

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Piezelektrické transformátory

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Stanislav Josef MAŠEK**
Osobní číslo: **E14B0069P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Piezelektrické transformátory**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte princip fungování piezelektrických transformátorů a v práci princip popište.
2. Sestavte jednoduchý funkční vzorek piezelektrického transformátoru a následně proměřte jeho parametry.
3. Proveďte přehled na trhu nabízených piezelektrických transformátorů. V práci uveďte dostupné parametry.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Václav Koucký, CSc.


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce pojednává o piezelektrických transformátorech, které využívají elektromechanický jev zvaný „přímý piezelektrický jev“ a jeho komplement nazývaný „nepřímý piezelektrický jev“ k přenosu energie.

Práce zahrnuje teorii elektromechanických jevů, popisuje princip, vlastnosti a využití piezelektrických transformátorů. Dále obsahuje přehled na trhu dostupných piezelektrických transformátorů. V poslední části práce je popsán prováděný experiment s cílem sestavit funkční vzorek piezelektrického transformátoru.

Klíčová slova

piezelektrický transformátor, elektromechanický jev, piezelektrický jev, dielektrikum, PZT keramika, polarizace, mód kmitání, rezonance

Abstract

This bachelor is about piezoelectric transformers that use an electromechanical effect called "direct piezoelectric effect" and its complement called "indirect piezoelectric effect" to transfer energy.

The bachelor thesis includes the theory of electromechanical phenomena. It describes the principle, properties and utilization of piezoelectric transformers. It also contains an overview of the market for piezoelectric transformers. In the last part of the work an experiment to assemble a functional sample of the piezoelectric transformer is described.

Key words

piezoelectric transformer, electromechanical effect, piezoelectric effect, dielectric, PZT ceramics, polarization, vibration mode, resonance

Prohlášení

Předkládám k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Piezoelektrické transformátory vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury, jenž je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1. 6. 2017

Stanislav Josef Mašek

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Kouckému, CSc. za profesionální vedení práce, věcné připomínky, cenné rady, čas a ochotu, jenž mi věnoval při řešení dané problematiky. Mé poděkování patří též mojí rodině a blízkým přátelům za jejich podporu během studia.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	10
Úvod	12
1. Historie, princip a využití elektromechanických jevů	13
1.1 Piezoelektrický jev – úvod	13
1.2 Historie	13
1.3 Dielektrika.....	15
1.3.1 Dielektrika.....	16
1.3.2 Polarizace dielektrika.....	16
1.3.3 Spontánní polarizace	17
1.3.4 Elektrety.....	18
1.3.5 Polární a nepolární látky	19
1.3.6 Krystalické látky	20
1.4 Elektromechanické jevy	22
1.4.1 Piezoelektrický jev	22
1.4.2 Využití piezoelektrického jevu.....	24
1.4.3 Pyroelektrický jev.....	25
1.4.4 Feroelektrický jev.....	26
1.5 Curieho teplota.....	26
1.6 Triboelektrický jev	27
2. Piezoelektrické transformátory	28
2.1 Obecně o piezoelektrických transformátorech	28
2.2 Historické pozadí piezoelektrických transformátorů.....	29
2.3 Rozdělení a druhy piezoelektrických transformátorů	31
2.3.1 Rosenův typ PT (longitudinal vibration mode)	33
2.3.2 Ring-dot typ PT (planar vibration mode)	34
2.3.3 PT založené na mechanismu ohybových a tloušťkově střížných kmitů	36
2.3.4 PT s tloušťkově rozpínávkými kmity (Thickness vibration mode)	37
2.3.5 PT s radiálními kmity (Radial vibration mode).....	38
2.3.6 Další konstrukce PT.....	39
2.4 Využití piezoelektrických transformátorů	40
2.4.1 Podsvícení LCD displejů	40
2.4.2 Elektronické předřadníky zářivkových světel.....	41

2.4.3	Zpětnovazební obvody MOSFET tranzistorů	41
2.4.4	MEMS technologie.....	41
2.4.5	Měření vysokého napětí v rozvodné síti.....	42
2.4.6	Pohon malých satelitů	42
2.4.7	Regulátor napětí EPC pro TWT v satelitech	43
2.4.8	Ostatní aplikace	43
2.5	Materiály pro výrobu piezoelektrického transformátoru	44
2.5.1	Polykrystalické piezoelektrické látky	44
2.5.2	PZT keramika.....	45
2.6	Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru.....	47
3.	Přehled na trhu dostupných piezoelektrických transformátorů	49
3.1	STEINER & MARTINS, INC	49
3.2	Face Electronics, International Corporation.....	52
3.3	Micromechatronics, Inc	54
3.4	CERATEC, Inc.....	58
3.5	FUJI & CO	59
3.6	ELPA Company.....	61
4.	Experimentální část	62
4.1	Vzorek piezoelektrického transformátoru.....	62
4.2	Ověření a měření přenosu signálu u vzorku.....	63
4.3	Výsledky měření	64
4.4	Zlepšení přenosových vlastností PT.....	65
4.5	Návrh aplikace s využitím vyrobeného PT	67
5.	Závěr.....	69
	Použitá literatura	71
	Seznam obrázků.....	74
Příloha A:	Fotografie vyrobených vzorků piezoelektrických transformátorů	
Příloha B:	Frekvenční charakteristiky vzorku č. 4 při zátěži 10 kΩ	

Seznam symbolů a zkratek

\$	.....	americký dolar
°C	.....	stupeň Celsiův – jednotka teploty
A	.....	ampér – jednotka elektrického proudu
AC	.....	střídavý elektrický proud (napětí)
<i>b</i>	.....	šířka (mm)
<i>C</i>	.....	elektrická kapacita (F)
CCFL	.....	cold cathode fluorescent lamp (fluorescenční lampa se studenou katodou)
cm ³	.....	centimetr krychlový – jednotka objemu
<i>cosφ</i>	.....	účinnost (-)
D	.....	elektrická indukce (Cm ⁻²)
<i>d</i>	.....	délka (mm)
DC	.....	stejnsměrný elektrický proud (napětí)
DPS	.....	deska plošných spojů
E	.....	intenzita elektrického pole (Vm ⁻¹)
EPC	.....	elektrický regulátor napětí
<i>f</i>	.....	frekvence (Hz)
FRAM	.....	ferroelectric random access memory (paměť s přímým přístupem využívající zbytkovou polarizaci feroelektrik)
<i>g</i>	.....	gram – jednotka hmotnosti
G	.....	generátor střídavých signálů
<i>h</i>	.....	tloušťka, výška (mm)
Hz	.....	hertz – jednotka frekvence
<i>I</i>	.....	elektrický proud (A)
IN	.....	vstup
INC	.....	incorporated – typ americké společnosti
IO	.....	integrovaný obvod
<i>k</i> ₃₁	.....	koeficient elektromechanické vazby
<i>k</i> ₃₃	.....	koeficient elektromechanické vazby
kg	.....	kilogram – jednotka hmotnosti
km/s	.....	kilometr za sekundu – jednotka rychlosti
<i>ks</i>	.....	kus (množství)
<i>L</i>	.....	elektrická indukce (H)
LCD	.....	liquid crystal display (česky: displej z tekutých krystalů)
LED	.....	light-emitting diode
mm	.....	milimetr – jednotka délky
MEMS	.....	micro electro mechanical systems
MOSFET	.....	metal oxide semiconductor field effect transistor – tranzistory řízené elektrickým polem
NASA	.....	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
Nylon	.....	označení pro skupinu syntetických polymerů
OUT	.....	výstup
<i>P</i>	.....	výkon (W)
Pa	.....	pascal – jednotka tlaku
PDA	.....	personal digital assistant – osobní digitální pomocník
PPT	.....	pulsed plasma thursters (česky: pulzní plazmová tryska)
PT	.....	piezoelektrický transformátor
PTFE	.....	polytetrafluorethylen
PVC	.....	polyvinylchlorid
PZT	.....	olovo zirkonát titanátu
<i>Q</i>	.....	činitel jakosti
<i>R</i>	.....	elektrický odpor (Ω)

RAM	random access memory – paměť s přímým přístupem
s_{33}^D	koeficient mechanické poddajnosti
s_{11}^E	koeficient mechanické poddajnosti
s_{33}^E	koeficient mechanické poddajnosti
SONAR	sound navigation and ranging (česky: zvuková navigace a zaměřování)
δ	šířka (mm)
T_c	Curieho teplota (°C)
Teflon	obchodní název pro polytetrafluorethylen
Transoner [®]	registrovaná obchodní značka piezoelektrického transformátoru od společnosti FACE Electronics
TWT	travelling-wave-tube (elektronka s postupující vlnou – Permaktron)
U	napětí (V)
UNIMORF	mosazný tenký kotouč s PZT keramikou
UV (záření)	ultrafialové (záření)
V	volt – jednotka elektrického napětí
v	výška (mm)
W	watt – jednotka výkonu
W/cm^3	watt na centimetr krychlový – hustota výkonu
η	účinnost (%)
μm	mikrometr – jednotka délky
φ	fázový posun (°)
Ω	ohm – jednotka elektrického odporu

Ag^+	kation stříbra
$BaTiO_3$	titaničitanu barnatého
Bi^{3+}	kation bismutu
$Bi^4Ti^3O_{12}$	titaničitan bismutitý
Fe^{3+}	kation železa
K^+	kation draslíku
La^{3+}	kation lanthanu
$Li_2B_4O_7$	tetraboritan lithný
Mn^{3+}	kation manganu
$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4 \cdot H_2O$	vínan sodnodraselný
Nd^{3+}	kation neodymu
$PbTiO_3$	titanát olova
$PbZrO_3$	zirkonát olova
Sb^{5+}	kation antimonu
SiO_2	oxid křemičitý

Úvod

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s piezoelektrickými transformátory, o kterých možná většina z vás, stejně jako já, dosud netušila, že existují. Tyto transformátory, využívají elektromechanický jev, kterému se říká piezoelektrický a od něho tedy pochází jejich název.

V elektrických a elektronických aplikacích, které jsou dnes nedílnou součástí našich životů se transformátory vyskytují ve velké míře. Zatím se jedná především o transformátory využívající elektromagnetický přenos energie. Nicméně si myslím, že s vývojem nových materiálů, technologie výroby, a hlavně s vývojem elektroniky o piezoelektrických transformátorech ještě hodně uslyšíme. Výhod, které mají je poměrně velké množství. Jmenujme například malou velikost, nízkou hmotnost a žádné vinutí.

V práci se nejdříve seznámíme s elektromechanickými jevy – s jejich historií, principy a látkami, kde se projevují. Dále se dozvíme o samotných piezoelektrických transformátorech. O principu jejich fungování, jaké druhy existují a v neposlední řadě o jejich výhodách při nasazení v nových aplikacích. Také se podíváme na vyráběné transformátory a jejich parametry, které porovnáme mezi sebou i s parametry, které jsem změřil v experimentální části.

Experimentální část se zabývá sestavením několika funkčních vzorků transformátorů pomocí dvou piezoelementů a zjišťováním jejich účinnosti a dalších parametrů pro určení schopnosti přenášet energii.

1. Historie, princip a využití elektromechanických jevů

1.1 Piezoelektrický jev – úvod

Pojem piezoelektrický jev nebo také piezoelektrický efekt je označení pro vlastnost, jisté skupiny dielektrických materiálů s krystalovou mřížkou, reagovat na mechanickou deformaci (například stlačením), vytvořením elektrického náboje na svém povrchu. V tomto případě se jedná o tzv. přímý piezoelektrický jev. Většinou se využívá pouze pojem piezoelektrický jev. Pokud se však bude jednat o obrácený mechanismus. Tedy přivedeme-li na krystal elektrické napětí a dojde k jeho mechanické deformaci, mluvíme o tzv. nepřímém piezoelektrickém jevu. Tento jev patří spolu s dalšími mezi tzv. elektromechanické jevy (viz kapitola 1.4). [1, 2]

1.2 Historie

Již ve starověké Indii bylo známo, že krystaly turmalínu (hlinitoborokřemičitanu železa), které byly vhozeny do horkého popela, zprvu částičky popela přitahovaly a poté odpuzovaly. Poznatky o tomto jevu se do Evropy dostaly až začátkem 18. století spolu s turmalínem, který přivezli holandští obchodníci. Zde studoval tento jev David Brewster. Kromě turmalínu využil i jiné krystaly jako Seignettovu sůl, křemen a jiné. Zjistil, že při změně teploty daného materiálu, dochází ke generaci elektrického náboje. Tomuto jevu dal název pyroelektrina. „Pyr“ znamená v řečtině oheň. [1, 4, 5, 7]

Dále Charles-Augustin de Coulomb předpokládal, že by mohl elektrický náboj vznikat také pomocí tlaku. O tento předpoklad se následně opíral René Just Haüy i Henri Becquerel. Ti hledali piezoelektrinu u různých krystalických materiálů. Například krystaly vápence, slída, topaz, sádrovec. Zjistili, že tyto materiály piezoelektrické nejsou. [1, 4, 5, 7]

Až v roce 1880 bratři Jacques a Pierre Curieové objevili piezoelektrický jev a provedli jeho první úspěšnou demonstraci. Vycházeli přitom ze spojení předchozích znalostí pyroelektriny a chápání základních krystalových struktur. První pokusy prováděli na krystalech turmalínu. Zjistili, že pokud se tyto krystaly stlačovaly v určitých směrech – osách, objevil se na jejich povrchu, resp. na konci os, elektrický náboj. Piezoelektrický děj následně podrobně popsali. Nepředpokládali však, že existuje také děj inverzní. Tedy nepřímý piezoelektrický jev, který matematicky odvodil Gabriel Lippmann až o rok později. Fyzicky

jeho existenci však opět potvrdili bratři Curieovi. Ti dále pokračovali ve zkoumání komplementárnosti těchto jevů a popsali zákony, kterými se tyto elektromechanické a mechanicko-elektrické jevy řídí. [1, 4, 5, 7]

- Elektrický náboj je přímo úměrný působícímu tlaku, náboj nezávisí na délce krystalu, ale jen na velikosti ploch. [6]
- Jev existuje díky anizotropii krystalu (existence polárních os), amorfnní látky tuto vlastnost nemají. [6]

Název pro piezoelektrický jev pochází z řeckých slov „piezó“, což v překladu znamená tlačit a „electron“ v překladu jantar. (Třením jantaru vzniká záporný náboj statické elektřiny).

Od roku 1892 se jev snažilo vysvětlit hned několik fyziků. Všichni nějakým způsobem dospěli k závěru, že vznik piezoelektrického náboje je způsoben mechanickou deformací mřížky. Ke konečnému vysvětlení došlo poté, co William Laurence Bragg zjistil mřížkovou strukturu u křemene pomocí rentgenového záření v roce 1914. [1, 5, 7]

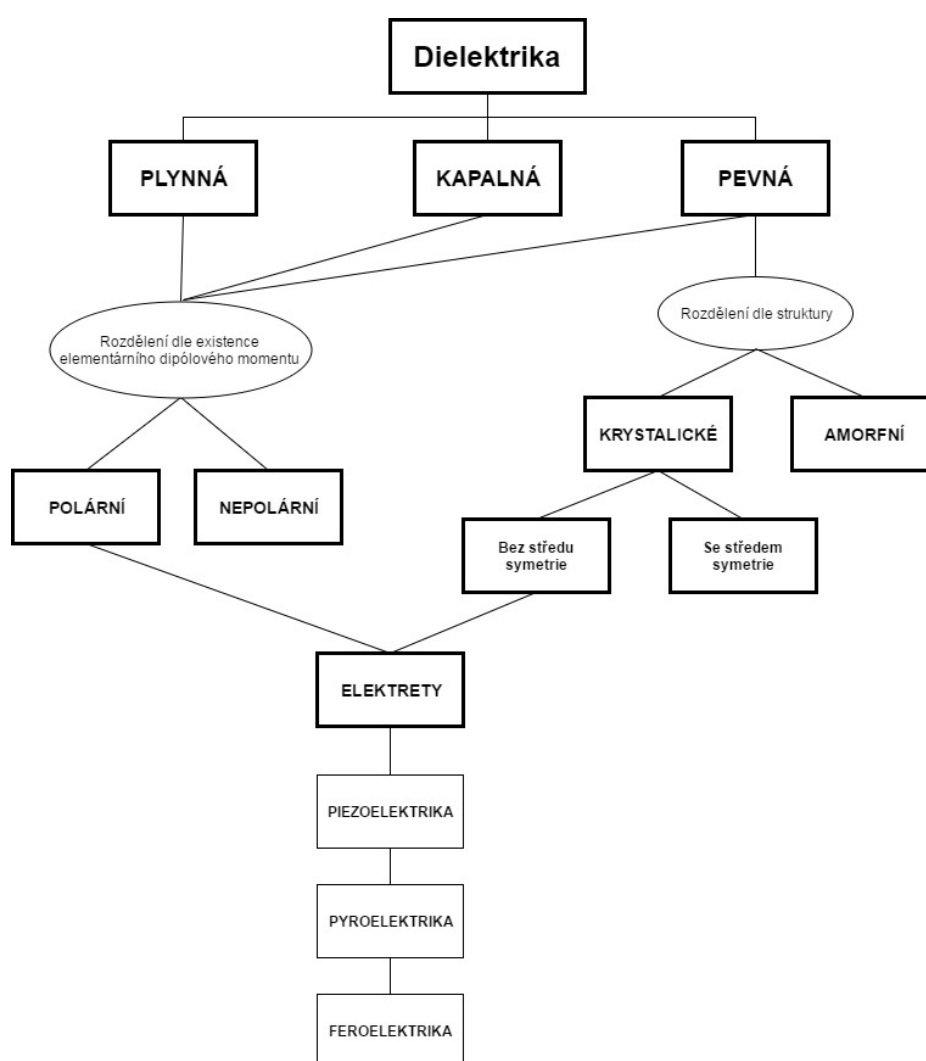
První zmínka o technickém využití piezoelektrického jevu pochází z doby, kdy Marie Curie-Sklodovská měřila intenzitu radioaktivního záření pomocí elektrometru, jenž využívá princip tohoto jevu. [1, 4]

Velký skok ve využívání piezoelektrického jevu a piezoelektřiny přinesla I. světová válka. Během ní byl v roce 1915 fyzikem Paulem Langevinem vyvinut první ultrazvukový SONAR. V meziválečném období se rozvoj a vývoj nových piezo-aplikací zpomalil kvůli nedostatku kvalitních materiálů s piezoelektrickými vlastnostmi. Avšak během II. světové války bylo potřeba hledat lepší dielektrické materiály do kondenzátorů, než byla slída. Výzkumné skupiny v různých státech světa se zabývaly tímto problémem a byla nalezena sloučenina BaTiO_3 (titaničitanu barnatého), který měl permitivitu několikanásobně vyšší, než slída a vykazoval též výborné piezoelektrické vlastnosti. Po II. sv. válce výzkum dále pokračoval a byl realizován asi nejúspěšnější a dodnes používaný systém – keramika PZT, což je směs zirkonátu olova (PbZrO_3) a titanátu olova (PbTiO_3) sloučená metodou práškové metalurgie. Výzkum piezoelektrického jevu a jevů podobných pokračuje dále stejně jako vývoj dalších materiálů tyto jevy vykazujících. Spolu s tím se rozvíjí také využití těchto principů v dalších oborech lidské činnosti. [1, 4, 5, 7]

1.3 Dielektrika

Aby bylo možné pozorovat elektromechanické jevy, mezi které patří i piezoelektrický jev, musí se jednat o dielektrické pevné materiály s krystalickou strukturou (tedy o krystaly) bez středu symetrie se spontánní polarizací. Dále se musí jednat o látky polární. [1, 13]

Výše zmíněné rozdělení dielektrik je přehledně vyobrazeno na obr. 1.



Obr. 1: Diagram rozdělení dielektrik [doplněno 13]

1.3.1 Dielektrika

Jak je vidět na obrázku 1, rozdělují se dielektrika podle skupenství na tři skupiny – pevná, kapalná a plynná, podle schopnosti vytvářet dipólový moment na polární a nepolární a podle vnitřní struktury na amorfni a krystalické. [13]

Dielektrické materiály mají elektrony a ionty pevně drženy na místě v krystalické struktuře – nepohybují se volně, jako je tomu u vodičů, a tudíž nemohou vést elektrický proud. Jde o tzv. vázané nosiče náboje, které lze vnějším elektrickým polem pouze různě natáčet případně mírně lokálně posouvat. Tento jev se nazývá polarizace dielektrika a uvnitř materiálu vzniká indukované elektrické pole. [1, 13]

Často bývá slovům dielektrikum a izolant dáván stejný význam. Nicméně tomu tak není. Mezi dielektrikem a izolantem je rozdíl. Izolant je materiál, který slouží pro oddělení míst s různým elektrickým potenciálem tím, že klade velký odpor procházejícímu proudu. Platí, že izolant je dielektrikem, ale dielektrikum nemusí být izolantem. [14]

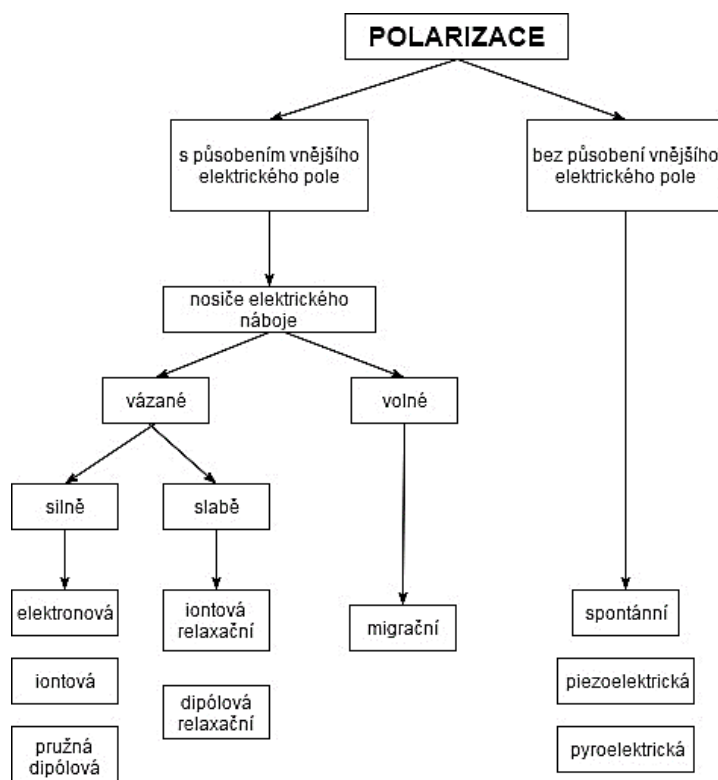
1.3.2 Polarizace dielektrika

Jak plyne z výše uvedeného, jedná se o děje, které probíhají v dielektriku, vložíme-li jej do elektrického pole. O průběhu polarizace rozhoduje struktura a stavba toho kterého dielektrika. Vzhledem k vnitřnímu uspořádání látky v ní probíhá polarizačních procesů více a celková polarizace je superpozicí jednotlivých. [13]

Polarizačních mechanismů existuje celá řada a lze je rozdělit dle schématu na obr. 2

Ze schématu je patrné, že hlavní rozdělení je v závislosti na tom, zda k polarizaci potřebujeme vnější elektrické pole nebo ne. Vzhledem k tomu, že piezoelektrický jev, ze kterého vychází hlavní téma této práce, souvisí se spontánní polarizací, která patří do kategorie polarizačních procesů, které nepotřebují elektrické pole, tak zde ostatní polarizační procesy nebudou zmíněny. Lze se o nich dovědět více v [13].

Polarizace dielektrika bez působení vnějšího elektrického pole může být způsobena mechanickým namáháním jako například u piezoelektrik, která pokud mechanicky stlačíme, dojde k jejich zpolarizování a na jejich povrchu se objeví vázaný náboj. Více o piezoelektrikách bude uvedeno níže.



