



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Současný stav ve vývoji mikrogenerátorů elektrické energie typu Energy harvesting

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

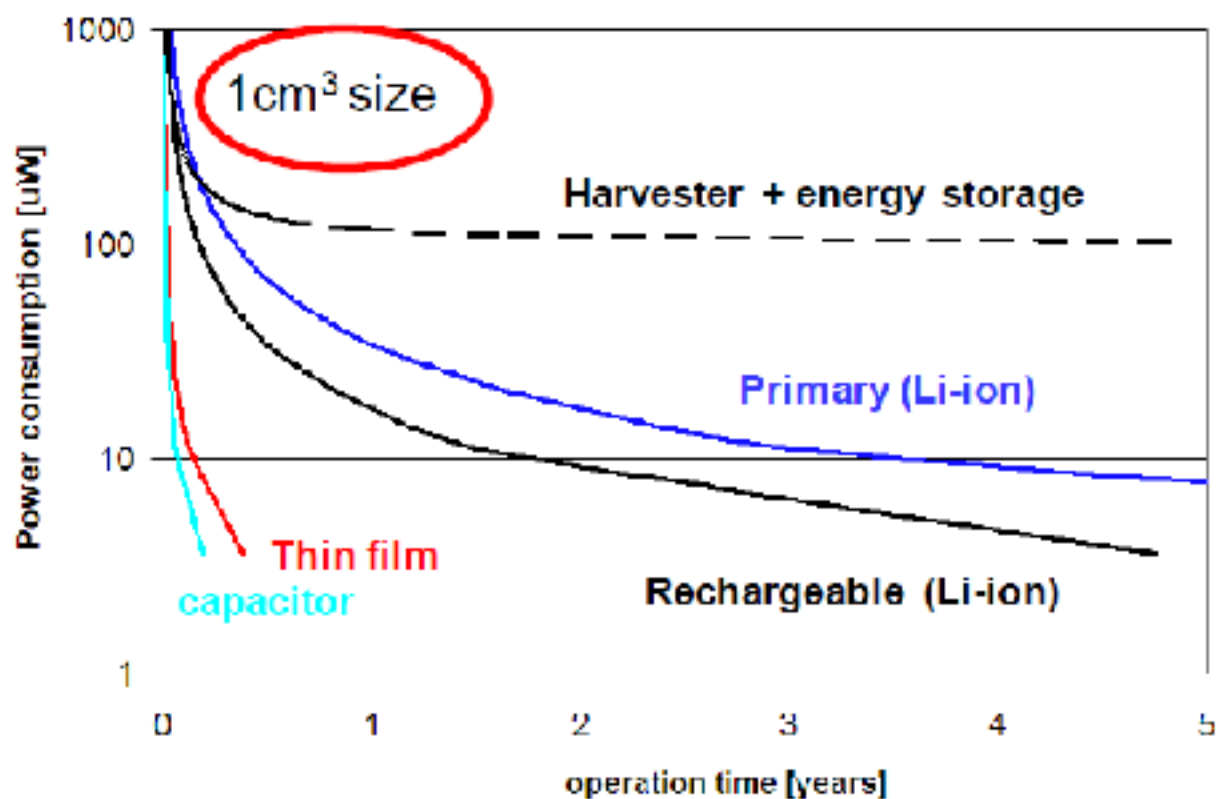
FEL ČVUT v Praze

husak@fel.cvut.cz

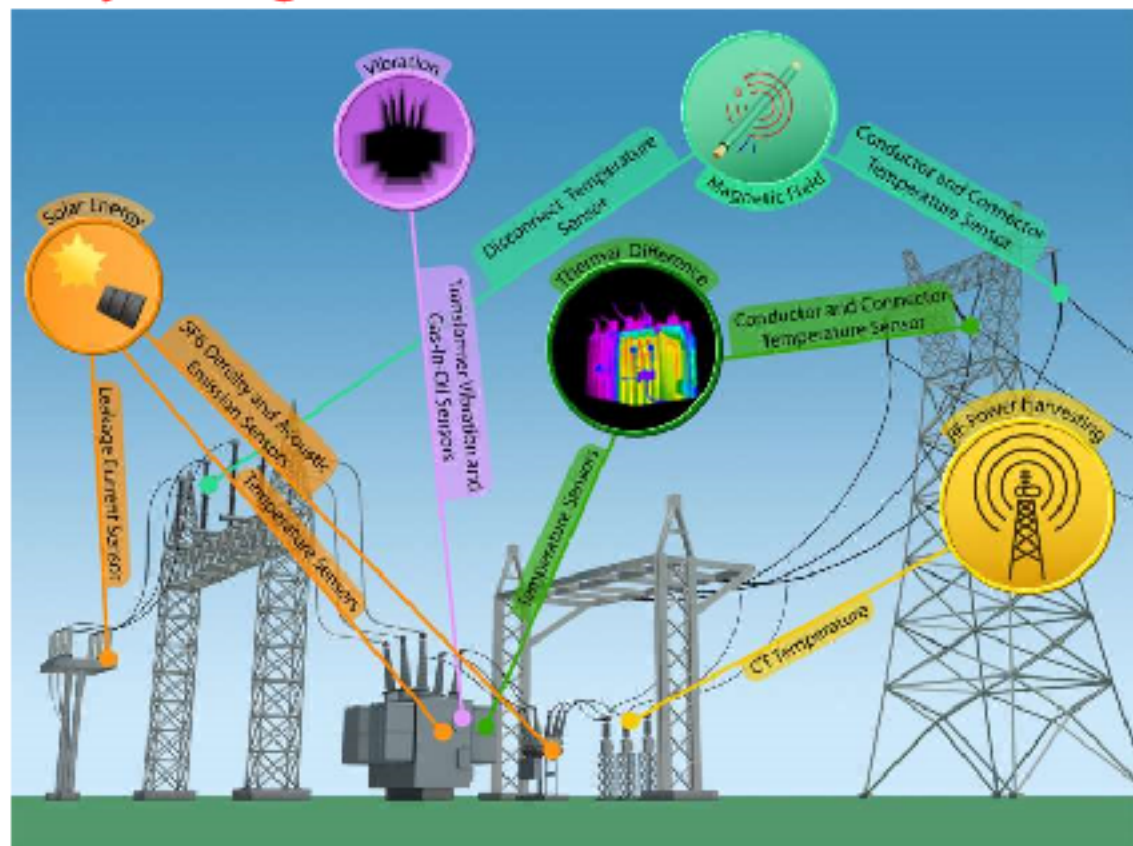
tel.: 2 2435 2267

<http://micro.feld.cvut.cz>

Charakteristiky mikro-napájecích zdrojů



Zdroje energie



Energie

Wristwatches, novelties, garden lights, piezo gas lighters, bicycle dynamo lights. Portable radio, flashlights, medical (crank dynamo). Small wind turbines and photovoltaics for boats and road furniture. Satellites

Electric train braking

Electric on- and off-road vehicle regenerative braking. Material handling: crane swing/lifting etc energy recovery. Photovoltaics for electric vehicle charging stations

Wireless building controls and actuators

Regenerative soaring and landing of electric aircraft and from tide of moored boats and from boats under sail

Structural electronics: aircraft, roads, road vehicles, floors, buildings, bridges

For Wireless Sensor Networks

For automotive sensors and lighting

EH shock absorbers for vehicles

For wearable technology

Elevator energy recovery

For mobile phones, laptops, tablets, apparel

Thermoelectric battery charging for hybrid electric vehicles

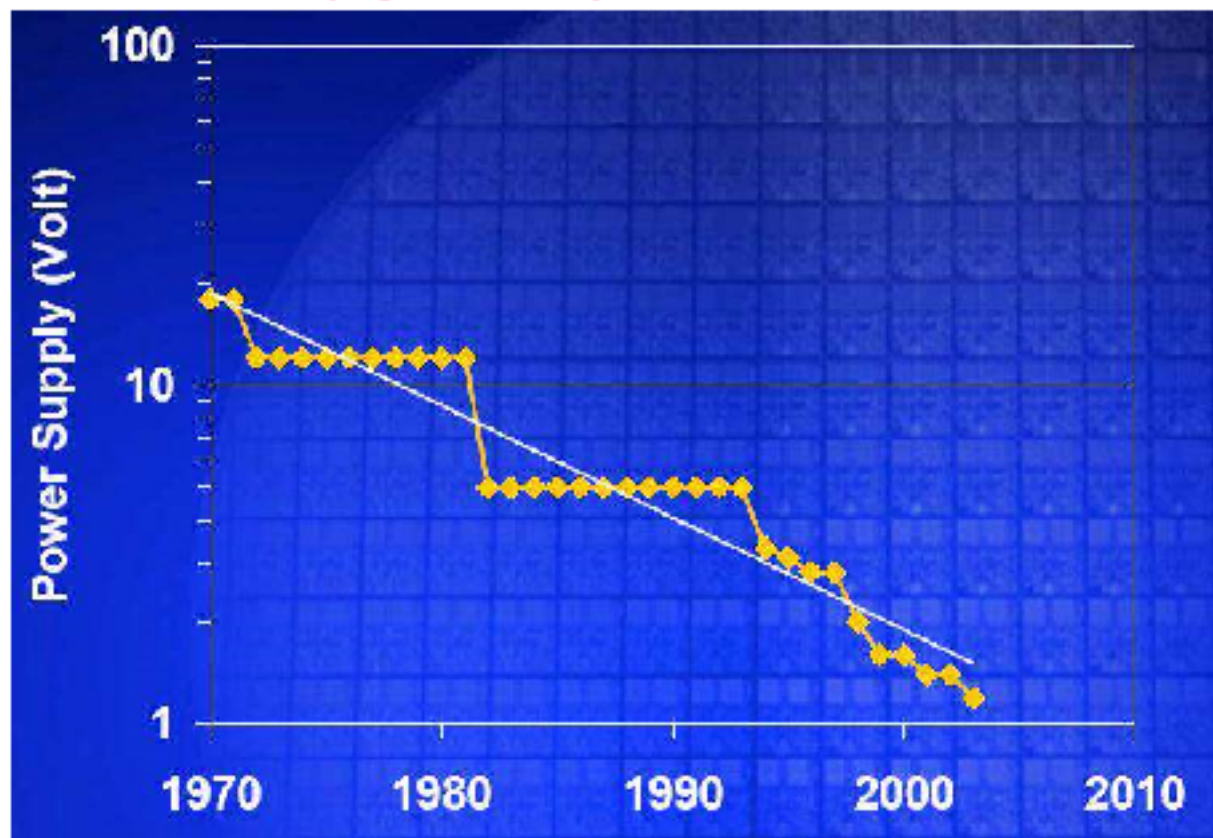
Mainly electro-dynamic and/ or photo-voltaic

Piezo-electric and thermo-electric often

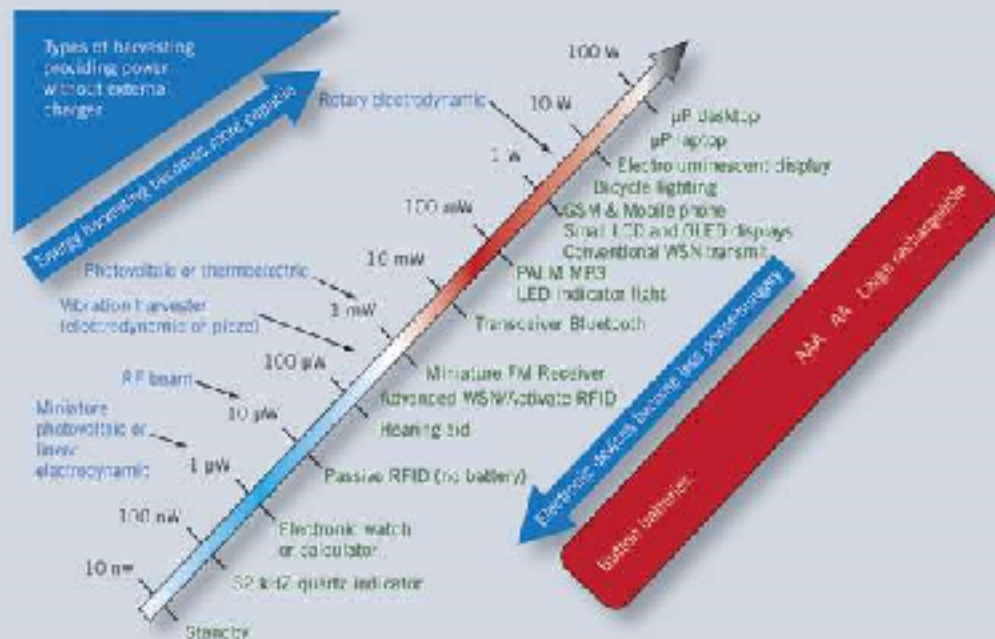
Energy Harvesting: Off-grid Renewable Power for Devices, Vehicles, Structures 2015-2025

<http://www.idtechex.com/research/articles/energy-harvesting-steady-growth-sensible-increase-in-opportunities-00009170.asp>

