

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Romana Pokorná



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

PŘÍPRAVA A OPTIMALIZACE ELEKTRICKY ZVLÁKŇOVANÝCH MATERIÁLŮ VHODNÝCH JAKO GENERÁTORY ELEKTRICKÉ ENERGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Romana Pokorná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Tofel, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Bioinženýrství**

Ústav biomedicínského inženýrství

Studentka: Bc. Romana Pokorná

ID: 203396

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Příprava a optimalizace elektricky zvláknovaných materiálů vhodných jako generátory elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte a popište problematiku zabývající se „energy harvesting“. 2) Seznamte se s přípravou různých elektricky zvláknovaných materiálů vhodných pro energy harvesting. 3) Vyroberte funkční generátory energie a proměřte jejich vlastnosti. 4) Optimalizujte vybrané generátory s cílem dosažení co nejvyššího výkonu. 5) Výsledky vhodným způsobem prezentujte a diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] A. Erturk, D.J. Inman, Piezoelectric Energy Harvesting, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2011. doi:10.1002/9781119991151.

[2] S. Priya, D.J. Inman, eds., Energy Harvesting Technologies, Springer US, Boston, MA, 2009. doi:10.1007/978-0-387-76464-1.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 20.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Pavel Tofel, Ph.D.

doc. Ing. Radim Kolář, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá energy harvestingem a je rozdělena na dvě části: teoretickou a praktickou. V teoretické části práce jsou nejprve popsány dielektrické parametry, je vysvětlen význam piezoelektrického a triboelektrického jevu a jsou představeny a popsány principy zisku elektrické energie. Poslední kapitola teoretické části práce je věnována různým elektricky zvlákněvaným materiálům vhodných pro energy harvesting. Praktická část práce je zaměřena na nanovláknna jakožto generátory energie. Právě v této části jsou proměřeny vybrané dielektrické parametry: dielektrická konstanta (relativní permitivita) a ztrátový činitel. Dále je vyroben funkční triboelektrický nanogenerátor a jsou proměřeny jeho vlastnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energy harvesting, nanovláknna, piezoelektrický jev, triboelektrický jev, dielektrická konstanta (relativní permitivita), ztrátový činitel ($\tan \delta$), triboelektrický nanogenerátor (TENG)

ABSTRACT

This master's thesis is focused on energy harvesting and is divided into two parts: theoretical and practical part. The theoretical part of the thesis contains the dielectric parameters, the meaning of the piezoelectric and triboelectric effect and the principles of electric energy gain in energy harvesting. The last chapter of the theoretical part is devoted to various electrospun materials suitable for energy harvesting. The practical part of the work deals with nanofibers as an energy generator and describes their dielectric parameters. In this part the relative permittivity and loss factor of selected types of nanofibers are measured. Also the triboelectric nanogenerator is made and its properties are measured.

KEYWORDS

Energy harvesting, nanofibers, piezoelectric effect, triboelectric effect, dielectric constant (relative permittivity), dielectric dissipation factor ($\tan \delta$), triboelectric nanogenerator (TENG)

POKORNÁ, Romana. *Příprava a optimalizace elektricky zvlákňovaných materiálů vhodných jako generátory elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství, 2022, 61 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Pavel Tofel, PhD.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Romana Pokorná
VUT ID autora:	203396
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Příprava a optimalizace elektricky zvláknovaných materiálů vhodných jako generátory elektrické energie

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Tofelovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Nanovlákná	12
2 Dielektrika	15
2.1 Elektrická polarizace dielektrik	15
2.2 Dielektrické parametry	16
3 Piezoelektrický jev	18
3.1 Princip piezoelektrického jevu	18
3.2 Piezoelektrické materiály	19
4 Triboelektrický jev	22
4.1 Princip triboelektrického jevu	22
4.2 Triboelektrický nanogenerátor	23
5 Energy harvesting	27
5.1 Mechanická energie	28
5.2 Tepelná energie	29
5.3 Elektromagnetické záření	30
6 Elektricky zvláknitelné materiály vhodné pro energy harvesting	31
6.1 Zvláknitelné materiály pro energy harvesting	32
7 Praktická část	35
7.1 Měření relativní permitivity a ztrátového činitele u BCZT/PVDF nanovláken	36
7.2 Měření relativní permitivity a ztrátového činitele u BT/PVDF nanovláken	41
7.3 Měření dielektrických parametrů u dalších druhů nanovláken	43
7.4 Generátor energie	45
7.5 Optimalizace generátoru	51
Zhodnocení výsledků a diskuse	53
Závěr	56
Literatura	58

Seznam obrázků

1.1	Srovnání lidského vlasu s nanovláknem [3]	12
1.2	Základní schéma elektrostatického zvlákňování [5]	13
3.1	Princip piezoelektrického jevu: a) molekula v klidu, b) deformace molekuly vnější silou [10]	18
3.2	Perovskitová struktura: a) nad Curieho, b) pod Curieho teplotou [15]	19
3.3	Krystalické fáze PVDF: a) alfa, b) beta, c) gama fáze [17]	21
4.1	Seznam materiálů uspořádaných v triboelektrické řadě podle jejich tendence ztrácet nebo získávat elektrony [19]	23
4.2	Schéma fungování čtyř základních režimů triboelektrických nanogenerátorů [19]	24
4.3	Aplikace triboelektrického nanogenerátoru [21]	25
5.1	Druhy energie pro energy harvesting [23]	27
5.2	Model piezoelektrického generátoru [24]	28
5.3	Seebeckův jev [23]	30
6.1	a) piezoelektrický převodník energie, b) rukavice s kapsou [29]	33
7.1	Alpha-A Analyzer [35]	35
7.2	Dielectric Test Fixture	35
7.3	Nanovláknata spinována na alobal (vlevo) a nanovláknata nastříhána na vzorky 2x2 cm (vpravo)	36
7.4	Závislost relativní permitivity na frekvenci u 10 % BCZT/PVDF nanovláken	37
7.5	Závislost $\tan \delta$ na frekvenci u 10 % BCZT/PVDF nanovláken	37
7.6	Hodnoty permitivity na frekvenci 1 kHz u 10 % BCZT/PVDF nanovláken	38
7.7	Hodnoty $\tan \delta$ na frekvenci 1 kHz u 10 % BCZT/PVDF nanovláken	38
7.8	Vrchní (vlevo) a spodní část (vpravo) TENG	45
7.9	Triboelektrický nanogenerátor	45
7.10	TENG v klidu (vlevo) a TENG při zátěži (vpravo)	46
7.11	KEYSIGHT osciloskop [36]	46
7.12	Průběh napětí při mechanickém namáhání TENG	47
7.13	KEITHLEY elektrometr (vlevo) [37] a odporový dekádní box (vpravo) [38]	51
7.14	Závislost středního výkonu na odporu	52
7.15	Závislost středního výkonu na tloušťce nanovláken	54
7.16	Závislost středního výkonu na příměších v nanovláknatě	55

Seznam tabulek

7.1	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 10 % BCZT/PVDF nanovláken	39
7.2	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 20 % BCZT/PVDF nanovláken	39
7.3	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 30 % BCZT/PVDF nanovláken	40
7.4	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 40 % BCZT/PVDF nanovláken	40
7.5	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 50 % BCZT/PVDF nanovláken	41
7.6	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 40 % BT/PVDF nanovláken	41
7.7	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 50 % BT/PVDF nanovláken	42
7.8	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u PVDF nanovláken	43
7.9	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 10 % BTO/PVDF nanovláken	44
7.10	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 10 % TiO ₂ /PVDF nanovláken	44
7.11	Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu ve špičce u PVDF nanovláken . . .	47
7.12	Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 10 % BTO/PVDF nanovláken .	48
7.13	Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 10 % TiO ₂ /PVDF nanovláken .	48
7.14	Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % BCZT/PVDF nanovláken .	48
7.15	Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % PVDF DMSO/AC + 20 % BaTiO ₃ nanovláken	49
7.16	Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % PVDF DMSO/AC + 20 % kalcinovaný BaTiO ₃ nanovláken	49
7.17	Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % PVDF DMSO/AC + 20 % TiO ₂ nanovláken	50
7.18	Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u nanovláken seřazené od nej- vyšší hodnoty ϵ_r po nejnižší	53
7.19	Hodnoty tloušťky vláken a průměrného středního výkonu	54

Úvod

S rozvojem lidské civilizace a rychlým pokrokem ve vědě nastává otázka, jak nahradit neobnovitelné zdroje energie, jako je uhlí, ropa a zemní plyn. Proto se v posledních letech čím dál více klade důraz na alternativní získávání elektrické energie. Existuje spousta forem energie, které lze sbírat a využívat z okolního prostředí, např. je to mechanická, tepelná nebo chemická energie. Touto problematikou se zabývá energy harvesting.

Energy harvesting v českém jazyce doslova znamená "sklizeň energie". Tento proces zahrnuje zachycení energie z okolního prostředí, přeměnu této energie na energii elektrickou a následné uchování energie ve vhodných zařízeních. Nasbíraná energie se poté využívá pro napájení autonomních elektronických zařízení nebo obvodů. V energy harvesting se získává nevyužívaná energie z okolních zdrojů, jako jsou vibrace, teplo nebo světlo. Množství zachycené energie ovšem není příliš velké, a tak se nasbíraná energie využívá pro napájení autonomních systémů o menších výkonech (např. senzorová a komunikační technika).

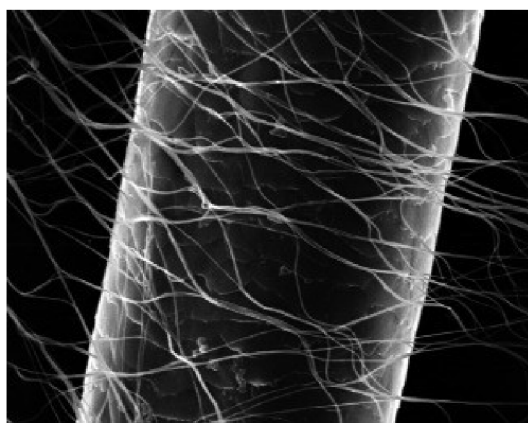
Přínosem této technologie je napájení zařízení bez nutnosti připojení do elektrické sítě nebo použití baterií. Jednou z největších výhod je také to, že takto získaná energie je na rozdíl od fosilních paliv obnovitelná a v některých případech i všudypřítomná (světlo nebo teplo).

Cílem této diplomové práce je seznámit se s problematikou zabývající se energy harvestingem a prostudovat přípravu různých elektricky zvlákněvaných materiálů vhodných pro energy harvesting. V praktické části práce je proměřena dielektrická konstanta (relativní permitivita) a ztrátový činitel vybraných nanovláken. Dále je navržen a vyroben triboelektrický nanogenerátor, tzv. TENG, vhodný pro energy harvesting aplikace.

1 Nanovlákná

Nanovlákná jsou materiály patřící do světa nanotechnologií. Jsou charakteristické tím, že jejich délka mnohonásobně převyšuje jejich průměr. Průměr nanovláken se pohybuje v rozmezí od desítek nanometrů až po mikrometr. Nanovlákná představují spojení mezi světem nanočástic a makroskopickým světem. Na Obr. 1.1 lze vidět srovnání lidského vlasu s nanovláknem. [1, 2]

Mezi nejvýznamnější vlastnosti nanovláken patří velký měrný povrch, vysoká pórovitost, flexibilita a vynikající mechanické vlastnosti v poměru k jejich váze. Díky tomu nacházejí nanovlákná čím dál větší uplatnění. Nalezneme je jak v technických výrobcích (filtry, senzory), ve zdravotnictví (příprava umělých orgánů, dodávka léčiv), tak i v energy harvesting aplikacích. [1, 2]



Obr. 1.1: Srovnání lidského vlasu s nanovláknem [3]

Výroba nanovláken

V dnešní době se vlákna vyrábí pomocí několika technik. Nejznámější a nejpoužívanější je electrospinning, neboli elektrostatické zvlákňování. Mezi další techniky patří samo-uspořádání, dloužení nebo fázová separace. Co se týče materiálů k přípravě vláken, nejčastěji se používají přírodní a syntetické polymery. [2]

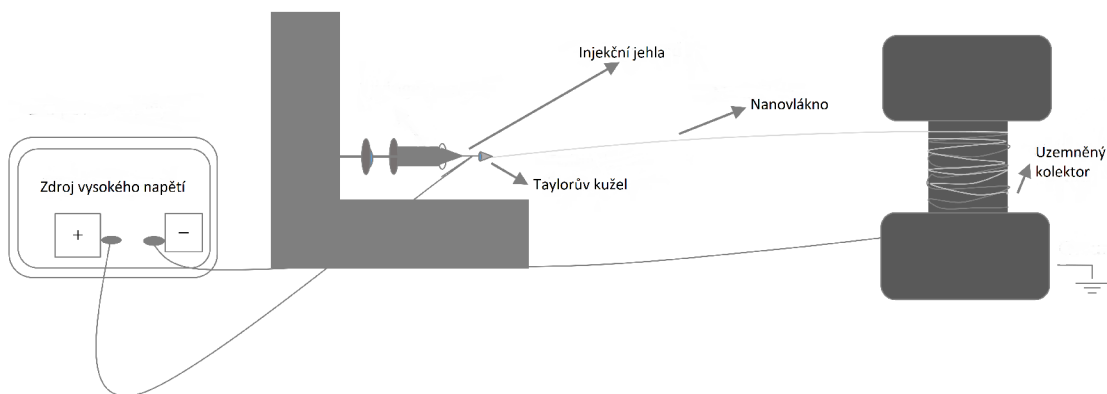
Elektrostatické zvlákňování

Historie elektrostatického zvlákňování (electrospinningu) sahá až do roku 1600, kdy byla provedena studie Williamem Gilbertem, který pozoroval vznik kuželovité vodní kapky v přítomnosti elektrického pole. Asi o jedno století později pozoroval Stephen Gray elektrohydrodynamickou atomizaci kapičky vody, ze které se generoval velmi jemný proud. V roce 1747 provedl Abbé Nollet první známý experiment s elektrosprejem. Prokázal, že voda může být rozstříkována jako aerosol, když prochází

elektrostaticky nabitou nádobou. Roku 1887 Charles V. Boys uvedl, že vlákna lze vyrobit z viskoelastické kapaliny za přítomnosti vnějšího elektrického pole. Použil přístroj sestávající z izolované misky připojené k elektrickému zdroji. Prokázal, že viskózní kapalina (např. včelí vosk a kolodium) mohla být přeměněna do podoby vláken, když se pohybovala k okraji misky. [27]

Nyní je výroba nanovláken pomocí electrospinningu založena na jednotvárném natahování viskoelastického proudu roztoku zvláknitelného materiálu. Zařízení k přípravě vláken (Obr. 1.2) obsahuje tři základní komponenty: zvláknovací elektrodu (kovová tyčinka, jehla nebo váleček), kolektor (rotující nebo pevný) a zdroj vysokého napětí. [4, 27]

Využívá se zde účinku vysokého napětí. To je aplikováno na syntetický nebo přírodní polymer, který je většinou ve formě polymerního roztoku nebo taveniny. Přivedením vysokého napětí do roztoku nebo taveniny vznikne náboj. Kolektor získá záporný náboj a systém kladný náboj. Tím dojde k vytvoření elektrického pole mezi zvláknovací elektrodou a kolektorem (sběračem). Poté, co se elektrostatická síla stane dominantní nad povrchovým napětím kapičky kapaliny, se kapička rozruší. V důsledku toho se na jejím povrchu objeví tzv. Taylorův kužel. To je stav, při kterém se emituje vlákno z kapičky polymeru na uzemněný kolektor. Při letu polymerního jetu (vysokorychlostního proudu) je odpařováno rozpouštědlo a na sběrač dopadají již tuhá vlákna. Ta jsou uspořádána buď náhodile nebo v jednom směru. Záleží na typu kolektoru. [2, 3, 4, 27]



Obr. 1.2: Základní schéma elektrostatického zvláknování [5]

Proces výroby nanovláken je ale i ovlivněn řadou faktorů, zejména materiálovými a procesními parametry.

