

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Energy harvesting pro smart textilie**

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

Jméno a příjmení: **Martin MIKEŠ**  
Osobní číslo: **E15B0126P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Energy harvesting pro smart textilie**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište jednotlivé principy energy harvesting.
2. Porovnejte jednotlivé systémy pro energy harvesting.
3. Navrhněte systém energy harvesting pro využití ve smart textiliích.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **VULLERS, R.J.M., R. VAN SCHAIJK, I. DOMS, C. VAN HOOFF a R. MERTENS. Micropower energy harvesting. Solid-State Electronics [online]. 2009, 53(7), 684-693. DOI: 10.1016/j.sse.2008.12.011. ISSN 00381101.**
2. **HARB, Adnan. Energy harvesting: State-of-the-art. Renewable Energy [online]. 2011, 36(10), 2641-2654. DOI: 10.1016/j.renene.2010.06.014. ISSN 09601481.**
3. **MITCHESON, P.D., E.M. YEATMAN, G.K. RAO, A.S. HOLMES a T.C. GREEN. Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. Proceedings of the IEEE [online]. 2008, 96(9), 1457-1486. DOI: 10.1109/JPROC.2008.927494. ISSN 0018-9219.**
4. **Elektronické informační zdroje**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Martin Partingl**

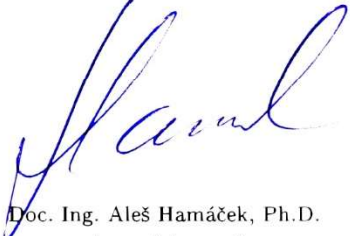
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**

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



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je rozdělena do tří hlavních částí. První část je zaměřena na obecný popis a princip jednotlivých typů energy harvesterů. V druhé části porovnává a uvádí některé systémy energy harvesting pro smart textilie. Ve třetí části navrhuje a prezentuje jejich využití pro smart textilie. Konkrétně je zde popsán návrh boty napájené dvěma piezoelektrickými harvestery. Bota je navržena jako energeticky autonomní a mohla by sloužit zejména k podiatrickým účelům.

**Klíčová slova**

Energy harvesting, smart textilie, autonomní smart textilie, energy scavenging, power harvesting, ambient power, bezdrátové napájení, energetická nezávislost

**Abstract**

This bachelor thesis is divided into three main parts. The first part is focused on general description and principle of each type of energy harvesters. The second part names and compares different energy harvesting systems for smart textiles. Last part proposes and presents their use in smart textiles. Subsequently, the thesis deals with the description of the smart shoes with two piezoelectric harvesters. This shoes could be used mainly for podiatry purposes. This application is designed to be energy autonomous.

**Key words**

Energy harvesting, smart textile, autonomous smart textile, energy scavenging, power harvesting, ambient power, wireless charging, smart fabric, energy autonomous

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 28.5.2018

Martin Mikeš

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Partinglovi za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>1 ENERGY HARVESTING</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBECNÝ POPIS BLOKŮ PRO ENERGY HARVESTING .....	14
1.1.1 <i>Zdroje energie pro energy harvesting, harvester</i> .....	14
1.1.2 <i>Usměrňovače pro energy harvesting</i> .....	15
1.1.3 <i>Konvertory pro energy harvesting</i> .....	16
1.1.4 <i>Zásoba energie</i> .....	17
1.1.5 <i>Správa napájení pro energy harvesting</i> .....	18
1.1.6 <i>Zátěž a komunikace s okolím</i> .....	18
1.2 MECHANICKÉ PRINCIPY ENERGY HARVESTINGU .....	19
1.2.1 <i>Elektromagnetický princip</i> .....	19
1.2.2 <i>Elektrostatický princip</i> .....	23
1.2.3 <i>Triboelektrický princip</i> .....	24
1.2.4 <i>Piezoelektrický princip</i> .....	26
1.2.5 <i>Magnetostrikční princip</i> .....	26
1.3 TERMOELEKTRICKÝ PRINCIP HARVESTINGU .....	28
1.3.1 <i>Seebeckův princip</i> .....	28
1.3.2 <i>Pyroelektrický princip</i> .....	30
1.4 FOTOVOLTAICKÝ PRINCIP HARVESTINGU .....	30
1.5 RF PRINCIP HARVESTINGU.....	32
<b>2 POROVNÁNÍ PRINCIPŮ A SYSTÉMŮ</b> .....	<b>33</b>
2.1 MECHANICKÉ HARVESTERY .....	35
2.1.1 <i>Elektromagnetické harvestery</i> .....	35
2.1.2 <i>Elektrostatické harvestery</i> .....	36
2.1.3 <i>Triboelektrické harvestery</i> .....	36
2.1.4 <i>Piezoelektrické harvestery</i> .....	37
2.1.5 <i>Magnetostrikční harvestery</i> .....	37
2.2 TERMOELEKTRICKÉ HARVESTERY .....	37
2.2.1 <i>Seebeckovy harvestery</i> .....	37
2.2.2 <i>Pyroelektrické harvestery</i> .....	37
2.3 FOTOVOLTAICKÉ HARVESTERY .....	38
2.4 RF HARVESTERY .....	38
2.5 KOMBINACE PRINCIPŮ .....	39
2.6 REALIZOVANÉ SYSTÉMY ENERGY HARVESTINGU POTENCIÁLNĚ VHODNÉ PRO SMART TEXTILIE .....	40
2.6.1 <i>Piezoelektricky a elektrostaticky napájená bota Rocha</i> .....	40
2.6.2 <i>Elektromagnetický harvester připevněný na batohu Wen</i> .....	41
2.6.3 <i>Nízkofrekvenční elektromagnetický generátor Sari</i> .....	41
2.6.4 <i>Elektromagnetický nízkofrekvenční generátor PFIG Galchev</i> .....	43
2.6.5 <i>Kompletní řešení pro kombinovaný TEG a RF harvesting Lhermet</i> .....	44



2.7	POROVNÁNÍ NĚKTERÝCH SYSTÉMŮ V TABULCE.....	44
<b>3</b>	<b>NÁVRH SYSTÉMU ENERGY HARVESTING PRO SMART TEXTILIE .....</b>	<b>46</b>
3.1	SMART TEXTILIE.....	46
3.1.1	<i>Typy smart textilií</i> .....	46
3.1.2	<i>Smart obuv</i> .....	47
3.2	ENERGY HARVESTER .....	48
3.3	USMĚRŇOVAČ, KONVERTOR, SPRÁVA NAPÁJENÍ A ZÁSoba ENERGIE IO .....	49
3.3.1	<i>Režimy systému</i> .....	49
3.3.2	<i>Integrované obvody napájení</i> .....	49
3.4	MIKROKONTROLER A KOMUNIKACE S OKOLÍM.....	50
3.5	SENZORY .....	51
3.6	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	51
3.7	SHRnutí VLASTNOSTÍ SYSTÉMU .....	51
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>53</b>
	<b>CITOVANÁ LITERATURA.....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>63</b>

## Seznam symbolů a zkratk

$A$	Úroveň akcelerace [ $m/s^2$ ]
<i>Amorfnní látky</i>	Látky bez pravidelné dlouhosáhlé (krystalické) struktury
$B$	Magnetická indukce [ $T$ ]
$Bi$	Bismut
<i>Bluetooth</i>	Standard pro bezdrátovou komunikaci
$Cd$	Kadmium
$c_e$	Koeficient elektrického útlumu [–]
$c_p$	Koeficient parazitního útlumu [–]
$c_T$	Celkový koeficient útlumu [–]
$Cu$	Měď
<i>Datasheet</i>	Datový katalogový list shrnující technické parametry daného objektu
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů (PCB)
<i>El. Encefalogram</i>	Elektroencefalogram (EEG) je přístroj měřící mozkovou aktivitu
<i>Energy Harvesting</i>	Získávání (sklizení, sběr) energie z dostupných okolních zdrojů
$F$	Síla [ $N$ ]
<i>FRAM</i>	Ferroelectric random access memory (nevolatilní paměť)
<i>FV</i>	Fotovoltaika
<i>GaAs</i>	Arsenid gallitý
<i>Gore – Tex</i>	Registrovaná značka, nejznámější jako nepromokavá tkanina
<i>GSM</i>	Globální systém pro mobilní komunikaci
<i>Holter</i>	Přístroj sloužící k zaznamenávání aktivity srdce po delší dobu (například 24 a 48 hodin)
$i$	Proud [ $A$ ]
<i>IC (IO)</i>	Integrated circuit (integrováný obvod)
<i>IR</i>	Infrared (infračervené záření)
<i>ITO</i>	Indium tin oxide (oxid india a cínu)
$k$	Tuhost pružiny [ $N/m$ ]
<i>Krystalické látky</i>	Látky s pravidelnou strukturou stavebních prvků
$l$	Vzdálenost [ $m$ ]

<i>Li – ion akumul.</i>	Lithium-iontový akumulátor
<i>Li – pol akumul.</i>	Lithium-polymerový akumulátor
<i>m</i>	Hmotnost [ <i>kg</i> ]
<i>MEMS</i>	Microelectromechanical system (mikroelektromechanická součástka)
<i>Metglas2605SC</i>	Magnetomechanický materiál
<i>MFC</i>	Macro fibre composite (kompozitní materiál větších rozměrů s vlákny)
<i>Monokrystal</i>	Krystal se zanedbatelnými poruchami krystalové struktury
<i>MOSFET</i>	Unipolární tranzistor se strukturou kov, oxid a polovodič
<i>Oxymetr</i>	Neinvazivní metoda monitorování kyslíkové saturace v tkáni [1]
<i>Parylen</i>	Obchodní název řady chemicky vylučovaných látek p-xylylen
<i>P<sub>d</sub></i>	Výkon rozptýlený tlumením [ <i>W</i> ]
<i>PDMS</i>	Polydimethylsiloxan
<i>P<sub>e</sub></i>	Elektrický výkon [ <i>W</i> ]
<i>PET</i>	Polyethylentereftalát
<i>Polykrystal</i>	Látky obsahující krystalickou i amorfní strukturu
<i>Pulsmetr</i>	Přístroj sloužící k měření tepové frekvence
<i>PUR</i>	Polyuretan
<i>PZT</i>	Piezoelektrický měnič (materiál)
<i>RF</i>	Radio frequency (rádiové vlny používané pro přenos informace)
<i>RFID</i>	Radio frequency identification (radiofrekvenční identifikátor)
<i>S</i>	Síra
<i>Sb</i>	Antimon
<i>Si</i>	Křemík
<i>sin α</i>	Úhel vektoru magnetické indukce a vektoru rychlosti vodiče [°]
<i>Te</i>	Tellur
<i>TEG</i>	Thermoelectric generator (termoelektrický generátor)
<i>TENG</i>	Triboelektrický generátor
<i>Thin film</i>	Vrstva materiálu od tloušťky v řádu nanometrů po milimetry, která může tvořit elektrický prvek
<i>UART</i>	Asynchronous receiver and transmitter (univerzální asynchronní sériové rozhraní)

$u_i$	Elektrické indukované napětí [ $U$ ]
<i>USB</i>	Universal serial bus (univerzální sériová sběrnice)
$v$	Rychlost [ $m/s$ ]
<i>Wifi (WLAN)</i>	Označení několika standardů bezdrátové komunikace (sítě)
$y(t)$	Vnější sinusová vibrace [ $m$ ]
$z(t)$	Pohyb tělesa vůči rámečku harvesteru [ $m$ ]
$\zeta_e$	Elektrické tlumení [–]
$\zeta_p$	Parazitní tlumení [–]
$\zeta_T$	Celkový koeficient tlumení [–]
$\varphi$	Fázový posuv mezi rámečkem a tělesem [°]
$\phi$	Magnetický indukční tok [ $Wb$ ]
$\omega$	Úhlová frekvence [ $s^{-1}$ ]
$\omega_n$	Vlastní úhlová frekvence [ $s^{-1}$ ]

## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na princip energy harvesting, porovnání jednotlivých systémů pro energy harvesting a na návrh využití energy harvesting pro smart textilie.

Díky rozšíření zařízení pracujících na bázi polovodičů dnes dochází k miniaturizaci přenosných zařízení a snížení jejich energetické náročnosti. Došlo také k výraznému rozvoji baterií, jejich kapacita navzdory velikosti a hmotnosti s vývojem roste [2]. Nicméně baterie zvyšují provozní náklady, velikost zařízení, nutnost údržby zařízení, mají malý počet nabíjecích cyklů oproti superkapacitorům [2] a dále je zde řada ekologických aspektů, které je nutné řešit při likvidaci již použitých starých baterií. S příchodem výše popsaného vývoje se dostáváme do stavu, kdy vývoj směřuje k energetické nezávislosti přenosných, nositelných a podobných zařízení. Toho můžeme dosáhnout pomocí energy harvesting [3].

Energy harvesting, někdy se také uvádí jako energy scavenging, power harvesting nebo ambient power. Jedná se o proces, při kterém je získávána energie z externích zdrojů, například sluneční energie, termální energie, větrná energie a kinetická energie [4]. Tato energie je zachycena a uchována pro napájení zařízení. Nejčastěji se jedná o malé přenosné nebo autonomní zařízení, které by mělo pracovat co nejdéle, bez nutnosti údržby, výměny baterií, nebo externího přívodu energie ze sítě. Harvesting může být také užít jako podpůrný prostředek k částečnému zvýšení životnosti baterie zařízení [4].

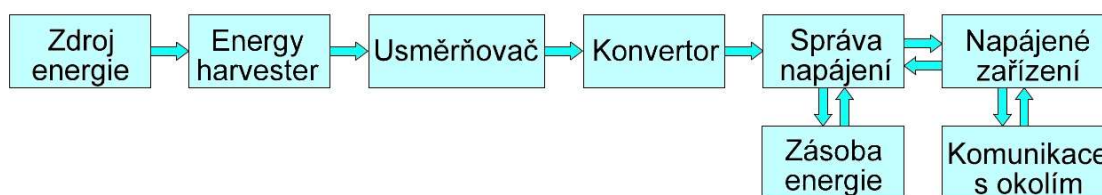
Díky této technologii mohou být některá zařízení finančně úspornější, samočinná a nemusí k nim vést dlouhé kabely. Tím dojde k snazší instalaci a úspoře hmotnosti. Bezbatérové systémy mají nižší hmotnost, můžou být menší a jejich zdroj energie by měl být ideálně nevyčerpatelný. Vždy je nutné zvážit, zdali se opravdu energy harvesting pro danou aplikaci hodí a za jakých podmínek - to někdy může být velice těžké rozhodnout.

# 1 Energy harvesting

Energy harvesting, jak již bylo stručně popsáno v úvodu, zahrnuje získání a zpracování elektrické energie z jakékoliv jiné dostupné energie. Jedná se o přeměnu energie o menších výkonech, často pro autonomní, přenosné a nositelné zařízení. Nejedná se tedy například o vysokovýkonové fotovoltaické a vodní elektrárny, které jsou někdy označovány za macro energy harvesting.

## 1.1 Obecný popis bloků pro energy harvesting

Celý proces lze rozdělit do několika hlavních bloků, jako je tomu na *Obr. 1.1*. Ve skutečných případech mohou být jednotlivé bloky řešeny integrovaně a vzájemně se doplňovat. Tedy například usměrňovač, konvertor a správa napájení mohou být v jednom uzavřeném pouzdře.



*Obr. 1.1* Blokové schéma zpracování energie.

### 1.1.1 Zdroje energie pro energy harvesting, harvester

Prvním blokem na *Obr. 1.1* je zdroj energie, tedy externí zdroj, odkud lze čerpat energii pro energy harvesting a zároveň druhá část energy harvester, které budou uvedeny společně. Máme různé principy, jak získávat energii z okolí, a každý z nich je vhodný na jinou aplikaci a každý má také jiný energetický přínos viz *Tab. 1* na str. 34. Mezi nejznámější energetické harvestery patří energie získané:

- mechanicky: pohyb, vibrace, proud kapaliny
- radiofrekvenčně: radiofrekvenční vysílání
- termoelektricky: rozdílem a změnou teplot
- generováním radioaktivními reakcemi
- makroskopickou změnou okolního tlaku
- solárně
- biologicky

Další kvalifikace je uvážena podle zdroje energie [2]:

- lidská (živočišná)
- okolní

Obr. 1.2 znázorňuje, kde se lze denně setkávat s některými z těchto zdrojů energie. Je jimi například radiofrekvenční záření především GSM a Wifi sítí, industriální vibrace, vibrace a pohyb člověka nebo zvěře, venkovní světlo nebo vnitřní světlo včetně umělého, termální energie industriální, termální energie lidská, zvířecí a mnoho dalších.



Obr. 1.2 Okolní zdroje energie pro energy harvesting (přeloženo z [5]).

### 1.1.2 Usměrňovače pro energy harvesting

Třetí částí na Obr. 1.1 je usměrňovač. Jedná se o obvod sloužící k usměrnění střídavého napětí na napětí stejnosměrné. Tato část je u některých typů harvesterů vynechána, protože některé harvestery generují stejnosměrné napětí. Harvestery pracující na principu získávání energie z vibrací generují ve většině případů střídavé napětí. To je tedy nutné pro další využití usměrnit.

Nejjednodušší usměrnění lze provést sériovým zapojením jedné diody. Ta bude propouštět vždy jen kladnou půlvlnu signálu a druhá záporná půlvlna bude potlačena. Mezi sofistikovanější zapojení patří diodový můstek. Toto zapojení se skládá ze čtyř polovodičových diod. Diody jsou zapojeny tak, že kladná půlvlna signálu bude procházet přes kladně orientovanou dvojici diod a záporná půlvlna přes dvojici opačně orientovaných diod. Toto zapojení nám obrátí zápornou část periody na kladnou. Vznikne tím usměrněný signál s dvakrát vyšší frekvencí (oproti původní frekvenci), a to může být především u radiofrekvenčních harvesterů problém z důvodu velice vysokých kmitočtů, spolu s malou získatelnou amplitudou signálu. Právě z tohoto důvodu se často využívá jednocestné usměrnění pomocí Schottkyho diody, která je složena z polovodiče a kovu (polovodičem bývá Si nebo GaAs typu N, kov bývá zlato nebo hliník). Schottkyho diody se mohou používat pro vyšší frekvence než klasické diody, protože vedení proudu v těchto diodách se účastní pouze majoritní nosiče náboje. Při difúzi se na okrajích hradlové vrstvy neakumulují minoritní nosiče [6]. Díky tomu je doba mezi vznikem a zánikem této vrstvy menší. Dalším užitečným faktorem je, že Schottkyho dioda má menší úbytek napětí v propustném směru rovnající se přibližně 0,3 V. Dioda křemíková s PN přechodem má tento úbytek okolo 0,7 V. Negativním faktorem v porovnání s klasickou diodou je vyšší proud v závěrném směru [6]. Dalším principiálně shodným zapojením je využití zapojení MOSFET tranzistoru jako diody, jedná se o poměrně efektivní low voltage usměrnění. Některé publikace dnes již běžně uvádí dosažitelnou hodnotu úbytku napětí v propustném směru u těchto tranzistorových usměrňovačů pouze zhruba 300 mV a proudu v závěrném směru pouze 415 nA při frekvenci 900 MHz [7].

### 1.1.3 Konvertory pro energy harvesting

Konvertor je čtvrtým blokem ve schématu pro sklizení a zpracování energie na *Obr. 1.1*. Česky se častěji uvádí DC/DC měnič nebo jednoduše stejnosměrný měnič. Jde o elektronický měnič napětí, tedy zařízení, které změní velikost stejnosměrného napětí na nižší, nebo v našem blokovém schématu na *Obr. 1.1* pro energy harvesting častěji na vyšší stejnosměrné napětí, protože například RF energy harvestery častěji generují nižší hodnoty napětí, než jsou potřebné pro další obvody. Snižovače napětí se anglicky označují jako step-down nebo buck-converters. Zvyšovače napětí se anglicky označují jako step-up nebo boost-converters. Měnič, který umí snižovat i zvyšovat napětí, se česky nazývá invertor



nebo anglicky buck-boost. V případě stejného napětí vstupu a výstupu hovoříme o true buck-boost konvertoru. Stejnoseměrné měniče se podle [8] dělí na přímé a nepřímé.

