

A glowing light bulb is the central focus, with its filament illuminated. The background is a soft, out-of-focus blue. Overlaid on the image is a faint, light blue circuit board pattern with various lines and circular nodes. A dark, semi-transparent rectangular box is positioned in the center, containing white text.

**Energia jest wszędzie, trzeba się
tylko umiejętnie po nią „schylić”.**

SYSTEMY POMIAROWO-RADIOWE, WSPOMAGANE
TECHNIKAMI ENERGY HARVESTING

O czym będziemy mówić?

- Trochę o mnie oraz geneza i cel wystąpienia,
- Koncepcja ogólna Energy Harvesting (EH),
 - Charakterystyka systemów Low Power (LP) i Trochę o Teorii Informacji,
 - Charakterystyka mikro-źródeł energii,
 - Charakterystyka zasobników energii,
 - Architektury systemów EH Układy scalone,
 - Zarządzanie energią,
- Rozwiązania rynkowe i proof of concept,
- Przyszłość i szanse EH.

Trochę autoreklamy

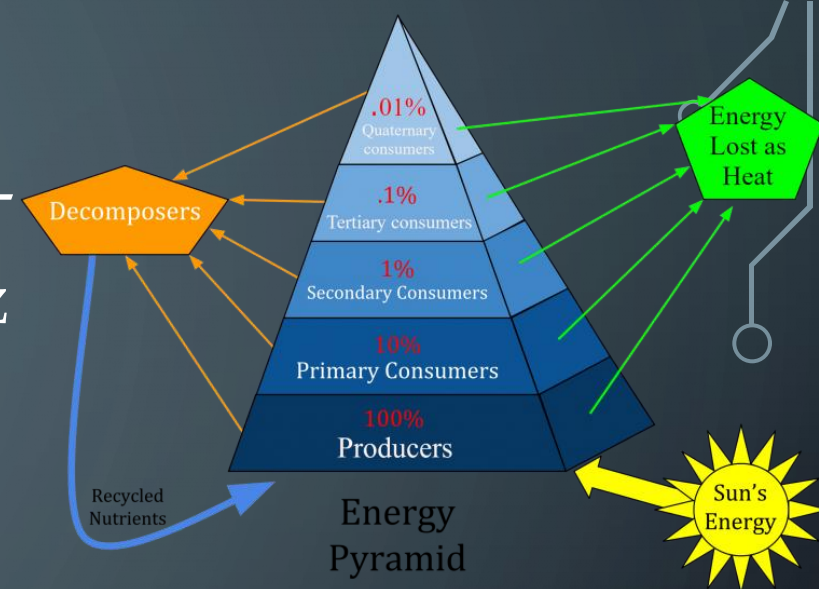
Konstruktor Elektronik - elektronika mocy, przetwarzanie energii, elementy magnetyczne, EMC, Radio/ HF

- Lincoln Electric – projektowanie elektroniki w urządzeniach spawalniczych
- Fizyka,
- Fascynacja losowością, rolą szumu, ergodycznością
- Krótkofalarstwo – SQ6NTO



Geneza prezentacji

- Potrzeba zaprojektowania systemu pomiarowo-radiowego bez dostępu sieci energetycznej oraz konieczność ograniczenia do minimum jego utrzymania/ serwisu;
- Co można z tego zasilić ?
- Codzienne pytanie – „Ile energii marnuje się dookoła?”
- Uporządkuiowanie informacji w ustrukturyzowanej formie,
- Czemu EH to nie OZE – problem skali



Czym jest Energy Harvesting?

Zbiór technik pozyskiwania **małoskalowej energii z otoczenia**, a także jej **magazynowanie i zarządzanie** w celu zasilania **urządzeń o bardzo małym poborze energii** (np. sieci czujników, wearables), zwykle w trybie **Low-Power**, aby **zmniejszyć zależność od baterii/sieci** mimo **niskiej gęstości mocy i zmienności źródeł**.



*Grube ryby –
nieopanowany,
przepływ energii w
środowisku*



*Rybki czyszciciele –
Harwestery, łapiące
„ochłapy”*



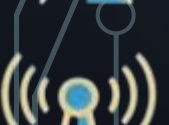
*Radio kryształkowe – historycznie
pierwsze zastosowanie EH*

Energy Harvesting ogólnie

Brak któregoś z elementów ==
niedomknięty budżet energii



Energia
Otoczenia



Przetworniki
energii

- Panele PV,
- TEG (Peltier),
- Przetworniki mechaniczne

Układ(y)
konwersji

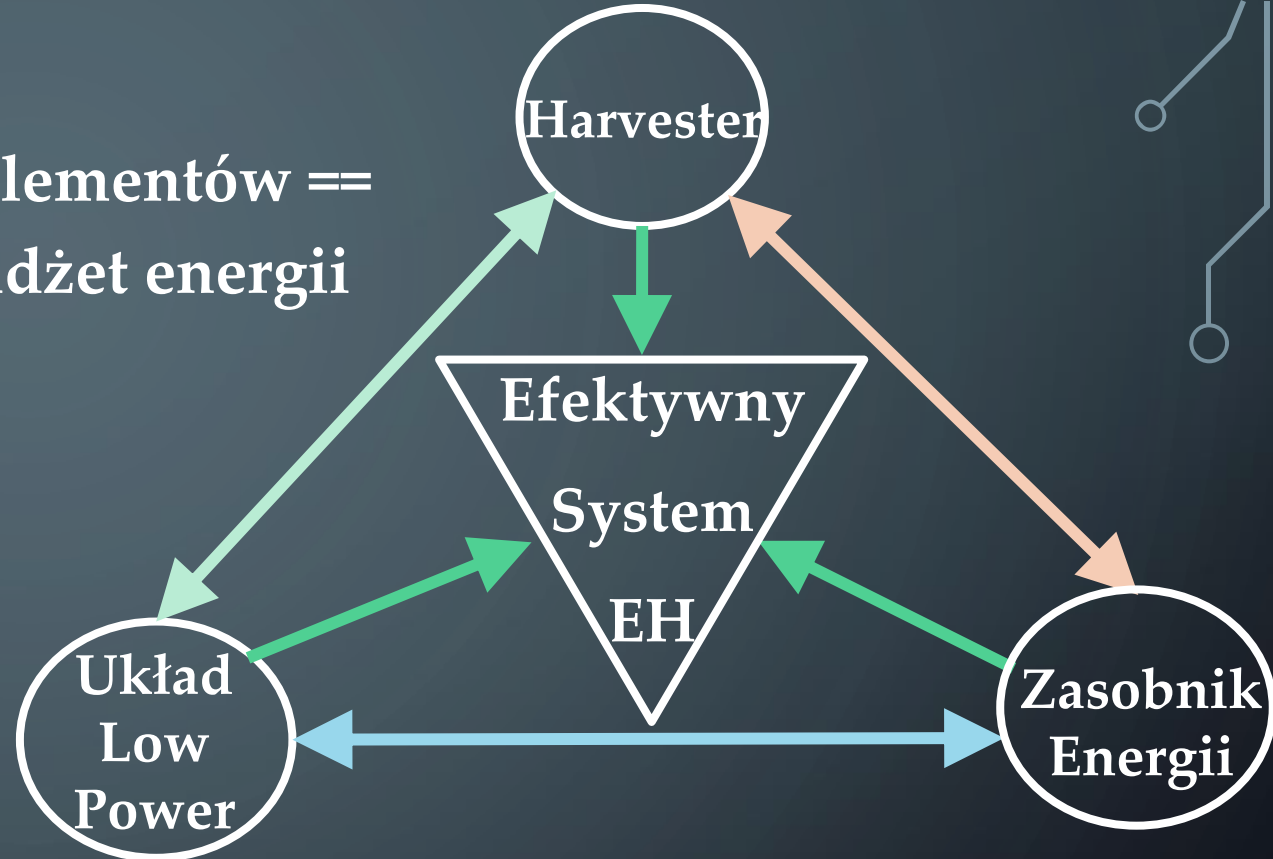
- Prostowniki synchr.
- Przekształtniki Buck-Boost

