

Česká zemědělská univerzita  
v Praze  
Technická fakulta



**Možnosti využití energie lidského pohybu**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Autor práce: Samuel Papp

Praha, 2021

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci napsal sám a za pomoci všech zdrojů zde uvedených.

V Praze, dne 13. 4. 2021

Samuel Papp



Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: Samuel Papp  
Studijní program: Zemědělská specializace  
Obor: Obchod a podnikání s technikou  
Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Libra, CSc.  
Garantující pracoviště: Katedra fyziky  
Jazyk práce: Čeština

Název práce: **Možnosti využití energie lidského pohybu**

Název anglicky: **Possibilities of using the energy of human movement**

Cíle práce: Vytvořit rešerši možností využití energie lidského pohybu pro spotřebiče.

Metodika: Vytvořit rešerši možností využití energie lidského pohybu pro spotřebiče jako např. svítidla či rádio. Posoudit možnosti akumulace této energie. Zhodnotit přednosti a nedostatky a využitelnost v praxi.

Doporučený rozsah práce: 40 stran

Klíčová slova: Přeměna energie, akumulace energie, zdroj záření

Doporučené zdroje informací:

1. LIBRA, M. -- POULEK, V. *Fotovoltaika : teorie i praxe využití solární energie*. Praha: ILSA, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.
2. LIBRA, M. -- POULEK, V. *Zdroje a využití energie*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1647-8.

Předběžný termín obhajoby: 2020/2021 LS - TF

Elektronicky schváleno: 3. 11. 2020  
prof. Ing. Martin Libra, CSc.  
Vedoucí katedry

**Abstrakt:**

Bakalářská práce je rešerší využití lidského pohybu v energetice, zhodnocení možností výkonového potenciálu a přenosu energie u různých nositelných generátorů. Především se zaměřuje na technologii LED, přeměnu a využití elektromagnetické energie a Faradayova zákona v porovnání s dalšími technologiemi jako je piezoelektrický, triboelektrický nebo termoelektrický jev. Modelovým příkladem určujícím kritéria zařízení je čelová lampa napájená jen za pomoci energie lidského těla. Dále je v práci popsán výkonový potenciál lidského těla jako zdroje energie a stručné ekonomické hodnocení. Na závěr je vybrán nejvhodnější způsob přeměny energie, zhodnoceny jsou i podmínky reálného použití a vize do budoucna.

**Klíčová slova:** Přeměna energie, akumulace energie, zdroj záření, LED

**Possibilities of using the energy of human movement****Summary:**

The bachelor's thesis is a research of using human motion in energetics, evaluation of the power potential possibilities and energy transfer in various wearable generators. It is mainly focused on LED technology, transformation and use of electromagnetic energy and Faraday's law in comparison with other technologies such as piezoelectric, triboelectric or thermoelectric effect. The example to determine criteria of the device is the headlamp powered only by the energy of the human body. Then the work describes the power potential of the human body as a source of energy and a brief economic evaluation. In conclusion the most suitable way of energy conversion is selected and the conditions of practical use and vision for the future are evaluated.

**Key words:** Energy conversion, energy storage, radiation source, LED

# Obsah

1. Úvod .....	1
2. Cíle práce.....	3
3. Metodika práce .....	4
4. Diody .....	5
1) Princip diody .....	5
2) LED .....	5
3) Vývoj LED diod v čase .....	6
4) LED svítlna.....	7
5. Elektromagnetická indukce .....	8
1) Faradayovy pokusy .....	8
2) Faradayův zákon .....	9
3) Přenos energie při indukci .....	10
4) Teorie generace proudu .....	11
5) Sběr energie za pomoci oscilačního generátoru .....	11
6) Tlakem poháněný generátor .....	13
7) Další nositelné generátory na bázi elektromagnetické indukce .....	15
8) Porovnání a zhodnocení uvedených elektromagnetických generátorů .....	17
6. Další způsoby generace napětí.....	18
1) Piezoelektrický jev .....	18
2) Flexibilní piezoelektrické generátory.....	19

3) Triboelektrický jev .....	20
4) Nositelný triboelektrický nanogenerátor (TENG).....	21
5) Princip termoelektrického generátoru (TEG) .....	22
6) Nositelné termoelektrické generátory (TEG) .....	23
7. Porovnání možností jednotlivých technologií.....	23
8. Energie těla.....	25
9. Ekonomické zhodnocení .....	26
10. Závěr .....	28
11. Literatura .....	30

## 1. Úvod

Když se dnes podíváme na fungování běžného člověka, jsme již zcela závislí na elektronických přístrojích. Ráno nás budí náš smartphone, který neustále běží a hlídá nás i v noci, následně se automaticky zapne přes WiFi ovládané rádio, které naladí naši oblíbenou stanici, uchopíme elektrický kartáček a při čištění zubů se díváme na televizi. Do práce jedeme metrem a naší novou high-tech elektrickou koloběžkou a cestou posloucháme hudbu přes Bluetooth ovládaná bezdrátová sluchátka. Každý náš krok zaznamenávají naše chytré hodinky, které nám měří tep a polohu a mnoho dalšího. [1, s. 10]

Všechna tato data se následně odesílají na neustále běžící servery naší aplikace. Většina z nás si ani neuvědomuje, že abychom mohli tohle všechno používat, surfovat po internetu, a ukládat si nejrůznější data přes cloudové a zálohové servery, je k tomu potřeba značné množství elektrické energie. I když se technologie vyvíjejí a přístroje jsou neustále úspornější a efektivnější na spotřebu, celková světová spotřeba energie roste spolu s rostoucí světovou populací a rozvojem jednotlivých států. Světová energetická rada předpokládá, že světová spotřeba elektrické energie poroste do roku 2050 o více než 100 % oproti roku 2007. Nárůst zaznamenají hlavně rozvojové země. S tím vším úzce souvisí koncentrace CO<sub>2</sub>, která má přímý vliv na globální oteplování a roste spolu se světovou spotřebou energie. [1, s. 10]

Vytváří se tedy tlak na využívání obnovitelných zdrojů energie a hledání nových alternativních zdrojů, které by nezatěžovali ekosystém a byly dostupné široké veřejnosti. I kdyby se efektivně dařilo zvyšovat podíl obnovitelných zdrojů energie, nebo by se dokonce povedlo přejít zcela na tyto zdroje, problémem zůstane transport a skladování takto vyrobené elektrické energie. Jelikož využíváme čím dál víc chytrých přístrojů a různých zařízení ve všech odvětvích průmyslu či běžného života, stoupá především spotřeba lithiových baterií, které se díky vhodným vlastnostem využívají čím dál víc. I když lithiové baterie nejsou všeobecně považované za nebezpečný odpad, jejich bezpečná likvidace je složitá vzhledem k hořlavým a toxickým látkám, které obsahují. [2, s. 247-254]

To všechno otevírá otázku využití energie, která je dostupná vždy tam, kde je její momentální spotřeba. Pokud se zaměříme na napájení smartphonů, hodinek, čelových svítilen a dalších přístrojů osobního použití, nabízí se jako ideální zdroj energie samotný člověk. Pokud bychom byli schopni vhodným způsobem získat dostatek energie na provoz těchto zařízení, odbourali bychom nutnost nabíjení a získali částečnou energetickou nezávislost. Člověk by si nemusel hlídat kolik má procent baterie na telefonu nebo se bát, jestli mu bude fungovat GPS v hodinkách i po dlouhé túře. V neposlední řadě je tady i ekonomický potenciál této technologie, který rozhodně nebude zanedbatelný. Otázkou je, zdali jsme schopni vytvořit a získat dostatečné množství energie a následně tuto energii jednoduše transportovat do požadovaného zařízení. Proto aby zařízení vyhovovalo použití v běžné praxi, je nutné splnit několik důležitých faktorů jako dostatečný výkon, přijatelné rozměry a umístění na těle, spolehlivost, dostupná cena a mnohé další. Stanovený cíl této práce je čelová lampa napájená jen energií člověka. Proto rozebereme danou problematiku na tomto příkladu.



## 2. Cíle práce

Vytvořit rešerši možností využití energie lidského pohybu pro spotřebiče denní potřeby. Stručně rozebrat LED technologii a její fungování. Porovnat jednotlivé technologie transformace mechanické energie na elektrickou, a to zejména elektromagnetickou indukci, triboelektrický či piezoelektrický jev. Zhodnotit výhody i nevýhody jednotlivých technologií v praktických aplikacích.

### 3. Metodika práce

Téma bylo zpracováno pomocí odborných publikací, vědeckých článků i dalších zdrojů o možnostech převodu energie lidského těla na elektrickou energii. Představena je stručně technologie LED a princip jejího fungování. Práce se následně zaměřuje na tři způsoby přeměny mechanické energie a jeden způsob tepelné. Tyto způsoby převodu energie jsou poté porovnány jak po stránce dosahovaných výkonů na plochu a hmotnost zařízení, ceny a dostupnosti materiálů, tak po stránce konstrukce a praktičnosti použití na lidském těle. Následně jsou stručně srovnány výhody i nevýhody jednotlivých způsobů. Poté je stručně zhodnocen člověk jako energetický zdroj a ekonomický potenciál porovnávaných technologií. Výsledkem práce je celkové zhodnocení, porovnání a seřazení jednotlivých technologií podle vhodnosti k napájení čelové lampy.