Přímý měnič pracuje na principu periodického přerušování napájecího obvodu, tj. pulzním způsobem [8]. Proto se často setkáváme také s názvem "pulzní měnič" nebo z angličtiny "chopper" (čopr) [8]. Pro spínání se využívají tranzistory a diody. Jako tzv. zásobníky energie se využívají induktoři, kapacitory nebo pro galvanické oddělení transformátory [8].

Nepřímý měnič je sestaven [8]:

- ze střídače, který ze stejnosměrného napětí vytvoří napětí střídavé o potřebné frekvenci,
- ze střídavého meziobvodu, většinou obsahujícího transformátor s vhodným převodem a izolační pevností,
- z řízeného usměrňovače, který střídavé napětí opět usměrní a umožňuje řízení výstupního napětí.

Mezi časté konstrukce patří tzv. nábojová pumpa, anglicky charge pump. Princip spočívá například u zvyšujícího boost převodníku v nabití dvou kapacitorů, které jsou zapojeny paralelně a následně přepojeny a vybity sériově. To způsobí ideálně dvojnásobné napětí a poloviční proud, než byly hodnoty vstupu. Tento princip měniče se hodí pro velice nízké hodnoty proudů. Díky nahrazení induktoru kapacitorem je možné dosáhnout účinnosti jen lehce pod 100 % [9].

#### 1.1.4 Zásoba energie

Zásoba energie na *Obr. 1.1* bývá nejčastěji baterie (Li-ion, Li-pol), thin film, vhodný kapacitor nebo jiné. Tato část zařízení slouží k úschově energie získané z energy harvesteru nebo z externího nabití, např. pomocí USB portu. Energeticky pokrývá potřeby zátěže při nadměrné spotřebě, výpadku energie získávané pomocí energy harvesteru nebo při nedostačující energii získávané z harvesteru.

Hustota energie baterií se v posledních desetiletích výrazně zvýšila, zejména s lithium-iontovými bateriemi, které mají nyní typické kapacity okolo 160 Wh/kg [10, 11], tj. asi 1 kJ/cm<sup>3</sup>. Uhlovodíková paliva, jako je například methanol, nabízejí hustotu energie řádově v jednotkách kWh/kg [11]. Nicméně je nutné mít další poměrně objemnou část

systému pro přeměnu energie (mikromotor). Toto palivo se tedy pro využití ve smart textiliích z praktického hlediska nehodí. Kapacity jsou dalším možným zásobníkem energie. Jejich výhodou je velký počet nabíjecích cyklů ve srovnání s bateriemi, hustota energie zůstává poměrně nízká, s teoretickými limity kolem 10 Wh/kg [12]. Dalším možným zdrojem uchování energie jsou i radioaktivní materiály. Vyznačují se nižší hustotou energie, ale dlouhodobou životností [13].

### 1.1.5 Správa napájení pro energy harvesting

Správa napájení z *Obr. 1.1* má za úkol zajistit řadu aktiv, jako je spínání mezi napájením zátěže z baterie nebo přímo z harvesteru. Zařízení napájené energy harvesterem se dělí na zařízení, která pracují [2, 14]:

- nepřetržitě: Spotřeba energie zařízení je menší než průměrný harvesterovaný výkon.
- přerušovaně: Spotřeba energie zařízení je větší než průměrný harvesterovaný výkon.

Správa napájení by měla maximalizovat získaný výkon impedančním přizpůsobením. Musí také zajistit, aby nedocházelo k přebíjení bloku pro zásobu energie. Další funkcí může být zajištění, aby se zásoba energie nesnižovala proudem procházejícím opačným směrem, tedy směrem do harvesteru [3]. Může zde být řada nadstandardních funkcí, jako rozsvícení signalizační led diody při problému s napájením, signalizace stavu baterie pro mikrokontroler apod.

### 1.1.6 Zátěž a komunikace s okolím

Poslední dva bloky na *Obr. 1.1* jsou zátěž, tou může být zařízení sloužící ke snímání, měření, zaznamenávání dat, a dále komunikace s okolím. Ta slouží k odesílání a přijímání dat, bývá zajištěno pomocí USB, Wifi, Bluetooth, RFID nebo jinak.

## 1.2 Mechanické principy energy harvesting

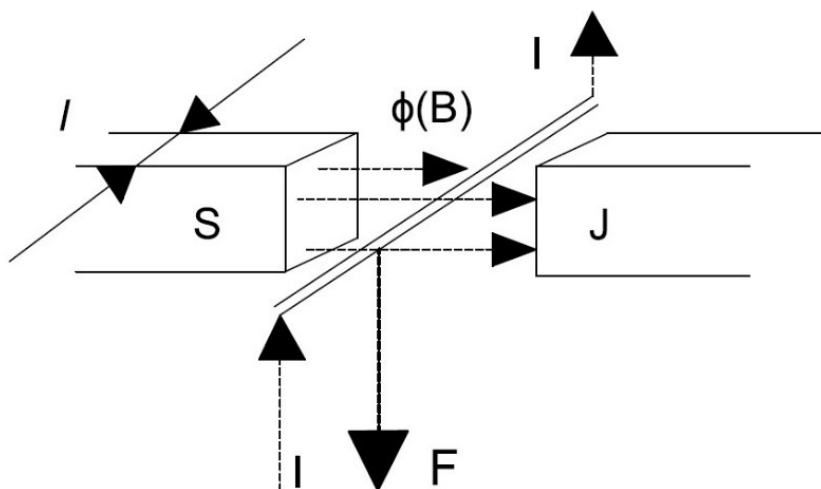
Jedná se o přeměnu mechanické energie na energii elektrickou. Jsou také energy harvestery, které například uloží energii natažením pružinky v hodinkách, ta se následně uvolňuje. Nicméně tato práce je zaměřená na první typ elektromechanických harvesterů.

Pro přeměnu pohybů a vibrací na elektrickou energii lze použít nejčastěji přeměnu:

- elektromagneticky
- elektrostaticky
- triboelektricky
- piezoelektricky
- magnetostrickí

### 1.2.1 Elektromagnetický princip

Tento princip byl popsán již v roce 1831 zákonem elektromagnetické indukce. K tomuto jevu dochází v nestacionárním magnetickém poli. Toto magnetické pole vytváří v induktoru indukované elektromotorické napětí. Nestacionární pole může být zajištěno stacionárním induktorem a pohybem magnetu v okolí induktoru, nebo naopak pohybem induktoru a stacionárním magnetem. Jedná se o hojně využívané metody. Další možností elektromagnetické indukce, která se u energy harvesting nevyužívá, je změna magnetického pole například v důsledku změny elektrického proudu induktoru, která je zdrojem magnetického pole. Jedná-li se o magnetostrickci, ta bude popsána ve článku 1.2.5 Magnetostrickční princip.



Obr. 1.3 Elektrodynamický měnič (překresleno z [15]).

**Obecně mechanický elektromagnetický měnič** může pracovat jako přijímač energie (vibrační harvester, elektrodynamický mikrofon)

$$u_i = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

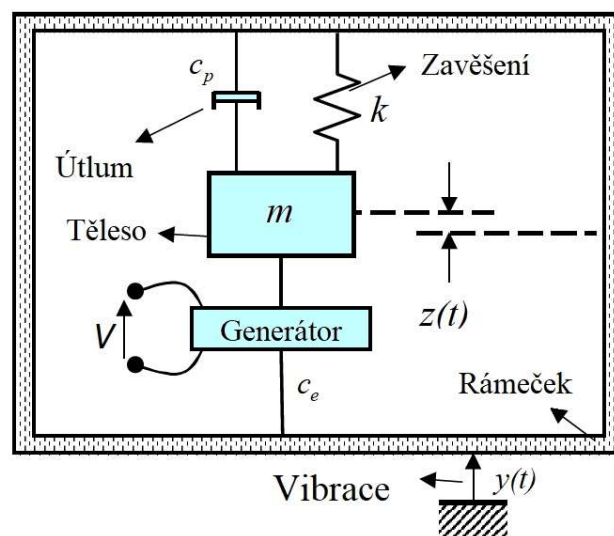
Teoreticky umí pracovat také jako vysílač (elektrodynamický reproduktor)

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{B} \quad (2)$$

Harvestery pracující na elektromagnetickém principu se dělí podle typu konstrukce na [16]:

- rezonanční
- rotační
- hybridní (rezonančně rotační)

**Rezonanční elektrodynamický harvester podle [17–19]:** Tento typ (Obr. 1.4) se skládá nejčastěji z rámečku, který je připevněn ke zdroji vibrace, rámeček je referenční bod. Dále je na rámečku připevněné mechanickým prvkem těleso  $m$  (například permanentní magnet a induktor), na kterém se indukuje napětí z důvodu vibrace magnetu a změny magnetického pole. Rám přenáší vibrace na zavěšené těleso, čímž mezi nimi vzniká relativní posun. Takový systém bude mít rezonanční frekvenci, která by měla být navržena tak, aby odpovídala charakteristikám aplikačního prostředí. Při rezonanci bude mít harvester nejlepší účinnost.



Obr. 1.4 Model lineárního rezonančního inerciálního generátoru. Generátory založené na rezonančním principu jsou v podstatě oscilátory s diferenciálními rovnicemi druhého řádu (překresleno z [17]).

Obr. 1.4 vycházející spolu s rovnicemi z [17–19] znázorňuje obecný příklad takového systému, založeného na kmitání tělesa o hmotnosti  $m$ , na pružině o tuhosti  $k$ , včetně uvážení parazitního útlumu  $c_p$ , a útlumu z důvodu extrahované elektrické energie  $c_e$ . Tento útlum budeme obecně označovat koeficientem útlumu  $c_T$ . Výše popsané součásti se nacházejí uvnitř inerciálního rámu, který je excitován vnější sinusovou vibrací tvaru

$$y(t) = Y \sin(\omega t). \quad (3)$$

Tato vnější vibrace vychýlí těleso o hmotnosti  $m$  na dráhu  $z(t)$ , při dosažení rezonance nám vznikne tzv. čistý pohyb  $z(t)$  mezi tělesem a rámečkem. To platí za předpokladu, je-li zdroj vibrace mnohonásobně těžší než hmotnost harvesteru (zjednodušeně tělesa o hmotnosti  $m$ ). Dostáváme rovnici

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t). \quad (4)$$

Ustálené řešení této rovnice je dáno rovnicí

$$z(t) = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{c_T\omega}{m}\right)^2}} Y \sin(\omega t - \varphi), \quad (5)$$

kde  $\varphi$  je fázový posuv mezi rámečkem a tělesem dáno pomocí

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{c_T\omega}{k - \omega^2 m} \right). \quad (6)$$

Nejlepší získaný výkon dosáhneme, když úhlová frekvence buzení bude odpovídat vlastní úhlové frekvenci harvesteru,  $\omega_n$ , danou rovnicí

$$\omega_n = \sqrt{k/m}. \quad (7)$$

Výkon rozptýlený tlumením (tj. výkon extrahovaný z důvodu elektrického harvestingu a dalších parazitních vlivů) bude odpovídat rovnici

$$P_d = \frac{m\zeta_T Y^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta_T \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}, \quad (8)$$

kde  $\zeta_T$  je celkové tlumení

$$\zeta_T = \frac{c_T}{2m\omega_n} [18]. \quad (9)$$

Maximální získaná energie bude tedy při

$$\omega = \omega_n, \quad (10)$$

dostaneme tím rovnicí

$$P_d = \frac{mY^2\omega_n^3}{4\zeta_T} \quad (11)$$

a zavedeme veličinu úroveň akcelerace,

$$A = \omega_n^2 Y. \quad (12)$$

Tak tedy po úpravě získáme

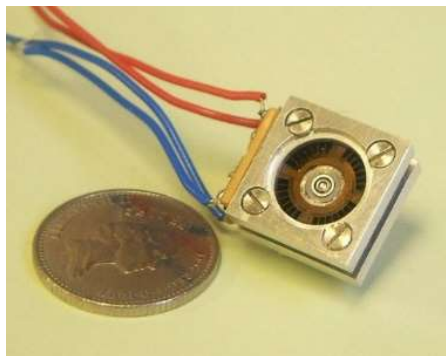
$$P_d = \frac{mA^2}{4\omega_n\zeta_T}. \quad (13)$$

Maximální elektrický výkon, který můžeme dostat, vypočítáme jako

$$P_e = \frac{m\zeta_e A^2}{4\omega_n(\zeta_p + \zeta_e)^2}. \quad (14)$$

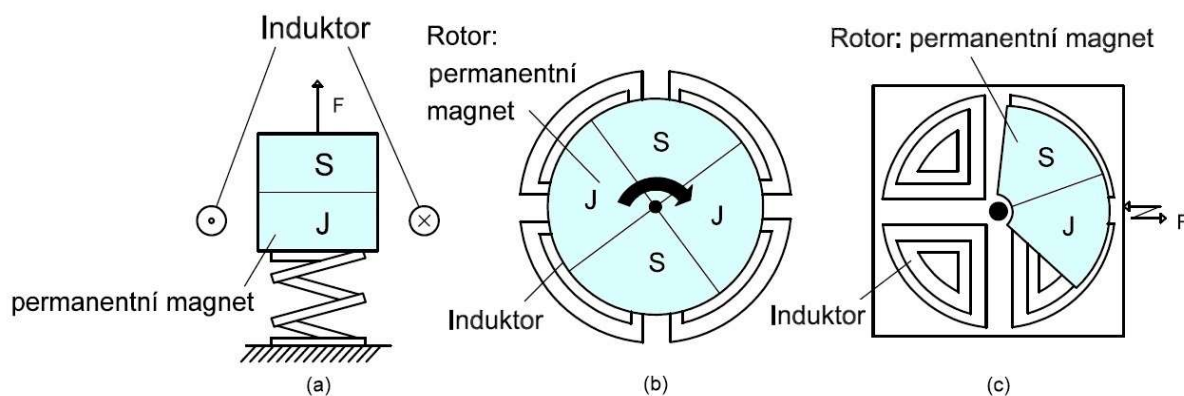
Ideální by byla možnost měnit tlumení, aby harvester mohl pracovat na více vibračních frekvencích o různé amplitudě výkyvu. Prakticky dochází spíše k tomu, že dané harvestery jsou navrhovány přímo na konkrétní aplikace, existují ovšem i samoladitelné harvestery. Dále vzhledem k tomu, že výstupní výkon je nepřímo úměrný vlastní úhlové frekvenci harvesteru, je obecně výhodnější pracovat při nízkých frekvencích vibrace, například v okolí 100 Hz [17], protože u vysokých frekvencí (například nad 1 kHz) dochází z pravidla k menšímu vychýlení  $z(t)$  tělesa s hmotností  $m$  a naopak u velice nízkých kmitočtů dojde k zatlumení pohybu tělesa a vychýlení  $z(t)$  by bylo v určitých okamžicích nulové [17].

**Rotační elektrodynamické harvestery:** Tento typ harvesterů funguje podobně jako stejnosměrný motor. Můžeme si ho představit jako reciproční miniaturní motůrek, jako bývá u RC modelů. Principiálně jde tedy o stator a rotor a jejich vzájemné působení.



Obr. 1.5 Rotační MEMS-větrný harvester a desetipencová mince (převzato z [20]).

**Hybridní elektrodynamické harvestery:** Byly vyvinuty sloučením rezonančního a rotačního principu. Konstrukce se skládá z nevyváženého rotoru, který může převést působící sílu na rotační pohyb a ten poté na elektrickou energii [16]. Hlavní výhodou je větší šířka frekvenčního pásma využitelné mechanické energie.



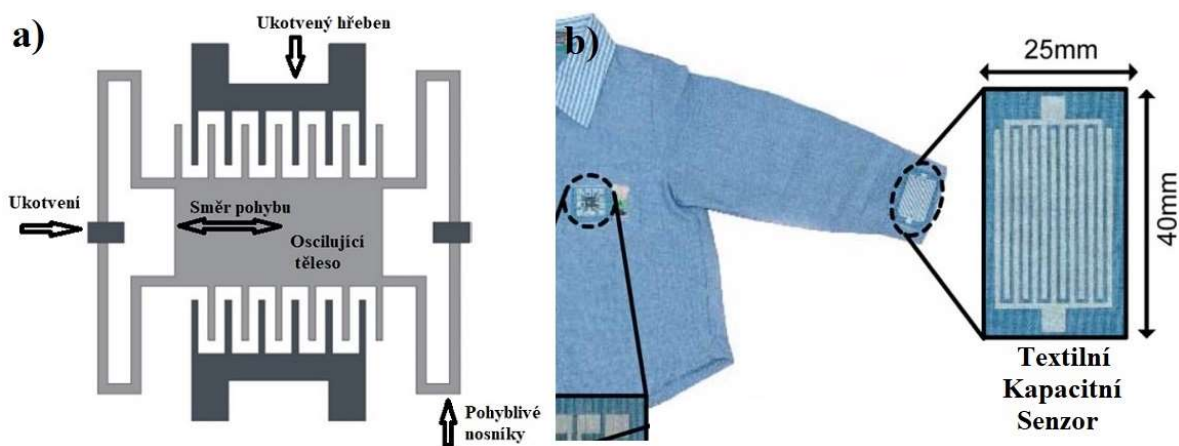
Obr. 1.6 Tři druhy mechanických elektromagnetických generátorů: (a) rezonanční (b) rotační (c) hybridní (překresleno z [16]).

### 1.2.2 Elektrostatický princip

Je založen na principu variabilní kapacity a elektrostatické indukce. Tento jev lze popsat jako stav, kdy povrch jednoho tělesa indukuje elektrostatický náboj přiblížením jiného elektricky nabitého tělesa. Jedná se o tzv. indukovaný náboj. Indukovaný náboj má opačnou polaritu než náboj, který tuto indukci vyvolal. Využití tohoto jevu nalezneme nejčastěji v kapacitorech [15].

Využívá se pohybu kovové membrány (pružná elektroda) vůči pevné elektrodě připojené na stejnosměrném napájecím napětí. Vzniká střídavé napětí, které je úměrné externímu působení, jako je například mechanická síla [2, 18]. Obě elektrody tvoří kapacitor. Pro energy harvesting lze použít i tzv. elektretový materiál (nepotřebuje napájecí napětí z důvodu permanentní polarizace a lze generovat energii bez nutnosti externího buzení). Mezi elektretové materiály patří například selen a síra [17]. Elektrody mohou být textilní, vyrobeny nejčastěji sítotiskem, vyšíváním, tkaním, nebo jinou alternativou [21]. Dielektrikem bývá polymer [21].

Konkrétní harvester pracující na principu variabilní kapacity je na *Obr. 1.7 a)*. Tato kapacita je závislá na síle působící na jednu z elektrod. Pokud je náboj na kapacitoru omezen, při snížení kapacity dojde k úniku náboje z kapacitoru [2, 18], takto je mechanická energie přeměňována na elektrickou.