Zasobnik(i)
Energii

Układ
Nadzorujący

Obciążenie -
czujniki/ TX

- Sensor, MCU +Radio Low Power



Struktura ograniczeń Harvestingu

- Granice narzucone przez fizykę są bardzo wysoko
- No to gdzie jest hamulcowy ?...okazuje się, że jest ukryty, a nazywa się „geometryczny spadek sprawności”

- Organizacja schematu myślenia o ograniczeniach – struktura lejka;

II zasada termodynamiki

$$\Delta S \geq 0$$

Ograniczenia Teoretyczne

Sfera Daysona

Ograniczenia Fizyczne

Ograniczenie Technologiczne

Konwersja energii

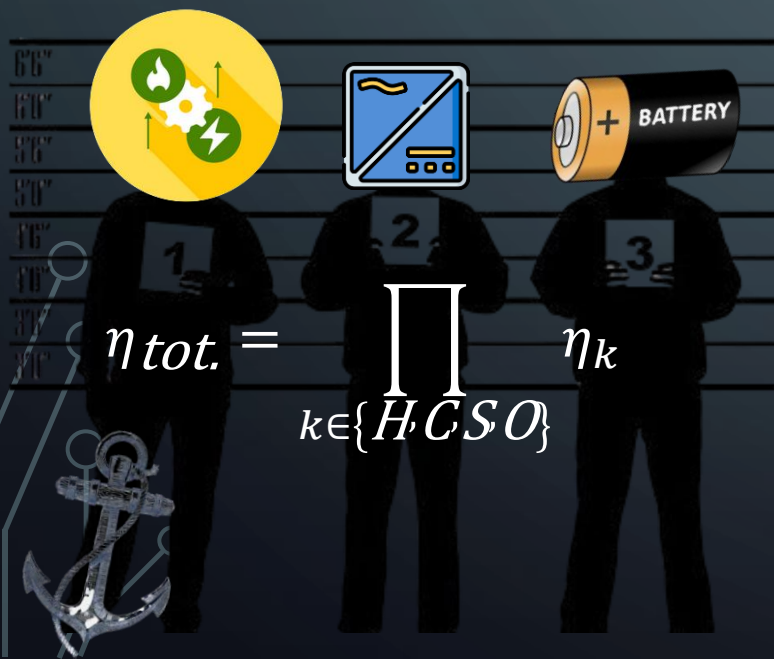
Ograniczenia Operacyjne

Koszty, wygoda użytkowania

Realna energia do pozyskania

- $\eta_{tot.}$ – całkowita sprawność toru zasilania,
- η_k – sprawność **k-tego bloku** (harvester, przetwornica, bufor, ...),
- N – liczba bloków w łańcuchu zasilania.

Całkowita sprawność to iloczyn sprawności wszystkich kolejnych bloków toru energii