## 4. Diody

### 1) Princip diody

Polovodičová dioda patří k nejjednodušším polovodičovým součástkám a jde v podstatě o zapouzdřený PN přechod. Na tento PN přechod je připojena anoda na stranu P a katoda na stranu N. Pokud je na anodě vyšší potenciál než na katodě, odpor PN přechodu je tak malý, že prochází elektrický proud a dioda je otevřená. Pokud směr potenciálů obrátíme, odpor PN přechodu se zvýší, dioda se dostane do závěrného směru a elektrický proud neprochází. Z toho vyplývá, že pomocí usměrňovací diody můžeme jednoduše řídit tok elektrického proudu. Nemůžeme ale řídit jakkoli velký proud, protože pokud budeme zvyšovat obvodové veličiny, dosáhneme v obou směrech hraničních hodnot a dojde ke zničení diody. Je tedy potřeba hlídat maximální proud v propustném směru  $I_{FMAX}$ , při jehož překročení dojde k tepelnému zničení diody a maximální napětí v závěrném směru  $U_{RMAX}$ , při kterém dojde k proražení diody, což je nevratný proces, kterým se také dioda zničí. [3, s. 124]

### 2) LED

Při rekombinaci volných nosičů náboje u polovodičů se uvolňuje energie, která je závislá na šířce zakázaného pásma PN přechodu. Na velikosti tohoto pásma je závislá i frekvence a vlnová délka vyzářené energie. Emise běžných polovodičových materiálů křemíku a germania (Si, Ge) není viditelná. Avšak například slitiny arsenu a galia (As, Ga) již vyzařují v infračerveném pásmu. Pokud přidáme fosfor (P), dochází k vyzařování ve viditelném pásmu. [3, s. 130]

Takovéto diody se nazývají elektroluminiscenční diody neboli LED (Light Emiting Diode) diody. Jednoduše řečeno, tyto diody mění elektrickou energii na světelnou. Vlnová délka, a tedy i barva samotného vyzářeného světla, je závislá na použitém druhu materiálu. Výhoda diod v porovnání s klasickými zářivkami je jejich vysoká účinnost. [3, s. 130]

Tedy vlnová délka  $\lambda_{em}$  emitovaného světla z LED závisí na šířce zakázaného pásma  $E_g$  daného polovodiče a je dána vztahem  $\lambda_{em} \geq hc/E_g$  ( $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla

a  $hc/\lambda_{em}$  je energie fotonu). Je tedy zřejmé, že pro výrobu LED, která bude emitovat specifickou barvu je důležité zvolit vhodný polovodič. K tomu, aby dioda začala emitovat fotony je potřeba dosáhnout prahové napětí  $U_p$ , přičemž platí  $U_p \approx \frac{E_g}{e}$  (kde  $e$  je elementární náboj). [4, s. 5-6]

V tomto případě se nám bude dobře pracovat s jednotkou energie eV (elektronvolt). Jeden eV je energie, kterou získá elektron v potenciálním poli jeden volt. Energii fotonu vyjádřenou v eV a vlnovou délku příslušného světla v nanometrech můžeme přepočítat dle vztahu  $\{E\}eV = 1239,511/\{\lambda\}nm$ . Pokud tedy vezmeme modré světlo s vlnovou délkou 470 nm, tak nám vyjde, že přibližná energie fotonu je 2,64 eV. V praxi tedy bude potřeba na rozsvícení modré LED prahové napětí mírně větší, tedy asi 3 V. [4, s. 6]

### 3) Vývoj LED diod v čase

Nejstarší pozorování elektroluminiscence je spjato s prvními usměrňujícími součástkami. Ty spočívaly v přitlačení kovového hrotu k vhodným přírodním minerálům. Německý fyzik Karl Ferdinand Braun (1850–1918), vynálezce katodové obrazovky a osciloskopu, byl právě tím, kdo v roce 1874 studoval elektrické vlastnosti krystalů pomocí kontaktu s kovovým hrotem. Zjistil, že když připojí do elektrického obvodu krystal galenitu (PbS), proud prochází jen jedním směrem. Nicméně důležitost tohoto objevu nebyla v tom čase pochopena a objev samotný neměl dlouho žádné uplatnění. [4, s. 7]

Skutečným vynálezcem samotné LED diody byl až ruský vědec Oleg Vladimirovič Losev. V polovině dvacátých let minulého století pozoroval emisi světla z krystalu oxidu zinečnatého a karbidu křemíku usměrňovacích diod používaných v rádiových přijímačích. V roce 1927 publikoval v ruském Nižném Novgorodě článek na toto téma, ve kterém popsal daný jev a příčiny jeho vzniku. Ohlasy britských a německých vědeckých časopisů na sebe nenechaly dlouho čekat a nakonec uznaly objevení toho, co dnes známe pod pojmem LED. Bohužel osud ruského objevitele LED diody byl nakonec tragický a jeho objevy zůstaly opomíjené a téměř zapomenuté sovětským režimem. [5, s. 189-191]

První skutečné svítivé diody a jejich vznik je spojen až s vývojem polovodičů v padesátých letech 20. století po objevu tranzistoru (1947) a s vynálezem laseru. První podrobně zkoumané polovodiče byly germanium a křemík, které sloužily právě k výrobě tranzistorů a diod. Hledali se i jiné materiály, které by byly schopné elektroluminiscence, mezi něž patřil také arsenid gallitý GaAs. Ke vzniku prvních LED pak přispěla i náhoda. Robert H. Rediker spolu s kolegy na MIT (Massachusetts Institute of Technology) začal zkoumat GaAs s cílem vyrobit co nejrychleji spínající polovodič, což se jim později podařilo. Proto, aby lépe pochopili rozdíly mezi vyrobenými diodami, se rozhodli využít metodu měření elektroluminiscence. [4, s. 8-10] Podařilo se jim objevit vysoce účinnou elektroluminiscenci a byli přesvědčeni, že můžou vyrobit polovodičový laser s GaAs. Svůj objev publikovali v červnu 1962 na vědecké konferenci, což odstartovalo závod o výrobu takového laseru. Ten byl sestrojen již na konci téhož roku, a i když nebyl v praxi příliš použitelný, byl to významný první krok. S rozvojem laserů se tak rozvíjely i polovodičové LED diody. [4, s. 8-10]

#### 4) LED svítilna

Abychom mohli rozebrat napájení modelového příkladu LED svítilny, je třeba si nejprve určit, jaký světelný tok  $\{\Phi\}$  by měla LED svítilna dosahovat, aby byla použitelná k praktickému svícení. Za smysluplnou hodnotu světelného toku můžeme brát hodnotu 50 lm, které dosahuje běžně prodávaná čelovka od firmy Petzl Pixa 1 s dosvitem 15 m. [6] K určení hodnoty potřebného dodaného výkonu pro dosažení této svítivosti bude nejjednodušší vzít skutečně prodávanou LED diodu s bílým světlem. Dioda od výrobce Hebei, označení S12PW3C-B, dosahuje dle údajů výrobce námi požadovaného světelného toku 40~50 lm za předpokladu dodaného výkonu 1 W. [7]

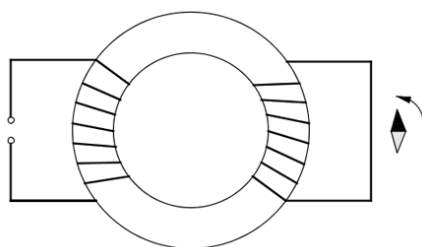
Tímto způsobem se dá jednoduše určit potřebný okamžitý napájecí výkon, tj. 1 W, jehož dosažení by mělo umožnit reálné svícení. Dalo by se tedy říct, že k využití energie lidského pohybu na svícení s již zmiňovanými hodnotami 50 lm po dobu jedné hodiny, je potřeba získat energii 1 Wh neboli 3600 J.

## 5. Elektromagnetická indukce

### 1) Faradayovy pokusy

Když bylo v roce 1820 objeveno, že elektrický proud budí magnetické pole, mnoho fyziků se soustředilo na pokusy, kterými by dokázali i opačnou souvislost. Šlo o to prokázat, že i magnetické pole budí elektrický proud. Úspěšným byl až M. Faraday, který v roce 1831 svými pokusy dokázal, že v uzavřeném obvodu vzniká elektrický proud, pokud v jeho blízkosti dochází ke změnám magnetického pole. Jeho pokusy lze rozdělit na tři skupiny. [8, s. 116]

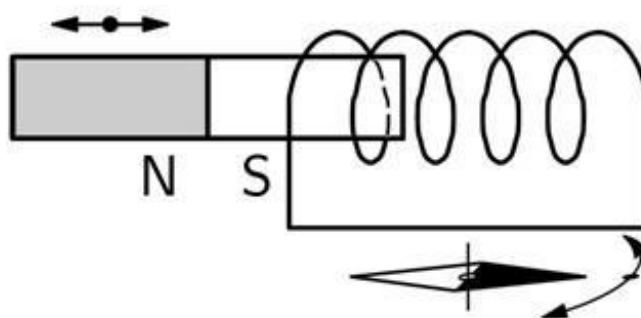
Obrázek č. 1 Změna magnetického pole



[9]

První skupina pokusů je zaměřena na změnu magnetického pole. Železný prstenec je ovinutý cívkami z obou stran. První je zapojena ke zdroji a druhá cívka je spojena vodičem, u kterého je umístěna magnetka (viz obrázek č. 1). Při zapínání a vypínání zdroje můžeme pozorovat, že magnetka se vychyluje v opačných směrech. [8, s. 116-117]

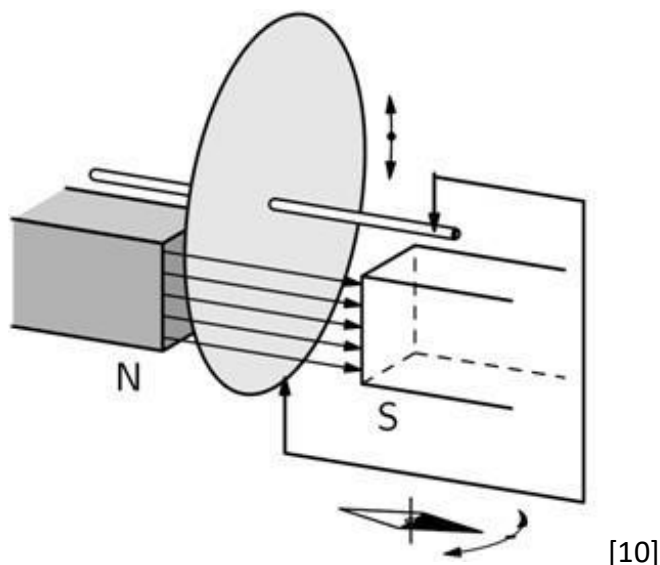
Obrázek č. 2 Pohyb zdroje magnetického pole



[10]

V druhém případě byl zasouván permanentní magnet do prázdné cívky. Zde bylo pozorováno, jak se vychyluje magnetka při zasouvání a vysouvání (viz obrázek č. 2).