Obr. 2: Druhy polarizačních mechanismů [13]

1.3.3 Spontánní polarizace

Speciálním druhem polarizace, která nevyužívá elektrické pole, je spontánní neboli samovolná polarizace. Tato se vyskytuje v materiálech, které nemají střed symetrie, poněvadž se v nich nemusejí těžiště záporného a kladného náboje shodovat. Těmto materiálům se říká **elektrety** a jsou analogií k permanentním magnetům. Důležitou roli u spontánní polarizace má frekvence, teplota a také intenzita elektrického pole. Spontánní polarizace se zvyšující se teplotou klesá a nad Curieho teplotou T_C je rovna nule. Nad Curieho teplotou T_C se látka stává paraelektrickou. [13, 14]

Vzhledem k tomu, že struktura elektretů je stejně jako u piezoelektrik nestředosymetrická, lze u nich také pozorovat piezoelektrický jev. U nich ovšem nemá vnější elektrické pole vliv na směr spontánní polarizace jako je tomu u ferroelektrik (viz dále). [13]

Spontánní polarizaci vykazují i pyroelektrika. Zde je tato polarizace způsobena jejich vnitřní strukturou a je kompenzována povrchovým nábojem, který závisí na teplotě. Velikost polarizace můžeme ovlivnit působením teploty. Tato pyroelektrika se řadí mezi lineární. [13]

Komplementem k nim jsou pyroelektrika nelineární, kterým říkáme ferroelektrika. Mají zvláštní vnitřní strukturu, která se rozpadá do jednotlivých domén a každá z těchto domén je samostatně polarizována. Ta má směry vektorů polarizace neuspořádané a jejich účinky se kompenzují. [13]

Vnější elektrickým polem, do kterého ferroelektrikum vložíme, můžeme měnit směr samovolné polarizace. Postupně dojde k přeorientování všech vektorů polarizace jednotlivých domén do směru vektoru tohoto elektrického pole a tím k zesílení elektrického pole v okolí ferroelektrika. [14, 16]

Podobnost pojmenování ferroelektrických látek a feromagnetických látek není náhodná. Oba druhy materiálů mají vnitřní strukturu rozdělenou na domény, které způsobují podobné vlastnosti, jako je například hysterézní chování ve vnějším elektrickém poli (hysterézní smyčka pro závislost mezi indukci \mathbf{D} a intenzitou \mathbf{E} elektrického pole). Látka si „pamatuje“ předchozí uspořádání doménových stavů. Podobně se hystereze projevuje při deformaci feromagnetické látky v magnetickém poli. [12]

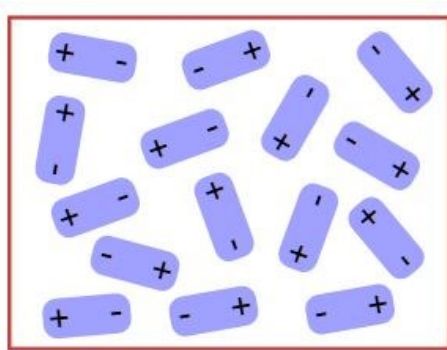
1.3.4 Elektrety

O elektretech mluvil již v roce 1896 Oliver Heaviside, který předpokládal, že existují-li v přírodě permanentní magnety, měla by existovat také elektrostatická analogie. A skutečně. V přírodě existují trvale polarizované látky, kterým říkáme pyroelektrety. U nich se ovšem trvalá polarizace za normálních okolností „zakryje“ nábojem, který kompenzuje povrchové náboje polarizovaného dielektrika. Náboj se na pyroelektretu objeví, jak lze odvodit z názvu, až po jeho zahřátí. [14, 15]

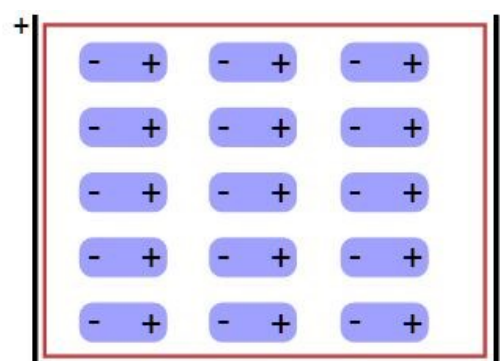
Elektrety lze připravit také uměle. První připravil Mototaro Eguich, který smíchal roztavenou pryskyřici, kalafunu a včelí vosk a nechal směs ztvrdnout v silném elektrickém poli. Vznikla trvale polarizovaná destička, na jejímž povrchu bylo možné pozorovat povrchové náboje. Takto polarizované dielektrikum se nazývá termoelektret. Elektrety lze připravit také jinými způsoby. Například dlouhodobým působením silného elektrického pole (elektroelektrety), současným působením světla a elektrického pole (fotoelektrety) nebo působením ionizujícího záření (pseudoelektrety). [14, 15]

1.3.5 Polární a nepolární látky

Z obrázku 1 je vidět, že elektrety, resp. materiály, ve kterých se projevují elektromechanické jevy, se vyskytují u látek polárních. Jako polární se označují ta dielektrika, jejichž molekuly jsou rozloženy tak, že jako celek vykazují vlastnosti elektrického pólu a tím pádem mají vlastní elektrický dipólový moment. Není-li látka v elektrickém poli, jsou dipólové momenty náhodně orientovány do libovolných směrů (obr. 3a). Vložíme-li látku do vnějšího elektrostatického pole, budou se její molekuly natáčet tak, aby se směr vektorů jejich dipólového momentu shodoval s vektorem vnějšího elektrického pole (obr. 3b). Reálně však směry vektorů nebudou nikdy shodné a vektory dipólových momentů molekul budou více či méně vychýleny od směru intenzity vnějšího elektrostatického pole. [17]

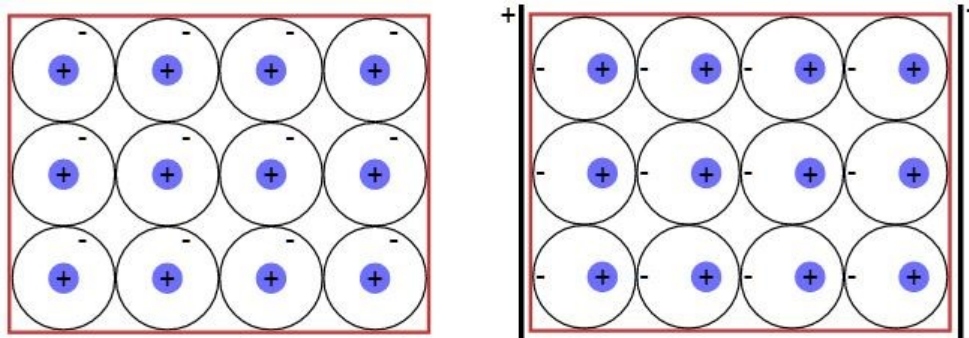


Obr. 3a: Chaoticky rozmístěné dipóly



Obr. 3b: Ideálně rozmístěné dipóly [18]

Dielektrické materiály, jejichž atomy nebo molekuly nemají vlastní dipólový moment, se nazývají nepolární. Vložíme-li je do vnějšího elektrostatického pole, bude jejich polarizace probíhat jiným způsobem. Díky silám vnějšího elektrostatického pole dojde k prostorovému rozmístění kladného a záporného náboje. Konkrétně dojde k posunu těžiště kladného náboje ve směru vektoru elektrické intenzity a k posunu těžiště záporného náboje proti směru vektoru intenzity elektrického pole. Směr vzniklých dipólových momentů je pak shodný se směrem intenzity vnějšího elektrického pole. Princip polarizace nepolárního dielektrika je na obrázku 4. Zda je molekula polární nebo nepolární záleží na typu vazby mezi jednotlivými atomy a jejich prostorovým uspořádáním. [17]



Obr. 4: Polarizace nepolární látky [18]

1.3.6 Krystalické látky

Krystal je pevná látka složená z elementárních buněk, což je nejmenší pravidelně opakující se část mřížky, která je složená z iontů (kladně nabitých – kationtů a záporně nabitých – aniontů). Periodické opakování této buňky ve třech rozměrech tvoří krystalovou mřížku. Symetrické vlastnosti základní buňky rozhodují o tom, zda může mít krystal piezoelektrické vlastnosti. [10]

Symetrie povrchových ploch krystalů je určena tzv. bodovou grupou (to je matematický popis pro symetrii bodů kolem os). V některých zdrojích je uváděn termín krystalová třída, což není zcela přesné. [8]

Těchto bodových grup je u krystalických látek 32. Z nich je 21 bez středu symetrie, ze kterých 20 vykazuje piezoelektrický jev, neboť mají vnitřní anizotropii (vlastnosti krystalů

jsou obecně v různých směrech různé). Deset grup z těchto dvaceti vykazuje spontánní polarizaci i bez mechanického namáhání. Mají totiž konstantní dipólový moment spojený s jejich elementární buňkou a pravidelně uspořádaný tak, že nepůsobí-li na krystal (na buňku) žádná síla, jsou tzv. „elektrická těžiště“ těchto iontů umístěna ve stejném bodě. Na povrchu krystalu nevzniká elektrický náboj. Krystal je elektricky neutrální. Tyto látky generují elektrický náboj v reakci na změnu teploty, kdy se mění elektrická polarizace úměrně ke změně teploty. Tato skupina krystalů vykazuje elektromechanický jev, kterému říkáme pyroelektrický. Podmnožinou materiálů pyroelektrických je skupina krystalů, která vykazuje jev feroelektrický. Jak již bylo zmíněno výše, tyto materiály mají spontánní elektrickou polarizaci, které lze ovlivnit vnějším elektrickým polem. [6, 8]

Je tedy patrné, že všechny látky ze skupiny feroelektrických jsou současně pyroelektrické i piezoelektrické.

Výše zmíněné je přehledně zobrazeno v tabulce 1, kde jsou k jednotlivým jevům uvedeny i materiály, které jej vykazují.

Tab. 1: Hierarchie elektromechanických jevů

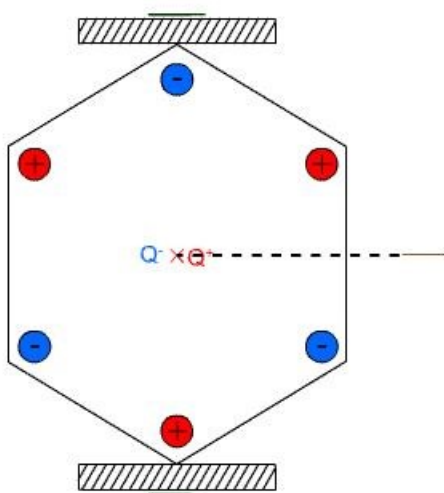
32 krystalických grup					
21 grup bez středu symetrie				se středem symetrie	
20 grup piezoelektrických			non - piezoelektrických		
10 grup pyroelektrických		non - pyroelektrických			
feroelektrika	non - feroelektrika				
BaTiO ₃ PbTiO ₃ PZT	Turmalín Li ₂ B ₄ O ₇	SiO ₂			

1.4 Elektromechanické jevy

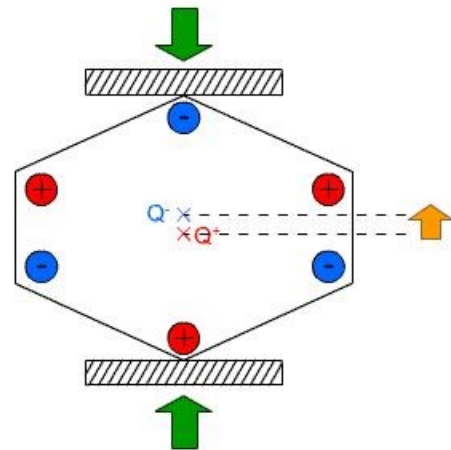
1.4.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev je schopnost dielektrik reagovat na mechanické namáhání vytvořením elektrického náboje na svém povrchu. Jev se projevuje v materiálech zvaných piezoelektrika. [2]

Jak bylo řečeno v kapitole 1.3.6, krystal je složen z iontů a nepůsobí-li na krystal žádná síla, jsou elektrická těžiště těchto iontů umístěna ve stejném bodě (viz obr. 5a). Na povrchu krystalu nevzniká elektrický náboj. Krystal je elektricky neutrální. [1]



Obr. 5a: Silou nezdeformovaná buňka [3]



Obr. 5b: Působení síly na buňku [3]

Pokud začne na krystal působit síla ať už ve směru zelených šipek jako na obr. 5b, tj. krystal bude stlačován, nebo obráceně bude-li krystal natahován, začne se krystalová mřížka deformovat. Kationty a anionty se posunou a vzdálí se od sebe jejich elektrická těžiště a vznikne nenulový dipólový moment. Jeho velikost je přímo úměrná působícímu tlaku. Díky tomu se na určitých stranách krystalu objeví elektrický náboj. Vzniká elektrické napětí, které se pohybuje v řádově 10^{-7} V/Pa. Tomuto jevu se říká **přímý piezoelektrický jev**. [1, 20]

Rozdíl mezi tím, zda bude na krystal tlačeno nebo bude natahován, je v tom, že vzniklý elektrický náboj, resp. napětí bude mít opačný charakter. Viz obr. 6. [22]

S deformací krystalické mřížky působením vnější síly souvisí i změna měrného elektrického odporu. Tento je označován jako **piezorezistivní jev**. [21]

K přímému piezoelektrickému jevu existuje také děj opačný, kterému se říká **nepřímý piezoelektrický jev** (často chybně nazýván elektrostrikce). [23]

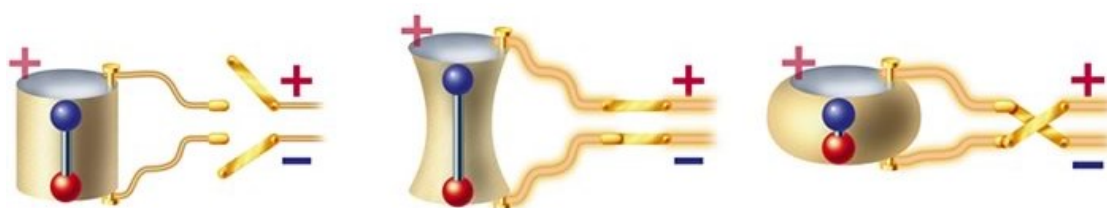
Inverzní jev spočívá ve vzniku mechanické deformace při přiložení elektrického napětí na krystal. Vnější elektrické pole vyvolá posunutí iontů uvnitř krystalu, a to vede k jeho tvarové deformaci. Pokud bude na krystal přiloženo střídavé napětí, tj. krystal bude umístěn v časově proměnném poli o kmitočtu, který odpovídá vlastním elastickým kmitům krystalu, vznikne mechanická rezonance. [23] Princip nepřímého piezoelektrického jevu je na obr. 7.

Velikost deformace materiálu se zvětšuje kvadraticky v závislosti na velikosti intenzity elektrického pole. [23]

Nepřímý piezoelektrický jev bývá zaměňován s jevem podobným, kterému se říká **elektrostrikce**. Tento jev však vzniká v jakémkoli dielektriku při jeho polarizaci, kdežto piezoelektrický jev se vyskytuje pouze u piezoelektrik, která jsou podmnožinou dielektrik. [23] Analogií v magnetických materiálech je jev **magnetostrikční**, který způsobuje změnu rozměrů vzorku při zmagnetování. [24]



Obr. 6: Přímý piezoelektrický jev [22]



Obr. 7: Nepřímý piezoelektrický jev [22]

1.4.2 Využití piezoelektrického jevu

Kromě využití piezoelektrického jevu v transformátorech, o kterých bude řeč níže, se piezoelektrický jev a jevy podružné (viz dále) využívají v mnoha aplikacích ve spoustě oborech lidské činnosti. Od jednoduchých výrobků spotřební elektroniky jako například mikrofony, reproduktory, dětské hračky aj. přes telekomunikace, energetiku, lékařství až po náročné zařízení pro vesmírné účely. Rozšíření elektromechanických jevů je takové, že se dá říci, že každý z nás některou aplikaci, kde jsou využity, používá a často o tom ani neví. [25,26]

Protože aplikací využívající tento jev, je opravdu nepřehledné množství bude zde zmíněno v bodech několik vybraných. Podrobně se využitím piezoelektrického jevu zabývá například bakalářská práce (viz 28).

- **Generátory** – využívají přímý piezoelektrický jev (mechanickým namáháním okolními vlivy generují elektrickou energii) [28]

- zapalovače, generátory instalované v podlaze, v podrážkách bot, ve větrných elektrárnách apod. Zajímavým nápadem je využití dýchacích pohybů pro napájení kardiostimulátoru [28]

- **Senzory** – využívají přímý piezoelektrický jev

- snímače vibrací, indikátory síly, tlaku, deformace, chvění, snímače zvuku v hudebních nástrojích, nárazová čidla – airbagy, gramofonové přenosky, mikrofony aj. [28]

- **Akční členy** – maloobjemové dávkovače, miniaturní pumpy, vysokofrekvenční sirény, ventily, vstřikovače v dieslových motorech, vstřikovací trysky v inkoustových tiskárnách [28]

Pod akční členy patří **Motory**. Ty využívají principu, kdy je složením několika piezoelektrických deformací vytvořena stojatá nebo postupná elastická vlna. Motory najdou uplatnění v přesných polohovacích zařízeních, v objektivách fotoaparátů a kamer pro automatické ostření, v biomedicíně, v nanorobotice i v pevných discích počítačů. [28]

Kromě výše zmíněného, se piezoelektrický jev využívá v detektorech plynu, v mikroskopii, v ultrazvukových přístrojích, v alarmech, ... [28]

S tím, jak postupuje výzkum a vývoj piezoelektrických látek, který je zaměřen především na nalezení materiálů s lepší citlivostí, větší účinností přenosu mechanické i elektrické energie a v neposlední řadě s lepší teplotní stabilitou rezonanční frekvence, otevírají se nové možnosti využití piezoelektrického jevu. [23, 26, 27]

1.4.3 Pyroelektrický jev

Stejně jako k piezoelektrickým látkám patří piezoelektrický jev, existuje analogicky k pyroelektrickým látkám pyroelektrický jev.

Jak bylo zmíněno výše, pyroelektrické materiály jsou látky, které mají spontánní polarizaci. Ta však nelze ovlivňovat vnějším elektrickým polem, jako tomu je u feroelektrik.

Pyroelektrický jev nastává v případě změny teploty materiálu. Vlivem jeho ohřívání nebo ochlazování dochází k objemové roztažnosti – mění se pozice atomů uvnitř krystalu a dochází ke změně rozložení elektrického náboje a těžiště kladných a záporných nábojů mění vzájemnou vzdálenost. Dochází ke ztrátě kompenzace povrchovým nábojem a projevuje se spontánní polarizace. Na krystalu vzniká dočasné napětí (pouze po dobu změny teploty). Po ustálení teploty na konstantní teplotě, se opět bude náboj ve struktuře kompenzovat. [12]

K pyroelektrickému jevu existuje také jev opačný, který se nazývá **elektrokolorický**. Ten se projevuje změnou teploty látky vložené do elektrického pole. [6]

Pyroelektrický jev se používá k přeměně změn teploty na elektrický signál v různých tepelných detektorech nebo infračervených čidlech. Elektrokolorický jev nebyl dosud u látek zjištěn v dostatečné míře, aby mohl být využit pro možnou aplikaci při elektrickém chlazení. [12]

1.4.4 Feroelektrický jev

Feroelektrický jev vykazují látky polární, v jejichž krystalové struktuře existuje nenulový dipólový moment. Mají permanentní obousměrnou elektrickou polarizaci se stejnou orientací, která je však ovlivnitelná vhodným vnějším elektrickým polem. Vložíme-li takový materiál do střídavého elektrického pole, pamatuje si svoji „historii“, což se projevuje tzv. hysterezní smyčkou. Látka se po vypnutí elektrického pole již nevrací do stavu s nulovou deformací a nulovým dipólovým momentem. Tento jev lze pozorovat v okolí určité teploty, které se říká Curieho teplota. Po jejím překročení se feroelektrikum chová jako dielektrikum. [1, 9, 12]

Tento jev objevil Čechoameričan Joseph Valasek (1897-1993) na piezoelektrickém krystalu Seignetteovy soli v roce 1921. Valasek poprvé pozoroval při chování krystalu v elektrickém poli hysterezní smyčku. [9]

Feroelektrické látky se kromě pyroelektrický a piezoelektrických vlastností využívají také pro miniaturizaci součástek (kondenzátorů) v elektrických obvodech díky jejich vysoké permitivitě, která dosahuje řádově až 10000, ve feroelektrických RAM pamětech (FRAM), v infračervených kamerách a dalších. [1]

Materiály, jež vykazují feroelektrický jev, jsou Seignettova sůl neboli vínan sodnodraselný ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), titaničitan barnatý BaTiO_3 nebo olovotitanát (PbTiO_3). [12]

Feroelektrika jsou elektrickou analogií k feromagnetům, které vykazují permanentní magnetický moment. [11]

1.5 Curieho teplota

Během předchozího povídání byl zmíněn termín Curieho (Curieova) teplota. Je to teplotní bod, který popsal Pierre Curie a při jehož překročení ztrácí látky své piezoelektrické, resp. feromagnetické vlastnosti. To je způsobeno tím, že se při této teplotě změní uspořádání vnitřní struktury krystalu a z nestředosymetrické struktury, která je požadována se stane struktura se středem symetrie. Dojde ke ztrátě spontánní polarizace a s tím i piezoelektrických vlastností. [29]

Je to důležitá konstanta, která rozhoduje o použitelnosti piezoelektrika v té, které aplikaci a je snaha tento bod s objevováním nových materiálů posouvat co nejvýše. [29]

1.6 Triboelektrický jev

Asi nejznámější způsob, jakým lze pozorovat statickou elektřinu je třením dvou určitých materiálů o sebe (např. třením vlasů o hřeben, nebo jej vytváří letící letadlo třením o vzduch). Třením vzniká elektrostatický náboj, za který může triboelektrický jev. Tento jev byl znám již ve starém Řecku, kdy bylo pozorováno, že jantar po tření plátnem přitahoval malé částičky. [31]

Vzhledem k tomu, že statická elektřina může mít neblahý vliv na elektroniku – může vznikat velké napětí, které ji i zničí, pamatuje na tento problém norma ČSN IEC/TR 61340-1, která popisuje triboelektrický jev jako druh elektrického nabíjení, při němž je náboj akumulován kontaktem a oddělením povrchů dvou materiálů. [29]

Při kontaktu dvou materiálů, jenž nejsou nabity a mají stejný potenciál, se přenesou náboj z jednoho materiálu na druhý. Některé materiály se lehce nabijí na kladný potenciál, neboť se z nich lépe uvolňují elektrony a jiné se nabijí snadno na záporný potenciál, protože elektrony snáze přijímají. Experimentálně byly materiály seřazeny dle schopnosti nabíjet se statickou elektřinou do tzv. "triboelektrické řady". Největší statický náboj vznikne, vzájemným třením dvou materiálů s opačných konců řady. [29, 32]

Po oddělení materiálů, má každý opačný náboj a vznikne mezi nimi elektrické pole. S rostoucí vzdáleností mezi materiály se zvětšuje i rozdíl mezi potenciály – napětí. Toto napětí může dosahovat i několika kilovoltů. [29, 31]

Neúplná **triboelektrická řada**: látky jsou seřazeny od schopnosti vytvářet největší kladný náboj (polyuretanová pěna), přes nulový náboj (vlna, ocel) až po největší záporný náboj (Teflon). [32]

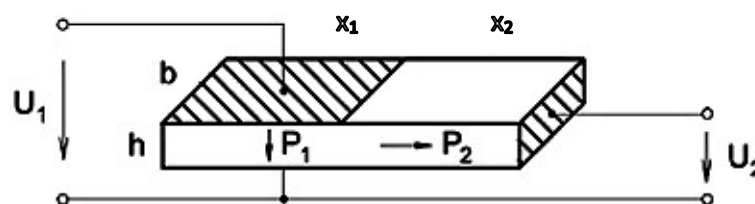
polyuretanová pěna – vlasy – nylon – sklo – králičí kožešina – olovo – papír – vlna – ocel – jantar – stříbro – polyester – polyetylen – PVC – Teflon [32]

2. Piezoelektrické transformátory

2.1 Obecně o piezoelektrických transformátorech

Piezoelektrické transformátory, stejně jako konvenční elektromagnetické transformátory přeměňují střídavé elektrické napětí. Na rozdíl od elektromagnetického transformátoru využívajícího k přenosu elektrické energie mezi primární a sekundární částí vzájemnou elektromagnetickou indukci, využívá piezoelektrický transformátor elektromechanických jevů. Konkrétně přímého piezoelektrického jevu a nepřímého piezoelektrického jevu, o kterých pojednává kapitola 1.4.1. [25, 34]

Princip piezoelektrického transformátoru lze vysvětlit pomocí piezoelektrického transformátoru Rosenova typu na obrázku 8. Destička obdélníkového tvaru, reprezentující náš PT, o tloušťce h a šířce b je rozdělena v polovině délky na část o délce x_1 , představující primární obvod a část o délce x_2 představující sekundární obvod. Primární část piezoelektrického transformátoru polarizována ve směru tloušťky P_1 je buzena harmonickým napětím U_1 o vhodné frekvenci blízké rezonanční frekvenci prvku. Tím dojde k vybuzení kmitů s délkou vlny rovné celkové délce destičky. Na primární části je délka vlny poloviční a pomocí **nepřímého piezoelektrického jevu** dojde k vyvolání mechanických oscilací. Tyto oscilace působí mechanickým namáháním na sekundární část polarizovanou v podélném směru P_2 a pomocí **přímého piezoelektrického jevu** zde dochází ke generování elektrického napětí U_2 . [19]



Obr. 8: Princip funkce piezoelektrického transformátoru typu Rosen [19]

Hlavním parametrem pro hodnocení piezoelektrického transformátoru je transformační poměr. Ten je dán podílem výstupního a vstupního napětí (viz rovnice 1). Bude-li transformační poměr nabývat hodnot větších než 1, jedná se o PT zesilující, tzv. step-up a naopak, bude-li poměr menší než jedna, je to PT zeslabující, tzv. step-down. O velikosti

transformačního poměru rozhoduje hned několik proměnných, jak lze vidět v rovnici. Těmi jsou koeficienty elektromechanické vazby obou částí k_{31} a k_{33} , činitel mechanické jakosti Q , délka sekundární části L_2 , výška prvku h a koeficienty mechanické poddajnosti s_{11}^E , s_{33}^E a s_{33}^D . [25, 19]

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{4}{\pi^2} k_{31} k_{33} Q \frac{L_2}{h} \frac{2 \sqrt{\frac{s_{33}^E}{s_{11}^E}}}{1 + \sqrt{\frac{s_{33}^D}{s_{11}^E}}} \quad (1)$$

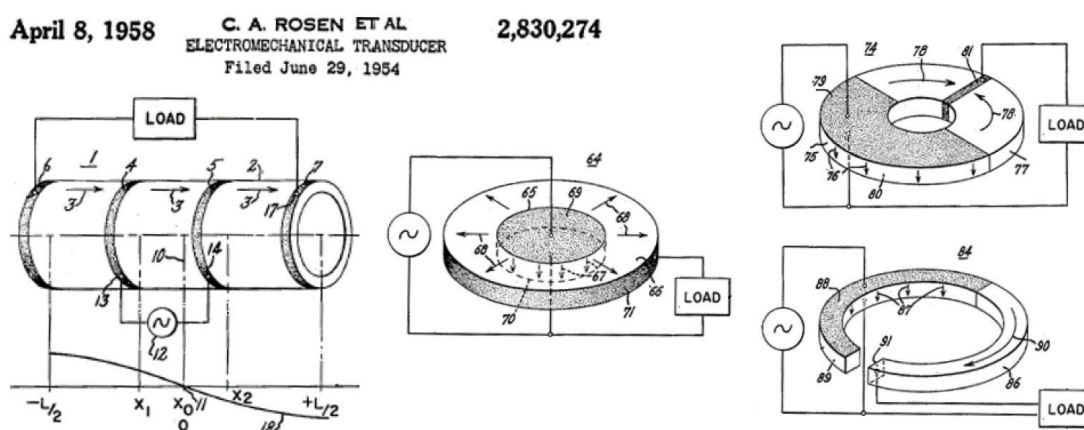
Další parametry jako tvar piezoelektrického transformátoru, směr polarizace a rozložení elektrod určují mód mechanických vibrací (anglicky vibration mode). Podle tohoto módu můžeme piezoelektrické transformátory také rozdělovat. [25]

2.2 Historické pozadí piezoelektrických transformátorů

Prvním, kdo zkoumal myšlenku využít piezoelektrické jevy pro přeměnu elektrické energie, byl Alexander McLean Nicolson ve 30. letech 20. století. Využil při tom dvou krystalů Seignettovy soli, které umístil proti sobě. Jeden z krystalů byl napájen elektrickým signálem a vznikaly v něm vibrace za pomoci nepřímého piezoelektrického jevu. Ty se přenášely na druhý krystal, kde byly jevem opačným transformovány opět na elektrickou energii. Vzhledem ke špatným vlastnostem použitého krystalu (omezený výkon, špatná elektromechanická vazba, těžká obrobitelnost přírodního krystalu, aj.), neměl tento vynález velký ohlas. [40]

Dalším, kdo se začal myšlenkou přeměny elektrické energie pomocí piezoelektrických jevů zabývat, byl začátkem padesátých let Charles Abraham Rosen. Využil za války objeveného titaničitanu barnatého (BaTiO_3) a poznatků Nicolsona a v roce 1954 zveřejnil se svým týmem návrh PT, který nechal následně patentovat. Na rozdíl od Nicolsonova PT složeného ze dvou krystalů, byl Rosenův transformátor z jednoho obdélníkového bloku polykrystalického BaTiO_3 . Tento celistvý blok byl rozdělen na dvě části pouze orientací polarizace. Polovina bloku byla polarizována v podélném směru a druhá polovina ve směru tloušťky. Mezi těmito částmi vznikla oblast – hranice okem neviditelná. Tato oblast byla kritická, neboť na ní mohlo docházet k mechanickým poruchám vlivem elastických napětí.