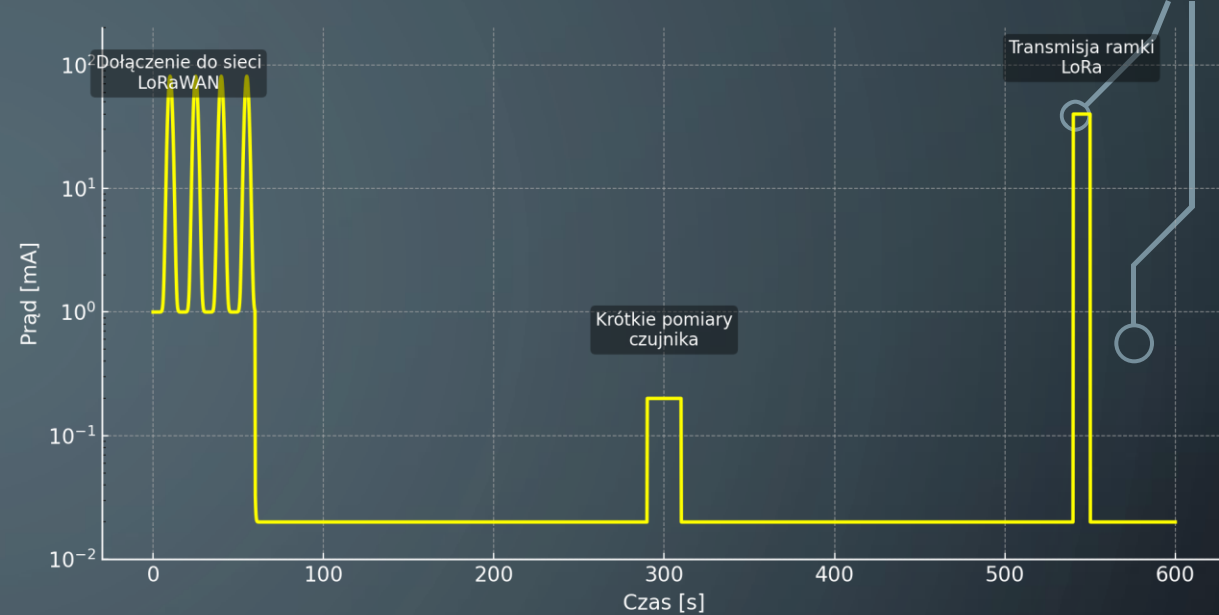


Scenariusz	$\eta_{H\text{harvester}}$	$\eta_{C\text{przetwornica}}$	$\eta_{S\text{magazyn}}$	$\eta_{O\text{inne}}$	$\eta_{tot.}$
Optymistyczny	20%	90%	95%	95%	~16%
Realistyczny	10%	80%	90%	90%	~6,5%
Pesymistyczny	5%	70%	80%	85%	~2,4%

Low Power - ogólnie



Bezwładność a korzyść – ograniczenie f.sampl. dla wielkości wolnozmiennych. Adaptacyjna f. do tempa zmian. Godzenie się na drobny uchyb. Interpolacja



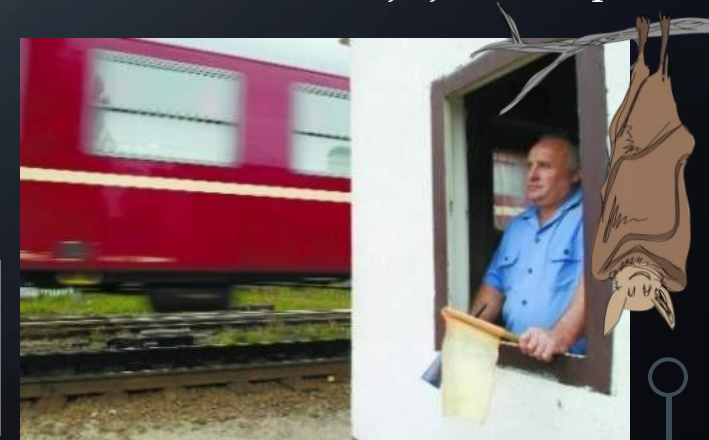
Projekt i planowanie – budżet energetyczny, wielopoziomowe zasilanie, niższe napięcia wybranych bloków

Dyty cycling – zasilania modułów; grupowanie zadań w krótkich sesjach pracy, by szybciej wrócić do stanu uśpienia.

Dróżnik - LP. Mniejsza aktywność przez większość czasu i wzmożona koncentracja przy otwierania przejazdu

System LP często hibernuje jak nietoperz

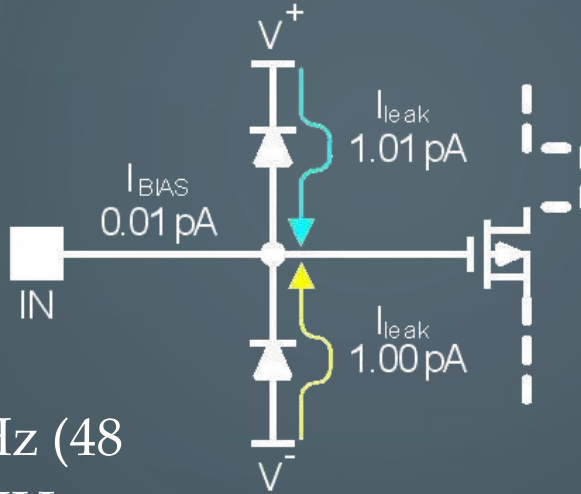
Teza: „Jesteśmy uwięzieni zależności kontekstowej – w konwencjonalnych projektach nie zwracamy często uwagi na miliwaty, na nieprzemysłane rezystory do LEDów, podczas gdy w EH każdy mikrowat jest cenny”.



Low Power - komponenty

Mikrokontrolery ULP

- Procesy technologiczne z niskimi upływami, praca niskie napięcie zasilania.
- Nowe: Ambiq Apollo3 $\sim 6 \mu\text{A}/\text{MHz}$ (48 MHz $\approx 0,3 \text{ mA}$), Apollo4 $\sim 4 \mu\text{A}/\text{MHz}$.



Głębokie tryby uśpienia

- Sleep $< 1 \mu\text{A}$ to dziś standard, nowsze układy schodzą w zakres nA.
- Podtrzymany RAM, działający RTC, pobudki z przerwań.

Obniżanie częstotliwości ma sens tylko wtedy, gdy czas aktywny nie jest ograniczony mocą CPU. W przeciwnym razie lepiej wykonać zadanie jak najszybciej i wrócić do deep-sleep

Czujniki low-power

- Projektowane do pracy ciągłej na μA .
- ADXL362: $< 2 \mu\text{A}$ @100 Hz, wake-on-motion ok. 270 nA.
- BME280: ok. $3,6 \mu\text{A}$ @1 Hz, sleep $\sim 0,1 \mu\text{A}$.