Mezi materiálové parametry patří vlastnosti polymeru a rozpouštědla, které dohromady tvoří polymerní roztok. Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou reologické vlastnosti polymerního roztoku (viskozita a viskoelastičita). Viskozita (odpor proti tečení) polymerního roztoku ovlivňuje průměr vláken a inicializaci procesu. Viskoelas-

ticita roztoku má vliv na zpevnění jetu během dlužení a na ukládání vláken na sběrač. [2, 6]

Mezi procesní parametry se řadí elektrické napětí, vzdálenost zvlákňovací elektrody od kolektoru a teplota a vlhkost prostředí. Napětí urychluje zvlákňovací proces a běžně se užívá stejnosměrného napětí. Vzdálenost elektrody od kolektoru bývá v rozmezí 5 - 40 cm. Při této vzdálenosti se musí rozpouštědlo plně odpařit a vlákno dostatečně vydloužit. [2, 6]

Samo-uspořádání

Samo-uspořádání neboli self-assembly je další technikou pro výrobu vláken. Využívá se zde malých molekul, které slouží jako základní stavební bloky. Molekuly jsou uspořádány soustředně a jejich samo-organizování se řídí strukturální kompatibilitou a chemickou komplementaritou. Částice jsou samy organizovány a seskupovány do stálé a dobře strukturálně definovatelné podoby. [2, 7]

Dloužení

Další metodou je dlužení (drawing). Lze jej charakterizovat jako suché zvlákňování na molekulární úrovni. Tento proces lze aplikovat pouze na viskoelastické materiály vykazující vysoký stupeň deformací. Ovšem za podmínky, že materiály zůstávají dostatečně pevné, aby byly schopné udržet vyvinuté napětí během tahu. [2, 7]

Fázová separace

Při fázové separaci se fáze separují na základě odlišných fyzikálních vlastností. Na začátku je vždy polymer smíchán s rozpouštědlem a poté dojde ke zgelování polymeru. Dále se rozpouštědlo extrahuje z gelu a ponechá se zbytková fáze. Tento proces je tedy popsán v pěti krocích: rozpouštění polymeru, gelování, extrakce rozpouštědla, zmrazení a lyofilizace ve vakuu. [2, 7]

2 Dielektrika

Je známo, že látky schopné vést elektrický proud se nazývají vodiče. Naopak látky, které tuto schopnost nemají, se nazývají nevodiče (dielektrika a izolanty). Látky, které jsou lépe vodivé než nevodiče a hůře vodivé než vodiče, patří do skupiny polovodičů. Typickými představiteli vodičů jsou kovy, roztoky elektrolytů nebo ionizované plyny (plazma). K nevodičům se řadí sklo nebo většina umělých hmot (polymerů) a k polovodičům např. křemík nebo germanium. [2]

Dielektrika lze tedy z hlediska elektrické vodivosti charakterizovat jako látky, které nevedou elektrický proud. Z hlediska pásové teorie pevných látek se jedná o látky mající zcela zaplněný valenční elektronový pás, a u kterých je šířka zakázaného pásu řádově vyšší než 1 eV. Je-li dielektrikum vystaveno vnějšímu elektrickému poli, nedojde ke změně rychlosti elektronů ani k přeskočení elektronů do vyšších energetických hladin. Nastane jev zvaný polarizace dielektrika. Jedná se o proces, při kterém dochází k přeskupení elektrických nábojů v atomech dielektrika a ke vzniku elektrických dipólů. [8]

2.1 Elektrická polarizace dielektrik

Elektrická polarizace se liší u polárních a nepolárních dielektrik. Při polarizaci nepolárních dielektrik se z atomů nebo molekul stanou elektrické dipóly, přičemž dojde k nesymetrickému rozložení elektricky nabitých částic. Polární dielektrika mají elektrické dipóly i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Směr dipólů je ovšem chaotický a při polarizaci dojde k uspořádání dipólů do jednoho směru. [2, 9]

Rozlišujeme několik druhů polarizací: rychlá (pružná), pomalá (relaxační) a polarizace zvláštní. [9]

Rychlá (pružná) polarizace

Rychlé polarizace se vyznačují krátkou dobou trvání, jelikož proběhnou prakticky okamžitě bez ztrát energie. Patří sem elektronová a iontová polarizace. [9]

- **Elektronová polarizace**

Tento druh polarizace se vyskytuje u všech dielektrik, nedochází zde ke ztrátám energie a není závislá na teplotě. [9]

- **Iontová polarizace**

K iontové polarizaci dochází u iontových krystalů. I tato polarizace probíhá beze ztrát, ovšem už je závislá na teplotě. [9]

Pomalá (relaxační) polarizace

Pomalá polarizace se vyznačuje tím, že během působení elektrického pole polarizace přibývá pomalu a obdobně. Je závislá na teplotě a je vždy provázena ztrátami energie. Rozlišujeme dva typy pomalé polarizace: iontovou relaxační a dipólovou. [9]

- **Iontová relaxační polarizace**

Vyskytuje se u dielektrik s nepravidelně uspořádanými ionty (např. anorganická skla a keramika). Je provázena ztrátami energie a závisí na teplotě a na kmitočtu. [9]

- **Dipólová polarizace**

Tato polarizace se vyskytuje u polárních látek a dochází zde ke ztrátám energie. Je také závislá na teplotě a na kmitočtu. [9]

Zvláštní polarizace

Patří sem mezivrstevová a samovolná polarizace.

- **Mezivrstevová (migrační) polarizace**

Probíhá u látek s makroskopickými nehomogenními strukturami. Jedná se o látky s částicovými či vláknitými plnivými, lamináty, pórovité a pěnové materiály nebo znečištěné látky. V porovnání s ostatními druhy polarizace je tato nejpomalejší a je podmíněná pohybem volných elektrických nábojů. Projevuje se pouze v oblasti velmi nízkých kmitočtů, je závislá na teplotě a dochází zde ke ztrátám energie. [9]

- **Samovolná (spontánní) polarizace**

Vyskytuje se u ferroelektrických látek s tzv. doménovou strukturou. Doménami se nazývají makroskopické oblasti, ve kterých jsou všechny částice plně spontánně polarizovány v důsledku působení vnitřních výměnných sil. Je provázena ztrátami energie a je závislá na kmitočtu, teplotě a na intenzitě elektrického pole. [9]

2.2 Dielektrické parametry

Pro tuto diplomovou práci jsou důležité dva dielektrické parametry: relativní permitivita a ztrátový činitel.

Relativní permitivita

Relativní permitivita, známá také jako dielektrická konstanta, je hlavním parametrem dielektrika. Z makroskopického hlediska charakterizuje chování dielektrika v elektrostatickém poli. Jde o bezrozměrnou veličinu, která představuje míru polarizace v látce. Pro různá dielektrika může nabývat hodnot od nepatrně větších než 1 až po hodnoty řádu 10^4 . Je definována vztahem (2.1). [2, 8, 9]

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} [-], \quad (2.1)$$

kde ϵ je permitivita daného materiálu a ϵ_0 představuje permitivitu vakua.

Ztrátový činitel

Dielektrické ztráty jsou závislé na materiálu a na elektrickém poli. Působením elektrického pole na dielektrikum totiž dochází ke vzniku nestacionárních pochodů. To má za následek ztráty energie, které jsou provázené ohřevem dielektrika. Jsou také příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem. [9]

V případě ideálního dielektrika je fázový posun ϕ mezi napětím a proudem roven 90° a ztráty jsou nulové: ztrátový úhel δ je roven 0. Ovšem u skutečného dielektrika je fázový posun menší než 90° . Platí vztah:

$$\phi = 90^\circ - \delta \quad (2.2)$$

Ztrátový činitel poté představuje tangens ztrátového úhlu, značí se $\tan \delta$ a je bez jednotky. Obvykle bývá v rozmezí 10^{-1} až 10^{-5} . [9]

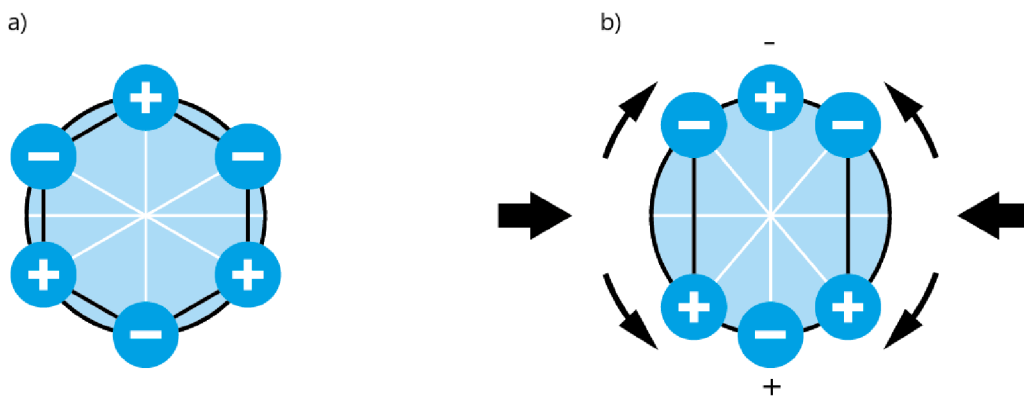
3 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev byl poprvé popsán roku 1880 bratry Pierem a Jacquem Curieovými, když pozorovali krystaly turmalínu. Jejich experiment spočíval v tom, že vlivem mechanického namáhání krystalu došlo ke vzniku nábojů různé polarity na plochách krystalu. Schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování se tedy nazývá jako přímý piezoelektrický jev.

Bratři Curieovi však netušili, že krystaly vykazující přímý piezoelektrický jev mohou vykazovat také jev opačný: deformace krystalu nastane po jeho vložení do elektrického pole. Tato vlastnost byla matematicky odvozena roku 1881 panem Gabrielem Lipmannem. Jev je znám jako nepřímý piezoelektrický jev. [2, 10]

3.1 Princip piezoelektrického jevu

Piezoelektrický jev může nastat pouze u krystalů bez středu symetrie. To znamená, že při deformaci krystalu, středy kladného a záporného náboje nebudou symetrické. Za normálního stavu krystalu, tj. nedeformovaného, jsou náboje rozmístěny symetricky a celkový náboj na povrchu je nulový. Když ovšem začne docházet k deformaci krystalu vnější silou, jako je např. stlačení nebo ohyb, ionty opačných nábojů se od sebe vzdálí. Díky tomu se na určitých plochách krystalu objeví elektrický náboj, který vyvolá vnitřní elektrické pole v krystalu (obr. 3.1). [2, 10]



Obr. 3.1: Princip piezoelektrického jevu: a) molekula v klidu, b) deformace molekuly vnější silou [10]

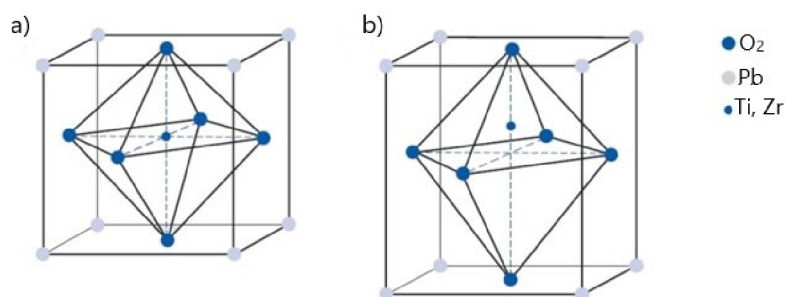
3.2 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály jsou materiály vykazující piezoelektrický jev. Lze je dělit podle struktury (monokrystaly, piezoelektrická keramika a piezoelektrické polymery) a podle hodnoty Curieovy teploty (látka ztratí své piezoelektrické vlastnosti nad Curieovu teplotu). Pro tuto diplomovou práci jsou důležité zejména piezoelektrické keramiky a polymery. [2]

Piezoelektrická keramika

Nejvíce zkoumanou skupinou piezokeramik je keramika s perovskitovou strukturou. Obecný vzorec pro takovouto sloučeninu je ABO_3 . Kationty A^{2+} obsazují rohy krychle/kvádru (například kationt baria (Ba) nebo olova (Pb)). Anionty kyslíku O^{2-} obsazují středy stěn krychle/kvádru a kationt B^{4+} leží v jejím (jeho) středu (kationt titanu (Ti) nebo zirkonia (Zr)). [13, 15]

Při teplotách nad Curieho teplotu se těžiště kladného a záporného náboje nachází ve stejném bodě (struktura je středově symetrická) a v materiálu se nenachází žádné dipólové momenty. Při nižších teplotách než je Curieho, dochází k vychýlení středového kationtu B^{4+} , a tím dochází ke vzniku elektrického dipólu. Krystalová soustava se stává středově nesymetrická (tetragonální nebo rombická) obr. 3.2. [13, 15]



Obr. 3.2: Perovskitová struktura: a) nad Curieho, b) pod Curieho teplotou [15]

Piezokeramiky jsou tradičně polykrystalického charakteru a tvoří se spečením zrn z určité piezoelektrické látky. Ovšem po spečení tento materiál piezoelektrický jev ještě nevykazuje, jelikož jednotlivá zrna jsou orientovaná náhodně, tedy směr elektrického dipólu se liší v jednotlivých doménách. Proto je materiál vložen do stejnosměrného elektrického pole, kde dojde k jeho polarizaci jako celku. Tím pádem elektrické dipólové momenty srovnají svoji orientaci a materiál zůstává polarizován i po vyjmutí z pole. Takto polarizovaný materiál může vykazovat přímý i nepřímý piezoelektrický jev. [2, 13, 14]

První objevenou keramikou byl titaničitán barnatý (BT). Ten byl ale později nahrazen tzv. PZT keramikou (tuhý roztok $PbTiO_3$ a $PbZrO_3$), která má lepší piezoelektrické vlastnosti. PZT ovšem obsahuje toxické olovo, a proto se čím dál více nahrazuje bezolovnatými keramikami. [13, 14]

Piezokeramiky můžeme tedy dělit na olovnaté a bezolovnaté. Do olovnatých patří již zmiňovaná PZT keramika a její deriváty. Do skupiny bezolovnatých keramik se řadí BT, KNN keramiky, BNT-BT keramiky a BCZT keramiky. [13, 14]

Piezoelektrické polymery

Poprvé byl piezoelektrický jev v polymerech popsán r. 1969 panem H. Kawainem. Tento jev byl připisován určité krystalické struktuře v polymerech během tuhnutí taveniny. Piezoelektrické polymery vykazují větší flexibilitu než piezokeramiky. Vyznačují se velkou pevností, jednoduchou zpracovatelností, nízkou toxicitou a možností zpracování do nanostruktur. Ovšem co se týče hodnot piezoelektrických parametrů, piezopolymery je mají řádově nižší než piezokeramiky. Nejznámějšími zástupci jsou PVDF a PVF2. [2, 16]