Snižování napájecího napětí



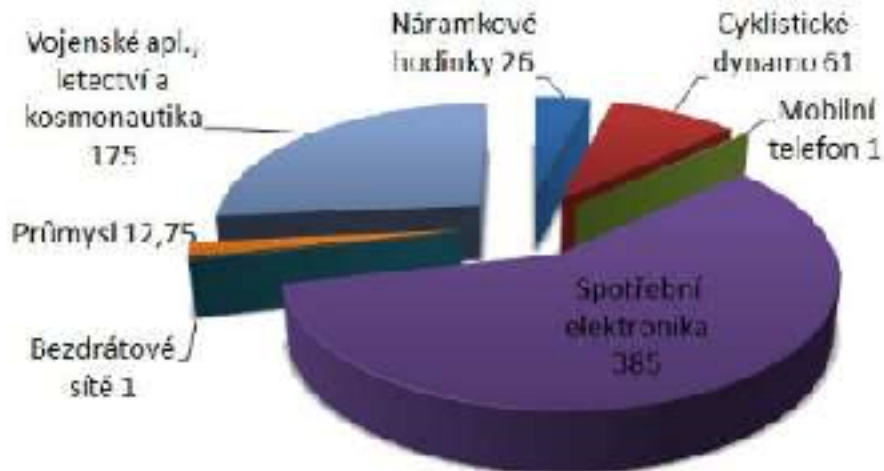
Porovnání požadavků na energii a možností EH



http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/alternative_power_sources/energy_harvesting/energy-harvesting-fig2.jpg

Použití

- prodloužení životnosti baterií
- systém v nepřístupných prostorech
- napájení senzorů uvnitř strojů



Human-powered energy generator

Low-power wellness sensors

Low-power electronics and antennae

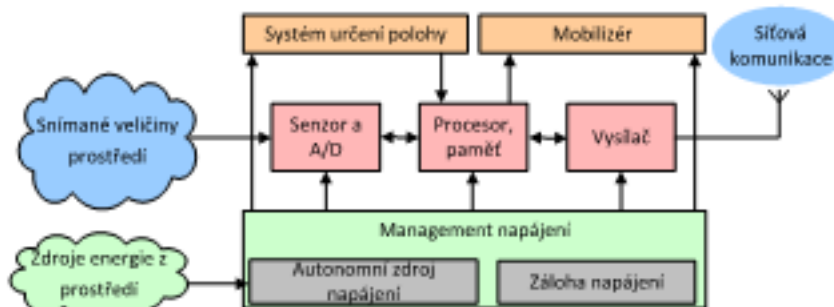
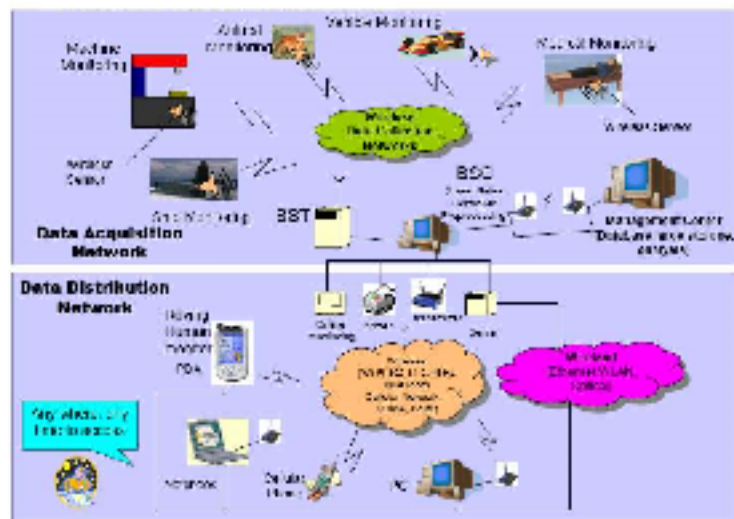


<http://iss.mech.utah.edu/files/2015/05/TCCartoonImage.png>

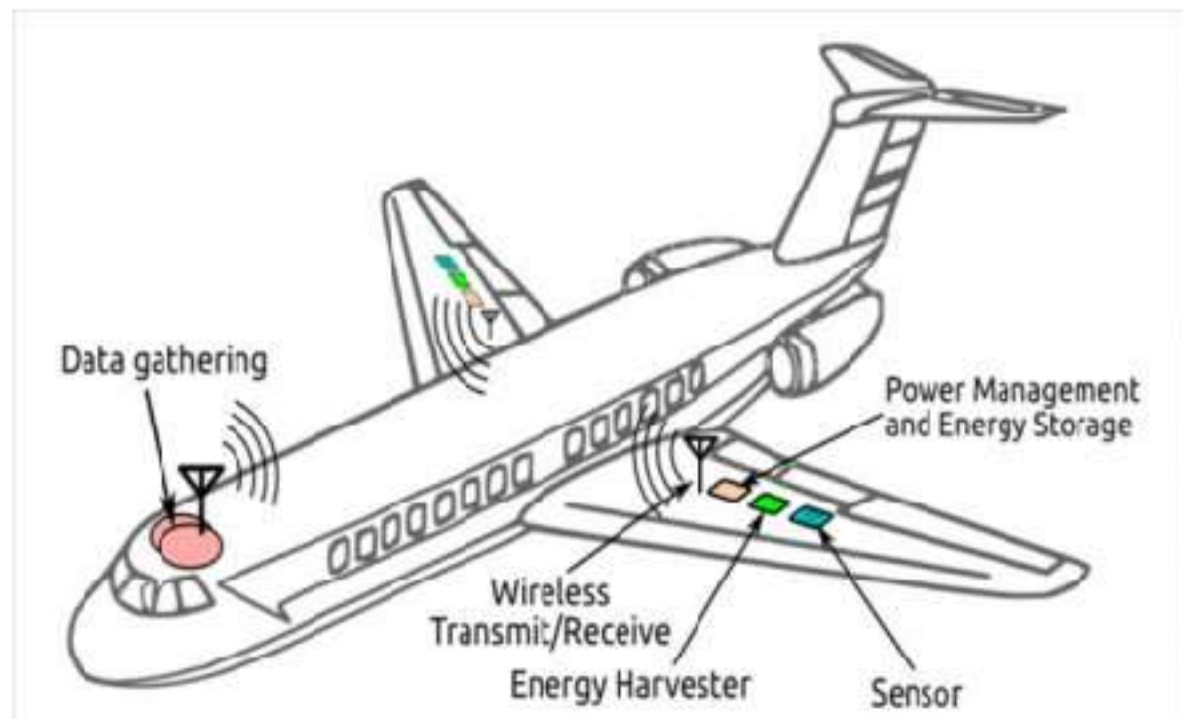
<http://www.ilovethisdance.com/wp-content/uploads/2013/06/springblade.jpg>



Bezdrátové senzorové sítě



Vzdušný prostor



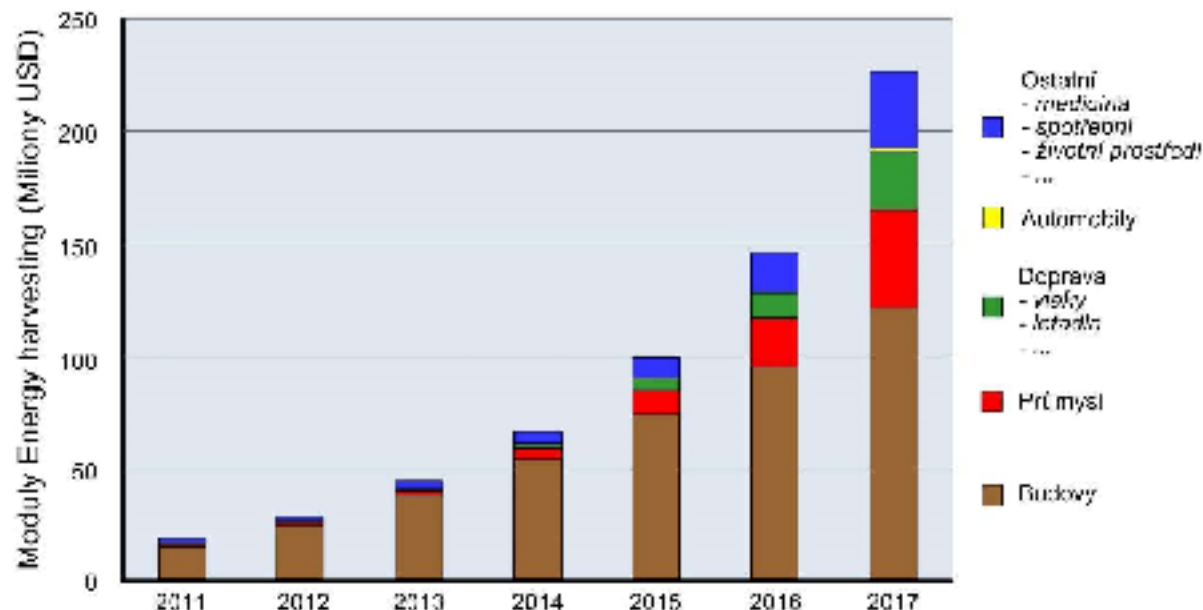
Jak mnoho energie lze získat z okolí?

Energy Source	Harvested Power
Vibration/Motion	
Human	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industry	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Temperature Difference	
Human	25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industry	1–10 mW/cm^2
Light	
Indoor	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Outdoor	10 mW/cm^2
RF	
GSM	0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
WiFi	0.001 mW/cm^2

Uplatnění systémů Energy harvesting na trhu

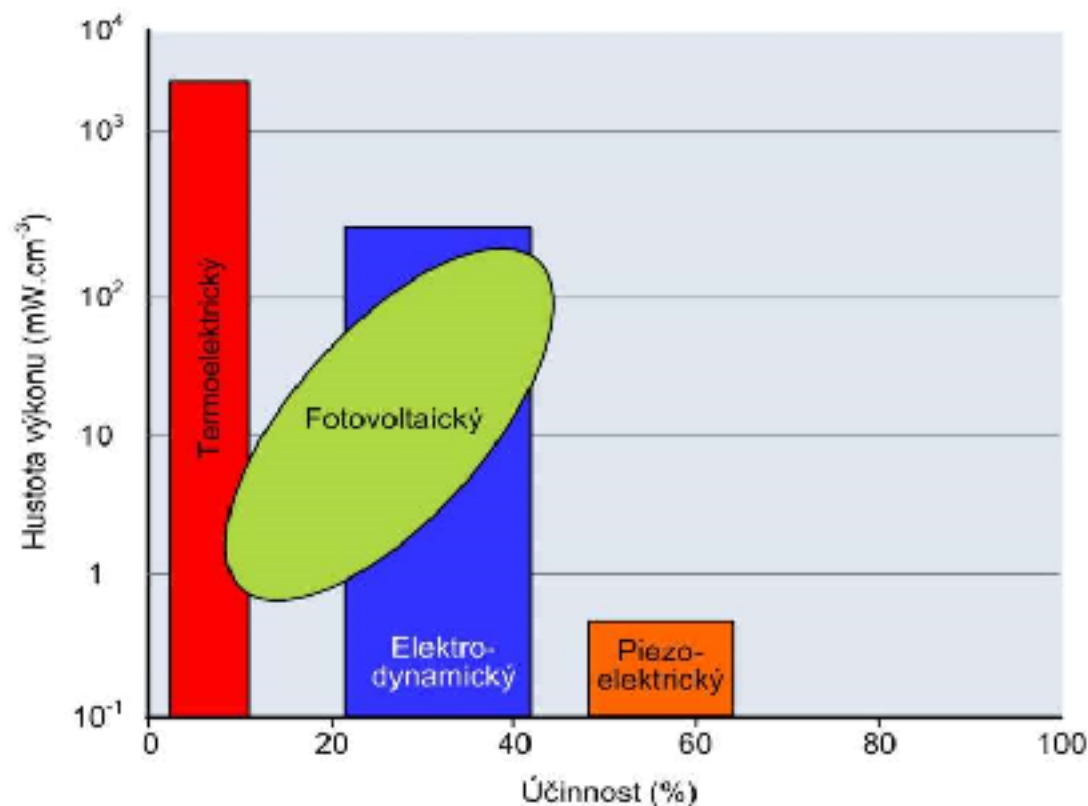
MEMS a Senzory

Moduly Energy harvesting - předpověď vývoje trhu podle aplikací



Říjen 2012

Porovnání různých Energy harvesting principů



Kdy bude možno elektroniku běžně napájet z EH???

Co očekávat od zmenšování rozměrů – nanotechnologií?