Architektura

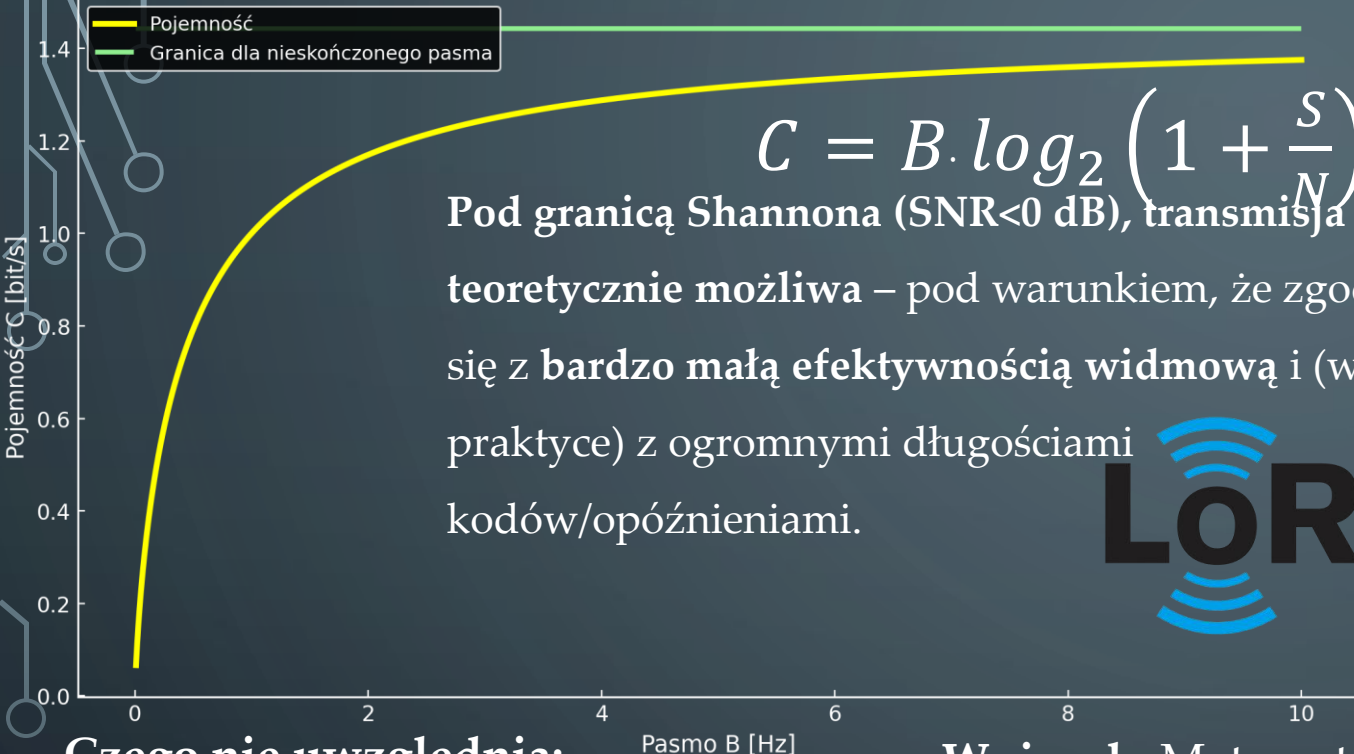
- Peryferia autonomiczne (timery, ADC, DMA) działają przy śpiącym CPU.
- „Smart” sensory – lokalne wykrywanie zdarzeń i budzenie MCU tylko gdy trzeba.

Oprogramowanie

- Zasada: „śpij zawsze, gdy nie liczy się kod”.
- Sleep przez WFI/WFE, zero busy-wait.
- Wyłączanie zegarów/periferiów nieużywanych w danej chwili.

Low Power (LP) a teoria informacji

Pojemność kanału Shannona AWGN dla $S/N_0 = 1$



Pod granicą Shannona (SNR < 0 dB), transmisja jest teoretycznie możliwa – pod warunkiem, że zgodzimy się z **bardzo małą efektywnością widmową** i (w praktyce) z ogromnymi długościami kodów/opóźnieniami.



Czego nie uwzględnia:

- realnych ograniczeń czułości, synchronizacji, oscylatorów, i **skończonych** długości kodu,
- rosnącej złożoności i opóźnienia, gdy zbliżamy się do granicy.

Wniosek: Matematycznie można

„na poziomie/pod szumem”.

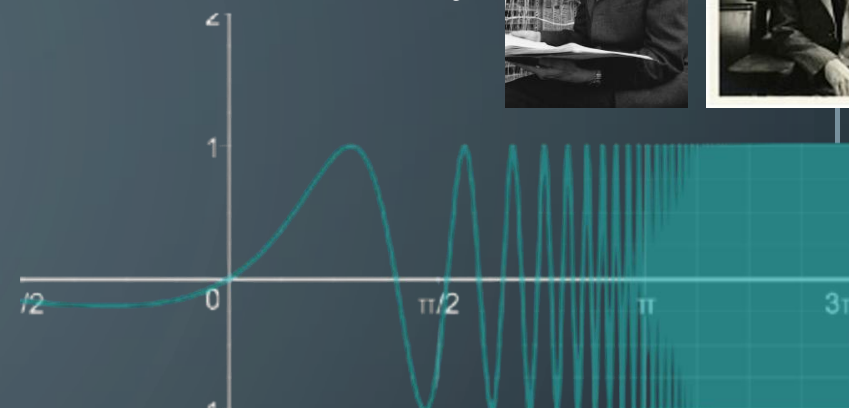
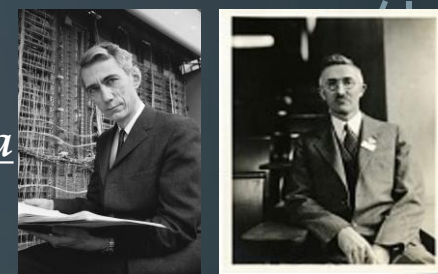
Fizycznie – tylko kosztem

malejącego R/B, rosnącego

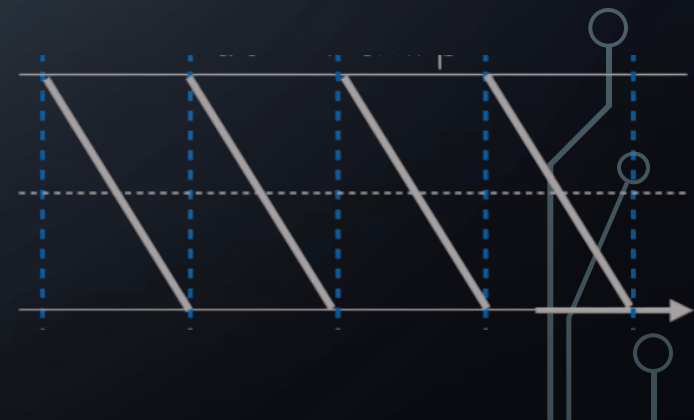
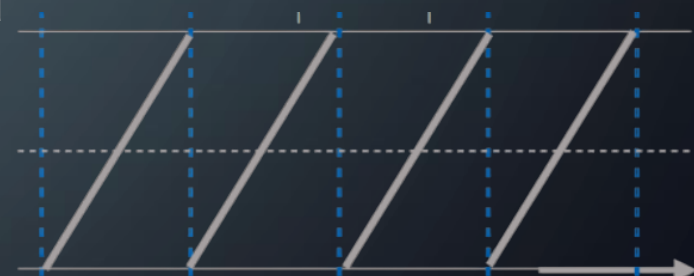
opóźnienia/kodu i z dużą dbałością

o resztę toru odbiorczego.

