

# Szenzorhálózatok tápellátása, energiagazdálkodás

Orosz György

2011. 09. 16.

# Energiagazdálkodás

- Energiagazdálkodás szükségessége:
  - Szenzorok hosszú élettartama (több év)
  - Energiaforrások cseréje időigényes, sokszor nem megoldható (mostoha körülmények, távoli központ,...)
- Élettartam meghosszabbításának lehetőségei
  - Megfelelő energiamenedzsment
  - Eszközök energiafogyasztásának csökkentése
  - Energiaforrások energiasűrűségének, kapacitásának növelése
  - Saját energiaellátás környezetből
  - Energiatovábbítás egy centralizált egységtől

# Energiafelhasználás

- Tipikus energiafogyasztási számértékek
  - Áramfelvétel aktív üzemmód:  $I \approx 10\text{-}50\text{mA}$
  - Áramfelvétel alvó üzemmód:  $I \approx 100\text{nA}\text{-}10\text{uA}$
  - Tipikus feszültség szintek:  $U=1.8 / 3.3 / 5 \text{ V}$
  - Felvett teljesítmény:  $P=UI \approx 20\text{mW}\dots 250\text{mW}$  (adott értékek mellett, aktív üzemmód)
  - Felvett energia:  $W=PT$  ( $T$ : idő)
    - Példa: 1sec aktív állapot:  $W=20\text{mJ}\dots 250\text{mJ}$
  - Felhasznált töltésmennyiség:  $Q=IT$ 
    - Példa: 1 sec aktív állapot:  $Q=10\text{mC}\dots 50\text{mC}$
    - Sokszor mAh (milli amper óra) a mértékegység, ekkor:  
 $Q \approx 0.003 \dots 0.014 \text{ mAh}$  (aktív üzemmód)
  - Összehasonlításként
    - Átlagos elem kapacitása:  $Q \approx 2000\dots 3000\text{mAh}$
    - Átlagos elem energiatartalma:  $W = QU \approx 10000\dots 16000\text{J}$
    - Adott paraméterek mellett élettartam
      - Folytonos aktív üzemmód: max ~200 óra (@ $I=10\text{mA}$ )

# Energy harvesting

Alternatív energiaforrások  
szenzorhálózatokban

# Alapötletek, irányvonalak

- Hagyományos energiatároló eszközök (elem, akkumulátor)
  - Viszonylag stabil és megbízható, jól becsülhető működés 😊
  - Újratölthető akkumulátorok 😊
  - Élettartamuk véges ☹️
  - Élettartamuk lejártával cserélni kell ☹️
  - Környezetet károsító anyagok ☹️
- A környezetben sok olyan jelenség található, mely hasznosítható energiát képes leadni (nap, gépek rezgése/mozgása ...)
  - „Ingyen” energia (egyébként is jelen van) 😊
  - Általában megújuló források 😊
  - Megbízhatatlan (pl. napsütés, szél) ☹️
  - Általában kis felhasználható teljesítmény/feszültség/áram ☹️

# Lehetséges energiaforrások

- Gépek, eszközök
  - Motorok, kompresszorok rezgése, mozgása
  - Hidak, épületek mozgása, lengése
  - Gépek által termelt hő
  - Szellőző berendezések levegő áramlása
  - Szerkezeti elemek ütközése, súrlódása, elmozdulása
- Természeti
  - Napsugárzás
  - Levegőáramlás
  - Vízmozgás, vízszint változás
  - Magas hőmérsékletű pontok
  - Elektromágneses sugárzás
- Emberi forrás (biomechanikai)
  - Mozgás
  - Testhőmérséklet

# Mechanikai energia hasznosítása

- Mechanikai energia hasznosítása:
  - A mechanikai erő, rezgés, mozgás, ... forrásához történő csatlakozás
  - A mechanikai energia átalakítása villamos energiává
  - Az energia tárolása és elosztása/felhasználása
- Elterjedt mechanikai energia-átalakítók alapelvei:
  - Piezoelektromos hatás
  - Mozgási indukció

# Piezoelektromos átalakítók

- Általában mW nagyságrendű kimenő teljesítmény
- Piezoelektromos hatás
  - Bizonyos anyagok esetén mechanikai feszültség/nyomás/deformáció hatására töltés halmozódik fel az anyag felszínén
    - Mindennapos felhasználás pl.: elektromos öngyújtó
  - A piezoelektromos hatás kristálytani iránytól függ
  - Kristályok (kemény kerámiák), pl. PZT (Lead Zirconate Titanate)
    - kis veszteség, rideg, kevésbé öregszik, hőnek jobban ellenáll
  - Polimer, pl. PVDF (Polyvinylidene fluoride)
    - nagyobb veszteség, magasabb generált feszültség, elasztikus
- Többrétegű struktúra: a piezoelektromos hatás fokozása
- Egyéb alkalmazási területek
  - Nyomásérzékelő
  - Beavatkozók



# Piezoelektromos átalakítók

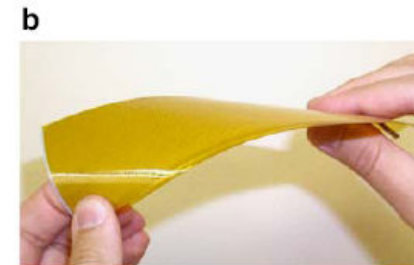
- Piezo anyagok fontos paraméterei
  - $d$ : adott nyomás hatására mekkora töltésmennyiség jelenik meg az anyag egységnyi felületén:  $Q_{\text{sűrűség}} = d \cdot p$ 
    - Nagyságrendileg néhány 100-1000 (pC/m<sup>2</sup>)/(N/m<sup>2</sup>) [pC/N]
  - $g$ : adott nyomás hatására mekkora villamos erőter keletkezik:  
 $E = g \cdot p$ 
    - Nagyságrendileg néhány 0.01-0.1 Vm/N [(V/m)/(N/m<sup>2</sup>)]
    - Számítható belőle a generált feszültség:  $U = E \cdot h = g \cdot p \cdot h$   
 $h$ : anyag vastagsága
  - A paraméterek kristálytani irányoktól függ, pl. hajlítás, nyomás más-más irányból
  - $k$ : elektromechanikus csatolási tényező (milyen hatékonysággal alakítja át a mechanikai energiát elektromossá)
    - Nagyságrendileg 30 - 75% (nincs benne egyéb veszteség)
  - Rezonanciafrekvencia (adott méret esetén)
  - Piezogenerátor kimenőfeszültsége és energia/teljesítmény
    - Példa (www.noliac.com) erő:  $F = 10\text{kN}$ ,  $U = 400\text{V}$ , energia:  $W = 12\text{mJ}$
  - Energiasűrűség: általában mJ/cm<sup>3</sup> nagyságrend