George Bourianoff, 2004, Silicon nanoelectronics and nanotech innovation

Energy harvesting mezi klíčovými technologiemi vytipovanými do roku 2020

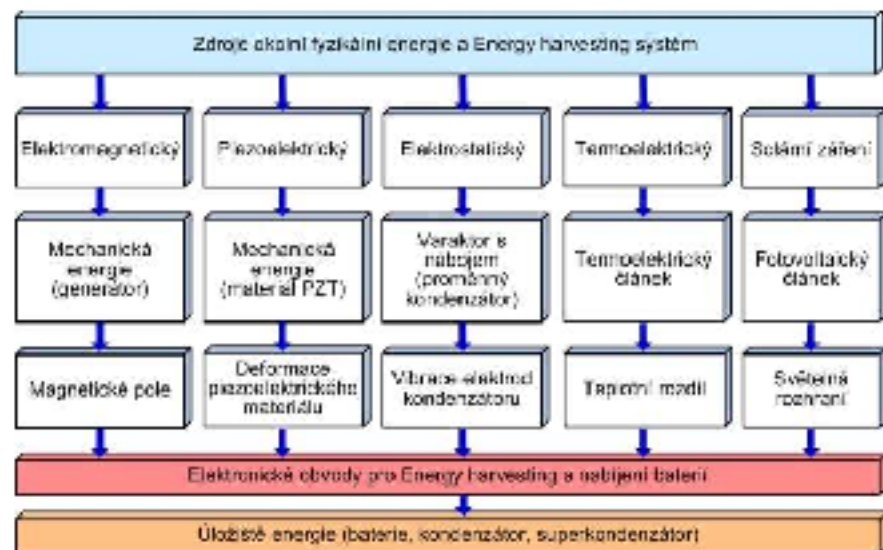


Fyzikální principy pro přeměnu energie

- fotovoltaický jev
- elektromagnetická indukce
- termoelektrický jev
- piezoelektrický jev
- elektrostatika
- magnetostrikce
- triboelektrina
- ...

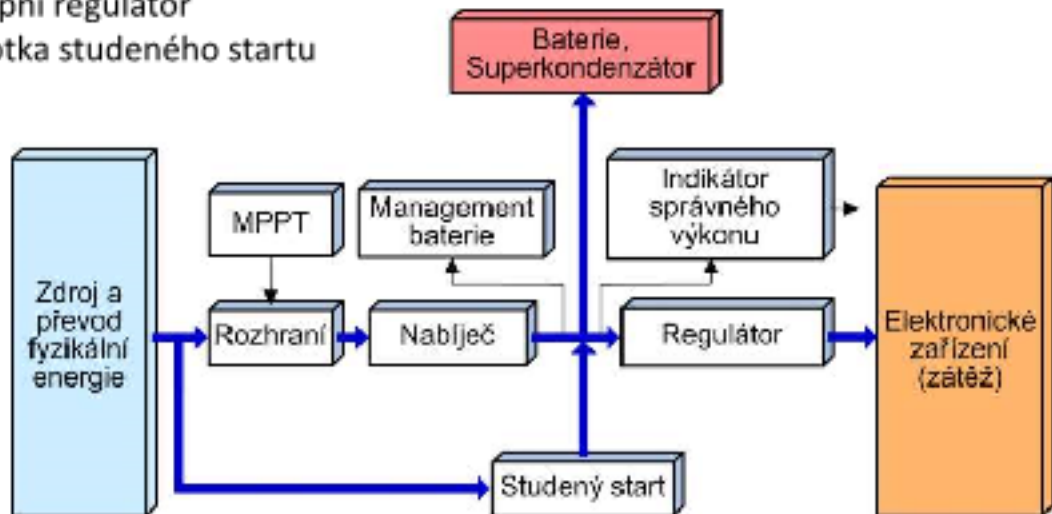
Hierarchy zpracování signálu

- 1.úroveň - primární fyzikální zdroje energie
- 2.úroveň - aktuální implementace a nástroje používané k převodu
- 3.úroveň - principy používané k přeměně energie z primárního zdroje
- 4.úroveň - elektronické principy a obvody pro řešení uchování energie a nabíjení baterií
- 5.úroveň - elektronické prostředky pro uchování



Architektura systému Energy harvesting

- Zdroj fyzikální energie (okolní prostředí)
- Úložiště energie (superkondenzátor nebo baterie)
- Zátěž
- Obvody managementu napájení (PMIC-power management Integrated circuit)
 - DC/DC měniče s optimalizovaným rozhraním k vnějšímu zdroji okolní energie,
 - obvodu managementu baterie
 - výstupní regulátor
 - jednotka studeného startu



Elektromagnetický princip

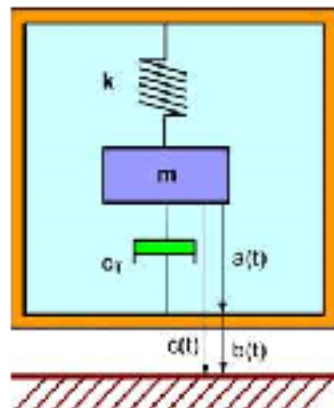
Elektromagnetický generátor

- elektromagnetická indukce
- účinný ve velkých rozměrech
- obtížně integrovatelný do MEMS

Elektromagnetický generátor

- Elektromagnetický princip náleží k neefektivnějším principům získávání elektrické energie elektromagnetickou indukcí
- permanentní magnety, cívky a rezonanční nosník
- na nosníku umístěny magnety nebo cívky
- magnety na nosníku mohou zároveň sloužit jako seismická hmota
 - m je seismická hmota,
 - k je pružinová konstanta závěsné pružiny seismické hmoty
 - c tlumicí systém elektromagnetického převodního mechanismu, tj. uspořádání magnetu a indukční cívky.

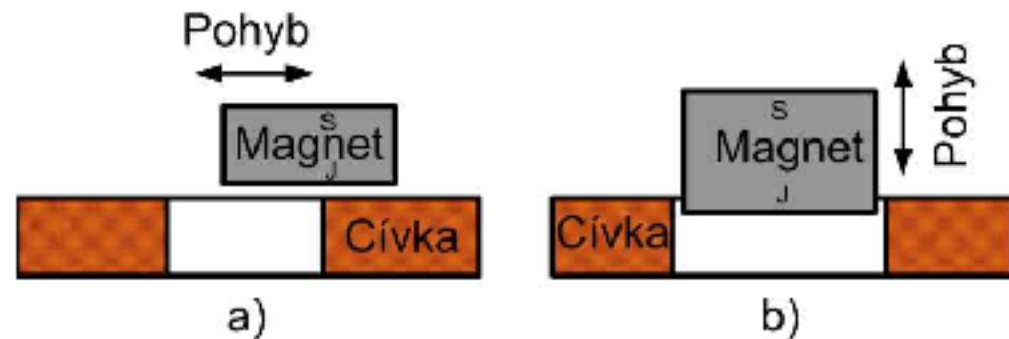
Základní princip činnosti je založen na Faradayově zákonu elektromagnetické indukce z roku 1831 reprezentovaný rovnicí



Elektromagnetický generátor

Dva typy relativního pohybu magnetu a cívky:

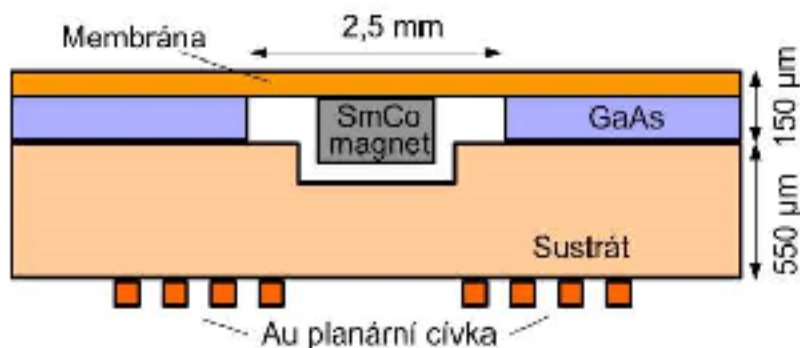
- a) planární (horizontální),
- b) prostorový (vertikální)



Cívky vinuté i realizované mikroobráběním

Elektromagnetický generátor

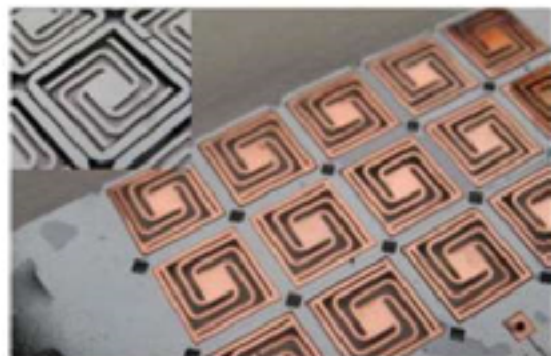
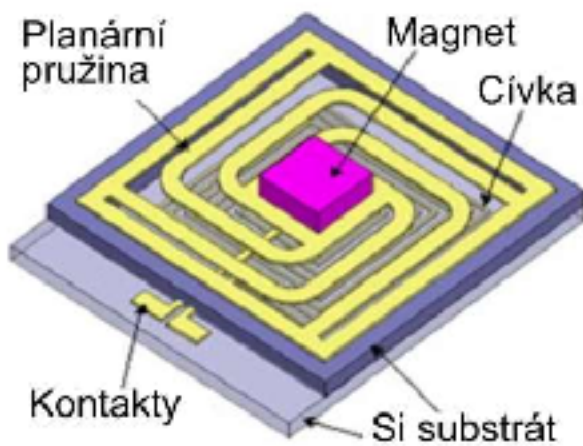
Příklad:



- Generátor - horní část GaAs s pružinou a seismickou hmotou, dolní část s integrovanou planární cívkou.
- Seismická hmota je tvořena vertikálně polarizovaným SmCo magnetem 1 mm x 1 mm x 0,3 mm o hmotnosti $2,4 \cdot 10^{-3}$ Kg, který je připevněn k 7 μm silné polyamidové kruhové membráně, která vytváří pružinový element.
- Planární cívka na spodní straně - 2,5 μm silná Au vrstva, 13 závitů.
- Rozměry generátoru - 5 mm x 5 mm x 1 mm.
- Typické parametry - 1 μW pro budicí frekvenci 70 Hz a 100 μW pro 330 Hz.

Elektromagnetický generátor

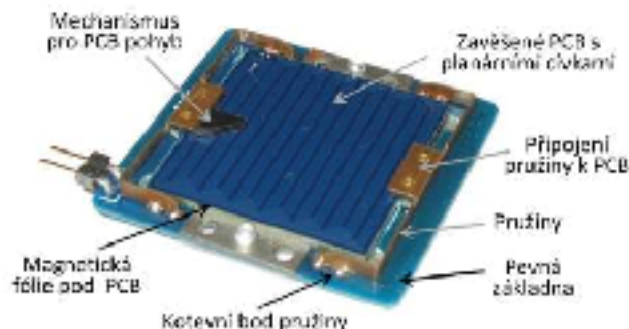
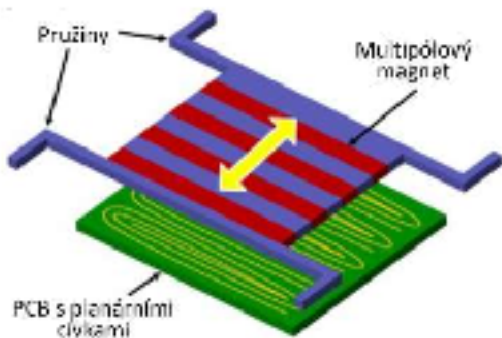
Planární (deskové) implementace



Na čipu lze vytvořit i pružiny držící seismickou hmotu a v současnosti i mikromagnet.

Elektromagnetický generátor (ELMG)

Příklad: Planární elektromagnetický generátor s multipólovou magnetickou destičkou



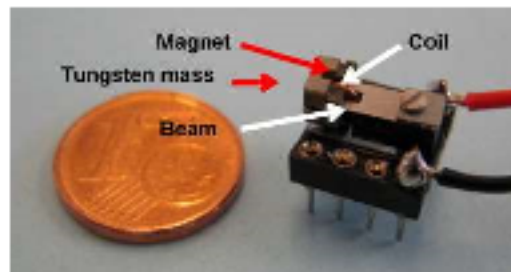
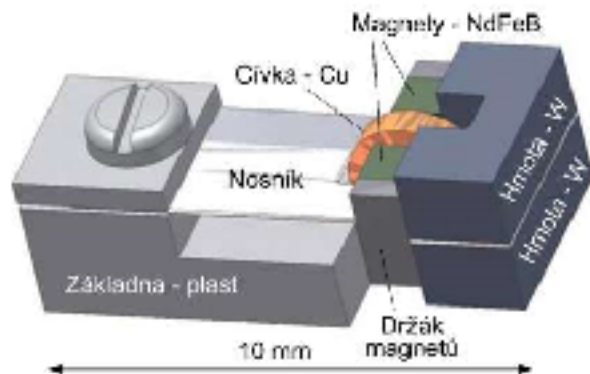
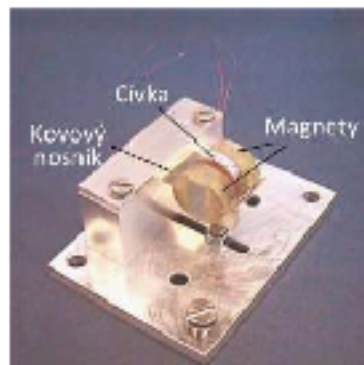
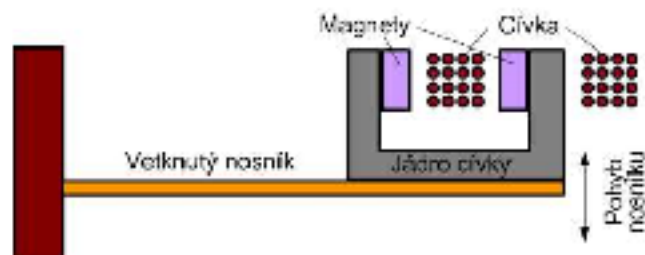
Generátor 37 × 37 × 3 mm, magnet 28 × 30 × 1 mm

ELMG se skládá z PCB s planárními cívkami, multipólového magnetu a pružiny. Seismická hmota může být vychylována vibracemi, inerciálním pohybem nebo přímým působením síly. Multipólový magnet je zavěšen nad DPS s planárními cívkami.