Na PT Rosenova typu byl v úvodu 2. kapitoly vysvětlen princip činnosti piezoelektrického transformátoru. Rosen, kromě obdélníkového PT navrhl i jiné konstrukce, včetně typu válcově-segmentového, radiálně polarizovaného disku a prstencového s dvojitou polarizací (viz obr. 9). Ve výzkumu piezoelektrických transformátorů dále pokračovalo hned několik výzkumníků. Ti se snažili zvýšit účinnost, výkon transformátoru a také vyřešit problém s rozhraním. [40]



Obr. 9: Další topologie Rosenova piezo-transformátoru [40]

O další patent v této oblasti požádali pánové H. Jaffe a D. A. Berlincourt na konci 50. let. Jejich PT sestával z disku polarizovaném pouze ve směru tloušťky a využíval nového kompozitního materiálu, jakým byla PZT keramika. Tím se zjednodušila výroba, a především byl odstraněn problém s rozhraním mezi rozdílně polarizovanými částmi Rosenova PT. Tato topologie vzbudila velké ohlasy. Nicméně PT stále nedokázaly pracovat s vysokými amplitudami a nízkými ztrátami. Tato nevýhoda se změnila s příchodem tvrdých kompozitních materiálů. Kompozitní materiály zvládaly vysoká napětí, a jejich kombinací s PT se začalo zabývat několik amerických a japonských firem. Společnosti se snažily využít PT pro generování vysokého napětí potřebného pro katodové trubice v černobílých televizorech, pro zapalování plynu v plynovém sporáku, v automobilech aj. Žádná z těchto aplikací nedosáhla komerčního úspěchu kvůli křehkosti PT a ceně piezokeramiky. [40]

Začátkem let 90. se japonské společnosti, zabývající se výrobou LCD displejů, pokusily využít piezoelektrické transformátory ke generování vysokého napětí potřebného pro napájení zářivek CCFL (zářivky se studenou katodou). Tyto zářivky se využívají k podsvícení LCD panelů v monitorech, televizorech a jiných zařízeních. Díky malé velikosti piezo-

transformátoru mohly být panely tenčí, lehčí, než když byly využívány transformátory elektromagnetické a oblast použití LCD panelů s PT se mohla stále rozšiřovat (např. mobilní telefony). Díky velkosériové výrobě se cena PT snížila a transformátory zažily obchodní boom. Jejich další vývoj rapidně rostl a byly hledány další možnosti jejich využití. V tomto období si nechala americká společnost Face Electronics patentovat nový koncept výkonných PT založený na vrstvené konstrukci, pod názvem. Transoner. [40]



Obr. 10: Aplikace PT na ovládací jednotce LCD displeje Apple PowerBook [40]

V novém tisíciletí začaly být LCD displeje s podsvícením CCFL nahrazovány podsvícením technologií LED, došlo k poklesu poptávky po vysokonapěťových (step-up) piezoelektrických transformátorech a společnosti se začaly více zajímat o využití PT v oblastech jako AC-DC adaptéry baterií, AC-DC LED ovladače nebo třeba v předřadnicích pro zářivky. V těchto aplikacích je však požadováno malé napětí v řádech několika voltů a větší výkony než u napájení CCFL. Proto se pro ně nehodí PT Rosenova typu, ale transformátory „step-down“ s vyšším výkonem, jako jsou PT typu Transoner. V současnosti se proto další vývoj v oblasti piezoelektrických transformátorů ubírá právě směrem nízkonapěťových transformátorů, především pak Transonerů. [40]

2.3 Rozdělení a druhy piezoelektrických transformátorů

Existuje několik způsobů, podle kterých lze piezo-transformátory členit. Je tedy poměrně složité si v rozdělení PT udělat přehled, neboť různá literatura využívá různého dělení. Piezoelektrické transformátory se mohou rozdělovat podle toho, zda napětí zvyšují, nebo snižují, podle tvaru konstrukce, podle módu vibrací, nebo třeba podle počtu vrstev.

Začneme hlavním rozdělením transformátorů, a to podle velikosti výstupního napětí. O tom již byla řeč výše, nicméně pro přehlednost bude zmíněno ještě jednou. Toto dělení závisí na velikosti transformačního poměru, který se vypočte dle rovnice 1 v kapitole 2.1.

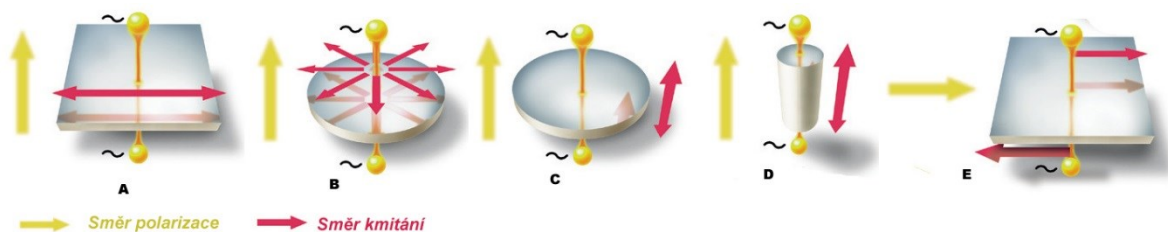
Bude-li poměr větší než jedna, patří takový transformátor mezi vysokonapěťové transformátory, tzv. step-up a naopak, pokud bude poměr menší než jedna, jedná se o PT nízkonapěťové, tzv. step-down. [25, 19]

Step-up piezoelektrické transformátory jsou Rosenova typu a mezi step-down transformátory patří ve většině případů všechny homogenně polarizované. Ovšem neplatí to vždy a je proto potřeba posuzovat toto podle transformačního poměru. [34]

Podle počtu vrstev se dají PT rozdělit na jednovrstvé (single-layer) a mnohovrstvé, které se dají rozdělit ještě na tzv. multistack a multilayer. Jednovrstvé PT jsou, jak název napovídá, tvořeny jedním celkem. Tím je jednodušší jeho výroba, nicméně má horší vlastnosti, které vylepšují mnohovrstvé transformátory. Mnohovrstvé transformátory mají lepší transformační poměr a lze je lépe impedančně přizpůsobit okolním obvodům. Rozdíl mezi multistack a multilayer je dán počtem a tloušťkou jednotlivých vrstev. PT typu multistack je tvořen jednotkami vrstev o tloušťce větší než 0,5 μm . Multilayer PT je tvořen desítkami až stovkami vrstev o tloušťce řádově desítek μm . [25]

Piezo-transformátory lze rozdělit do skupin podle směru polarizace a módu mechanických vibrací (vibration mode). Směry polarizace se u PT využívají dva, a to polarizace ve směru délky (longitudinal polarization) a polarizace ve směru tloušťky (thickness polarization). Módy mechanických kmitů, které najdeme u PT jsou vidět na obrázku 11. [25, 19]

- A. Podélné kmitání (longitudinal oscillation mode)
- B. Rovinné (plošné) kmitání (planar oscillation mode)
- C. Tloušťkové kmitání (thickness oscillation mode)
- D. Podélné cylindrické kmitání (longitudinal cylinder oscillation)
- E. Střížné kmitání (shear oscillation)

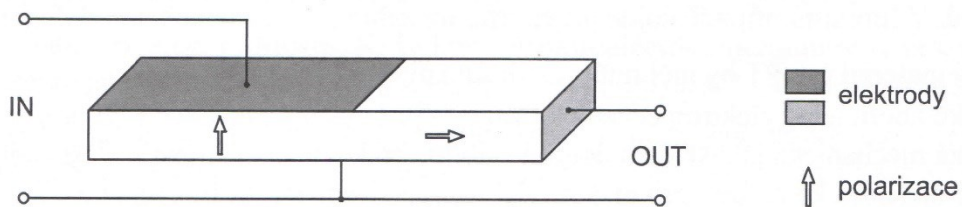


Obr. 11: Druhy mechanických kmitů piezoelektrických transformátorů [22]

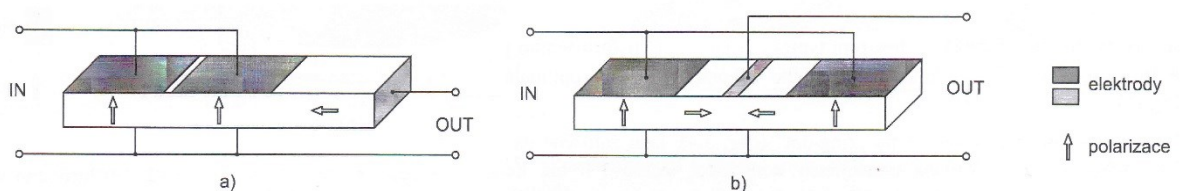
2.3.1 Rosenův typ PT (longitudinal vibration mode)

Tento typ transformátoru se nejčastěji objevuje ve tvaru obdélníkové tyčinky. Nicméně, jak již bylo řečeno v historii PT výše, jeho vynálezce C. A. Rosen navrhl i další tvary (viz obr. 9). Tento PT má dvě polarizace. Vstupní část je polarizována ve směru tloušťky a výstupní část ve směru délky. Mechanické kmity, které v destičce vzniknou vlivem nepřímého piezoelektrického jevu, mají charakter podélného kmitání. Rosenovy PT zesilují (zvyšují) napětí. Na jejich výstupu může být i několik kV. Patří proto do skupiny step-up transformátorů. Jsou-li vyrobeny z tvrdé PZT keramiky dosahuje jejich transformační poměr $10^1 \div 10^2$. [25]

Kvůli rozhraní, které vzniká mezi dvěma rozdílně polarizovanými částmi, může docházet k mechanickým poruchám vlivem elastických napětí. Tomu se nechá předejít např. provozováním PT při vyšších řádech podélných kmitů. Toho dosáhneme příhodným rozmístěním elektrod a vhodnou konfigurací směrů polarizace. Takto uzpůsobené PT jsou na obrázku 13. Tento upravený transformátor dosahuje transformačního poměru 15, účinnosti větší než 95 % a hustota jeho výstupního výkonu dosahuje 12 W/cm^3 při zátěži $80 \div 160 \text{ k}\Omega$. [25]

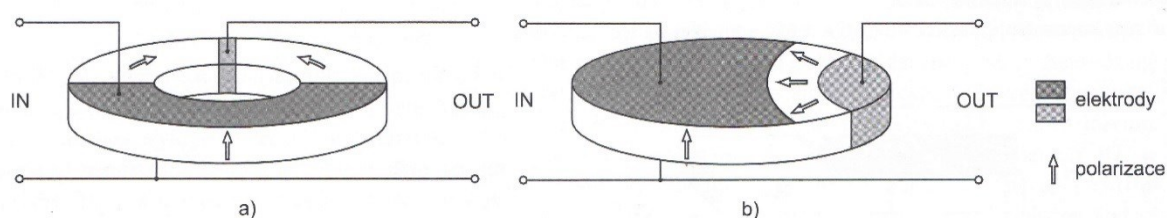


Obr. 12: Piezoelektrický transformátor Rosenova typu [25]



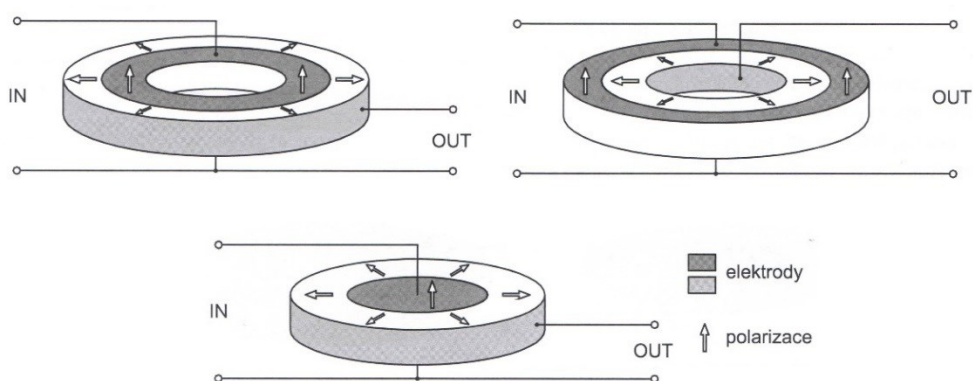
Obr. 13: PT Rosenova typu, pracující na třetím řádu podélných kmitů [25]

Další tvary PT transformátorů (prstencový a s elektrodami ve tvaru půlměsíce) na obrázku 14 mají transformační poměr 50, jejich účinnost je více než 90 % a hustota výstupního výkonu 14 W/cm^3 . V případě mnohvrstvé struktury PT Rosenova typu se výrazně zvýší výstupní hustota výkonu až na 30 W/cm^3 při zátěži $50 \text{ k}\Omega$. [25]



Obr. 14: a) Prstencový PT b) PT s půlměsíčovými elektrodami [25]

Piezoelektrické transformátory Rosenova typu na obrázku 15. dosahují velmi vysoké účinnosti – až 99 % při zátěži do $2 \text{ k}\Omega$ a transformačního poměru 10^2 není-li PT zatížen. Při zatížení klesne poměr na 1-10. [25]



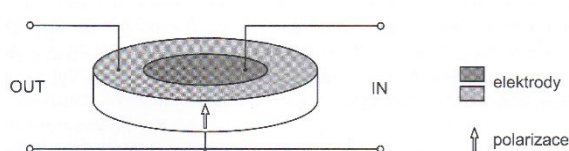
Obr. 15: Prstencové PT (nahore) a diskový PT (dole) [25]

2.3.2 Ring-dot typ PT (planar vibration mode)

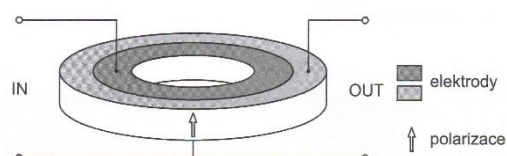
Piezoelektrické transformátory typu Ring-dot mají v celé své konstrukci pouze jeden typ polarizace, většinou jsou polarizovány ve směru tloušťky. V anglicky psaných člancích bývá používán termín „unipoled“ (jako „jednopolární“). Díky jednotné polarizaci jsou tyto transformátory jednodušší na výrobu, než tomu bylo u Rosenova typu, a navíc nevzniká

kritické rozhraní, kde by mohlo dojít k poruše. Mechanismus přenosu energie je u nich založen na planárních (rovinných) mechanických kmitech (planar vibration mode). Opět existuje několik konstrukčních variant. Na obr. 16 je kruhový PT typu ring-dot. Tato varianta dosahuje více než 95% účinnosti a při optimální zátěži $1 \div 10 \text{ k}\Omega$ hustoty výstupního výkonu $18,5 \text{ W/cm}^3$. [25]

Další konstrukční variantou PT typu ring-dot je prstencová konstrukce (viz obr. 17). Účinnost tohoto PT přesahuje 92 %, transformační poměr bývá 1,9 a hustota výstupního výkonu 14 W/cm^3 . [25]

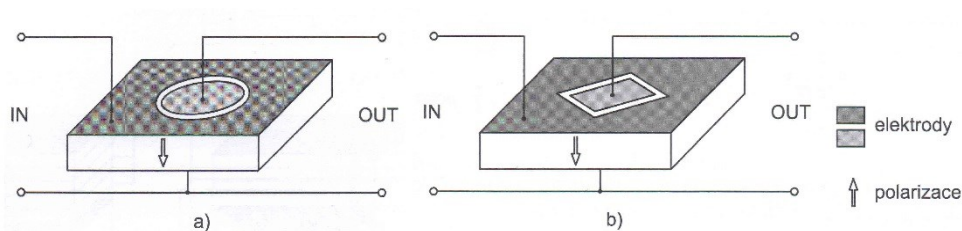


Obr. 16: Kruhový PT typu ring-dot [25]



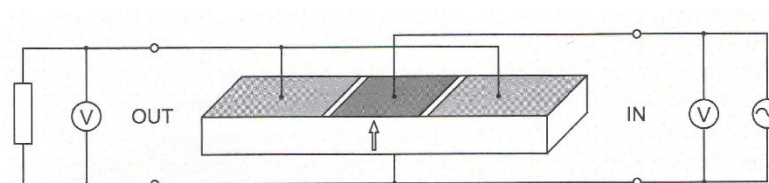
Obr. 17: Prstencový PT typu ring-dot [25]

Existuje také pravoúhlá konstrukce PT typu ring-dot, nejčastěji je to čtvercová destička s centrální elektrodou buď kruhovou, nebo pravoúhlou (viz obr. 18). Tato konstrukce PT vykazuje účinnost vyšší než 97 %, transformační poměr o hodnotě 5 a při zátěži $0,8 \text{ k}\Omega$ hustotu výstupního výkonu 17 W/cm^3 . [25]



Obr. 18: Pravoúhlé varianty PT typu ring-dot s centrální elektrodou kruhovou (vlevo) a pravoúhlou (vpravo) [25]

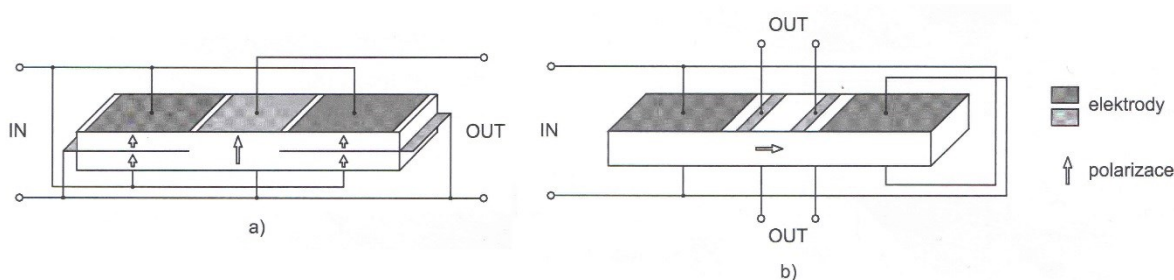
Mezi PT typu ring-dot lze zařadit také obdélníkovou tyčinku (viz obr. 19), která je na principu ring-dot založena. Tento PT ale využívá kmity délkově rozpínavé a není-li zatížen má poměrně malé hodnoty transformačního poměru. [25]



Obr. 19: PT typu ring-dot ve tvaru tyčinky [25]

2.3.3 PT založené na mechanismu ohybových a tloušťkově střížných kmitů

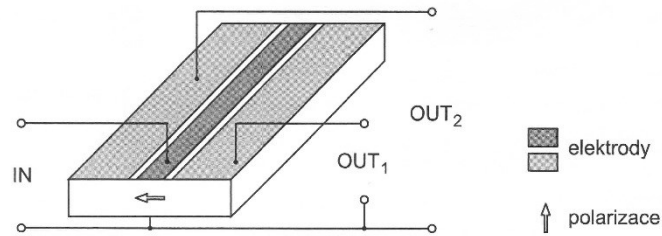
Zkracováním jedné vrstvy a současným roztahováním druhé (jakási obdoba bimetalového pásku) vzniknou v piezoelektrickém transformátoru na obrázku 20 a) ohybové kmity. Obě vrstvy PT jsou rozděleny na tři stejně velké části, které tvoří elektrody. Na každou z částí připadá jedna vlnová délka podélných mechanických kmitů. PT využívající tohoto mechanismu dosahuje účinnosti vyšší než 85 %, transformačního poměru 5 a při optimální zátěži 1,2 k Ω hustoty výstupního výkonu o velikosti 0,1 W/cm³. Jiný mechanismus pro skládání ohybových kmitů využívá PT na obrázku 20 b). U tohoto jsou ohybové kmity složeny ze dvou tloušťkově střížných kmitů opačné polarizace. Takový PT má transformační poměr 25, účinnost vyšší než 80 % a hustotu výstupního výkonu 0,2 W/cm³ při zátěži 25-30 k Ω . [25]



Obr. 20: Ohybové PT a) dvouvrstvý, b) jedno-vrstvý [25]

Samotných tloušťkově střížných kmitů (thickness-shear vibration mode) využívá PT na obrázku 21. Je to jednovrstvá homogenně ve směru šířky polarizovaná destička. Takový transformátor se vyznačuje tím, že u něho lze navrhnout více výstupních částí, a tudíž můžeme dostat z jednoho vstupního napětí více různých výstupních napětí. Patří do skupiny

step-down piezotransformátorů, neboť jeho transformační poměr je menší než jedna. Jeho účinnost je vyšší než 98 % a hustota výstupního výkonu 10 W/cm^3 . Těchto parametrů dosahuje při optimální zátěži 240-350 ohmů. [25, 41]

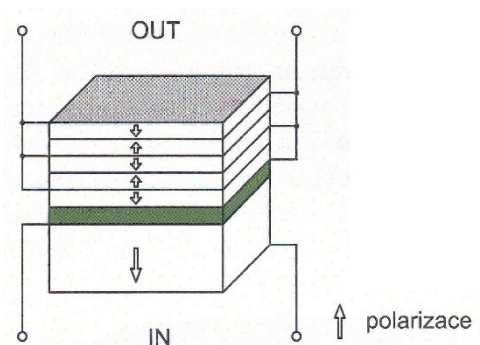


Obr. 21: PT založen na principu tloušťkově střižných kmitech [25]

2.3.4 PT s tloušťkově rozpínávkami kmity (Thickness vibration mode)

U piezoelektrických transformátorů pracujících s tímto druhem mechanického kmitání se nejčastěji uplatňuje mnohvrstvá technologie. Jedním z důvodů je, že lze zapojením různého počtu vrstev měnit provozní parametry celého PT. [25] Dalším důvodem je, že taková konstrukce PT umožňuje dosáhnout vyšší hustoty výstupního výkonu, vyšších provozních frekvencí, vysoké výstupní kapacity a značného proudu při nízkých napětích. [41] Jednou z typických konstrukcí PT, kde se uplatňují tloušťkově rozpínávkami kmity, lze vidět na obrázku 22. Skládá se z jednovrstvé vstupní části oddělené izolací od vícevrstvé výstupní. Tato konstrukce dosahuje účinnosti přes 80 %, transformační poměr je 0,5 a hustota výstupního výkonu dosahuje 16 W/cm^3 . [25, 41]