# Piezogenerátorok felépítése

- Példa
  - Különböző felépítésű piezo anyagok



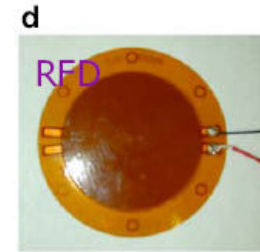
THin layer UNimorph DRIVER



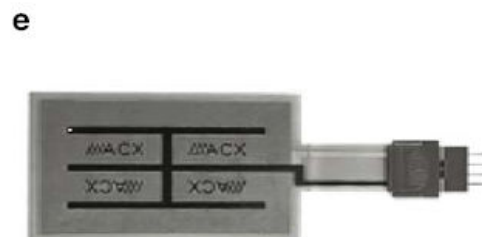
Active Fiber Composite



MacroFiber Composite



Radial Field Diaphragm



QuickPack



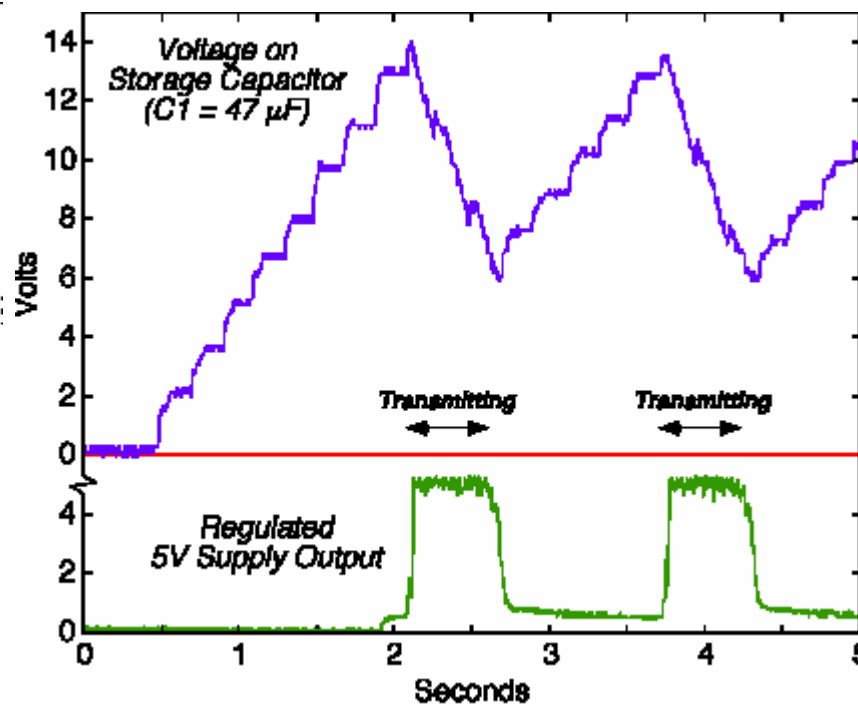
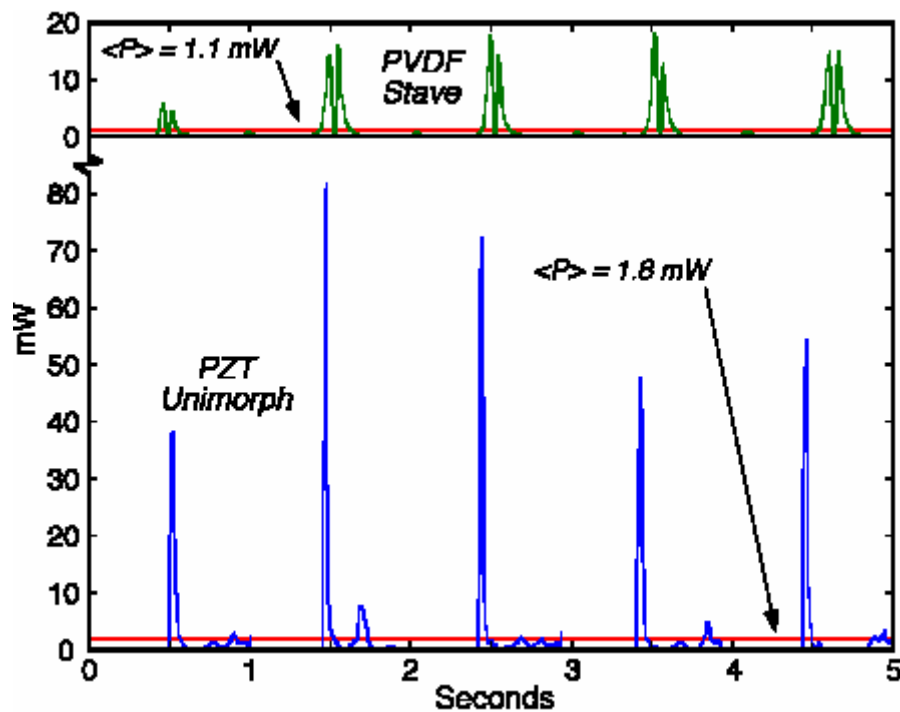
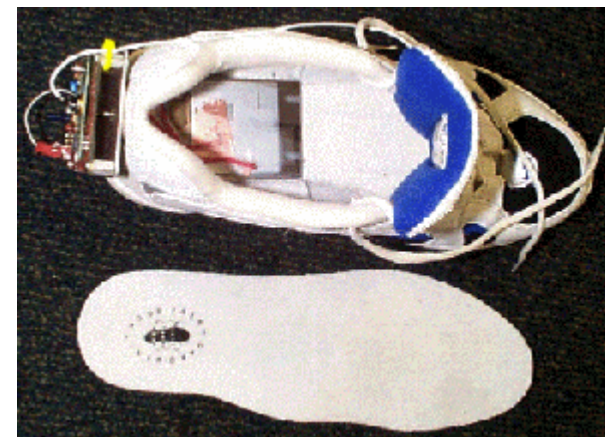
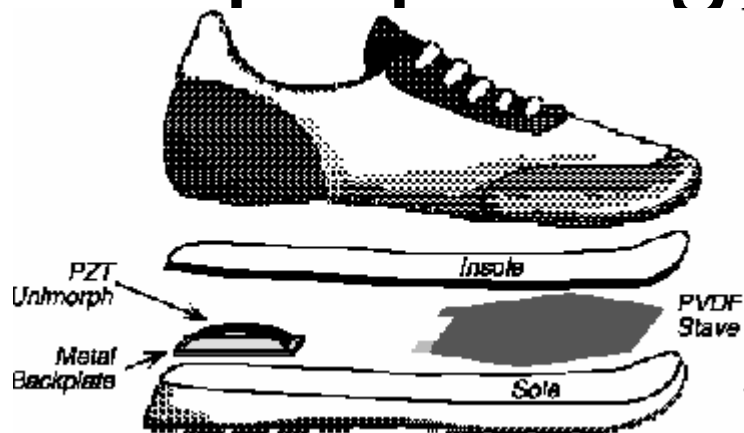
Bimorphs

Forrás: Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers

# Példa : cipő piezogenerátorral

1-2mJ energia /lépés

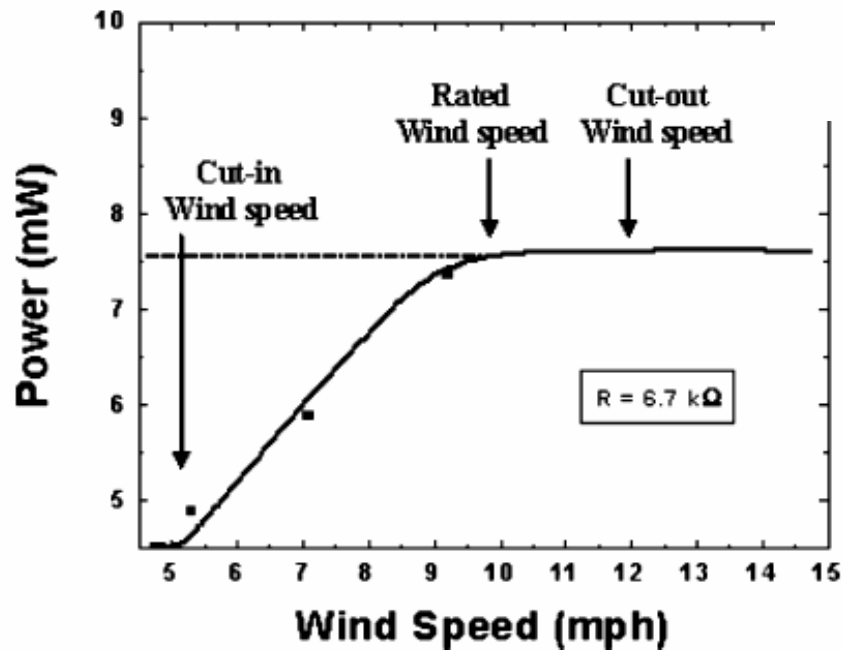
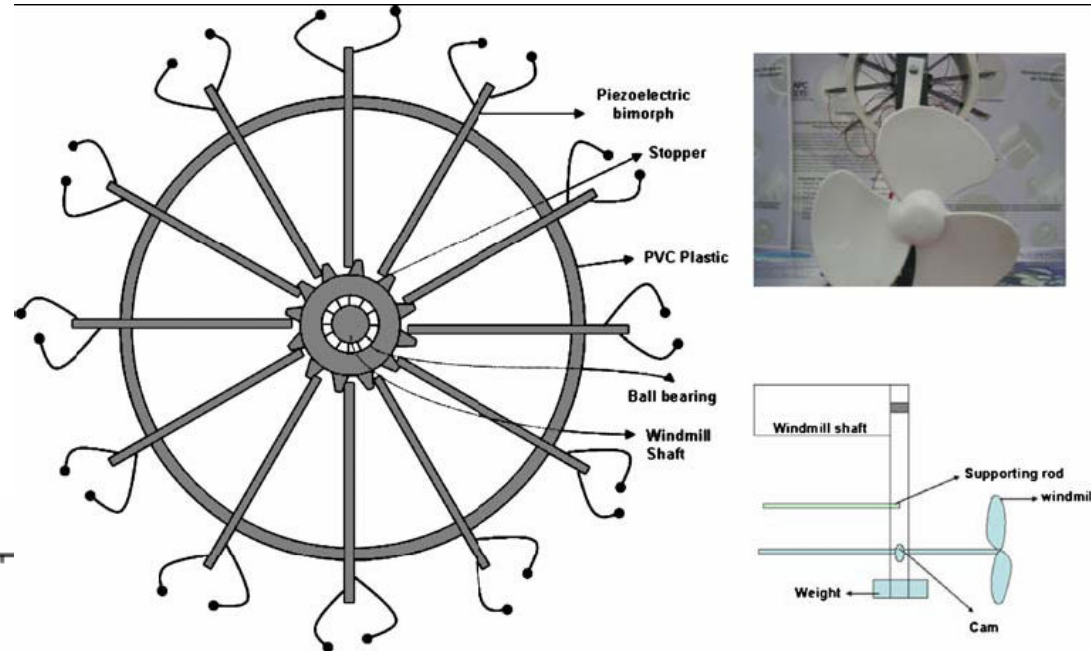
forrás:  
[www.media.mit.edu](http://www.media.mit.edu)



# Példa

- Hány lépés alatt keletkezik annyi energia, amellyel egy 30 mW-ot fogyasztó eszköz 0.3 másodpercig üzemel
  - $W_{\text{termel}} = 2 \text{ mJ / lépés}$
  - $W_{\text{fogyaszt}} = PT = 9 \text{ mJ}$ 
    - $P=30 \text{ mW}$
    - $T=0.3 \text{ sec}$
  - $N_{\text{lépés}} = W_{\text{fogyaszt}} / W_{\text{termel}} = 4.5$