PCB má 6 Cu vrstev o tloušťce 0,9 mm. V každé vrstvě PCB je 5 cívek zapojených do 7 smyček, tj. celkový počet cívkových smyček je $5 \times 7 \times 6 = 210$. Cu vodiče 0,6 mm x 0,072 mm, optimalizace pro zátěž 20 Ω . PCB je zavěšena nad multipólovým magnetem dvěma BeCu pružinami. Mezera magnet - PCB je 0,1 mm, $f_{\text{rezonanční}} = 260$ Hz.

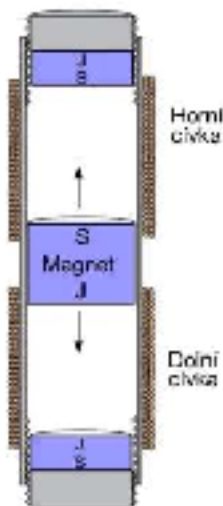
Elektromagnetický generátor

Prostorová implementace



Elektromagnetický vibrační generátor s výkonem $45 \mu\text{W}$

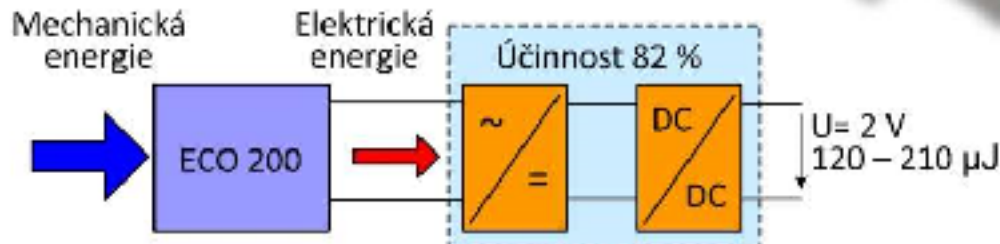
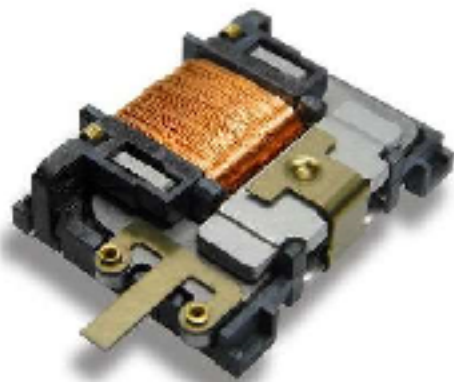
Elektromagnetický generátor



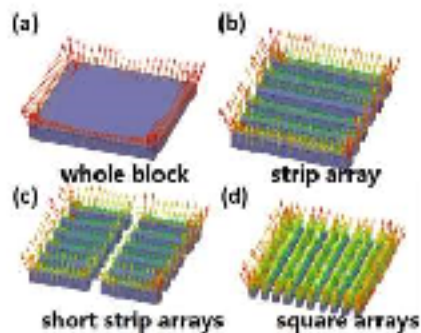
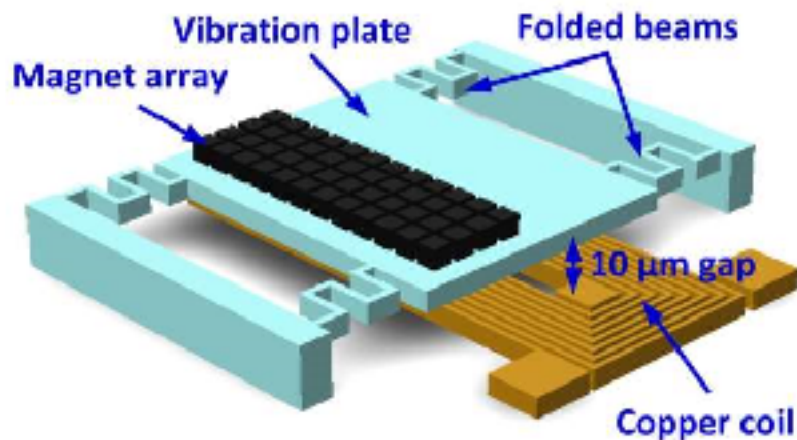
- ELMG pro činnost využívající cyklické pohyby továrních strojů pro generování energie napájející bezdrátové senzorové sítě, které mají monitorovat činnost těchto strojů a předávat informace o případných poruchách.
- Pracovní frekvence - Systém pracuje s vibrační frekvencí 155 Hz.
- Výkon - harvester generuje **výkon 200 μW**
- Ukládání energie - zpracování pomocí integrovaného obvodu a ukládání do **superkondenzátoru** s napětím 1,85 V.
- Životnost - předpokládaná životnost se odhaduje na **10 až 20 let** bez jakékoliv údržby

Elektromagnetický generátor

- ECO 200 firmy EnOcean - komerčně vyráběný ELMG
- Uplatňuje se především ve spojení s bezdrátovým vysílačem v miniaturizovaných přepínačích a senzorech v inteligentních budovách a průmyslové automatizaci.
- rozměry jsou **29,3 mm x 19,5 mm x 7 mm**,
- působící síla 2,7 - 3,9 N / při výchylce 1,2 mm
- výstupní **energie 120 - 210 μ J při 2 V**.

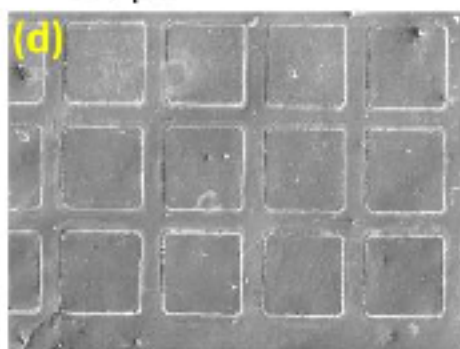
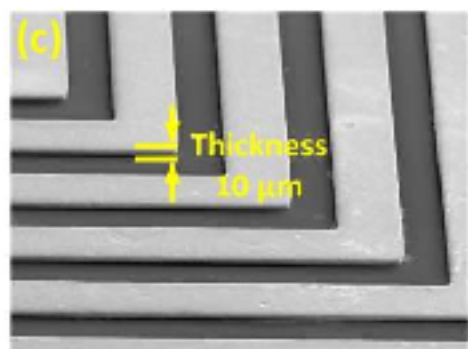
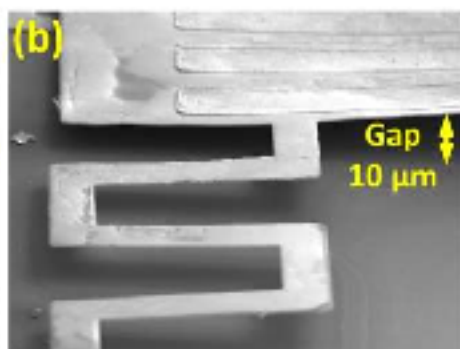
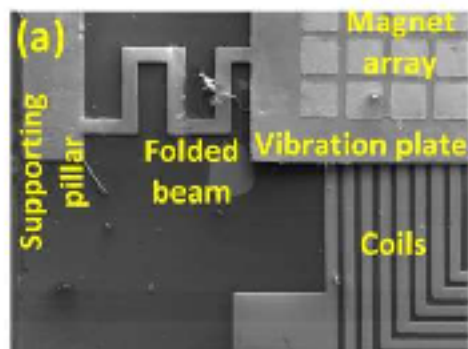


MEMS VERZE s podélným pohybem



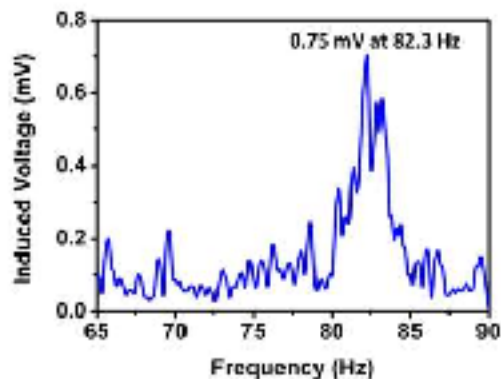
Mengdi, H., Zhongfang, L., Xuming, S., Habiba, Z.: An in-plane electromagnetic energy harvester with integrated magnet, array, *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2013

MEMS VERZE



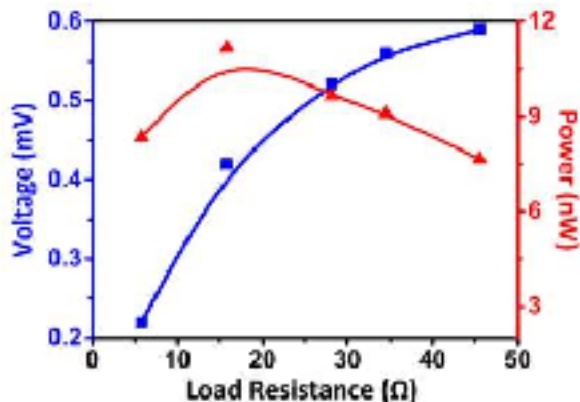
Mengdi, H., Zhongliang, L., Xuming, S., Hailin, Z.: An in-plane electromagnetic energy harvester with integrated magnet array, *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2013

MEMS VERZE



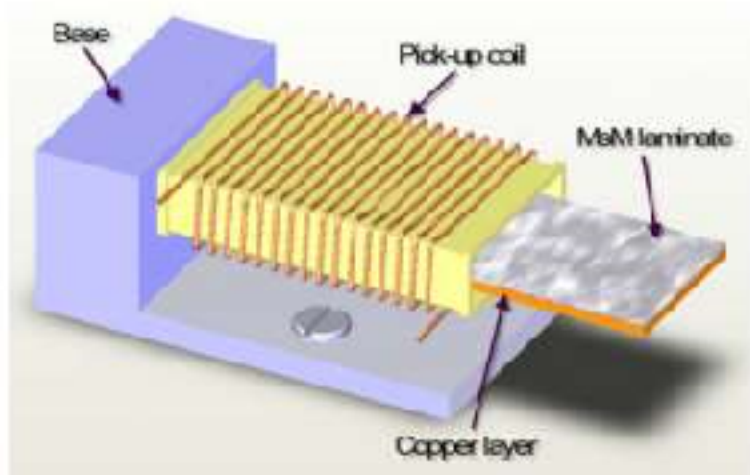
Parametry max:

- 0,75 mV / při 82,3 Hz
- 11,2 nW/ při zátěži 15,8 Ω
- 2,24 $\mu\text{W}/1 \text{ cm}^3$ výkonová hustota



Mengli, H., Zhongliang, L., Xuning, S., Hailin, Z.: An in-plane electromagnetic energy harvester with integrated magnet array, Sensors & Actuators: A, Physical, 2013

MAGNETOSTRIKČNÍ GENERÁTOR



Lei Wang and F G Yuan - Vibration energy harvesting by magnetostrictive material

Piezelektrický princip

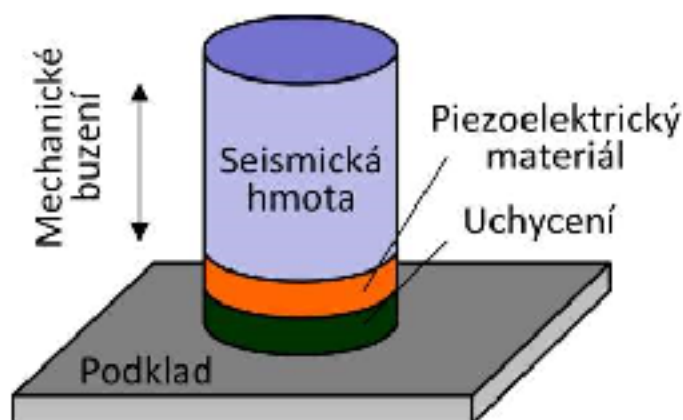
Piezelektrický generátor (Piezo-G)

- piezelektrický jev
- vhodný pro MEMS integraci

Piezelektrický generátor (Piezo-G)

d) Piezelektrické generátory s tlakovou strukturou

- přímé stlačování piezelektrického materiálu
- Vlivem setrvačnosti seismické hmoty dochází při působení vibrací k střídavému mechanickému stlačování a natahování aktivní vrstvy a tím ke generování elektrického náboje
- Zvýšení výstupního výkonu se docílí stohováním jednotlivých aktivních vrstev
- **Nevýhoda** - vyšší rezonanční frekvence než u nosníkových struktur. Snížení rezonanční frekvence lze docílit mnohem větší seismickou hmotou v porovnání s nosníkovou strukturou.