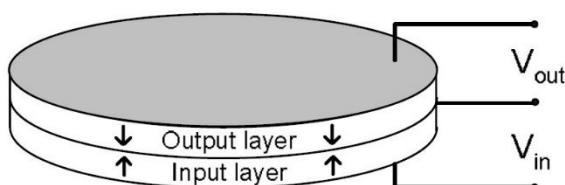
Konstrukce tohoto typu transformátoru nemusí být nutně čtvercová, nebo obdélníková a vstupní část nemusí být pouze jednovrstvá. Společnost Noliac vytvořila v roce 2000 PT, využívající tloušťkově rozpínávkami kmity, ve tvaru prstence, který může mít jednovrstvé nebo vícevrstvé obě části. Tento PT dosahuje hustoty výstupního výkonu až 50 W/cm^3 a účinnosti přesahující 98 % při frekvenci 330 kHz. [41]



Obr. 22: PT – tloušťkově rozpínávkami mód [25]

2.3.5 PT s radiálními kmity (Radial vibration mode)

V roce 1996 přišla firma Face Electronics s konstrukcí, kterou nazvala Transoner a nechala si ji ihned patentovat. Je to PT složený z několika tenkých kruhových piezokeramických kotoučů vrstvených na sebe a polarizovaných ve směru tloušťky. Minimálně musejí být tyto kotouče dva a odděleny mezi sebou izolační vrstvou, aby vznikla primární a sekundární část. To je obdobné konstrukci na obrázku 22 v předchozí kapitole. Počet vrstev (počet kotoučů) v primární a sekundární části lze libovolně měnit tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů piezotransformátoru. Polarizace jednotlivých vrstev je střídavě inverzní. Elektrody jsou u této konstrukci umístěny na podstavách vzniklého válce, jak lze vidět na obrázku 23. Díky tomuto rozložení elektrod a tloušťkové polarizaci jednotlivých vrstev vznikají kmity radiálního módu (radial vibration mode). [41]



Obr. 23: PT konstrukce Transoner [41]

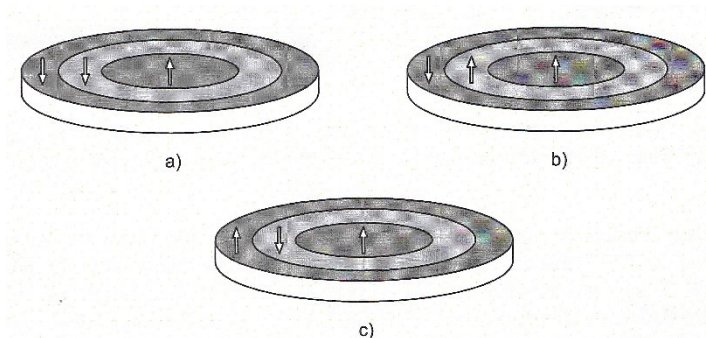
Teoreticky by mohla být konstrukce i jiného tvaru než kruhového. Je však lepší využívat vrstev diskových, protože vzdálenost od středu disku k jeho okraji je ve všech směrech stejně velká. Pokud by byly vzdálenosti rozdílné, což by například u čtvercové konstrukce byly, docházelo by k dodatečným vibracím. To by mělo za následek snížení maximálního výstupního výkonu vlivem zhoršení parametrů elektromechanické vazby. [41]

PT typu Transoner se vyznačují vysokým dodávaným výkonem. Již bylo prokázáno, že zvládají výkony vyšší než 100 W a s dalším vývojem se předpokládá, že brzy překročí hodnotu 200 W. Jejich rezonanční kmitočet se pohybuje v rozmezí 50-250 kHz a hustota výstupního výkonu převyšuje 40 W/cm³. [41]

2.3.6 Další konstrukce PT

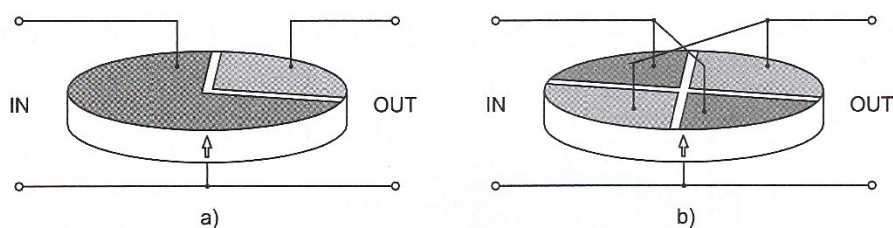
Zdroj [25] uvádí další konstrukce piezoelektrických transformátorů. Tyto jsou založeny na doménovém inženýrství. PT založené na tomto principu nejsou příliš vhodné z důvodu obtížné výroby a horších parametrů, proto o nich není mnoho napsáno. Podle polarizace a rozmístění elektrod se skupina těchto PT může rozdělit do tří podskupin. [25]

Do první podskupiny lze zařadit PT kruhového tvaru. Tyto PT jsou složeny ze tří soustředných částí (viz obr. 24) a jednotlivé části jsou různě polarizovány (Dle sledu polarizace UDD – Up-Down-Down, UUD – Up-Up-Down a UDU – Up-Down-Up). Transformační poměr se pohybuje v řádu jednotek při zatížení 0,15-2 kΩ a účinnost dosahuje 80 %. [25]



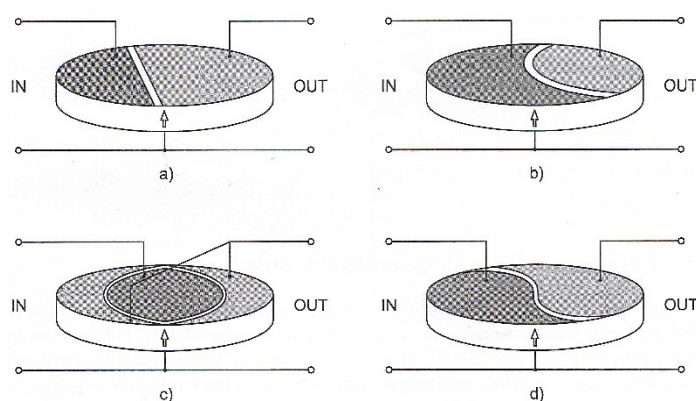
Obr. 24: PT založené na doménovém inženýrství, a) UDD, b) UUD, c) UDU [45]

Do druhé skupiny PT založených na doménovém inženýrství patří transformátory z obrázku 25, které sestávají z homogenně polarizované kruhové destičky a klínových elektrod o různém úhlu. Elektrody rozdělují PT buď na dvě části (tzv. dvousegmentové) nebo na čtyři (tzv. čtyřsegmentové). [25]



Obr. 25: PT založené na doménovém inženýrství, a) dvousegmentové, b) čtyřsegmentové [25]

Třetí skupinu PT založených na doménovém inženýrství tvoří piezotransformátory na obrázku 26. Tyto PT jsou také tvořeny jedním homogenně polarizovaným diskem, ale jeho elektrody nejsou symetrické. Možnou výhodou PT z této skupiny oproti PT z předchozí je existence více rezonančních frekvencí ve spektru, a tedy možnost provozovat PT ve více pracovních režimech. [25]



Obr. 26: PT založené na doménovém inženýrství s nesympetrickým tvarem elektrod,
a) „Moonie“, b) „Smile“ dvou-segmentový, c) „Smile“ tří-segmentový, d) „Jing-Jang“ [25]

2.4 Využití piezoelektrických transformátorů

Některé z aplikací, kde se piezoelektrické transformátory využívají nebo byly využívány, byly zmíněny již v kapitole 2.2. Nicméně oblast využití těchto zařízení je více rozsáhlá a vzhledem k tomu, že se o PT zajímají i armády a NASA, které do vývoje hodně investují, bude se jejich uplatnění pravděpodobně nadále rozrůstat.

2.4.1 Podsvícení LCD displejů

Největší uplatnění PT je i přes ústup LCD zobrazovacích panelů s CCFL podsvícením právě v této oblasti. O využití PT v této aplikaci bylo již psáno v kapitole 2.2 nicméně pro přehlednost a ucelenost bude zmíněna ještě jednou. [40]

PT se v LCD-CCFL panelech využívají v budících obvodech pro zářivky se studenou katodou (Cold Cathode Fluorescent Lamp), které tento panel podsvětlují. CCFL jsou dlouhé a tenké skleněné nebo plastové trubice naplněné řídkým inertním plynem s příměsí rtuti a jejich povrch je pokryt luminoforem. Na obou koncích trubice jsou umístěny elektrody,

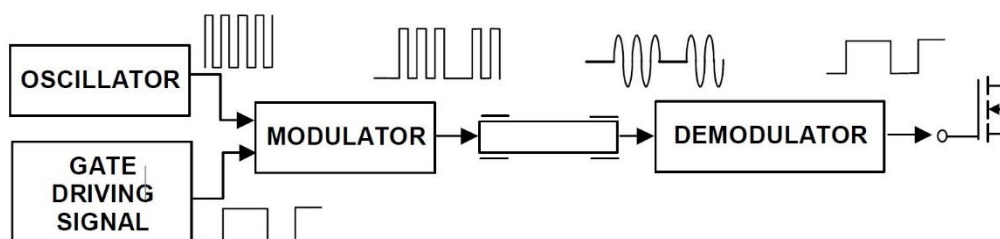
na které je přivedeno vysoké napětí z PT. Toto napětí zde neslouží ke žhavení a zapálení oblouku, ale k ionizaci inertních plynů v trubici. Ionizovaný plyn umožňuje tok elektrického proudu mezi elektrodami a dochází ke generování ultrafialového záření. Část UV záření se při dopadu na luminofor přemění na viditelné světlo a podsvítí LCD displej. [40, 42]

2.4.2 Elektronické předřadníky zářivkových světel

Elektronické předřadníky (nebo také vysokofrekvenční předřadníky) rozsvěcují a následně napájí zářivková světla – lineární zářivky či kompaktní zářivky. Elektronický předřadník nahrazuje konvenční předřadník složený z tlumivky, startéru a kompenzačního kondenzátoru. Elektronický předřadník je vlastně usměrňovač, střídač se stejnosměrným meziobvodem a vysokofrekvenční transformátor. A právě tento transformátor se společnosti vyrábějící elektronické předřadníky snaží nahradit piezoelektrickým transformátorem. [42]

2.4.3 Zpětnovazební obvody MOSFET tranzistorů

Piezoelektrické transformátory se v některých aplikacích využívají také pro izolaci řídicích obvodů a elektrody Gate (G) u MOSFET tranzistorů. [40]



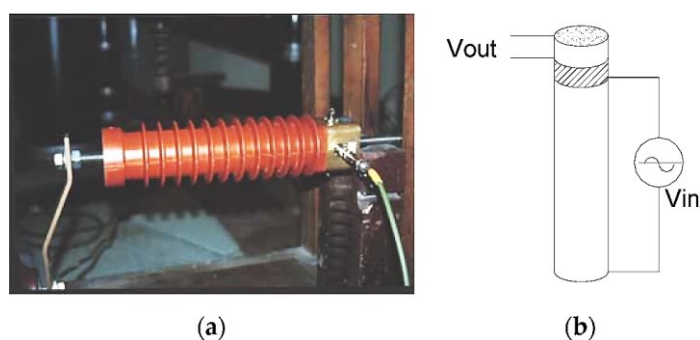
Obr. 27: Řídicí obvod pro ovládání MOSFET tranzistoru s PT [40]

2.4.4 MEMS technologie

Pro MEMS technologie (MicroElectroMechanical Systems) jsou vyvíjeny PT menší než 5 mm v průměru a 1 mm tloušťky. Tyto „mikrotransformátory“ mají zisk více než 50 a umožňují přenášet výkon 0,5 W. Je snaha tyto rozměry dále zmenšovat a zároveň zlepšit přenosové parametry. [42]

2.4.5 Měření vysokého napětí v rozvodné síti

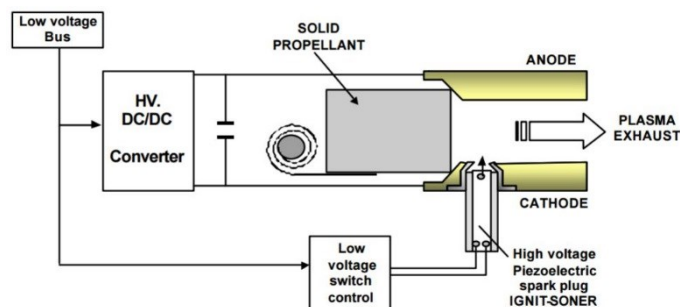
S využitím piezoelektrického transformátoru pro monitoring vysokého napětí v elektrické rozvodné soustavě přišel španělský student A. V. Carazo v rámci své disertační práce. V této aplikaci se PT neprovozuje na rezonanční frekvenci. Vysoké napětí je přivedeno na jednu část PT, která je mechanicky spojena, ale elektricky oddělena od druhé. K druhé – nízkonapěťové části je pak připojena snímací jednotka, která vyhodnotí velikost vysokého napětí přivedeného na vstupní. Na obrázku 28. a) je vidět skutečné zapojení PT v rozvodně a na obr. 28. b) je schéma daného celku. [40]



Obr. 28: a) prototyp PT pro monitorování vysokého napětí, b) schéma [40]

2.4.6 Pohon malých satelitů

V posledním desetiletí se o PT začala zajímat NASA, která je uplatňuje ve svých malých satelitech tzv. „microsats“ o hmotnosti nižší než 20 kg a „nanosats“ o hmotnosti do 1 kg. Konkrétně v pohonných jednotkách, které se starají o udržení a konstelaci satelitu ve správné poloze na oběžné dráze. Tento pohon se nazývá pulzní plazmová tryska (Pulsed Plasma Thrusters, PPT) a využívá plazmy vypuštěné z trysky. Princip PPT je vyobrazen na obrázku 29. [43]



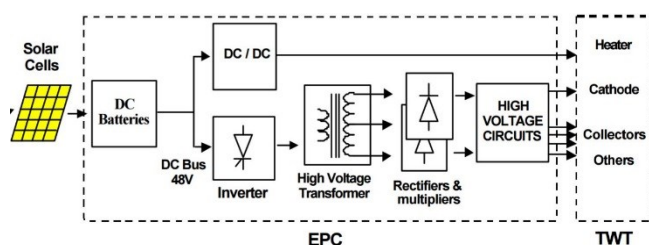
Obr. 29: Vysokonapěťový PT umístěn v pohonné jednotce [43]

Pomocí vysokonapěťového PT je zapálen oblouk mezi anodou a katodou. Tento oblouk odtavuje pevné palivo (PTFE nebo Teflon) umístěné v těsné blízkosti zapáleného oblouku a následně ionizuje a urychluje atomy, které vytrysknou rychlostí 10 až 20 km/s v podobě plazmy z trysky a dojde k potřebnému pohybu satelitu. Napětí dodávané PT dosahuje až 3 kV. [43]

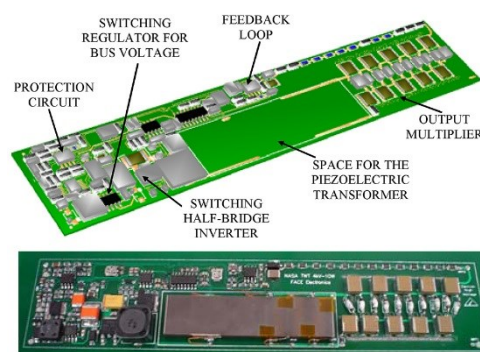
2.4.7 Regulátor napětí EPC pro TWT v satelitech

Piezoelektrický transformátor má uplatnění také v elektronickém regulátoru napětí (EPC). Ten slouží pro řízení napájení vysokofrekvenčního zesilovače v satelitech. Tento zesilovač je tvořen zesilovací elektronikou s postupnou vlnou (zkratka TWT od anglického Travelling-Wave-Tube) a slouží k zesílení velmi slabého signálu odesílaného na Zemi. [43]

PT nahrazují v obvodech EPC (viz obr. 30) původní vysokonapěťové transformátory využívající elektromagnetickou vazbu. Tím se snižuje hmotnost celého zařízení a je ušetřeno v satelitech tolik potřebné místo. Další výhodou použití PT je menší rušení okolních obvodů. [43]



Obr. 30: Schéma napájení TWT [43]



Obr. 31: EPC s piezotransformátorem [43]

2.4.8 Ostatní aplikace

Piezoelektrické transformátory jsou uplatňovány dále například v generátorech ozónu, v nabíječkách, v AC-DC a DC-DC měničích, v obvodech pro řízení baterií v elektromobilech, v laserech, v lékařských rentgenových zařízeních a dalších aplikacích. [40, 43]

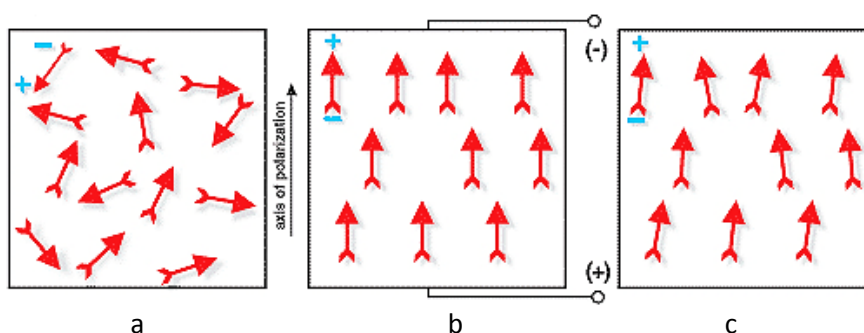
2.5 Materiály pro výrobu piezoelektrického transformátoru

Dá se říci, že piezoelektrické transformátory mohou být vyrobeny z kteréhokoliv piezoelektrického materiálu. Z počátku se využívaly krystalické látky (turmalíny, křemen, vlny nebo germanium vizmut). V současnosti se pro běžné aplikace využívají uměle připravené materiály – polykrystalické piezoelektrické látky (tzv. piezokeramika). Zvláště jmenujme nejpoužívanější PZT keramiku. Tyto látky jsou využívány především z cenových důvodů, snadnějším přizpůsobením pro danou aplikaci a také pro lepší piezoelektrické a elektromechanické vlastnosti. [25]

Vzhledem k tomu, že se tato bakalářská práce ve své praktické části zabývá návrhem piezoelektrického transformátoru, kde je využita piezokeramika, bude psáno pouze o tomto materiálu.

2.5.1 Polykrystalické piezoelektrické látky

Polykrystalické piezoelektrické látky (zkráceně piezokeramika) jsou uměle vyrobené materiály s velice dobrými piezoelektrickými vlastnostmi. Vyrábějí se seskupením velkého množství zrn s náhodně orientovanými doménami (obr. 32a). Kvůli náhodné orientaci nevykazuje vzniklý keramický materiál piezoelektrický jev. Materiál proto musí projít procesem polarizace. Při tomto procesu je materiál, při teplotě lehce pod Curieho bodem, vystaven silnému stejnosměrnému elektrickému poli, při kterém domény srovnají svoji orientaci. (obr. 32b). Tato orientace materiálu z velké části již zůstane i bez působení vnějšího elektrického. Této zůstatkové orientaci se říká remanentní polarizace (obr. 32c). Dojde pouze k nepatrnému natočení jednotlivých domén, ale keramický materiál si již zachová své piezoelektrické vlastnosti. [45, 46]



Obr. 32: Proces polarizace piezokeramika [49]

Piezokeramika je dnes díky svým výhodám nejpoužívanějším piezoelektrickým materiálem. Mezi tyto výhody se řadí vysoké piezoelektrické konstanty jako nábojová konstanta, dielektrická konstanta a elektromechanický coupling faktor (indikátor efektivity, se kterou piezoelektrický materiál převádí elektrickou energii na mechanickou energii a naopak). Dále možnost vyrobit keramiku v různých tvarech a s různou orientací polarizace. Velkou výhodou pro použití piezokeramiky v komerční sféře je cena. [44, 46]

Jako záporné vlastnosti piezokeramiky lze zmínit její omezenou pracovní oblast kvůli nižší Curieho teplotě a omezení velikosti elektrického a mechanického napětí působícího na piezokeramiku. Při překročení těchto omezení může dojít ke ztrátě nebo změně piezoelektrických vlastností keramiky. Dalším mínusem piezokeramiky je problém s teplotní stabilitou, kvůli kterému je náročné využívat ji v aplikacích s velkými změnami teplot. [44, 46]

Při využití piezokeramiky je také důležité zohlednit její stárnutí. Při tomto stárnutí piezokeramiky způsobeném teplotním pohybem molekul, které se s časem odchylojí od osy polarizace, dochází ke zhoršování piezoelektrických vlastností. Stárnutí má logaritmický charakter a nejlepších vlastností dosahuje keramika ihned po zpolarizování. Výrobci proto obvykle uvádějí hodnotu zhoršování vlastností piezokeramiky v procentech na dekádu. Pro vysvětlení: „materiál, který stárne s 1 % na dekádu, ztratí 1 % z hodnoty piezoelektrických vlastností za 1 den, další 1 % pak za deset dní, další za sto dní atd.“ [44, 46]

Mezi polykrystalické piezoelektrické materiály patří například titaničitan barnatý (BaTiO_3), titaničitan olovnatý (PbTiO_3), titaničitan bismutitý ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$), zirkoničitan olovnatý (PbZrO_3) a nejpoužívanější sloučenina PZT, které bude věnována následující podkapitola. [44, 46]

2.5.2 PZT keramika

Jedná se v současnosti o komerčně nejpoužívanější piezoelektrický materiál. Je vyráběn z tuhých roztoků titaničitanu olovnatého (PbTiO_3) a zirkoničitanu olovnatého (PbZrO_3) metodou práškové metalurgie. PZT keramika je feroelektrickým materiálem a má tedy jak piezoelektrické, tak pyroelektrické vlastnosti. Pro modifikaci vlastností PZT keramiky se přidávají dopující příměsi. Množství těchto dopantů bývá do 3 %. [25, 44, 45]

Pokud jsou do směsi PbTiO_3 a PbZrO_3 přidány atomy, jako např. Fe^{3+} , Mn^{3+} , Ag^+ , K^+ apod., které mají v obalu atomu o jeden elektron méně, než směr (tzv. akceptory), vznikne **tvrdá (hard) keramika**. Tato keramika má menší piezoelektrické vlastnosti, je odolná vůči vyššímu elektrickému i mechanickému namáhání, je více odolná proti depolarizaci a má nižší ztrátový činitel. Tento typ PZT keramiky je vhodný pro výkonové aplikace jako jsou např. měniče pro generaci ultrazvuku pro svařování a čištění. [44, 45]

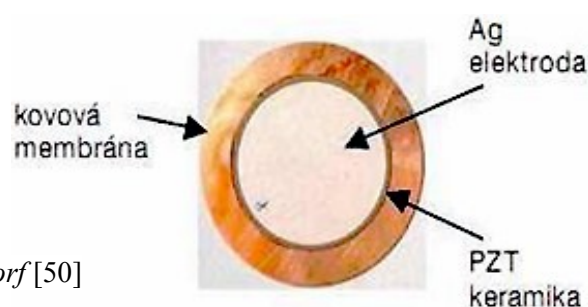
Přidáním donorů, tedy atomů, které mají v obalu atomu o jeden elektron více, než směr vznikne **měkká (soft) keramika**. Používané donory jsou La^{3+} , Bi^{3+} , Nd^{3+} nebo Sb^{5+} . Tato keramika má vyšší permitivitu, lepší piezoelektrické vlastnosti, avšak je méně mechanicky a elektricky odolná. Díky schopnosti dosáhnout větších mechanických posuvů se hodí pro citlivé senzory a aktuátory. [44, 45]

Důležitým parametrem je hodnota Curieovy teploty. Ta určuje teplotní mez pro použití materiálu. Pro tvrdou keramiku je to 300-360 °C a pro měkkou 150-360 °C [44]

Po vyrobení PZT keramiky práškovou metalurgií a jejím vybroušením do požadovaných tvarů se na keramiku sítotiskem nanese stříbrné elektrody a celek je znovu vypálen a následně elektricky zpolarizován. [44, 47]

Keramika se stříbrnými elektrodami může být nalepena na nepiezoelektrický materiál (například kovovou membránu) a vznikne prvek, kterému se říká **unimorf** (obr. 33.). Zpravidla to bývá kruhová mosazná destička, na které je nalepena PZT keramika. Používá se v sirénách, čidlech neelektrických veličin, v elektroakustických měničích aj. Splením dvou unimorfů k sobě bude využito v experimentální části této bakalářské práce, kdy bude zjišťováno, zda se pomocí nich nechá sestavit funkční piezoelektrický transformátor. [44, 47]

Existují další možnosti uspořádání PZT. Například navrstvením dvou keramik na sebe (nejčastěji obdélníkového tvaru), kdy mezi keramikami jsou kovové elektrody, vznikne **bimorf**. [48]



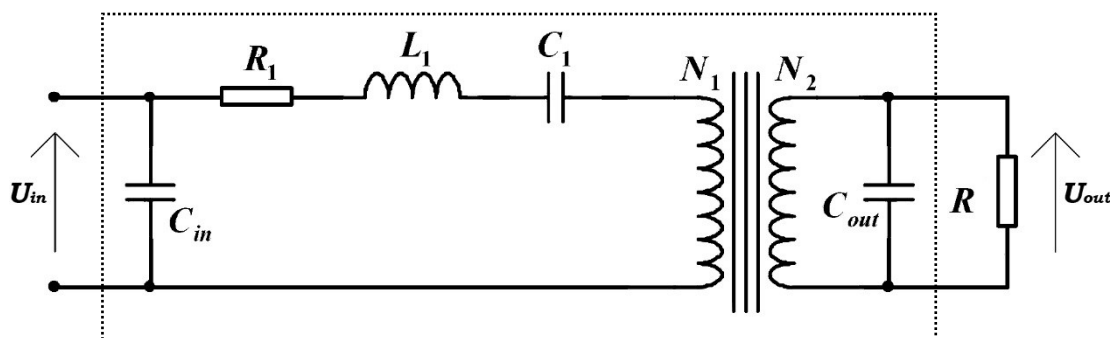
Obr. 33 (vpravo): Unimorf [50]