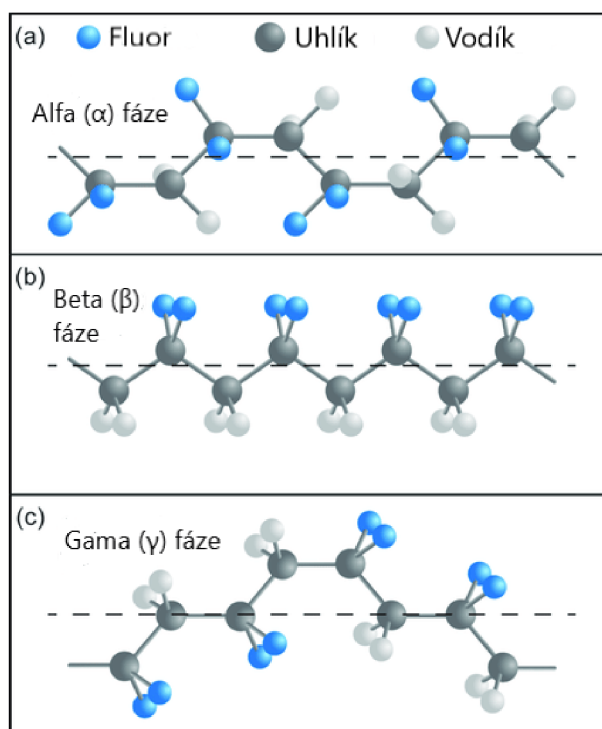
Polyvinylidenfluorid (PVDF)

Jedná se o semikrystalický termoplastický polymer, jenž vykazuje piezo-, pyro- a ferroelektrické vlastnosti. PVDF se skládá z opakujícího se uhlíkového řetězce se střídavými vodíkovými a fluorovými jednotkami $-(CH_2-CF_2)_n-$. PVDF existuje v 5 různých krystalických fázích: alfa (α), beta (β), gama (γ), delta (δ) a epsilon (ϵ). První tři fáze jsou zobrazeny na obr. 3.3. Fáze α a β jsou nejčastěji se vyskytující fáze. γ fáze představuje přechodný stav mezi α a β , a proto není tak častá. Zbylé dvě fáze, δ a ϵ , se obtížněji izolují a obvykle je nelze nalézt pomocí konvenčních zpracovatelských technik. [17]

Fáze α je nepolární a vzniká přirozeně při tuhnutí z taveniny. Dipólové momenty krystalitů jsou uspořádány antiparalelně, díky čemuž pak dochází k jejich vzájemnému vyrušení. [2, 17]

Fáze β je polární a je možné ji získat řízenou krystalizací nebo mechanickým protažením za vyšších teplot. Atomy vodíku a fluoru jsou zde uspořádány tak, aby bylo dosaženo maximálního dipólového momentu. Tzn. že dipóly polymeru jsou seřídány ve stejném směru. Zisk piezoelektrického jevu z PVDF je výsledkem jeho polarizace. Právě β fáze je ze všech polárních fází nejvíce spontánně polarizována, proto vykazuje nejlepší piezoelektrické vlastnosti. [2, 17]

PVDF nachází široké uplatnění v biomedicíně, v aplikacích energy harvesting, ve vývoji senzorů a ovladačů. Dále se používá ve filtračních a separačních zařízeních (membrány, filtry, pouzdra). [17]



Obr. 3.3: Krystalické fáze PVDF: a) alfa, b) beta, c) gama fáze [17]

4 Triboelektrický jev

Triboelektrický jev je znám již tisíce let. Kolem roku 600 př. n. l. Thalés z Milétu pozoroval, že třením jantaru vhodnou látkou došlo ke vzniku elektrostatického náboje a jantar tak přitahoval lehké předměty (např. list nebo peříčko). Jedná se tedy o jev, při němž dochází k přenosu elektrického náboje mezi dvěma materiály v důsledku jejich kontaktu. Jeden z materiálů se po vzájemné interakci stane kladně nabitým a druhý záporně nabitým. Tření při tomto jevu není nezbytné (stačí dotek obou materiálů), nicméně výsledný efekt zesílí. Triboelektrický jev je tedy zodpovědný za většinu statické elektřiny, se kterou se setkáváme každý den. [18, 19]

4.1 Princip triboelektrického jevu

Princip samotného nabíjení není prozatím jednoznačně vysvětlen a je stále studován. Obecně jde o to, že po kontaktu dvou různých materiálů dojde mezi některými částmi dvou povrchů k vytvoření chemické vazby, která se nazývá adheze. Náboje se přesunou z jednoho materiálu na druhý, a to z důvodu vyrovnání jejich elektrochemického potenciálu. Přenesenými náboji mohou být elektrony nebo ionty/molekuly. Když jsou odděleny, některé z vázaných atomů mají tendenci uchovávat elektrony navíc a některé zase mají tendenci je rozdávat. Tím může na površích docházet ke tvorbě triboelektrické náboje. [18]

Jakýkoliv materiál může vykazovat triboelektrický efekt. Ovšem schopnost materiálu získat nebo ztrácet elektrony závisí na polaritě materiálu. V průběhu let byly prováděny experimenty, na jejichž základě se vytvořila tzv. triboelektrická řada. První vytvořenou řadu publikoval John Carl Wilcke v roce 1757. Poměrně známou, hojně využívanou řadu vytvořil v roce 2009 pan Bill Lee v AlphaLab, Inc (obr. 4.1). Platí, že při kontaktu dvou látek se nabije kladně ta, která se nachází v uvedené řadě výše. Naopak záporně se nabije látka stojící v řadě níže. Dále platí, že čím větší je vzdálenost mezi látkami v řadě, tím větší je přenesený náboj. Naopak, pokud jsou dva materiály v řadě blízko sebe, předají si jen malý nebo žádný náboj. [19]

Co se týče aplikace triboelektrického jevu, čím dál více se využívají triboelektrické nanogenerátory v energy harvesting aplikacích, jejichž cílem je získat elektrickou energii v malém měřítku.

Název izolantu	Afinita náboje [nC·J ⁻¹]	Název izolantu	Afinita náboje [nC·J ⁻¹]
Polyuretanová pěna	+60	Sorbothan	+58
Vlasy, mastná pleť	+45	Pevný polyuretan	+40
Fluorid hořečnatý	+35	Nylon, suchá kůže	+30
Strojní olej	+29	Nylatron	+28
Sklo (soda)	+25	Papír	+10
Dřevo (borovice)	+7	Bavlna	+5
Nitrilová pryž	+3	Vlna	0
Polykarbonát	-5	Akryl	-10
Epoxid	-32	Styren-butadienový kaučuk	-35
PET (mylar) pevný	-40	EVA pryž	-55
Přírodní kaučuk	-60	Polystyren	-70
Polyimid	-70	Silikony	-72
Vinyl: pružný	-75	LDPE	-90
Polypropylen	-90	HDPE	-90
Nitrocelulóza	-93	UHMWPE	-95
Polychloropren	-98	PVC (pevný vinyl)	-100
Latex (přírodní kaučuk)	-105	Viton	-117
Epichlorhydrinový kaučuk	-118	Santoprene	-120
Hypalon	-130	Butylkaučuk	-135
EDPM pryž	-140	PTFE (teflon)	-190

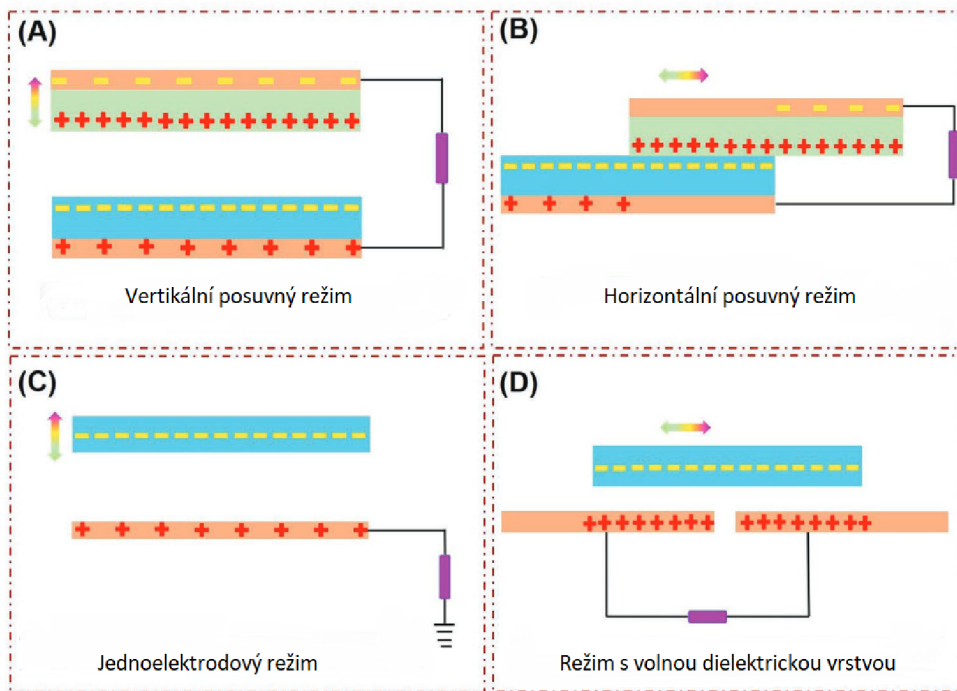
Obr. 4.1: Seznam materiálů uspořádaných v triboelektrické řadě podle jejich tendence ztrácet nebo získávat elektrony [19]

4.2 Triboelektrický nanogenerátor

Triboelektrický nanogenerátor, tzv. TENG, kombinuje triboelektrický jev a elektrostatickou indukci. První zmínka o TENG je z roku 2012. Od té doby byly vynalezeny čtyři různé režimy triboelektrických nanogenerátorů: vertikální a horizontální posuvný, jednoelektrodový a s volnou dielektrickou vrstvou (obr. 4.2). [19, 20]

- **Vertikální posuvný režim**

Jedná se o nejjednodušší provedení TENG. Využívá se zde dvou dielektrických vrstev. Ty jsou přichyceny na vodivých elektrodách, které jsou vzájemně propojeny přes vnější obvod. TENG je konstruován tak, aby bylo možné opakované stlačování obou dielektrických vrstev vnějším mechanickým pohybem. Nejprve dochází ke stlačení obou dielektrických vrstev. To způsobí, že obě dielektrika budou polarizována pomocí triboelektrického jevu. Následným oddalováním obou vrstev dojde ke změně elektrického potenciálu mezi vodivými elektrodami. To způsobí pohyb elektronů z jedné elektrody na druhou přes vnější obvod. Tím dojde k přeměně mechanické energie na elektrickou. [19, 20]



Obr. 4.2: Schéma fungování čtyř základních režimů triboelektrických nanogenerátorů [19]

- **Horizontální posuvný režim**

Tento typ nanogenerátoru je podobný předešlému příkladu. Liší se pouze tím, že obě dielektrika po sobě kloužou působením vnější síly. Když dojde ke změně překrytí obou nabitých materiálů, vznikne tak potenciálový rozdíl mezi elektrodami, což má za následek vznik elektrického proudu ve vnějším obvodu. [19, 20]

- **Jednoelektrodový režim**

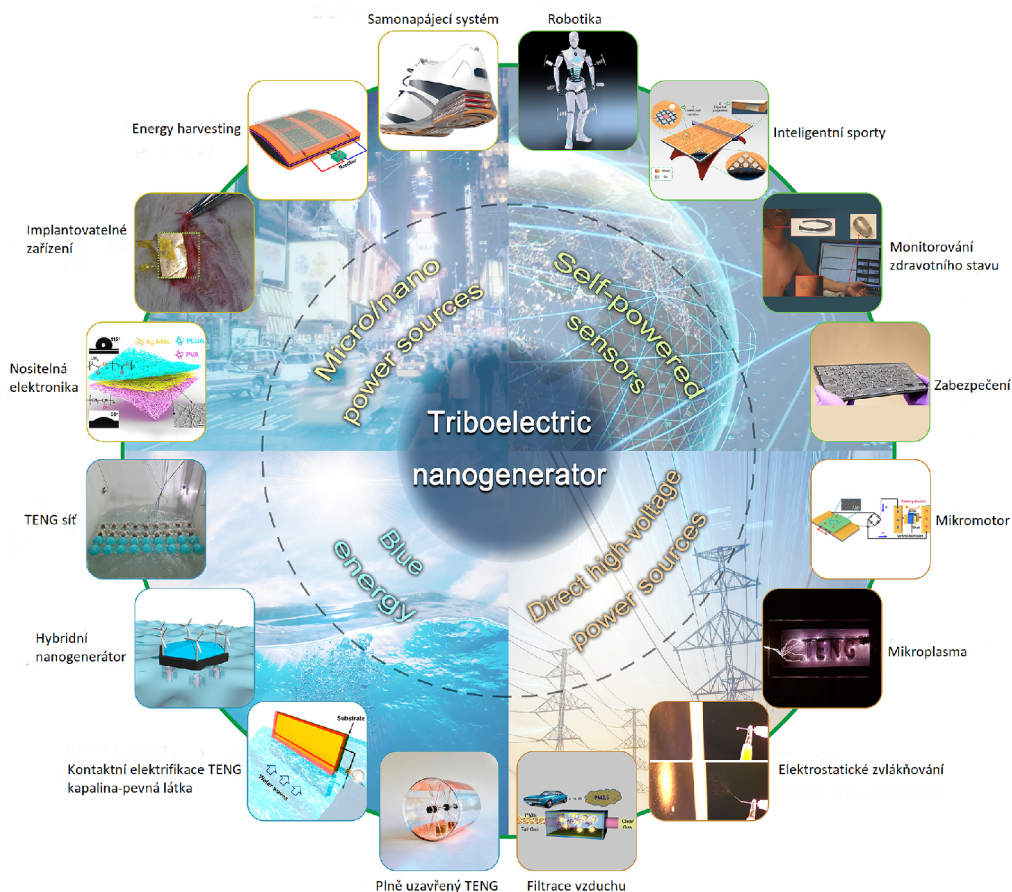
Jednoelektrodový režim představuje TENG složený z: dielektrického materiálu bez elektrody a jedné samostatné elektrody uzemněné přes vnější obvod. K nabití obou materiálů dojde při jejich kontaktu. Když se poté oba povrchy oddalují a přibližují, vznikne potenciálový rozdíl mezi elektrodou a zemí, tím pádem mezi nimi dojde ke vzniku elektrického proudu. [19, 20]

- **Režim s volnou dielektrickou vrstvou**

Zde se využívá volné dielektrické vrstvy a dvou pevných elektrod, které jsou vzájemně propojeny přes vnější obvod. Působením vnější mechanické síly dojde ke klouzavému pohybu dielektrika mezi oběma elektrodami. Platí zde, že vzdálenost mezi elektrodami nesmí přesahovat velikost dielektrika. Potenciálový rozdíl mezi elektrodami pak vzniká měnícím se překryvem dielektrika a obou elektrod, což má za následek vznik elektrického proudu mezi nimi. [19, 20]

Aplikace TENG

Triboelektrický nanogenerátor nabízí mnoho výhod: vysokou účinnost, nízkou cenu, lehkost nebo také bohaté konstrukční a materiálové možnosti. Proto nachází uplatnění např. jako mikro/nano zdroj energie, má potenciál pro vývoj samonapájecích senzorů, využívá se v oblasti tzv. modré energie nebo slouží jako vysokonapěťový zdroj energie (obr. 4.3). [21]



Obr. 4.3: Aplikace triboelektrického nanogenerátoru [21]

Co se týče oblasti mikro/nano zdroje energie, byl vyvinut flexibilní triboelektrický nanogenerátor, který lze přizpůsobit jakémukoliv křivočarému povrchu. Takovýto TENG lze namontovat pod obuv, aby docházelo ke sběru energie z lidské chůze. Dále byl např. vyroben TENG v podobě náramku určený k nošení na zápěstí. Byl také vyvinut implantabilní TENG (iTENG) pro biomechanickou přeměnu energie in vivo: symbiotický kardiostimulátor s vlastním napájením. [21]

Vzhledem k tomu, že TENG může přímo převádět mechanické podněty na elektrické signály bez jakýchkoli dalších převodníků, má skvělý potenciál pro vývoj senzorů s vlastním napájením bez použití externích zdrojů energie. Jedná se např. o tlakové, pohybové, chemické, akustické nebo fotoelektrické senzory. V oblasti sportu

byl např. vyvinut chytrý pingpongový stůl, který mohl přímo převádět dopady mezi pingpongovým míčkem a povrchem stolu na elektrické signály. V oblasti textilního průmyslu bylo navrženo celotextilní pole TENG, které lze přímo začlenit do různých míst tkaniny pro sledování fyziologických signálů. Všitím TENGu do látky lze např. přímo sledovat informace o dýchání. [21]