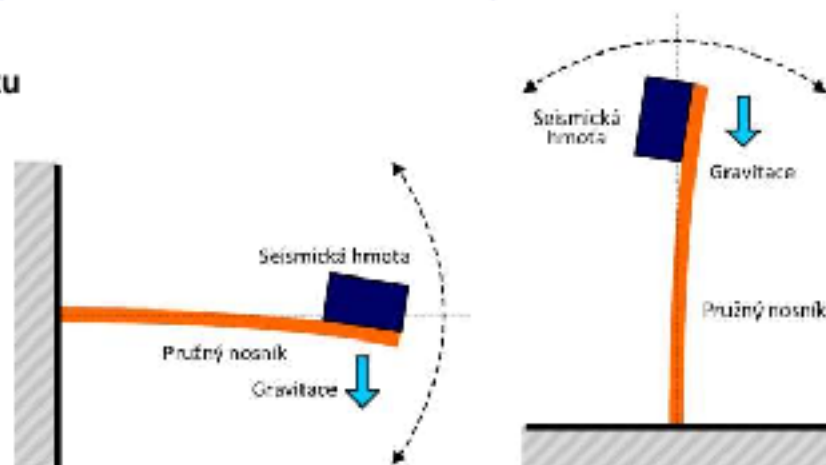


Piezelektrický generátor (Piezo-G)

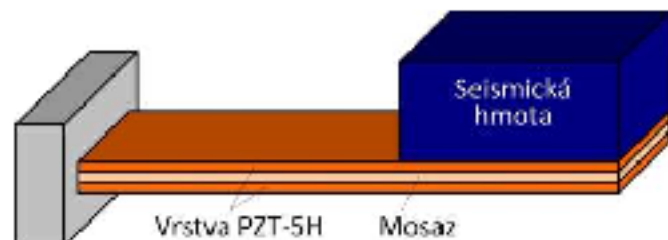
a) Piezelektrické generátory s nosíkem buzené mechanickými vibracemi

Struktura vetknutého nosníku

- a) vertikální ohyb,
- b) horizontální ohyb



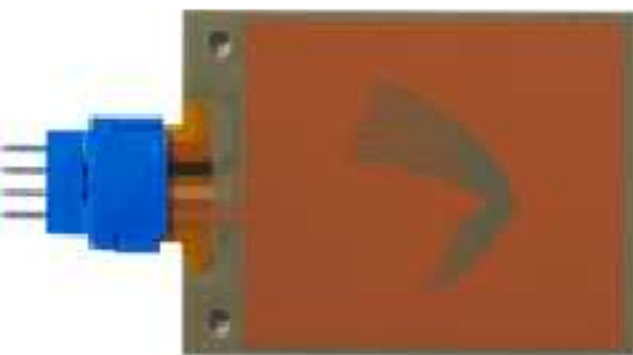
- Seismická hmota - slitina Sn a Bi
- tloušťka 0,28 mm PZT vrstvy
- délka nosníku 11 mm
- seismická hmota 17x7,7x3,6 mm
- výstupní výkon **375 μ W**
- využití pro napájení RF vysílače.



Piezelektrický generátor (Piezo-G)

a) Piezelektrické generátory s nosíkem buzené mechanickými vibracemi

Piezelektrické generátory firmy Mide Technology Corporation, a) V25w, b) PEH20w

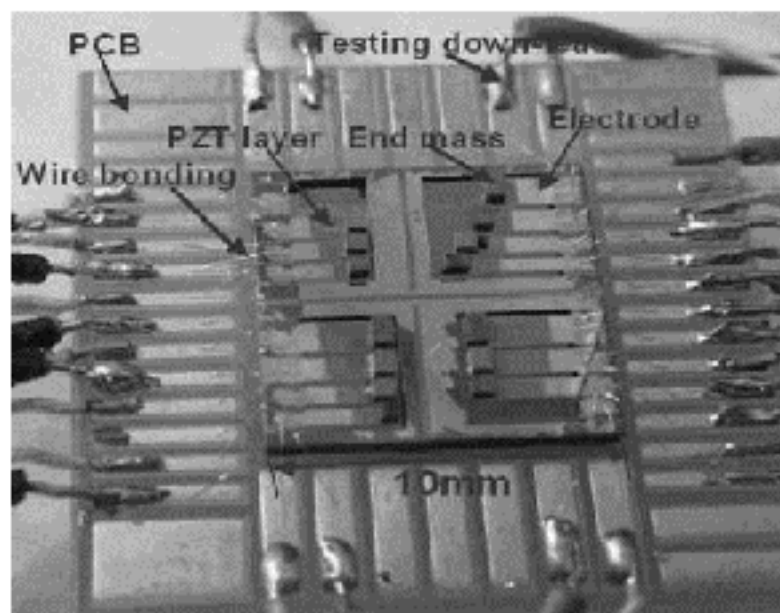


- bimorfnní nosník se setrvačnou hmotou na konci nosníku
- geometrické rozměry $90 \times 42,5 \times 9,75$ mm
- Výstupní výkon $0,55$ mW při vibracích 113 Hz

Piezelektrický generátor (Piezo-G)

a) Piezelektrické generátory s nosníkem buzené mechanickými vibracemi

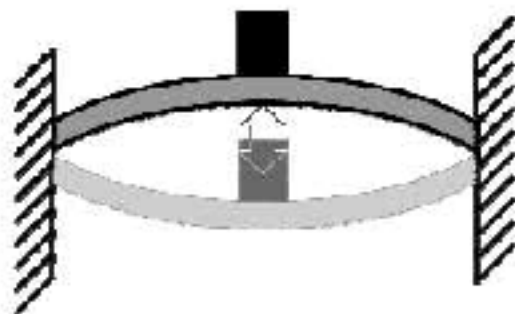
MEMS piezelektrický generátor s polem různě laděných nosníků



fotografie MEMS generátorového pole s tlustovrstvovými piezelektrickými nosníky. Generátorový systém lze ladit na frekvence mechanického buzení okolních vibrací.

Bistabilní systém

- Dvě klidové polohy
- Použitelný od nulové frekvence – prahová budicí síla
- Rezonanční chování kolem klidových poloh



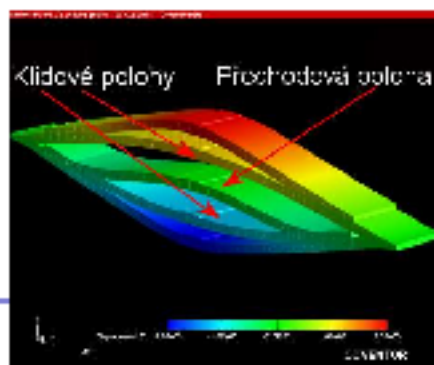
Alternative Geometries for Increasing Power Density in Vibration Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks - Jessy Baker, Dr. Shad Roundy, Prof. Paul Wright

Piezelektrický generátor (Piezo-G)

c) Piezelektrické generátory s bistabilní strukturou

Můstková struktura MEMS

- seismická hmota umístěna ve středu struktury
- Mechanické předpětí vytvořené uvnitř struktury např. stlačením, strukturu prohne.
- Působením vibrací se můstek překlápí mezi dvěma krajními polohami (systém se v okolí každé polohy chová jako monostabilní systém)
- Přejod mezi polohami nastává skokem při překonání určité kritické síly
- V bistabilním režimu nastane překlacení do druhé polohy působením jediného vnějšího impulsu.
- **Výhoda** bistabilních struktur je široké pásmo pracovních frekvencí a vyšší výstupní výkon než u monostabilních struktur.
- **Nevýhoda** je nutnost překonání prahových sil pro bistabilní funkci.

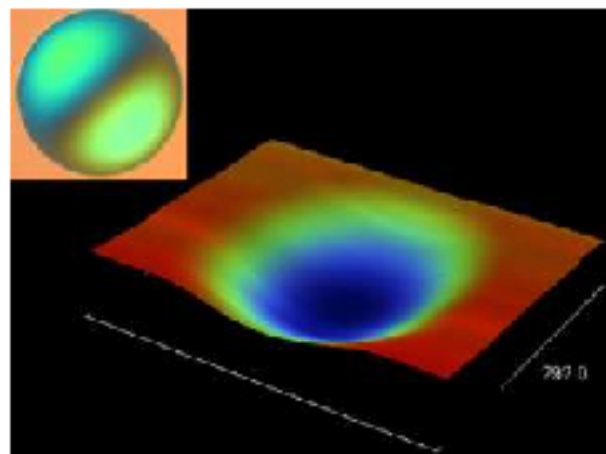
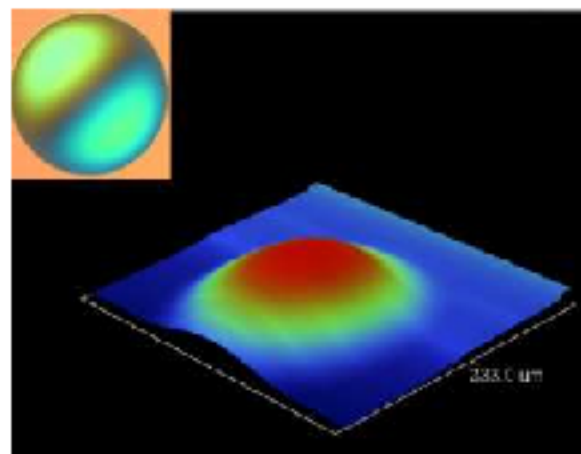


Piezelektrický generátor (Piezo-G)

c) Piezelektrické generátory s bistabilní strukturou

Membránová struktura MEMS

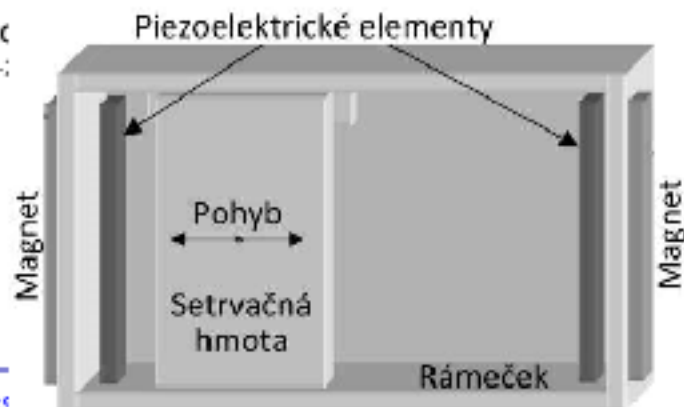
- analogie dvojrozměrné verze můstkového provedení
- Klidové prohnutí membrány lze vytvořit při výrobě, např. využitím rozdílné teplotní roztažnosti použitých materiálů



Piezelektrický generátor (Piezo-G)

e) Piezelektrické generátory s využitím nárazové energie

- Generátor využívající energie vzniklé nárazem na piezelektrický materiál pro použití u člověka
- Generátor je tvořený inerciální hmotností umístěnou uvnitř rámečku, ale volně se pohybující podél jedné osy.
- Ocelová setrvačná hmota **750 mg** má v kluzné ose délku 2 mm, 10 mm šířku a 5 mm sílu.
- Rám je **12 mm dlouhý v kluzné ose a 10 mm široký**.
- Energie je generována nárazem setrvačné hmoty na PZT nosníky.
- Pro zvýšení výkonu a bistabilního režimu činnosti se používají magnety umístěné na koncích rámu
- výstupní **výkon až 40 μW** při objemu 1 cm^3 při 1 Hz (odpovídá zrychlení $0,1 \text{ ms}^{-2}$)