# Példa: piezoelektromos szélkerék



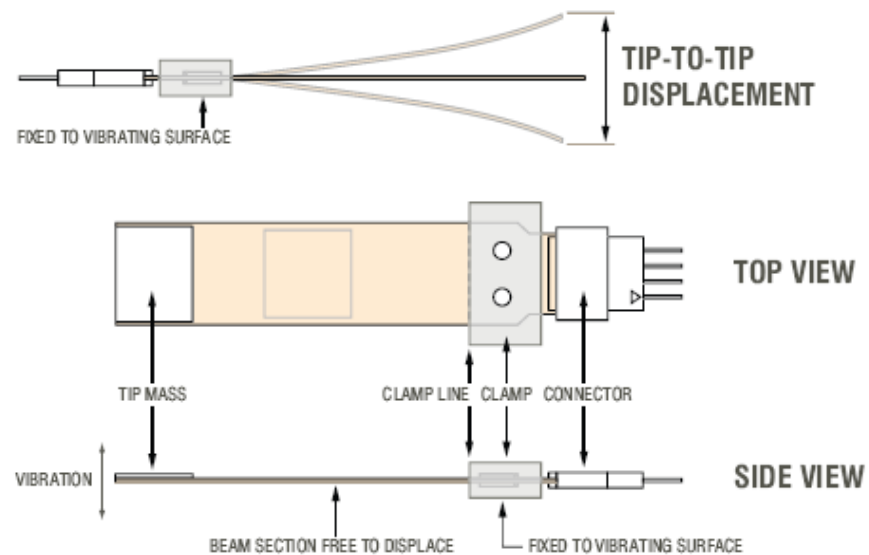
Forrás: Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers

# Piezoelektromos átalakítók üzemmodjai

- Nem rezonáns üzemmód
  - Statikus, vagy ritkán ismétlődő erőhatások
  - Példa: cipőbe épített generátor
  - Feszültség és töltés számítása egy adott mechanikai behatás esetén a  $g$  és  $d$  paraméterekből
- Rezonáns üzemmód
  - Például forgógépek, járművek rezgései
  - A rezgések gyakran periodikusak
  - Megfelelő hatásfok rezonanciafrekvencián érhető el
  - Működési frekvencia függ a forrás felépítésétől, üzemi körülményektől
  - Különböző piezogenerátorok elérhetőek más-más rezonanciafrekvenciára hangolva
    - Rezonanciafrekvencia függ
      - Piezo anyag (vagy annak hordozójának) flexibilitása
      - Piezo generátor tömege (hangolható külső tömeg hozzáadásával)

# Rezonáns piezogenerátorok

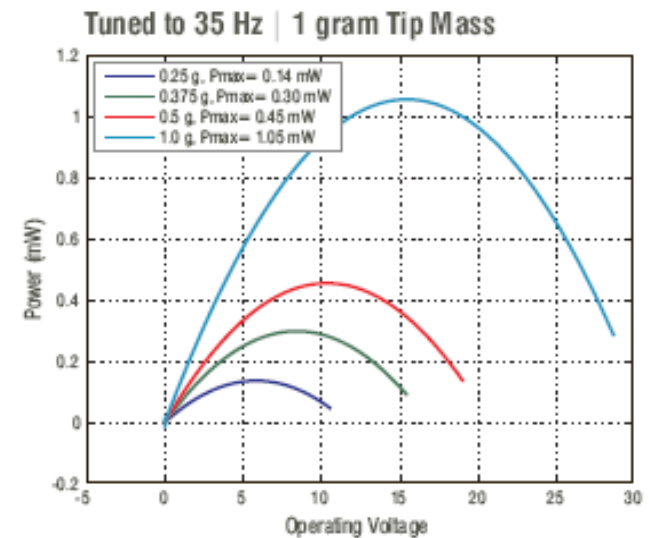
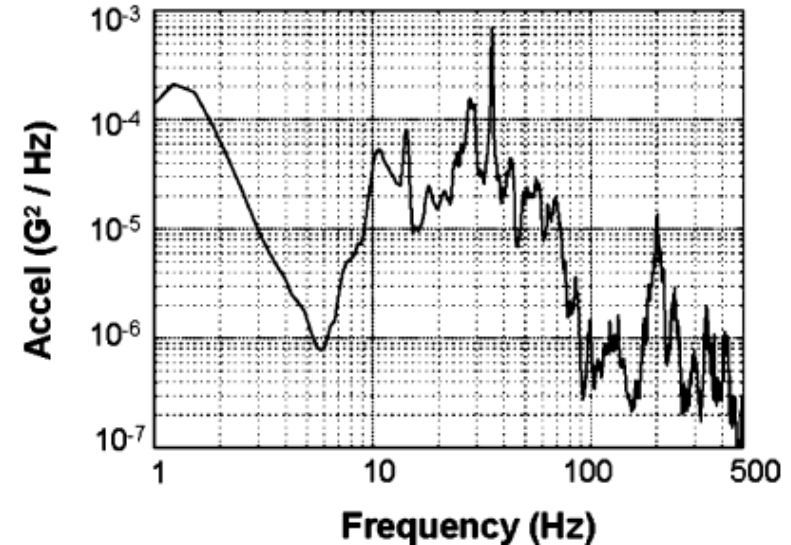
- Rugalmas hordozólemez + hangoló súly
- Tartóelem rögzítése csavarokkal
- Két piezo réteg (2x2 kivezetés): sorba és párhuzamosan kapcsolható:
  - Sorba: kétszeres feszültség
  - Párhuzamosan: kétszeres áram



Volture rezonáns piezogenerátorok

# Rezonáns piezogenerátorok

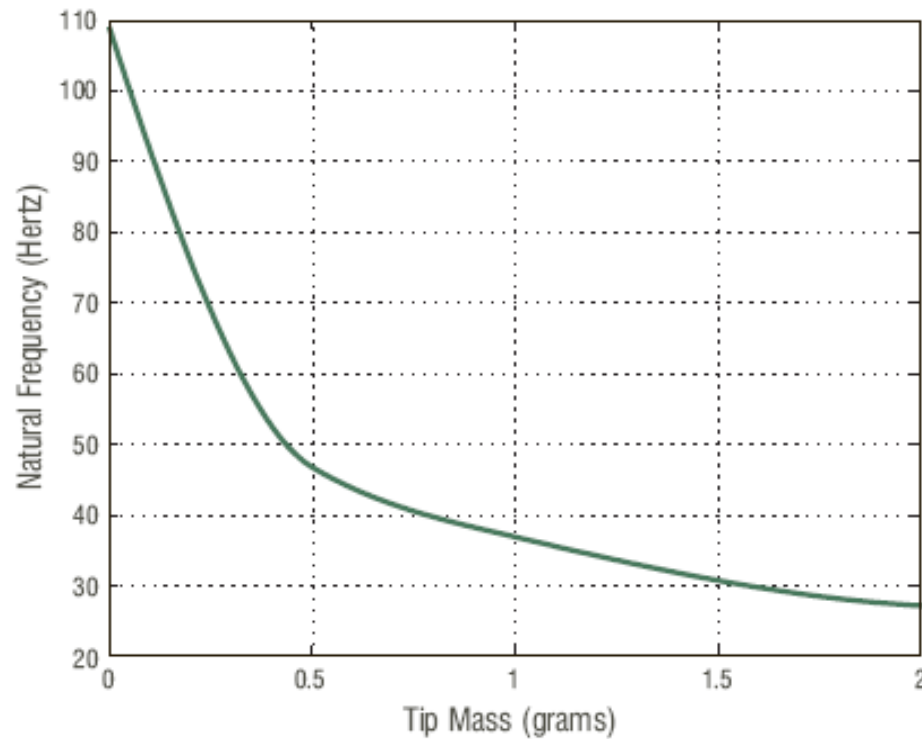
- Tervezési lépések:
  - Kiaknázandó rezgés vizsgálata
    - Példa: spektrum vizsgálat, maximális teljesítmény 30-40 Hz
  - Megfelelő eszköz kiválasztása: 35 Hz-es rezonancia frekvencia
  - Várható teljesítményadatok elemzése