2.6 Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru

Účinnost, hustota výkonu a další specifické parametry určitého piezoelektrického transformátoru jsou závislé na jeho zatížení. Aby měl PT nejlepší možné přenosové parametry je vhodné jej navrhnout speciálně pro cílovou aplikaci. Pro úspěšný návrh PT ke konkrétním aplikacím je potřebné sestavit si jeho náhradní elektrický obvod. Náhradní obvod PT umožňuje přibližně popsat jeho elektrické chování, které odpovídá materiálovým parametrům, rozměrům, teplotě a připojené zátěži. [41]

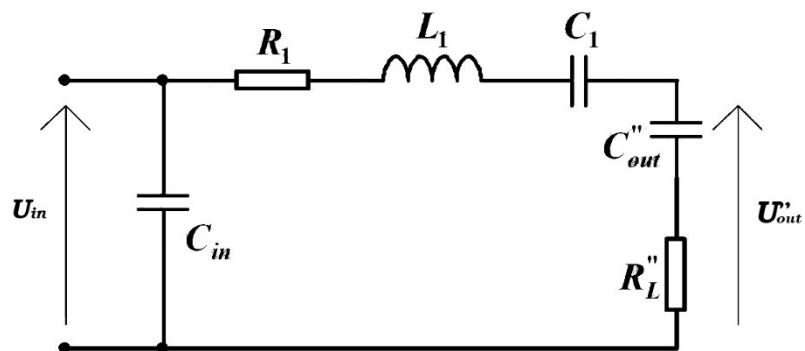
Ekvivalentní obvod na obrázku 34 je připojen k čistě odporové zátěži (ve schématu znázorněno odporem R) a představuje elektrické chování PT při provozu na určité rezonanční frekvenci. Je ovšem potřeba mít na paměti, že v tomto náhradním obvodu nejsou brány v potaz žádné další rezonanční frekvence, jsou zanedbány dielektrické ztráty, které jsou nejmenší právě v oblasti rezonance. A v neposlední řadě náhradní obvod PT neřeší problém, který se vztahuje k mechanické poddajnosti. Mechanická poddajnost se mění s frekvencí a je funkcí upevnění, deformačního režimu, tvaru a modulu elasticity piezoelektrického transformátoru. [41]

Při rezonanci vzniká ztrátové teplo především mechanickými ztrátami. Mimo rezonanční frekvence je ztrátové teplo způsobeno dielektrickými ztrátami. Tyto ztráty lze do náhradního schématu promítnout přidáním odporu paralelně ke vstupní a výstupní kapacitě. Mechanické ztráty představuje v modelu odpor R_1 a rezonanční charakteristiky představují L_1 a C_1 . Vstupní kapacita C_{in} a výstupní kapacita C_{out} představují tzv. upnutou kapacitu. Ta se projevuje, jestliže není i po připojení elektrického pole k PT generováno žádné napětí. [41]



Obr. 34: Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru [41]

Vzhledem k tomu, že se PT chová jako pásmový filtr s vysokým Q faktorem, způsobí obdélníkový průběh signálu připojený na vstup PT na jeho výstupu sinusový průběh. Náhradní obvod PT lze tedy zjednodušit do podoby zobrazené na obrázku 35. [41]



Obr. 35: Zjednodušené náhradní schéma piezoelektrického transformátoru [41]

3. Přehled na trhu dostupných piezoelektrických transformátorů

Na trhu nepůsobí mnoho firem, které by se výrobou piezoelektrických transformátorů zabývaly. Je to způsobeno nejspíše tím, že se na jejich výrobu vztahuje rozsáhlá patentová ochrana. Níže uvedu největší společnosti, které piezo-transformátory produkují nebo dodávají a povedlo se mi vyhledat jejich parametry.

3.1 STEINER & MARTINS, INC

Asi největším producentem piezoelektrických transformátorů je americká společnost **STEINER & MARTINS, INC**, která vyrábí dva druhy piezoelektrických transformátorů Rosenova typu. A to jednovrstvé a mnohovrstvé. Oba druhy transformátorů jsou vhodné spíše pro menší výkony a z vizuálního hlediska jsou víceméně stejné. Rozdílem mezi nimi je ten, že jednovrstvý má oproti mnohovrstvému vyšší vstupní statickou kapacitu, menší výstupní kapacitu a mají menší převod. [32] Přehled parametrů jednotlivých piezoelektrických transformátorů této firmy je shrnut do tabulek 2 a 3.

Tab. 2: Parametry jednovrstvých piezo-transformátorů společnosti Steiner & Martins, INC

Společnost			STEINER & MARTINS, INC					
Typ			jednovrstvé					
Výrobní číslo			SMSTF150P1S7	SMSTF50P2S6	SMSTF68P10S9	SMSTF71P12S8	SMSTF71P8S8	SMSTF74P6S8
Parametr	Symbol	Jednotky						
Transformační poměr	-	-	7,5	6	9	8	8	8
Statická vstupní kapacita	C_{IN}	nF	530 ± 7 %	1000 ± 10 %	850 ± 10 %	1400 ± 10 %	780 ± 10 %	880 ± 10 %
Rezonanční frekvence	f_{REZ}	kHz	170 ± 3 %	50 ± 3	-	71,5 ± 2	-	74 ± 3 %
Pracovní frekvence	f_p	kHz	150	43,5	68 ± 2 %	71,5 ± 2	67	74
Maximální vstupní napětí	$U_{IN(max)}$	V	60	90	130	140	130	-
Maximální výstupní napětí	$U_{OUT(max)}$	V	3000	1800	7000	2500	2500	2500
Maximální výstupní výkon	P_{OUT}	W	1,5	2,5	10	12	8	6
Rozměry (DxŠxV)	mm		21x4,3x1,1	35x6x1,2	53x7,5x2,6	53,25x16,3x4,5	35,1x12x4,2	44x6,5x2,2
Použitá keramika			PZT	PZT	PZT	PZT	PZT	PZT
Cena (sada 2 ks)	§		18,00	18,00	22,00	21,00	18,00	18,00
Použití			měnič pro CCFL podsvícení LCD; notebook, PDA, monitor, mobil a další					

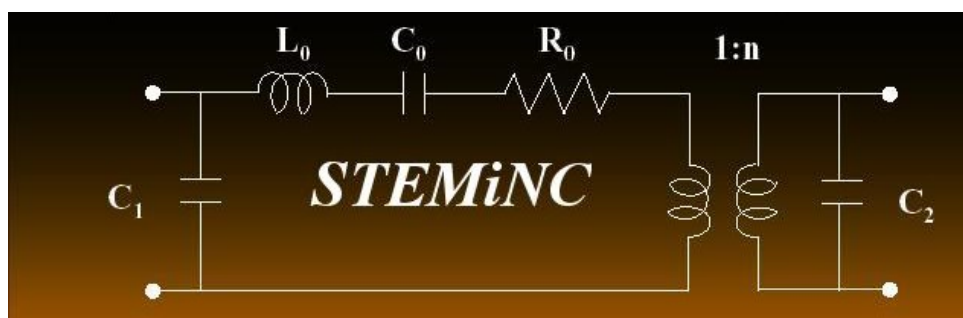
Tab. 3: Parametry mnohvrstevných piezo-transformátorů společnosti Steiner & Martins, INC

Společnost			STEINER & MARTINS, INC					
Typ			mnohvrstevné					
Výrobní číslo			SMMTF53P2S40	SMMTF53P3S45	SMMTF53P4S50	SMMTF55P4S80	SMMTF55P6S50	SMMTF85P1S50
Parametr	Symbol	Jednotky						
Transformační poměr	-	-	40	45	50	80	50	50
Statická vstupní kapacita	C_{IN}	nF	$71,4 \pm 15 \%$	$100 \pm 15 \%$	$130 \pm 15 \%$	$250 \pm 15 \%$	-	-
Rezonanční frekvence	f_{REZ}	kHz	-	$55 \pm 3 \%$	-	$55,5 \pm 3 \%$	$55 \pm 3 \%$	-
Pracovní frekvence	f_p	kHz	$55 \pm 4 \%$	$53 \pm 3 \%$	$53 \pm 3 \%$	$55,5 \pm 3 \%$	$55 \pm 3 \%$	$85 \pm 3 \%$
Maximální vstupní napětí	$U_{IN(max)}$	V	18	18	18	18	28	10
Maximální výstupní napětí	$U_{OUT(max)}$	V	1200	1800	1800	1800	2500	500
Maximální výstupní výkon	P_{OUT}	W	2	3	4	4	6	0,1
Rozměry (dxšxv)	mm		35,8x8,8x3,8	-	35x8,5x3,6	35x8,5x3,6	35,5x10,2x3,28	20x4x1
Použitá keramika			PZT	PZT	PZT	PZT	PZT	PZT
Cena (sada 2 ks)	§		18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
Použití			měnič pro CCFL podsvícení LCD; notebook, PDA, monitor, mobil a další					

Společnost na svých stránkách také uvádí parametry jednotlivých součástek (viz tab. 4) náhradního schématu obr. 36 pro vyráběné piezoelektrické transformátory.

Tab. 4: Parametry součástek náhradního schéma vyráběných piezo-transformátorů

Výrobní číslo piezo transformátoru	R_0	L_0	C_0	C_1	C_2
	Ω	mH	pF	pF	pF
SMSTF71P12S8	30	102	45	1250	16
SMSTF71P8S8	60	132	40	740	9
SMSTF50P2S6	24	59	60	960	8
SMSTF150P1S7	140	49	20	500	7
SMSTF74P6S8	55	130	30	727	
SMSTF68P10S9	43	158	35	710	-
SMMTF55P6S50	0,4	0,939	8600	110000	24
SMMTF55P4S80	0,5	0,51	16000	240000	18
SMMTF53P4S50	0,5	1,24	6500	85400	-
SMMTF53P3S45	0,9	1,61	6000	90000	16
SMMTF53P2S40	1,40	2,27	3730	58610	14



Obr. 36: Náhradní obvod vyráběných piezo-transformátorů [32]



Obr. 37: Ukázka jednovrstvého PT (výrobní číslo: SMSTF68P10S9) [32]



Obr. 38: Ukázka mnohovrstvého PT (výrobní číslo: SMMTF53P4S50) [32]

3.2 Face Electronics, International Corporation

Zajímavým výrobcem v oblasti piezoelektrických transformátorů je společnost **Face Electronics, International Corporation**, která si nechala v polovině 90. let patentovat velmi výkonné piezoelektrické transformátory pod názvem Transoner®. Společnost rozděluje Transonery na dvě skupiny – širokopásmové pracující v určitém frekvenčním rozsahu a výkonové pracující v okolí rezonanční frekvence. [36]

Skupina širokopásmových Transonerů je určena pro aplikace zpracovávající signál. Tyto PT transformují napětí na nižší, než je vstupní a poskytují elektrickou izolaci mezi vstupní a výstupní částí. Skupina širokopásmových Transonerů je dále rozdělena do tří kategorií dle šířky frekvenčního pásma. Toto členění odpovídá aplikacím, pro které jsou vhodné – audio aplikace, datové aplikace a vysokofrekvenční aplikace. Parametry skupiny širokopásmových Transonerů jsou shrnuty v tabulce 5. [36]

Tab. 5: Parametry širokopásmových Transonerů

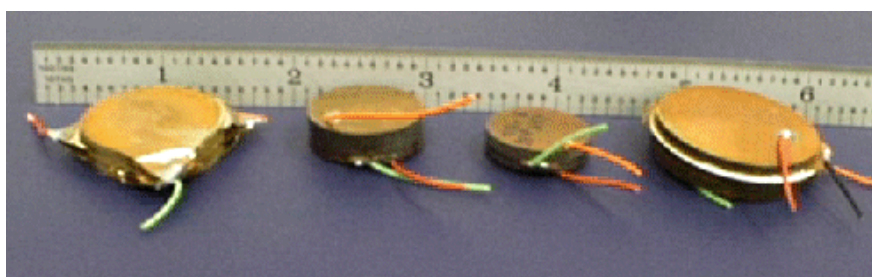
Společnost		Face Electronics		
Transformátor		Transoner®		
Skupina		Širokopásmové		
Aplikace	Audio	Datové	Vysokofrekvenční	
Prokázaná frekvence	10 Hz ÷ 20 kHz	300 Hz ÷ 500 kHz	30 kHz ÷ 50 MHz	
Očekávaná frekvence	10 Hz ÷ 30 kHz	300 Hz ÷ 20 MHz	30 kHz ÷ 75 MHz	
Napěťový zisk	1:0,07 ÷ 1:0,12	1:0,07 ÷ 1:0,10	1:0,05 ÷ 1:0,10	
Izolační napětí	> 35 kV	> 35 kV	> 35 kV	
Provozní teplota	-40°C ÷ 150 °C	-40°C ÷ 150 °C	-40°C ÷ 150 °C	
Průměr	38,1 mm	2,54 mm	1,778 mm	
Tloušťka	0,762 mm	3,048 mm	1,270 mm	

Výkonové Transonery pracují v okolí rezonanční frekvence, kdy vykazují největší napěťový zisk a velký přenos síly. Používají se pro přeměnu energie. Mohou být izolované nebo neizolované. Oba jsou schopny efektivně zesilovat vstupní napětí a dosahovat větších jmenovitých výkonů ve srovnání se stejně velkými transformátory využívajícími elektromagnetickou vazbu. Izolované výkonové Transonery se hodí pro aplikace, kde se požaduje izolovaný převod nebo přenos střídavého napětí, jako je oblast počítačů, lékařství

aj. Neizolované najdou uplatnění v oblasti elektro-luminesenčních displejů, zářivek, flash světel u kamer a miniaturních světel. Parametry výkonových Transonerů jsou v tabulce 6. [36]

Tab. 6: Parametry výkonových PT typu Transoner

Společnost			Face Electronics, Inc	
Typ transformátoru			Transoner®	
Skupina			Výkonové	
Aplikace	Izolované	Neizolované		
Prokázaný výkon	> 80 W	> 80 W		
Očekávaná očekávaný	> 100 W	> 100 W		
Prokázaná frekvence	1 kHz ÷ 100 kHz	50 Hz ÷ 250 kHz		
Očekávaná frekvence	50 Hz ÷ 500 kHz	10 Hz ÷ 2 MHz		
Prokázaný zisk	1:0,25 ÷ 1:18	1:0,25 ÷ 1:60		
Očekávaný zisk	1:0,05 ÷ 1:100	1:0,05 ÷ 1:100		
Izolační napětí	> 35 kV	-		
Účinnost	> 98 %	> 99 %		
Provozní teplota	-40°C ÷ 150 °C	-40°C ÷ 150 °C		
Průměr	6,35 mm ÷ 76,2 mm	6,35 mm ÷ 15,24 mm		
Tloušťka	0,635 mm ÷ 6,35 mm	0,635 mm ÷ 12,7 mm		



Obr. 39: Příklad PT typu Transoner o výkonech 40 W, 5 W, 15 W a 30 W [36]

Společnost v tabulkách neuvádí žádné hodnoty, jaký proud jednotlivé Transonerky snesou. Nicméně se na jejich webových stránkách můžeme dočíst, že zvládají rozsah proudů od 0,25 A v méně náročných aplikacích až po 4 A v náročných aplikacích. Obecně je proudová zatížitelnost dána konstrukcí Transoneru a lze ji zvýšit zvětšením povrchu keramiky nebo zvýšením počtu vrstev. [36]

3.3 Micromechatronics, Inc

Další významnou společností, která dodává na trh piezoelektrické transformátory, je též americká společnost **Micromechatronics, Inc** (zkráceně MMech). Ta má v nabídce tzv. Step-down piezo-transformátorů (název je odvozen od toho, že snižují rozmezí vstupních napětí na nižší konstantní výstupní) čtyři kategorie, do nichž rozděluje PT dle výstupního výkonu a dále je ještě dělí podle výstupního napětí. Tyto PT jsou založeny na principu radial vibration mode, a všechny jsou uloženy v obdélníkovém pouzdře o dvou vstupních a dvou výstupních pinech z jeho spodní strany, jak lze vidět na obrázku 40. Uplatnění najdou v DC-DC měničích, CFL a lineárních předradnicích zářivek. [34] Zveřejněné parametry těchto PT jsou zpracovány v níže uvedených tabulkách.

Tab. 7: Parametry step-down PT o výkonu 5 W a 10 W společnosti Micromechatronics, Inc

Společnost		Micromechatronics, Inc				
Typ transformátoru		Step-down				
Kategorie		5W		10W		
Parametr	Symbol	Jednotky	Specifikace		Specifikace	
Provozní teplota	t	°C	-55 ÷ 125		-55 ÷ 125	
Elektrická pevnost (mezi vstupem a výstupem)	vb	V _(DC) /min	> 3700		> 3700	
Výstupní výkon	P	W	5		10	
Pracovní frekvence	f	kHz	121 ÷ 134		127 ÷ 132	
Vstupní napětí (rozmezí)	U _{IN}	V	28 ÷ 50	v.č.: 005010	57 ÷ 75	v.č.: 010010
			-	-	64 ÷ 76	v.č.: 010012
			28 ÷ 45	v.č.: 005015	56 ÷ 80	v.č.: 010015
			24 ÷ 45	v.č.: 005018	62 ÷ 70	v.č.: 010018
			20 ÷ 45	v.č.: 005024	55 ÷ 70	v.č.: 010024
Výstupní napětí	U _{OUT}	V	10	v.č.: 005010	10	v.č.: 010010
			-	-	12	v.č.: 010012
			15	v.č.: 005015	15	v.č.: 010015
			18	v.č.: 005018	18	v.č.: 010018
			24	v.č.: 005024	24	v.č.: 010024
Vstupní statická kapacita	C _{IN}	nF	4 ± 10 %		3,5 ± 10 %	
Výstupní statická kapacita	C _{OUT}	nF	47,5 ± 10 %	v.č.: 005010	88 ± 10 %	v.č.: 010010
			-	-	56 ± 10 %	v.č.: 010012
			17 ± 10 %	v.č.: 005015	34 ± 10 %	v.č.: 010015
			12 ± 10 %	v.č.: 005018	27 ± 10 %	v.č.: 010018
			7,5 ± 10 %	v.č.: 005024	16 ± 10 %	v.č.: 010024
Cena [Š]	při odběru 1 ÷ 10 ks		150,00		150,00	
	při odběru 11 ÷ 25 ks		95,50		95,50	

Tab. 8: Parametry step-down PT o výkonu 20 W a 30 W společnosti Micromechatronics, Inc

Společnost			Micromechatronics, Inc			
Typ transformátoru			Step-down			
Výkonostní kategorie			20W		30W	
Parametr	Symbol	Jednotky	Specifikace		Specifikace	
Provozní teplota	t	°C	-55 ÷ 125		-55 ÷ 125	
Elektrická pevnost (mezi vstupem a výstupem)	vb	V _(DC) /min	> 3700		> 3700	
Výstupní výkon	P	W	20		30	
Pracovní frekvence	f	kHz	88 ÷ 92		76 ÷ 79	
Vstupní napětí (rozmezí)	U _{IN}	V	50 ÷ 70	v.č.: 020010	65 ÷ 75	v.č.: 030010
			65 ÷ 85	v.č.: 020012	70 ÷ 90	v.č.: 030015
			55 ÷ 75	v.č.: 020015	70 ÷ 90	v.č.: 030018
			60 ÷ 80	v.č.: 020018	70 ÷ 90	v.č.: 030020
			60 ÷ 80	v.č.: 020024	70 ÷ 90	v.č.: 030024
			60 ÷ 80	v.č.: 020028	70 ÷ 85	v.č.: 030028
Výstupní napětí	U _{OUT}	V	10	v.č.: 020010	10	v.č.: 030010
			12	v.č.: 020012	15	v.č.: 030015
			15	v.č.: 020015	18	v.č.: 030018
			18	v.č.: 020018	20	v.č.: 030020
			24	v.č.: 020024	24	v.č.: 030024
			28	v.č.: 020028	28	v.č.: 030028
Vstupní statická kapacita	C _{IN}	nF	11,5 ± 10 %		16 ± 10 %	
Výstupní statická kapacita	C _{OUT}	nF	300 ± 10 %	v.č.: 020010	530 ± 10 %	v.č.: 030010
			130 ± 10 %	v.č.: 020012	235 ± 10 %	v.č.: 030015
			85 ± 10 %	v.č.: 020015	170 ± 10 %	v.č.: 030018
			75 ± 10 %	v.č.: 020018	150 ± 10 %	v.č.: 030020
			55 ± 10 %	v.č.: 020024	93 ± 10 %	v.č.: 030024
			38 ± 10 %	v.č.: 020028	68 ± 10 %	v.č.: 030028
Cena [€]	při odběru:		1 ÷ 10 ks	150,00	1 ÷ 9 ks	150,00
	při odběru:		11 ÷ 25 ks	95,50	10 ÷ 99 ks	95,50

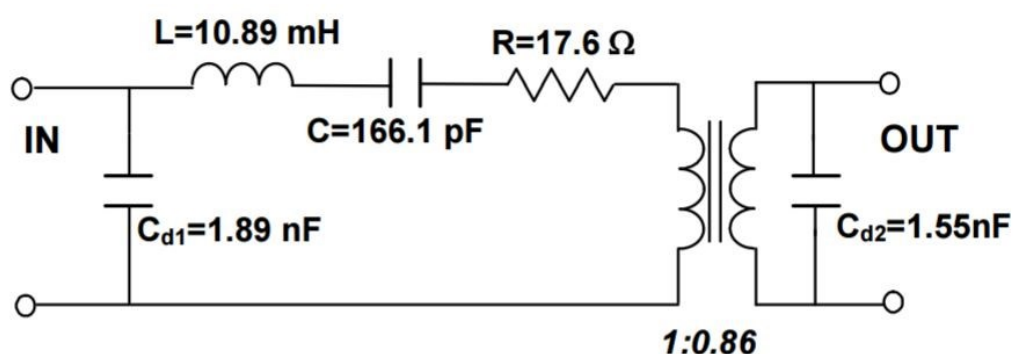


Obr. 40: Vzhled obdélníkového pouzdra step-down PT [34]

MMech má v nabídce step-down piezoelektrických transformátorů zařazen také jeden druh transformátoru s názvem T1-Transoner. Tento, stejně jako předchozí, využívá principu radial vibration mode ve dvou vrstvách. Uplatnění nachází mj. v kompaktních zářivkách. Parametry tohoto PT jsou uvedeny v tabulce 9 a hodnoty součástek náhradního schématu zmíněného transformátoru na obr. 41. [34]

Tab. 9: Dostupné parametry piezo-transformátoru T1-Transoner společnosti Micromechatronics, Inc

Společnost	Micromechatronics, Inc		
Typ transformátoru	Transoner T1 2-layer		
Parametr	Symbol	Jednotky	Hodnota
Vstupní napětí	$U_{IN(ef)}$	V	89,43
Vstupní proud	I_{IN}	mA	213
Příkon	P_{IN}	W	15,3
Výstupní napětí	$U_{OUT(ef)}$	V	88,45
Výstupní proud	I_{OUT}	mA	170
Výkon	P_{OUT}	W	15
Rezonanční frekvence	f	kHz	$121 \pm 5 \%$
Účinnost	η	%	> 95
Transformační poměr	-	-	$1 \pm 0,1$
Průměr	d	mm	19,05
Výška vstupního segmentu	h1	mm	1,52
Výška výstupního segmentu	h2	mm	2,29



Obr. 41: Náhradní obvod T1-Transoner [34]

Dále lze v nabídce společnosti Micromechatronics nalézt vysokonapěťové piezo-transformátory Rosenova typu ve dvou výkonových variantách – jednovattové a pětivattové. Jejich parametry, které společnost uvádí lze vyčíst opět v tabulce níže. [34]

Tab. 10: Dostupné parametry vysokonapěťových PT společnosti Micromechatronics, Inc

Společnost		Micromechatronics, Inc		
Typ transformátoru		step-up		
Výkonostní kategorie		1W	5W	
Model		PT291C3	LNA3207A-PCB	
Parametr	Symbol	Jednotky	Hodnota	Hodnota
Vstupní napětí	$U_{IN(ef)}$	V	8	-
Vstupní kapacita	C_{IN}	nF	$91 \pm 30 \%$	$196 \pm 20 \%$
Výstupní proud	I_{OUT}	mA	3,16	-
Výstupní kapacita	C_{OUT}	pF	$5,2 \pm 30 \%$	$18 \pm 20 \%$
Výkon	P_{OUT}	W	1	5
Rezonanční frekvence	f	kHz	$130 \pm 10 \%$	$49 \pm 5 \%$
Účinnost	η	%	> 90	> 93
Transformační poměr	-	-	> 57	$75 \pm 10 \%$
Rozměr PT (d x š x v)	-	mm	28,6 x 7,8 x 1,9	32 x 6,75 x 2,5
Rozměr pouzdra (d x š x v)	-	mm	24 x 6 x 0,8	-
Cena 1 ÷ 10 ks		\$	120,00	150,00
Cena 11 ÷ 50 ks		\$	75,00	90,00
Cena 51 ÷ 100 ks		\$	-	55,00
Cena 101 ÷ 1000 ks		\$	-	25,00
Cena nad 1000 ks		\$	-	10,00



Obr. 42: Piezo-transformátor PT PT291C3 [34]