Obrázek č. 3 Pohyb vodiče v magnetickém poli



Ve třetím případě byl měděný kotouč připojen k obvodu klouzavým kontaktem na obvodu kotouče a druhý konec připojen v místě ložiska. Pokud se kotouč točí, můžeme pozorovat vychýlení magnetky. Směr vychýlení se mění dle směru otáčení (viz obrázek č. 3). U všech těchto pokusů je možné do proudové smyčky zapojit galvanometr a při pohybu vodiče, magnetu anebo spínání zaznamenávat proud v obvodech. [8, s. 117]

## 2) Faradayův zákon

Faraday tedy jako první pochopil, že elektromotorické napětí a proud mohou být ve smyčce indukovány tím, že se mění magnetické pole procházející smyčkou. Magnetické pole znázornil pomocí magnetických indukčních čar, které procházejí smyčkou. Důležité je pochopení, že velikost indukovaného napětí a proudu nezávisí na počtu indukčních čar, které procházejí plochou smyčky ale na rychlosti změny jejich počtu. Aby se dal Faradayův zákon používat k výpočtům, je potřeba stanovit míru magnetického pole procházejícího smyčkou, tedy magnetický tok. Magnetický indukční tok ve smyčce je  $\Phi_B = \int_S B dS$ . Velikost elektromotorického napětí (emn)  $U_{ic}$  ve vodivé smyčce je tedy rovna rychlosti změny magnetického indukčního toku  $\Phi_B$  procházejícího danou smyčkou. Matematicky zapíšeme

tento zákon jako  $U_{ic} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ . Pokud bychom měnili magnetický indukční tok v cívce o  $N$  závitů, tak indukované emn se tvoří v každém závitě. Tedy celkové emn vzniklé v cívce je rovno součtu těchto jednotlivých napětí. Pokud je cívka hustě vinutá, tak je tok v každém závitě stejný a pro celkový indukční tok v cívce platí vztah  $U_{ic} = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$ .

Magnetický indukční tok v cívce můžeme měnit různě:

1. Změnou velikosti  $B$  magnetického pole v cívce.
2. Změnou obsahu průřezu cívky, tedy části plochy, která se nachází v magnetickém poli.
3. Změnou úhlu mezi směrem magnetického pole  $B$  a plochou cívky tak, že se nám mění počet indukčních čar, které procházejí cívkou. [11, s. 799-800] [8, s. 118-119]

### 3) Přenos energie při indukci

Chvíli potom, co Faraday zformuloval svůj zákon elektromagnetické indukce, Emil Lenz vyslovil pravidlo (nyní Lenzův zákon) k určování směru indukovaného proudu ve smyčce. A to: „Indukovaný proud má takový směr, že magnetické pole tímto proudem vyvolané působí proti změně magnetického pole, která proud indukovala“. Když budeme tedy pohybovat magnetem směrem k uzavřené smyčce nebo od ní, tak nám v pohybu podle tohoto zákona brání síla. Když tuto sílu přemáháme, konáme práci. Zároveň se ve smyčce bude tvořit teplo, jelikož materiál smyčky má určitý elektrický odpor. Pokud zanedbáme vyzářenou energii, můžeme říct, že energie, kterou do uzavřené smyčky a magnetu dodáme silou, je ve smyčce obsažená. Platí tak zákon zachování energie a k dané přeměně energie dochází bez ohledu na způsob, kterým je proud indukován. Jednoduše řečeno tedy platí, že vznik indukovaného elektromotorického napětí umožňuje proměnu elektrické energie na mechanickou práci a naopak. V našem případě to znamená, že budeme moci využít mechanické práce člověka (pohyb) na výrobu elektrické energie k napájení čelové LED svítilny, a to za použití elektromagnetické indukce. [11, s. 799-802] [12, s. 341-344]



#### 4) Teorie generace proudu

Pokud chceme generovat proud pomocí indukce, je pro nás nejvýhodnější vytvářet střídavý harmonický proud. Zařízení, které je schopné produkovat elektromotorické napětí a být zdrojem střídavého harmonického napětí má časovou závislost danou vztahem:  $U(t) = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$ , kde  $U_0$  je amplituda napětí,  $\omega$  je úhlová frekvence a  $\varphi$  je fázová konstanta. Dva nejdůležitější principy na výrobu takového proudu jsou elektrický generátor/alternátor nebo využití vlastních kmitů v obvodu s indukčností, odporem a kapacitou. Elektrický generátor využívá indukce ve vodičích, které se pohybují v magnetickém poli. V praxi se více používá druhá varianta, tedy alternátor. Ten má konstrukci složenou ze statoru a rotoru. Stator je složen z magneticky měkkého feromagnetika, na jehož plášti jsou navinuté cívky, a to vždy v párech oproti sobě. V dutině statoru se pohybuje rotor, kterým je nejčastěji elektromagnet buzený cívkou. Otáčení rotoru způsobuje změnu magnetického pole v cívkách a budí střídavý magnetický tok, který při vhodné konstrukci indukuje elektromotorické napětí. Vzniklý proud bude střídavý harmonický, ale jelikož napájení LED svítilny vyžaduje jednosměrný proud, bude potřeba použít usměrňovač s vyhlazovacím kondenzátorem, který upraví proud na jednosměrný s plynulým průběhem. [12, s. 289-292]

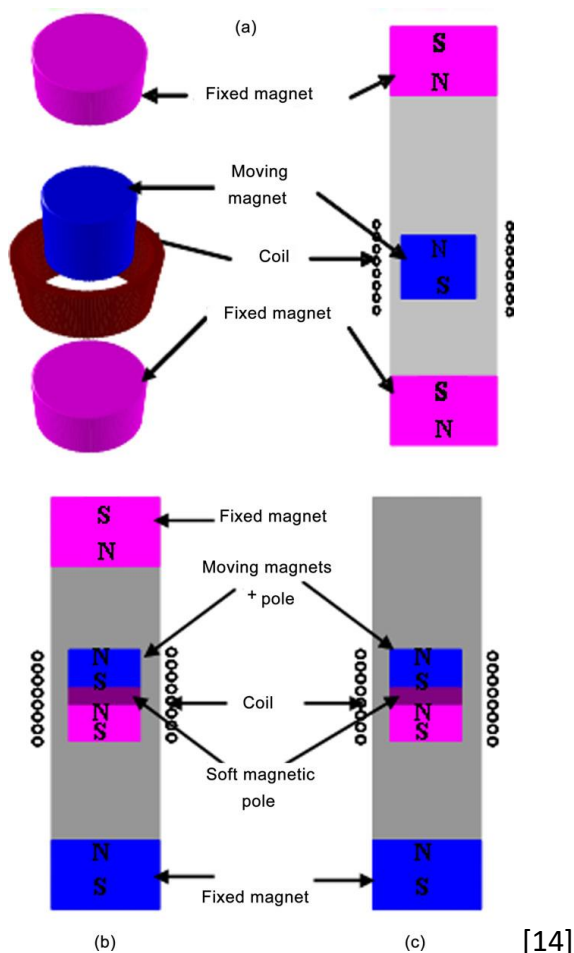
#### 5) Sběr energie za pomoci oscilačního generátoru

Způsobům generace proudu za pomoci lidského pohybu se věnuje pozornost již dlouhou řadu let a vede se mnoho výzkumů s cílem vyvinout co nejlepší technologii. V roce 2004 se Buren a kol. pokusili ve své práci vypočítat potenciál takového zařízení umístěného jinde na těle než v botě. Ve svých teoretických výpočtech uvedli, že elektromagnetický generátor o obsahu  $1 \text{ cm}^3$  s pohyblivou částí o hmotnosti  $10 \text{ mg}$  a dráhou pohybu  $5 \text{ mm}$  by mohl generovat výkon  $134 \text{ } \mu\text{W}$  až  $2,1 \text{ mW}$  z lidské chůze za předpokladu umístění na noze nebo hlavě. Tyto výpočty byly založené na předpokladu, že rezonanční frekvence se bude shodovat s frekvencí chůze. [13, s. 36]

Jelikož lidský pohyb je spíše nízkofrekvenční a významně nepravidelný, použití takového zařízení nebude nejlepším řešením. Je tedy potřeba struktury zařízení, které bude pracovat

dobře i mimo rezonanční frekvenci. Saha a kol. se v práci z roku 2008 zaměřili na sestavení takového zařízení umístěného v batohu. Generátor využívá tzv. „magnetické pružiny“ jako náhrady mechanické pružiny s výhodami jednoduchosti konstrukce a nižšího sklonu k únavě materiálu. Jedná se v podstatě o osově magnetizované permanentní magnety uložené do tuby stejnou polaritou k sobě. Magnety na obou koncích tuby jsou připevněny a mezi nimi se nachází volně se pohybující magnet, který je ale z každé strany odpuzován pevně uloženými magnety (viz obrázek č. 4).

Obrázek č. 4 Části oscilačního generátoru



Obal tuby tvoří namotaná cívka. Ve výsledku se jim podařilo naměřit hodnoty za běžného užívání, a to 0,3 mW u chůze a 1,86 mW u pomalého běhu při prototypu s oběma konci tuby s pevným magnetem. Prototyp s horním koncem tuby bez ohraničujícího magnetu dosáhl lepších hodnot, a to 0,95 mW pro chůzi a 2,46 mW při pomalém běhu, tedy frekvenci 8 Hz.