*Obr. 1.7 a) Základní konstrukce elektrostatického harvestru (přeloženo z [17]).  
b) Textilní kapacitní senzor obdobné konstrukce (přeloženo z [21]).*

### 1.2.3 Triboelektrický princip

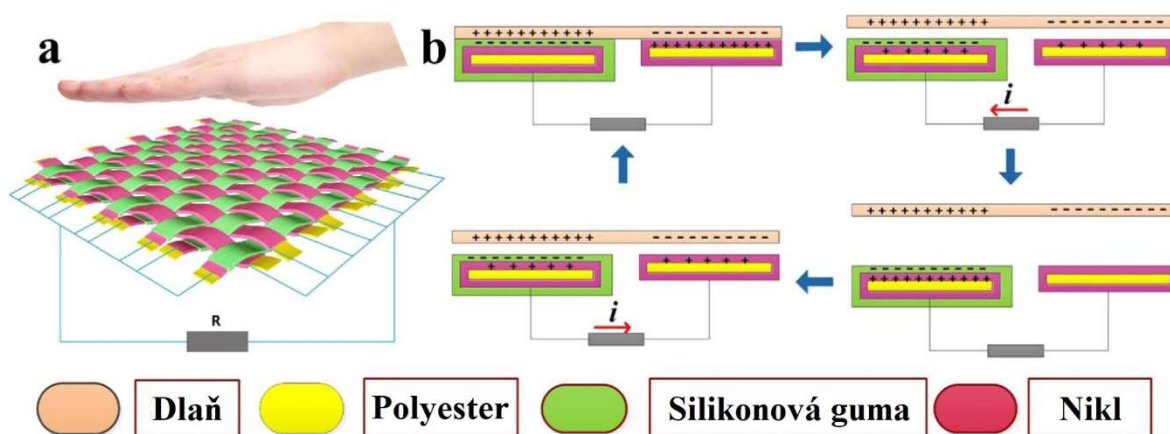
Jedná se o poměrně nově diskutovaný způsob energy harvesting pro smart textilie. Poprvé byl pozorován již v dobách starého Egypta v Babylonu při spřádání vláken, která se navzájem odpuzovala a ve tmě světélkovala.

Základní teorie vychází z Maxwellových rovnic, jako výsledek propojení triboelektrifikace a elektrostatické indukce [22–25]. K triboelektrickému jevu dochází při tření a mačkání některých dvojic materiálů, více či méně v závislosti na jejich vzdálenosti od sebe v triboelektrické řadě. Tato řada se dá označit za tabulku, v níž jsou řazeny materiály, které se snadno nabijí kladně, protože uvolní elektrony, přes neutrální materiály po materiály snadno záporně nabitelné, které elektrony ochotně přijímají. Z tabulky lze částečně určit elektronovou afinitu materiálů, nebo ji tabulka dokonce již udává. Čím je vzdálenost dvou materiálů od sebe v této řadě větší, tím větší náboj mohou mezi sebou vyvolat.



Mechanismus triboelektrických harvesterů je založen na řízeném toku elektronů indukovaných triboelektrickým efektem [26]. Konstrukce triboelektrických nanogenerátorů, zkráceně TENG, obsahuje dvě vrstvy triboelektrických materiálů a distanční vložku (rozpěrku) mezi nimi. Z těchto dvou odlišných vrstev triboelektrického materiálu je vhodným způsobem separován kladný a záporný náboj. Je-li například horní vrstva materiál PET a spodní vrstva PDMS, horní vrstva může být pro separaci náboje potažena materiálem ITO o tloušťce např. 300 nm a spodní vrstva Cu plátkem [26]. Distanční vložkou mezi triboelektrickými materiály může být z běžně dostupných materiálů vyskytujících se v textiliích, seřazeno od nejvhodnějších: elastická PUR pěna, textilie složená z 80 % bavlnou a z 20 % ostatními užívanými materiály (nylon, silon apod.), nebo čistá bavlna [26].

Důležitým faktorem je počet rozpěrek, nebo jinak řečeno procentuální plocha rozpěrek vůči ploše desky TENG. Maximální proudové hustoty bylo dosaženo při pokrytí rozpěrkami 10 % plochy a maximálního napětí při 5 % pokrytí [26]. Dalším parametrem rozpěrky je její tloušťka (maximální distance mezi deskami). Podle [26] se zvyšuje výstupní napětí na svorkách TENG při zvětšení distance mezi deskami. V praxi však bylo zjištěno, že při distanci větší než 3 mm napětí klesá. Při zvyšující se frekvenci v řádu jednotek až desítek Hz roste také výkon. TENG generují napětí v řádu stovek volt a při praktickém použití bude velice záviset výstupní výkon na impedančním přizpůsobení zátěže, nejlepších výkonů bude dosaženo s rezistencí zátěže v okolí desítek  $M\Omega$  [26].



Obr. 1.8 a) Triboelektrický textilní energy harvester (přeloženo z [25]).  
b) Princip funkce triboelektrického harvesteru (přeloženo z [25]).

### 1.2.4 Piezoelektrický princip

Tyto harvestery pracují na piezoelektrickém jevu, který byl poprvé popsán již roku 1880 bratry Curieovými. Piezoelektrický jev je schopnost krystalů generovat elektrické napětí při jejich deformaci (tahu, tlaku a ohybu), nebo reciproční jev, kdy se krystal v elektrickém poli deformuje. Vyskytuje se pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejběžnější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen, křišťál [27].



Obr. 1.9 Piezoelektrický flexibilní film na textilií a polymeru (převzato z [28]).

Budeme-li uvažovat krystal s iontovou vazbou a centrovanou mřížkou v nedeformovaném stavu krystalu, jsou náboje rozmístěny symetricky, a tedy jejich celkový náboj na povrchu je nulový. Působí-li na krystal vnější síla, způsobí to posun nosičů náboje, ale symetrie není narušena, náboj na povrchu je opět nulový. Vezmeme-li si krystal bez středové symetrie, deformací krystalu se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů se od sebe vzdálí, na rozdíl od nedeformovaného stavu, kde těžiště souhlasí s původním [27]. Při deformaci vznikne na plochách krystalu elektrický náboj a ten způsobí vnitřní elektrické pole v krystalu [27]. Jev zvaný elektrostriktce, při kterém dochází k deformaci dielektrik vlivem vnějšího elektrického pole, není jevem patřícím mezi piezoelektrické jevy, jedná se o proces samostatný [29].

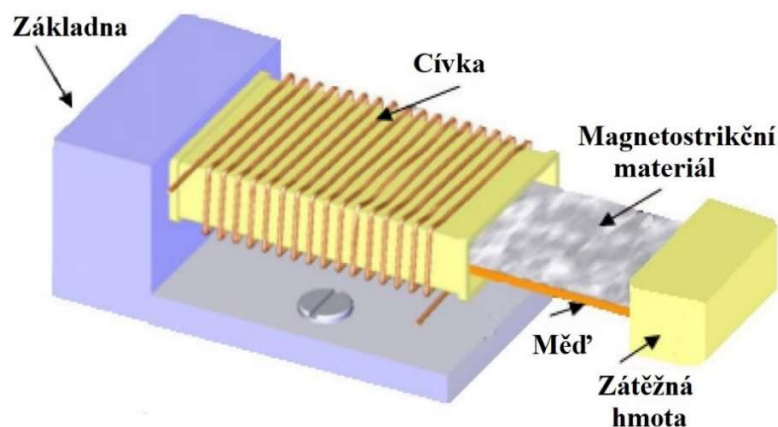
### 1.2.5 Magnetostrikční princip

Magnetostrikci objevil roku 1842 James P. Joule. Magnetostrikce byla popsána jako změna rozměrů magnetického materiálu, způsobená změnou okolního magnetického pole. Pro magnetostrikční generátory je využíváno opačného efektu, jež se nazývá Villaryho efekt, který byl objeven a popsán roku 1865. Tyto generátory se hodí pro nízké frekvence v okolí

100 Hz [30]. Vlastnosti magnetostrikce byly hojně využívány v poválečném období pro sonary, mechanické aktuátory, snímače polohy a akcelerometry [30].

Při mechanickém namáhání materiálů vhodných pro magnetostrikční účely (feromagnetika) dochází ke změně magnetického pole, tato změna magnetického pole způsobí indukované napětí na induktoru [30]. Jde o velice podobný princip, jako je tomu u elektromagnetických harvesterů. U tohoto principu ale nedochází k vzájemnému posuvu mezi např. permanentním magnetem a induktorem. Zde jsou magnetostrikční materiál a induktor vůči sobě pevně upevněny a dochází k ohybu celé této části naráz.

Teoretická konstrukce na *Obr. 1.10* se skládá z magnetostrikčních tenkých vrstviček materiálu Metglas2605SC, laminovaných na měděném proužku, tvořícím jazýček. Dalším komponentem je induktor, který má za úkol indukovat napětí a odvádět elektrickou energii dále do zařízení. Základna slouží k upevnění těchto komponentů a k ukotvení na zdroj vibrace. Posledním komponentem zde může být zátěžná hmota pro změnu optimální frekvence kmitů jazýčku.



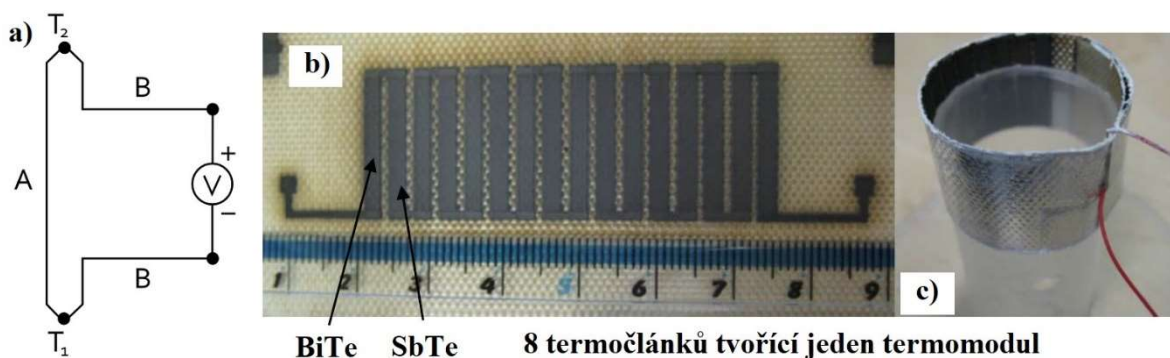
*Obr. 1.10* Konstrukce magnetostrikčního generátoru (přeloženo z [30]).

Bude-li na základnu působit vibrace, rozvibruje se jazýček, na který z důvodu ohybů bude působit na jedné straně tlaková a na druhé tahová síla. Jazýček je vyroben z magnetostrikčního materiálu a ten tedy vlivem deformace bude vytvářet proměnlivé magnetické pole v jeho okolí. To způsobí indukované napětí na induktoru, a to je poté dále odváděno na potřebné části energy harvesteru, nebo rovnou podle zvolených komponentů do bloku správy napájení.

## 1.3 Termoelektrický princip harvestingu

### 1.3.1 Seebeckův princip

Zdrojem energie tohoto harvesteru je rozdíl teplot. Již v roce 1821 byl objeven tzv. Seebeckův efekt. Ten spočívá v tom, že rozdíl teplot (teplotní gradient) mezi dvěma odlišnými vodiči (polovodiči) vytváří napětí. Mají-li vodiče rozdílné teploty, rozdíl teplot na jedné a druhé straně termoelektrického harvesteru, vytvoří se mezi nimi tepelný tok, který bude směřovat od teplejší strany ke straně chladnější podle druhého termodynamického zákona. Rozdíl teplot na plochách harvesteru způsobí při uzavření obvodu přenos nosičů náboje a vznik napětí, velikost napětí bude záviset na rozdílu teplot [29].



Obr. 1.11 a) Seebeckův efekt (převzato z [31]).

b) Tištěný termomodul na textilií (přeloženo z [32]).

c) Ukázka flexibility tištěného textilního termomodulu (přeloženo z [32]).

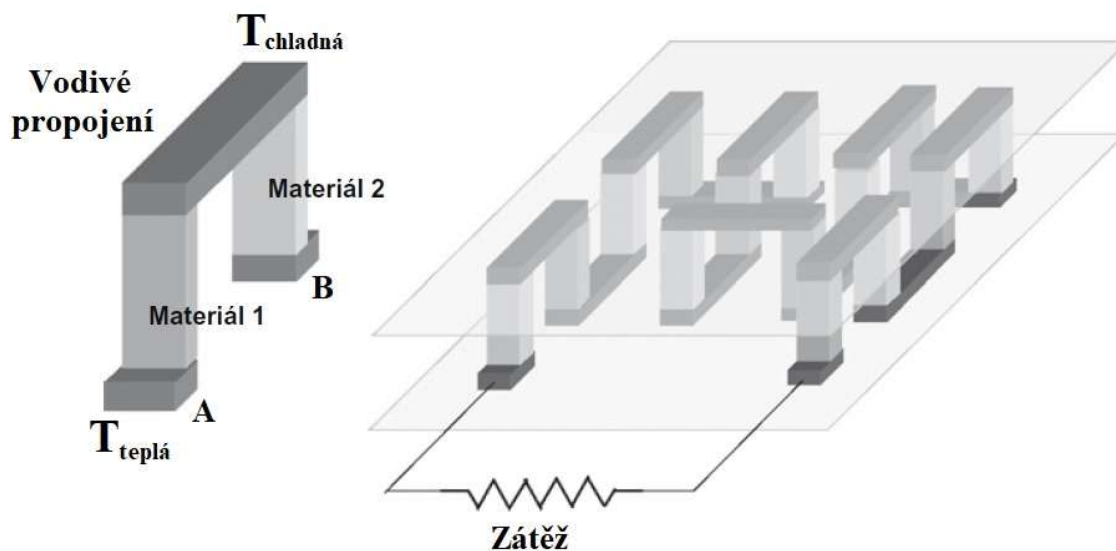
Na Obr. 1.11 a) může vzniknout napětí, které vypočteme jako

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT, \quad (15)$$

kde  $S_A$  a  $S_B$  jsou Seebeckovy koeficienty kovů A a B,  $T_1$  a  $T_2$  je teplota spojů. Seebeckovy koeficienty jsou nelineární a závisejí na teplotě vodičů, použitém materiálu a jeho molekulární struktuře [31].

Nejjednodušší praktická konstrukce je znázorněna na Obr. 1.12. Levá část obrázku představuje termočlánek. Ten se skládá z dvou pilířů vyrobených ze dvou různých materiálů z důvodu generování co největšího napětí. Pilíře jsou vodivě spojeny. Typicky se jako pilíře

používají polovodiče, protože jejich Seebeckův koeficient je vysoký. Zároveň je znaménko Seebeckova koeficientu pro P-typ a N-typ opačné, příspěvek napětí obou pílířů se sečte [3]. Pravou částí Obr. 1.12 je termomodul. Jedná se o základní prvek využívaný pro energy harvestery. Jde o velký počet termočlánků umístěných mezi dvě desky. Termočlánky jsou tepelně řazeny paralelně a elektricky zapojeny sériově. Další částí termomodulu bývá na jedné z desek umístěný chladič, nebo může být i přepínač odboček pro případ vodního chlazení.



Obr. 1.12 Konstrukce termočlánku vlevo a termomodulu vpravo (přeloženo z [3]).

Seebeckův princip funguje i obráceně a byl objeven roku 1834, nazývá se Peltierovým jevem nebo efektem. Průchodem elektrického proudu Peltierovým článkem (obvod výše) se začne jedna plocha ohřívat a druhá ochlazovat. Tyto články se prodávají nejčastěji jako Peltierovy články, Seebeckovy články nebo případně TEG články.

Souvisejícím jevem podle [29] je jev Thomsonův objevený roku 1851. Vzniká při zahřívání například kovové tyče na jednom konci, zvýší se tím v daném místě kinetická energie elektronů, ty se budou snažit přemístit ke chladnějšímu konci. To způsobí slabé kladné nabití jedné strany a záporné nabití druhé strany, čímž vznikne slabé elektrické pole. Jedná se o děj vratný, slabý, těžko měřitelný, zanedbatelný. Posledním souvisejícím, zde ale nežádoucím jevem je „Jouleův zákon“ z roku 1840, jedná se o ztráty přeměněné v teplo.

### 1.3.2 Pyroelektrický princip

Další možností získání energie je pomocí pyroelektrického jevu, ten vzniká u pyroelektrických materiálů, tím je například krystal turmalínu [33]. Tento jev způsobí vznik náboje při opakované změně teploty. Rozdíl je tedy ten, že u Peltierova článku pro získání náboje stačí udržovat konstantní rozdíl teploty na opačných deskách, ale u pyroelektrického článku musí být neustálé ochlazování a ohřívání desek, aby bylo možné generovat elektrickou energii. Matematicky lze tedy zkoumat derivaci teploty v čase. Tento jev funguje také opačně a nazývá se jevem elektrokaloreickým, spočívá ve změně teploty krystalu vloženého do elektrického pole [33]. Všechny pyroelektrické látky jsou současně piezoelektrické [33].

### 1.4 Fotovoltaický princip harvestingu

Fotovoltaický energy harvesting je založen na principu fotovoltaických článků. Tyto články jsou nejčastěji známé jako velkoplošné polovodičové desky, které dokážou přeměnit elektromagnetické záření nejčastěji ze slunce, konkrétně viditelné světlo a blízké IR záření, na elektrickou energii. Je přitom využito fotovoltaického jevu. Tento jev byl poprvé pozorován již v roce 1876, popsán roku 1905 a využit až v roce 1954. Tento princip harvestingu je považován za trvale udržitelný zdroj a za jeden z nejvýkonnějších [34].

Na 1 m<sup>2</sup> povrchu atmosféry dopadá přibližně 1367 W, část záření je pohlcená atmosférou, některé vlnové délky méně a některé více [34]. Koeficient atmosférické masy AM je snížení intenzity záření vlivem průchodu atmosférou, vypočte se jako

$$AM = \frac{1}{\sin(\phi)}, \quad (16)$$

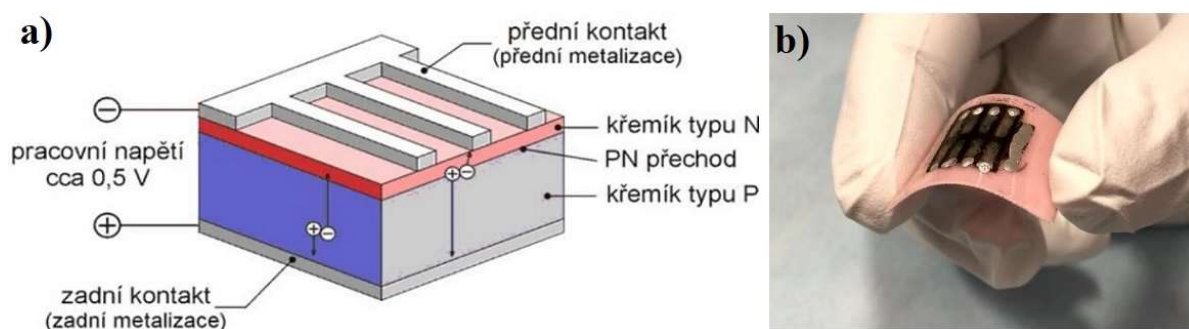
kde  $\phi$  je úhel vstupu záření do atmosféry [34]. V našich podmínkách je tento úhel asi 42° a tedy  $AM \approx 1,5$ , na rovníku je  $AM = 1$ . Dalším důležitým parametrem u fotovoltaiky obecně je délka dne (doba svitu slunce), ta je v našich podmínkách nejkratší v měsíci prosinci, kdy tato doba trvá zhruba 8 hodin, naopak nejdelší doba je v červenci, asi 16 hodin [34]. Pro dosažení maximálního výkonu je výhodné optimalizovat, aby dopadající záření bylo kolmé na panel. V České republice na 1 m<sup>2</sup> povrchu země v průměru dopadá 600 W, z tohoto výkonu lze získat až 150 W/m<sup>2</sup>, dosažitelná účinnost fotovoltaických článků nepřesahuje 25 %. Tyto parametry v případě energy harvestingu pro smart textilie jsou spíše informativní, protože zde nelze zaručit konstantní podmínky osvětlení a vysokou účinnost.