# Rezonáns piezogenerátorok

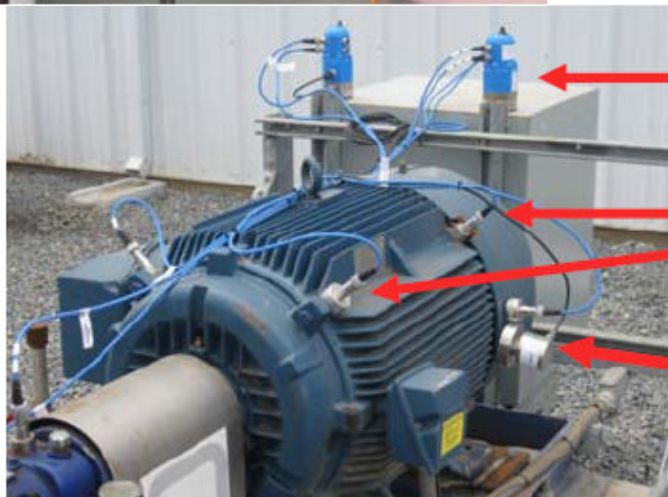
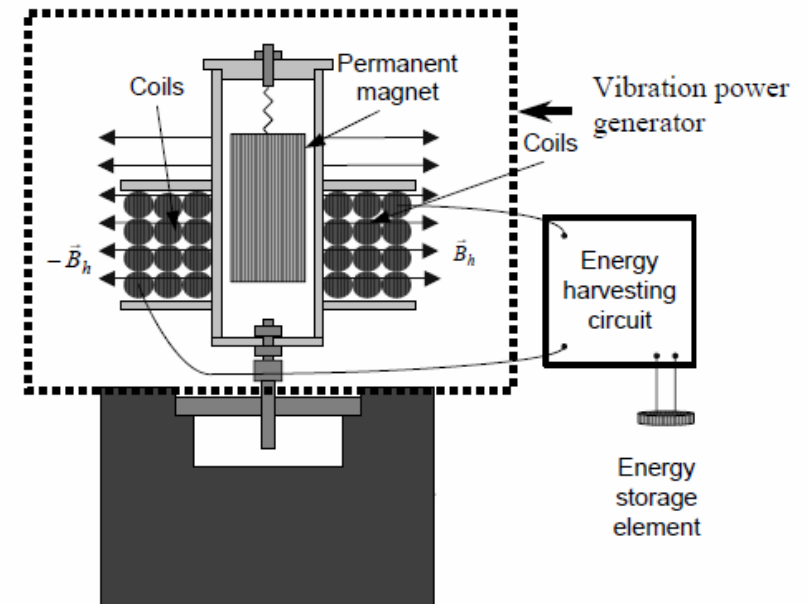
- A rezonanciafrekvencia hangolható, néhány tipikus paraméter:



Tip Mass (gram)	Fn (Hz)	Amplitude (g)	Open Circuit Voltage*
0	110	0.25	2
0	110	0.375	3.1
0	110	0.5	4.2
0	110	1	6.9
0.5	45	0.25	6
0.5	45	0.375	8.5
0.5	45	0.5	11
0.5	45	1	17.5
1	35	0.25	8
1	35	0.375	11.5
1	35	0.5	14
1	35	1	23.4
2	30	0.25	12
2	30	0.375	16.1
2	30	0.5	20.8
2	30	1	31.8

# Energiaátalakítás mozgási indukcióval

- Egy tekercs mágneses térben történő mozgása során feszültség indukálódik
- Pl.: Perpetuum PMG17-120



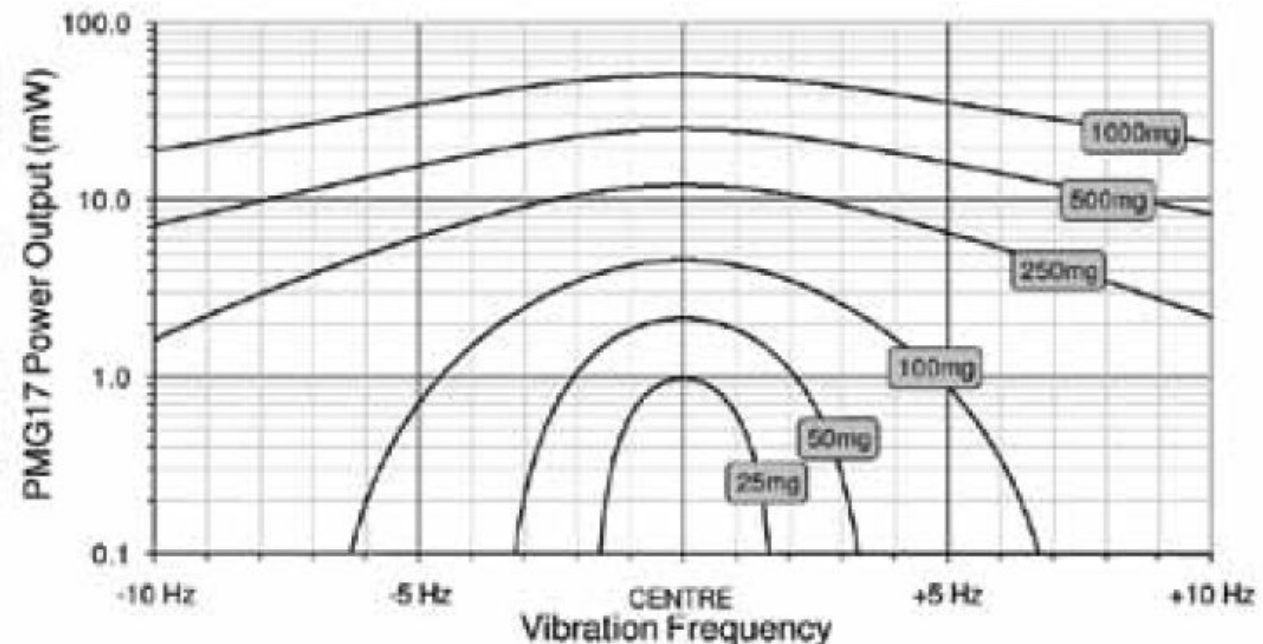
Wireless Sensor Node

Industrial Vibration Accelerometers

Vibration Energy Harvester powering the Wireless Sensor Node

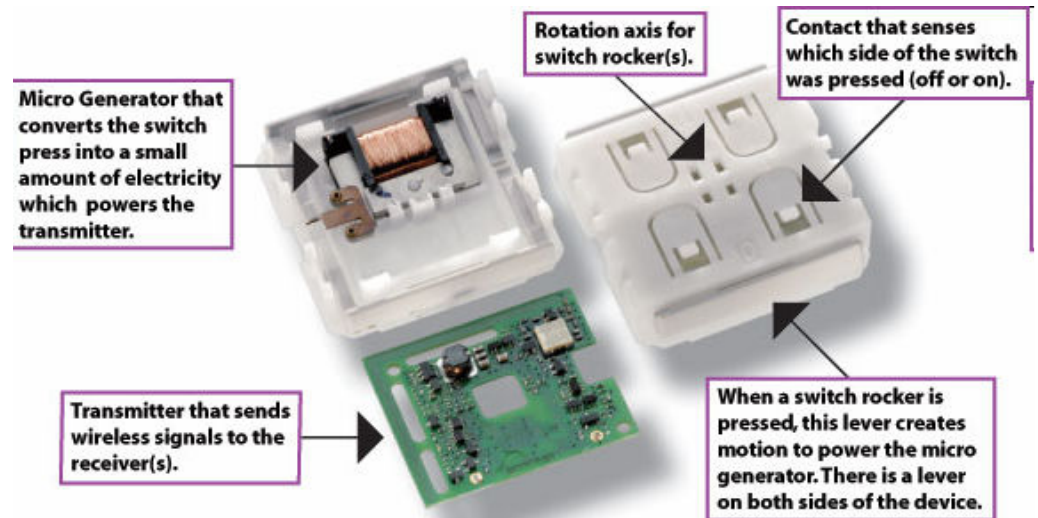
# Energiaátalakítás mozgási indukcióval

- Rezonancia jelensége kihasználható
- Rezonancia frekvenciától távolodva csökken a leadott teljesítmény
- Rezonancia beállítása: rezgő tömeg + felfüggesztő rugó



# Példa: vezeték nélküli kapcsoló

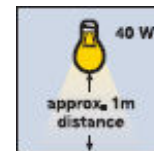
- EnOcean vezeték nélküli kapcsoló
- Mikrogenerátor alakítja a megnyomásakor keletkező mechanikai energiát villamos energiává
- Specifikációk
  - 868 MHz-es sáv
  - 280 kHz sávszélesség



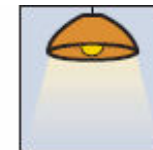
# Fényenergia felhasználása

- Foto-elektromos hatás
  - Félvezető eszközben (szilícium) fény hatására szabad töltések keletkeznek
- Napenergia átlagosan  $150 \text{ W/m}^2 = 15 \text{ mW/cm}^2$ 
  - Pl.  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ -es felületen:  $375\text{mW}$  (ennek még van átalakítási vesztesége)
- Hátrányok
  - Nem folytonos forrás
  - Drága
- Tipikus adatok pl. beltéri felhasználásra (Schott Solar OEM modul):

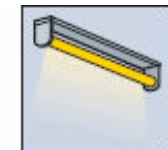
Typical data at		100	200	1000	100 mW/cm <sup>2</sup>
		Lux	Lux	Lux	
Voltage at nominal power	$U_{mpp}$ [mV]	410	430	475	620 mV
Current density at nominal power	$I_{mpp}$ [ $\mu\text{A/cm}^2$ ]	7.1	14.2	71	11.5 mA/cm <sup>2</sup>
Open-circuit voltage	$U_{oc}$ [mV]	585	610	670	820 mV
Short-circuit current density	$I_{sc}$ [ $\mu\text{A/cm}^2$ ]	7.4	14.8	74	13.5 mA/cm <sup>2</sup>
Nominal power density	$P_{nom}$ [ $\mu\text{W/cm}^2$ ]	2.9	6.1	34	7.1 mW/cm <sup>2</sup>