Objem samotného zařízení činí 12,7 cm<sup>3</sup>. Zásadní naměřenou hodnotou je energie, kterou tento generátor uloží za jednu hodinu. Za jednu hodinu chůze bylo zvýšeno napětí testovací baterie z 1,09 V na 1,27 V. Po přepočtu vychází, že přenesená energie generátorem je 3,54 J. [14, s. 248-253]

## 6) Tlakem poháněný generátor

V porovnání s ostatními končetinami je pohyb nohy a chodidla více stabilní, a proto vhodnější k instalaci malých generátorů ke sběru energie z lidského pohybu. Podle výzkumu z roku 2014 průměrný běžec pohybující se rychlostí 16,2 km/h vydá při každém kroku energii mezi 1,72–10,32 J. Většina z této energie je pohlcena dopadem paty na podložku. [15, s. 328]

Deng s kol. se tedy zaměřili na tlakem poháněný generátor umístěný v botě (viz obrázek č. 5 a 6). Využili analýzy chůze a brali do úvahy pohodlnost nošení generátoru za chůze. Podařilo se jim přijít s umístěním a zpracováním, které téměř vůbec neomezuje uživatele. Prototyp, který sestrojili, dosáhl velice zajímavých hodnot výkonu, a to 97 mW s odpovídajícím odporem 17  $\Omega$  při chůzi 4 km/h. Zařízení mělo objem 82,8 cm<sup>3</sup> a dosahovalo objemovou hustotu výkonu 1,17 mW/cm<sup>3</sup>. [16, s. 785]

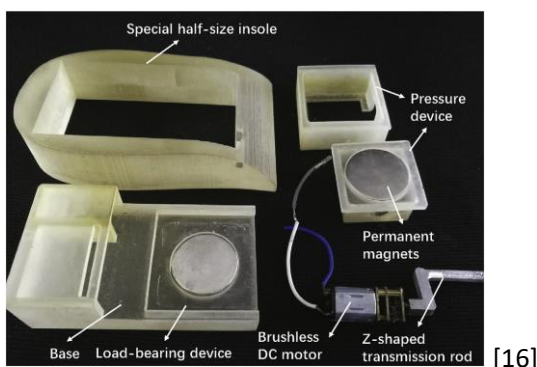
Nejdříve však museli pečlivě zmapovat skutečnou lidskou chůzi a získaná data zanalyzovat inženýrskými metodami. K tomu využili třídídimenzionální tlakovou podložku TAFS-P-060, která sbírala data při chůzi. Na zemi rozmístili 4 takovéto podložky, čímž vytvořili testovací plochu o velikosti 600 mm x 600 mm s pracovní výškou 8 cm. Tester pak chodil diagonálně přes testovací plochu tak, aby zaznamenali síly při osamoceném šlápnutí na podložku nebo při dvou krocích přes tuto plochu. Zjistili, že maximální tlak při jednom kroku se rovná asi 1,2násobku tlaku dané osoby jen při působení gravitace. [16, s. 787]

Po zjištění, že tlak při došlapu rozhodně není zanedbatelný, bylo potřeba ještě zjistit, jak se mění tyto síly v průběhu jednoho došlápnutí. Došli k závěru, že část chodidla, která by byla vzhledem ke změnám zrychlení nejvhodnější, je špička nohy (palec), pak pata a až nakonec střední část chodidla. Jelikož ale museli brát v potaz komfort při nošení, odolnost a praktičnost, rozhodli se umístit zařízení do podrážky na patě boty, protože poskytuje nejvíc prostoru a neomezuje uživatele. [16, s. 787-788]

Zařízení se skládá ze základny, tlakového zařízení, převodové části a bezkartáčového stejnosměrného motoru. Tlakové zařízení je tvořeno dvěma permanentními magnety, mezi které je uložena vrchní horizontální část klikové hřídele. Celá tlaková část je uložena ve vertikální drážce a ze spodní části ohraničená kontrolním permanentním magnetem otočeným tak, aby odpuzoval tlakové zařízení směrem nahoru. Kliková hřídel je pak přes převod zapojena na motor. [16, s. 789-790]

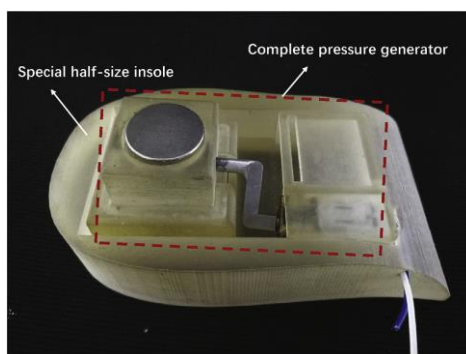
Při došlapu se tlakem stlačí tlaková část a pohybuje klikovou hřídelí směrem dolů, kliková hřídel přes převodovku velkým zrychlením roztočí bezkartáčový motor. Při uvolnění tlaku chodidla kontrolní magnet odpuzuje tlakové zařízení, a to se pohybuje směrem nahoru a přes hřídel roztočí motor na opačnou stranu. Takto se generuje proud, který je zpracováván, stabilizován a ukládán v superkondenzátoru a může být vyveden přes USB rozhraní. Celé zařízení je o rozměrech 4,5 cm x 8 cm a 3,5 cm na výšku. [16, s. 789-790]

Obrázek č. 5 Části tlakového generátoru



[16]

Obrázek č. 6 Složený tlakový generátor



[16]

## 7) Další nositelné generátory na bázi elektromagnetické indukce

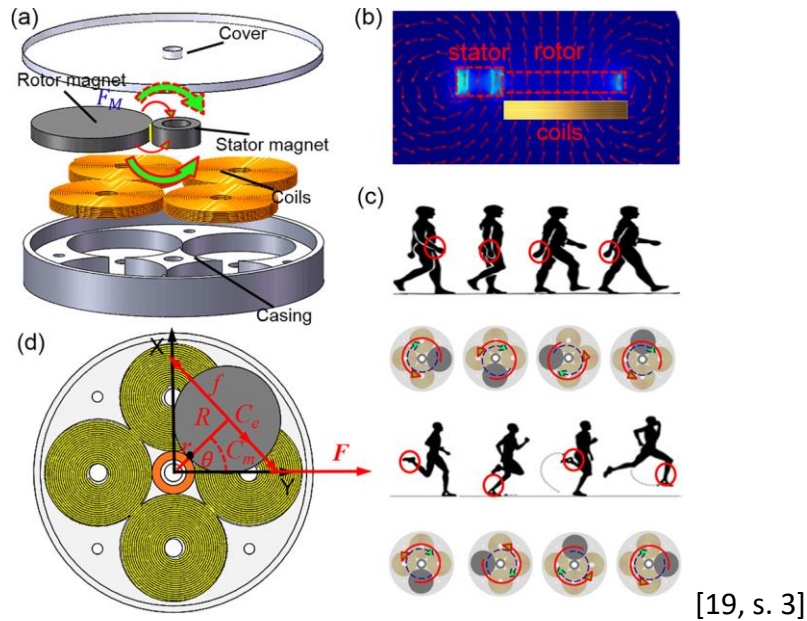
Elektromagnetický typ generátoru je nejvíce používaný typ generátoru napětí, a to z důvodu dobré účinnosti při vyšších frekvencích. Zde je tedy pár dalších příkladů prototypů generátorů na této bázi a jejich stručný popis a dosažené hodnoty. Lin s kol. publikovali v roce 2017 práci o rotačním elektromagnetickém generátoru složeném z válcového statoru a rotoru ve tvaru disku z neodymových magnetů, přesněji NdFeB. Jelikož rotor a stator mají mezi sebou teoretickou linii tvořenou magnetickou silou, nedochází mezi nimi k žádnému tření a rotor se může pohybovat zcela bez omezení. Při rychlosti běhu  $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  bylo dosažených maximálních hodnot napětí  $1,92 \text{ mV}$  a objemové hustoty výkonu  $0,2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$ , tj.  $9,6 \text{ mW}$ . Zařízení bylo vloženo do podrážky na botě a poháněné bylo zrychlením paty při došlapu. Zařízení mělo objem  $48 \text{ cm}^3$  a při rychlosti pohybu  $6 \text{ km/h}$  dosahovalo průměrného výkonu  $4,13 \text{ mW}$ . [17, s. 22]

Zcela jiný přístup zvolil Fan a kol., kteří navrhli rotační generátor energie (REH – Rotational Energy Harvester) založený na jednoduchém principu provazem poháněného rotoru. Představili zařízení nenáročné na výrobu s relativně vysokým výkonem, které sbírá energii i při nepravidelném pohybu, různých frekvencích nebo i vibracích při běhu. Zařízení REH má cívky vložené na diskovém statoru a magnety rotoru jsou na druhém disku nacházejícím se na stejné ose. Rotor pohání elastické a neelastické lanko navinuté na hřídeli, na které je pevně připevněn. Hřídel je navržena s dvěma drážkami na dvě lanka a je podpořena ložisky, zajišťující plynulé otáčení. Lanka jsou namotaná v opačných směrech tak, že neelastické lanko tažené pohybem ruky otáčí rotor, odvíjí se a natahuje elastické lanko tím, že ho navinuje. Následně je elastické lanko po uvolnění pohybu natažené a stahováním na původní délku roztáčí rotor opačným směrem. Tímto je dosaženo využití i malých pohybů a frekvencí. Zařízení dosahuje při stanovené frekvenci  $4 \text{ Hz}$  výkonu  $5,3 \text{ mW}$ , při chůzi o rychlosti  $6,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  výkonu  $0,65 \text{ mW}$  a při vibracích u běhu  $0,45 \text{ mW}$ . Objem zařízení je  $21,5 \text{ cm}^3$ , hmotnost  $22,8 \text{ g}$  a objemová hustota výkonu je  $0,247 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$ . [18, s. 1028-1039]

Další zajímavý rotační generátor (REH) představil Liu a kol. v roce 2018. Ve své práci se také se zaměřili na nepravidelný pohyb a využití nízkých frekvencí. Jejich REH byl složen z válcového statoru a rotoru ve tvaru disku vytvářející pohyb vyššího páru. Bez jakýchkoli převodů se rotor pohybuje kolem statoru jen přitažlivou magnetickou silou (viz obrázek č. 7).