Konstrukce fotovoltaického článku je zobrazená na *Obr. 1.13 a*). Myšlenkou je podle [34] přeměna vlnové délky záření na energii

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (17)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta  $h = 6,6 \times 10^{-34}$  [Js],  $c$  je rychlost světla  $c = 3 \times 10^8$  [m/s] a  $\lambda$  je vlnová délka záření. Prochází-li foton (elementární částice, kterou je popsáno kvantum elektromagnetické energie) s dostatečnou energií materiálem, dochází k interakci mezi dopadajícím fotonem a materiálem, poté k interakci s vázanými elektrony, tím se elektrony uvolní a vznikne volný nosič náboje, ten je pak odváděn pomocí kovových kontaktů [35]. Takto může vzniknout stejnosměrné napětí. Dochází také k interakci s mřížkou materiálu a volnými elektrony, tím vzniká nežádoucí teplo [34].

Vysvětlení z pohledu polovodičového PN přechodu může být podle [35] následující. Při dopadu světla na povrch fotočlánku předají fotony svoji energii atomům v krystalové mřížce křemíku, z té se začnou uvolňovat elektrony. Díky PN přechodu nedochází k rekombinaci a uvolněné elektrony v horní vrstvě polovodiče typu N nemohou přecházet do vrstvy P, ale nahromadí se ve vrstvě N. Elektrony uvolněné ve vrstvě P naopak mohou procházet PN přechodem do vrstvy N a počet elektronů se v ní stále zvětšuje. Nahromaděním volných elektronů mezi horní a spodní vrstvou vznikne elektrické napětí.



*Obr. 1.13 a) Základní konstrukce krystalického Si FV článku (převzato z [36]).  
b) Fotovoltaická textilie (převzato z [28]).*

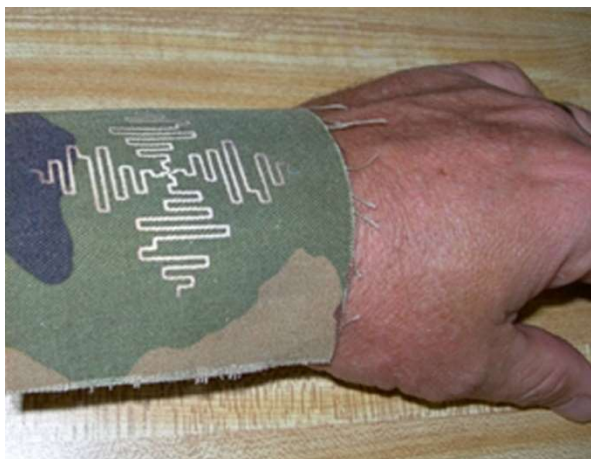
Fotovoltaické články se dají rozdělit na:

- monokrystalické: účinnost se pohybuje od 12-20 %
- polykrystalické: s účinností okolo 12-14 %
- tenkovrstvé: účinnost v řádu jednotek procent

Thin film FV články, nebo česky tenkovrstvé články lze vyrobit i flexibilní, ty se hodí nejvíce na energy harvesting pro smart textilie. Na výrobu článků se využívají materiály jako  $\text{CuInSe}_2$ , amorfnní křemík, amorfnní  $\text{SiGe}$  a  $\text{CdTe/CdS}$  [34]. Klasický fotovoltaický článek dosahuje napětí 0,5 V a  $30 \text{ mA/cm}^2$  (při optimalizaci výkonu), pracovní teplota se pohybuje od  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $+85 \text{ }^\circ\text{C}$  [34]. V praxi je vhodné články spojovat sériově pro dosažení vyššího napětí nebo případně sérioparalelně.

## 1.5 RF princip harvestingu

Okolní energie získaná z rádiových vln může být také zdrojem energie pro energy harvesting. Tato RF neboli radiofrekvenční energie je dnes dostupná především díky veřejným telekomunikačním sítím, jako je GSM, WLAN a dalším. To znamená především v městských oblastech nebo v blízkosti těchto vysílačů. Jako první komerční RF energy harvester byl dříve populární krystalový rádiový přijímač. Jedná se o zařízení pro příjem rozhlasového vysílání, které nepotřebuje ke své činnosti napájení. Je napájen pomocí RF energie a jeho princip je podle [37] následovný. Krystalka (primitivní hrotová dioda) demoduluje v rámci svých omezených možností amplitudově modulovaný signál (včetně signálu modulovaného kmitočtově). Anténa přijímá dané spektrum signálů na paralelní rezonanční obvod, který má za úkol selektovat toto spektrum a propustí tedy jen požadované spektrum signálu. Dioda odstraní horní nebo dolní postranní pásmo amplitudově modulovaného signálu a paralelně řazený kapacitor ke sluchátku zajistí filtraci zbylého vysokofrekvenčního signálu. Tím na sluchátku získáme požadovaný signál. Zde by měla mít využitá anténa podle zažitých zásad - vodič dlouhý 10 až 30 metrů o průměru 1-2 mm, vodorovně natažený nejlépe 5 metrů nad zemí.



Obr. 1.14 Příklad tištěné antény na smart textilii (převzato z [38]).



Dnešní RF harvestery fungují podobně, nicméně anténa je nesrovnatelně menší, často se využívá microstrip antenna, tedy mikropásková anténa, známá i v tištěné verzi [39]. Využívá se také rectenna, jedná se o speciální druh antény, která sestává z dipólové antény a nejčastěji Schottkyho diody připojené k dipólu, určené pro usměrnění signálu [40]. Schottkyho dioda je použita z důvodu malých ztrát díky malému poklesu napětí a její rychlosti. Za nejjednodušší rectennu by se dala označit právě krystalka, i když se částečně liší. Zjednodušeně tedy lze tvrdit, že je to anténa, která má výstupní usměrněný signál.

Obecně zde anténa slouží jako zařízení pro příjem rádiových signálů. Přijme RF signál, přemění ho na vysokofrekvenční elektrický signál. Dostaneme tím střídavý signál, který dále v jednotlivých blocích usměrníme a konvertujeme ho na napětíovou úroveň vyšší nebo nižší podle potřeby. Důležitým aspektem je schopnost harvesteru efektivně převádět vysokofrekvenční energii na stejnosměrnou v širokém spektru provozních podmínek. Některé RF harvestery, jak již bylo zmíněno, potřebují pro svoji funkci externí napájecí obvod, to může být samozřejmě problém, a proto je preferováno zvolit RF harvester, který toto externí napájení nepotřebuje.

## 2 Porovnání principů a systémů

V porovnání systémů pro energy harvesting ve smart textiliích je nutno uvážit mnoho parametrů. Mezi hlavní parametry patří výkon převedený na zátěž, který je vždy omezen především dostupností surové externí energie (např. tedy světlem, zdrojem vibrací, nebo teplem, kterému je zařízení vystaveno). Externí energie je u aplikací pro smart textilie velice diverzifikovaná. V *Tab. 1* na str. 34 jsou uvedeny některé výkonové úrovně, které lze dnes získat pomocí energy harvestingu. Dále je tento výkon omezen účinností energy harvesteru, tedy například konverzí vibrací na el. energii, nebo jiné. Další omezení je v účinnosti obvodů pro zpracování energie, tedy účinností usměrňovače a především konvertoru, protože harvestery mohou generovat při rozdílných podmínkách rozdílné napětí a může být nutno je impedančně přizpůsobit. Ve většině případů je požadované napětí větší, než je napětí generované harvesterem, a právě proto zejména u RF harvesterů bývá nejvhodnější harvester provozovat při nejvyšším generovaném napětí (nejčastěji jde o konverzi napětí z okolí desetin až jednotek volt na napětí v okolí 5 V) [2, 3, 18]. Mezi další parametry pro harvesting můžeme řadit objem, šířku pracovního pásma, hmotnost,

počet jednotek paralelně nebo v sérii, flexibilitu, integrovatelnost, pořizovací náklady, dostupnost a další.

*Tab. 1 Orientační výkonové úrovně dostupné z energy harvestingu v okolním prostředí (částečně převzato z [3, 41]).*

Typ energie	Výkon	Komentář
Radiofrekvenční	<1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Nenachází-li se harvester v těsné blízkosti vysílačů.
Světlo uvnitř (kancelář)	1,2 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Při účinnosti flexibilního tištěného článku 2 % a při uvážení o jednotkový řád nižšího průměrného výkonu na $\text{m}^2$ , než je uvedeno v článku 1.4 pro venkovní průměrnou hodnotu přímého slunečního záření v ČR.
Světlo venku	1,2 $\text{mW}/\text{cm}^2$	Při účinnosti flexibilního tištěného článku 2 % a průměrného výkonu na $\text{m}^2$ v ČR uvedeného v článku 1.4.
Vibrace (pohyb člověka)	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Pro mikrogenerátory. Při běžném pohybu rukou, hrudi apod. Vibrace v řádu Hz. Vysoce závislé na mnoha faktorech uvedených v článku 2.
Vibrace (průmysl)	100-800 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Industriální prostředí, vibrace v řádu kHz. Vysoce závislé na mnoha faktorech uvedených v článku 2.
Termální (člověk)	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Při teplotním rozdílu desek 5 °C. Typická účinnost generátoru pod 1 % při teplotním rozdílu menším než 40 °C. Závisí na aplikaci a užitém článku.
Termální (průmysl)	1-10 $\text{mW}/\text{cm}^2$	V závislosti na aplikaci a užitém článku.
Okolní proudění vzduchu	1 $\text{mW}/\text{cm}^2$	Aplikace viz <i>Tab. v [41]</i> při průtoku turbínou 30 l/s. Při reálných větrných podmínkách ve vhodném prostředí lze očekávat o jednotkový řád nižší hodnoty. Např. textilní samonatačivé větrolamy.
Vložka v obuvi	10 $\text{mW}/\text{cm}^2$	Osoba vážící 70 kg při frekvenci chůze 1 Hz, piezoelektrický měnič. Potenciál až 7 $\text{W}/\text{cm}^2$ [41].
Ruční generátory	potenciál 30 $\text{W}/\text{kg}$	Aplikace viz <i>Tab. v [41]</i> pro dobíjení svítilny.

Každý princip by měl být hodnocen individuálně pro danou aplikaci a je nemožné tvrdit, že některé řešení je obecně nejlepší, a to právě z důvodu vysokého počtu parametrů, které je nutno brát v úvahu. U vibračních harvesterů s výjimkou elektrostatického lze prohlásit, že větší zařízení mívají větší hustotu energie, tedy získatelný výkon na jednotku objemu. Naopak obecně velice malé konstrukce mikroharvesterů dosahují opět nižší hustoty energie oproti středně velkým, například z důvodu horšího a méně dokonalého opracování menších rozměrů a dále z důvodu složitějšího dosažení požadované konstrukce celého zařízení. Často také platí, že mechanické harvestery konstruované pro práci na vyšších kmitočtech mají nižší výchylku kmitající hmotnosti „m“ z rovnovážného stavu, naopak zařízení pracující na nízkých frekvencích mají toto vychýlení větší. Některé harvestery lze využít po úpravě také jako senzory v širokém spektru aplikací. Základní analýza z *Tab. 2* naznačuje, že z pohybu lidského těla lze reálně dosáhnout úrovní výkonů mikroharvesterů

pro smart textilie vztažených na  $1 \text{ cm}^3$  nejvýše v řádu jednotek miliwatt. To značně omezuje následnou aplikaci pro nezávislé napájení řady zařízení.

## 2.1 Mechanické harvestery

Níže je uvedeno porovnání mechanických harvesterů, které jsou obecně pro smart textilie nejuniverzálnější díky téměř všudypřítomnému mechanickému pohybu textilií a smart obleků. Tato mechanická energie v řadě případů přesahuje svoji dostupností externí energie, ostatní možné zdroje pro harvesting. Různé typy mohou mít extrémně proměnné parametry s ohledem na velikost, konstrukci, hmotnost a další.

### 2.1.1 Elektromagnetické harvestery

Mezi nejdiskutovanější zařízení podle [2, 42] patří elektromagnetické harvestery. Běžně se tohoto principu využívá od úrovní výkonů v řádech megawatt u elektráren, po nanowatty u harvesterů konstrukce MEMS, které jsou vhodným řešením pro implementaci tohoto typu získávání energie ve smart textiliích. MEMS harvestery se stále s vývojem zmenšují a zdokonalují a lze je užít také jako senzory. U těchto MEMS harvesterů může vznikat problém s nízkou úrovní výstupního napětí a následně její účinné konverze. Samozřejmě malý rozměr znamená také malý dostupný výkon. V budoucnu je možné, že se bude užívat stovky těchto MEMS harvesterů pro dosažení většího výkonu a flexibility této sítě MEMS harvesterů. Další konstrukční omezení spočívá ve složité integraci permanentních magnetů.

Podle [18] se ukázalo, že většina elektromagnetických harvesterů pracuje nejlépe na frekvenci v okolí 100 Hz. Základním problémem těchto harvesterů potencionálně vhodných pro integraci do smart textilií je tedy dosáhnout vyšších a stabilních frekvencí, protože nositelné smart textilie dosahují nejčastěji frekvence pohybu v řádu jednotek Hz. Tento problém lze částečně potlačit typem konstrukcí FupC, viz kapitolu 2.6.3. Naopak při velmi vysokých frekvencích dochází k horší funkci zařízení, pravděpodobně důsledkem vyššího mechanického namáhání a vlivem většího parazitního tlumení vzduchu a dalších.

Je možné, že se objeví v průběhu několika let bezdrátové dobíjení smart obleků, telefonů a jiných zařízení pomocí smart textilie například v textilií sedačky automobilu fungující obdobně, jako je řešené bezdrátové dobíjení smart telefonů dnes pomocí induktivního

přenosu energie. Toto řešení ovšem nemusí být považována za harvesting v pravém slova smyslu a také by nešlo o mechanický princip.

### 2.1.2 Elektrostatické harvestery

Elektrostatické harvestery se dají označit za širokopásmové mechanické harvestery, protože umí pracovat efektivně v širokém spektru frekvencí bez nutnosti dynamického ladění [3]. Pro svoji funkci vyžadují přednabití, aby je bylo možné využívat. Přednabití nemusí být externího charakteru, ale lze využít elektretových materiálů, které jsou trvale polarizovány, nicméně tlumící síla nebo spíše tlumení  $\zeta$  je závislé na velikosti napětí. Praktické konstrukce jsou dosaženy opět i u mikroelektromechanických konstrukcí MEMS. Pro lepší integraci do textilie lze využít technologii netkaných textilií a nanosení pomocí sítotisku stříbrných past [42], nicméně sítotisk má horší mechanickou odolnost a je tedy i náchylnější k praní. Následkem může být přerušování vodivé cesty a nefunkčnost harvesteru. Elektrostatické harvestery jsou nepraktické a neúčinné při velkých rozměrech [18].

### 2.1.3 Triboelektrické harvestery

Triboelektrické harvestery jsou pro smart textilie velice vhodné díky poměrně snadné integraci do vláken textilie, nicméně některé z nejnovějších informací o nich nejsou zatím zcela dostupné nebo známé. Výzkum a vývoj naznačuje zmenšení vláken a jejich potenciál v budoucím průmyslu smart textilií. TENG jsou levné, poměrně výkonné, lehké, udržitelné, biologicky kompaktní, snadno nositelné a odolné [26]. V závislosti na typu implementace harvesteru do textilie může být nevýhodou z principu funkce nemožnost generování energie ve vlhkém prostředí. Dostupnost získané energie závisí opět na mnoha faktorech od typů materiálů, tedy od polaritě a síly náboje, drsnosti povrchu, teploty, tlaku, procentuální plochy rozpěrek mezi triboelektrickými materiály vůči celé ploše, až po vlhkost a další parametry. Energie pro nositelné smart textilie může pocházet i z míst, která by jinak byla pro jiný typ harvesteru nepřijatelná. Na lidském těle lze zvolit umístění mezi trupem a rukou, podpaží, mezi nohama, podkolení jamku a jiné. Některé studie naznačují, že díky vysokému generovanému napětí v řádu stovek volt mohou v budoucnu sloužit pro stimulaci nervů, masáže a další lékařské účely [26]. V některých aplikacích naopak vysokonapěťové úrovně mohou být problémem. Výstupní špičkový signál TENG může být použit jako spouštěcí signál snímače pohybu u návrh zařízení pro monitorování pohybu.

### 2.1.4 Piezoelektrické harvestery

Piezoelektrické harvestery jsou opět vhodnou volbou. Ve smart textiliích je lze díky snadno dosažitelné vysoké hodnotě tlumení  $\zeta$  využít tam, kde můžeme dosáhnout vysoké působící síly i při poměrně malé frekvenci. Tedy například pro smart boty, viz kapitolu 2.6.1. Ještě lepších výsledků lze podle [43] dosáhnout pomocí kombinace elektrostatického harvesteru s piezoelektrickým. Piezoelektrické harvestery dosahují poměrně vysokých napěťových úrovní v řádu jednotek až desítek voltů. Jsou vhodné pro smart textilie díky snadné integraci i ve flexibilní tištěné formě. Produkují elektrickou energii již při nízkém namáhání, reagují téměř na jakýkoliv typ deformace v závislosti na konstrukci. Jsou poměrně levné a dostupné [44]. Tyto harvestery mohou být přímo integrovány v mnoha formách, například tkané, pletené nebo tištěné [44]. Lze je také vytvořit pomocí sítotisku [44], ty však, jak již bylo zmíněno, jsou méně mechanicky odolné. Nevhodné je využití u rotačních systémů [18].

### 2.1.5 Magnetostrikční harvestery

Magnetostrikční harvestery nejsou vhodným způsobem harvestingu pro smart textilie kvůli nízké úrovni získatelného výkonu a dnešním navrženým konstrukcím. Hodí se spíše pro senzorové aplikace.

## 2.2 Termoelektrické harvestery

### 2.2.1 Seebeckovy harvestery

Termoelektrické harvestery konstrukce Seebeckova (Peltierova) článku jsou vhodné pro smart textilie. S dnešními technologiemi je možné zakomponovat termoelektrické články přímo do těchto textilií, nicméně nadměrným snižováním velikosti se začne snižovat rozdíl teplot na ploškách harvesteru a tím dojde ke špatné termodynamické účinnosti [2]. Užitečné výkony lze získat již při rozdílu několika málo stupňů Celsia.

### 2.2.2 Pyroelektrické harvestery

Pyroelektrický harvester není příliš vhodný pro nositelné smart textilie, protože v těchto aplikacích se příliš často nevyskytuje rychlá a neustálá změna teploty okolí. Není vyloučeno, že se tento princip může prosadit v některém industriálním prostředí.

## 2.3 Fotovoltaické harvestery

Solární harvestery se hodí tam, kde je vysoká intenzita světla. Zatímco u velkoplošného využití se hledí spíše na cenu, u harvesterů vhodných pro smart textilie hraje roli především účinnost článků, která je u flexibilních textilních článků pouze v okolí jednotek procent. Dalším hlavním parametrem je dostupnost světla (která je klíčovým omezením), flexibilita, integrace na oblek, odolnost a v neposlední řadě pohodlné nošení. Zde se dá předpokládat technické zdokonalení flexibilních článků a následné hojně komerční využití.