50 Lux



200 Lux



500 Lux

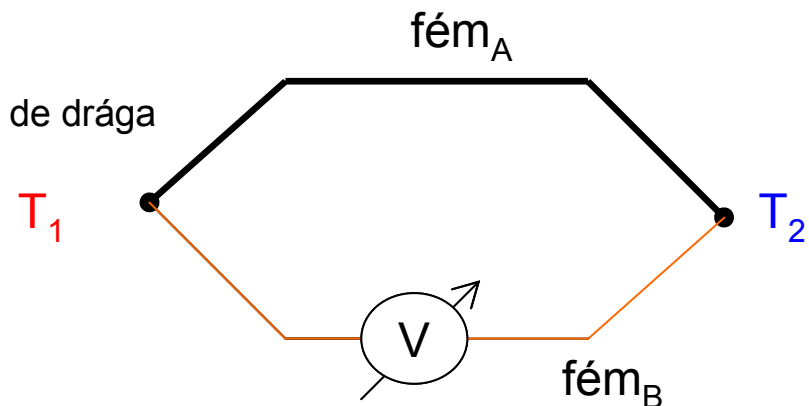


1.000 Lux

Utolsó oszlop: közvetlen napsütés

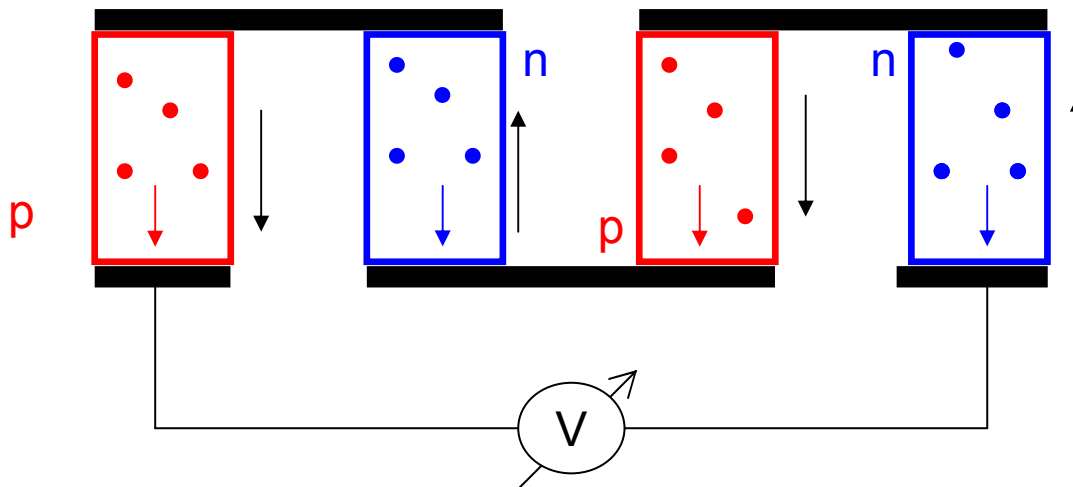
# Termo-elektromos generátor

- Thermoelectric Generator (TEG)
- Előny: nincsen mozgó, előregedő alkatrész
- Működési alapelv: Seebeck effektus
  - Különböző típusú fémek összeérintésénél feszültség keletkezik, ha a két érintkezési pont hőmérséklete eltérő
  - Szemléletes modell: töltéshordozók hő hatására a melegebb helyről a hidegebb felé áramlanak. Különböző típusú fémekben más a töltéshordozók mozgékonyasága vagy a többségi töltéshordozók töltése, így töltésmegosztás alakul ki, az egyensúlyi helyzet felbomlik.
  - $V = (S_A - S_B)(T_1 - T_2) = \alpha(T_1 - T_2)$
  - $S_A$ ,  $S_B$ ,  $\alpha$ : Seebeck együttható.  $\alpha$  mértékegység és nagyságrend:  $\mu\text{V/K}$
  - Kis feszültség  $\rightarrow$  általában több generátor sorba (lásd később)
  - Tipikusan félvezető anyagból készül
    - Nagy Seebeck-együttható
    - Si : kiforrott technológia, így olcsó
    - Bismuth Telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), jobb hatásfok, de drága



# Félvezető alapú TEG források működése

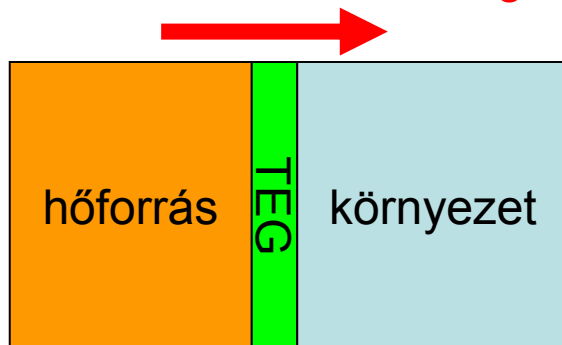
- Félvezető alapú forrás
  - Piros: p típusú félvezető: többségi töltéshordozók a pozitív töltésű lyukak
  - Kék: n típusú félvezető: többségi töltéshordozók a negatív töltésű elektronok
  - Fekete: fémes összeköttetés
- A többségi töltéshordozók a melegebb helyről a hidegebb felé áramlanak. Az áramirány megegyezik a lyukak áramlási irányával (piros nyíl), és ellentétes az elektronok áramlási irányával (kék nyíl), így az eredő áramirány (fekete nyíl) minden félvezető darabban, tehát az egész eszközben egységes



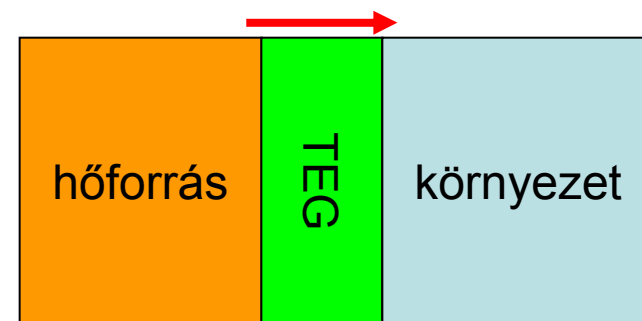
# Tervezési kompromisszumok

- p-n páronként alacsony a generált feszültség, néhány 10-100  $\mu\text{V}$ , így akár sok ezer sorba kapcsolt egység kell
  - Megnö a kimeneti feszültség 😊
  - Megnö a kimeneti ellenállás ☹️
- Minél nagyobb kimenőfeszültséghez nagy hőmérsékletkülönbség kell
  - Érdemes vastagra készíteni, hogy a hőforrást elszigetelje a környezetétől, így a környezetet kevésbé melegíti a hőforrást → nagyobb hőmérsékletkülönbség 😊
  - Nagy vastagság szintén nagy belső ellenállást eredményez ☹️

Átáramló hő, melegíti a környezetet → csökken a hőmérsékletkülönbség ☹️



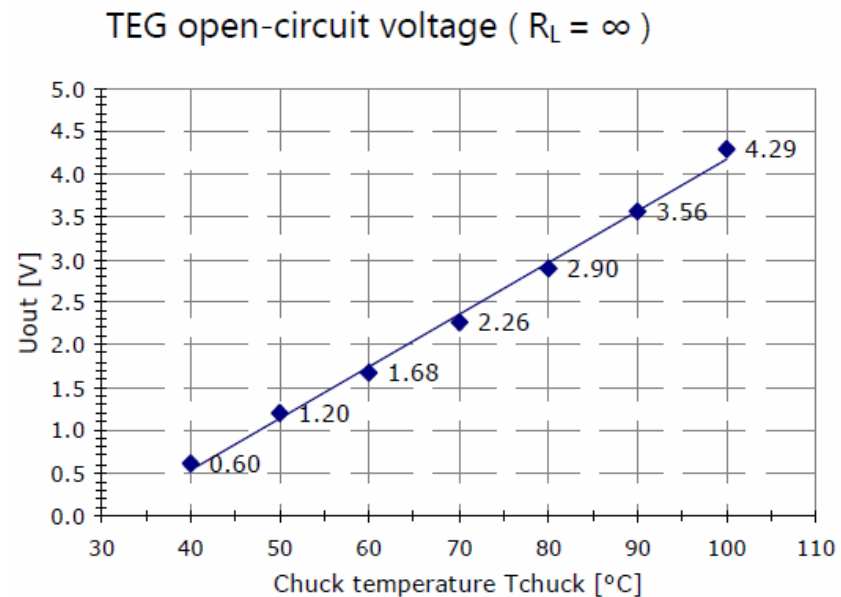
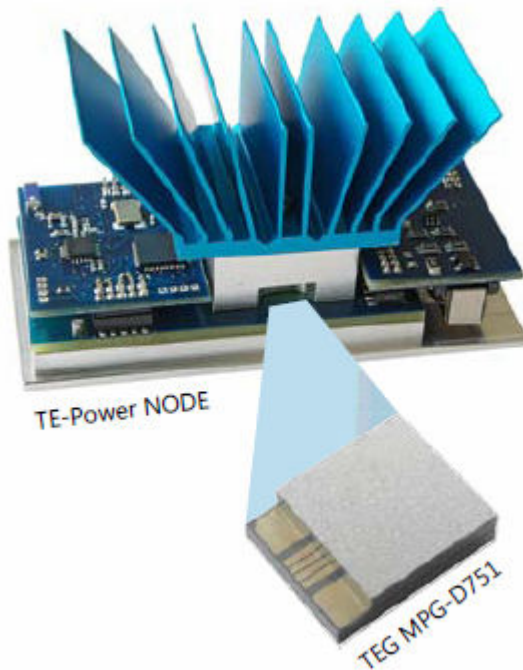
Kisebb átáramló hő → nagyobb a hőmérsékletkülönbség 😊, de nagy belső ellenállás ☹️