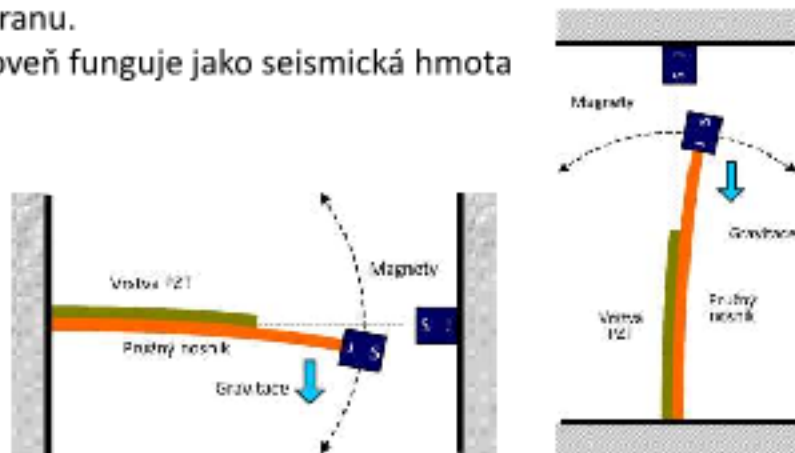


Piezelektrický generátor (Piezo-G)

c) Piezelektrické generátory s bistabilní strukturou

Bistabilní režim nosníku buzeným magnetickým polem

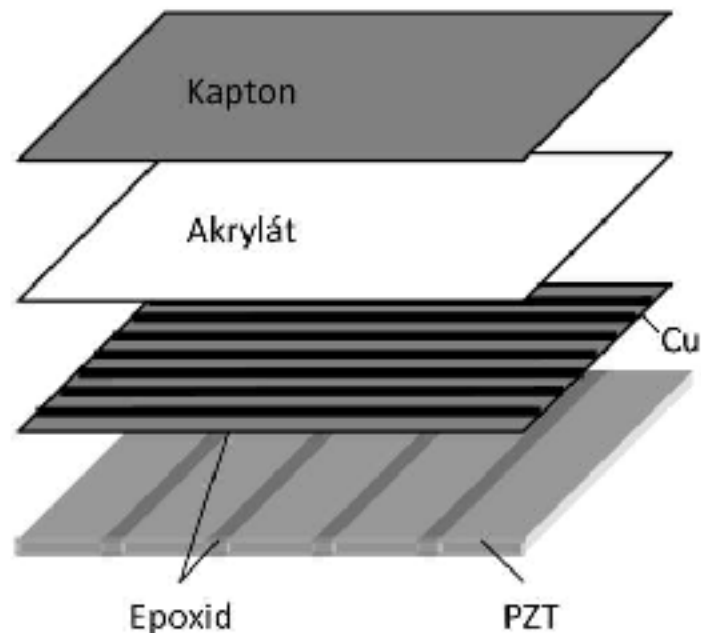
- dvou stabilních stavů se dosáhne použitím permanentních magnetů
- vetknutý nosník s piezelektrickou vrstvou, na konci nosníku je umístěn permanentní magnet. Proti tomuto magnetu je umístěn pevný permanentní magnet.
- Pro dosažení vychýlení magnetickým polem uspořádání magnetů je takové, aby siločáry magnetů byly orientovány proti sobě, vzájemným působením se dosáhne vychýlení nosníku na jednu stranu.
- Magnet na konci nosníku zároveň funguje jako seismická hmota



Piezelektrický generátor (Piezo-G)

e) Piezelektrické generátory s kompozitními strukturami

- makrovláknové kompozitní materiály (MFC)
- Struktura MFC vyvinutá v NASA se skládá z tenkých vláken PZT vložených do vrstvy Kaptonu a interdigitálních elektrod (IDE)
- Pokud je aktuátor vázán na strukturu, mechanická napětí jsou vázána podél délky vláken
- Generátor byl využit pro dobíjení baterie **200 mAh za dobu 4 hod.**



Piezelektrický generátor (Piezo-G)

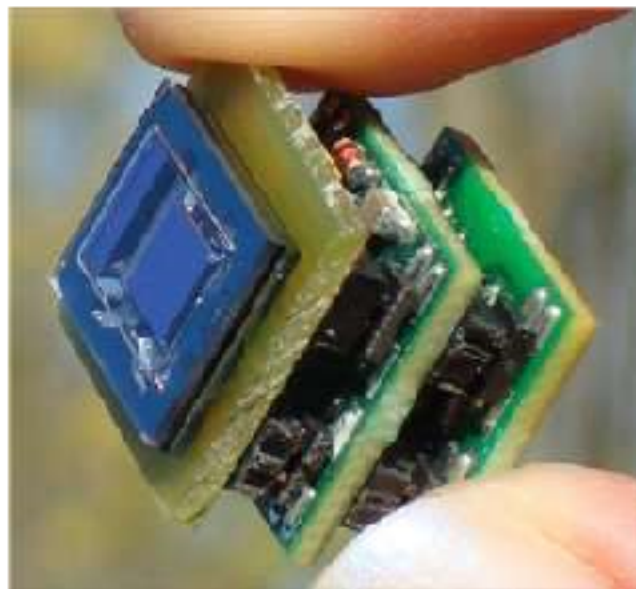
f) Piezelektrické generátory MEMS

- MEMS generátor EH vyvinutého na universitě v Portland (USA) spolu s drobnými obvodovými prvky a **objemem 27 mm³**
- Systém pracující s frekvencí vibrací 14 až 155 Hz
- Výstupní **výkon 200 μW**
- Energie je skladována v superkondenzátoru s napětím 1,85 V.
- Předpokládá se **životnost 10 až 20 let**

Piezelektrický generátor (Piezo-G)

f) Piezelektrické generátory MEMS

- Piezelektrický generátor EH vyvinutý v IMEC v Belgii využívající levné CMOS technologie kompatibilní s MEMS technologií s procesy na 6 palcových Si deskách, **teplotní senzor napájený EH generátorem**
- Systém EH generuje elektrickou energii **85 μW** z vibrací 150 Hz až 1,2 kHz.



Piezelektrický generátor (Piezo-G)

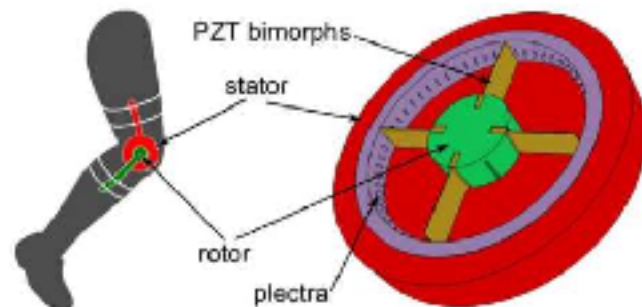
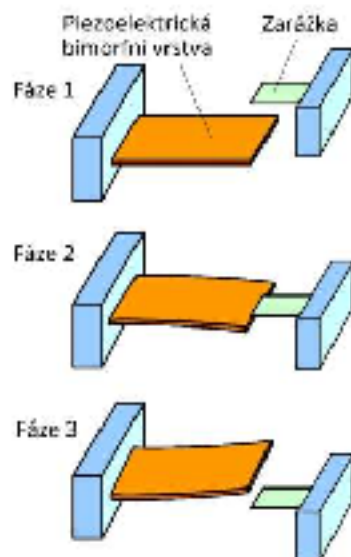
g) Piezelektrické generátory ostatní

- využití „odpadové mechanické“ energie (vibrace, tlaky) na pozemních komunikacích a přeměna na elektrickou.
- piezelektrické generátory, 100 m úsek dvouprúdové silnice, až **400 kW/1 km**.
- využití i energii dalších zdrojů jako je např. proudění tekutin.
- PVDF membránu umístěnou v dynamicky proudící tekutině (vytvořené víry), generátory s PVDF membránou s tloušťkou až 0,7 mm a délkou 0,457 m (napájení senzorů mořských bójí).
- bezdrátové senzorové sítě

Piezelektrický generátor v lékařství

Piezelektrický bimorfni systém pro kolenní kloub

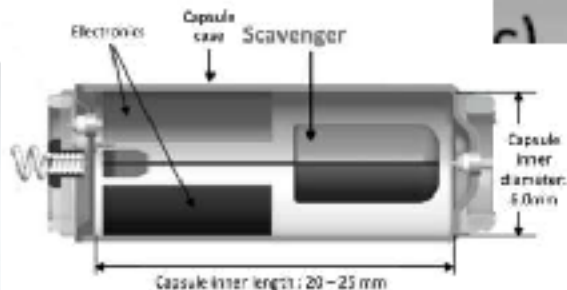
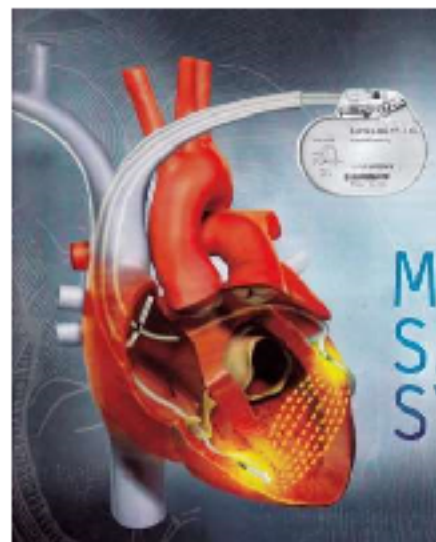
- sběr energie z pohybu kolenního kloubu
- Mechanické buzení je tvořeno ze sledu fází – přiblížení + kontaktu, fáze mechanického namáhání a ohnutí nosníku, fáze uvolnění a kmitání nosníku při rezonanční frekvenci
- Při normální chůzi se koleno ohýbá a natahuje jednou za vteřinu s úhlem natočení cca 70°.
- Vnější kroužek nesoucí zarážky je připevněn na stehno, vnitřní systém s piezelektrickými nosníky se otáčí s pohybem kolena.
- kmitání několika piezelektrických nosníků.
- energie několika mW.



Piezelektrický generátor v lékařství

Piezelektrický systém pro napájení kardiostimulátorů

- náhrada baterie implantovaného kardiostimulátoru
- umožní realizaci kardiostimulátoru, který lze umístiti přímo do srdce



Kapsle
kardiostimulátoru
s napájecím zdrojem
typu EH



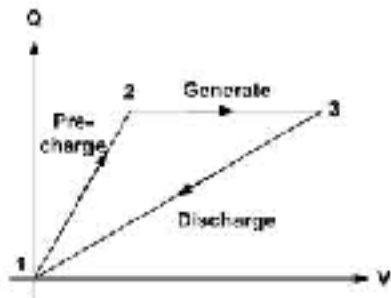
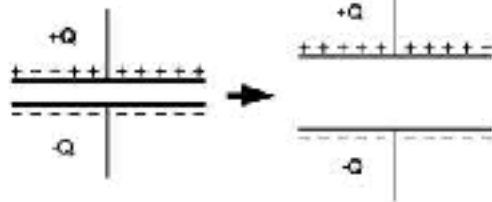
Elektrostatický princip

Elektrostatický generátor

- energetický násobič
- potřebuje externí zdroj energie
- proměnný kondenzátor
- vhodný pro MEMS

Elektrostatický generátor

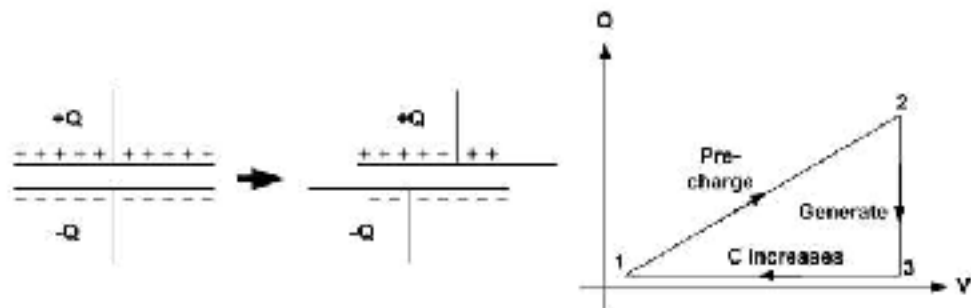
- režim konstantního náboje



P.D. Mitcheson, T. Sterken, C. He, M. Kiziroglou, E. M. Yeatman and R. Puers - Electrostatic Microgenerators

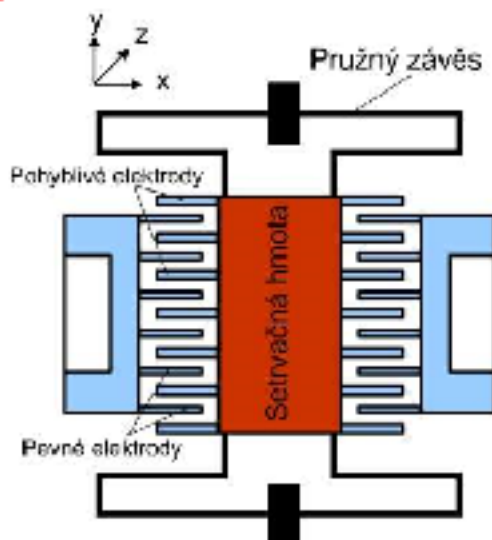
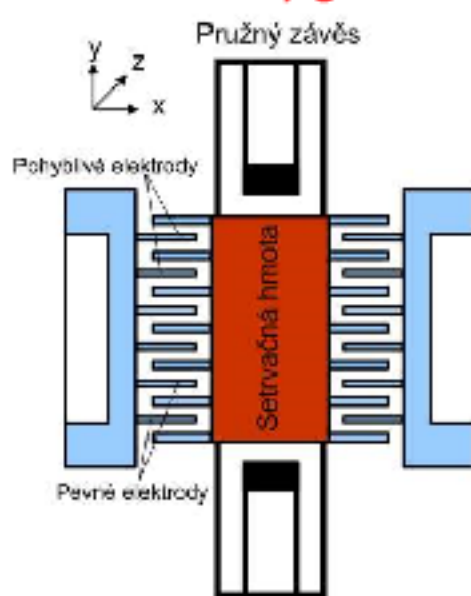
Elektrostatický generátor