## 2.4 RF harvestery

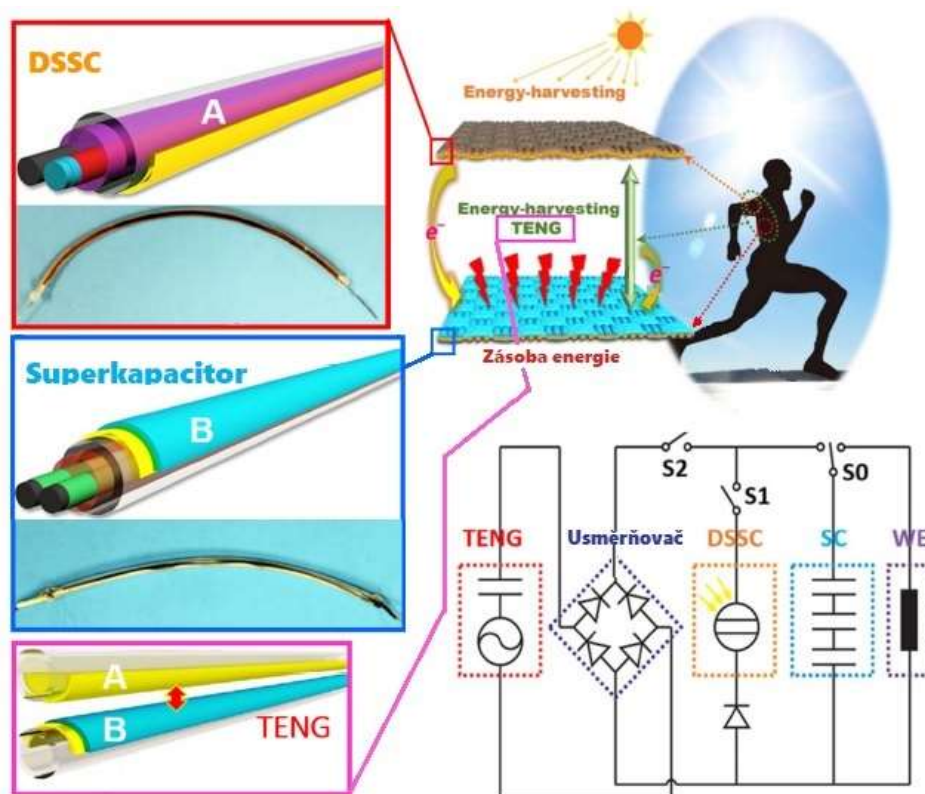
Sklizení okolní RF energie pro smart textilie je teoreticky vhodné z důvodu poměrně snadného zakomponování antény harvesteru například do vláken textilie. Aby bylo možné tuto technologii v praxi využívat, vlákna musí být tenká, lehká, mechanicky odolná, nenáročná na údržbu, odolná vůči praní, levná a integrovatelná [43, 44]. Využívá se různých kompozitních kovových nití a tkanin. Jako širokopásmové antény pro energy harvesting lze řadit tzv. rozvinuté skládané dipólové anténní soustavy, kovem potažené tkaninové patchové, mikropáskové a spirálové anténní pole [48]. Anténa by mohla být navržena i pro komunikaci s okolím. U tohoto typu harvestingu se musíme vypořádat s velmi nízkou úrovní hustoty výkonu. Dostupná energie mobilních sítí získaná z vysílače o výkonu 3 W, bude v několika metrech pouze maximálně v řádech miliwatt, v deseti a více metrech to budou maximálně mikrowatty [47]. V závislosti na vysílacím výkonu, okolním prostředí a dalších vlivech se tyto parametry mohou značně lišit. Měření energy harvestingu v prostředí Wifi vysílačů udávají o řád menší získané výkony [47].

V praxi se tedy ukázalo, že je tato okolní energie velice malá, účinnost konverze této energie je poměrně složitá a celkový získaný výkon nedosahuje vysokých hodnot v porovnání s většinou metod energy harvestingu.

## 2.5 Kombinace principů

Při pohledu na parametry a výše uvedené možnosti sklizení energie, je možnou volbou užít více principů energy harvesting pro jeden systém. Vhodné může být kombinovat některý z mechanických principů spolu s fotovoltaickým, nebo termoelektrickým obdobně jako na *Obr. 2.1*.

Konkrétní systém [48] čerpá energii z pohybu pomocí triboelektrického generátoru. Kdyby osoba setrvala v klidu, nedocházelo by k získávání energie pomocí energy harvesting. Proto je zde DSSC (Dye-sensitized solar cell, česky barvocitlivé solární vlákno), jako sekundární fotovoltaický princip pro energy harvesting, který může zásobovat blok zátěž i v případě, že se osoba nehýbe.

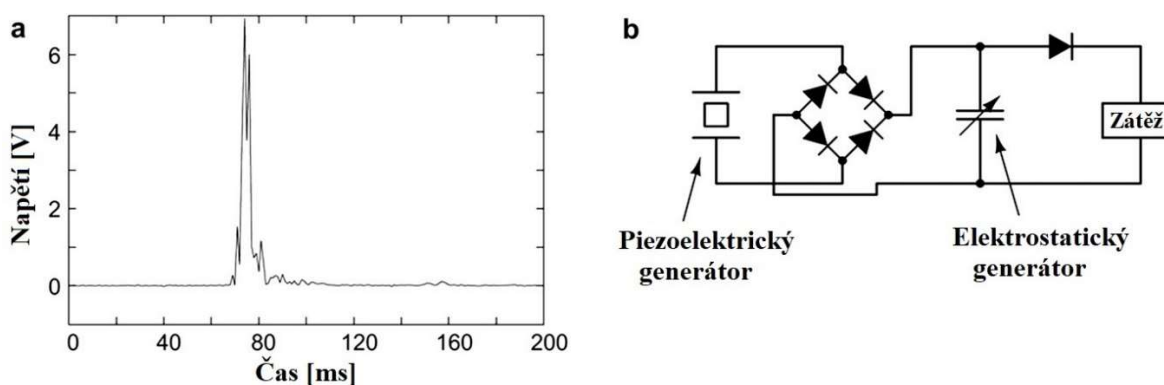


*Obr. 2.1 Smart textilie obsahující chytré vlákna, skládající se z TENG (Triboelektrický generátor), Superkapacitoru-SC (jako zásoba energie v textili) a DSSC (Dye-sensitized solar cell, česky barvocitlivé solární vlákno, jako alternativní sekundární zdroj pro energy harvesting). WE jako zátěž je Wearable electronics, česky nositelná elektronika (překresleno z [48]).*

## 2.6 Realizované systémy energy harvestingu potencionálně vhodné pro smart textile

### 2.6.1 Piezoelektricky a elektrostaticky napájená bota Rocha

Rocha a kolektiv v [43] popisují energy harvesting systém plně integrovaný do podrážky boty. Jde o systém, kde zdrojem energie je mechanická síla z lidské chůze. Využilo se piezoelektrického a elektrostatického principu pro přeměnu na elektrickou energii. Tyto dva principy jsou spolu nejvhodnější, protože se doplňují tím, že piezoelektrický generátor přednabíje kapacitní generátor. V této aplikaci je dosaženo vysoké hustoty energie při vysoké a nárazové působící síle.



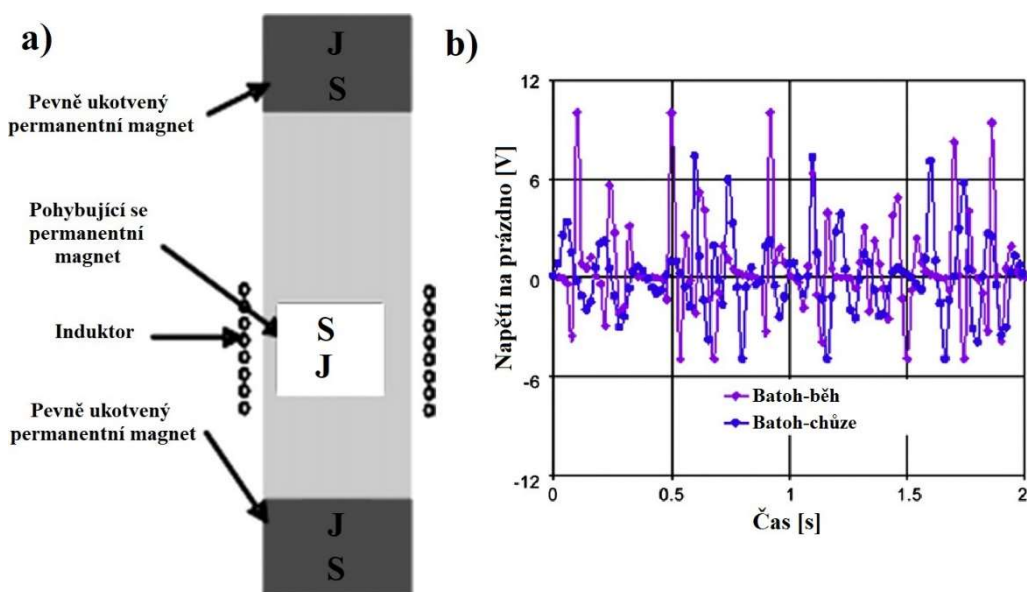
Obr. 2.2 a) Graf zobrazující generované napětí při jednom kroku jedné boty (přeloženo z [43]).  
b) Základní schéma zapojení (přeloženo z [43]).

Když osoba došlápne a poté konstantně stojí na zemi v popisované botě, kapacita elektrostatického generátoru (dvě metalické destičky, které jsou odděleny flexibilním dielektrikem) se zvýší zhruba dvojnásobně. V témže okamžiku piezoelektrický generátor (polymerní materiál potažený po obou stranách vodivým materiálem, který tvoří elektrody) zvýší svoje napětí o trochu více než elektrostatický generátor z Obr. 2.2. Následně bude nabit elektrostatický harvester, to umožní využít elektrostatického principu. Když osoba zvedne nohu, kapacita elektrostatického generátoru se sníží a napětí zvýší. Zátěží na Obr. 2.2 b) je úložiště energie (tenkovrstvá lithiová baterie s napětím 3 V). Jmenovité napětí baterie je tedy nižší než napětí na elektrostatickém generátoru. Náboj je přenášen z generátoru do baterie a sériově zapojená dioda brání zpětnému vybíjení baterie. Tímto je generována špičková energie od desítek po stovky miliwatt hodin v závislosti na typu chůze nebo běhu. Průměrná získaná energie do odporové zátěže při běhu po dobu jedné hodiny nepřesáhla 51 mJ to znamená v průměru 14 mWh.



## 2.6.2 Elektromagnetický harvester připevněný na batohu Wen

Harvester připevněný na batoh, pracující na elektromagnetickém principu, byl testován v [49]. Jde o pohyb permanentního magnetu v uzavřené tubě, přičemž na každém konci tuby jsou magnety orientovány tak, aby volně uložený magnet v tubě byl odpuzován od stran, tedy aby nesetrvával většinu času pohybu na okrajích tuby, kde nelze dostatečně transformovat mechanickou energii na elektrickou. Tím se dosáhlo většího kmitání magnetu, a proto vyššího výkonu. Bude-li se magnet pohybovat ze strany na stranu, na induktoru se začne indukovat napětí. Průměrný získaný výkon byl 0,95 mW při chůzi a 2,46 mW při běhu. Bylo použité jednocestné usměrnění diodou a prototyp byl schopný dodat průměrně 3,54 J (983  $\mu$ Wh) během jedné hodiny do baterie. Tato úroveň energie je dostatečná pro napájení některých malých zařízení, které následně mohou pracovat bez nutnosti výměny baterií, nebo externího přívodu energie, tedy pro některá energeticky autonomní zařízení.

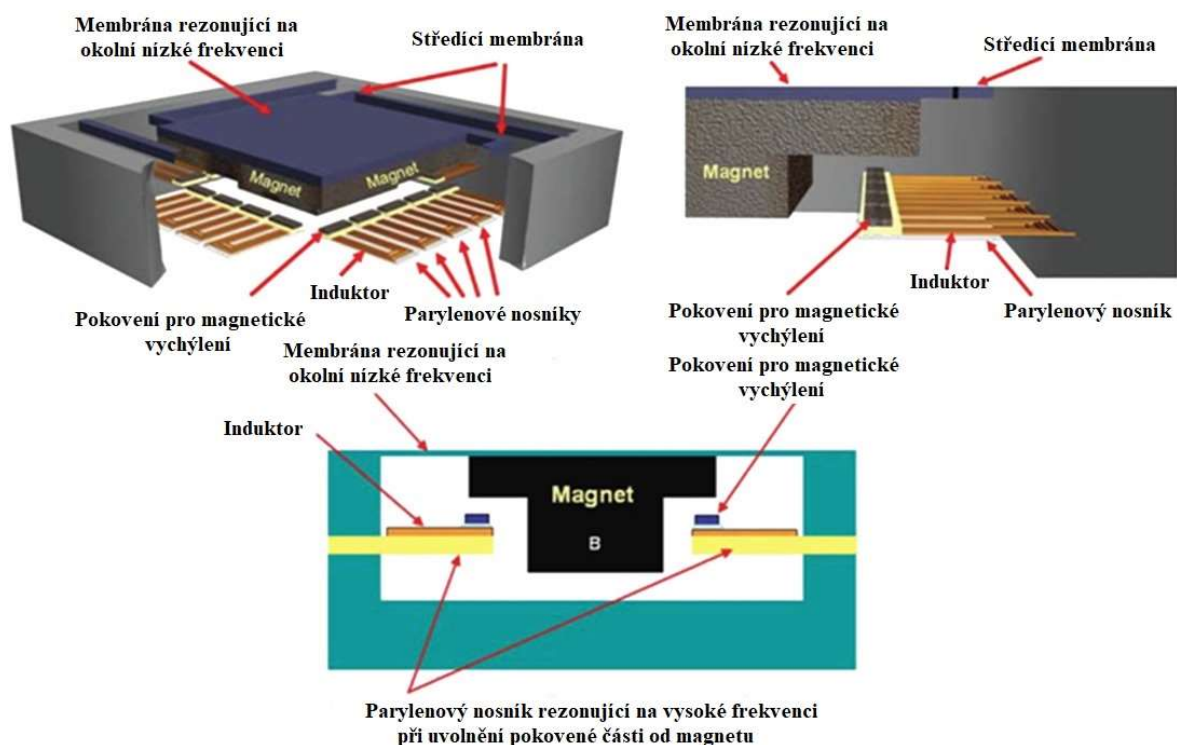


Obr. 2.3 a) Konstrukce elektromagnetického harvesteru pro batoh (přeloženo z [49]).  
 b) Výstupní hodnoty napětí tohoto nezátíženého harvesteru připevněného na batohu. Fialově je zobrazen průběh při běhu a modře při chůzi (přeloženo z [49]).

## 2.6.3 Nízkofrekvenční elektromagnetický generátor Sari

Vzhledem k tomu, že výkon vibračních harvesterů je úměrný akceleraci a frekvenci, možným řešením je zařízení, které svojí konstrukcí převede nízkokmitočtové vibrace

na vibrace o vyšších kmitočtech. Takovéto konstrukce bylo dosaženo na *Obr. 2.4* v [50] u elektromagnetického harvesteru. Tento převod byl označen jako frekvenční konverze, zkratkou FupC (z anglického frequency by employing the frequency upconversion) [50]. Harvester se skládá z magnetu připevněného na membránu, která rezonuje s okolní frekvencí v rozmezí jednotek až stovek hertz. Další částí je řada pružných nosníků, jejich rezonanční frekvence je 2 až 3 kHz a jsou umístěny přímo pod membránou s magnetem. Na špičce každého nosníku je provedeno pokovení niklem pro interakci s magnetem. Membrána rezonuje na vnější nízké frekvenci, magnet zachycuje a vychyluje pokovené špičky nosníků. Špičky jsou tedy vytaženy do určitého bodu a následně se od magnetu uvolní. Uvolněním nosníků od magnetu začnou nosníky rezonovat na vysoké frekvenci, ale s přirozeným vysokým útlumem (tlumením). Tento pohyb se exponenciálně snižuje, a to při nižších frekvencích vibrace okolí až na nulovou hodnotu. Následně se cyklus opakuje.

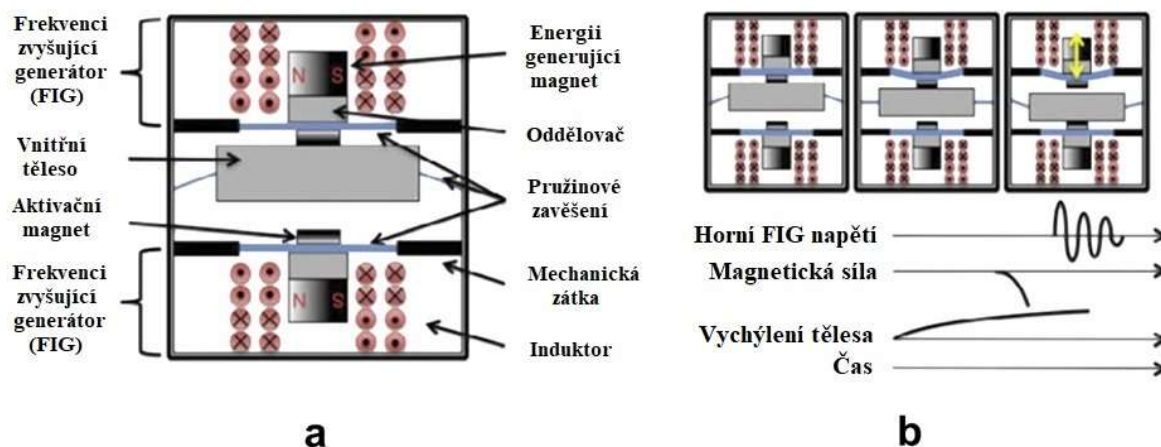


*Obr. 2.4 Energy harvester, který svojí konstrukcí konvertuje okolní vibraci na vyšší frekvenci, která je následně přeměněna na elektrickou energii. Parylen je obchodní název řady chemicky vylučovaných látek poly (p-xylylen) (přeloženo z [50]).*

Experimentální výsledky této konstrukce ukázaly, že při vibraci v okolí 113 Hz je systém schopen vytvářet špičkový výkon 0,25 nW a napětí 0,57 mV na jednom induktoru, tedy na jednom nosníku. Tyto výsledky jsou dokonce lepší ve srovnání s některými většími elektromagnetickými systémy pracujícími na podobném principu.

## 2.6.4 Elektromagnetický nízkofrekvenční generátor PFIG Galchev

Parametrický generátor s rozšířenou frekvencí působnosti nebo anglicky také The Parametric Frequency Increased Generator (PFIG, FIG) je navržen tak, aby vyhovoval velkým amplitudám spojeným s nízkofrekvenčními vibracemi, v [51] je dále popisován jako elektromagnetický nerezonující generátor. Jak si lze povšimnout na *Obr. 2.5 a*), skládá se ze dvou FIG generátorů, mezi kterými se pohybuje vnitřní těleso (inerciální hmota), která je zavěšena na pružinách. Dalším komponentem jsou menší permanentní magnety (aktivační magnety), které slouží k přidržování tělesa. Magnety jsou vůči sobě orientovány opačně. Velké magnety mají za úkol svým pohybem vytvořit proměnlivé magnetické pole v okolí induktoru, na kterém se následně objeví indukované napětí. Část pracovního cyklu PFIG generátoru je uvedena na *Obr. 2.5 b*).