Poháněn je vibracemi širokého pásma frekvencí, přičemž se pohybuje nad obalem s vloženými cívkami, které sbírají pomocí elektromagnetické indukce energii. Při řízené frekvenci 8 Hz dosahuje jejich REH maximální výkon 10,4 mW při vloženém odporu 100  $\Omega$ . Objem zařízení je 33,1 cm<sup>3</sup> a hmotnost je 1600 g. [19, s. 1-6]

Obrázek č. 7 Schéma REH



## 8) Porovnání a zhodnocení uvedených elektromagnetických generátorů

Tabulka č. 1 Porovnání elektromagnetických generátorů

Reference	Frekvence (Hz)- rychlost (km*h <sup>-1</sup> )	Objem (cm <sup>3</sup> )	Hmotnost (g)	Maximální výkon (mW)	Výkon na objem (mW*cm <sup>-3</sup> )	Výkon na hmotnost (mW*g <sup>-1</sup> )	Typ generátoru
C. R. Saha a kol. [14]	8 Hz	12,7	27	2,46	0,194	0,091	Oscilační
F. Deng a kol. [16]	4 km/h	82,8	-	97	1,17	-	Tlakový
J. Lin a kol. [17]	8 km/h	48	-	9,6	0,2	-	Rotační
K. Fan a kol. [18]	4 Hz	21,5	22,8	5,3	0,247	0,232	Rotační
H. Liu a kol. [19]	8 Hz	33,1	1600	10,4	0,314	0,0065	Rotační

Jednotlivá zařízení se od sebe liší nejen technickým provedením samotného generátoru, ale také hmotností, maximálním dosahovaným výkonem nebo objemem (viz tabulka č. 1). Co je však možná nejdůležitější, zásadně se liší v tom, do jaké míry omezují uživatele a kde je jejich pásmo efektivního výkonu. Oscilační generátor od Saha a kol. vyžaduje umístění externě v batohu a pracuje efektivně jen při rezonanční frekvenci 8 Hz [14, s. 248-253].

Fan a kol. vytvořili zajímavé zařízení jednoduché na výrobu a schopné efektivně pracovat při nepravidelném pohybu a různých frekvencích [18, s. 1028-1039]. U tohoto zařízení je však největší nevýhodou propojení dvou končetin lankem, což se jeví jako velice nepraktické při běžném užívání.

Liu a kol. se vysloveně zaměřili na nepravidelný pohyb člověka a jejich zařízení REH se skládá z jednoho kusu, nijak neomezuje při pohybu a je jednoduché na nošení (viz obrázek č. 7) [19, s. 1-6]. Přestože jejich REH zařízení vykazalo zajímavých hodnot výkonu 10,4 mW při upnutí kolem zápěstí nebo kotníku, tak jeho hmotnost 1600 g je přinejmenším znatelnou překážkou pro běžné nošení.

Ze všech zde uvedených generátorů se tedy jako nejpraktičtější jeví tlakový generátor od Deng a kol. [16, s. 785-790]. Nejen tím, že dosahuje nejvyššího výkonu 97 mW při běžné chůzi, ale také jeho umístění v podrážce boty (viz obrázek č. 5 a 6) nabízí velký potenciál pro každodenní využívání.

## 6. Další způsoby generace napětí

### 1) Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev je schopnost látek (krystalů) generovat elektrické napětí při jejich deformaci. Vyskytuje se jen u krystalů, které jsou středově nesymetrické. Krystal je tvořen z atomů a iontů uspořádaných v krystalické mřížce tak, že si kladné a záporné částice odpovídají. Krystal je tedy elektricky neutrální. Pokud působíme na krystal vnější silou a stlačujeme jej, tak se začne deformovat jeho krystalická mřížka a kladně a záporně nabitě částice se posunou tak, že se z krystalů stanou dipóly. Vlivem těchto dipólů se na povrchu krystalu začne tvořit elektrický náboj opačné polarity. Asi nejnámějším využitím tohoto jevu v praxi je zapalování v různých zapalovačích, stlačením určeného tlačítka dojde k přeskoku jiskry. [20, s. 30-34]



Materiály schopné piezoelektrického jevu tedy mohou být využitelné ke sběru mechanické energie a její přeměny na elektrickou energii za pomoci mechanicko-elektrického zařízení. [21, s. 3004] Organické materiály schopné piezoelektrického jevu, např. Polyvinylchlorid (PVC), Nylon 11, Polyvinylidenfluorid (PVDF) a PVDF-Gn, mají jedinečné vlastnosti jako flexibilitu a chemickou stabilitu. Jsou tak vhodnými kandidáty na jednoduchou výrobu vláken, které mohou tvořit základ těchto zařízení. [22, s. 4-21]

Polymery mají obecně nízkou dielektrickou konstantu a vyžadují silné elektrické pole k dosažení limitu piezoelektřiny. Roubované polymery nebo zvýšení podílu určité funkční skupiny polymeru na jejich povrchu může zlepšit dielektrickou konstantu struktury a zvýšit výkon těchto flexibilních zařízení. [23, s. 1-3] Je tedy potřeba najít materiály, které budou mít vysoký stupeň piezoelektrické aktivity, nízkou hodnotu Youngova modulu pružnosti (jednotky GPa), tedy pružné materiály, a také nízkou permitivitu, aby se dali použít přímo na těle člověka. Zde se jako zajímavá jeví feroelektrika. Feroelektrika jsou typicky buněčné polymerní pěny, které mají vnitřní strukturu složenou z náhodně uspořádaných buněčných mezer s pozitivními a negativními náboji uchycenými na opačné straně každé mezery. Jelikož mají nízkou hodnotu modulu pružnosti, tak se pod tlakem tyto materiály deformují, sníží se dipólový moment a elektrický náboj v dutinách je kompenzován náboji na vnějších plochách materiálu. Experimentálně při simulaci síly lidského kroku byl naměřen výkon až 2,73  $\mu\text{W}$  při zapojení s 65 M $\Omega$  zátěží. [24, s. 1-2]

Nositelné piezoelektrické generátory obecně dosahují řádově nižší výkony než generátory založené na bázi elektromagnetické indukce a také mají nižší životnost ovlivněnou opotřebením materiálu. Jejich velkou výhodou však je, že jsou malé a dají se dobře zakomponovat do bot nebo nositelného oblečení. Hodí se tak potenciálně k napájení sensorové elektroniky nebo obecně elektroniky, která funguje na nízký výkon. [16, s. 785-786]

## 2) Flexibilní piezoelektrické generátory

Přestože elektromagnetické a elektrostatické generátory mají velkou produkční kapacitu a dosahují vyšších výkonů, jejich miniaturizace je velice obtížná. Tím je jejich použití

omezené oproti piezoelektrickým měničům. Piezoelektrické materiály ve své podstatě efektivně mění mechanické namáhání na elektřinu. Velký potenciál této technologie je široce zkoumán hlavně v oblasti sběru vibrační energie. Le Scornec a kol. se ve své práci zaměřili právě na tuto technologii. Vyvinuli flexibilní konzolový mikrogenerátor, který je složený z tenkého aktivního PZT filmu uloženého na polymerním substrátu. Inovace tohoto výzkumu je především v procesu výroby, kde se podařilo přenést PZT na polymer v posledním kroku procesu a IDE elektrody na volnou hliníkovou stranu PZT. To umožňuje modifikovat rozměry nosiče (tedy rozměry polymerního plátu) tak, že se dosáhne příznivého vyladění jeho mechanické rezonanční frekvence za účelem optimalizace přeměny energie. Maximální dosažený výstupní výkon byl  $127 \mu\text{W}$  při sinusoidním zrychlení  $1 \text{ g}$  s frekvencí  $9,9 \text{ Hz}$  a upnutí hmoty na vzdálenost  $8 \text{ cm}$ . Pozice upnutí dovoluje operovat při různých frekvencích v rozsahu  $9,9\text{--}16 \text{ Hz}$ , což umožňuje upravit technologii pro zařízení na sběr energie při pohybu lidského těla, kde se pohybujeme ve frekvencích pod  $20 \text{ Hz}$ . Tato technologie tedy vykazuje velký potenciál pro případné nízkoenergetické zařízení poháněné vlastní silou člověka. [25, s. 1-2]

Další zajímavý výzkum s využitím piezoelektrického nanogenerátoru zpracoval Jeong a kol. Zkoumali krystalografické ovládání tenkých PZT filmů s vícefázovým složením přes substrativní modulace od molekulárních rozměrů až po praktické aplikace generátorů. Podařilo se jim sestavit vysokovýkonný flexibilní piezoelektrický generátor. Ten byl vyroben na plastovém podkladu za použití tenkého krystalograficky řízeného PZT filmu z MgO substrátu z ILLO (anorganicky laserem startovaným) přenosem. Toto zařízení s aktivní plochou  $1,82 \text{ cm}^2$  dosáhlo při frekvenci  $0,4 \text{ Hz}$  plošné hustoty výkonu  $47,5 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . [26, s. 437-452]