- režim konstantního napětí

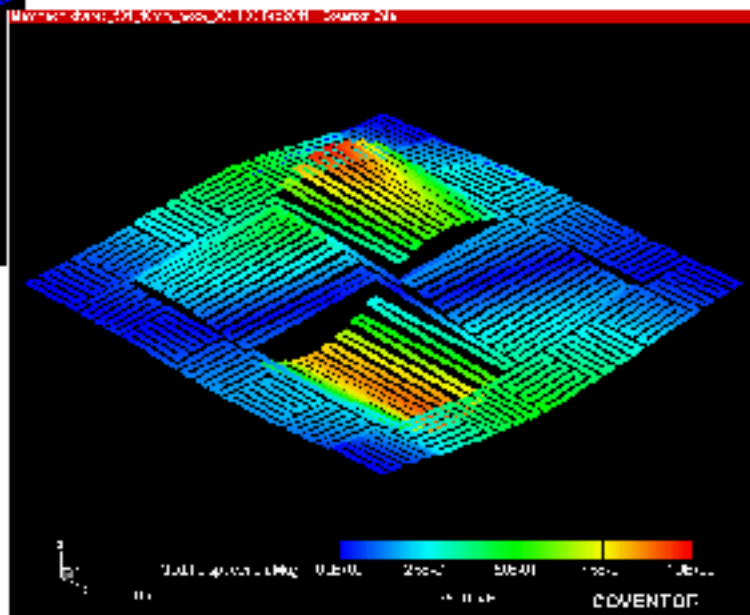
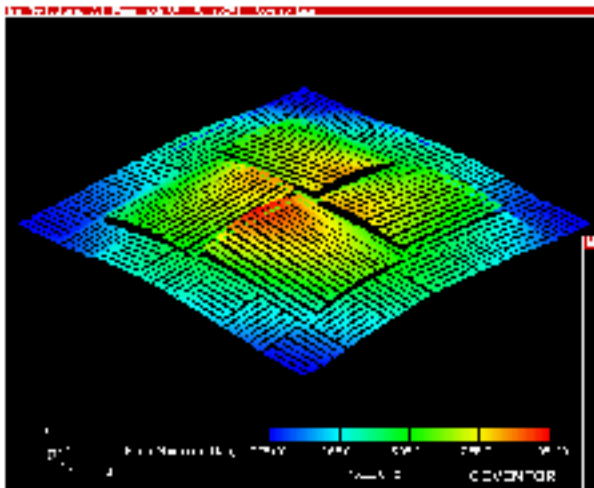


P.D. Mitcheson, T. Sterken, C. He, M. Kiziroglou, E. M. Yeatman and R. Puers - Electrostatic Microgenerators

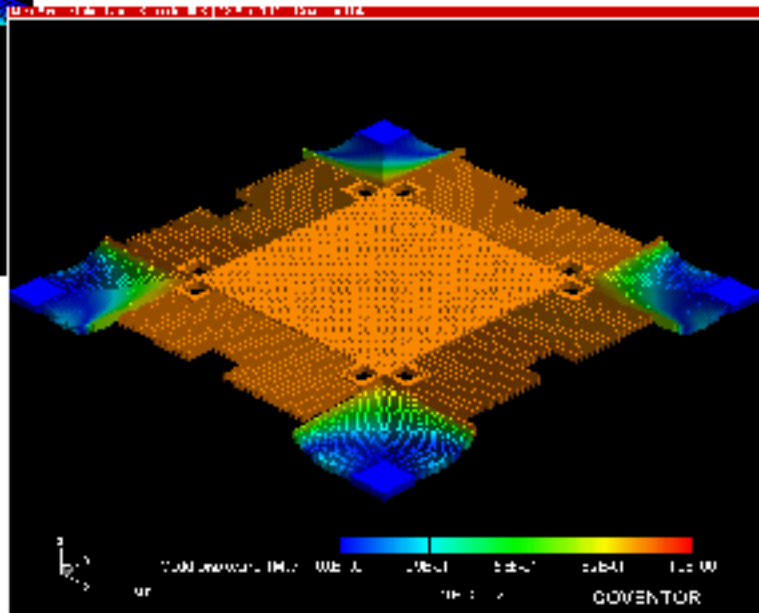
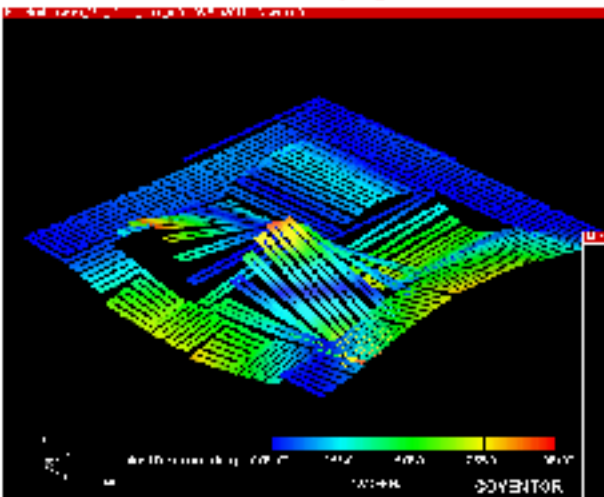
Elektrostatický generátor - STRUKTURY



Elektrostatický generátor - STRUKTURY



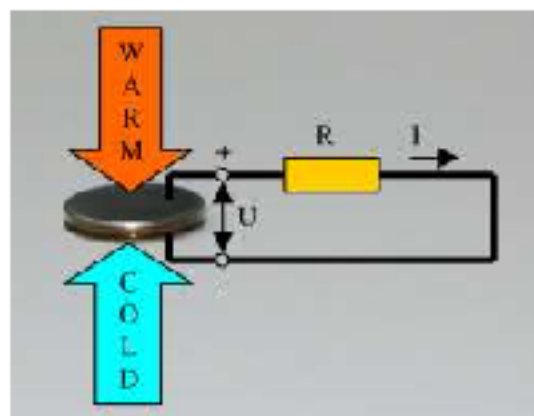
Elektrostatický generátor - STRUKTURY



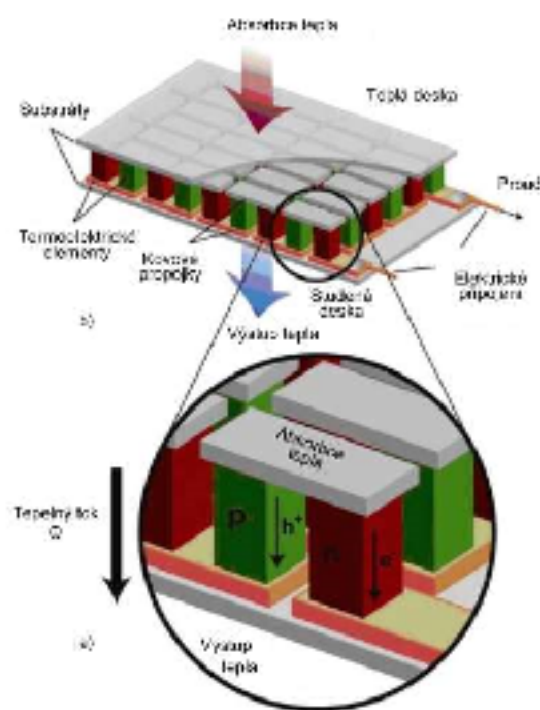
Tepelný princip

Teplotní generátor (teplotní gradient)

- Seebeckův jev – termočlánek
- spojení více termočláneků
 - elektricky sériově
 - tepelně paralelně



Ingo Stark - Thermal Energy Harvesting with Thermo Life



S.Priya, D.J.Inman - Energy harvesting technologies

Teplotní generátor (teplotní gradient)

- “Peltierův článek” 40 mm x 40 mm
- 512 elementů
- teplotní rozdíl 85°C
- 1,7 V naprázdno
- 200 mA nakrátko

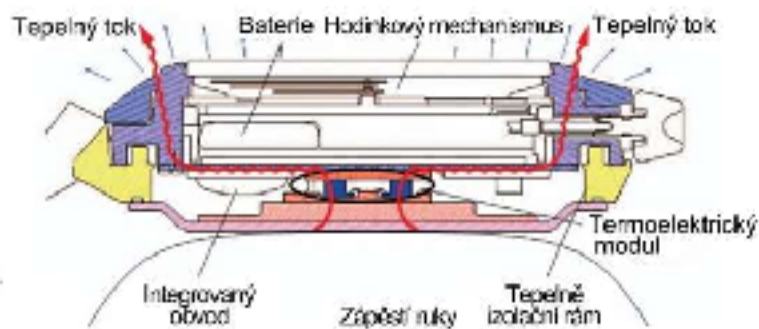
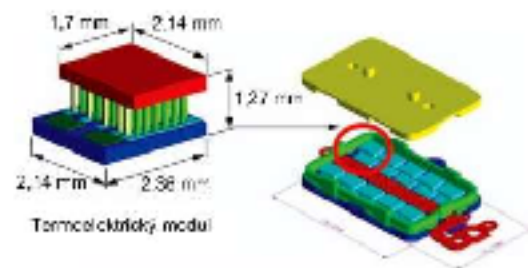


<http://www.gme.cz/peltierovy-clanky/m-tec1-07108-p601-006/>

Teplotní generátor (teplotní gradient) - TEG

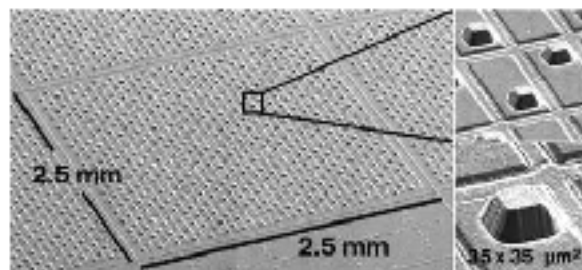
Termoelektrické napájení hodinek Seiko

- 1988 - Seiko náramkové hodinky napájené termoelektrickým generátorem
- 10 článků ze sintrovaného Bi_2Te_3
- Výstupní napětí generátoru **300 mV**
- teplotní gradient mezi teplotou povrchu zápěstí a okolním vzduchem



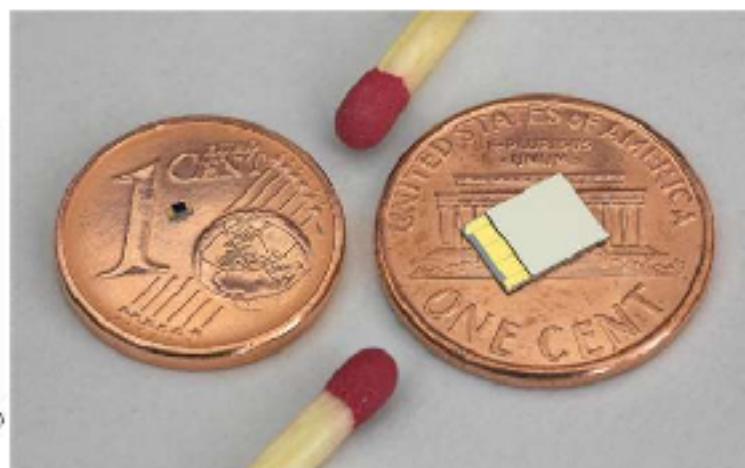
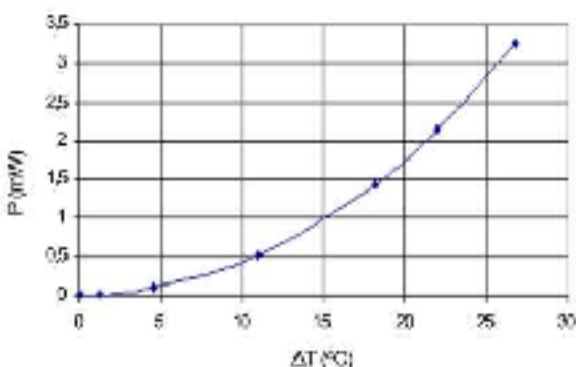
Teplotní generátor (teplotní gradient) - TEG