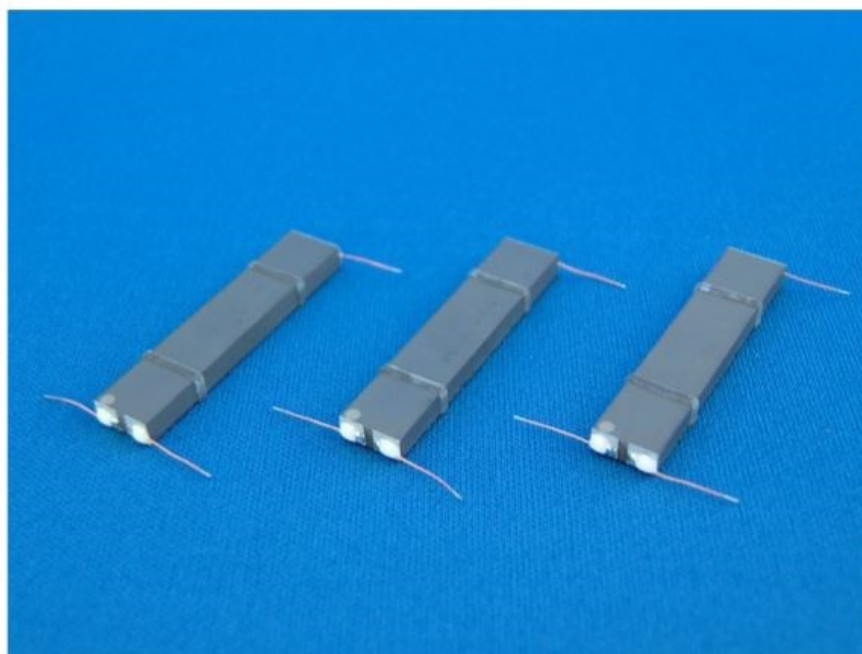
Obr. 43: Piezo-transformátor LNA3207A [34]

3.4 CERATEC, Inc

Piezoelektrické transformátory má ve své nabídce také společnost **CERATEC, Inc** z Japonska. Ta na svých stránkách uvádí, že její mnohvrstvé PT typu Rosen jsou výkonné, mají vysokou účinnost, překračující 95 %, velký step-up poměr a malé rozměry. Jsou určeny především pro aplikace s LCD podsvícením a pro vysokonapěťové aplikace. Např. DC-DC měniče. Uvedenou specifikaci tří nabízených piezoelektrických transformátorů naleznete v tabulce 11. [35]

Tab. 11: Dostupné parametry piezoelektrických transformátorů společnosti Ceratec, Inc

Společnost			Ceratec, Inc		
Typ transformátoru			mnohvrstvý - Rosen		
Model			NA2406	T8645	NA3207
Parametr	Symbol	Jednotky			
Výstupní výkon	P_{OUT}	W	1	3	5
Výstupní proud	I_{OUT}	mA	3	5	6
Účinnost	η	%	> 90	> 90	> 90
Rezonanční frekvence	f	kHz	133	67	49
Rozměry	d x š x v	mm	24 x 6 x 0,7	48 x 7 x 2	32 x 6,7 x 2,6



Obr. 44: PT nabízené společností Ceratec [35]

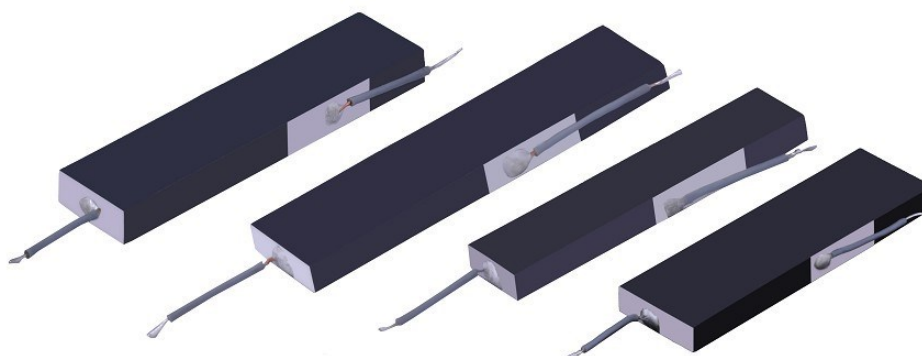
3.5 FUJI & CO

Japonská společnost **FUJI & CO** vyrábí piezoelektrické transformátory Rosenova typu. Vzhledem k tomu, že piezoelektrické transformátory vyrábí na zakázku, dle požadavků a specifikací zákazníka, jsou pro každý jejich výrobek parametry různé a nejsou uvedeny. Dostupné jsou pouze základní údaje o keramických prvcích, ze kterých je PT vyroben. Tyto údaje jsou v tabulce 12. [37]

Tab. 12: Dostupné parametry piezoelektrických prvků pro výrobu PT společnosti FUJI & CO

Společnost	FUJI & CO						
Označení prvku	Velikost elementů			Hmotnost	Rezonanční frekvence	Kapacita	
	L	W	T	m	f	vstupní	výstupní
	mm			g	kHz	pF	
Z0.7N2.7X10R-E (C-205)	10	2,7	0,7	0,15	332	270	5,0
Z1.2N5.4X20R-E (C-205)	20	5,4	1,2	1,00	166	630	9,0
Z1.8N8.5X37R-E (C-205)	37	8,5	1,8	4,50	90	1200	11,5
Z2.9N10.8X40R-E (C-205)	40	10,8	2,9	10,00	84	1000	22,0
Z2N13X50R-E (C-205)	50	13,0	2,0	10,20	66	2300	14,5

Na čínském trhu působí společnost **KongHong Corporation Limited**. Ta nabízí piezoelektrické transformátory jednovrstvé, vícevrstvé a Rosenova typu. Ukázka z nabízených piezo-transformátorů Rosenova typu je na obrázku 45. Dostupné parametry všech nabízených PT jsou k dispozici v tabulkách 13, 14 a 15 níže. [38]



Obr. 45: PT nabízené společností KongHong [38]

Tab. 13: Dostupné parametry vícevrstvých PT společnosti FUJI & CO KongHong

Společnost			KongHong Corporation Limited						
Typ transformátoru			vícevrstvý						
Model			MPT3006A45L0	MPT3006F45L	MPT3008B70L0	MPT3307A70L0	MPT3608A85L0	MPT3608B85L0	MPT3610B10L1
Parametr	Symbol	Jednotky							
Vstupní napětí	$U_{IN(ef)}$	V	10	9,5	12,5	10	10	13	12,5
Vstupní kapacita	C_{IN}	nF	95 ± 15 %	110 ± 15 %	105 ± 15 %	145 ± 15 %	170 ± 15 %	120 ± 15 %	160 ± 15 %
Výstupní napětí	$U_{OUT(vp-vp)}$	V	> 1900	> 1900	> 2800	> 2800	> 3150	> 3150	> 3150
Zátěž	R	kΩ	100	100	150	150	175	175	150
Výkon	P_{OUT}	W	4,5	4,5	6,0	6,0	7,0	7,0	8,0
Anti-rezonanční frekvence	f	kHz	55 ± 1,5	55 ± 1,5	55 ± 1,5	51 ± 1,5	47 ± 1,5	47 ± 1,5	47 ± 1,5
Účinnost	η	%	> 99 %	> 99 %	> 99 %	> 99 %	> 99 %	> 99 %	> 99 %
Transformační poměr	-	-	> 67	> 71	> 80	> 99	> 110	> 86	> 89
Délka	l	mm	30,2 ± 0,5	30,2 ± 0,5	30,2 ± 0,5	33,2 ± 0,5	36,0 ± 0,5	36,0 ± 0,5	36,0 ± 0,5
Šířka	w	mm	6,0 ± 0,3	6,0 ± 0,3	8,0 ± 0,3	7,4 ± 0,3	8,2 ± 0,3	8,2 ± 0,3	10,0 ± 0,3
Tloušťka	h	mm	2,45 ± 0,2	2,5 ± 0,2	3,0 ± 0,2	2,75 ± 0,2	2,75 ± 0,2	3,15 ± 0,2	2,0 ± 0,2
Teplota (max. teplota PT)	t_{PT}	°C	< 20	< 20	< 20	< 20	< 25	< 25	< 25

Tab. 14: Dostupné parametry jednovrstvých PT společnosti FUJI & CO KongHong

Společnost			KongHong Corporation Limited	
Typ transformátoru			jednovrstvý	
Model			SPT4907R	SPT3606
Parametr	Symbol	Jednotky		
Vstupní napětí	$U_{IN(ef)}$	V	-	-
Vstupní proud	I_{IN}	mA	-	-
Vstupní kapacita	C_{IN}	nF	550 ± 20 %	1,2 ± 15 %
Příkon	P_{IN}	W	-	-
Výstupní napětí	$U_{OUT(vp-vp)}$	V	> 1900	-
Výstupní proud	I_{OUT}	mA	-	-
Zátěž	R	kΩ	100	1
Výkon	P_{OUT}	W	6	0,7
Anti-rezonanční frekvence	f	kHz	67,9 ± 3 %	90 ± 6
Účinnost	η	%	> 60 %	-
Transformační poměr	-	-	5,8 ± 15 %	40 ± 10
Délka	l	mm	47,70	35,5 ± 0,3
Šířka	w	mm	7,00	5,9 ± 0,15
Tloušťka	h	mm	2,85	1 ± 0,1
Teplota (max. teplota PT)	t_{PT}	°C	< 25	< 25
Provozní teplota	t_p	°C	-	-10 ÷ 60
Skladovací teplota	t_s	°C	-	-25 ÷ 100

Tab. 15: Dostupné parametry PT Rosenova typu společnosti FUJI & CO KongHong

Společnost			KongHong Corporation Limited		
Typ transformátoru			Rosenův		
Model			MPT2805C00R0	MPT3307E00R0	MPT2805C00R2
Parametr	Symbol	Jednotky			
Vstupní kapacita	C_{IN}	nF	8 ± 15 %	38 ± 15 %	11,5 ± 15 %
Anti-rezonanční frekvence	f	kHz	120 ± 1,5	102 ± 1,5	120 ± 1,5
Účinnost	η	%	> 99 %	> 99 %	> 99 %
Délka	l	mm	28,2	33,2	28,2
Šířka	w	mm	5,1	7,1	5,1
Tloušťka	h	mm	2,05	2,4	2,05

3.6 ELPA Company

Ruská společnost **ELPA Company** vyrábí vysokonapěťové piezoelektrické transformátory jednovrstvé i mnohovrstvé. Mnohovrstvé PT mají 5 až 9 vrstev a patří tedy mezi tzv. multistack PT. Parametry jednovrstvých PT této společnosti jsou uvedeny v tabulce 16 a parametry mnohovrstvých v tabulce 17. ELPA Company neuvádí k PT výrobní ani objednávací čísla a nabízené PT třídí podle rozměrů. [39]

Tab. 16: Dostupné parametry jednovrstvých PT společnosti ELPA Company

Společnost			ELPA Company				
Typ transformátoru			jednovrstvý - vysokonapěťový				
Rozměr (d x š x h) [mm]			80x18x2	80x12x3.5	80x11x3	35x5x2	22x5x1
Parametr	Symbol	Jednotky					
Vstupní napětí	$U_{IN(max)}$	V	50	15	15	30	15
Vstupní proud	I_{IN}	mA	80	80	80	-	-
Vstupní kapacita	C_{IN}	nF	5	3	3	1,5	0,6
Výstupní napětí	$U_{OUT(max)}$	V	8000	9000	9000	1000	1000
Zátěž	R	MΩ	51	500	500	100	330
Výkon	P_{OUT}	W	0,019 ÷ 3	0,019 ÷ 3	0,019 ÷ 3	0,019 ÷ 3	0,019 ÷ 3
Rezonanční frekvence	f	kHz	403	42,53	42,53	503	755

Tab. 17: Dostupné parametry jednovrstvých PT společnosti ELPA Company

Společnost			ELPA Company			
Typ transformátoru			multistack - vysokonapěťový			
Rozměr (d x š x h) [mm]			20x4x2	20x5x1.5	35x5x2	70x10x2
Parametr	Symbol	Jednotky				
Vstupní napětí	$U_{IN(max)}$	V	5	10	5	5
Vstupní kapacita	C_{IN}	nF	15 ÷ 20	3,2 ÷ 4,2	28 ÷ 38	96 ÷ 130
Výstupní napětí	$U_{OUT(max)}$	V	2500	2500	3500	6000
Výstupní kapacita	C_{IN}	nF	8,9 ÷ 12,1	8,8 ÷ 11,8	6,1 ÷ 8,3	6,4 ÷ 8,6
Transformační poměr (při zátěži 100 kΩ)	-	-	500	250	700	1200
Výkon	P_{OUT}	W	0,5 ÷ 3	0,5 ÷ 3	0,5 ÷ 3	0,5 ÷ 3
Rezonanční frekvence	f	kHz	84 ÷ 90	87 ÷ 89	35 ÷ 45	20 ÷ 25

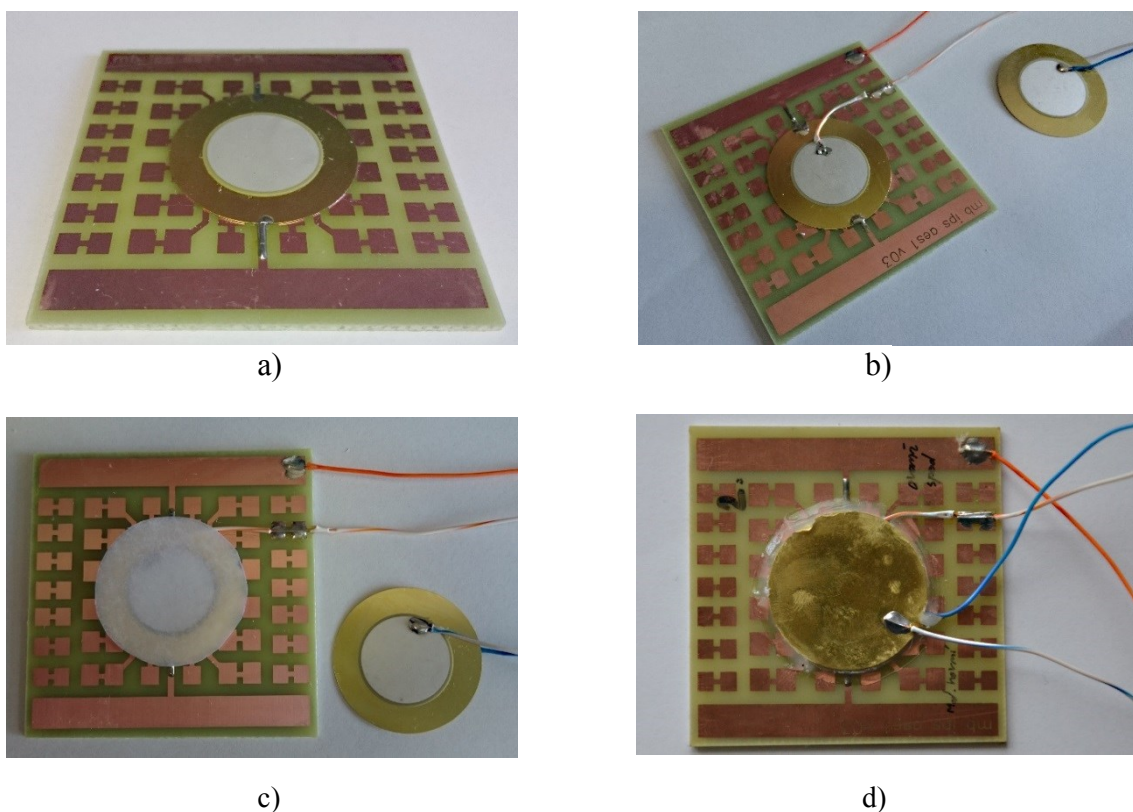
4. Experimentální část

4.1 Vzorek piezoelektrického transformátoru

Jedním z cílů bakalářské práce bylo sestavit funkční vzorek piezoelektrického transformátoru. K tomu bylo využito dvou unimorfů, který byly slepeny k sobě. Tato konstrukce vychází z konstrukce Transonerů, o kterých pojednává kapitola 2.3.5.

Po vytvoření principiálního návrhu bylo tedy potřeba slepit vzorek a na něm dokázat, že tento vzorek přenáší energii ze vstupní části na výstupní. Nakonec bylo vytvořeno několik vzorků s různým druhem izolace mezi jednotlivými unimorfy a s různým postavením piezokeramických elektrod proti sobě, resp. od sebe. Fotky těchto vzorků jsou v příloze A.

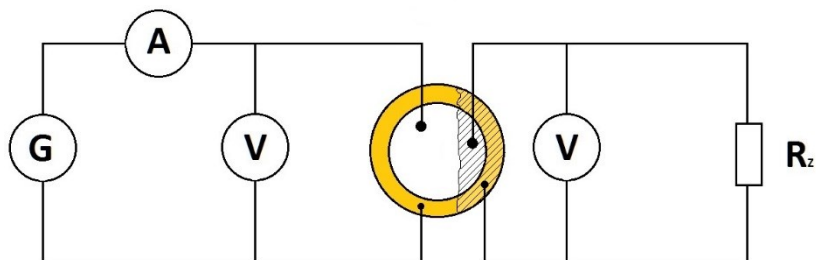
Ukázka výroby jednoho ze vzorků je na obr. 46. a) připájený unimorf na nosné destičce, b) napájeny dráty na elektrody, c) vložen impregnovaný papír jako izolace mezi unimorfy d) přilepen druhý unimorf, jako sekundární část transformátoru. Fotografie ostatních vyrobených vzorků jsou v příloze v kapitole 1.1.



Obr. 46: Postup výroby vzorku 2 piezoelektrického transformátoru

4.2 Ověření a měření přenosu signálu u vzorku

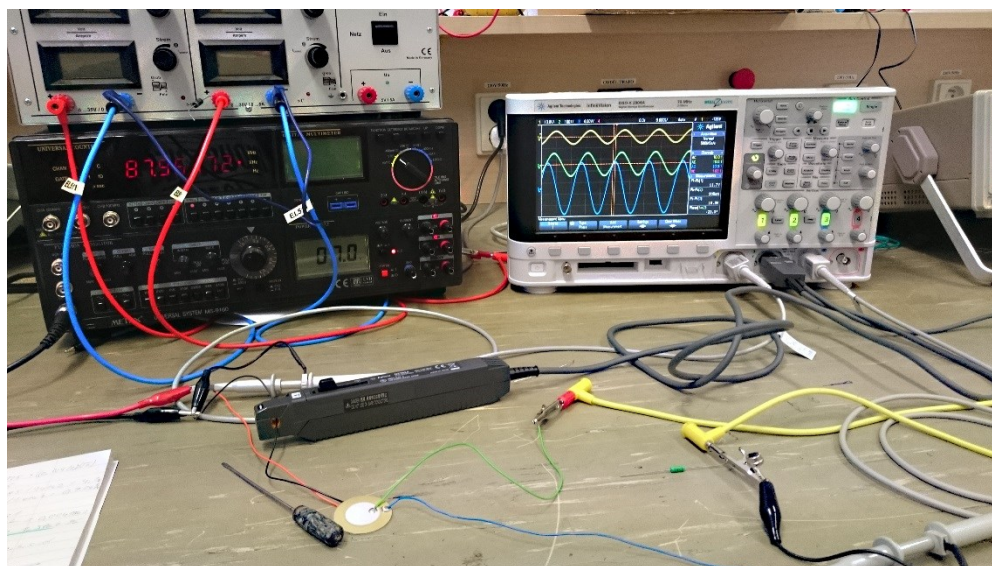
Následně bylo zjišťováno, zda tyto vzorky transformátorů přenášejí a přeměňují energii. To bylo zjišťováno měřením vstupního napětí a proudu a výstupního napětí při určitém impedančním zatížení na výstupu. Schéma zapojení pro měření je na obrázku 47.



Obr. 47: Schéma zapojení pro měření přenosu piezo-transformátoru (naznačen uprostřed)

Na funkčním generátoru byl nastaven sinusový výstupní signál. Frekvence signálu byla zvyšována od malých hodnot v řádu desítek kHz, po vysoké v řádu stovek kHz a pomocí osciloskopu byly odečítány měřené parametry a zobrazovány jejich průběhy.

Na obrázku 48 je k vidění fotografie z průběhu měření vzorku č. 3.



Obr. 48: Průběh měření vzorku č. 3

4.3 Výsledky měření

Na všech třech měřených vzorcích PT byl zjištěn přenos energie ze vstupní do výstupní části a lze tedy považovat tuto část experimentu za úspěšnou. Nicméně při výpočtu parametrů vzorků nebylo ani v jednom případě dosaženo příliš velké hodnoty výstupního výkonu a účinnosti PT. Změřené a vypočítané hodnoty prvních tří vzorků jsou k vidění v tabulkách 18 až 20 (zeleně vyznačena nejvyšší dosažená účinnost daného vzorku). Nízká účinnost byla pravděpodobně způsobena nedostatečnou mechanickou vazbou mezi jednotlivými unimorfy, neboť na sebe nedoléhaly kvůli vodičům přivedeným na elektrody. Dalším možným důvodem nízké účinnosti je, že mosazná destička (elektroda), na které je PZT keramika nalepena je poměrně silná a tlumí vibrace důležité pro přenos.

Tab. 18: Naměřené a dopočtené hodnoty vzorku č. 1

Vzorek 1		
R _z	[Ω]	39 200
f	[kHz]	89,38
U _{in}	[V]	2,1
I _{in}	[mA]	36,2
U _{out}	[V]	4,2
φ	[°]	-54
cosφ	[-]	0,59
P _{in}	[mW]	44,1
P _{out}	[mW]	0,5
η	[%]	1,0
U _{in} /U _{out}	[-]	2,0

Tab. 19: Naměřené a dopočtené hodnoty vzorku č. 2

vzorek 2							
měření		1.	2.	3.	4.	5.	6.
R _z	[Ω]	39 000	39 000	39 000	39 000	39 000	39 000
f	[kHz]	86,01	87,39	88,06	88,16	88,18	88,68
U _{in}	[V]	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
I _{in}	[mA]	75,3	65,4	71,1	62,6	69,7	54,1
U _{out}	[V]	3,5	4,6	6,5	5,8	6,6	4,3
φ	[°]	-66	-72	-78	-81	-63	-57
cosφ	[-]	0,41	0,31	0,21	0,16	0,45	0,55
P _{in}	[mW]	145,5	96,0	70,2	46,5	150,2	141,8
P _{out}	[mW]	0,3	0,5	1,1	0,9	1,1	0,5
η	[%]	0,2	0,6	1,5	1,8	0,8	0,3
U _{in} /U _{out}	[-]	1,3	1,0	0,7	0,8	0,7	1,1

Tab. 20: Naměřené a dopočtené hodnoty vzorku č. 3

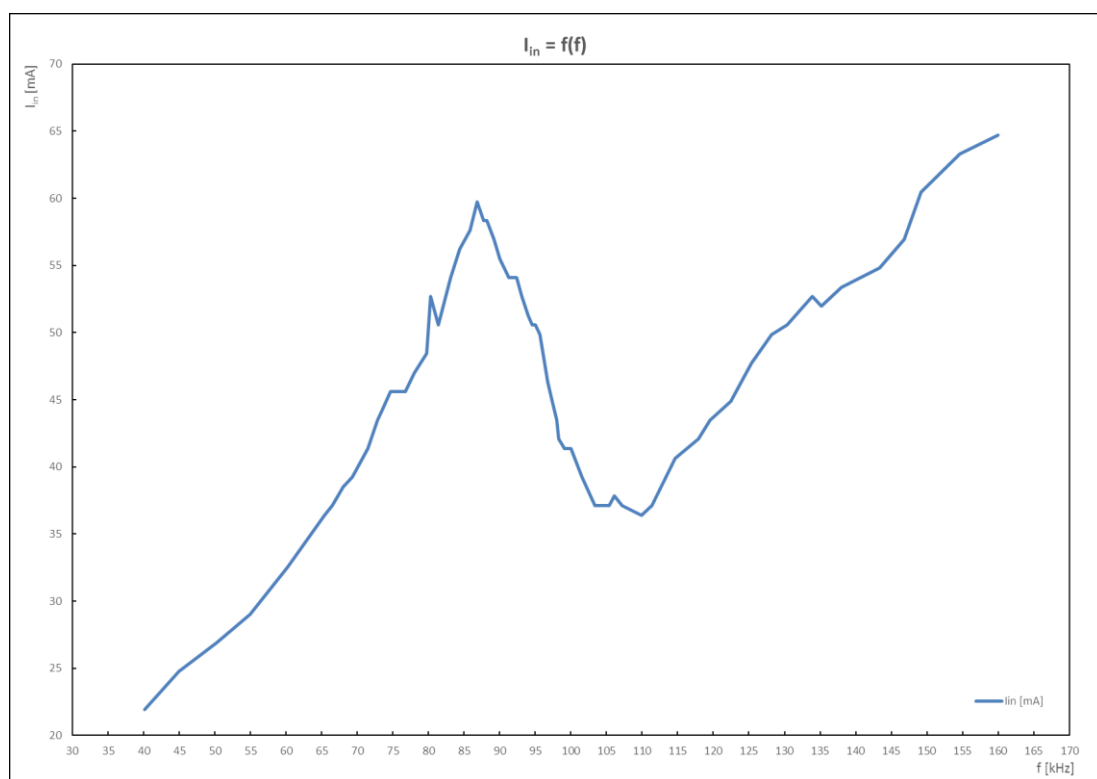
		vzorek 3								
měření		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
R _Z	[Ω]	39 200	39 200	39 200	39 200	39 200	39 200	39 200	39 200	39 200
f	[kHz]	1,86	2,80	33,30	35,60	94,92	94,99	95,05	97,53	98,73
U _{in}	[V]	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
I _{in}	[mA]	5,0	5,3	5,7	7,5	4,5	4,6	4,6	32,5	32,5
U _{out}	[V]	2,4	1,1	2,0	1,2	3,3	3,2	3,3	0,5	0,4
φ	[°]	-54	-56	-50	-53	-33	-40	-30	-38	-57
cosφ	[-]	0,59	0,56	0,64	0,60	0,84	0,77	0,87	0,79	0,54
P _{in}	[mW]	11,2	11,4	14,0	17,4	14,6	13,4	15,3	98,7	68,2
P _{out}	[mW]	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0
η	[%]	1,3	0,3	0,8	0,2	1,9	1,9	1,8	0,0	0,0
U _{in} /U _{out}	[-]	1,6	3,5	1,9	3,2	1,2	1,2	1,2	8,4	8,7