### 3) Triboelektrický jev

Triboelektrický jev bývá jako prastarý jev elektrostatické přilnavosti demonstrován třením jantaru o hedvábí nebo zvířecí kožešinu. Jantar poté přitahuje lehké objekty jako vlákna nebo papír. Jantar získává záporný náboj a hedvábí nebo kůže zase pozitivní. Dochází tak

k přenosu částic z povrchu jedné látky na druhou. Jedná se tedy o jev, při kterém určité materiály získávají elektrický náboj při kontaktu s jinou látkou. [27, s. 1454-1458]

Tento jev je lidstvu znám již od antického Řecka, avšak obvykle je brán jako negativní vedlejší efekt a při mnohých technologiích je věnována pozornost k jeho odstranění. Zásadní změna přichází s vynálezem triboelektrického nanogenerátoru (TENG), který využívá mechanickou energii a mění ji v elektrickou za pomoci spojení triboelektrifikace a elektrostatické indukce. Vnitřní okruh tohoto zařízení je tvořen dvěma tenkými filmy organické/anorganické struktury opačné tribopolarity, mezi kterými vzniká tření. Vzniklý náboj je odváděn elektrodami napojenými na zadní straně filmů, čímž se balancuje potenciál. [28, s. 9533-9557]

Jelikož nejvíce vhodné materiály pro TENG jsou organické, bývá také nazýván organický nanogenerátor. Od doby, co byl TENG v roce 2012 vynalezen, byl za krátkou dobu vylepšen tak, že dosahoval plošnou hustotu výkonu  $313 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , objemovou hustotu výkonu  $490 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$  a účinnost přenosu přibližně 60 %. TENG může být použitý na sběr jakékoli mechanické energie, která je dostupná, ale běžně ji mrháme při našem každodenním životě, jako je lidský pohyb, chůze, vibrace, otáčení kol, vítr a mnohé další. [28, s. 9533-9557]

#### 4) Nositelný triboelektrický nanogenerátor (TENG)

Jelikož generátory TENG jsou založené na triboelektrickém efektu mezi jakýmkoli dvěma materiály s různou elektronegativitou, technologie TENG nabízí široké spektrum materiálu na jeho výrobu. Co je ale nejdůležitější, TENG dokáže efektivně přeměnit nízkofrekvenční mechanickou energii i při zanedbatelných pohybech lidského těla na vysokonapěťový výstup. Mezi další výhody určitě patří velice jednoduchá konstrukce a nízká cena, která umožňuje i podomácky vyrobit zařízení, které u specifických aplikací bude plně funkční. [29, s. 1-2]

Song a kol. představili v roce 2020 nositelnou robustní a potenciálně masově výrobitelnou platformu, která nevyžaduje akumulátor a efektivně sbírá energii z lidského pohybu prostřednictvím flexibilních tištěných obvodových desek, tj. FTENG – Freestanding Triboelectric Nanogenerator (volně stojící triboelektrický nanogenerátor). Zařízení umístěné na boku hrudníku dosahuje maximálního výstupního výkonu 0,94 mW a jeho plošná hustota

výkonu je  $416 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , což je dostačující výkon na pohánění několika biosenzorů pocení a bezdrátové přenášení dat do uživatelského rozhraní. Triboelektrický pár tvoří PTFE (Polytetrafluorethylén) a měď (Cu) na dosažení vysokého elektrifikačního efektu. [30, s. 1-3]

## 5) Princip termoelektrického generátoru (TEG)

Většina termoelektrických generátorů se skládá ze tří klíčových částí, kterými jsou:

1. Tepelný výměník (HEX – Heat Exchanger), který absorbuje teplo a přenáší ho na termoelektrické články.
2. Termoelektrické články (TEM – Thermoelectric module), které generují elektřinu při rozdílných teplotách na jejich koncích. Obsahují několik termoelektrických párů, kde každý pár kombinuje dvojici P a N typů polovodičů.
3. Chladič, který zabezpečuje odvod zbytkového tepla z termoelektrických článků.

Teplotní rozdíl mezi dvěma konci generátoru určuje funkčnost TEG. Pokud vezmeme jako příklad kus kovu, kterého jedna strana je ohřívána a souběžně druhá strana ochlazována, elektrony obklopující atomy kovu na horké straně budou mít víc energie než elektrony na studené straně. Tím pádem se „teplé“ elektrony pohybují rychleji směrem ke studené straně než „studené“ elektrony směrem k teplé, až se studená strana termoelektrického generátoru nabije záporným nábojem a teplá strana kladným. [31, s. 1-4]

Nevýhodou je, že generované napětí je příliš malé a nemůžeme části propojit do sekvence jednoduše vodičem z kovů. Ty by produkovaly napětí v opačném směru. Nejefektivnější způsob řešení tohoto problému je použít materiály, které vedou proud pozitivně nabitými částicemi místo elektronů, a zároveň elektrony v těchto materiálech budou pomáhat procesu tím, že se budou pohybovat směrem od teplé k studené části. V případě, že využijeme tyto materiály, bude nám v okruhu vznikat proud. Materiály, které tohle umožňují jsou vždy polovodiče. Zároveň je potřeba najít materiály, které mají nízkou tepelnou vodivost a vysokou elektrickou vodivost, aby se nám teploty v člancích nevyrovnali a proud se nepřestal generovat. [31, s. 1-4]

## 6) Nositelné termoelektrické generátory (TEG)

Pomineme-li mechanický pohyb, lidské tělo v průměru průběžně vyzáří ve formě tepla energii až  $20 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tato energie ve formě tepla může být přeměněná na elektřinu právě pomocí TEG generátorů. [32, s. 4]

Sargolzaeiaval a kol. v roce 2019 publikovali práci, kde představili flexibilní nositelné termoelektrické generátory. Ty jsou složeny z pevných P a N-typů bismut chalkogenid termoelektrických článků zapojených do série s nízkým odporem a pružným propojením s tekutým kovem. V práci představili nový TEG vyrobený z pružného vysoce tepelně vodivého elastomeru skládajícího se z polydimethylsiloxanu (PDMS) s grafitovými nanodestičkami. Výsledná plošná hustota výkonu jejich TEG nošeného na zápěstí dosahovala až  $35 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  při pohybu větru  $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , což odpovídá běžné rychlosti chůze. [33, s. 1, 10-11]

## 7. Porovnání možností jednotlivých technologií

Každá technologie generace elektrické energie má svoje výhody i nevýhody. Na příkladech zde uvedených nositelných generátorů lze stručně popsat jednotlivé technologie a navzájem je porovnat. Mezi výhody elektromagnetického generátoru lze nesporně zařadit velký střídavý proud a vysokou účinnost při vysokých frekvencích. Ze všech generátorů dosahoval největšího výkonu právě tlakem poháněný elektromagnetický generátor umístěný v botě, a to 97 mW. Mezi zjevné nevýhody patří jejich velikost, složité zmenšování a nízký výstupní výkon měkkých magnetů. [29, s. 2]

Piezoelektrické generátory se oproti elektromagnetickým dají vyrobit velice kompaktní, mají vysokou citlivost a jsou kompatibilní s tradičními technologiemi mikrofabrikace. Nedosahují však potřebných výstupních výkonů, které se pohybují řádově níže než předchozí technologie (nejlepší zde uvedený  $127 \mu\text{W}$ ) a jsou u nich kladeny vysoké požadavky na materiálovou přípravu (orientace mřížky). [29, s. 2]

Mezi výhody triboelektrických generátorů lze zařadit velké střídavé napětí při nízkých frekvencích, velký výběr použitelných materiálů, jednoduchá struktura a nízká výrobní cena.

Nevýhody jsou pulzní výstup, vysoká impedance a rychlé opotřebení materiálů. I když poskytují relativně vysokou plošnou hustotu výkonu (příklad zařízení na boku hrudníku,  $416 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ), velikost využitelné plochy na těle člověka má svoje limity a nedá se nějak zásadně ovlivňovat. Reálné zařízení proto nedosahují až takových výkonů. [29, s. 2]

Termoelektrické generátory jako výhodu (při napájení LED) nabízejí jednosměrný proud a jednoduché zmenšování. Mezi jejich hlavní nevýhody patří vysoký výstupní odpor, špatné tepelné vlastnosti a také nízký výkon. Přestože plošná hustota výkonu není špatná ( $35 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  u uvedeného příkladu), využití větší plochy je složité. [29, s. 2]

Pokud tedy budeme chtít napájet čelovku stálým příkonem 1 W pocházejícím jenom z pohybu člověka, je již z textu jasné, že nám nebude osamoceně stačit žádný z uvedených generátorů. Budeme muset pro svícení využít bateriový akumulátor, který bude použitý na napájení čelové lampy při samotném svícení. Na dobíjení tohoto akumulátoru můžeme využít buď jednu vybranou technologii nebo kombinaci vícero technologií.

Jako zdroj napájení čelové lampy je potřeba vybrat nejvhodnější akumulátor, který bude mít dostatečnou energetickou hustotu, nízké procento samovybití a co nejvyšší počet životních cyklů. Proto využijeme lithium-iontový akumulátor, který nám z dostupných typů vychází jako nejvhodnější (viz tabulka č. 2). [34, s. 359-360]

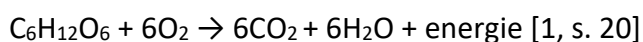
Tabulka č. 2 Porovnání jednotlivých typů baterií

Typ baterie	Energetická Hustota (Wh*dm <sup>-3</sup> )	Energetická hustota (Wh*kg <sup>-1</sup> )	Samovybíjení (%) za rok	Počet životních cyklů
Alkalické	300	125	4 %	1
Ni-Cd	100	30-35	15-20 %	300
Ni-MH	175	50	20 %	300
Li-ion	200	90	5-10 %	500

[34, s. 359-360]

## 8. Energie těla

Každý člověk potřebuje k životu energii, kterou přijímá hlavně ve formě potravy. Přijatou potravu následně tělo člověka zpracovává chemickými reakcemi na energii. Uvolňování energie metabolismem v těle člověka probíhá chemickým rozkladem organických látek. Jako příklad se dá uvést reakce glukózy a kyslíku:



Výkon průměrného člověka, tj. muž 30 let, 172 cm, 70 kg je při běžném fungování cca 150 W, přičemž na bazální metabolismus člověk spotřebuje cca 81–100 W. To znamená, že v průměru člověk spotřebuje na samotný pohyb 50–69 W. [1, s. 20] [35, s. 16]

Celkově tak člověk vytvoří za rok svého života energii o hodnotě 1314 KWh. Když vezmeme průměrnou hodnotu energie na pohyb, tj. 59,5 W, vychází nám, že jeden člověk za rok spotřebuje k běžnému pohybu energii 521,22 KWh. Část této energie bychom mohli být teoreticky schopni i mechanicky získat a využít.