Termoelektrický generátor firmy Micropelt



Polovodičová struktura se 100 termoelektrickými páry na mm²

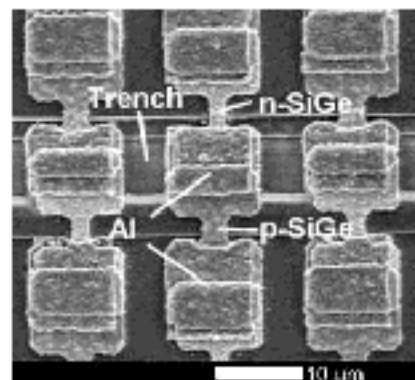
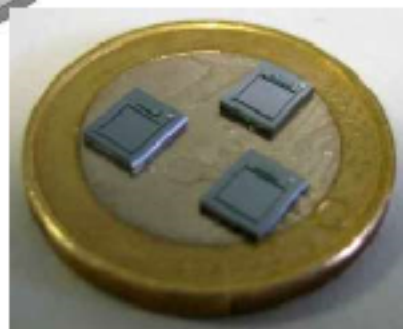
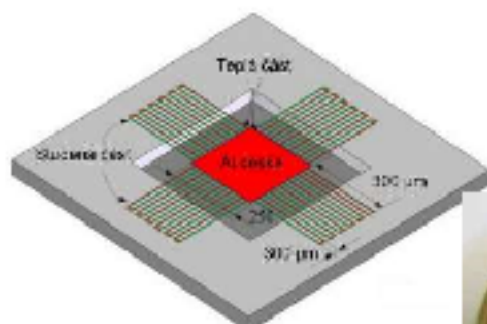
- 2,5 x 3,5 mm²
- výstupním výkonem 1 mW / 15 °C



Teplotní generátor (teplotní gradient) - TEG

Termoelektrický generátory v CMOS

- Pro aplikace na lidském těle
- K eliminaci velkého tepelného odporu zdroje tepla jsou termoelektrické články realizované mikroobráběním
- Bi_2Te_3 , výška termoelektrického článku 10 až 15 μm , výkon $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2 / 5 \text{ V}$
- Lze vyrobit termoelektrické články s výškou 0,5 μm a šířkou 3 μm



RF princip

RF generátory

- volba pracovního kmitočtu
- vhodná anténa → rozměry
- použití v RFID

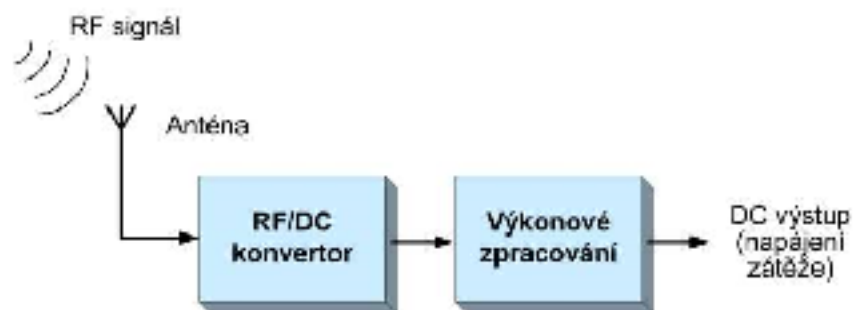


http://www.combitrading.cz/obj/obsah_fck/RFIDtag.jpg

RF generátory

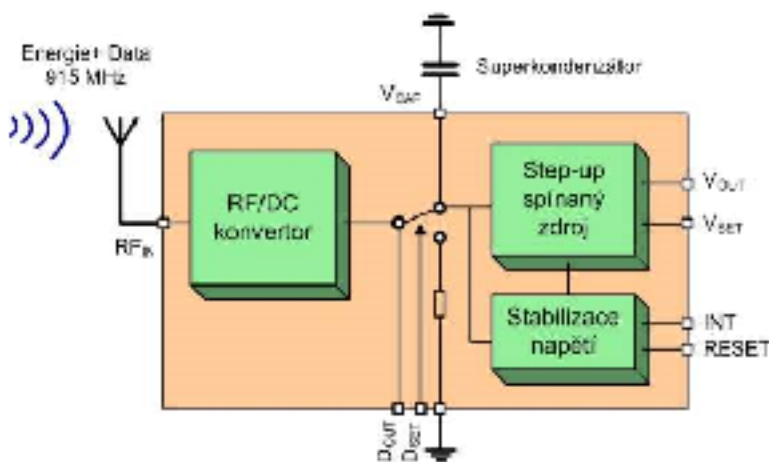
Zdroje RF energie

- rádiové vysílače (více než 4 miliardy, 1 širokopásmové)
- Mobilní telefony (napájení nízkopříkonových aplikací)
- WiFi systémy
- WiFi routery s výkonem 50 až 100 mW (v místnosti)
- RF energii na vzdálenost cca 2,5 km od 5 kW rozhlasového AM vysílače
- bezlicenční pásma, typicky 868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz, 5,8 GHz

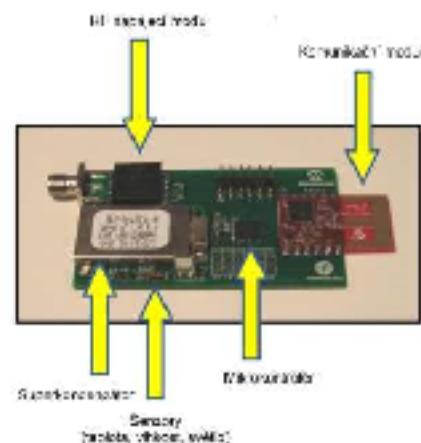
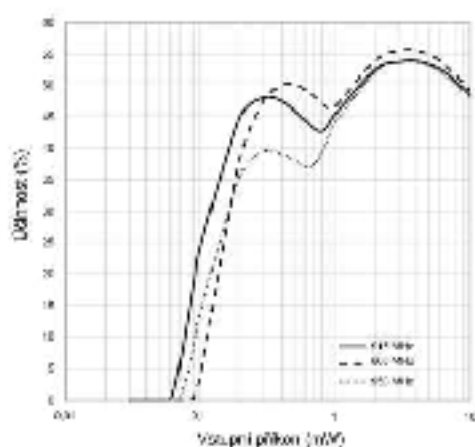


RF generátory

Powercast P2110 se superkondenzátorem



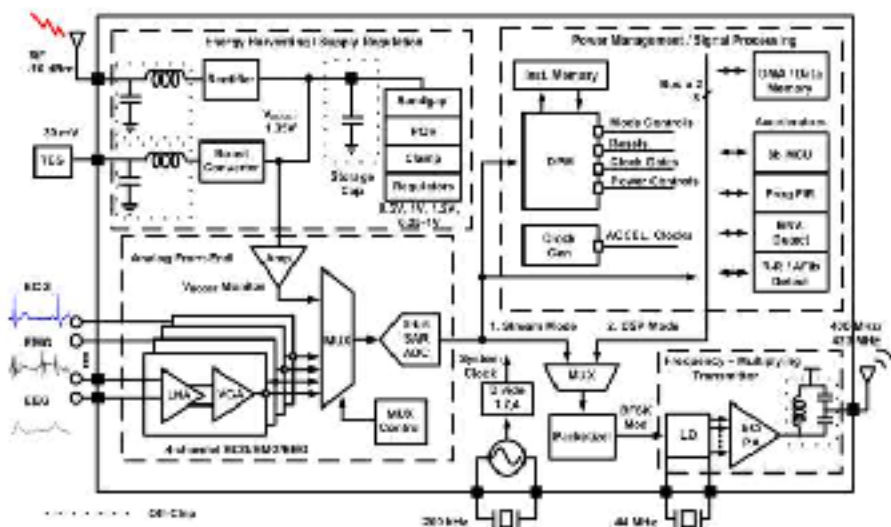
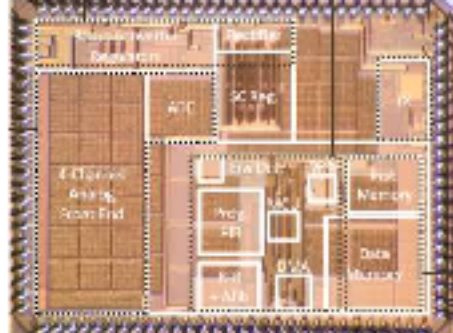
Aplikace RF modulu P2110 pro napájení mikroprocesoru a bezdrátových senzorů



RF generátory

RF generátory ve zdravotnictví

- Čip s RF vysílačem sensorových dat
- snímání bio-signálů (EEG, EMG a ECG)
- Velmi nízká spotřeba, RF mikrogenerátor

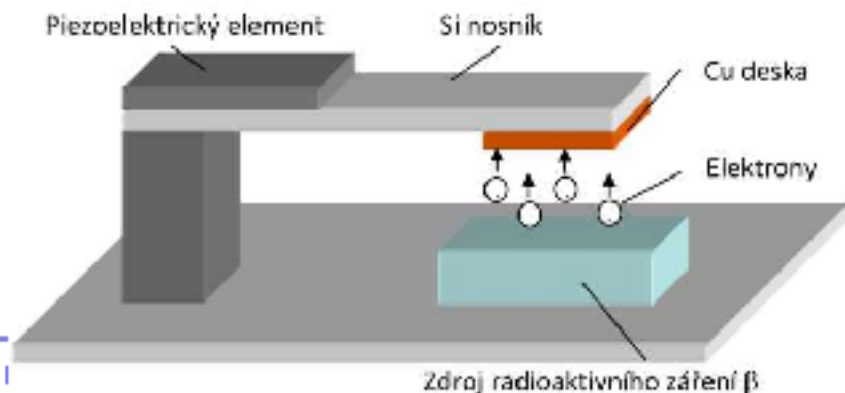


Radioaktivní princip

Piezelektrický generátor (Piezo-G)

b) Piezelektrické generátory s nosníkem buzené radioaktivním zářením

- vyzařované β částice elektrostaticky nabijí Cu desku.
- Po nabití je nosník přitahován ke zdroji, až dojde ke kontaktu, kdy se náboj vybije.
- Po vybití se nosník uvolní a začne vibrovat na své rezonanční frekvenci - generace energie v piezelektrické vrstvě.
- Výstupní elektrický výkon a charakteristiky generátoru jsou ovlivňovány různou kombinací materiálů, geometrií a použitými radioizotopy.
- Generátor s radioaktivním zdrojem 1 cm^2 s poločasem rozpadu 100 let v kombinaci s **15 mm dlouhým a 2 mm širokým** křemíkovým nosníkem je schopný generovat špičkový výkon **$16 \mu\text{W}$** .



β Particles Energy Conversion

Simulation of Nuclear Radiation Based Energy Harvesting Device using Piezoelectric Transducer

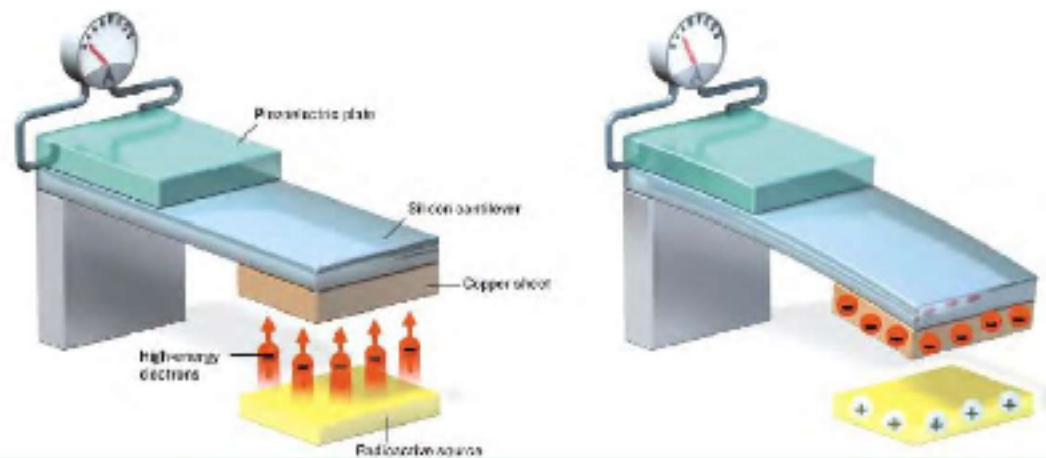


Fig 1. Beta particles (high-energy electrons) fly spontaneously from the radioactive source and hit the copper sheet, where they accumulate.

Fig 2. Electrostatic attraction between the copper sheet and the radioactive source bends the silicon cantilever and the piezoelectric plate on top of it.

β Particles Energy Conversion

Simulation of Nuclear Radiation Based Energy Harvesting Device using Piezoelectric Transducer



Fig 3. When the cantilever bends to the point where the copper sheet touches the radioactive source, the electrons flow back to it, and the attractive force ceases



Fig 4. The cantilever then oscillates, and the mechanical stress in the piezoelectric plate creates an imbalance in its charge distribution, resulting in an electric current

Zdroje vibrací

S.Priya, D.J.Inman - Energy harvesting technologies

zdroj	zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	frekvence (Hz)
motor automobilu	12	200
obráběcí stroj	10	70
mixér	6,4	120
sušička	3,5	120
přístrojová deska automobilu	3	13
zavření dveří	3	125
mikrovlnná trouba	2,5	120
okno v rušné ulici	0,7	100
CD mechanika v notebooku	0,6	75

- Nové materiály
- Nové technologie (nano)
- Další integrace
- Uplatňování nových prvků typu MEMS a NEMS
- Uplatňování nových elektronických systémů s mezioborovým zaměřením
- Uplatnění dalších nových dosud neobjevených technologií (mohou vycházet z nanotechnologií) pro realizaci elektronických struktur

Děkuji za pozornost