Twierdzenie Shannona-Hartleya



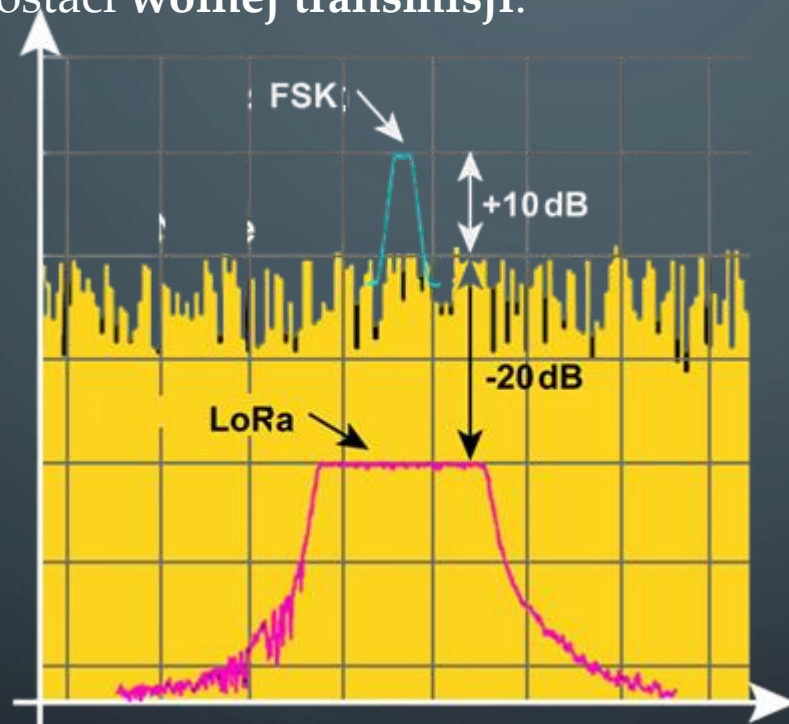
Przykład sygnału świergotowego



Low Power - LoRa

LoRa „kupuje” działanie przy **ujemnym SNR** przez **spread (CSS)** + **długie symbole** $\Rightarrow$ bardzo mała efektywność widmowa, ale **niskie wymagania mocy**. To jest praktyczna realizacja idei „poniżej szumu” z ceną w postaci **wolnej transmisji**.

Odbiornik LoRa może odtworzyć z powodzeniem sygnał 20 dB pod poziomem szumów, co skutkuje czułością nadajnika do nawet -149 dBm



–149 dBm w LoRa to tak, jakby dojrzeć gołym okiem **pojedynczą świeczkę niemal po drugiej stronie Ziemi** – dla odbiornika z wąskim pasmem, dużym zyskiem przetwarzania i integracją w czasie – jak najbardziej do ogarnięcia.



-Shanon: „Możesz nadawać pod szumem, ale to będzie kosztować przepustowość.”

-LoRa: „Dobra. Masz tu świergot + długie symbole i spadaj.”



Obciążenia Low Power a Harvestery

Czujnik z
t.sampl. ~3 h

MSP430
(sleep)



Radio
CC2500
(sleep)

MSP430
(awake)

Radio
CC2500
(TX)

Węzeł
ZigBee
mesh +
czujnik



„Komórka”

1 μ W

10 μ W

100 μ W

1 mW

10 mW

100 mW

1 W

Małe
belki
piezo



1cm² Si PV
oświetlenie
kabinowe

Harvestery
„dzwonkowe”

Większe
harvestery
indukcyjne

Ogniwo PV-Si 1 cm² w
nasłonecznionym
oknie samolotu

Bardzo umowna granica Energy Harvesting

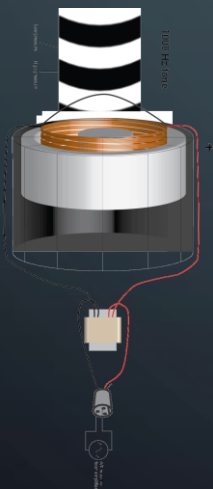
ENERGY HARVESTING OGÓLNI

ENERGY HARVESTING

Źródła Mechaniczne

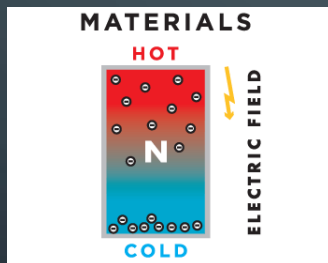
Napężenia/
Odkształcenia

Wibracje



Źródła Termiczne

Różnice
Temperatur

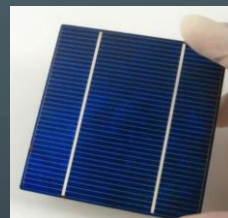


Źródła Promieniowania

Słoneczne
Zew.



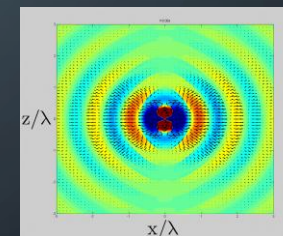
Słoneczne
Wew.