Detailnější pohled na vytvořenou energii při běžných aktivitách člověka nabízí T. Starner. Ten ve svojí práci uvádí, že průměrný člověk o hmotnosti 68 kg vygeneruje při chůzi o frekvenci 2 kroků za sekundu výkon 67 W, při zvedání paží nad hlavu výkon až 60 W, tělesným teplem vyžáří 2,4–4,8 W, vydechováním 1 W, roztahováním hrudníku 0,83 W, tlakem krvi 0,93 W, a nakonec pohybem prstů 6,9–19 mW. To by tedy znamenalo, že u průměrného člověka bychom měli mít v průběhu dne k dispozici dostatečný výkon na pohánění většiny běžné nositelné elektroniky denního použití, tj. mobil, hodinky, sluchátka GPS a další. [36, s. 1-11]

## 9. Ekonomické zhodnocení

Na ekonomické hodnocení projektu a vytvoření ekonomické analýzy je potřeba konkrétních nebo aspoň odhadovaných hodnot vstupů (investic), délka zvažované investice, provozní náklady a další data, která vzhledem k povaze a zaměření práce nejsou k dispozici. Práce je zaměřená na možnosti využití energie lidského pohybu, a proto je ekonomické hodnocení zaměřené čistě jen na případný ekonomický potenciál zmiňovaných technologií v běžném životě člověka. [37, s. 94-115]

Energetická soběstačnost nositelné elektroniky jde ruku v ruce s trendem hledání alternativních zdrojů energie ve všech odvětvích našich životů. Tento trend je poháněn tlakem společnosti, která si uvědomuje, že je potřeba rozvíjet dlouhodobě udržitelné technologie nezatěžující životní prostředí. Nejvíce se projevuje v odvětvích, jako je samotná energetika, doprava a transport, stavebnictví či automobilový průmysl. Věda a výzkum se tak čím dál více soustředí na téma získávání zelené energie, ekologických způsobů dopravy, výstavbu energeticky nenáročných budov či zkoumá energetickou hustotu různých zdrojů energie, čímž tento sílící trend jen potvrzují. [38, s. 1003] [39, s. 1-2] [40, s. 1-2] [41, s. 1-3] [42, s. 328-330]

Není tedy potřeba víc popisovat, jak by právě nositelný generátor elektrické energie schopný napájet čelovou lampu nebo dobíjet mobilní telefon perfektně zapadl do tohoto celospolečenského trendu. Dalším a možná ještě důležitějším faktorem pro spotřebitele by



byla naprostá svoboda užívání a nabízená vysoká spolehlivost, která by nebyla limitována kapacitou akumulátoru. Jednoduše a zcela jasně se dá říct, že pokud by nějaká společnost přišla s výrobkem typu: „Nesmrtelná čelová lampa, kterou nabíjíte svojí aktivitou a vydrží svítit celou noc!“ nebo „Chytré GPS hodinky, s kterými nikdy neztratíte signál!“, poptávka by byla obrovská.

Použít lze modelovou situaci již několikrát zmiňované čelové lampy, která by dosahovala výkonu „jen“ 50 lm, kde napájení světelného zdroje by zabezpečoval akumulátor, který by byl postupně dobíjen právě energií člověka. Pokud by zpracování nabízelo pohodlné nošení, dá se předpokládat, že jenom v České republice by byla poptávka v řádech desítek až stotisíců kusů. A kdyby byla navíc cena zasazena jen kolem střední hladiny cen nabízených čelovek a pohybovala by se kolem 1500 Kč, očekávané roční tržby z prodeje by byly v desítkách milionů Kč. I po započtení výrobních nákladů, nákladů na vývoj, režii, marketing a dalších by se tato investice jevila jako rentabilní.

Dlouhodobá investice do nejistého projektu soběstačného zařízení napájeného jen energií člověka však může být během na velmi dlouhou trať. Je totiž nutné skloubit mnoho faktorů jako je přijatelná cena součástí výrobku, jeho finální vytvoření, pokud možno hromadná automatizovaná výroba, nabídnutí úplného komfortu užívání a další faktory, které jsou až příliš rizikové na neomezené dotování vývoje. Spíše se tedy uplatňují menší investice do vývoje nebo rozvoje více specifických aplikací mikroelektroniky nebo průmyslových technologií s jistějším cílem a zpeněžením.

## 10. Závěr

Cílem této práce byla rešerše technologií použitelných pro využití energie a pohybu lidského těla. V práci byla představena technologie LED a několik způsobů přeměny energie nositelnými generátory za účelem nalezení nejvhodnějšího způsobu napájení čelové lampy či jiné elektroniky jen za pomoci energie lidského těla. Pro lepší určení potřebného výkonu dodávaného generátorem byla vybrána běžně užívaná čelová lampa Petzl Pixa 1 s dosvitem 15 m, která dosahuje světelného toku 50 lm. [6] K této hodnotě světelného toku byla přiřazena odpovídající dioda s bílým světlem s příkonem 1 W. Tímto byla určena hodnota požadovaného výkonu nositelného generátoru. [7]

Z představených technologií se pro napájení čelové lampy hodí nejlépe elektromagnetická indukce. Ze všech nositelných generátorů vyšel nejlépe tlakový elektromagnetický generátor umístěný na patě v podrážce boty. Zařízení dosáhlo hodnot 97 mW okamžitého výkonu při chůzi 4 km/h, a to při přijatelném objemu 82,8 cm<sup>3</sup>. [16, s. 785] Představeno bylo i několik rotačních generátorů, z kterých největšího výkonu dosáhl generátor s výkonem 10,4 mW nositelný na noze nebo ruce. [19, s. 1-6]

Triboelektrický generátor nositelný na těle také nevykazoval špatných hodnot plošné hustoty výkonu, tj. 416 mW\*m<sup>-2</sup>, avšak vzhledem na jeho malou plochu byl reálný výkon jen 0,94 mW. [30, s. 1-3] Piezoelektrické i termoelektrické generátory se svými výkony pohybovali ještě o řadu níže v desítkách až stovkách μW.

Průměrný člověk při chůzi s frekvencí 2 kroky za sekundu generuje výkon zhruba 67 W, což by znamenalo, že chůze nabízí dostatečný výkon k napájení zmiňované čelové lampy. [36, s. 1-11] Ta potřebuje na svícení energii 1 W, tedy na hodinu svícení spotřebuje energii 1 Wh nebo 3600 J. Z popisovaných generátorů máme k dispozici maximální výkon o hodnotě jen 97 mW při rychlosti chůze 4 km/h. Z práce je tedy zřejmé, že žádný z popisovaných generátorů nedosahuje výkonu, který by umožňoval svícení zmiňované čelové lampy bez použití akumulátoru. Avšak za předpokladu použití kompaktní ale dostatečně výkonné baterie jako zdroje svícení a její nabíjení během chůze přes USB, by takto sestavené zařízení mělo fungovat. Tato problematika bude podrobněji zkoumána v navazující diplomové práci.

Problémem zůstává efektivní propojení generátoru na noze s čelovou lampou na hlavě tak, aby neomezovalo uživatele. Také velikost baterie a její umístění a upevnění musí být pečlivě zváženo. Přestože by zmiňované zařízení mělo za specifických podmínek fungovat, ke komerčnímu užívání takto sestrojeného zařízení zatím chybí kus cesty. Během posledních let však můžeme pozorovat velký progres ve výkonnosti a snižování energetické náročnosti jednotlivých technologií. Je tedy jen otázkou času, kdy budou tyto překážky odstraněny. Obecně mají technologie na sběr a přeměnu energie z lidského těla velký ekonomický potenciál a spolu s trendem zvyšování efektivity elektrických zařízení jistě dosáhnou v blízké budoucnosti na komerční užití při každodenních aktivitách.

## 11. Literatura

- [1] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Zdroje a využití energie*. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007, s. 10-20. ISBN 978-80-213-1647-8.
- [2] CASTILLO, S., F. ANSART, C. LABERTY-ROBERT a J. PORTAL. Advances in the recovering of spent lithium battery compounds. *Journal of Power Sources*. 2002, **2002**(112), 247-254.
- [3] PAULOVÍČ, Stanislav, Bohumír BRACHTÝR a Vladimír CVIKLOVIČ. *Základy Elektrotechniky*. 2013. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2013. ISBN 978-80-552-1041-4.
- [4] VALENTA, Jan. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: Modrá je dobrá. Díl 1. Stoletá cesta svítivých diod od kuriozity k Nobelově ceně* [online]. Praha: Academia, 1985, , 17 s. [cit. 2020]. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/144333>
- [5] ZHELUDEV, Nikolay. The life and times of the LED — a 100-year history. *Nature Photonics*. Nature Publishing Group, 2007, **2007**(1), 189-192.
- [6] Pixa 1. *Www.hudy.cz* [online]. Online: [hudy.cz](http://www.hudy.cz), 2020 [cit. 2020-09-17]. Dostupné z: <https://www.hudy.cz/pixa-1-e78ahb-2>
- [7] *LED STAR 1W teplá bílá 50lm/120° Batwing Hebei S12PW3C-B* [online]. Praha: Online, 2020 [cit. 2020-09-19]. Dostupné z: <https://www.svetsoucastek.cz/vykonova-led-dioda-1w-hebei-s12pw3c-b-p319/>
- [8] SLÁDKOVÁ, Jarmila a Naděžda UHDEOVÁ. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 2. opr. Brno: VUTIUM, 1999, s. 116-121. ISBN 80-214-1290-9.