# Alkalmazási példa TE-Power node

- Kész alkalmazások, energy harvesting modul:
  - Kommunikációs egység
  - Teljesítményvezérlés, tápfeszültség szabályozás
  - USB bázisállomás
  - Alkalmazói szoftver
- Gyártó adatai: 35°C hőmérsékletkülönbség éves szinten 3628mAh kapacitást jelent (1-2 elem/akkumulátor)



Hőmérsékletkülönbség-feszültség karakterisztika

# Termikus elrendezés

- Minél nagyobb hőmérsékletkülönbséget kell létrehozni
- Cél: hűtőbordák minél jobb elrendezése, az áramló levegő nagyobb hőt tudjon elszállítani

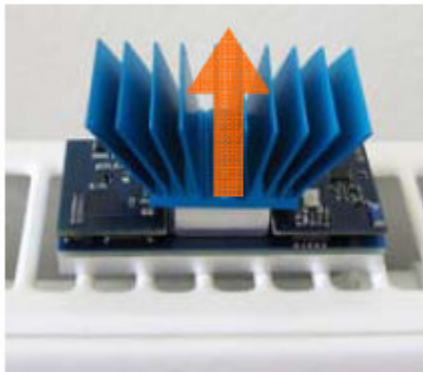


Figure A: Inferior positioning



Figure B1: Preferred positioning

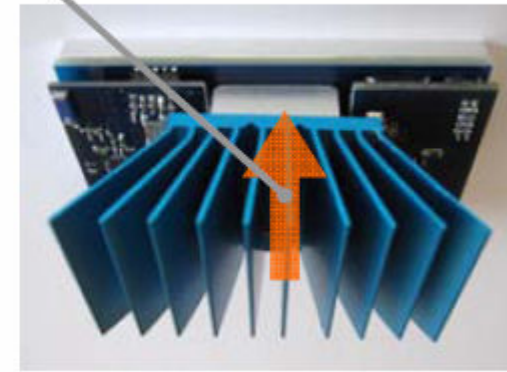
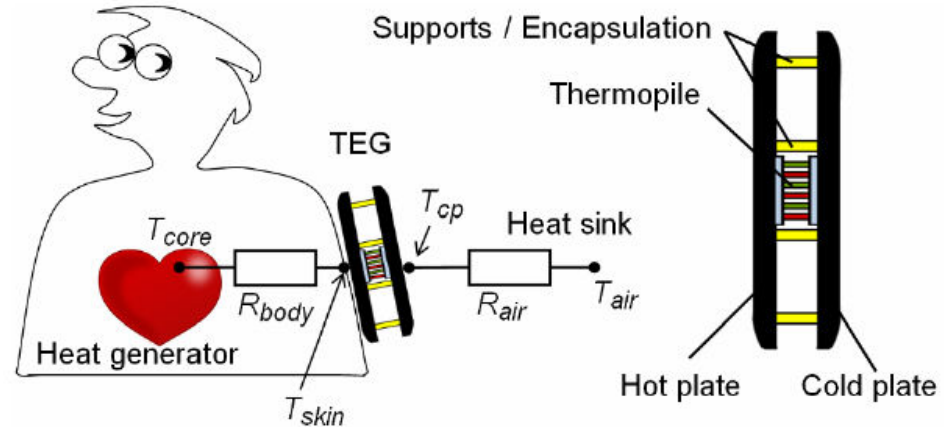


Figure B2: Ideal positioning

# Alkalmazási példa testre rögzíthető modul

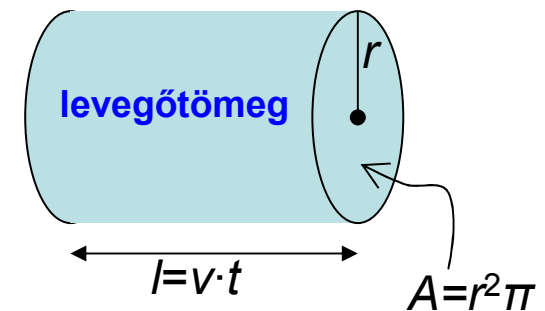
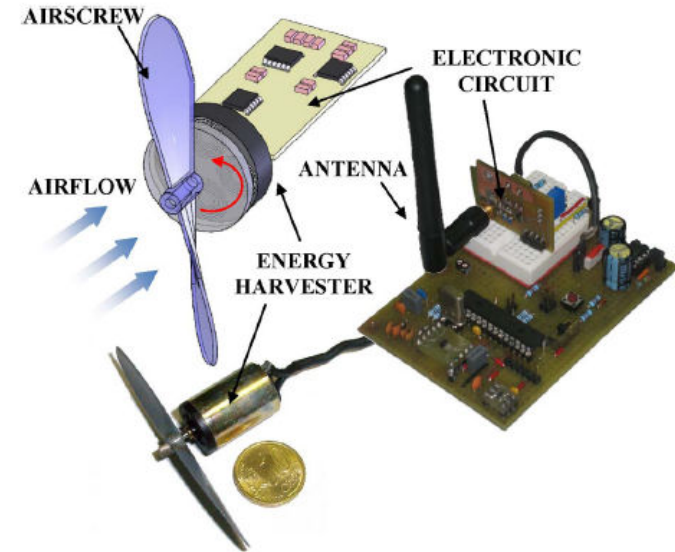
- Emberi test mint hőforrás
- Aktív szakaszban kb. 0.45 mW-os leadott teljesítmény. Ez kb. 16 óra naponta → 7.2mWh/ nap generált energia naponta
- Megengedett átlagos fogyasztás: 7.2mWh/24h=0.3 mW. 3 V-on ez 0.1 mA.
  - Pl. 10mA-es aktív fogyasztás mellett kb. 100 másodpercenként ébredhet fel a fogyasztó 1sec ideig



Forrás: Human Heat Generator for Energy Scavenging with Wearable Thermopiles

# Szélenergia felhasználása

- Levegő áramlás → turbina meghajtása → generátor
- Felhasználható energia
  - Szél energiája:  $W = \frac{1}{2}mv^2$
  - $W = \frac{1}{2}A\rho v^3t$
  - Teljesítmény:  $P = W/t = \frac{1}{2}A\rho v^3$
  - Példa
    - $r = 32 \text{ cm} \rightarrow A = 0.32 \text{ m}^2$
    - Szél sebessége: 4.5 km/h (1.25 m/s)
    - $P_{\text{max}} = 405 \text{ mW}$
    - Hatásfok kb. 10%  $\rightarrow P = 0.1 \cdot P_{\text{max}} = 40 \text{ mW}$



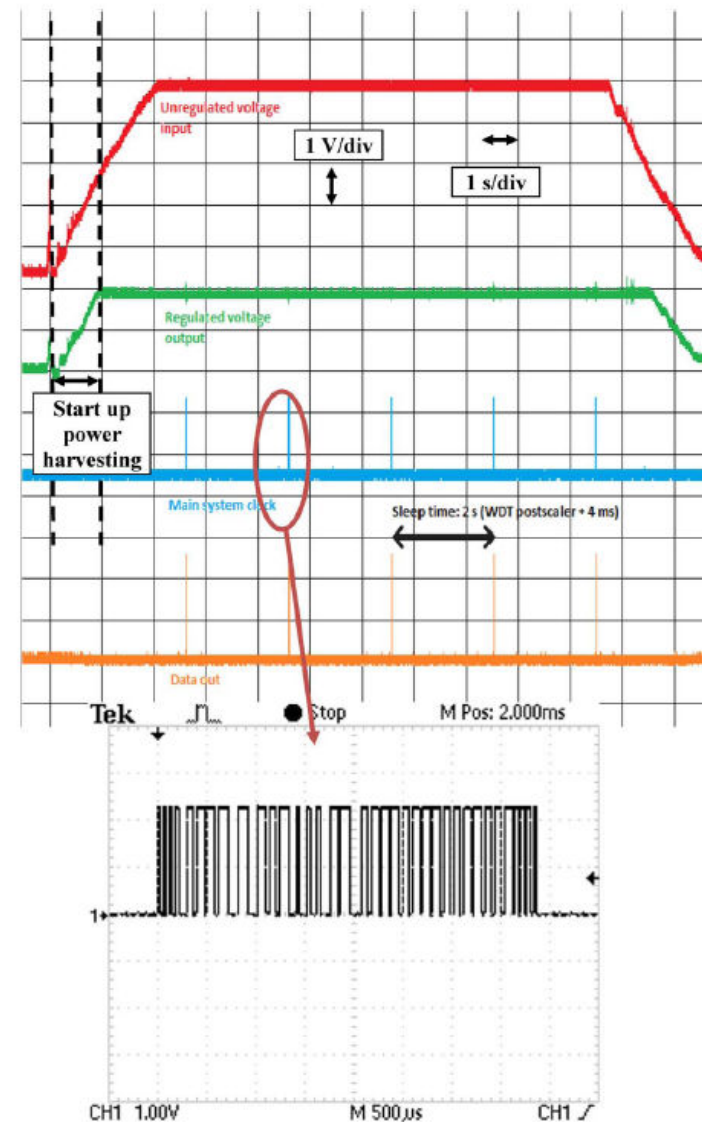
$$m_{\text{levegő}} = V \cdot \rho = l \cdot A \cdot \rho = v \cdot t \cdot A \cdot \rho$$