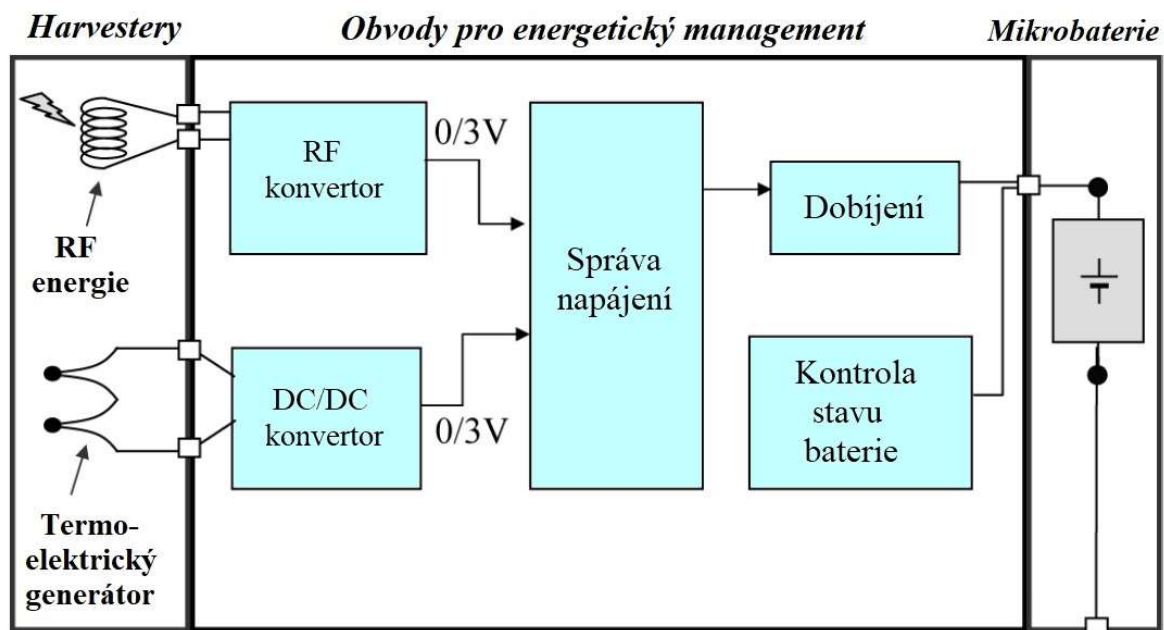


*Obr. 2.5 Nízkofrekvenční energy harvester PFIG (přeloženo z [51]).*

Princip funkce je takový, že vnitřní těleso na *Obr. 2.5 b*) kmitá a zachytává se mezi horním a spodním přidržovacím malým aktivačním magnetem, tedy i mezi horním a spodním FIG generátorem. Při pohybu tělesa je vytahována pružina FIG generátoru. Když se těleso přiblíží k opačnému FIG, začne se zvyšovat magnetická síla opačného FIG. Protože síly působící na systém FIG překonávají přidržovací magnetickou sílu původního FIG, těleso se vychýlí a je přitahováno opět k opačnému FIG. Těleso tedy nyní rezonuje vysokofrekvenčním pohybem a tento pohyb byl předán také větším magnetům, které způsobí proměnlivé magnetické pole v okolí induktoru, na kterém se začne indukovat napětí. Celkový objem  $3,74 \text{ cm}^3$ , hmotnost  $9 \text{ g}$  a vstupní frekvence  $10 \text{ Hz}$  vygeneruje elektrický výkon  $288 \mu\text{W}$ .

### 2.6.5 Kompletní řešení pro kombinovaný TEG a RF harvesting Lhermet

Jedná se o využití dvou zdrojů okolní energie pomocí klasického termoelektrického článku (TEG) a radiofrekvenčního (RF) harvesteru, včetně obvodů pro zpracování získané energie. Tento obvod byl poprvé představen v [52] a díky jeho dvojímu zdroji energie ho lze využít pro větší množství aplikací včetně aplikace pro smart textilie. Jeho schematický obvod je znázorněn na Obr. 2.6. Termoelektrický generátor využitý v této aplikaci byl vyroben z materiálů Bi a Sb, které byly nanášeny rozprašováním a následným vypálením. Tyto prvky poskytly výkon  $4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  při napětí 1 V a teplotním rozdílu 60 K. Pro řízení napěťové úrovně získané pomocí TEG bylo využito integrovaného převodníku buck-boost s externím induktorem. Tento obvod pro energy management spotřebuje 5 nW a může přenášet výkon až 1 mW.



Obr. 2.6 Blokové schéma kombinovaného systému pro energy harvesting (překresleno z [52]).

### 2.7 Porovnání některých systémů v tabulce

Na následující straně je uvedena tabulka pro porovnání některých systémů energy harvesting.

Tab. 2 Porovnání některých systémů.

		Porovnání potenciálně vhodných systémů energie harvesting pro smart textilie			
Autor	Ref.	Získaný výkon (kalkulovaný)	Zdroj energie	Rozeř*/hmotnost	Komentář (kalkulované hodnoty)
Rocha	[43]	51 mJ (14,17 μWh)	Vibrace chůze		Bota, piezoelektrický a elektrostatický princip, měřeno jednu hodinu. Další informace jsou v kapitole 2.6.1.
Saha	[49]	0,95 mW	Vibrace chůze		Batoh, elektromagnetický princip. Další informace jsou v kapitole 2.6.2.
		2,46 mW	Vibrace běh		Batoh, elektromagnetický princip. Další informace jsou v kapitole 2.6.2.
Donelan	[61]	3,54 J (983 μWh)	Vibrace běh/chůze		Batoh, elektromagnetický princip. Další informace jsou v kapitole 2.6.2.
		4,8 - 0,8 W	Vibrace chůze	790 g	Elektromagnetický princip s převodem, konstrukce upevněná na nohu, ohyb kolene.
Kymissis	[62]	10 mW	Vibrace chůze/běh	150 cm <sup>3</sup>	Elektromagnetický a piezoelektrický princip, bota, znatelné ovlivnění chůze.
Bassani	[63]	2 x 2,6 μW	Vibrace běh	3,2 cm <sup>3</sup> / 17,4 g	Piezoelektrický princip, ohyb piezoelektrické destičky v oblasti kolene, 0,8 - 1,8 Hz, deska s patentem NASA.
Galchev	[51]	288 μW	Vibrace	3,74 cm <sup>3</sup> / 9 g	Elektromagnetický, nerezující, širokopásmový a vysokamplicitudový mikrogenerátor, měřeno při 10 Hz. Další informace jsou v kapitole 2.6.4.
Li	[64]	100 μW	Vibrace	1 cm <sup>3</sup> / 0,22 g	Elektromagnetický princip, 60 Hz, výkon po zpracování energie.
		100 μW	Vibrace	1 cm <sup>3</sup> / 0,22 g	Elektromagnetický princip, 120 Hz, výkon po zpracování energie.
Lee	[65]	830 μW	Vibrace	7,3 cm <sup>3</sup> / 0,14 g	Elektromagnetický princip, 85 Hz, výkon před zpracováním energie.
Huang	[66]	1,44 μW	Vibrace	0,04 cm <sup>3</sup> / 0,03 g	Elektromagnetický princip, 100 Hz, výkon před zpracováním energie.
Sari	[50]	0,25 nW/nosník	Vibrace	0,15 cm <sup>3</sup>	Elektromagnetický mikrogenerátor s polem nosníků, rozsah 1 - 150 Hz, měřeno při 113 Hz, kde bylo získané napětí 0,57 V / nosník. Další informace jsou v kapitole 2.6.3.
Tian	[25]	22,3 mW	Vibrace-tření	25 cm <sup>2</sup>	Triboelektrický princip, 3 Hz dvojitá vrstva generátoru, laboratorní testování.
Tashiro	[67]	58 μW	Vibrace	640 g	Elektrostatický princip, 4,76 Hz.
Arakawa	[68]	6 μW	Vibrace	0,4 cm <sup>3</sup> / 0,65 g	Elektrostatický princip, 10 Hz.
Mitcheson	[69]	2,4 μW	Vibrace	0,6 cm <sup>3</sup> / 0,12 g	Elektrostatický princip, 20 Hz.
Challa	[70]	240 - 280 μW	Vibrace	50 cm <sup>3</sup> / 45,8 g	Piezoelektrický princip, pasivně samoladitelný v rozsahu 22 - 32 Hz.
Miyazaki	[71]	0,21 μW	Vibrace	5 g	Elektrostatický princip, 45 Hz.
Despesse	[72]	1000 μW	Vibrace	18 cm <sup>3</sup> / 104 g	Elektrostatický princip, 50 Hz, výkon po zpracováním energie.
Roundy	[11]	365 μW	Vibrace	1 cm <sup>3</sup> / 8,2 g	Piezoelektrický princip, 60 Hz, výkon před zpracováním energie. Nejvhodnější varianta z více testovaných.
		207 μW	Vibrace	1 cm <sup>3</sup> / 7,5 g	Piezoelektrický princip, 85 Hz, výkon před zpracováním energie.
Carlson	[73]	34 μW	Termální		Seebeckův TEG, měřeno na lidské paži, obvod včetně zpracování energie buck-boost, externí induktor, při tepelné rovnováze dosažené za 10 min, napětí na prázdnou 34 mV. Výkon získaný při konverzi na 1 V.
Carmo	[74]	18 μW	Termální		Seebeckův mikro TEG s boost převodníkem, vhodný pro elektroencefalogram, tenkovrstvé provedení.
Cuadras	[75]	0,5 mJ (138,9 μWh)	Termální		Dva pyroelektrické články, vyrobené sítiskovou metodou pomocí PZT filmů (titan zirkonititan olovnatý) a PVDF (polyvinylidenfluorid), napětí 31 V.
Mi	[76]	-86 dBm (2,5 pW)	Radiofrekvence		Zdroj 13 dBm (20 μW). Výkon ve vzdálenosti 4 cm od zdroje, Schottkyho diody [2].
Jabbar	[77]	12,39 μW	Radiofrekvence		Zdroj 316,23 μW (55 dBm). Výkon ve vzdálenosti 4 cm od zdroje, CMOS technologie [2].
Hagerty	[78]	10 <sup>-5</sup> - 0,1 mW/cm <sup>2</sup>	Radiofrekvence		Zdroj pouze okolní signály, širokopásmová rektennové pole 2 - 18 GHz, stejnosměrný výstup.
David Rancourt	[79]	2,4 mW	Proudění vzduchu	147 cm <sup>3</sup>	Elektromagnetický princip větrné mikroturbíny, při rychlosti větru 5,5 m/s.

\*POZOR! Některé rozměry, hmotnosti jsou udávány včetně obvodů pro zpracování energie a pomocných systémů, nicméně některé nikoliv!

### 3 Návrh systému energy harvesting pro smart textilie

Níže je uveden popis smart textilií a vzhledem k tomu, že výkon v jednotkách  $\mu\text{W}$  je dnes již v některých senzorických aplikacích dostatečný, nachází se zde také návrh systému energy harvesting pro smart textile spolu s částmi souvisejícími.

#### 3.1 Smart textilie

Smart textilie, nebo někdy také psáno jako inteligentní, aktivní či chytré textilie a materiály, jsou velice rozsáhlé a stále častěji diskutované téma [53]. Jedná se o textilie obsahující textilní produkty, tedy nitě, vlákna nebo příze, vytvářející tkanou, netkanou nebo pletenou strukturu, která spolu s elektronickými obvody, které mohou být zakomponovány v textilií nebo jsou externě připojitelné, mohou komunikovat s okolním prostředím nebo uživatelem [45]. Jde tedy o inteligentní textilií s přidanou hodnotou, která díky svým vlastnostem poskytuje možnost využití například ve zdravotnictví, sportovních aktivitách, ochranných oblecích či automobilovém průmyslu. Zásadním faktorem je možnost co největší možné integrace elektronických prvků, tedy aby bylo možné využít flexibilní součástky, aby bylo nošení pohodlné, neomezovalo pohyb, nezvyšovalo příliš hmotnost, aby bylo možno oblek prát a je zde řada dalších požadavků. Některé součástky, jako může být flexibilní piezoelektrický generátor, je možné vyrobit přímo na ohebné substráty, konkrétní příklad uvádí [54] s tenkovrstvým tranzistorem, který lze natisknout na polymerní substrát. Elektronické prvky mohou být do textilie zakomponovány mnoha metodami. Často se využívá sítotisku, který je levný, dostupný a nemusí respektovat konstrukci tkaniny. Má ovšem horší mechanickou odolnost. Další možností je využití rozprašování, které zajistí elektricky tuhé spoje a dobrou odolnost, oproti sítotisku je časově náročnější a také dražší [21]. Vodivé spojení mezi komponenty může být zajištěno vodivými přízemi, které jsou tvořeny čistým kovem, nebo z kompozitu kovu a nevodivého materiálu. Kompozitu je využíváno pro napodobení textilních vlastností, jako je pružnost, ohebnost a dalších.

##### 3.1.1 Typy smart textilií

Smart textilie byly díky inovaci technologií vylepšovány od tzv. první generace (pasivní smart textilie) přes aktivní smart textilie do současného stavu, kdy jsou využívány a vyvíjeny ultra smart textilie.

Pasivní smart textilie, někdy označovány jako funkční textilie, jsou smart textilie první generace. Pracují v pasivním režimu, to znamená bez ohledu na změny okolního prostředí, kterými mohou být proměnná vlhkost, změna teploty, změna intenzity slunečního záření a další. Typickým příkladem takovýchto textilií může být stan, kde jeho spodní izolační textilie zůstane stále vysoce izolační v určité pracovní oblasti bez ohledu na okolní prostředí. Tyto textilie mohou mít funkce, jako jsou antimikrobiální, proti zápachu, izolační, balistickou ochranu [55], žáruvzdorné apod.

Aktivní smart textilie obsahují akční členy, popř. senzory [55], které nemusí být vždy elektrické. Textilie reagují na dané prostředí a přizpůsobují se mu. Příkladem je membránová paropropustná bunda, která propustí vlhkost ve formě vodní páry ve směru z těla ven do okolí a v opačném směru je nepromokavá díky velkému povrchovému napětí materiálu s membránou, takto pracuje například GORE-TEX.

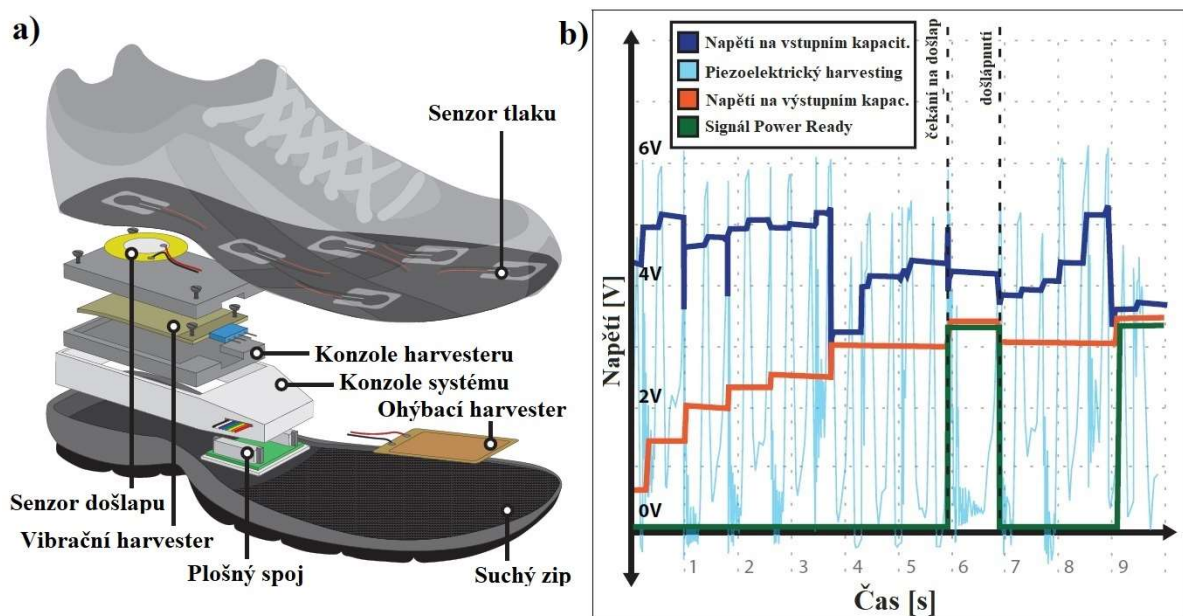
Poslední generace je Ultra smart textilie, česky lze přeložit jako vysoce inteligentní textilie. Dokážou samostatně vnímat, reagovat, případně se autonomně přizpůsobovat. Všechny tyto textilie vyžadují a pravděpodobně stále budou vyžadovat energii, nicméně tato energie nemusí být získávána nabíjením ze sítě, ale nabízí se zde možnost integrace právě energy harvesting. Tato generace textilie úzce spojuje tradiční textilní průmysl s průmyslem technologickým a s obory, jako jsou elektrotechnický, chemický, materiálový, automatizační a telekomunikační vědy [55]. Příkladem může být skafandr určený pro výstup do volného kosmu.

### 3.1.2 Smart obuv

Mezi tzv. smart textilie lze řadit také smart obuv. Jedná se o vylepšenou obuv doplněnou o nadstandardní funkci oproti obuvi klasické. Tato aplikace poskytuje jednu z nejvyšších dostupných energií na lidském těle [56]. Návrhem energy harvesteru pro smart textilie bude tedy chytrá bota.

### 3.2 Energy harvester

Jako vhodný harvester byl zvolen PZT piezoelektrický element společnosti Midé Technologies, série Volture, typ V25W, především díky vhodným rozměrům, implementaci konektorů a patentované ochranné vrstvě poskytující ochranu například před vlhkostí a prachem [57]. Typ V25W je největším z řady Volture, poskytuje i největší výkon, největší výchylku a funguje při nejnižších frekvencích v porovnání s ostatními. V25W je tvořen dvěma vzájemně odizolovanými piezoelektrickými vrstvami, proto má čtyři piny, které lze zapojit sériově pro dosažení většího napětí, nebo paralelně pro dosažení většího proudu. Bude tedy zapojen tak, aby byl získán dvojnásobný proud, protože tento měnič generuje poměrně vysoké úrovně napětí. Harvester bude umístěn ve speciální konstrukci v podrážce boty navržené tak, aby kmity harvesteru byly omezeny jen minimálně. Tento harvester bude poskytovat energii především při došlapu boty na zem, dále zde bude ještě harvester pracující při ohybu boty obdobně jako na *Obr. 3.1*, nicméně v této aplikaci bude užito o desetinu milimetru tlustšího harvesteru typ P-876.A12 za účelem dosažení většího výkonu.



*Obr. 3.1 a) Prototyp systému autonomní chytré boty snímající působící sílu na vložku boty (přeloženo z [58]).*

*b) Graf zobrazující napěťové úrovně v čase. Režim 1 je zde pouze v krátkém časovém okamžiku, při poklesu napětí výstupního kapacitoru. V ostatních případech jde o Režim 2 (přeloženo z [58]).*



### 3.3 Usměrňovač, Konvertor, Správa napájení a Zásoba energie IO

Tyto části jsou řešeny integrovanými obvody, a proto jsou uvedeny v jedné kapitole. Aby bylo možné systém provozovat pouze s využitím energy harvesting, bez externí výměny baterie, systém bude pracovat ve třech režimech obdobně, jako tomu je v [58].

#### 3.3.1 Režimy systému

Režim 1 - systém je plně funkční, snímá, zaznamenává a je napájen z uložené energie získané z piezoelektrického harvesting. Následně po zaznamenání dat, případně po vyčerpání většiny energie, přejde systém do Režimu 2.

Režim 2 - bude definován jako systém ve stavu spánku, kdy je uložená energie nedostatečná k plnému provozu systému. V tuto chvíli systém čeká na shromáždění dostatečné energie, aby se následně mohl přepnout do Režimu 1, kde dále snímá a zaznamenává data.

Režim 3 charakterizuje systém při zapojení do USB portu. Nabíjí se a zároveň je možné analyzovat pomocí externího zařízení získaná data. Toto spojení pro přenos dat může být v budoucnu změněno na bezdrátové, a může se tedy v určitých intervalech střídát Režim 3 s Režimem 1, aby bylo možné získaná data bezdrátově přenášet například technologií Low Energy Bluetooth nebo jiné v reálném čase a poté zpracovávat v telefonu nebo PC.

#### 3.3.2 Integrované obvody napájení

Aby byl systém napájen ve všech třech režimech, obvod napájení používá dva integrované obvody a nízkoztrátové kapacitory. Prvním čipem od Linear Technologies - Integrated Circuit je LTC3588-1, který přímo doporučuje datasheet [57] harvesteru V25W. IO poskytuje kombinaci nízkoztrátového dvoucestného AC/DC usměrňovače a následně buck/boost konvertor, obvod je nejvíce vhodný pro piezoelektrické, solární nebo elektromagnetické harvestery, režim UVL (Ultra-Low Shutdown) s širokou hysterezí umožňuje nahromadit náboj na vstupním kapacitoru a následně zapnout konvertor a účinně přenést část této energie na výstupní kapacitor [59]. Režimu UVL bude užíváno pro minimalizaci ztrát. Výstupní napětí lze zvolit z několika hodnot, zde bude zvolena hodnota 3,3 V, aby bylo možné účinně napájet následné bloky systému. Maximální dovolené napětí je 20 V. Podle [58] lze očekávat, že harvesting bude dosahovat špiček napětí v okolí 10 V.