- [9] Michael Faraday. In: *Techmania* [online]. Online: Techmania Science Center, o.p.s., 2020 [cit.2020-10-01].Dostupné z:  
<http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/vedec/1137/faraday>
- [10] Slideplayer. In: <https://slideplayer.cz/slide/2877952/> [online]. Online: 2020  
SlidePlayer.cz Inc., 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z:  
<https://slideplayer.cz/slide/2877952/>
- [11] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. Brno: VUTIUM, 2000, s. 799-802. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [12] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektrina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002, s. 289-344. ISBN 80-200-1004-1.
- [13] VON BUREN, T., P.D. MITCHESON, T.C. GREEN, E.M. YEATMAN, A.S. HOLMES a G. TROSTER. Optimization of inertial micropower Generators for human walking motion. *IEEE Sensors Journal*. 2006, **6**(1), 28-38. ISSN 1530-437X. doi:10.1109/JSEN.2005.853595
- [14] SAHA, C.R., T. O'DONNELL, N. WANG a P. MCCLOSKEY. Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008, **147**(1), 248-253. ISSN 09244247. doi:10.1016/j.sna.2008.03.008
- [15] HOUNG, Hesmondjeet Oon Chee, Siti SARAH, S. PARASURAMAN, M.K.A. Ahamed KHAN a I. ELAMVAZUTHI. Energy Harvesting from Human Locomotion: Gait Analysis, Design and State of Art. *Procedia Computer Science*. 2014, **42**, 327-335. ISSN 18770509. doi:10.1016/j.procs.2014.11.070

- [16] DENG, Fang, Yeyun CAI, Xinyu FAN, Peng GUI a Jie CHEN. Pressure-type generator for harvesting mechanical energy from human gait. *Energy*. 2019, **171**, 785-794. ISSN 03605442. doi:10.1016/j.energy.2019.01.039
- [17] LIN, Jiahong, Huicong LIU, Tao CHEN, Zhan YANG a Lining SUN. A rotational wearable energy harvester for human motion. *2017 IEEE 17th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*. IEEE, 2017, , 22-25. ISBN 978-1-5090-3028-6. doi:10.1109/NANO.2017.8117409
- [18] FAN, Kangqi, Hengheng QU, Yipeng WU, Tao WEN a Fei WANG. Design and development of a rotational energy harvester for ultralow frequency vibrations and irregular human motions. *Renewable Energy*. 2020, **156**, 1028-1039. ISSN 09601481. doi:10.1016/j.renene.2020.04.117
- [19] LIU, Huicong, Cheng HOU, Jiahong LIN, Yunfei LI, Qiongfeng SHI, Tao CHEN, Lining SUN a Chengkuo LEE. A non-resonant rotational electromagnetic energy harvester for low-frequency and irregular human motion. *Applied Physics Letters*. 2018, **113**(20), 1-6. ISSN 0003-6951. doi:10.1063/1.5053945
- [20] PETRŽÍLKA, Václav a Josef Bartoloměj SLAVÍK. *Piezoelktřina a její technické použití*. 1. Praha: ČSAV, 1960, s. 30-34. Cesta k vědě (Jednota českých matematiků a fyziků).
- [21] ZHANG, Yan, Ying LIU a Zhong LIN WANG. Fundamental Theory of Piezotronics. *Advanced Materials*. © 2011 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2011, **2011**(23), 3004.
- [22] KATSOURAS, Ilias, Kamal ASADI, Mengyuan LI et al. The negative piezoelectric effect of the ferroelectric polymer poly(vinylidene fluoride). *Nature Materials*. 2016, **15**(1), 78-

84. ISSN 1476-1122. doi:10.1038/nmat4423

- [23] PARK, Jonghwa, Marie KIM, Youngoh LEE, Heon Sang LEE a Hyunhyub KO. Fingertip skin–inspired microstructured ferroelectric skins discriminate static/dynamic pressure and temperature stimuli. *Science Advances*. 2015, **1**(9), 1-14. ISSN 2375-2548. doi:10.1126/sciadv.1500661
- [24] SHI, Junjie, Zhenhua LUO, Zhu DIBIN a Steve BEEBY. Optimization a structure of MEMS based PDMS ferroelectret for human body energy harvesting and sensing. *Smart Materials and Structures*. Department of Electronics and Computer Science, University of Southampton, UK: University of Southampton, 2019, **28**(7), 1-12. ISSN 0964-1726. doi:10.1088/1361-665X/ab1ce2
- [25] LE SCORNEC, Julien, Benoit GUIFFARD, Raynald SEVENO a Vincent LE CAM. Frequency tunable, flexible and low cost piezoelectric micro-generator for energy harvesting. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020, **312**(1), 1-11. ISSN 09244247. doi:10.1016/j.sna.2020.112148
- [26] JEONG, Chang Kyu, Sung Beom CHO, Jae Hyun HAN et al. Flexible highly-effective energy harvester via crystallographic and computational control of nanointerfacial morphotropic piezoelectric thin film. *Nano Research*. 2017, **10**(2), 437-455. ISSN 1998-0124. doi:10.1007/s12274-016-1304-6
- [27] FREEMAN, G.R. a N.H. MARCH. Triboelectricity and some associated phenomena. *Materials Science and Technology*. 2013, **15**(12), 1454-1458. ISSN 0267-0836. doi:10.1179/026708399101505464
- [28] WANG, Zhong Lin. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors. *ACS Nano*. 2013,

7(11), 9533-9557. ISSN 1936-0851. doi:10.1021/nn404614z

- [29] WANG, Haobin, Mengdi HAN, Yu SONG a Haixia ZHANG. Design, manufacturing and applications of wearable triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*. 2021, **81**(1-18). ISSN 22112855. doi:10.1016/j.nanoen.2020.105627
- [30] SONG, Yu, Jihong MIN, You YU, Haobin WANG, Yiran YANG, Haixia ZHANG a Wei GAO. Wireless battery-free wearable sweat sensor powered by human motion. *Science Advances*. <http://advances.sciencemag.org>, 2020, **2020**(6), 1-10.
- [31] JOUHARA, Hussam, Alina ŻABNIEŃSKA-GÓRA, Navid KHORDEHGAH et al. Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*. 2021, **9**, 1-18. ISSN 26662027. doi:10.1016/j.ijft.2021.100063
- [32] HUANG, Liang, Shizhe LIN, Zisheng XU, He ZHOU, Jiangjiang DUAN, Bin HU a Jun ZHOU. Fiber-Based Energy Conversion Devices for Human-Body Energy Harvesting. *Advanced Materials*. 2019, **32**(5), 1-20. ISSN 0935-9648. doi:10.1002/adma.201902034
- [33] SARGOLZAEIAVAL, Yasaman, Viswanath PADMANABHAN RAMESH, Taylor V. NEUMANN, Veena MISRA, Daryoosh VASHAEE, Michael D. DICKEY a Mehmet C. ÖZTÜRK. Flexible thermoelectric generators for body heat harvesting – Enhanced device performance using high thermal conductivity elastomer encapsulation on liquid metal interconnects. *Applied Energy*. 2020, **262**, 1-13. ISSN 03062619. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114370
- [34] MATEU, Loreto, Francesc MOLL, Jose F. LOPEZ, Francisco V. FERNANDEZ, Jose Maria LOPEZ-VILLEGAS a Jose M. DE LA ROSA. *Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics*. 2005, , 359-373. doi:10.1117/12.613046
- [35] HERMAN, Irving P. *Physics of the Human Body*. 3rd corrected printing. New York:



Springer, 2007. Biological and medical physics, biomedical engineering. ISBN 978-3-540-29603-4.

[36] STARNER, T. Human-powered wearable computing. *IBM Systems Journal*. 1996, **35**(34), 618-629. ISSN 0018-8670. doi:10.1147/sj.353.0618

[37] ROŠOCHATECKÁ, Eva. *Ekonomika podniků*. První. Praha: Česká Zemědělská univerzita v Praze, Provozně Ekonomická fakulta, 2014, s. 94-115.

[38] REN, Jingzheng a Marie LÜTZEN. Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, **74**, 1003-1019. ISSN 13640321. doi:10.1016/j.rser.2017.03.057

[39] ABOAGYE, Bernard, Samuel GYAMFI, Eric Antwi OFOSU a Sinisa DJORDJEVIC. Status of renewable energy resources for electricity supply in Ghana. *Scientific African*. 2021, **11**, 1-28. ISSN 24682276. doi:10.1016/j.sciaf.2020.e00660

[40] GUI, Xuechen a Zhonghua GOU. Understanding green building energy performance in the context of commercial estates: A multi-year and cross-region analysis using the Australian commercial building disclosure database. *Energy*. 2021, **222**, 1-10. ISSN 03605442. doi:10.1016/j.energy.2021.119988

[41] YU, Xiao, Navjot S. SANDHU, Zhenyi YANG a Ming ZHENG. Suitability of energy sources for automotive application – A review. *Applied Energy*. 2020, **271**, 1-16. ISSN 03062619. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115169

[42] CHAKRABORTY, Saptorshee Kanto a Massimiliano MAZZANTI. Energy intensity and green energy innovation: Checking heterogeneous country effects in the OECD.

*Structural Change and Economic Dynamics*. 2020, **52**, 328-343. ISSN 0954349X.  
doi:10.1016/j.strueco.2019.12.002