4.4 Zlepšení přenosových vlastností PT

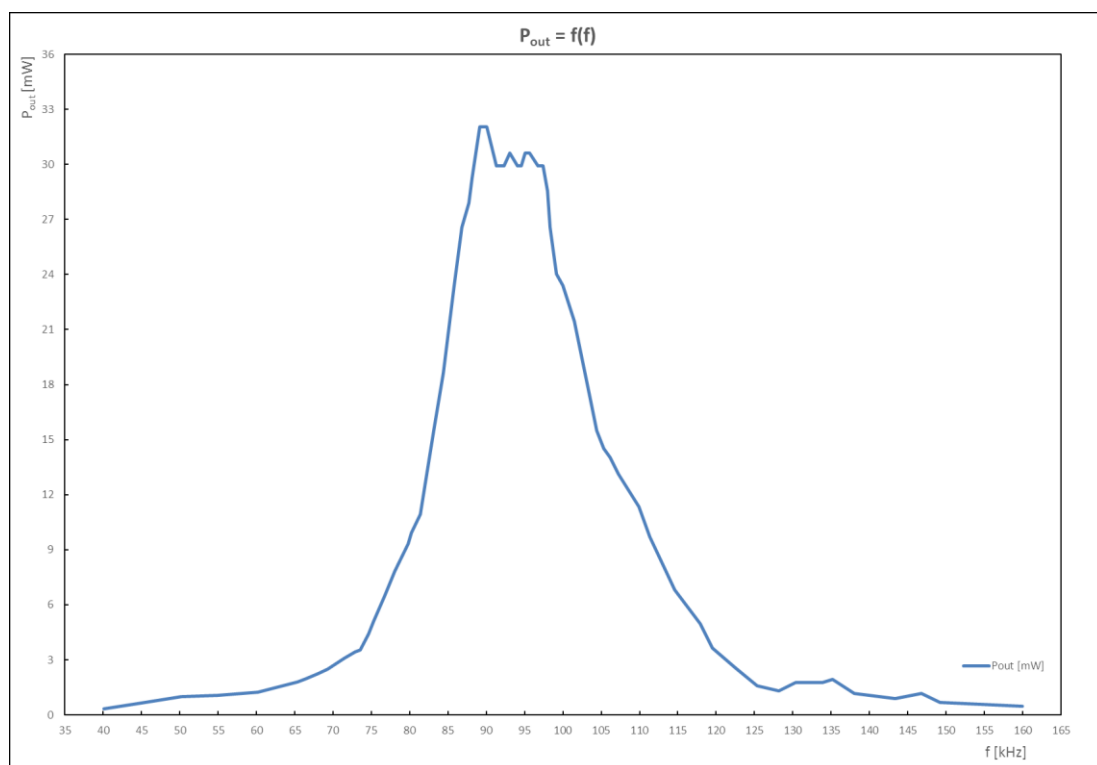
K ověření myšlenky příliš silné mosazné elektrody bylo potřeba sestavit vzorek, u něhož by se snížila tloušťka mosazi a zmenšil průřez vodiče. Pro snížení tloušťky mosazné elektrody byla zvolena metoda odleptání. Toho bylo dosaženo využitím chloridu železnatého. Celková tloušťka mosazi na jednom unimorfu byla díky tomuto snížena z 0,23 mm na 0,07 mm. Lze tedy předpokládat, že tímto nebude docházet ke zmenšování útlumu vibrací a dojde ke zlepšení účinnosti přenosu. Aby k sobě obě části dostatečně přiléhaly, byly oba unimorfy slepeny „zády“ k sobě tak, aby mohly být vodiče připájeny z vnějšku piezotransformátoru. Vyroběný vzorek č. 4 lze vidět na obrázku A-4 v příloze.

Opět bylo provedeno měření, aby byla myšlenka potvrzena případně vyvrácena. Měřením a dopočtením parametrů bylo zjištěno značené zlepšení hodnot přenášeného výkonu a účinnosti transformátoru. Při zatížení odporem R_Z o velikosti 50 Ω bylo dosaženo nejvyšší hodnoty výstupního výkonu 32,0 mW při frekvenci 90,06 kHz a nejvyšší účinnosti přenosu 32,4 % při frekvenci 87,71 kHz. Frekvenční závislost vstupního proudu, výstupního výkonu, účinnosti a transformačního poměru při zatížení 50 Ω a vstupním napětí 3,8 V lze vidět na obrázcích 49 až 51 na další straně.

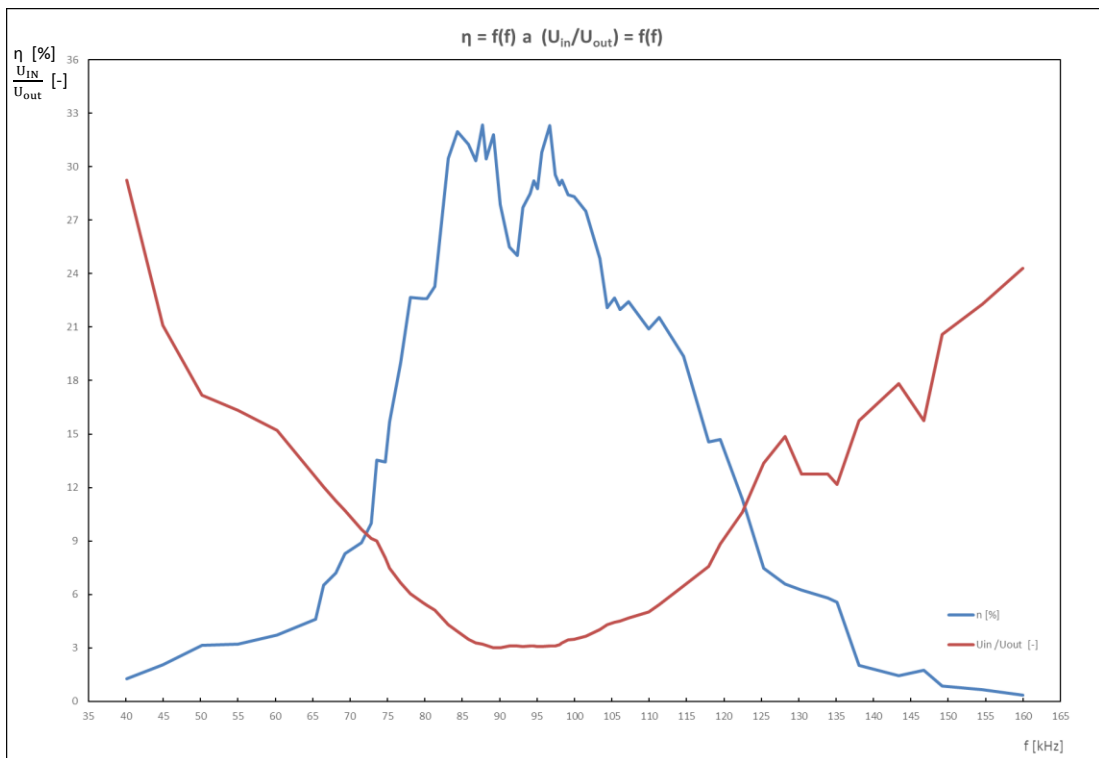
Frekvenční závislost těchto parametrů při zatížení 10 kΩ je k vidění na obrázcích B1 až B3 v příloze. Při zvýšení odporu, došlo k velkému poklesu účinnosti.



Obr. 49: Frekvenční závislost vstupního proudu při $R_Z = 50 \Omega$



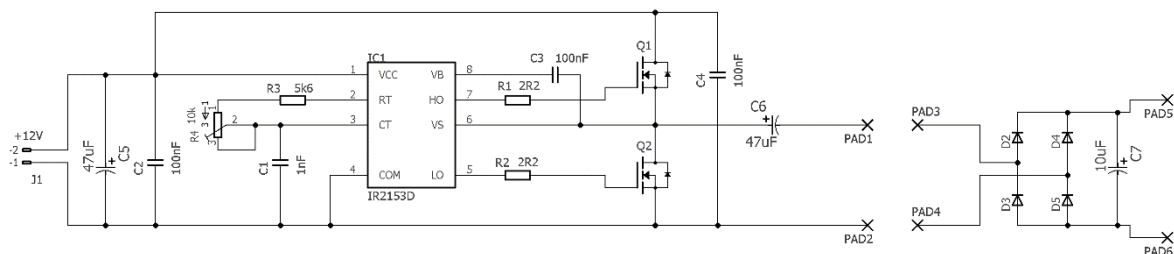
Obr. 50: Frekvenční závislost výstupního výkonu při $R_Z = 50 \Omega$



Obr. 51: Frekvenční závislost účinnosti (modře) a transformačního poměru (červeně) při $R_z = 50 \Omega$

4.5 Návrh aplikace s využitím vyrobeného PT

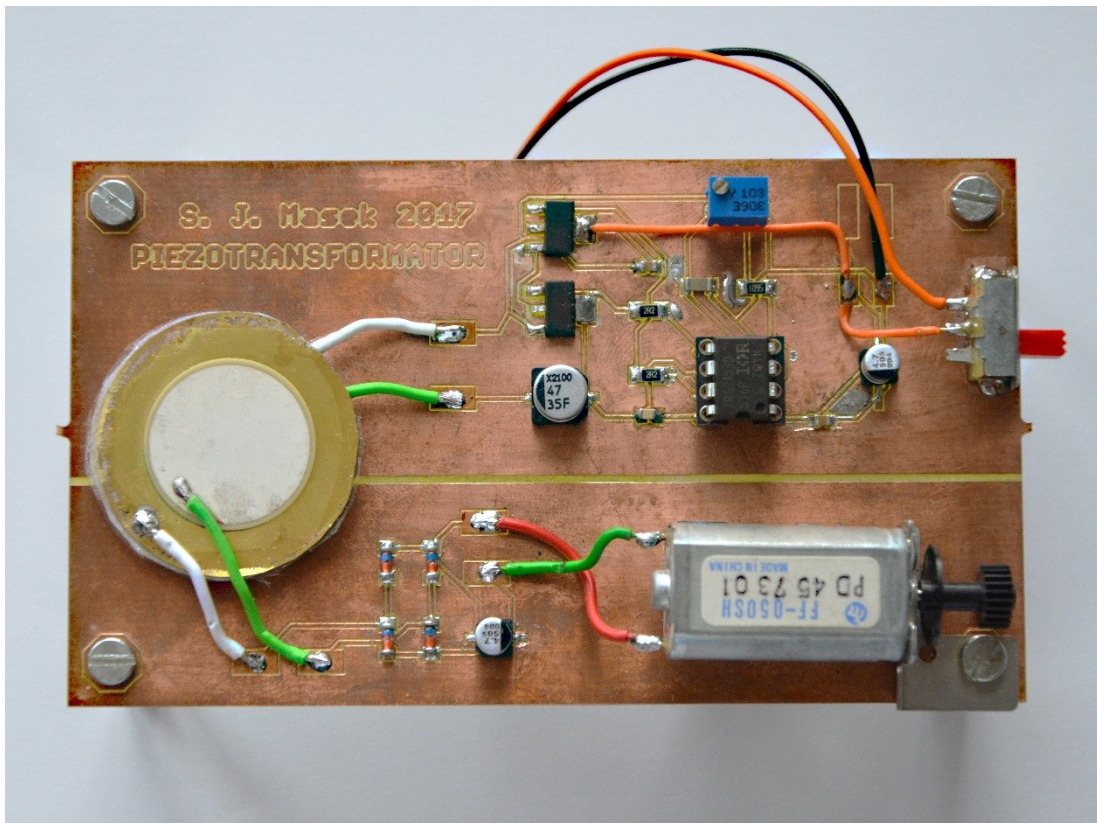
Dosažené parametry čtvrtého vzorku piezoelektrického transformátoru již byly dostatečné pro využití PT v nějaké aplikaci. Byl tedy navržen obvod s tímto vzorkem PT pro pohon motůrku. Schéma celého návrhu je na obrázku 52. Vzorek č. 4 PT přijde připojit mezi pájecí plošky PAD 1-2 a PAD 3-4.



Obr. 52: Schéma aplikace pro řízení motoru (vytvoreno v programu EAGLE)

K řízení motoru je využito IO IR2153D, který v sobě má obvod pro řízení půlmůstku složeného z tranzistorů typu N. Aby tento obvod generoval určitou frekvenci, je potřeba vhodně zvolit hodnoty odporů R_3 a R_4 a kapacity C_1 . Vzhledem k tomu, že chceme mít možnost měnit frekvenci v určitém rozsahu, abychom mohli nastavit takovou frekvenci, při které bude dosaženo nejlepší účinnosti, byl místo pevného odporu R_4 zvolen trimr o maximálním odporu 10 k Ω . Parametry odporu R_3 a kondenzátoru C_1 byly určeny z datasheetu dodávaného k IO2153D. Aby bylo zajištěno, že budeme moci měnit frekvenci v okolí frekvence při níž bylo dosaženo nejlepších parametrů, byly zvoleny hodnoty $R_3 = 5,6$ k Ω a C_1 1 nF. Výstupní frekvence z IO je tedy v rozsahu 45,57 kHz až 125,87 kHz. Pro usměrnění výstupního napětí z piezoelektrického transformátoru byly zvoleny Schottkyho diody 40V/0,35A.

Dle schématu byl pomocí programu EAGLE vytvořen návrh desky plošného spoje. Po jejím vyrobění byla DPS osazena zvolenými součástkami spolu se vzorkem sestaveného piezoelektrického transformátoru a motoru. K napájení této aplikace je potřeba zdroj o velikosti napětí 12 V. Hotová aplikace je k vidění na obrázku 53.



Obr. 53: Kompletní aplikace pro řízení motoru s využitím 4. vzorku PT

5. Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s principem fungování piezoelektrických transformátorů, které k přenosu energie využívají elektromechanický jev zvaný piezoelektrický. O tomto jevu a jevech podobných byla zmínka v první části práce. O samotných transformátorech pojednává kapitola 2, kde byl podrobně popsán princip fungování, vývoj, druhy a využití PT v různých aplikacích.

Ve třetí kapitole byl splněn úkol, vyhledat parametry na trhu dostupných PT. Společností, které PT vyrábějí komerčně není příliš a také parametry, které jednotlivé společnosti zveřejnily byly různé, resp. nebyly nijak sjednoceny. Některé společnosti neuvádějí přenášený výkon, účinnost, jiné zase nezmiňují rozměry PT apod.

Ve čtvrté kapitole byl popsán postup výroby aplikace pro ukázkou funkce piezoelektrického transformátoru, při kterém byl piezo transformátor sestaven ze dvou unimorfů.

Nejprve byla ověřena myšlenka, zda vůbec takto sestavený PT, dokáže přenášet energii. Měřením na třech funkčních vzorcích bylo zjištěno že ano, ale účinnost nedosahovala potřebných hodnot, aby mohl být PT využit pro nějakou aplikaci. Byl tedy hledán způsob, jak účinnost a výstupní výkon zvýšit. Tento způsob byl nalezen a následně byl aplikován. Díky snížení tloušťky mosazné elektrody, na které je umístěna PZT keramika, bylo zabráněno tlumení kmitů, které účinnost, jak se potvrdilo, snižovalo. Dále byla zvýšena elektromechanická vazba tím, že byly unimorfy slepeny „zády“ k sobě tak, aby byly vodiče připojeny z vnějšku transformátoru.

Měřením se potvrdilo dostatečné zvýšení účinnosti a přenášeného výkonu a následně mohla být sestavena aplikace (obr. 53), kde je PT využit pro přenos energie k pohánění elektromotorku.

Do budoucna by bylo zajímavé vyzkoušet různé uspořádání jednotlivých disků, různé druhy odizolování, nebo třeba zkusit umístit dva disky proti sobě a využít jako prostředí pro přenos vibrací vodu, či jiné médium. PT by mohl být sestaven na vstupní i výstupní straně z více disků a zjištěno, zda se parametry přenosu nezlepší.

Tato práce splnila na začátku stanovené cíle a autorovi přinesla rozšíření znalostí v oboru piezelektrických transformátorů, o kterých do doby procházení témat pro závěrečnou práci vůbec nevěděl. Také si rozšířil znalosti v elektromechanických jevech, které jsou stejně jako PT hodně zajímavým odvětvím a pravděpodobně o nich ještě bude hodně napsáno s tím, jak poroste jejich uplatnění.

Použitá literatura

- [1] ERHART, Jiří. Piezoelektrina a další elektromechanické jevy I. *Třípól: časopis pro studenty o vědě a technice* [online]. 2009 [cit. 2017-01-17]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz>
- [2] FIGURA, Jiří. Piezoelektrický jev. In: *Jirifigura.blogspot.cz* [online]. 2012 [cit. 2017-01-17]. Dostupné z: <http://jirifigura.blogspot.cz/2012/09/piezoelektricky-jev.html>
- [3] Piezoelektrický jev. In: *Wikiwand* [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/cs/Piezoelektrick%C3%BD_jev
- [4] JURÁK, Karel a Zuzana NEJEZCHLEBOVÁ. PiezoAplikace: Terminologie. *Časopis DPS Elektronika od A do Z* [online]. CADware, 2015 [cit. 2016-12-06]. ISSN 1805-5044. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz>
- [5] ERHART, Jiří. *Piezoelektrina a feroelektrina: Jevy a jejich vlastnosti* [online]. Liberec: Katedra fyziky FP TUL, nedatováno [cit. 2016-12]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/1057/mod_resource/content/5/FPM_Piezo_prednaska1.pdf
- [6] ERHART, Jiří. *Základy piezoelektriny pro aplikace: Učební texty k semináři* [online]. Brno: Ústav automatizace a měřicí techniky VUT v Brně, 2011 [cit. 2016-12]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf
- [7] Vývoj Dějin Piezoelektrické Keramiky. *Sinocera Piezotronics, INC* [online]. Sinocera Piezotronics, 2016 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://cz.sinopiezo.net/news-1928681>
- [8] SYMETRIE KRYSTALŮ A KRYSTALOVÉ TŘÍDY. *Krystalografická společnost* [online]. Czech and Slovak Crystallographic Association (CSCA), nedatováno [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/kryst/str04d.htm>
- [9] PETZELT, Jan a Milada GLOGAROVÁ. *SEKCE FYZIKY KONDENZOVANÝCH LÁTEK: DIELEKTRIKA* [online]. In: Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, 2003, s. 237-243 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: https://www.fzu.cz/sites/default/files/petzelt_glogarova.pdf
- [10] Obecná mineralogie: Základní pojmy. *Muzeum Mineral* [online]. nedatováno [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://muzeum.mineral.cz/mineralogie>
- [11] Dielektrická a magnetická polarizace. *Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK* [online]. nedatováno [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz>
- [12] ERHART, Jiří a Petr DESENSKÝ. *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky: Navaříme si elektřinu aneb výlet do světa elektrických dipólů* [online]. Veletrh 17. Praha: Univerzita Karlova, Praha, 2012 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/17-07-Erhart.html>
- [13] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [14] Dielektrika: Teorie dielektrik. *Dielektrika: Fyzika normálních dielektrik* [online]. Plzeň: katedra obecné fyziky Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz>
- [15] NERUDA, Jan. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: Historie vzniku elektretu. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. Praha: JČMF, 1960, 718-728 [cit. 2017-02-17]. ISSN 0032-2423. Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/138259>
- [16] *Elektrické vlastnosti pevných látek: Dielektrika* [online]. In: Praha: VŠCHT Praha, nedatováno, s. 1-38 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://uchpel.vscht.cz/>

- [17] HOFMANN, Jaroslav a Marie URBANOVÁ. *Fyzika I* [online]. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011 [cit. 2017-02-17]. ISBN 978-80-7080-777-4. Dostupné z: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/>
- [18] Dielektrikum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>
- [19] Mechatronika učebnice. MAIXNER, Ladislav. *Mechatronika: učebnice*. Brno: Computer Press, 2006, s. 127-128. Učebnice (Computer Press). ISBN 80-251-1299-3.
- [20] ERHART, Jiří. Demonstrujeme piezoelektrický jev. *Matematika, fyzika, informatika: časopis pro výuku na základních a středních školách*. Praha: Prometheus, 2011, 20(2), 106-109. ISSN 1210-1761
- [21] Snímače mechanického namáhání: Piezoelektrický jev. *ELEKTRONICKÁ UČEBNICE: ELUC* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1590>
- [22] *Základy piezokeramické technologie: Piezoelektrický princip, perovskit a polarizace* [online]. CeramTec [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials>
- [23] *Tenkovrstvé piezoelektrické senzory* [online]. In: Praha: VŠCHT, s. 1-61 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf?redirected
- [24] *Magnetostrikce* [online]. Encyklopedie Cojeco, 2000 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: http://www.cojeco.cz/index.php?id_desc=55782&s_lang=2&detail=1&title=Magnetostrikce
- [25] *Aplikace piezoelektrických prvků v mechanických a akustických soustavách*. Editor Jiří ERHART, editor Martin PUSTKA, editor Petr PŮLPÁN. Liberec: VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-57-8.
- [26] *Piezoelektrické jevy: Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikací v moderní technologiích* [online]. In: Praha: ČVÚT, nedatováno, s. 1-25 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf
- [27] *Magazín Ekologické bydlení* [online]. Stará Boleslav: Chamanne s.r.o, 2011 [cit. 2017-02-17]. ISSN 1803-0211. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/tag/piezoelektricky-jev>
- [28] KOUKOLÍK, Václav. *Využití piezoelektrického jevu v praxi* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal>. Diplomová práce. Západočeská univerzita Plzeň. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [29] *Noliac* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.noliac.com/>
- [30] ČSN IEC/TR 61340-1. *Elektrostatika - Část 1: Elektrostatické jevy - Principy a měření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [31] *Triboelektrická řada. Fyzmatik.píše* [online]. 2010 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/411-triboelektricka-rada.html>
- [32] *Triboelektrický jev*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Triboelektrický_jev
- [33] *STEMiNC: Steiner & Martins, INC.* [online]. nedatováno [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://www.steminc.com>
- [34] *Micromechanics, Inc.* [online]. nedatováno [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.mmech.com/transformers>
- [35] *Ceratec, Inc.* [online]. nedatováno [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.ceratecinc.com>

- [36] <http://www.transoner.com/performance-faq/> *Transoner: Face Electronics, LC* [online]. nedatováno [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.transoner.com/performance-faq/>
- [37] *FUJI & CO.* [online]. nedatováno [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://www.fuji-piezo.com>
- [38] <http://www.konghong.com/> *KONGHONG: focus piezo innovation* [online]. nedatováno [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.konghong.com>
- [39] *Elpa* [online]. nedatováno [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.elpapiezo.ru>
- [40] Piezoelectric Transformers: An Historical Review. In: *Actuators* [online]. 24.4.2016. USA: Micromechatronics, 2016, 5(2), s. 12- [cit. 2017-03-11]. DOI: 10.3390/act5020012. ISSN 2076-0825. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-0825/5/2/12>
- [41] E.L. HORSLEY, E.L., M.P. FOSTER a D.A. STONE. *State-of-the-art Piezoelectric Transformer Technology* [online]. Sheffield, S1 3JD, England: The University of Sheffield, nedatováno [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com>
- [42] *Piezoelectric Transformer Characterization and Application of Electronic Ballast: Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering* [online]. Blacksburg, Virginia, 2001 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com>. Dizertační. Virginia Polytechnic Institute and State University. Vedoucí práce Dr. Fred C. Lee.
- [43] CARAZO, A. Vázquez. *Piezoelectric Transformers for Space Applications*. Norfolk, Virginia, USA: Department of R&D Engineering, Face Electronics, LC, 2009.
- [44] ERHART, J. a P. DESENSKÝ. Navaříme si elektřinu aneb výlet do světa elektrických dipólů. *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky* [online]. Praha: Veletrh 17, 2012 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/17-07-Erhart.html>
- [45] ERHART, J. Piezoelektrické "chytré" materiály pro elektrotechniku: PZT keramika. *FCC Public: Média navazující na tradiční české odborné literatury* [online]. 2002, 4-7 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: [z:http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110204.pdf](http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110204.pdf)
- [46] PROCHÁZKA, Josef. *Simulační modelování piezo-generátoru* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42721. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.
- [47] ERHART, J. a P. PŮLPÁN. Parametry piezoelektrických unimorfů. *FCC Public: Média navazující na tradiční české odborné literatury* [online]. 2005, 4-7 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010504.pdf>
- [48] ERHART, J. a P. PŮLPÁN. Parametry piezoelektrických bimorfů. *FCC Public: Média navazující na tradiční české odborné literatury* [online]. 2002 [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010504.pdf>
- [49] InTech. Polarizing of a piezoelectric ceramic. In: *InTech: Open science, open mind* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/source/html/19252/media/image4.png>
- [50] GÁBOR, Kovácsziak. Unimorf. In: *InTech: Open science, open mind* [online]. 2012 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/EnelSlovensko/play-energy-2012-piezo-dopravn-retardr-projekt>