Důležitou funkcí tohoto obvodu bude také pin PGOOD, který udává logický výstup 1, je-li na výstupním kapacitoru dostatečné napětí kolem 92 % z  $V_{out}$  [59], tedy z hodnoty 3,3 V. Tato logická hodnota bude odeslána do následných IO pro možnost spínání mezi režimy, jak bylo uvedeno v kapitole 3.3.1. Poklesne-li výstupní napětí pod určitou mez, logická hodnota pinu PGOOD se změní na 0 [59].

Druhý integrovaný obvod společnosti Cymbet Enerchip – Integrated Circuit je CBC-3150. Jedná se o systém správy napájení s integrovanou zásobou energie 50  $\mu$ Ah a první světový IO s integrovanou Thin film baterií poskytující tisíce nabíjecích cyklů [60]. Obvod je zde pro řízení / přemostění zdroje energie. V podstatě funguje obdobně jako UPS zdroj, vnitřní zásoba energie by měla energeticky zálohovat systém v Režimu 2 po dobu minimálně 1-3 týdnů v závislosti na aplikaci. Za tento obvod bude dále umístěn kapacitor s nízkým ztrátovým činitelem  $\tan \delta$ , např. typ FCA1210C105M-G2, který dobu zálohování ještě prodlouží. Při dostatku energie se autonomně IO dobíjí a předává energii dále. Když napětí primárního zdroje energie (výstup z LTC3588-1) klesne pod prahové napětí určené pinem VMODE, EnerChip bude signalizovat tuto událost a směřovat uloženou energii na další blok systému z vnitřní baterie [60], následující blok by se měl převést do režimu úspory energie. Toto přepnutí zajistí pin RESET, který je digitálním výstupem EnerChipu a odešle logický signál do následujícího bloku systému. V Režimu 3 se bude EnerChip dobíjet pomocí USB, nebude-li se jednat o bezdrátovou komunikaci viz kapitolu 3.3.1. Protože CBC-3150 může být na trhu nedostupný, lze užít obdobně pracující náhradu CBC910 s připojením většího externího kapacitoru.

### 3.4 Mikrokontroler a komunikace s okolím

Tato kapitola popisuje poslední dva bloky z *Obr. 1.1* navrhovaného systému. Mikrokontroler slouží jako rozbočovač pro řízení komunikace, ukládání a zpracovávání dat. Mezi některé řídicí funkce patří přepínání systému ze stavu snímání do stavu spánku, díky signálům z předešlých bloků [58]. Mikrokontroler by mohl pomocí senzoru připojených k I/O portům indikovat například, je-li bota nazutá, je-li bota na zemi nebo ve vzduchu a dále měřit některé hodnoty, jako je vlhkost boty, vlhkost okolního prostředí, působící sílu na vložku boty, počet kroků (pedometr) nebo teplotu.

Je extrémně důležité, aby mikrokontroler spotřebovával nízký výkon. Systém musí obsahovat převodník UART/USB nebo jiný pro komunikaci s okolím, např. tedy externě připojitelný modul FT232R(Q). Dále musí mít mikrokontroler implementováno alespoň několik I/O portů, aby bylo možné snímat vstupní parametry nebo naopak signalizovat určitý stav výstupními porty. Vstupní parametry je nutno ukládat ideálně energeticky nezávisle. Vhodné je využít FRAM paměť mikrokontroleru. Jako účelný se ukázal mikrokontroler MSP430FR5739 společnosti Texas instrument, který splňuje veškeré požadavky.

### 3.5 Senzory

Do tohoto návrhu lze implementovat senzory měřící například vlhkost uvnitř boty, vlhkost okolního prostředí, působící statickou a dynamickou sílu na vložku boty například pomocí senzorů FlexiForce A502 nebo A201, počet kroků, teplotu uvnitř a vně boty například pomocí senzoru MOD-TRONIC S17422, atmosférický tlak, těkavé organické látky nebo případně jiné parametry. Nabízí se možnost zvolit modul měřící více parametrů najednou, jako může být modul Adafruit s Bosch senzorem BME680. Je důležité vybrat senzor, který nebude příliš energeticky zatěžovat systém. Vhodné je využít také flexibilní senzory.

### 3.6 Zpracování naměřených hodnot

Senzory ve většině případů pracují na proměnné rezistenci. Následně je tato proměnná přeměněna na napěťový signál vhodným zapojením nejčastěji s operačními zesilovači, které udávají datasheety senzorů. Napěťový signál je následně mikrokontrolerem převeden na digitální hodnotu, která se uloží do jeho FRAM paměti. K tomu je nutné vhodně mikrokontroler naprogramovat. Při připojení systému k PC pomocí USB by měla být data vhodně převedena na požadované jednotky, např. při měření síly na jednotku newton a následně zobrazena na grafu.

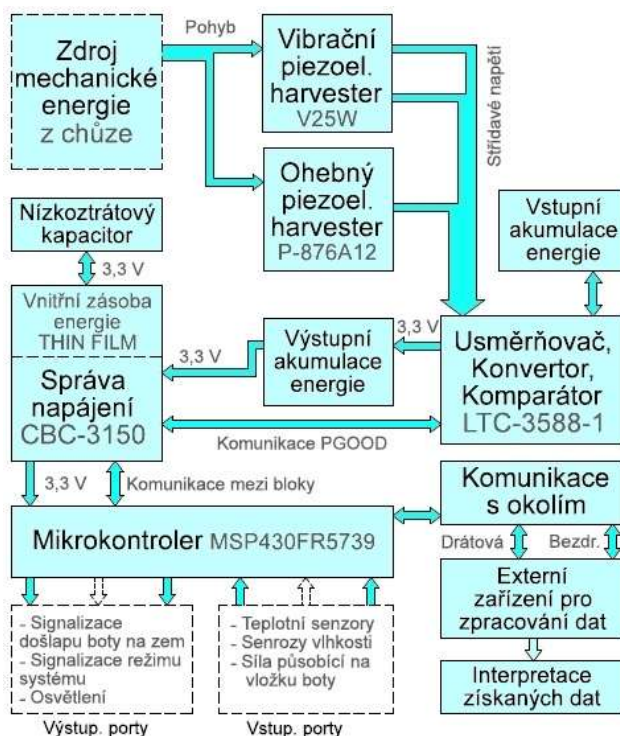
### 3.7 Shrnutí vlastností systému

Energy harvesting bude schopen při chůzi energeticky pokrýt spotřebu systému. Obdobný systém byl testován v [58], kde byla měřená působící síla na vložku boty šesti sensory. Pro prvotní měření působící síly bylo potřeba ujít 10-20 kroků, aby se systém přepnul do Režimu 1. Následně se přepne do Režimu 2 a bude zapotřebí vynaložit 1-5 kroků

v závislosti na mnoha faktorech, aby se systém opět převedl do Režimu 1. Přepnutí mezi režimy a snížení napěťové hladiny lze vyčíst z Obr. 3.1 b).

Údaje vycházející z výše popsaného testování uvádí získání 10-20  $\mu\text{J}$  na krok. Návrh popsaný v této práci užívá vibrační piezoelektrický harvester V25W a dále ohebný typ P-876.A12, který by měl poskytovat více energie než v [58]. Lze předpokládat při měření stejných parametrů vyšší získanou energii, a tedy i menší nutný počet kroků pro přepnutí mezi režimy systému. Reálně lze kalkulovat s hodnotou 15  $\mu\text{J}$  na krok. Trvají-li průměrně dva kroky jednu sekundu, lze snadným přepočtem určit, že systém bude generovat za konstantních podmínek 30  $\mu\text{W}$ . Komponenty je možno zapojit podle doporučení jednotlivých datasheetů a výše uvedeného popisu.

Další možností, která se ale nejeví zcela vhodně u některých aplikací pro smart textlie, by mohlo být zakoupení sofistikovaných modulů pro energy harvesting, např. EH300A. Stačí k nim připojit pouze zvolený harvester a mikrokontroler s periferiemi, které lze také zakoupit jako integrované moduly. Při užití těchto modulů odpadá jinak nutné navrhování složitějších DPS. Naopak modul nemusí být vhodný pro všechny aplikace z důvodu jeho konstrukce. Porovnání těchto komplexních modulů napájení z hlediska účinnosti je možné pouze reálným změřením v daných aplikacích, a to z důvodu jejich složitosti.



Obr. 3.2 Blokové schéma navrhovaného zařízení.

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo prostudovat problematiku energy harvesting, porovnat jednotlivé systémy a navrhnout systém energy harvesting pro smart textilie.

První částí bylo prostudování běžných systémů energy harvesting společně s alternativními principy pro sběr energie. Obecný popis energy harvesting seznamuje s jednotlivými bloky systému. Systém byl rozdělen celkem na osm hlavních bloků, kde prvním je zdroj okolní energie, kterým může být například sluneční záření, vibrace a další. Blok energy harvester je zařízení sloužící k přeměně okolní energie na elektrickou energii. Následují bloky usměrňovač, sloužící k usměrnění elektrické energie a konvertor pro dosažení požadované napěťové hladiny. Tyto bloky mohou být v integrované podobě spolu s blokem pro správu napájení. Správa napájení řídí a případně ukládá získanou energii do bloku zásoba energie, kterou může tvořit nízkoztrátový kapacitor. Blok zátěž spotřebovává energii získanou pomocí energy harvesting. Posledním blokem je komunikace s okolím neboli rozhraní pro drátový případně bezdrátový přenos dat a signalizaci.

Bakalářská práce dále v první části popisuje celkem devět principů energy harvesting. Největší pozornost byla věnována mechanickým principům z důvodu mnoha způsobů transformace mechanického pohybu na elektřinu. Mezi mechanické principy patří elektromagnetický, elektrostatický, triboelektrický, piezoelektrický a magnetostrikční. Elektřinu lze získávat i termoelektrickými způsoby, mezi které patří Seebeckův princip a pyroelektrický jev. Pozornost byla věnována i fotonvoltaickému principu a získávání energie z okolních radiofrekvenčních vln, tedy RF princip.

Druhá část porovnává jednotlivé principy z pohledu pro smart textilie a některé vytvořené systémy energy harvesting z této oblasti. Nejuniverzálnější jsou mechanické harvestery, díky téměř všudypřítomnému mechanickému pohybu textilií. Elektromagnetické harvestery lze využít pro smart textilie, nicméně většina těchto harvesterů pracuje nejlépe až v okolí 100 Hz, zatímco pohyb nositelných smart textilií bývá pouze v řádu jednotek Hz. Elektrostatické harvestery spolu s piezoelektrickými jsou označovány za širokopásmové, lze je užívat již od jednotek až po stovky Hz. Piezoelektrické harvestery lze užít při nízkém

i vysokém namáhání a stále účinně generovat elektrickou energii. Triboelektrické harvestery se zdají díky integraci do vláken textilie možnou cestou, kudy se bude dále vyvíjet výzkum energy harvesting pro smart textilie. Magnetostrikční princip se jeví pro většinu smart textilií jako nevhodný. Termoelektrický Seebeckův princip se oproti pyroelektrickému jeví jako vhodný. Fotovoltaické flexibilní harvestery pro smart textilie dosahují zatím nízké účinnosti, přesto je lze vyhodnotit jako vhodné. RF harvestery jsou možným řešením, ale nejsou příliš vhodné, generují pouze malé výkony.

Třetí část je zaměřena na stručný popis smart textilií a následný návrh systému energy harvesting pro smart textilie. Byl vypracován návrh pro smart obuv napájenou pomocí dvou piezoelektrických měničů, v botě totiž očekáváme největší dostupnost externí energie z lidského těla. Piezoelektrický měnič byl zvolen z důvodu širokého pracovního pásma. V návrhu je uvedeno několik možných aplikací, k čemuž bota může sloužit, jde především o podiatrické účely, jako je měření síly působící na vložku boty, teplotu uvnitř a vně boty, vlhkost a další. Aby bylo možné užívat systém energeticky autonomně, bylo předloženo několik režimů systému, které definují, kdy by měl být systém aktivní a kdy ve stavu spánku. Naměřené hodnoty by bylo dále možné přenést do externího zařízení, kterým může být počítač a telefon, který by výsledky z měření dále zpracoval. Z obdobného návrhu citovaného v kapitole 3.7 lze předpokládat generování výkonu  $30 \mu\text{W}$ . To znamená, že je nutno ujit asi 10-20 kroků pro prvotní měření a následně 1-5 kroků pro znovunabití systému a přepnutí do aktivního režimu. Celý systém je navržen jako nízkovýkonový.

Díky často dostatečné dostupnosti externí energie, ale zatím horší implementaci a účinnosti harvesting, lze s vývojem očekávat využití i pro napájení náročnějších aplikací, především pro monitorování životních funkcí pomocí textilního holteru, pulsmetru, oxymetru, případně lokátoru polohy a dalších. Tyto zařízení by byly schopny zachránit lidské životy. Lze očekávat i komerční rozšíření a větší zájem veřejnosti o toto téma.

## Citovaná literatura

- [1] M. PENHAKER, M. IMRAMOVSKÝ, P. Tiefenbach a F. Kobza. *Lékařské diagnostické přístroje*. 2004.
- [2] HARB, Adnan. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy* [online]. 2011, **36**(10), 2641–2654. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2010.06.014
- [3] VULLERS, R.J.M., R. VAN SCHAIJK, I. DOMS, C. VAN HOOFF a R. MERTENS. Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics* [online]. 2009, **53**(7), 684–693. ISSN 00381101. Dostupné z: doi:10.1016/j.sse.2008.12.011
- [4] ENERGYHARVESTING.NET. *energyharvesting* [online]. [vid. 2017-10-02]. Dostupné z: <http://www.energyharvesting.net/>
- [5] THE ENGINEER. German Engineer Makes A Free Energy Harvesting Device. *Wonderful Engineering* [online]. 2014 [vid. 2017-10-25]. Dostupné z: <http://wonderfulengineering.com/german-engineer-makes-a-free-energy-harvesting-device/>
- [6] PHYSICS AND RADIO ELECTRONICS. *Schottky diode* [online]. [vid. 2017-10-27]. Dostupné z: <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/schottkydiode.html>
- [7] LIU, Dong-Sheng, Feng-Bo LI, Xue-Cheng ZOU, Yao LIU, Xue-Mei HUI a Xiong-Fei TAO. New Analysis and Design of a RF Rectifier for RFID and Implantable Devices. *Sensors* [online]. 2011, **11**(7), 6494–6508. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s110706494
- [8] JIŘÍ PAVELKA, Zdeněk Čerovský. *Výkonová Elektronika* [online]. 2000. Dostupné z: <http://cvut.falconis.cz/semestr-4/ve1/vykonova-elektronika-Cerovsky-Pavelka.pdf>
- [9] MAJUMDER, Ritwik, Arindam GHOSH, Gerard LEDWICH a Firuz ZARE. Control of parallel converters for load sharing with seamless transfer between grid connected and islanded modes. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* [online]. B.m.: IEEE, 2008, s. 1–7. ISBN 978-1-4244-1905-0. Dostupné z: doi:10.1109/PES.2008.4596111
- [10] DUNN-RANKIN, Derek, Elisângela Martins LEAL a David C. WALTHER. Personal power systems. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2005, **31**(5–6), 422–465. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2005.04.001
- [11] SHADRACH JOSEPH ROUNDY, BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY, (UNIVERSITY OF CALIFORNIA, Berkeley. *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion* [online]. 2003 [vid. 2018-01-10]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/5ce8/02253bb58dbff49de2d8bf6bbd76b4fde8b9.pdf>

- [12] LEWANDOWSKI, Andrzej a Maciej GALINSKI. Practical and theoretical limits for electrochemical double-layer capacitors. *Journal of Power Sources* [online]. 2007, **173**(2), 822–828. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2007.05.062
- [13] LAL, A. a J. BLANCHARD. Daintiest dynamos [nuclear microbatteries. *IEEE Spectrum* [online]. 2004, **41**(9), 36–41. ISSN 0018-9235. Dostupné z: doi:10.1109/MSPEC.2004.1330808
- [14] MATEU, Loreto a Francesc MOLL. <title>Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics (Keynote Address)</title>. In: Jose F. LOPEZ, Francisco V. FERNANDEZ, Jose Maria LOPEZ-VILLEGAS a Jose M. DE LA ROSA, ed. [online]. 2005, s. 359–373. Dostupné z: doi:10.1117/12.613046
- [15] J. BARTONĚK. *Základy audio a video techniky*. Olomouc: VOŠ a SPŠE Olomouc, 2012.
- [16] KHALIGH, A., PENG ZENG a CONG ZHENG. Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2010, **57**(3), 850–860. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2009.2024652
- [17] BEEBY, S P, M J TUDOR a N M WHITE. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* [online]. 2006, **17**(12), R175–R195. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01
- [18] MITCHESON, P.D., E.M. YEATMAN, G.K. RAO, A.S. HOLMES a T.C. GREEN. Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2008, **96**(9), 1457–1486. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2008.927494
- [19] STERKEN, T., K. BAERT, C. VANHOOF, R. PUERS, G. BORGHS a P. FIORINI. Comparative modelling for vibration scavengers. In: *Proceedings of IEEE Sensors, 2004*. [online]. B.m.: IEEE, nedatováno, s. 1249–1252. ISBN 0-7803-8692-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICSENS.2004.1426407
- [20] HOLMES, A.S., G. HONG, K.R. PULLEN a K.R. BUFFARD. Axial-flow microturbine with electromagnetic generator: design, CFD simulation, and prototype demonstration. In: *17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Maastricht MEMS 2004 Technical Digest* [online]. B.m.: IEEE, 2004, s. 568–571. ISBN 0-7803-8265-X. Dostupné z: doi:10.1109/MEMS.2004.1290648
- [21] YONGSANG KIM, HYEJUNG KIM a HOI-JUN YOO. Electrical Characterization of Screen-Printed Circuits on the Fabric. *IEEE Transactions on Advanced Packaging* [online]. 2010, **33**(1), 196–205. ISSN 1521-3323. Dostupné z: doi:10.1109/TADVP.2009.2034536
- [22] WANG, Zhong Lin. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators. *Materials Today* [online]. 2017, **20**(2), 74–82. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2016.12.001