$$\rho \approx 1.29 \text{ kg/m}^3$$

# Szélenergia felhasználása

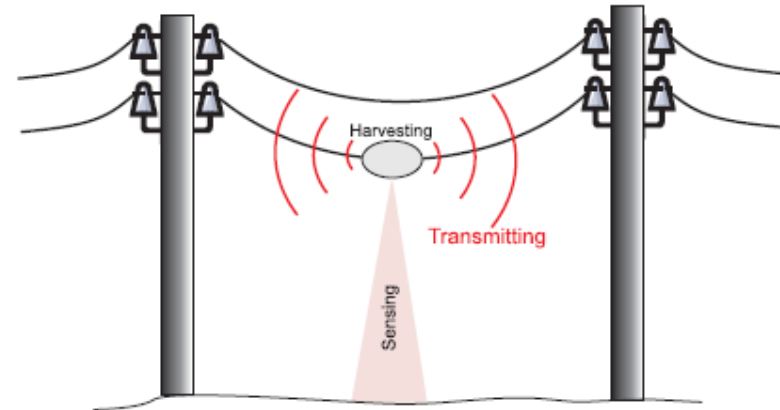
- Esettanulmány: környezeti monitorozó (szélesebesség + hőmérséklet)  
Forrás: Self-Powered Wireless Sensor for Air Temperature and Velocity Measurements With Energy Harvesting Capability
- Szélesebesség mérhető a turbina fordulatszámából
- Szakaszos üzem kb. 2msec periodicitással

	Current consumption	Voltage level	Power supply
Measurement activity	280 $\mu$ A	2.2 V	616 $\mu$ W
RF transmission	13 mA	2.2 V	28 mW
Stop Mode	40 $\mu$ A	2.2 V	88 $\mu$ W
Temperature sensor	7.5 $\mu$ A	2.2 V	16.5 $\mu$ W
Velocity sensor & conditioning	100 $\mu$ A	2.2 V	220 $\mu$ W

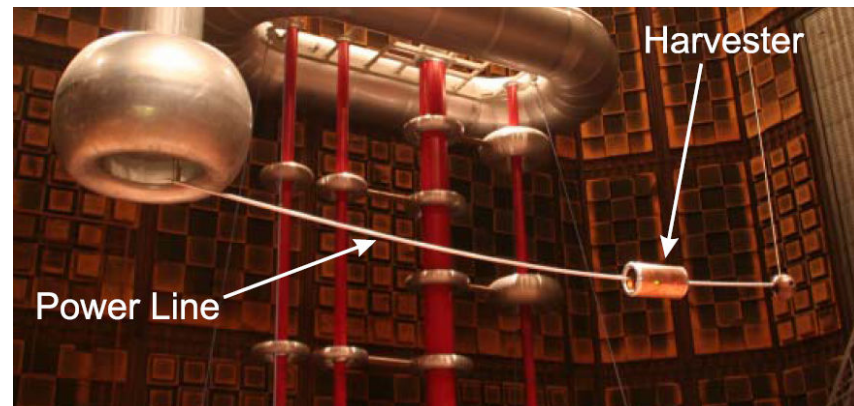


# Villamos erőter használata

- Esettanulmány: Energy Harvesting for Online Condition Monitoring of High Voltage Overhead Power Lines
- Kábelek igénybevételének mérése (lengés a szél miatt, fagyosodás, lelógás)
- Elektromos erőter használata. Okok:
  - Az áram mágneses tere függ az áramerősségtől, mely függ a fogyasztók számától → nehezen tervezhető
  - Elektromos erőter csak a feszültségtől függ, mely viszonylag állandó



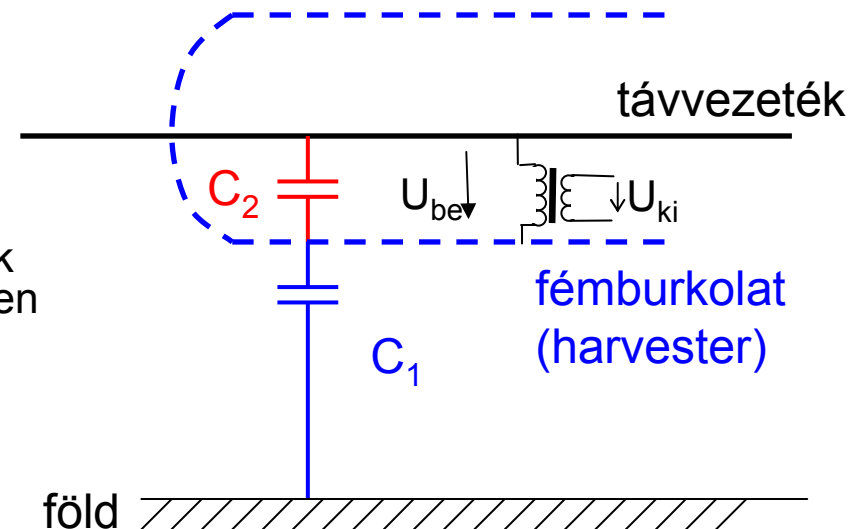
teszt elrendezés



# Villamos erőter kihasználása

- Teljesítményanalízis (forrás: Energy Harvesting for Online Condition Monitoring of High Voltage Overhead Power Lines)
- PI:  $U=10\text{kV}$ -os távvezeték
- $C_2$  és  $C_1$ : szórt kapacitások a távvezeték és a modul fémburkolata, illetve a fémburkolat és a föld között
- $C_1$  a meghatározó a föld felé szivárgó áram szempontjából
- Szimuláció:  $C_1 = 19\text{pF} \rightarrow X_c = 1/(2\pi \cdot f \cdot C) = 1/(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 19\text{pF}) = 167\text{M}\Omega$
- A távvezeték és fémburkolat között kialakuló feszültség  $U_{be}$ : néhány kV
- Várható szivárgási áram:  $I=U/X_c=10\text{kV}/167\text{M}\Omega \approx 50\mu\text{A}$
- Ha  $U_{be}$  néhány kV feszültséget feltételezünk, akkor  $0.1 \dots 0.5\text{mW}$  teljesítményt kapunk
- $U_{be}$  túl nagy közvetlen felhasználásra, ezért transzformátorral csökkentjük a feszültséget
- Kimenőfeszültség:  $U_{ki}$

A modul áramköri paneljének elhelyezésének célszerű orientáltsága: vezetékre merőlegesen



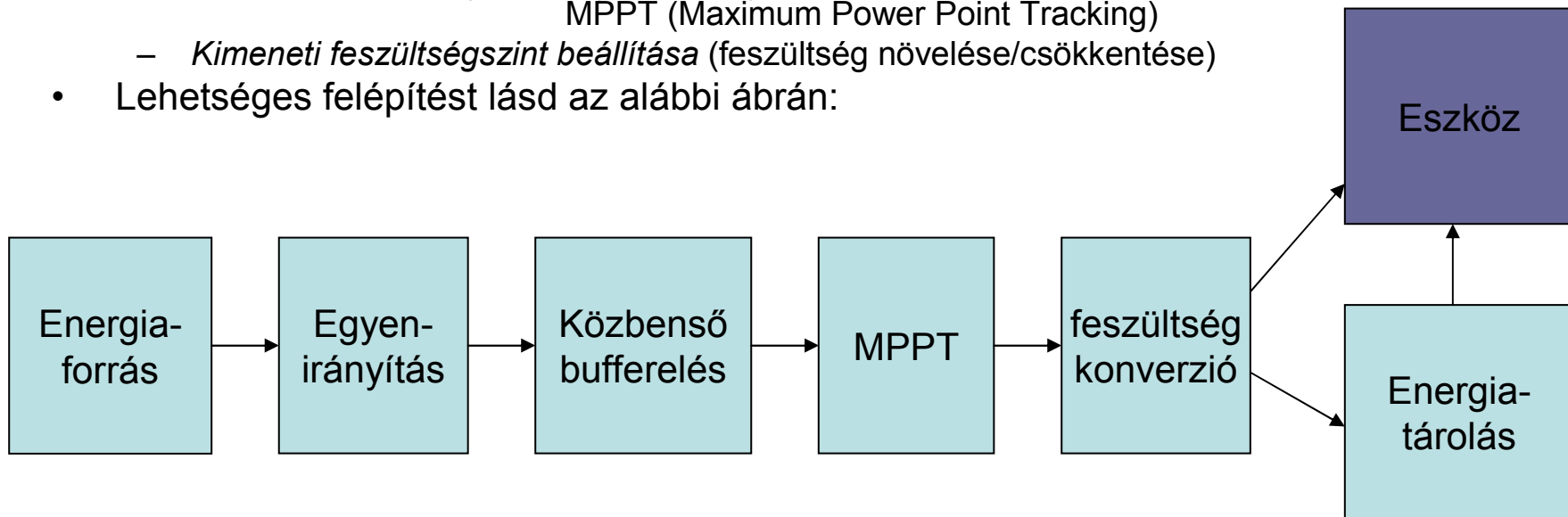
# Energiaforrások összehasonlítása

- Adatok: Alternative Energy Sources for Sensor Nodes: Rationalized Design for Long-Term Deployment
- Li/SOCl<sub>2</sub> elem
  - 3.6 V cellafeszültség
  - 8500 mAh (tárolt töltés:  $Q=8.5\text{Ah}\cdot 3600\text{sec/h}=30600\text{C}$ )
  - 10 éves élettartam (feltételezzük, hogy nem cseréljük ki)
  - 110 kJ ( $W=QU=30600\text{C}\cdot 3.6\text{ V}$ )
- Fényenergia
  - Schott Solar OEM modul
  - 90x72 mm<sup>2</sup>
  - 500 lux: normál irodai világítás
  - 0.8 mW ( $P=0.8\text{ mW}$ )
  - Napi 8 óra működés
  - 10 éves üzemidő ( $T=10\cdot 365\cdot 8\cdot 3600\text{ sec}$ )
  - Összes termelt energia: 84 kJ ( $W=PT$ )
- Mechanikai rezgésátalakító
  - Perpetuum PMG17-120 vibration energy harvester
  - Rezgés: 0.025g ( $g=9.81\text{ m/s}^2$ )
  - Termelt teljesítmény: 0.8 mW
  - 24 órás működés
  - 10 éves üzemidő ( $T=10\cdot 365\cdot 24\cdot 3600\text{ sec}$ )
  - Összes termelt energia: 252 kJ
- Hosszú időtartamra vetítve az elemmel összemérhető energia termelhető alternatív energiaforrások segítségével