IR



RF



Źródła Biochemiczne

Biochemia

Źródła – Energia Słoneczna

- Maksymalna (teoretyczna) gęstość mocy promieni słonecznych na ziemi :

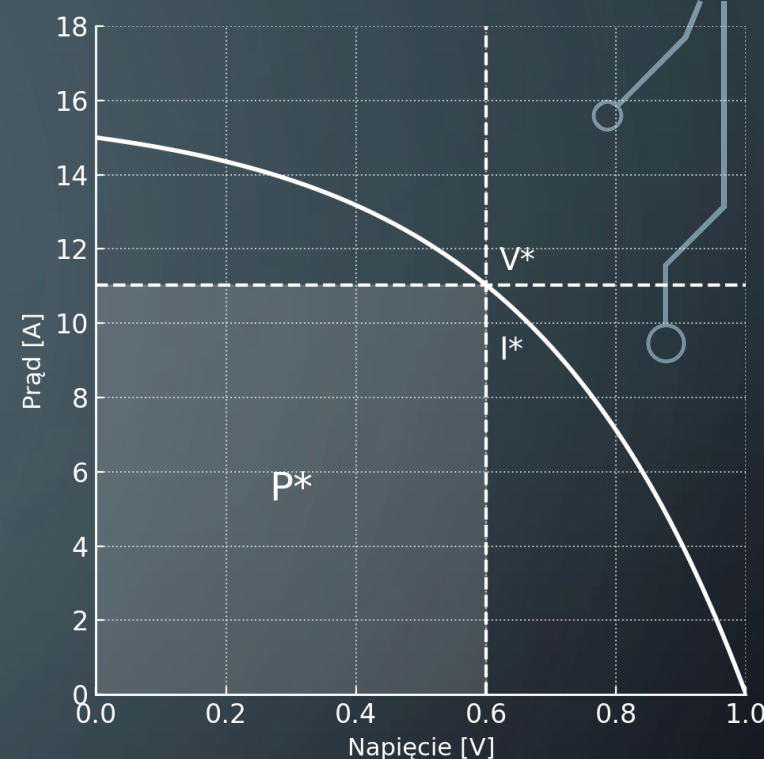
$$1000 \text{ W/m}^2 \approx 100 \text{ mW/cm}^2$$

w południe, latem, bez chmur, przy padaniu promieni pod kątem prostym

- nocą przy pełni Księżyca to tylko $\sim 1 \text{ mW/m}^2$
- zimą (w Europie) energia słoneczna to ok. 1/10 wartości letniej
- wewnątrz pomieszczeń: ok. $500\text{--}1000 \text{ mW/m}^2$
- tłumienie wraz z odległością od źródła światła jest bardzo duże

Zmienna moc wyjściowa:

- Nasłonecznienie,
- Punkt pracy
- Temperatura, starzenie...



Typowa sprawność ogniw PV: 10–24%

- 2–5% dla bardzo tanich / bardzo małych ogniw



ŹRÓDŁA – TEMPERATURA (TEG)

- Efekt Seebecka – bezpośrednie przetwarzanie różnicy temperatur na energię elektryczną.

- Sprawność (górne ograniczenie): $\eta \approx \frac{\Delta T}{T}$

- gdzie T – tem. absolutna (w kelwinach),

- ΔT – różnica temperatur między stroną gorącą i zimną.

- Dla $T = 20^{\circ}\text{C} \approx 293\text{ K}$ i $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ | $\eta \approx 1,6\%$.

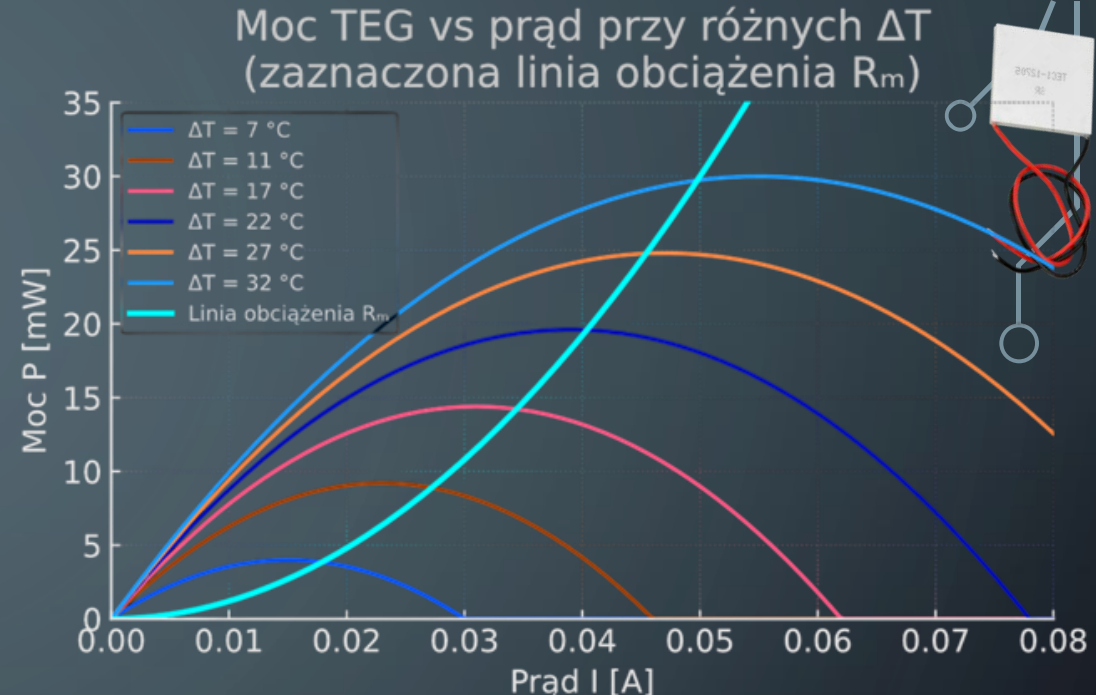
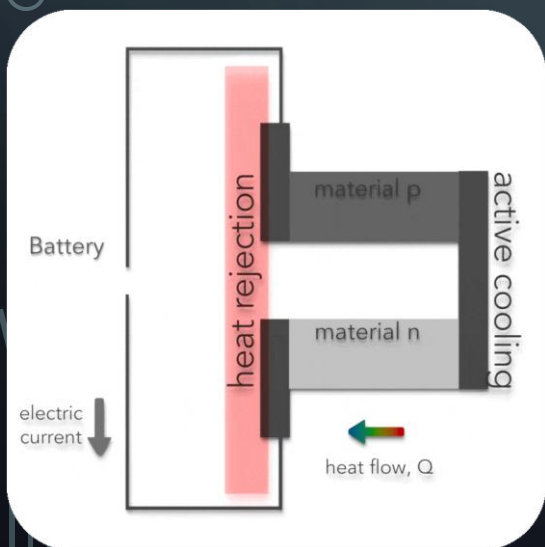
$$V_{OC} = \alpha_{\Delta T} \Delta T_{TEG}$$

$$P_{max} = \frac{\alpha^2}{4 \cdot R_{el,TEG}} (\Delta T_{TEG})^2$$

Napięcie wyjściowe TEG jest bardzo niskie.