V oblasti modré energie se využívá energie vodních vln. Ta je po celé Zemi široce distribuována a je jedním z nejdůležitějších obnovitelných a čistých zdrojů energie. Byl vyvinut TENG, který získává energii z nepravidelných a nízkofrekvenčních pohybů vodních vln, a to integrací mnoha jednotek TENG do sítě. Pro efektivní shromažďování energie vodních vln byly navrženy TENGy s různým designem struktury: struktury založené na pružině, zvlněné elektrodové struktury, struktury ve tvaru kachny, rolovací kulové struktury nebo např. vzduchem poháněná membránová struktura.[21]

TENG lze také použít jako vysokonapěťový zdroj energie. Ve srovnání s tradičními vysokonapěťovými zdroji mají vysokonapěťové zdroje na bázi TENG pouze malý proud. Obvykle ale nevyžadují sofistikované měniče energie, díky čemuž nabízí mnohé výhody: bezpečnost, přenosnost, jednoduchou strukturu a úspornost.[21]

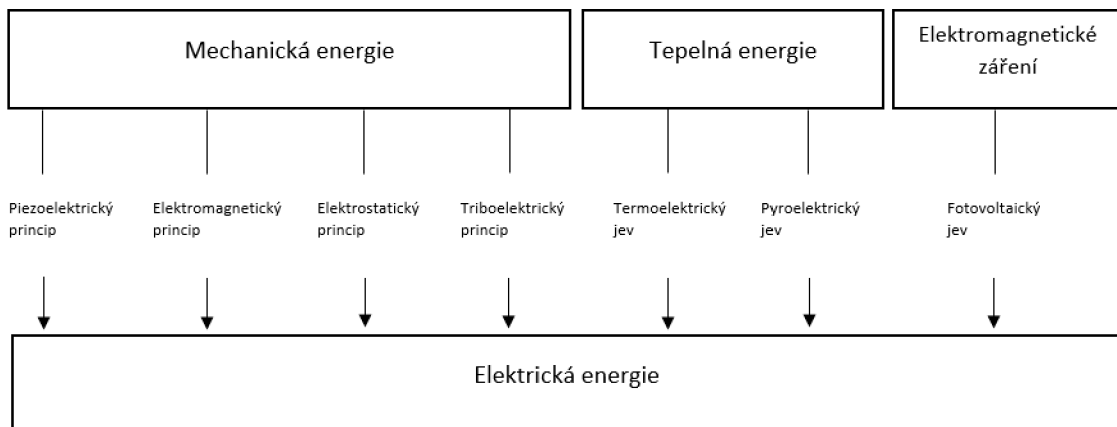
5 Energy harvesting

Energy harvesting lze volně přeložit jako zisk a následné zpracování elektrické energie z okolního prostředí. Nejčastějšími zdroji energie jsou vibrace, teplo, pohyb a světlo. Jedná se pouze o zisk malého množství energie, která by jinak byla ztracena. Takto získaná elektrická energie je poté uskladněna ve vhodných elektronických obvodech nebo součástkách a využita pro napájení autonomních elektronických zařízení o malých výkonech (např. bezdrátové senzory, malá přenosná elektronická zařízení). [22, 23]

Celý proces energy harvesting je tedy složen ze dvou částí: nejprve je vhodným způsobem získána energie (převod primární fyzikální energie na elektrickou) a poté je v druhém kroku elektrická energie uskladněna (baterie, kondenzátor). [23]

Energy harvesting je velice perspektivní obor, jelikož se jedná o obnovitelný zdroj energie (narozdíl od fosilních paliv). Mezi největší výhody patří nízké pořizovací náklady, prakticky bezúdržbový provoz a již zmíněná obnovitelnost energie. Na druhou stranu nevýhodou je to, že se vyprodukuje menší množství energie než u fosilních paliv. [22, 23]

Elektrickou energii můžeme získat např. vhodným převodem mechanické a tepelné energie nebo také převodem elektromagnetického záření (Obr. 5.1). Největším kandidátem na výrobu elektřiny se stala mechanická energie, jelikož je všudypřítomně k dispozici, nejvíce distribuována a vhodná pro aplikace související s lidským pohybem. [22, 23]



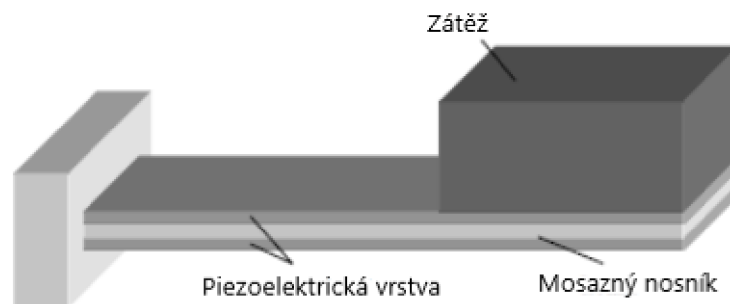
Obr. 5.1: Druhy energie pro energy harvesting [23]

5.1 Mechanická energie

Převod mechanické energie na elektrickou lze uskutečnit na základě piezoelektrického, elektromagnetického, elektrostatického a triboelektrického principu. [23]

Piezoelektrický princip

Piezoelektrický princip energy harvesting je založen na piezoelektrickém jevu. Mechanická energie je přeměněna na elektrickou pomocí piezoelektrických generátorů. Generátor se obvykle skládá z nosníku, který je tvořen nebo obsahuje piezoelektrický materiál (polymery, keramika) s elektrodami (obr 5.2). Vlivem mechanického namáhání dochází k ohýbání nosníku, což vede k namáhání piezoelektrického materiálu a ke generování elektrické energie. Nosník může pracovat v horizontálním nebo vertikálním režimu. Jako mechanická energie se zde uplatňují vibrace. Pro zachycení energie z vibrací je potřeba na vetknutý nosník připojit zátěž o hmotnosti m. Mechanickou energii lze sbírat např. z chůze lidského těla (během nebo chůzí) nebo také z otřesů podlah, strojů, atd. [22, 23, 24]



Obr. 5.2: Model piezoelektrického generátoru [24]

Elektromagnetický princip

Další možnost přeměny mechanické energie na elektrickou je založena na elektromagnetickém principu, jehož podstatou je elektromagnetická indukce. Roku 1831 vyslovil Michael Faraday zákon elektromagnetické indukce, který pojednává o vzniku elektrického napětí v uzavřeném elektrickém obvodu. Napětí je zde způsobeno změnou indukčního toku, což je označováno jako elektromagnetická indukce. Elektromagnetické generátory vycházejí právě z tohoto zákona. Generátor se skládá z cívky a permanentního magnetu a jejich vzájemným pohybem vzniká elektrická energie. [22, 24]

Elektrostatický princip

Elektrostatický princip přeměny mechanické energie na elektrickou využívá elektrostatické indukce. Při tomto jevu se na povrchu tělesa vytváří elektrický náboj v důsledku přiblížení jiného elektricky nabitého tělesa. Tento náboj se označuje jako indukovaný a má opačnou polaritu než náboj, který indukci vyvolal. Elektrostatická indukce se využívá především u kapacitorů. Zařízení pro přeměnu mechanické energie na elektrickou využívající tohoto principu se skládá ze dvou kapacitních desek (elektrod), které jsou oddělené ve většině případů vzduchem, vakuem nebo dielektrickým materiálem. V důsledku vibrací z okolí poté dochází k pohybu mezi těmito dvěma deskami, čímž dojde ke změně kapacit a generování elektrického náboje. [23, 24, 25]

Triboelektrický princip

Mechanická energie může být přeměněna na elektrickou na základě triboelektrického jevu (viz kapitola 4). Využívají se již zmiňované triboelektrické nanogenerátory (TENG), které kombinují triboelektrický jev a elektrostatickou indukci. [19, 20]

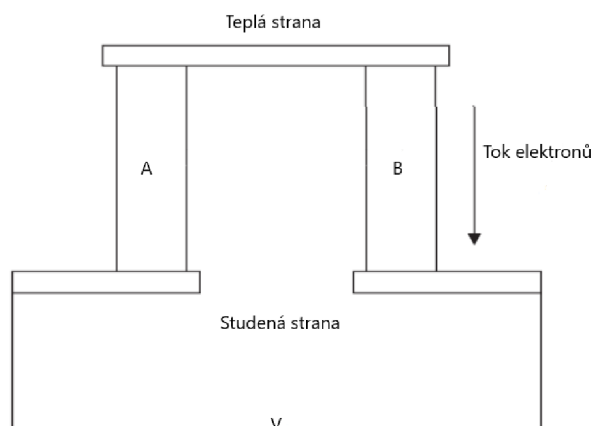
5.2 Tepelná energie

Přeměna tepelné energie na elektrickou může být uskutečněna pomocí termoelektrického (Seebeckova) a pyroelektrického jevu. Oba jevy jsou založeny na generování elektrického napětí vlivem změny teploty. [22, 23]

Termoelektrický jev

Termoelektrický jev, známý také jako Seebeckův jev, je založen na toku elektronů mezi dvěma kovovými či polovodičovými materiály (na obr. 5.3 A a B). Jev nastává při rozdílných teplotách těchto materiálů. Princip činnosti je naznačen na obr. 5.3. Teplotní rozdíl mezi teplou a studenou stranou způsobí tepelný tok, který je přenášen volně se pohybujícími částicemi, jako jsou elektrony a díry. Tepelný tok mezi vodiči směřuje od teplejší strany k chladnější. Pohyb nabitých částic způsobí na kontaktech obou materiálů prostorové náboje, které vytvoří elektrické pole působící proti pohybu, dokud nebude dosaženo rovnováhy. Pro dva stejné materiály ($A = B$) se výsledná napětí vyruší, ale pro různé materiály se objeví nenulové celkové napětí V . Pokud je přes výstup zařízení připojena zátěž, poteče proud. Tím se energie tepelného toku přemění na elektrickou energii. Napětí V na materiálu s teplotním rozdílem ΔT lze zapsat jako $V = \alpha \Delta T$, kde α je Seebeckův koeficient materiálu. Vztah mezi V a ΔT není lineární, a proto α závisí na teplotě (čím vyšší hodnota α , tím lepší vlastnosti termoelektrického materiálu). Kromě vhodných Seebeckových

koeficientů musí mít použité materiály i malou tepelnou vodivost. Spojením několika termoelektrických dvojic vzniká tzv. termoelektrický generátor, zkráceně TEG. V současné době jsou TEG založeny na materiálech na bázi bismutu a teluru. [22, 23]



Obr. 5.3: Seebeckův jev [23]

Pyroelektrický jev

Mechanická energie může být také přeměněna na elektrickou pomocí pyroelektrického jevu. U některých materiálů dochází ke generování elektrického napětí změnou teploty. Právě jakákoliv změna teploty způsobí tvorbu volných nábojů na povrchu struktury materiálu, čímž dojde ke změně jeho polarizace způsobující vznik elektrické energie. Polarizace je tedy závislá na teplotě - s rostoucí teplotou polarizace klesá. Pyroelektrický jev trvá pouze po dobu působení opakovaně proměnlivé teploty. Jakmile teplota zůstane konstantní, pyroelektrické napětí postupně mizí. Tento jev je velice podobný jevu piezoelektrickému. Všechny pyroelektrické látky jsou současně piezoelektrické, ale ne všechny piezoelektrické látky musejí být také pyroelektrické. [23, 26]

5.3 Elektromagnetické záření

Přeměna elektromagnetického záření (viditelné světlo) na elektrickou energii může být realizována pomocí fotovoltaického jevu. Princip fotovoltaického jevu je takový, že po dopadu fotonu (s dostatečnou energií) na polovodičový materiál s PN přechodem dojde k uvolnění elektronu z elektronového obalu atomu. Na místě uvolněného elektronu se pak vytvoří elektronová díra, která má kladný náboj. Volné elektrony tak mají tendenci zaplnit elektronovou díru a díky tomu vzniká elektrický proud. Fotovoltaického jevu se využívá v solární energetice. [22, 23]

6 Elektricky zvláknitelné materiály vhodné pro energy harvesting

Vlákna, v umělé nebo přírodní podobě, jsou všudypřítomně k dispozici. Historie výroby vláken sahá až do pravěku: Byly vykopány útržky bavlněných výrobků z doby 5000 př.n.l. V roce 2700 př.n.l. začalo pěstování bource morušového pro výrobu hedvábných vláken a textilií. Kolem roku 1300 bylo vynalezeno vřetení pro výrobu vlněných a bavlněných vláken pro výrobu látek a oděvů. Tato praxe se v 80. letech 19. století pomalu vyvinula v textilní průmysl. Prvním komerčně životaschopným syntetickým vláknem byl nylon, který představila společnost DuPont v roce 1938. Tento objev okamžitě upoutal pozornost veřejnosti a v průběhu dalších let bylo vyvinuto mnoho různých typů polyesterů a dalších syntetických polymerů pro výrobu syntetických vláken. [27]

Pojem zvláknění obecně znamená přeměnu tekuté látky na textilní vlákno. Zvláknitelnou tekutinou nejčastěji bývá uměle vytvořená tavenina, polymerní roztok nebo emulze. Pro výrobu vláken ze syntetických polymerů bylo vyvinuto mnoho metod, a to zejména těch, které jsou založeny na mokřím, suchém, tavném a gelovém zvláknění. [27]

Mokrý zvláknění zahrnuje zvláknovací trysku ponořenou v chemické lázni. Když je roztok polymeru vytlačován ze zvláknovací trysky do chemické lázně, polymer se vysráží v důsledku zředovacího efektu nebo chemické reakce, přičemž tuhnutím vznikají vlákna. Pro suché zvláknění se roztok polymeru vytlačuje do vzduchu přes zvláknovací trysku a vlákna se získávají jako výsledek odpařování rozpouštědla z trysek za pomoci proudu horkého vzduchu. Během zvláknění z taveniny se tavenina polymeru vytlačuje ze zvláknovací trysky, aby se po ochlazení vytvořila vlákna. Gelové zvláknění se používá k výrobě vláken s vysokou mechanickou pevností nebo jinými speciálními vlastnostmi zvlákněním polymeru ve stavu „gelu“, následovaným sušením na vzduchu a následným ochlazením v kapalné lázni. [27]

Všechny tyto metody jsou ale svým způsobem omezené: tvoří se vlákna o průměrech 10 - 100 μm . Což znamená, že vlákna stále nemohou dosáhnout submikrometrového měřítka. [27]

Naštěstí roku 1887 pan Charles V. Boys dal základ elektrostatickému zvláknění (viz 1). Oznámil, že vlákna lze vyrobit z viskoelastické kapaliny za přítomnosti vnějšího elektrického pole. Tato technika, nyní tedy známá jako elektrostatické zvláknění (electrospinning), otevírá dveře k výrobě ultratenkých vláken s průměry až do nanometrů. Obecně platí, že elektrostatické zvláknění umožňuje snadnou výrobu kontinuálních vláken o průměrech od desítek nanometrů do několika mikrometrů. Ve 20. století bylo podáno i několik patentů na elektrostatické zvláknění (roku

1902 Johnem Cooleyem a Williamem Mortonem, poté v letech 1934 a 1944 Antonem Formhalsem). V průběhu let se poté metoda zdokonalovala a stala hojně používanou metodou pro výrobu dlouhých a souvislých vláken s průměry až do nanometrového měřítko. [27]

Vlákna vyrobená pomocí electrospinningu nachází uplatnění v biomedicínských aplikacích, v získávání, přeměně a uchování energie (energy harvesting) nebo se také používají jako filtrační membrány. [27]