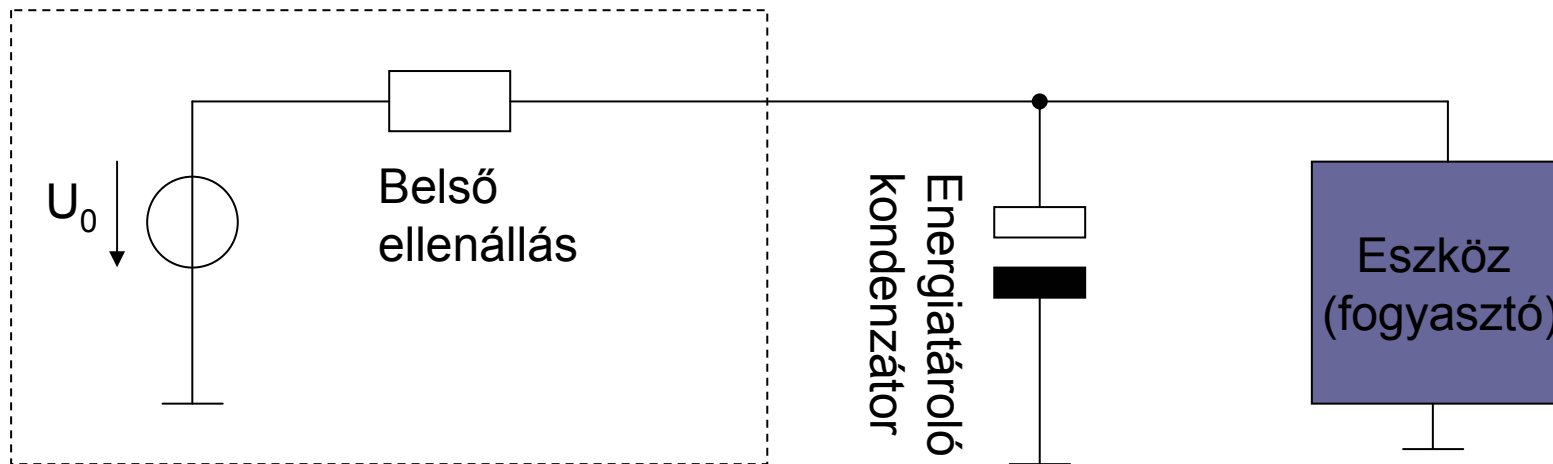
# Alternatív energiaforrások illesztése

- Problémák
  - Szakaszos üzem (mind a tápforrás, mind az eszköz részéről)
  - Változó tápfeszültség
  - Kis teljesítmény
  - Túl kicsi/nagy feszültség
  - Nagy kimenőellenállás
  - Bizonyos esetekben váltófeszültség (piezo)
- Közvetlenül nem mindig használhatóak tápforrásként
- Szükséges műveletek
  - Egyenirányítás (pl. Graetz-híd)
  - Energia tárolása: elsődleges / másodlagos energiatárolás
  - Maximális kivett teljesítményre szabályzás (kevésbé általános):  
MPPT (Maximum Power Point Tracking)
  - Kimeneti feszültség szint beállítása (feszültség növelése/csökkentése)
- Lehetséges felépítést lásd az alábbi ábrán:



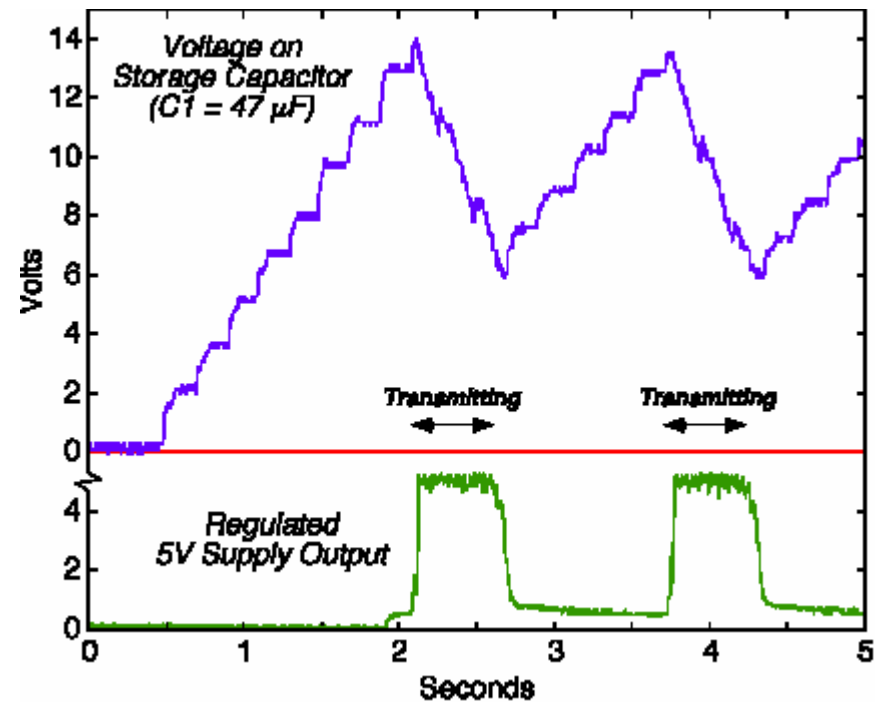
# Alternatív energiaforrások illesztése

- Szakaszos üzem és energiatárolás kondenzátor vagy szuperkapacitás segítségével
- Akkumulátorok folytonos töltése sokszor nem előnyös: bonyolult töltési „protokoll” szükséges. Bizonyos akkumulátorok nem tolerálják a rátöltést. → kondenzátor, mint közbenső energiatároló
- Szuperkapacitás: nagy kapacitású kondenzátor (több Farad)
- Kondenzátor: tipikusan elektrolit vagy tantál kondenzátor (kb. 10-1000  $\mu\text{F}$ )
- Működési szakaszok:
  - Az eszköz inaktív állapotában a kondenzátor töltődik, tárolja az energiaátalakító által termelt energiát
  - Aktív állapotban: a töltés folyamatosan fennáll, de az eszközön keresztül kisül a kondenzátor, és csökken a feszültsége
- Aktív állapot hossza: amíg a kondenzátor feszültsége a megengedhető üzemi feszültség alá csökken
- Környezetvédelem: pl. a szuperkapacitás szerves anyagot is tartalmaz, így kevésbé környezetszennyező, mint az elem vagy akkumulátor.



# Alternatív energiaforrások illesztése

- Energiatároló kondenzátor méretezése (egyszerűsített modell, exponenciális töltődés és kisütés helyett lineáris közelítés)
- Mekkora lehet az aktív állapot hossza adott feszültség szintek, kapacitásérték és fogyasztás esetén
- Áramfelvétel aktív állapotban:  $I_a$
- Bufferkondenzátor kapacitása:  $C$
- Maximális kondenzátor feszültség:  $U_{\max}$
- Minimális üzemi feszültség:  $U_{\min}$
- Aktív állapot hossza ekkor:  
$$T_a = (U_{\max} - U_{\min})C / I_a$$
- Példa: piezogenerátoros cipő (lásd korábbi dia)  
A példa fordított: most az áramfelvételt számítjuk, mert a többi paraméter olvasható le az ábráról.
- $$I_a = (U_{\max} - U_{\min})C / T_a$$
  
$$I_a = (14V - 6V)47\mu F / 0.75 s = 0.5 \text{ mA}$$



Feszültségfüggvények piezogenerátoros cipő esetén

# Alternatív energiaforrások illesztése

- Kész megoldás: EH300/EH301  
EPAD® ENERGY  
HARVESTING™ Modules
- AC/DC bemenetet is fogad
  - 0 ... 500 V bemenő feszültség
  - 200 nA ... 400 mA bemenő áram
  - Piezo
  - Napelem
  - Termoelektromos generátor (TEG)
  - 1.8 ... 3.6V kimenőfeszültség
- Energiatárolás
- AA elemmel kompatibilis méret
- Szennyezés és pára elleni védelem

Töltéstároló kapacitás