- [23] ZI, Yunlong a Zhong Lin WANG. Nanogenerators: An emerging technology towards nanoenergy. *APL Materials* [online]. 2017, **5**(7), 74103. ISSN 2166-532X. Dostupné z: doi:10.1063/1.4977208
- [24] CHUN, Jinsung, Byeong Uk YE, Jae Won LEE, Dukhyun CHOI, Chong-Yun KANG, Sang-Woo KIM, Zhong Lin WANG a Jeong Min BAIK. Boosted output performance of triboelectric nanogenerator via electric double layer effect. *Nature Communications* [online]. 2016, **7**, 12985. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms12985
- [25] TIAN, Zhumei, Jian HE, Xi CHEN, Zengxing ZHANG, Tao WEN, Cong ZHAI, Jianqiang HAN, Jiliang MU, Xiaojuan HOU, Xiujuan CHOU a Chenyang XUE. Performance-boosted triboelectric textile for harvesting human motion energy. *Nano Energy* [online]. 2017, **39**, 562–570. ISSN 22112855. Dostupné z: doi:10.1016/j.nanoen.2017.06.018
- [26] HOU, Te-Chien, Ya YANG, Hulin ZHANG, Jun CHEN, Lih-Juann CHEN a Zhong LIN WANG. Triboelectric nanogenerator built inside shoe insole for harvesting walking energy. *Nano Energy* [online]. 2013, **2**(5), 856–862. ISSN 22112855. Dostupné z: doi:10.1016/j.nanoen.2013.03.001
- [27] ČVUT ÚSTAV FYZIKY. *Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích* [online]. [vid. 2017-12-22]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_11.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf)
- [28] STEVE BEEBY, JOHN TUDOR, RUSSEL TORAH, Kai Yang. *Energy Harvesting for Wearable Applications Energy*. Southampton, UK: University of Southampton, Department of Electronics and Computer Science. 2017
- [29] P. ČIČMANEC. *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetizmus*. Bratislava: Alfa a SNTL, 1980.
- [30] WANG, Lei a F G YUAN. Vibration energy harvesting by magnetostrictive material. *Smart Materials and Structures* [online]. 2008, **17**(4), 45009. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/17/4/045009
- [31] CONVERTER.CZ, moon.felk.cvut. *Termoelektrický jev* [online]. [vid. 2018-01-02]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Seebeck\\_effect\\_circuit\\_2.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/Seebeck_effect_circuit_2.svg)
- [32] CAO, Zhuo, Michael John TUDOR, Russel N TORAH a Steve P BEEBY. Screen Printable Flexible BiTe–SbTe-Based Composite Thermoelectric Materials on Textiles for Wearable Applications. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2016, **63**(10), 4024–4030. ISSN 0018-9383. Dostupné z: doi:10.1109/TED.2016.2603071
- [33] JIŘÍ ERHART. *Piezoelektrina a další elektromechanické jevy I* [online]. 2009 [vid. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubrika/astronomie/40-piezoelektrina-a-dalsi-elektromechanicke-jevy-i>

- [34] PAVEL HRZINA. *Sluneční energie, fotovoltaický jev* [online]. 2012 [vid. 2018-01-10].  
Dostupné z: [http://pasan.feld.cvut.cz/ad1b13svs/velke/prednes\\_01\\_SVS\\_DS.pdf](http://pasan.feld.cvut.cz/ad1b13svs/velke/prednes_01_SVS_DS.pdf)
- [35] CEZ.CZ. *Fotovoltaický jev* [online]. [vid. 2018-01-14].  
Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>
- [36] CNE.CZ. *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny* [online]. [vid. 2018-02-01].  
Dostupné z: <http://www.cne.cz/seniori/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>
- [37] TECHLIB.COM, Charles Wenzel. *Crystal Radio Circuits* [online]. [vid. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.techlib.com/electronics/crystal.html>
- [38] CLARE SCOTT. *Researchers Develop New Type of 3D Printed Wearable Antenna* [online]. 2017 [vid. 2018-01-24].  
Dostupné z: <https://3dprint.com/190220/3d-printed-wearable-antenna/>
- [39] ANTENNA-THEORY.COM. *Microstrip (Patch) Antennas* [online]. [vid. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php#introduction>
- [40] SHIRE, A. M., N. ABDULLAH a E. MOHD. Design of rectenna for wireless energy harvesting. In: *2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)* [online]. B.m.: IEEE, 2016, s. 1–4. ISBN 978-1-5090-2948-8. Dostupné z: doi:10.1109/SCORED.2016.7810060
- [41] PARADISO, J.A. a T. STARNER. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics. *IEEE Pervasive Computing* [online]. 2005, 4(1), 18–27. ISSN 1536-1268. Dostupné z: doi:10.1109/MPRV.2005.9
- [42] TAE-HO KANG, C. MERRITT, B. KARAGUZEL, J. WILSON, P. FRANZON, B. POURDEYHIMI, E. GRANT a T. NAGLE. Sensors on Textile Substrates for Home-Based Healthcare Monitoring. In: *1st Transdisciplinary Conference on Distributed Diagnosis and Home Healthcare, 2006. D2H2*. [online]. B.m.: IEEE, 2006, s. 5–7. ISBN 1-4244-0058-9. Dostupné z: doi:10.1109/DDHH.2006.1624783
- [43] ROCHA, J.G., L.M. GONCALVES, P.F. ROCHA, M.P. SILVA a S. LANCEROS-MENDEZ. Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2010, 57(3), 813–819. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2009.2028360
- [44] X. TAO. *Handbook of Smart Textiles*. Singapore: Springer Verlag GmbH, 2015.
- [45] M. Stoppa a A. Chiolerio, *Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical, Torino, Italy: Sensors, roč. 14, č. 7, s. 1–36, Červen 2014.*
- [46] R. Jung-Sim, C. Yong-Seung a J. K. Tae, „Wearable textile antennas,“ *International Journal of Fashion Design Technology and Education Technology and Education*(3), pp. 135-153. 2010.

- [47] VISSER, Hubregt J., Adrianus C. F. RENIERS a Jeroen A. C. THEEUWES. Ambient RF Energy Scavenging: GSM and WLAN Power Density Measurements. In: *2008 38th European Microwave Conference* [online]. B.m.: IEEE, 2008, s. 721–724. ISBN 978-2-87487-006-4. Dostupné z: doi:10.1109/EUMC.2008.4751554
- [48] WEN, Z., M.-H. YEH, H. GUO, J. WANG, Y. ZI, W. XU, J. DENG, L. ZHU, X. WANG, C. HU, L. ZHU, X. SUN a Z. L. WANG. Self-powered textile for wearable electronics by hybridizing fiber-shaped nanogenerators, solar cells, and supercapacitors. *Science Advances* [online]. 2016, **2**(10), e1600097–e1600097. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.1600097
- [49] SAHA, C.R., T. O'DONNELL, N. WANG a P. MCCLOSKEY. Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2008, **147**(1), 248–253. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2008.03.008
- [50] SARI, Ibrahim, Tuna BALKAN a Haluk KÜLAH. An Electromagnetic Micro Power Generator for Low-Frequency Environmental Vibrations Based on the Frequency Upconversion Technique. *Journal of Microelectromechanical Systems* [online]. 2010, **19**(1), 14–27. ISSN 1057-7157. Dostupné z: doi:10.1109/JMEMS.2009.2037245
- [51] GALCHEV, T., H. KIM a K. NAJAFI. Non-resonant bi-stable frequency-increased power scavenger from low-frequency ambient vibration. In: *TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference* [online]. B.m.: IEEE, 2009, s. 632–635. ISBN 978-1-4244-4190-7. Dostupné z: doi:10.1109/SENSOR.2009.5285404
- [52] LHERMET, Hélène, Cyril CONDEMINE, Marc PLISSONNIER, Raphaël SALOT, Patrick AUDEBERT a Marion ROSSET. Efficient Power Management Circuit: From Thermal Energy Harvesting to Above-IC Microbattery Energy Storage. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* [online]. 2008, **43**(1), 246–255. ISSN 0018-9200. Dostupné z: doi:10.1109/JSSC.2007.914725
- [53] L. V. Langenhove, *Smart Textiles for Medicine and Healthcare*, Materials, Cambridge, England: Woodhead. 2007.
- [54] KATRAGADDA, Rakesh B. a YONG XU. A novel intelligent textile technology based on silicon flexible skins. In: *2007 IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* [online]. B.m.: IEEE, 2007, s. 301–304. Dostupné z: doi:10.1109/MEMSYS.2007.4432973
- [55] SARIF ULLAH PATWARY, Md Syduzzaman. Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview. *Journal of Textile Science & Engineering* [online]. 2015, **5**(1). ISSN 21658064. Dostupné z: doi:10.4172/2165-8064.1000181
- [56] SELVARATHINAM, Jinthuja a Alagan ANPALAGAN. Energy Harvesting From the Human Body for Biomedical Applications. *IEEE Potentials* [online]. 2016, **35**(6), 6–12. ISSN 0278-6648. Dostupné z: doi:10.1109/MPOT.2016.2549998

- [57] MIDÉ, Vulture. *Piezoelectric Energy Harvesters* [online]. 2010 [vid. 2018-03-30]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/606/mide-technology\\_vulture\\_datasheet\\_001-1214898.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/606/mide-technology_vulture_datasheet_001-1214898.pdf)
- [58] MEIER, Rich, Nicholas KELLY, Omri ALMOG a Patrick CHIANG. A piezoelectric energy-harvesting shoe system for podiatric sensing. In: *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* [online]. B.m.: IEEE, 2014, s. 622–625. ISBN 978-1-4244-7929-0. Dostupné z: doi:10.1109/EMBC.2014.6943668
- [59] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. *LTC3588-1 - Nanopower Supply Harvesting Power Supply* [online]. 2011 [vid. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/35881fc.pdf>
- [60] CYMBET, Corporation. *EnerChip™ CC CBC3150 with Integrated Power Management* [online]. 2010 [vid. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.cymbet.com/pdfs/DS-72-03.pdf>
- [61] LI, Q., V. NAING, J.A. HOFFER, D.J. WEBER, A.D. KUO a J. M. DONELAN. Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. B.m.: IEEE, 2008, s. 3672–3677. ISBN 978-1-4244-1646-2. Dostupné z: doi:10.1109/ROBOT.2008.4543774
- [62] KYMISSIS, J., C. KENDALL, J. PARADISO a N. GERSHENFELD. Parasitic power harvesting in shoes. In: *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No.98EX215)* [online]. B.m.: IEEE Comput. Soc, 1998, s. 132–139. ISBN 0-8186-9074-7. Dostupné z: doi:10.1109/ISWC.1998.729539
- [63] BASSANI, Giulia, Alessandro FILIPPESCHI a Emanuele RUFFALDI. Human motion energy harvesting using a piezoelectric MFC patch. In: *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* [online]. B.m.: IEEE, 2015, s. 5070–5073. ISBN 978-1-4244-9271-8. Dostupné z: doi:10.1109/EMBC.2015.7319531
- [64] LI, W.J., T.C.H. HO, G.M.H. CHAN, P.H.W. LEONG a HIU YUNG WONG. Infrared signal transmission by a laser-micromachined, vibration-induced power generator. In: *Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems (Cat.No.CH37144)* [online]. B.m.: IEEE, 2000, s. 236–239. ISBN 0-7803-6475-9. Dostupné z: doi:10.1109/MWSCAS.2000.951628
- [65] LEE, J.M.H., S.C.L. YUEN, W.J. LI a P.H.W. LEONG. Development of an AA size energy transducer with micro resonators. In: *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03.* [online]. B.m.: IEEE, 2003, s. IV-876-IV-879. ISBN 0-7803-7761-3. Dostupné z: doi:10.1109/ISCAS.2003.1206360

- [66] W.-S. Huang, K.-E. Tzeng, M.-C. Cheng a R.-S. Huang, „A silicon MEMS micro power generator for wearable micro devices,“ *J. Chin. Inst. Eng.*, vol. 30, no. 1, p. 133–140, 2007.
- [67] TASHIRO, Ryoichi, Nobuyuki KABEI, Kunimasa KATAYAMA, Yoshizo ISHIZUKA, Fuminori TSUBOI a Kiichi TSUCHIYA. Development of an Electrostatic Generator that Harnesses the Motion of a Living Body. Use of a Resonant Phenomenon. *JSME International Journal Series C* [online]. 2000, **43**(4), 916–922. ISSN 1347-538X. Dostupné z: doi:10.1299/jsmec.43.916
- [68] ARAKAWA, Yasuhiro, Yuji SUZUKI a Nobuhide KASAGI. Micro Seismic Power Generator Using Electret Polymer Film. *The Proceedings of the National Symposium on Power and Energy Systems* [online]. 2004, **2004.9**, 37–38. ISSN 2424-2950. Dostupné z: doi:10.1299/jsmepes.2004.9.37
- [69] MIAO, P., P. D. MITCHESON, A. S. HOLMES, E. M. YEATMAN, T. C. GREEN a B. H. STARK. Mems inertial power generators for biomedical applications. *Microsystem Technologies* [online]. 2006, **12**(10–11), 1079–1083. ISSN 0946-7076. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-006-0152-9
- [70] V. R. Challa, M. G. Prasad, Y. Shi a F. T. Fisher, „A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability,“ *Smart Materials and Structures*, vol. 17, pp. 1-10. 2008.
- [71] MIYAZAKI, M., H. TANAKA, G. ONO, T. NAGANO, N. OHKUBO, T. KAWAHARA a K. YANO. Electric-energy generation using variable-capacitive resonator for power-free LSI: efficiency analysis and fundamental experiment. In: *Proceedings of the 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design, 2003. ISLPED '03*. [online]. B.m.: ACM, 2003, s. 193–198. ISBN 1-58113-682-X. Dostupné z: doi:10.1109/LPE.2003.1231861
- [72] DESPESSE, G., CHAILLOUT, J.J., JAGER, T., J.M. LÉGER, A. VASSILEV, S. BASROUR a B.CHARLOT. High Damping Electrostatic System For Vibration Energy Scavenging. In: *in Proc. 2005 Joint Conf. Smart Objects Ambient Intell. VInnov. Context-Aware Services: Usages Technol* [online]. 2005. Dostupné z: [http://www.ami-conferences.org/2005/proceedings/articles\\_pagines/38\\_pdf\\_file.pdf](http://www.ami-conferences.org/2005/proceedings/articles_pagines/38_pdf_file.pdf)
- [73] CARLSON, Eric J., Kai STRUNZ a Brian P. OTIS. A 20 mV Input Boost Converter With Efficient Digital Control for Thermoelectric Energy Harvesting. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* [online]. 2010, **45**(4), 741–750. ISSN 0018-9200. Dostupné z: doi:10.1109/JSSC.2010.2042251
- [74] CARMO, J.P., L.M. GONCALVES a J.H. CORREIA. Thermoelectric Microconverter for Energy Harvesting Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2010, **57**(3), 861–867. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2009.2034686
- [75] CUADRAS, A., M. GASULLA a V. FERRARI. Thermal energy harvesting through pyroelectricity. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2010, **158**(1), 132–139. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2009.12.018

- [76] MINHONG MI, M.H. MICKLE, C. CAPELLI a H. SWIFT. RF energy harvesting with multiple antennas in the same space. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* [online]. 2005, **47**(5), 100–106. ISSN 1045-9243. Dostupné z: doi:10.1109/MAP.2005.1599171
- [77] JABBAR, Hamid, Young. SONG a Taikyeong JEONG. RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* [online]. 2010, **56**(1), 247–253. ISSN 0098-3063. Dostupné z: doi:10.1109/TCE.2010.5439152
- [78] HAGERTY, J.A., F.B. HELMBRECHT, W.H. MCCALPIN, R. ZANE a Z.B. POPOVIC. Recycling Ambient Microwave Energy With Broad-Band Rectenna Arrays. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [online]. 2004, **52**(3), 1014–1024. ISSN 0018-9480. Dostupné z: doi:10.1109/TMTT.2004.823585
- [79] RANCOURT, David, Ahmadreza TABESH a Lg FRÉCHETTE. Evaluation of centimeter-scale micro windmills: aerodynamics and electromagnetic power generation. *Proc. PowerMEMS* [online]. 2007, 93–96. Dostupné z: <http://cap.ee.imperial.ac.uk/~pdm97/powermems/2007/pdfs/093-096Rancourt, D.pdf>

## Seznam obrázků

OBR. 1.1 BLOKOVÉ SCHÉMA ZPRACOVÁNÍ ENERGIE. ....	14
OBR. 1.2 OKOLNÍ ZDROJE ENERGIE PRO ENERGY HARVESTING (PŘELOŽENO Z [5]). ....	15
OBR. 1.3 ELEKTRODYNAMICKÝ MĚNIČ (PŘEKRESLENO Z [15]). ....	19
OBR. 1.4 MODEL LINEÁRNÍHO REZONANČNÍHO INERCIÁLNÍHO GENERÁTORU (PŘEKRESLENO Z [17]). ....	20
OBR. 1.5 ROTAČNÍ MEMS-VĚTRNÝ HARVESTER A DESETIPENCOVÁ MINCE (PŘEVZATO Z [20]). ....	22
OBR. 1.6 TŘI DRUHY MECHANICKÝCH ELEKTROMAGNETICKÝCH GENERÁTORŮ: (A) REZONANČNÍ (B) ROTAČNÍ (C) HYBRIDNÍ (PŘEKRESLENO Z [16]). ....	23
OBR. 1.7 A) ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE ELEKTROSTATICKEHO HARVESTERU (PŘELOŽENO Z [17]). B) TEXTILNÍ KAPACITNÍ SENZOR OBDOBNÉ KONSTRUKCE (PŘELOŽENO Z [21]). ....	24
OBR. 1.8 A) TRIBOELEKTRICKÝ TEXTILNÍ ENERGY HARVESTER (PŘELOŽENO Z [25]). B) PRINCIP FUNKCE TRIBOELEKTRICKÉHO HARVESTERU (PŘELOŽENO Z [25]). ....	25
OBR. 1.9 PIEZOELEKTRICKÝ FLEXIBILNÍ FILM NA TEXTILII A POLYMERU (PŘEVZATO Z [28]).	26
OBR. 1.10 KONSTRUKCE MAGNETOSTRIKČNÍHO GENERÁTORU (PŘELOŽENO Z [30]). ....	27
OBR. 1.11 A) SEEBECKŮV EFEKT (PŘEVZATO Z [31]). ....	28
OBR. 1.12 KONSTRUKCE TERMOČLÁNKU VLEVO A TERMOMODULU VPRAVO (PŘELOŽENO Z [3]). ....	29
OBR. 1.13 A) ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE KRYSTALICKÉHO SI FV ČLÁNKU (PŘEVZATO Z [36]). ....	31
OBR. 1.14 PŘÍKLAD TIŠTĚNÉ ANTÉNY NA SMART TEXTILII (PŘEVZATO Z [38]). ....	32
OBR. 2.1 SMART TEXTILIE OBSAHUJÍCÍ CHYTRÉ VLÁKNA, SKLÁDAJÍCÍ SE Z TENG (TRIBOELEKTRICKÝ GENERÁTOR), SUPERKAPACITORU-SC (JAKO ZÁSOKA ENERGIE V TEXTILII) A DSSC (DYE-SENSITIZED SOLAR CELL, ČESKY BARVOCITLIVÉ SOLÁRNÍ	

VLÁKNO, JAKO ALTERNATIVNÍ SEKUNDÁRNÍ ZDROJ PRO ENERGY HARVESTING). WE JAKO ZÁTĚŽ JE WEARABLE ELECTRONICS, ČESKY NOSITELNÁ ELEKTRONIKA (PŘEKRESLENO Z [48]). .....	39
OBR. 2.2 A) GRAF ZOBRAZUJÍCÍ GENEROVANÉ NAPĚTÍ PŘI JEDNOM KROKU JEDNÉ BOTY (PŘELOŽENO Z [43]). .....	40
OBR. 2.3 A) KONSTRUKCE ELEKTROMAGNETICKÉHO HARVESTERU PRO BATOH (PŘELOŽENO Z [49]). .....	41
OBR. 2.4 ENERGY HARVESTER, KTERÝ SVOJÍ KONSTRUKCÍ KONVERTUJE OKOLNÍ VIBRACI NA VYŠŠÍ FREKVENCI (PŘELOŽENO Z [50]) .....	42
OBR. 2.5 NÍZKOFREKVENČNÍ ENERGY HARVESTER PFIG (PŘELOŽENO Z [51]). .....	43
OBR. 2.6 BLOKOVÉ SCHÉMA KOMBINOVANÉHO SYSTÉMU PRO ENERGY HARVESTING (PŘEKRESLENO Z [52]). .....	44
OBR. 3.1 A) PROTOTYP SYSTÉMU AUTONOMNÍ CHYTRÉ BOTY SNÍMAJÍCÍ PŮSOBÍCÍ SÍLU NA VLOŽKU BOTY (PŘELOŽENO Z [57]). .....	48
OBR. 3.2 BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRHOVANÉHO ZAŘÍZENÍ. ....	52

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Orientační výkonové úrovně dostupné z energy harvesting v okolním prostředí (částečně převzato z [3, 41]) .....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 2 Porovnání některých systémů .....</i>	<i>45</i>