6.1 Zvláknitelné materiály pro energy harvesting

Jak již bylo popsáno v kapitole 5, energy harvesting představuje získávání a následné uchování elektrické energie. V prvním kroku je přeměněna primární fyzikální energie na elektrickou, a to pomocí vhodného generátoru. Následně je energie uskladněna ve vhodných elektronických obvodech nebo součástkách. Když se např. zaměříme na piezoelektrický princip přeměny mechanické energie na elektrickou (viz 5.1), tak zde generátor obvykle obsahuje nosník, který je tvořen nebo obsahuje piezoelektrický materiál (polymery nebo keramika). Právě tímto materiálem mohou být vlákna vyrobená pomocí electrospinningu. [23]

K výrobě nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování se využívají různé typy materiálů. Hodně používanými materiály jsou organické polymery ve formě roztoku nebo taveniny. Více využívané jsou polymery ve formě roztoku. Elektrostatické zvlákňování je však vhodné i k přípravě čistě keramických vláken. Ta jsou připravována z keramického prekursoru (např. typu sol-gel), většinou s podporou polymerní látky. Ta je ovšem v posledním kroku procesu odstraněna tepelným zpracováním vláken. Další možností je také příprava kompozitů nanovláknem/nanočásticemi pomocí electrospinningu za vzniku funkčně pokročilých polymer/keramických kompozitů. [27]

Organické polymery

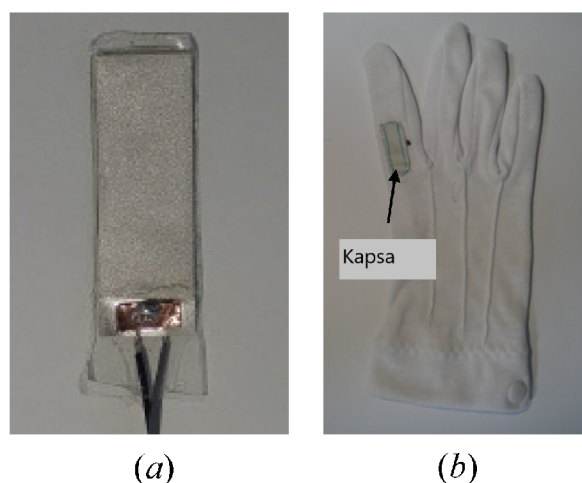
Jedním z nejvíce používaných organických polymerů pro energy harvesting je již zmínovaný polyvinylidenfluorid (PVDF). Podrobněji byl popsán v kapitole 3.2. Tento polymer se využívá hlavně pro piezoelektrické a/nebo pyroelektrické aplikace. V dnešní době se ale PVDF čím dál více používá v kombinaci s jinými látkami, jelikož je tak dosaženo většího výkonu. [17]

Skupina Vatansever et al. [28] srovnávala napěťové odezvy piezoelektrických vláken na bázi PZT a piezoelektrických pásků na bázi PVDF. Bylo zkoumáno generování elektrické energie těchto materiálů při vystavení větru a kapkám vody. Z

výsledků vyplynulo, že piezoelektrické polymerní materiály generovaly vyšší napětí/výkon než piezoelektrické materiály na keramické bázi.

Tým Cha et al. [29] analyzoval získávání energie z klikání prstu (robotického a lidského) na počítačovou myš. Využívalo se zde piezoelektrického převodníku s PVDF vlákny. Ten byl umístěn v kapse na látkové rukavici, která byla navlečena na ruku (obr. 6.1). Generovaná energie dosahovala hodnot v rozmezí 1-10 nJ.

Kim a Yun [30] navrhli spirálové piezoelektrické zařízení pro sběr energie z oděvu. Harvestory obsahovaly PVDF vlákna, která byla zabudována do oděvu na čtyřech místech: na rameni, lokti, kyčli a koleni. Maximální naměřený výstupní výkon byl 1,42 mW.



Obr. 6.1: a) piezoelektrický převodník energie, b) rukavice s kapsou [29]

Keramika

Keramická nanovlákna se electrospinningem získávají pouze z roztoku. Často se pro přípravu prekurzoru používá metoda sol-gel, kdy právě sol je použit jako prekurzor pro elektrostatické zvlákňování. Většinou bývá v kombinaci s polymerním roztokem pro zajištění dostatečné vodivosti prekurzoru. Hojně používanou keramikou pro energy harvesting je zirkoničitan titaničitan olovnatý, neboli PZT keramika. [27]

Skupina Chen et al. [31] vyrobila nanogenerátor na bázi PZT nanovláken. Flexibilní PZT nanovlákna byla zapuštěna do měkké polymerní matrice polydimethylsiloxanu (PDMS), což pomohlo zabránit poškození těchto vláken a prodloužil se tak životní cyklus nanogenerátoru. Výstupní napětí tohoto nanogenerátoru bylo 1,63 V a výstupní výkon byl 0,03 μW se zátěžovým odporem 6 M Ω .

Kompozity

Pod pojmem kompozity se rozumí kompozitní materiály, které se skládají z více materiálů. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou pak dány kombinací jeho složek. Tato kombinace bývá ve většině případů výhodná, jelikož bývá dosaženo lepších výsledků. [27]

Tým Sorayani Bafqi et al. [32] připravil pomocí electrospinningu nanovlákná PVDF s oxidem zinečnatým (ZnO) pro výrobu nanogenerátorů. Charakteristiky těchto struktur byly hodnoceny pomocí rentgenové krystalografie, infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR), diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) a skenovací elektronové mikroskopie (SEM). Výsledky ukázaly, že začlenění nanočástic ZnO do PVDF nanovláken zlepšilo piezoelektrické vlastnosti až o 1,1 V ve srovnání s 0,351 V u čistých PVDF vzorků. Tyto výsledky naznačují slibné aplikace pro různá nositelná elektronická zařízení a systémy s vlastním napájením.

Skupina Abolhasani et al. [33] připravila pomocí elektrostatického zvlákňování PVDF/grafenová kompozitní nanovlákná pro vývoj nanogenerátorů. Bylo pozorováno, že přidání malého množství grafenu (0,1 % hm.) významně zvýšilo β fázi PVDF. Vyvinutý PVDF/grafenový nanogenerátor umožnil synchronizaci pohybu prstu a jeho generovaná elektřina dokázala rozsvítit komerční LED po dobu 30 s. Tento typ PVDF generátoru má potenciál být použit jako samonabíjecí zdroj energie a mohl by být využit pro napájení osobní elektroniky.

Skupina Chen et al. [34] vytvořila výkonný flexibilní piezoelektrický nanogenerátor vyrobený z PVDF-TrFE (polyvinylidenfluorid-trifluorethylen) a nanočástic $BaTiO_3$. Bylo prokázáno, že generátor s PVDF-TrF/ $BaTiO_3$ vykazuje 7,3krát vyšší hodnotu než původní PVDF-TrFE fólie. Nanogenerátor stabilně generoval elektřinu, která byla použita k pohonu elektronických zařízení (jako je LCD obrazovka, pole modrých LED zapojených do série, digitální hodinky a hudební přehrávač).

7 Praktická část

Tato praktická část práce je zaměřena na nanovlákná jakožto generátory energie. V první části práce byla u několika druhů nanovláken provedena elektrická charakterizace. Následně byl v druhé části práce vyroben generátor energie a byly proměřeny jeho vlastnosti.

Co se týče elektrické charakterizace nanovláken, byla proměřena dielektrická konstanta (relativní permitivita, ϵ_r) (viz 2.2) a ztrátový činitel ($\tan \delta$) (viz 2.2). Pro měření těchto parametrů byl využit měřicí systém Alpha-A High Performance Frequency Analyzer (obr. 7.1) od firmy Novocontrol technologies, dále Dielectric Test Fixture 16451B (obr. 7.2) a WinDETA software. Výsledky byly vyhodnoceny v MS Excel. Měření těchto dielektrických parametrů proběhlo na BCZT/PVDF, BT/PVDF, BTO/PVDF, TiO₂/PVDF a čistých PVDF nanovláknkách.



Obr. 7.1: Alpha-A Analyzer [35]



Obr. 7.2: Dielectric Test Fixture

7.1 Měření relativní permitivity a ztrátového činitele u BCZT/PVDF nanovláken

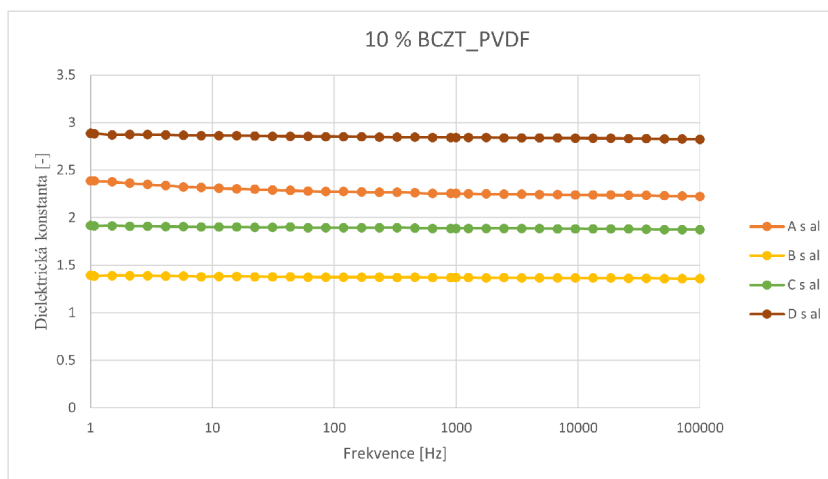
Měření dielektrické konstanty a ztrátového činitele proběhlo na nanovláčknech s obsahem 10 %, 20 %, 30 %, 40 % a 50 % BCZT/PVDF. Vlákna byla vyrobena elektrostatickým zvlákňováním na CEITEC VUT a byla spinována na alobal (obr. 7.3 vlevo). Všechna vlákna byla nastříhána na vzorky o rozměrech 2x2 cm (obr. 7.3 vpravo). Počet vzorků u každého druhu se liší, jelikož vlákna nebyla vždy stejné délky.



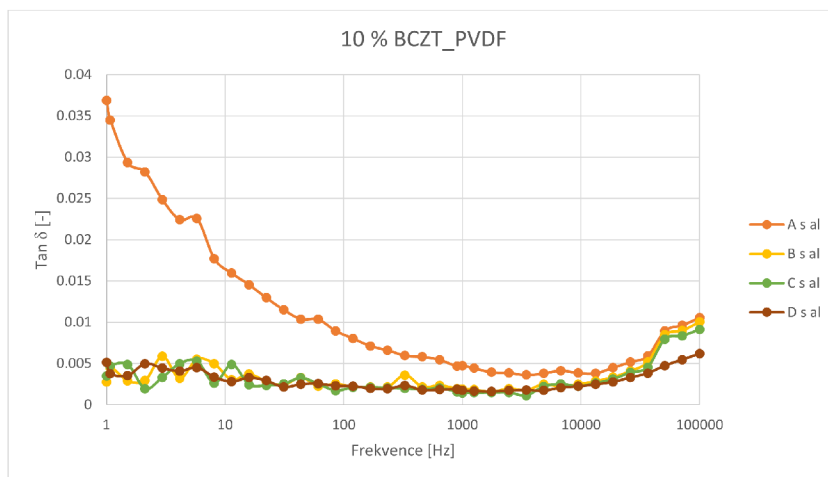
Obr. 7.3: Nanovláčna spinována na alobal (vlevo) a nanovláčna nastříhána na vzorky 2x2 cm (vpravo)

Hodnota relativní permitivity a ztrátového činitele se vždy měřila pro vzorek s alobalem. Vzorek o rozměru 2x2 cm se vložil mezi elektrody přístroje Dielectric Test Fixture a z přístroje se odečetla tloušťka nanovláken. Tloušťka se následně zapsala do WinDETY, což je standardní software pro širokopásmovou dielektrickou a impedanční spektroskopii. V tomto softwaru se také zapsala plocha měřeného vzorku. Následně se získala závislost relativní permitivity a ztrátového činitele na frekvenci.

Naměřená data z WinDETY bylo možné uložit pouze v podobě textového souboru, a tak se grafy vykreslily v MS Excel. Pro každý vzorek byla tedy vynesena závislost relativní permitivity a ztrátového činitele na frekvenci. Dále se u každého druhu vláken vypočítala průměrná hodnota relativní permitivity, ztrátového činitele a tloušťky vláken. Ke každé průměrné hodnotě se také dopočítala směrodatná odchylka měření. Ukázka průběhu relativní permitivity je vyzobrazena na obr. 7.4 a ztrátového činitele na obr. 7.5.

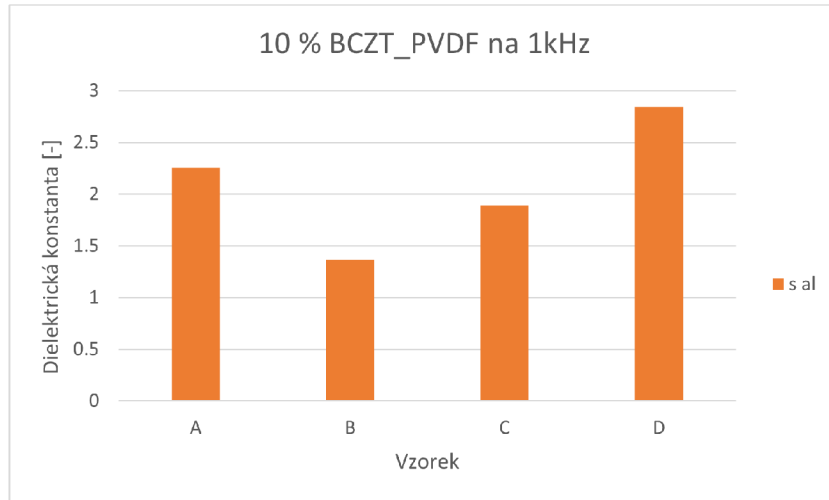


Obr. 7.4: Závislost relativní permitivity na frekvenci u 10 % BCZT/PVDF nanovláken

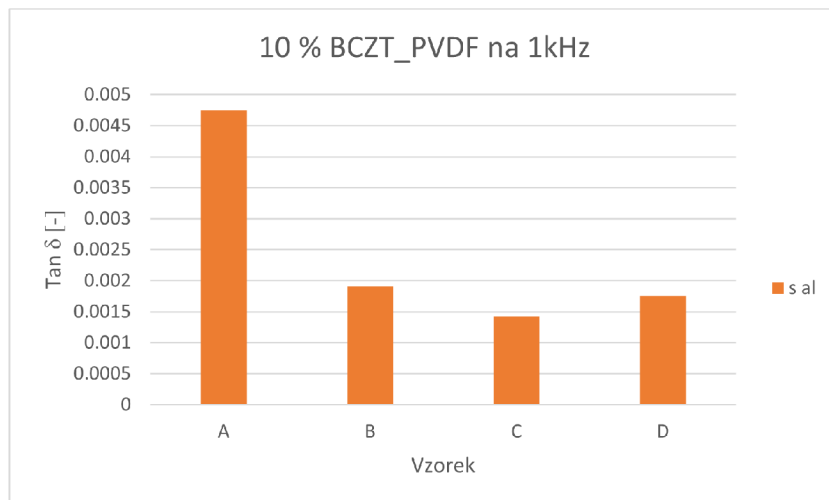


Obr. 7.5: Závislost $\tan \delta$ na frekvenci u 10 % BCZT/PVDF nanovláken

Do grafů byly také vykresleny hodnoty ϵ_r a $\tan \delta$ na frekvenci 1 kHz. A to z důvodu, že při tomto přehlednějším zobrazení se dalo lépe zjistit, která data si byla nejvíce podobná. Ukázka grafu hodnot dielektrické konstanty při frekvenci 1 kHz je zobrazena na obr. 7.6 a hodnoty ztrátového činitele na frekvenci 1 kHz na obr. 7.7.