Rezystancja wew. zależy od temperatury i starzenia,

→ więc położenie MPP też „pływa” stąd potrzeba MPPT,



- TEG ma MPP (zwykle w okolicy połowy V_{OC}), zmieniający się wraz z ΔT

$$V_{MPP}(\Delta T) \approx \frac{1}{2} V_{OC}$$

- Realne sprawności są dużo niższe (straty materiałowe, kontaktowe, etc).

- Moc wyjściowa rośnie mniej więcej jak:

$$P_{out} \propto \frac{(\Delta T)^2}{T}$$

- podwojenie $\Delta T \sim 4\times$ większą moc, ale im wyższa temperatura absolutna, tym gorzej z efektywnością.

Źródła – Energia Mechaniczna

Wibracje a elektrostatyka

Wibracje – konwersja elektrostatyczna

Ogólny model mocy z wibracji (wg William et al. 1995):

$$P = \frac{m \zeta_e^2 A^2}{4 \omega (\zeta_e + \zeta_m)^2}$$

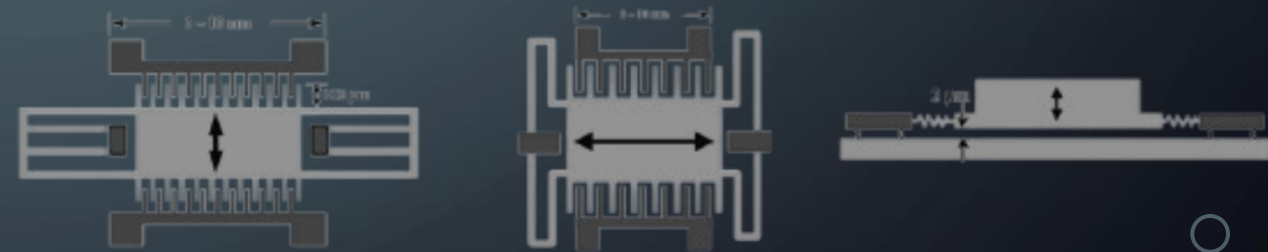
gdzie:

- m – masa drgająca (proof mass),
- ζ_e – elektryczny współczynnik tłumienia,
- ζ_m – mechaniczny współczynnik tłumienia,
- A – amplituda przyspieszenia wibracji,
- ω – częstotliwość rezonansowa (i częstotliwość pobudzenia).

Intuicyjnie:

- **Moc wyjściowa rośnie wraz z masą układu:** większa masa $\rightarrow$ więcej energii kinetycznej do „zebrania”.
- **Moc rośnie z kwadratem amplitudy przyspieszenia A^2 :** dwa razy większe drgania $\rightarrow$ $\sim 4\times$ więcej mocy.
- **Moc jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości ω :** przy tej samej amplitudzie wolniejsze, „cięższe” drgania zwykle dają więcej energii na cykl.

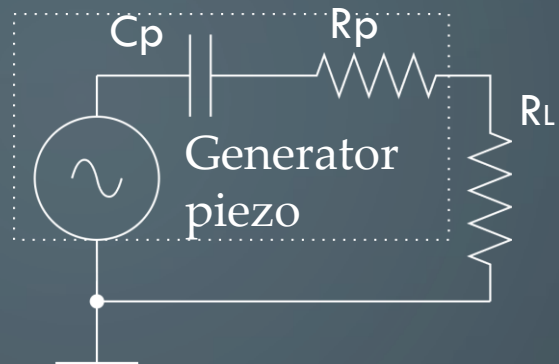
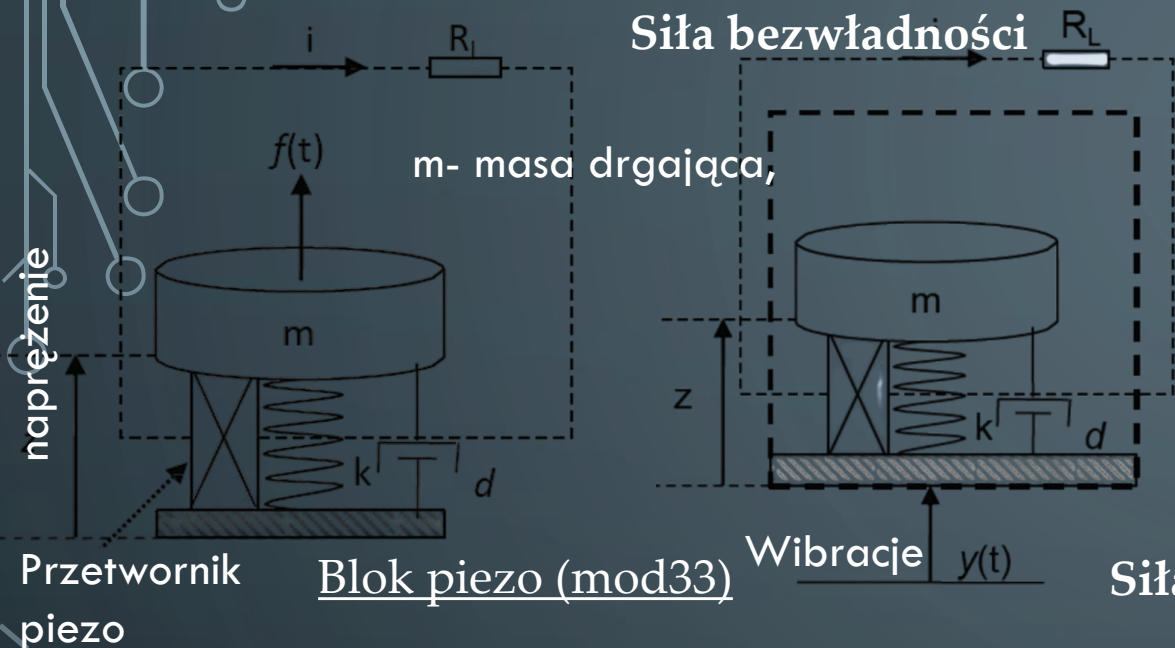
Źródło wibracji	Szczytowe przyspieszenie [m/s^2]	Częstotliwość [Hz]
Podstawa 3-osiowego centrum obróbczego	10	70
Obudowa blendera kuchennego	6,4	121
Suszarka bębnowa	3,5	121
Ościeżnica przy zatrzaśnięciu drzwi	3,0	125
Nawiew HVAC w biurze	2,25	121
Drewniany pomost z ruchem pieszym	1,3	385
Opiekacz do chleba	1,03	121
Okna zewnętrzne przy ruchliwej ulicy	0,7	100
Pralka	0,5	109
Lodówka	0,1	240