Seznam obrázků

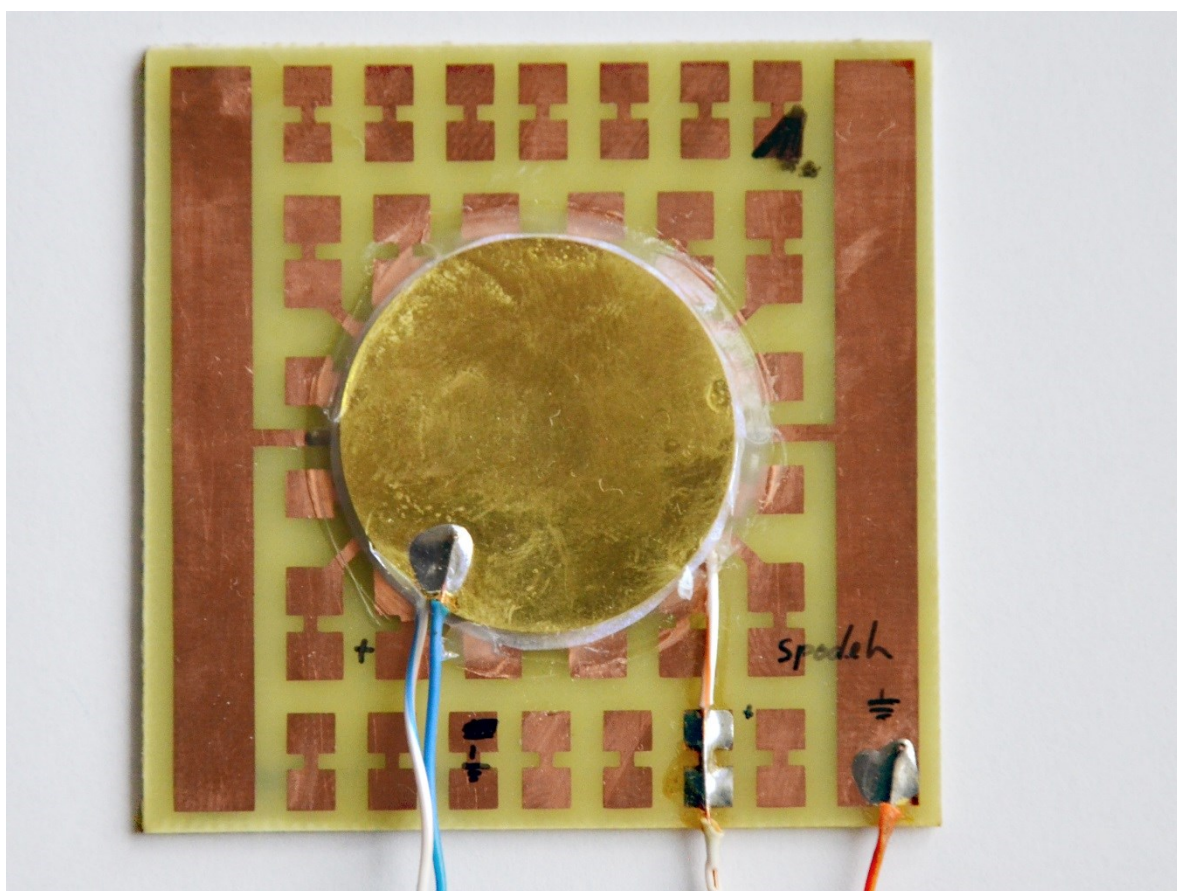
obr. 1	Diagram rozdělení dielektrik	strana 15
obr. 2	Druhy polarizačních mechanismů	strana 17
obr. 3	Chaoticky rozmístěné dipóly a ideálně rozmístěné dipóly	strana 19
obr. 4	Polarizace nepolární látky	strana 20
obr. 5	Silou nezdeformovaná buňka a působení síly na buňku	strana 22
obr. 6	Přímý piezoelektrický jev	strana 23
obr. 7	Nepřímý piezoelektrický jev	strana 23
obr. 8	Princip funkce piezoelektrického transformátoru typu Rosen	strana 28
obr. 9	Další topologie Rosenova piezo-transformátoru	strana 30
obr. 10	Aplikace PT na ovládací jednotce LCD displeje Apple PowerBook	strana 31
obr. 11	Druhy mechanických kmitů piezoelektrických transformátorů	strana 32
obr. 12	Piezoelektrický transformátor Rosenova typu	strana 33
obr. 13	PT Rosenova typu, pracující na třetím řádu podélných kmitů	strana 33
obr. 14	Prstencový PT a PT s půlměsíčovými elektrodami	strana 34
obr. 15	Prstencové PT a diskový PT	strana 34
obr. 16	Kruhový PT typu ring-dot	strana 35
obr. 17	Prstencový PT typu ring-dot	strana 35
obr. 18	Pravoúhlé varianty PT typu ring-dot	strana 35
obr. 19	PT typu ring-dot ve tvaru tyčinky	strana 36
obr. 20	Ohybové PT dvouvrstvý a jedno-vrstvý	strana 36
obr. 21	PT založen na principu tloušťkově střížných kmitů	strana 37
obr. 22	PT – tloušťkově rozpínavý mód	strana 37
obr. 23	PT konstrukce Transoner	strana 38
obr. 24	PT založené na doménovém inženýrství – dle polarizace	strana 39
obr. 25	PT založené na doménovém inženýrství – dle segmentů	strana 39
obr. 26	PT založené na doménovém inženýrství s nesymetrickým tvarem elektrod	strana 40
obr. 27	Řídicí obvod pro ovládání MOSFET tranzistoru s PT	strana 41
obr. 28	Prototyp PT pro monitorování vysokého napětí + schéma	strana 42
obr. 29	Vysokonapěťový PT umístěn v pohonné jednotce	strana 42
obr. 30	Schéma napájení TWT	strana 43
obr. 31	EPC s piezotransformátorem	strana 43
obr. 32	Proces polarizace piezokeramika	strana 44
obr. 33	Unimorf	strana 46
obr. 34	Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru	strana 47
obr. 35	Zjednodušené náhradní schéma piezoelektrického transformátoru	strana 48
obr. 36	Náhradní obvod vyráběných piezo-transformátorů	strana 50
obr. 37	Ukázka jednovrstvého PT (výrobní číslo: SMSTF68P10S9)	strana 51
obr. 38	Ukázka mnohovrstvého PT (výrobní číslo: SMMTF53P4S50)	strana 51
obr. 39	Příklad PT typu Transoner o výkonech 40 W, 5 W, 15 W a 30 W	strana 53
obr. 40	Vzhled obdélníkového pouzdra step-down PT	strana 55
obr. 41	Náhradní obvod T1-Transoner	strana 56
obr. 42	Piezo-transformátor PT PT291C3	strana 57
obr. 43	Piezo-transformátor LNA3207A	strana 57
obr. 44	PT nabízené společností Ceratec	strana 58
obr. 45	PT nabízené společností KongHong	strana 59
obr. 46	Postup výroby vzorku 2 piezoelektrického transformátoru	strana 62
obr. 47	Schéma zapojení pro měření přenosu piezo-transformátoru	strana 63
obr. 48	Průběh měření vzorku č. 3	strana 63
obr. 49	Frekvenční závislost vstupního proudu při $RZ = 50 \Omega$	strana 66
obr. 50	Frekvenční závislost výstupního výkonu při $RZ = 50 \Omega$	strana 66
obr. 51	Frekvenční závislost účinnosti a transformačního poměru při $RZ = 50 \Omega$	strana 67

obr. 52	Schéma aplikace pro řízení motoru	strana 67
obr. 53	Kompletní aplikace pro řízení motoru s využitím 4. vzorku PT	strana 68
obr. A-1	První vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru	Příloha A
obr. A-2	Druhý vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru	Příloha A
obr. A-3	Třetí vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru	Příloha A
obr. A-4	Čtvrtý vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru	Příloha A
obr. B-1	Frekvenční závislost vstupního proudu při $RZ = 10 \text{ k}\Omega$	Příloha B
obr. B-2	Frekvenční závislost výstupního výkonu při $RZ = 10 \text{ k}\Omega$	Příloha B
obr. B-3	Frekvenční závislost účinnosti při $RZ = 10 \text{ k}\Omega$	Příloha B

Příloha A

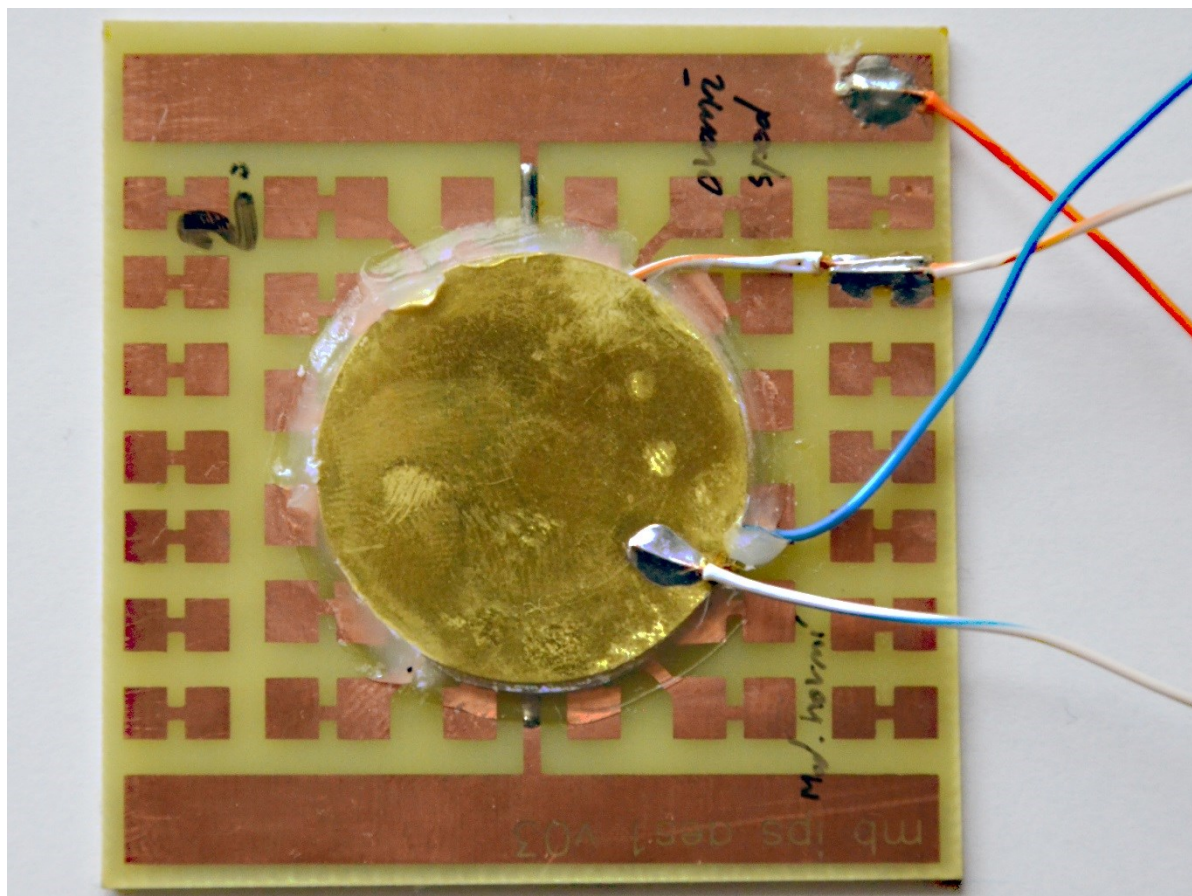
Fotografie vyrobených vzorků piezoelektrických transformátorů

Na obrázku A-1 je fotografie prvního vzorku. Ten byl vytvořen slepením dvou unimorfů. Elektrody z PTZ keramiky směřují v tomto případě k sobě. Vstupní a výstupní část je u tohoto vzorku oddělena papírem impregnovaným vteřinovým lepidlem.



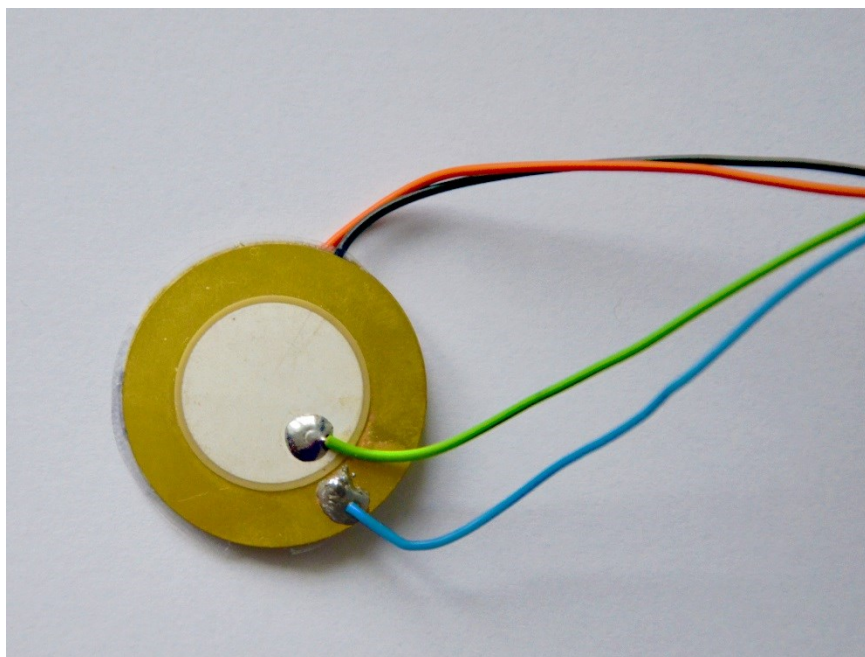
Obr. A-1: První vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru

Na obrázku A-2 je fotografie druhého vzorku. Ten byl vytvořen slepením dvou unimorfů. Elektrody z PTZ keramiky směřují k sobě. Vstupní a výstupní část je oddělena fólií s velkou permitivitou.



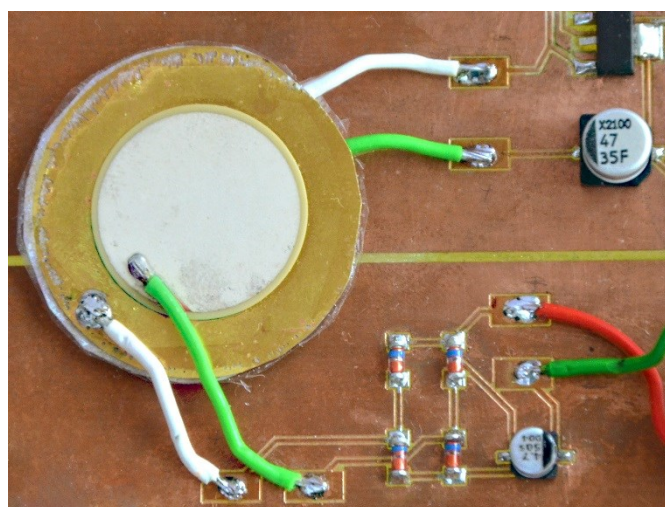
Obr. A-2: Druhý vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru

Fotografie vzorku č. 3. je na obr. A-3. U tohoto vzorku byla změněna architektura stavby. Elektrody z PTZ keramiky nesměřují k sobě, jako u předchozích vzorků, ale PZT elektroda vstupní části je přes fólii přilepena k mosazné elektrodě („k zádům“) výstupní části piezoelektrického transformátoru.



Obr. A-3: Třetí vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru

Vzorek č. 4. s odleptanou mosazí a s elektrodami PTZ „zády“ k sobě. Vstupní a výstupní část je oddělena papírem impregnovaným vteřinovým lepidlem. Tento vzorek byl využit v aplikaci pro ilustraci funkce.

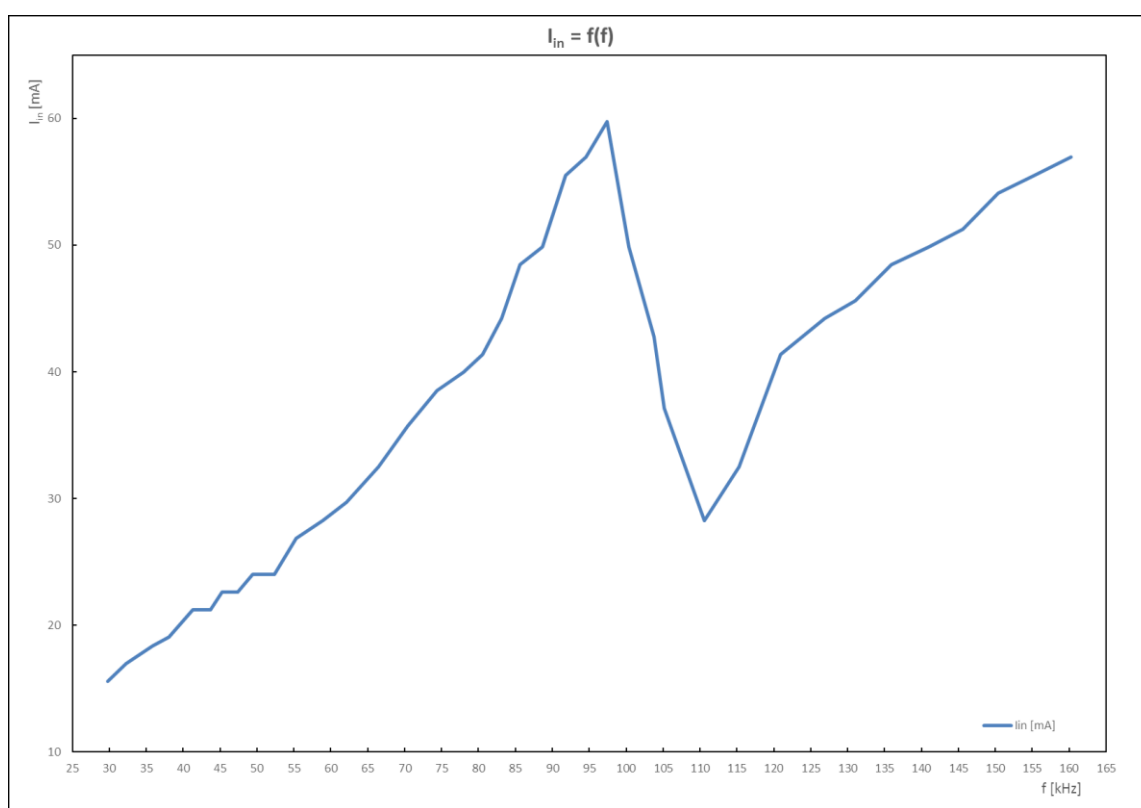


Obr. A-4: Čtvrtý vzorek slepeného piezoelektrického transformátoru

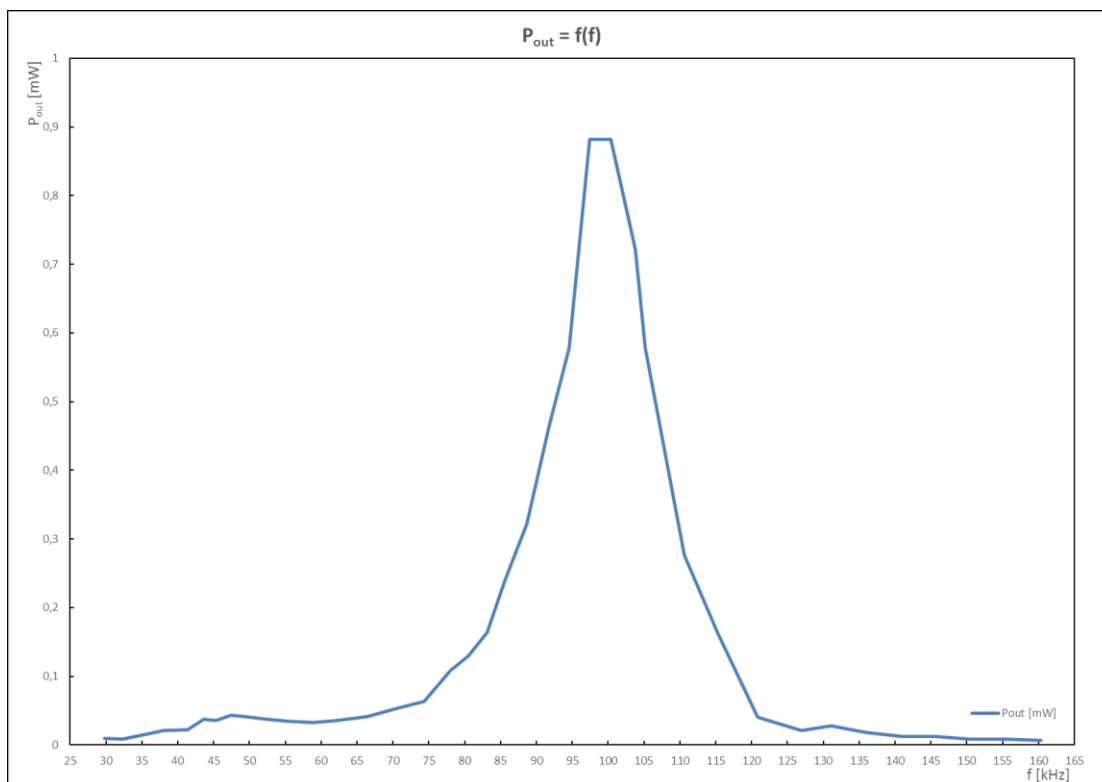
Příloha B

Frekvenční charakteristiky vzorku č. 4 při zátěži 10 k Ω

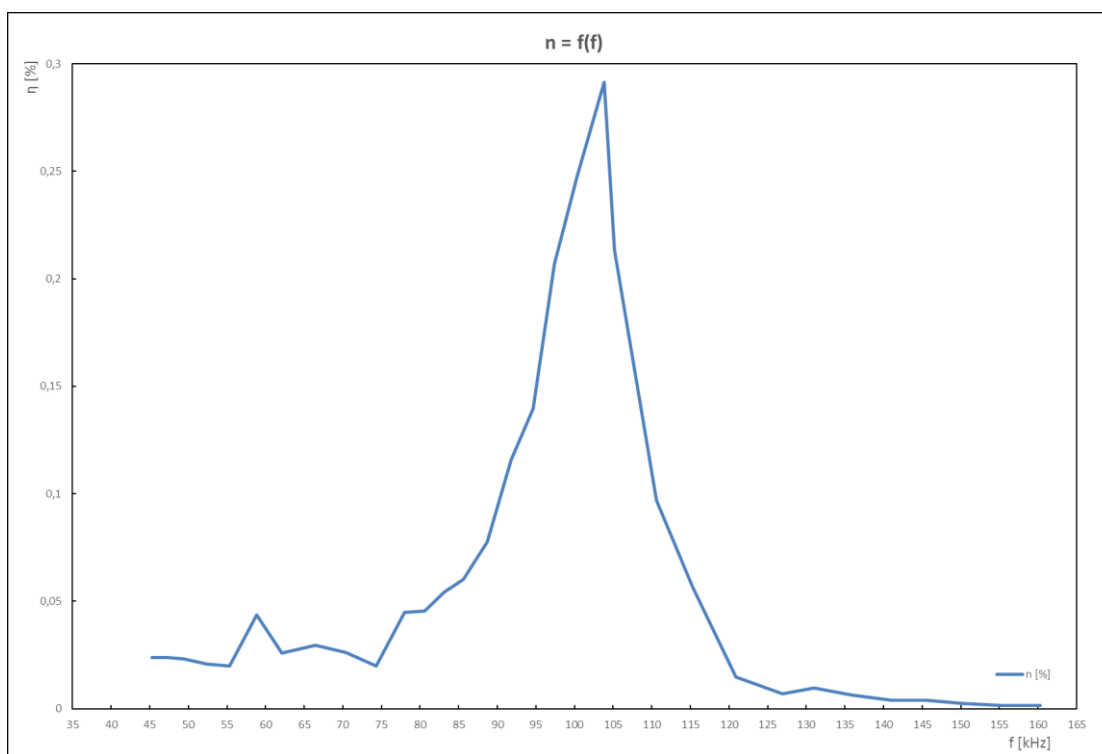
Při zatížení odporem R_Z o velikosti 10 k Ω bylo dosaženo nejvyšší hodnoty výstupního výkonu 2,5 mW při frekvenci 100,4 kHz a nejvyšší účinnosti přenosu 0,3 % při frekvenci 100,8 kHz. Je tedy patrné, že účinnost přenosu je silně závislá nejen na frekvenci, ale také na zátěži. Frekvenční závislost vstupního proudu, výstupního výkonu a účinnosti při zatížení 10 k Ω a vstupním napětí 4,4 V lze vidět na obrázcích B-1 až B-3 níže.



Obr. B-1: Frekvenční závislost vstupního proudu při $R_Z = 10 \text{ k}\Omega$



Obr. B-2: Frekvenční závislost výstupního výkonu při $R_Z = 10\text{ k}\Omega$



Obr. B-3: Frekvenční závislost účinnosti při $R_Z = 10\text{ k}\Omega$