Obr. 7.6: Hodnoty permitivity na frekvenci 1 kHz u 10 % BCZT/PVDF nanovláken



Obr. 7.7: Hodnoty $\tan \delta$ na frekvenci 1 kHz u 10 % BCZT/PVDF nanovláken

10 % BCZT/PVDF nanovlákná

Tento druh nanovláken byl nastříhán na 4 vzorky (A, B, C, D). Průměrná hodnota relativní permitivity vyšla 2.0992 ± 0.5397 . Průměrná hodnota ztrátového činitele byla 0.0053 ± 0.0036 a průměrná hodnota tloušťky vláken byla 0.0575 ± 0.01230 mm.

Tab. 7.1: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 10 % BCZT/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	2.2803	0.0115	0.0400
B	1.3733	0.0035	0.0700
C	1.8900	0.0032	0.0500
D	2.8502	0.0030	0.0700
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	2.0992 ± 0.5397		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0053 ± 0.0036		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0575 ± 0.0130		

20 % BCZT/PVDF nanovlákná

I v tomto případě byla nanovlákná nastříhána na 4 vzorky (A, B, C, D). Průměrná hodnota relativní permitivity vyšla 1.4639 ± 0.1592 , hodnota ztrátového činitele 0.0043 ± 0.0009 a hodnota tloušťky vláken 0.0275 ± 0.0083 mm.

Tab. 7.2: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 20 % BCZT/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	1.5941	0.0053	0.0300
B	1.4177	0.0052	0.0200
C	1.2235	0.0036	0.0200
D	1.6203	0.0033	0.0400
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.4639 ± 0.1592		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0043 ± 0.0009		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0275 ± 0.0083		

30 % BCZT/PVDF nanovlákná

Zde byla nanovlákná nastříhána také na 4 vzorky (A, B, C, D). Průměrná hodnota relativní permitivity vyšla 1.6810 ± 0.3251 , průměrná hodnota ztrátového činitele 0.0068 ± 0.0014 a průměrná hodnota tloušťky vláken byla 0.0500 ± 0.0100 mm.

Tab. 7.3: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 30 % BCZT/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	2.2200	0.0077	0.0400
B	1.6417	0.0046	0.0400
C	1.4852	0.0068	0.0600
D	1.3769	0.0083	0.0600
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.6810 \pm 0.3251		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0068 \pm 0.0014		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0500 \pm 0.0100		

40 % BCZT/PVDF nanovlákná

Tato nanovlákná se podařilo nastříhat na 5 vzorků (A, B, C, D, E). Průměrná hodnota relativní permitivity vyšla 1.5333 \pm 0.2863. Hodnota ztrátového činitele byla 0.0070 \pm 0.0037 a hodnota tloušťky vyšla 0.0480 \pm 0.0204 mm.

Tab. 7.4: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 40 % BCZT/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	1.2545	0.0141	0.0200
B	2.0391	0.0054	0.0400
C	1.5321	0.0047	0.0400
D	1.2612	0.0040	0.0600
E	1.5794	0.0069	0.0800
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.5332 \pm 0.2863		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0070 \pm 0.0037		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0480 \pm 0.0204		

50 % BCZT/PVDF nanovlákná

Zde byla nanovlákná nastříhána na 4 vzorky (A, B, C, D). Průměrná hodnota relativní permitivity byla 1.4443 \pm 0.2748, průměrná hodnota ztrátového činitele vyšla 0.0301 \pm 0.0342 a průměrná hodnota tloušťky byla 0.0325 \pm 0.0043 mm.

Tab. 7.5: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 50 % BCZT/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	1.8136	0.0893	0.0300
B	1.4516	0.0104	0.0300
C	1.4738	0.0119	0.0300
D	1.0384	0.0087	0.0400
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.4443 \pm 0.2748		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0301 \pm 0.0342		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0325 \pm 0.0043		

7.2 Měření relativní permitivity a ztrátového činitele u BT/PVDF nanovláken

Zde byla proměřena nanovlákná s obsahem 40 % BT/PVDF a 50 % BT/PVDF. Nanovlákná i v tomto případě vznikla electrospinningem na CEITEC VUT. Opět byla vlákna nastříhána na vzorky o rozměrech 2x2 cm a byla proměřena relativní permitivita a ztrátový činitel u všech vzorků s alobalem. U obou parametrů byla vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro každý druh vláken.

40 % BT/PVDF nanovlákná

Tato nanovlákná byla poměrně krátká a tak se podařilo nastříhat pouze 3 vzorky (A, B, C). Průměrná hodnota relativní permitivity vyšla 1.5156 \pm 0.1458. Hodnota ztrátového činitele byla 0.0057 \pm 0.0029 a hodnota tloušťky vláken byla 0.0600 \pm 0.0000 mm.

Tab. 7.6: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 40 % BT/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	1.3712	0.0058	0.0600
B	1.7153	0.0092	0.0600
C	1.4603	0.0021	0.0600
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.5156 \pm 0.1458		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0057 \pm 0.0029		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0600 \pm 0.0000		

50 % BT/PVDF nanovlákna

V tomto případě byla nanovlákna nastříhána na 7 vzorků (A, B, C, D, E, F, G). Průměrná hodnota relativní permitivity vyšla 1.4797 ± 0.4064 , hodnota ztrátového činitele vyšla 0.0065 ± 0.0034 a tloušťka vláken byla 0.0286 ± 0.0083 mm.

Tab. 7.7: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 50 % BT/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	1.2665	0.0043	0.0200
B	1.3435	0.0037	0.0300
C	1.2858	0.0039	0.0300
D	1.1896	0.0103	0.0200
E	1.9204	0.0024	0.0400
F	2.2674	0.0102	0.0400
G	1.0850	0.0105	0.0200
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.4797 \pm 0.4064		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0065 \pm 0.0034		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0286 \pm 0.0083		

7.3 Měření dielektrických parametrů u dalších druhů nanovláken

PVDF nanovlákná

Měření dielektrické konstanty a ztrátového činitele proběhlo také na vzorcích čistého PVDF nanovlákná, tzn. nanovlákná bez příměsí jiných látek. Celkem bylo nastříháno 5 vzorků (A, B, C, D, E). Průměrná hodnota ϵ_r vyšla 1.6461 ± 0.3397 , průměrná hodnota $\tan \delta$ byla 0.0070 ± 0.0026 a průměrná hodnota tloušťky vláken byla 0.0280 ± 0.0075 mm.

Tab. 7.8: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	2.2686	0.0118	0.0300
B	1.5123	0.0075	0.0200
C	1.4494	0.0062	0.0300
D	1.2876	0.0042	0.0200
E	1.7126	0.0054	0.0400
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.6461 ± 0.3397		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0070 ± 0.0026		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0280 ± 0.0075		

10 % BTO/PVDF nanovlákná

Zde bylo změřeno celkem 5 vzorků (A, B, C, D, E). Průměrná hodnota relativní permitivity vyšla 1.6453 ± 0.4250 , průměrná hodnota ztrátového činitele 0.0054 ± 0.0024 a hodnota tloušťky nanovláken byla 0.0360 ± 0.0080 mm (tab. 7.9).

10 % TiO₂/PVDF nanovlákná

V tomto případě byly proměřeny celkem 4 vzorky (A, B, C, D). Průměrná hodnota dielektrické konstanty vyšla 1.3722 ± 0.3285 , průměrná hodnota ztrátového činitele byla 0.0087 ± 0.0021 a tloušťka vláken byla 0.0425 ± 0.0083 mm (tab. 7.10).

Tab. 7.9: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 10 % BTO/PVDF nanovláken

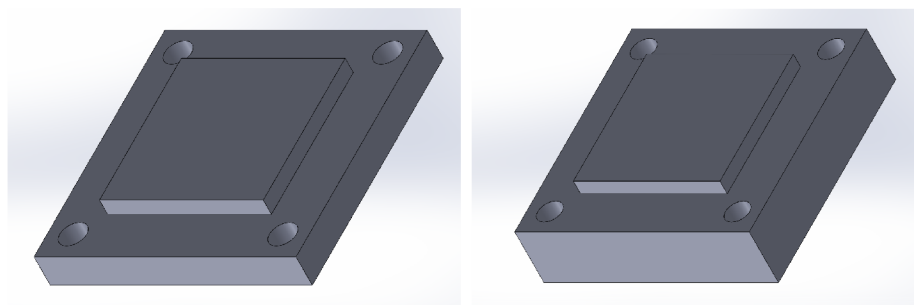
Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	1.4785	0.0075	0.0300
B	2.3842	0.0088	0.0300
C	1.5237	0.0021	0.0400
D	1.7466	0.0047	0.0300
E	1.0936	0.0040	0.0500
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.6453 \pm 0.4250		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0054 \pm 0.0024		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0360 \pm 0.0080		

Tab. 7.10: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u 10 % TiO₂/PVDF nanovláken

Vzorek	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
A	1.9143	0.0114	0.0500
B	1.3515	0.0058	0.0400
C	1.1386	0.0077	0.0300
D	1.0845	0.0099	0.0500
Průměrná hodnota ϵ_r [-]	1.3722 \pm 0.3285		
Průměrná hodnota $\tan \delta$ [-]	0.0087 \pm 0.0021		
Průměrná hodnota l [mm]	0.0425 \pm 0.0083		

7.4 Generátor energie

V další části práce byl navržen a vyroben generátor energie. Jedná se o triboelektrický nanogenerátor fungující ve vertikálním posuvném režimu (viz 4.2). Část generátoru, dvě polymerní desky (obr. 7.8), byla navržena v 3D softwaru SOLIDWORKS. Jedná se o strojírenský 3D CAD software. Návrh byl následně vytisknut na 3D tiskárně na VUT v Brně.



Obr. 7.8: Vrchní (vlevo) a spodní část (vpravo) TENG

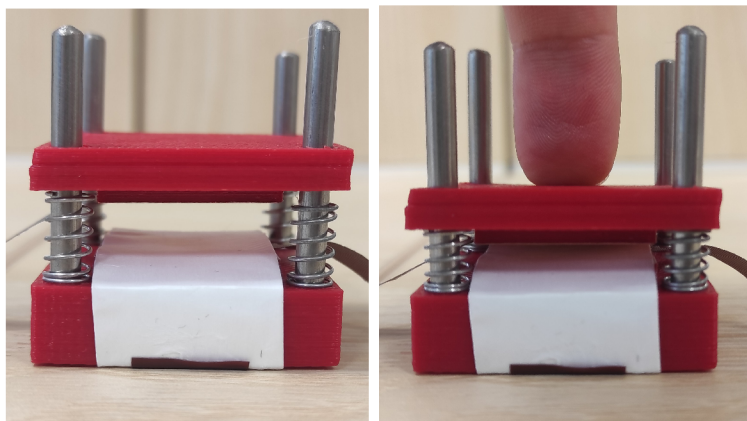
Tento typ triboelektrického generátoru tedy obsahuje: 2 polymerní desky z ABS o rozměru 4 x 4 cm, 4 nosné tyčky z nerez, 4 pružinky, vodivou měděnou pásku a vodivou textilií.

Vrchní a spodní polymerní část generátoru je spojena 4 nerezovými tyčkami s navlečenými pružinkami. Na vyvýšených plochách vnitřních polymerních částí je nalepena měděná páska, která slouží jako plošná elektroda. Mezi polymerem a měděnou páskou je nalepená vodivá textilie, která slouží jako výstup z generátoru. Kompletní triboelektrický nanogenerátor je zobrazen na obr.7.9



Obr. 7.9: Triboelektrický nanogenerátor

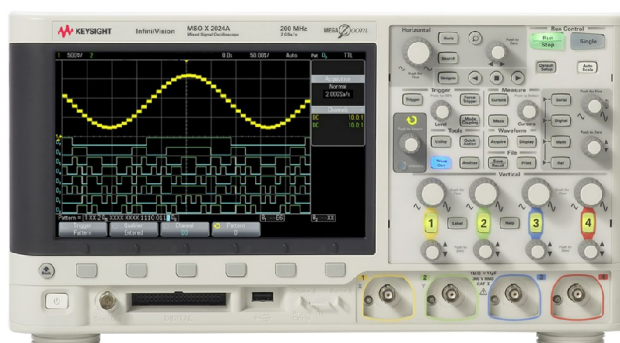
Princip fungování je takový, že se na spodní měděnou elektrodu vloží vzorek nanovláken. Rozměr vláken je určen podle velikosti elektrod. V případě tohoto generátoru je aktivní plocha velká 2,5 x 2,5 cm. Pro lepší uchycení byl vzorek přilepen ze spodní části polymerní desky. Ke generování napětí poté dochází opakovaným stlačováním a uvolňováním vrchní desky generátoru (obr. 7.10).



Obr. 7.10: TENG v klidu (vlevo) a TENG při zátěži (vpravo)

Měření napětí

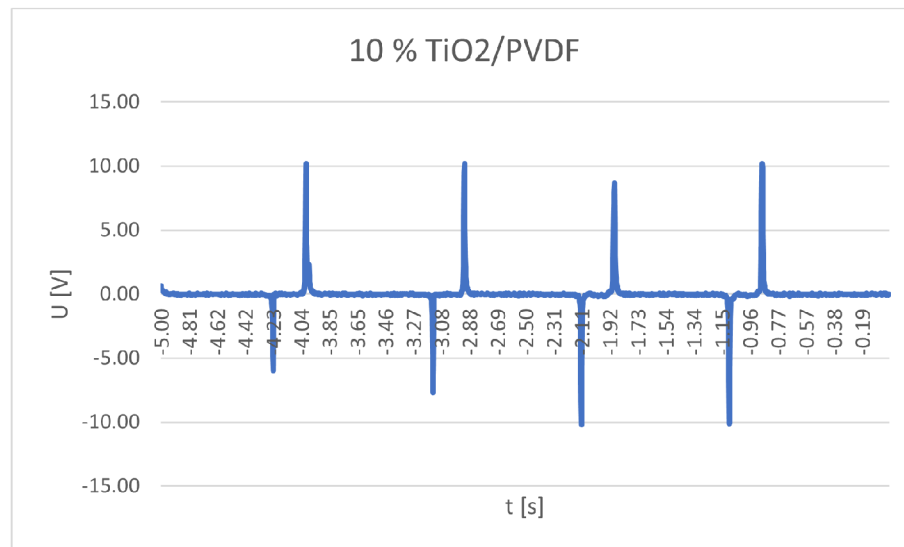
Měření napětí probíhalo pomocí osciloskopu KEYSIGHT (obr. 7.11). Generátor se umístil na magnetickou desku. Textilie vystupující z vrchní elektrody se uzemnila a textilie vystupující ze spodní elektrody se připojila k sondě osciloskopu KEYSIGHT (obr. 7.11). Následně došlo k opakovanému stlačování a uvolňování vrchní desky generátoru, čímž došlo ke generování napětí. Vstupní odpor osciloskopu byl 10 M Ω .



Obr. 7.11: KEYSIGHT osciloskop [36]

Napětí se měřilo opět na několika vybraných druzích nanovláken. Pro každý druh vláken bylo na osciloskopu změřeno napětí. Ukázka průběhu napětí je zobrazena na obr. 7.12. Vybralo se vždy 5 nejvyšších změřených hodnot napětí ve špičce a následně se podle vzorce 7.1 dopočítal špičkový výkon. A to jako podíl druhé mocniny změřeného napětí ve špičce vůči vstupnímu odporu osciloskopu, který byl 10 MΩ.

$$P = \frac{U^2}{R} [W] \quad (7.1)$$



Obr. 7.12: Průběh napětí při mechanickém namáhání TENG

PVDF nanovlákná

Dle vybraných pěti nejvyšších hodnot napětí ve špičce byla průměrná hodnota napětí rovna 3.36 ± 0.29 V. Průměrný špičkový výkon byl 1.14 ± 0.20 μW. Tloušťka nanovláken byla 0.03 mm.

Tab. 7.11: Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu ve špičce u PVDF nanovláken

Špička	1	2	3	4	5
Napětí [V]	3.90	3.38	3.26	3.22	3.06
Výkon [μW]	1.52	1.14	1.06	1.04	0.94
Průměrná hodnota napětí [V]	3.36 ± 0.29				
Průměrná hodnota výkonu [μW]	1.14 ± 0.20				

10 % BTO/PVDF nanovlákná

Zde vyšla průměrná hodnota špičkového napětí 25.52 ± 2.43 V a špičkového výkonu 65.71 ± 13.07 μ W. Tloušťka vláken byla 0.05 mm.

Tab. 7.12: Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 10 % BTO/PVDF nanovláken

Špička	1	2	3	4	5
Napětí [V]	30.15	25.01	24.92	24.52	22.99
Výkon [μ W]	90.90	62.55	62.10	60.12	52.85
Průměrná hodnota napětí [V]	25.52 ± 2.43				
Průměrná hodnota výkonu [μ W]	65.71 ± 13.07				

10 % TiO₂/PVDF nanovlákná

U těchto vláken byla průměrná hodnota napětí ve špičce 10.17 ± 0.09 V a průměrný špičkový výkon byl 10.34 ± 0.18 μ W. Změřená tloušťka nanovláken byla 0.04 mm.

Tab. 7.13: Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 10 % TiO₂/PVDF nanovláken

Špička	1	2	3	4	5
Napětí [V]	10.21	10.21	10.21	10.21	9.99
Výkon [μ W]	10.42	10.42	10.42	10.42	9.98
Průměrná hodnota napětí [V]	10.17 ± 0.09				
Průměrná hodnota výkonu [μ W]	10.34 ± 0.18				

20 % BCZT/PVDF nanovlákná

Zde vyšly nejvyšší průměrné hodnoty špičkového napětí i výkonu, a to 46.35 ± 2.93 V u napětí a 215.71 ± 27.42 μ W u výkonu. Tloušťka těchto nanovláken byla 0.1 mm.

Tab. 7.14: Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % BCZT/PVDF nanovláken

Špička	1	2	3	4	5
Napětí [V]	51.06	47.63	45.83	45.03	42.21
Výkon [μ W]	260.71	226.69	210.04	202.77	178.17
Průměrná hodnota napětí [V]	46.35 ± 2.93				
Průměrná hodnota výkonu [μ W]	215.71 ± 27.42				

20 % PVDF DMSO/AC + 20 % BaTiO₃ nanovlákna

U těchto nanovláken byla průměrná hodnota napětí ve špičce 43.97 ± 2.27 V. Průměrný špičkový výkon dosáhl hodnoty $193.81 \pm 19.95 \mu\text{W}$. Tloušťka vláken byla 0.07 mm.

Tab. 7.15: Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % PVDF DMSO/AC + 20 % BaTiO₃ nanovláken

Špička	1	2	3	4	5
Napětí [V]	47.44	45.03	43.42	43.42	40.52
Výkon [μW]	225.06	202.77	188.53	188.53	164.19
Průměrná hodnota napětí [V]	43.97 ± 2.27				
Průměrná hodnota výkonu [μW]	193.81 ± 19.95				

20 % PVDF DMSO/AC + 20 % kalcinovaný BaTiO₃ nanovlákna

V tomto případě vyšlo průměrné špičkové napětí 33.74 ± 1.85 V a průměrný špičkový výkon byl $114.15 \pm 12.62 \mu\text{W}$. Tloušťka vláken byla 0.05 mm.

Tab. 7.16: Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % PVDF DMSO/AC + 20 % kalcinovaný BaTiO₃ nanovláken

Špička	1	2	3	4	5
Napětí [V]	36.50	35.38	32.56	32.32	31.92
Výkon [μW]	133.23	125.17	106.02	104.46	101.89
Průměrná hodnota napětí [V]	33.74 ± 1.85				
Průměrná hodnota výkonu [μW]	114.15 ± 12.62				

20 % PVDF DMSO/AC + 20 % TiO₂ nanovlákna

Zde byla průměrná hodnota napětí ve špičce 16.27 ± 1.60 V a průměrný špičkový výkon vyšel 26.72 ± 5.55 μ W. Tloušťka nanovláken byla 0.04 mm.

Tab. 7.17: Nejvyšší hodnoty napětí a výkonu u 20 % PVDF DMSO/AC + 20 % TiO₂ nanovláken

Špička	1	2	3	4	5
Napětí [V]	19.42	15.88	15.48	15.48	15.08
Výkon [μ W]	37.71	25.22	23.96	23.96	22.74
Průměrná hodnota napětí [V]	16.27 ± 1.60				
Průměrná hodnota výkonu [μ W]	26.72 ± 5.55				

7.5 Optimalizace generátoru

Optimalizace TENG probíhala tak, že se generátor připojil k osciloskopu, elektrometru KEITHLEY a k odporovému dekádovému boxu (obr. 7.13). Na boxu se postupně měnily hodnoty odporu: 100k, 200k, 300k, 500k, 700k, 1M, 3M, 5M, 10M, 20M, 26M, 34M, 42M, 59.2M, 91.2M a 131.2M. Jelikož rozsah boxu je od 1 Ω do 11.111111 $M\Omega$, přidávaly se k němu postupně rezistory.

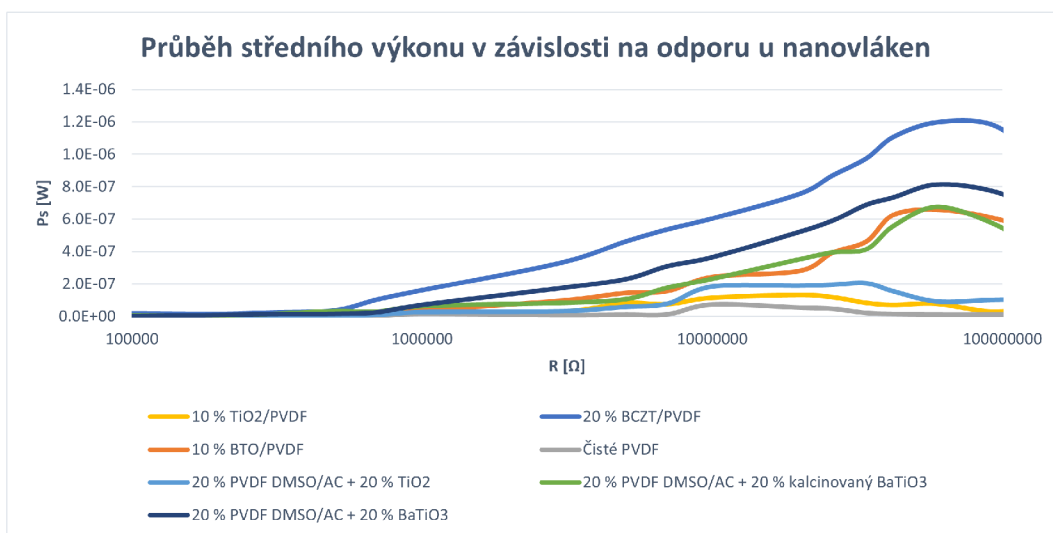


Obr. 7.13: KEITHLEY elektrometr (vlevo) [37] a odporový dekádový box (vpravo) [38]

Vzorek nanovláken se vložil mezi elektrody generátoru a opětovným mačkáním a uvolňováním vrchní desky se generovalo napětí. To bylo měřeno pro stejná nanovlákna jako v předchozí kapitole. Pro každou zvolenou hodnotu odporu se z osciloskopu odečetla tzv. RMS, neboli efektivní hodnota napětí. Poté se podle vzorce 7.2 vypočítal střední výkon P_S . A to jako podíl druhé mocniny efektivní hodnoty napětí vůči vybrané hodnotě odporu z dekádového boxu.

$$P_S = \frac{U_{ef}^2}{R} [W] \quad (7.2)$$

Hodnoty středního výkonu v závislosti na odporu pro každý druh nanovláken se následně vynesly do grafu (obr. 7.14). Z grafu je patrné, že nejvyšší střední výkon byl u 20 % BCZT/PVDF nanovláken, kdy při odporu 59.2 $M\Omega$ byl střední výkon 1.2 μW . Naopak celkově nejnižší střední výkon byl zaznamenán u čistých PVDF nanovláken.



Obr. 7.14: Závislost středního výkonu na odporu

Zhodnocení výsledků a diskuse

V praktické části práce nejprve proběhlo měření relativní permitivity a ztrátového činitele u pěti druhů nanovláken. Vždy se jednalo o PVDF nanovlákná, ale dopovaná jinými příměsemi: BCZT/PVDF, BT/PVDF, BTO/PVDF, TiO₂/PVDF a čistá PVDF nanovlákná. U každého vzorku nanovlákná byla také zaznamenána jeho tloušťka.

Dle tab. 7.18 byla nejvyšší hodnota relativní permitivity u 10 % BCZT/PVDF nanovláken, a to 2.0992 ± 0.5397 . Nejnižší hodnota byla zaznamenána u 10 % TiO₂/PVDF, a to 1.3722 ± 0.3285 . Z výsledků vyplývá, že tloušťka vláken nijak významně neovlivňuje hodnoty relativní permitivity a ztrátového činitele. Z výsledků dále plyne, že ani různé dopanty přidané k PVDF neovlivnily výslednou hodnotu relativní permitivity. U většiny vláken byla hodnota dielektrické konstanty menší než 2, pouze u 10 % BCZT/PVDF byla hodnota konstanty lehce nad 2.

Tab. 7.18: Průměrné hodnoty ϵ_r , $\tan \delta$ a tloušťky u nanovláken seřazené od nejvyšší hodnoty ϵ_r po nejnižší

Druh vláken	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]	l [mm]
10 % BCZT/PVDF	2.0992 ± 0.5397	0.0053 ± 0.0036	0.0575 ± 0.0130
30 % BCZT/PVDF	1.6810 ± 0.3251	0.0068 ± 0.0014	0.0500 ± 0.0100
PVDF bez příměsi	1.6461 ± 0.3397	0.0070 ± 0.0026	0.0280 ± 0.0075
10 % BTO/PVDF	1.6453 ± 0.4250	0.0054 ± 0.0024	0.0360 ± 0.0080
40 % BCZT/PVDF	1.5332 ± 0.2863	0.0070 ± 0.0037	0.0480 ± 0.0204
40 % BT/PVDF	1.5156 ± 0.1458	0.0057 ± 0.0029	0.0600 ± 0.0000
50 % BT/PVDF	1.4797 ± 0.4064	0.0065 ± 0.0034	0.0286 ± 0.0083
20 % BCZT/PVDF	1.4639 ± 0.1592	0.0043 ± 0.0009	0.0275 ± 0.0083
50 % BCZT/PVDF	1.4443 ± 0.2748	0.0301 ± 0.0342	0.0325 ± 0.0043
10 % TiO₂/PVDF	1.3722 ± 0.3285	0.0087 ± 0.0021	0.0425 ± 0.0083

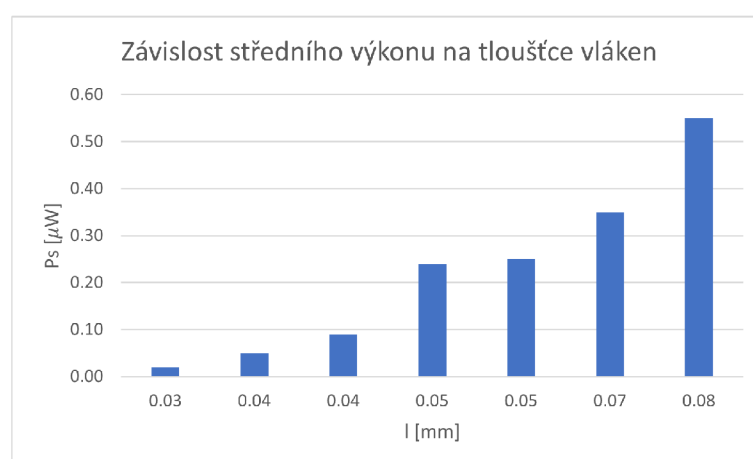
V další části práce byl vyroben triboelektrický nanogenerátor a byl otestován na sedmi druzích nanovláken: čistá PVDF, 10 % BTO/PVDF, 10 % TiO₂/PVDF, 20 % BCZT/PVDF, dále 20 % PVDF DMSO/AC s příměsí 20 % BaTiO₃, 20 % kalcinovaného BaTiO₃ a 20 % TiO₂.

Nejprve bylo měřeno špičkové napětí a z něj se vypočítal špičkový výkon. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u 20 % BCZT/PVDF nanovláken, kdy špičkový výkon dosahoval hodnot $215.71 \pm 27.42 \mu\text{W}$. Nejhůře na tom byla čistá PVDF nanovláčka, u kterých byl špičkový výkon pouze $1.14 \pm 0.20 \mu\text{W}$.

V další části práce byl generátor optimalizován, tj. byl počítán střední výkon při různých odporových zátěžích. U všech druhů nanovláken byl poté spočítán průměrný střední výkon. Z tabulky 7.19 a grafu (obr. 7.15) vyplývá, že s rostoucí tloušťkou vláken se zvyšuje hodnota středního výkonu. Je vidět, že vlákna s tloušťkou 0.1 mm vykazovala nejlepší výsledek, a to $0.55 \mu\text{W}$. Kdežto u vláken s tloušťkou 0.03 byla hodnota středního výkonu pouze $0.03 \mu\text{W}$.

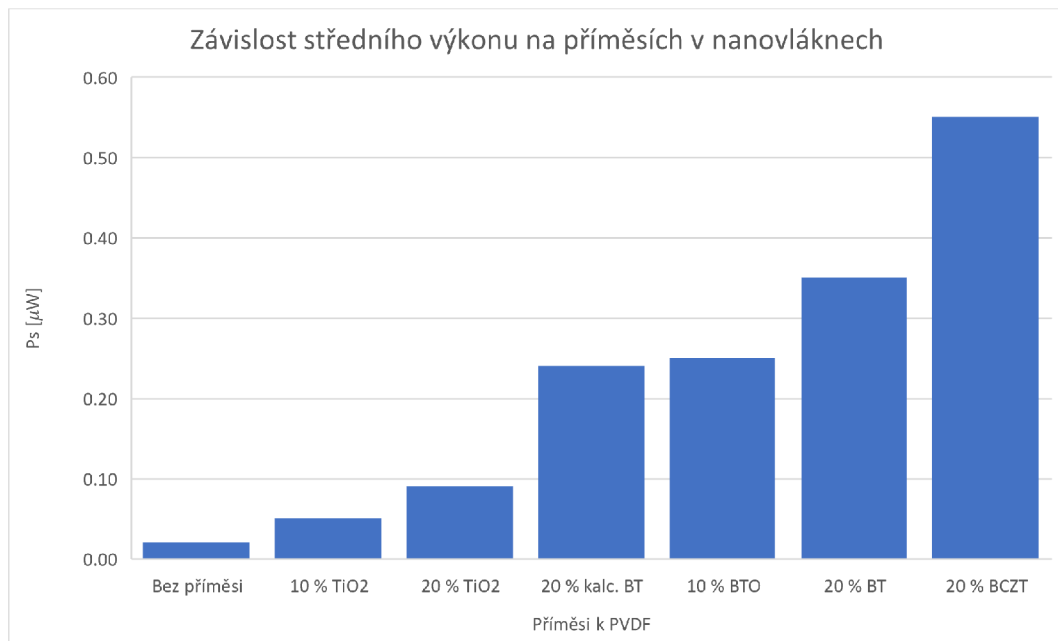
Tab. 7.19: Hodnoty tloušťky vláken a průměrného středního výkonu

Druh vláken	l [mm]	P _S [μW]
PVDF bez příměsi	0.03	0.02
10 % TiO₂/PVDF	0.04	0.05
20 % TiO₂/PVDF	0.04	0.09
20 % kalc. BT/PVDF	0.05	0.24
10 % BTO/PVDF	0.05	0.25
20 % BT/PVDF	0.07	0.35
20 % BCZT/PVDF	0.10	0.55



Obr. 7.15: Závislost středního výkonu na tloušťce nanovláken

Dále bylo zjištěno, že přidáním různých příměsí k PVDF se zvýšila hodnota středního výkonu (obr. 7.16). Nejnižší hodnotu výkonu měla čistá PVDF nanovláknina, tj. v grafu vlákna bez příměsí. Hodnota zde byla pouze $0.02 \mu\text{W}$. Ovšem po přidání 10 % a 20 % TiO_2 , 10 % BTO, 20 % normálního nebo kalcinovaného BaTiO_3 (v grafu jako BT) nebo 20 % BCZT došlo ke zvýšení hodnot středního výkonu. Nejvyšší průměrná hodnota byla zaznamenána u 20 % BCZT/PVDF, a to $0.55 \mu\text{W}$. Na obr. 7.14 bylo také vidět, že při odporu $59.2 \text{ M}\Omega$ dosáhl střední výkon u těchto vláken hodnoty $1.2 \mu\text{W}$. Druhý nejvyšší průměrný střední výkon byl dosažen u 20 % BaTiO_3 /PVDF vláken, a to $0.35 \mu\text{W}$. Následovala 10 % BTO a 20 % kalcinovaná BaTiO_3 /PVDF nanovláknina, u nichž byl výsledek dosti podobný: 0.25 a $0.24 \mu\text{W}$. Co se týče částic TiO_2 , při obou příměsích (10 a 20 %), dosahoval výkon malých hodnot: 0.09 a $0.05 \mu\text{W}$.



Obr. 7.16: Závislost středního výkonu na příměsích v nanovlákních

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s problematikou zabývající se energy harvestingem, prostudovat přípravu různých elektricky zvláknovaných materiálů vhodných pro energy harvesting, proměřit vybrané dielektrické parametry u nanovláken a vyrobit a otestovat generátor energie.

Teoretická část práce je rozdělena na několik částí. První část se zabývala nanovláknami a byl popsán jejich vznik a využití. Bylo zjištěno, že nejvíce používanou metodou pro výrobu nanovláken je elektrostatické zvláknování. Následovaly kapitoly o dielektrikách a o piezoelektrickém jevu a materiálech, jenž tento jev vykazují. Čtvrtá část práce zmiňovala triboelektrický jev a byl popsán triboelektrický nanogenerátor a jeho aplikace. Pátá část se věnovala energy harvestingu. Energy harvesting představuje v dnešní době velmi slibnou a diskutovanou technologii. Podstatou je získání elektrické energie z okolního prostředí (vibrace, teplo, světlo) a následné využití této energie pro napájení autonomních zařízení o malých výkonech. V této kapitole jsou popsány možné způsoby získání elektrické energie a jejich využití. Poslední část se zabývala elektricky zvláknitelnými materiály vhodnými pro energy harvesting aplikace. Zvláknitelnými materiály mohou být polymery, keramika a kompozity. V energy harvesting aplikacích se nejvíce z organických polymerů využívá polyvinylidenfluorid (PVDF).

Praktická část práce se nejprve věnovala měření dielektrických parametrů: dielektrické konstanty (relativní permitivity) a ztrátového činitele u vybraných druhů nanovláken: BCZT/PVDF, BT/PVDF, BTO/PVDF, TiO₂/PVDF a čistá PVDF nanovláknina. U všech druhů nanovláken byly vypočítány průměrné hodnoty ϵ_r a $\tan \delta$. Nejvyšší průměrná hodnota ϵ_r byla zaznamenána u 10 % BCZT/PVDF nanovláken, a to 2.0992 ± 0.5397 . Naopak nejnižší byla u 10 % TiO₂/PVDF s hodnotou 1.3722 ± 0.3285 . Nejnižší dielektrické ztráty měla 20 % BCZT/PVDF nanovláknina a nejvyšší byly u 50 % BCZT/PVDF nanovláken. Z měření vyplynulo, že tloušťka vláken neměla vliv na výslednou hodnotu relativní permitivity a ani příměsi k PVDF nijak neovlivnily její hodnotu. Průměrné hodnoty ϵ_r byly skoro u všech nanovláken menší než 2, pouze u 10 % BCZT/PVDF vláken byla hodnota lehce nad 2.

Na závěr byl v praktické části práce vyroben triboelektrický nanogenerátor, který byl otestován na sedmi druzích nanovláken: čistá PVDF, 10 % BTO/PVDF, 10 % TiO₂/PVDF, 20 % BCZT/PVDF, dále 20 % PVDF DMSO/AC s příměsí 20 % BaTiO₃, 20 % kalcinovaného BaTiO₃ a 20 % TiO₂.

Nejprve bylo měřeno špičkové napětí (při odporu osciloskopu 10 M Ω) a z něj vypočten průměrný špičkový výkon. Nejvyšší průměrný špičkový výkon měla 20 % BCZT/PVDF nanovláknina, a to $215.71 \pm 27.42 \mu\text{W}$. Nejnižší byl zaznamenán u čistých PVDF nanovláken, a to pouze $1.14 \pm 0.20 \mu\text{W}$.

Dále bylo měřeno napětí při různých odporových zátěžích. Z osciloskopu se odečetala efektivní hodnota napětí, pomocí které se pak vypočítal střední výkon P_S . Nejvyšší hodnota P_S byla u 20 % BCZT/PVDF nanovláken, a to $1.2 \mu\text{W}$ při odporu $59.2 \text{ M}\Omega$. U všech nanovláken se také vypočítal průměrný střední výkon. Při hodnocení výsledků měření bylo zjištěno, že s rostoucí tloušťkou nanovláken se zvyšuje hodnota středního výkonu. U čistých PVDF nanovláken s tloušťkou 0.03 mm byla průměrná hodnota P_S pouze $0.02 \mu\text{W}$, zato u 20 % BCZT/PVDF s tloušťkou 0.10 mm se hodnota průměrného P_S dostala na $0.55 \mu\text{W}$. Dále bylo zjištěno, že i přidání různých příměsí (např. BaTiO_3 , TiO_2 , BCZT) k čistým PVDF nanovláknům má vliv na hodnotu středního výkonu, a to tak, že po přidání příměsí se hodnota P_S také zvýšila.

Literatura

- [1] SODOMKA, Lubomír: *Nanovlákná–materiály budoucnosti*. Rozhledy matematicko-fyzikální, 2016, 91(4), 14–18
- [2] VLASÁKOVÁ, Romana: *Elektrická charakterizace flexibilních nanovláknenných piezoelektrických materiálů*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [3] GREINER, Andreas a Joachim H. WENDORFF: *Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers* Angewandte Chemie International Edition, 2007, 46(30), 5670-5703, ISSN 14337851, doi:10.1002/anie.200604646
- [4] HU, Xiuli, Shi LIU, Guangyuan ZHOU, Yubin HUANG, Zhigang XIE a Xiabin JING: *Electrospinning of polymeric nanofibers for drug delivery applications*. *Journal of Controlled Release*. 2014, 185, 12-21, ISSN 01683659, doi:10.1016/j.jconrel.2014.04.018
- [5] ALHASSAN, Zainab Abu, Yasmeeen S. BUREZQ, Remya NAIR a Nader SHEHATA: *Polyvinylidene Difluoride Piezoelectric Electrospun Nanofibers: Review in Synthesis, Fabrication, Characterizations, and Applications*. *Journal of Nanomaterials*. 2018, 2018, 1-12. ISSN 1687-4110, doi:10.1155/2018/8164185
- [6] RAMAKRISHNA, Seeram: *An introduction to electrospinning and nanofibers*. Hackensack, NJ: World Scientific, c2005. ISBN 98-125-6454-3
- [7] ALMETWALLY, Alsaid Ahmed, M. EL-SAKHAWY, M. H. ELSHAKAN-KERY a M. H. KASEM: *Technology of Nano-Fibers: Production Techniques and Properties - Critical Review*. *Journal of the Textile Association*. 2017, 78(1), 5-14
- [8] KRATOCHVÍL, Bohumil: *Základy fyziky a chemie pevných látek II*. 1st ed. Praha : VŠCHT Praha, 1990. ISBN 80-7080-055-0
- [9] JIRÁk Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ, Marie SEDLAŘÍKOVÁ: *Materiály a technická dokumentace: Materiály v elektrotechnice*. Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [10] EDVARDSSON, Malin: *What is piezoelectricity?*. Biolin Scientific. 21 Oct, 2020 Dostupné z:
<<https://www.biolinscientific.com/blog/what-is-piezoelectricity/>>.

- [11] Piezoelectric Constants: *APC International*, 2016. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>.
- [12] XU, T.-B.: *Energy harvesting using piezoelectric materials in aerospace structures*. Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures. Elsevier, 2016, 175-212. ISBN 9780081001486, doi:10.1016/B978-0-08-100148-6.00007-X
- [13] WEI, Huige, Hui WANG, Yijie XIA, et al: *An overview of lead-free piezoelectric materials and devices*. 12446-12467, doi:10.1039/C8TC04515A
- [14] RÖDEL, Jürgen, Kyle G. WEBBER, Robert DITTMER, Wook JO, Masahiko KIMURA a Dragan DAMJANOVIC: *Transferring lead-free piezoelectric ceramics into application*. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015, 35(6), 1659-1681. ISSN 09552219, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2014.12.013
- [15] Monitoring Blood Flow with Ultrasonic Piezo Transducer: *News Medical Life Sciences*. 24 Sept, 2019 Dostupné z: <https://www.news-medical.net/whitepaper/20190924/Monitoring-Blood-Flow-with-Ultrasonic-Piezo-Transducer.aspx>.
- [16] SONG, Hang: *Fabrication and characterisation of electrospun polyvinylidene fluoride (PVDF) nanocomposites for energy harvesting applications*. 2016, Wolfson Centre of Material Processing, Brunel University London.
- [17] SHEPELIN, Nick A., Alexey M. GLUSHENKOV, Vanessa C. LUSSINI, Phillip J. FOX, Greg W. DICINOSKI, Joseph G. SHAPTER a Amanda V. ELLIS: *New developments in composites, copolymer technologies and processing techniques for flexible fluoropolymer piezoelectric generators for efficient energy harvesting*. 2019, 12(4), 1143-1176. ISSN 1754-5692, doi:10.1039/C8EE03006E
- [18] Triboelectricity. *Tribonet: About Tribology*. 01 Feb, 2019 Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/triboelectricity/>.
- [19] KHANDELWAL, Gaurav, Nirmal Prashanth MARIA JOSEPH RAJ a Sang-Jae KIM: *Materials Beyond Conventional Triboelectric Series for Fabrication and Applications of Triboelectric Nanogenerators*. *Advanced Energy Materials*. 2021, 11(33). ISSN 1614-6832, doi:10.1002/aenm.202101170
- [20] WANG, Zhong Lin: *Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors – Principles, problems and perspectives*. *Faraday Discuss*. 2014, 176, 447-458. ISSN 1359-6640, doi:10.1039/C4FD00159A

- [21] LUO, Jianjun a Zhong Lin WANG: *Recent progress of triboelectric nanogenerators: From fundamental theory to practical applications*. EcoMat. 2020, 2(4). ISSN 2567-3173, doi:10.1002/eom2.12059
- [22] HADAŠ, Zdeněk: *Vývoj alternativních zdrojů elektrické energie pro moderní elektroniku*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky: VUTIUM, 2015, ISSN 1213-418X.
- [23] KIZIROGLOU M.E. a E. M. YEATMAN: *Materials and techniques for energy harvesting*. Imperial College London, UK, 2012.
- [24] BEEBY, S. P., M. J. TUDOR a N. M. WHITE: *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*. Measurement Science and Technology. 2006, 17(12), R175-R195. ISSN 0957-0233, doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01.
- [25] BOISSEAU, S., G. DESPESSE a B. AHMED: *Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting*. Small-Scale Energy Harvesting. InTech, 2012, 2012-10-31. ISBN 978-953-51-0826-9, doi:10.5772/51360
- [26] CUADRAS, A., M. GASULLA a V. FERRARI: *Thermal energy harvesting through pyroelectricity*. Sensors and Actuators A: Physical. 2010, 158(1), 132-139. ISSN 09244247, doi:10.1016/j.sna.2009.12.018
- [27] XUE, Jiajia, Tong WU, Yunqian DAI a Younan XIA: *Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications*. Chemical Reviews. 2019, 119(8), 5298-5415. ISSN 0009-2665, doi:10.1021/acs.chemrev.8b00593
- [28] VATANSEVER, D., R. L. HADIMANI, T. SHAH a E. SIORES: *An investigation of energy harvesting from renewable sources with PVDF and PZT*. Smart Materials and Structures. 2011, 20(5). ISSN 0964-1726, doi:10.1088/0964-1726/20/5/055019
- [29] CHA, Youngsu, Jin HONG, Jaemin LEE, Jung-Min PARK a Keehoon KIM: *Flexible Piezoelectric Energy Harvesting from Mouse Click Motions*. Sensors. 2016, 16(7). ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s16071045
- [30] KIM, Minsung a Kwang-Seok YUN: *Helical Piezoelectric Energy Harvester and Its Application to Energy Harvesting Garments*. Micromachines. 2017, 8(4). ISSN 2072-666X, doi:10.3390/mi8040115

- [31] CHEN, Xi, Shiyou XU, Nan YAO a Yong SHI: *1.6 V Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting Using PZT Nanofibers*. Nano Letters. 2010, 10(6), 2133-2137. ISSN 1530-6984, doi:10.1021/nl100812k
- [32] SORAYANI BAFQI, Mohammad Sajad, Roohollah BAGHERZADEH a Masoud LATIFI: *Fabrication of composite PVDF-ZnO nanofiber mats by electrospinning for energy scavenging application with enhanced efficiency*. Journal of Polymer Research. 2015, 22(7). ISSN 1022-9760, 10.1007/s10965-015-0765-8
- [33] ABOLHASANI, Mohammad Mahdi, Kamyar SHIRVANIMOGHADDAM a Minoo NAEBE: *PVDF/graphene composite nanofibers with enhanced piezoelectric performance for development of robust nanogenerators*. Composites Science and Technology. 2017, 138, 49-56. ISSN 02663538, doi:10.1016/j.compscitech.2016.11.017
- [34] CHEN, Xiaoliang, Xiangming LI, Jinyou SHAO, et al: *High-Performance Piezoelectric Nanogenerators with Imprinted P(VDF-TrFE)/BaTiO₃ Nanocomposite Micropillars for Self-Powered Flexible Sensors*. Small. 2017, 13(23). ISSN 16136810, doi:10.1002/sml.201604245
- [35] Alpha-A High Performance Modular Measurement System: *Novocontrol Technologies*, 2020. Dostupné z:
<https://www.novocontrol.de/php/ana_alpha.php>.
- [36] DSOX2024A - Osciloskop, 4x 200MHz, 2GSPS, Keysight: *Distrelec*, 2022. Dostupné z:
<<https://www.distrelec.cz/cs>>.
- [37] 6517B/E - Elektrometr, 2M Ω ... 200T Ω , Keithley: *Distrelec*, 2022. Dostupné z:
<<https://www.distrelec.cz/cs>>.
- [38] P3280 - Odporová dekáda 1 Ω ...11.111 M Ω 2 W, PeakTech: *Distrelec*, 2022. Dostupné z:
<<https://www.distrelec.cz/cs>>.