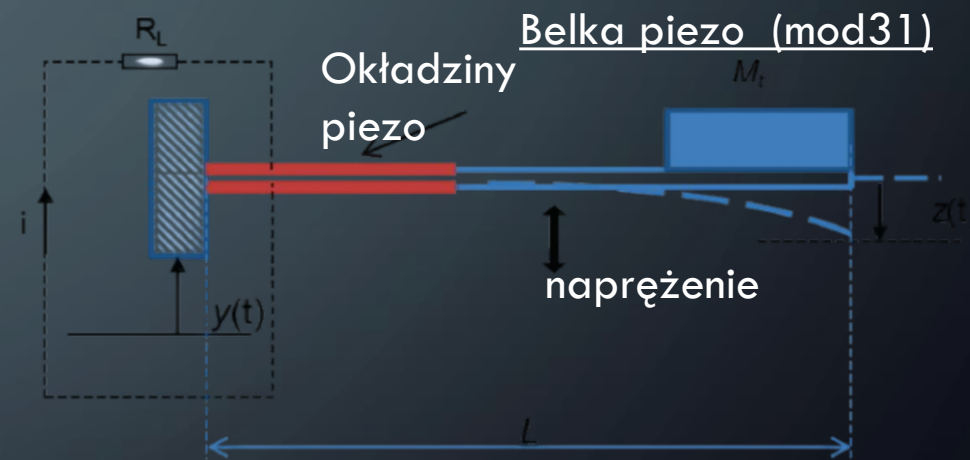
Typowo: przyspieszenia 0,1–10 m/s^2 , częstotliwości ~ 60 –200 Hz.

Elektrostatyczne harvestery projektuje się tak, by rezonans (ω) wypadł właśnie w tym zakresie.

Źródła – Energia Mechaniczna - Piezoelektryczność



<https://newatlas.com/mechanical-motion-rectifier-railroad-energy-harvester/25223/>



Generatory inercyjne są bardziej elastyczne niż te z bezpośrednim przyłożeniem siły. Wymagają tylko jednego punktu mocowania do poruszającej się struktury, co pozwala na większy stopień miniaturyzacji.

mod 33-

1szy, -kierunek odkształcenia

2gi -kierunek polaryzacji,

$$P = \frac{V_L^2}{R_L}, \text{ moc dostarczana do obciążenia}$$



1 -x długość (np. belki),
2 -y szerokość
3 -z grubość

Źródła – różne formy energii ciała ludzkiego

Ciepło 2,4 - 4,8 W

Ciśnienie krwi 0,9 W

Bicie serca/ krążenie 1,4 W

Ruch ramienia 60 W

Ruch palca 6,9-10mW

Kroki 67W

Wydychanie 1W

Energia Ciepłna

Energia chemiczna

Energia Mechaniczna

Temp. ciała

Ciepło oddechu

Ciepło parowania

Glukoza

Kwas mlekowy

H₂O

Bicie serca

Ruchy oddechowe

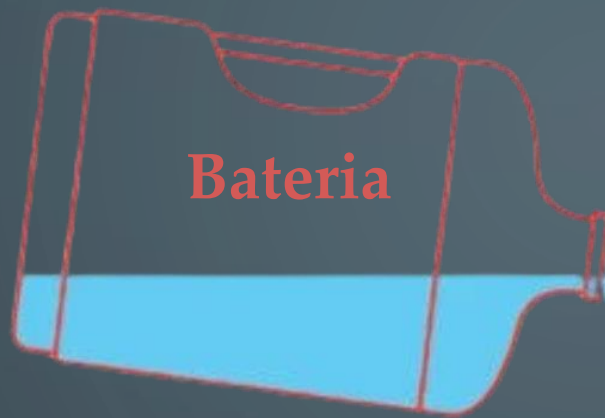
Ruch ciała



Źródła – zestawienie porównawcze

Źródło energii	Polaryzacja źródła	Sprawność	Pozyskiwana moc	Charakterystyka
Światło	DC	10–24%	100 mW/cm² (na zewnątrz) • 100 μW/cm² (biuro oświetlone)	Warunki pracy silnie zależą od poziomu oświetlenia. Do uzyskania maksymalnego transferu mocy potrzebne algorytmy MPPT .
Ciepło	DC	~0,1% (ludzkie ciało) • ~3% (przemysł)	60 μW/cm² (ciało człowieka) • ~1–10 mW/cm² (warunki przemysłowe)	Niskie napięcie wyjściowe — wymagany przetwornik podwyższający. Aby uzyskać maksymalny transfer mocy, potrzebne jest dopasowanie impedancji.
Wibracje	AC	25–50%	~4 μW/cm³ (ruch człowieka – Hz) • ~800 μW/cm³ (maszyny – kHz)	Wysokie napięcie AC z dodatnimi i ujemnymi pikami. Potrzebny prostownik oraz układy obniżające napięcie.
Przepływ powietrza	AC	~39% (turbinka dynamiczna) • ~41% (generator)	35 μW/cm² (prędkość ~1 m/s) • 3,5 mW/cm² (prędkość ~8,4 m/s)	Często wyjście dwu- lub trójfazowe — wymagany prostownik. Punkt MPP zmienia się nieznacznie z prędkością wiatru. Dopasowanie impedancji zwykle wystarcza do uzyskania maksymalnego transferu.
RF	AC	~50%	0,1 μW/cm² (GSM 900 MHz) • 0,001 mW/cm² ≈ 1 μW/m² (Wi-Fi)	

Zasobniki – bateria a superkondensator



Określona Energia

Baterie i akumulatory charakteryzują się większą gęstością energii i mogą działać dłużej.

Superkondensator

Określona Moc

Superkondensatory mają większą gęstość mocy, mogą przejmować udary prądowe



Prąd „tła” -> przewaga baterii,

Interfejs radiowy -> przewaga Superkondensatorów

Zasobniki – czas życia baterii

Dystans = czas życia/pojemność użyteczna przy danym obciążeniu.

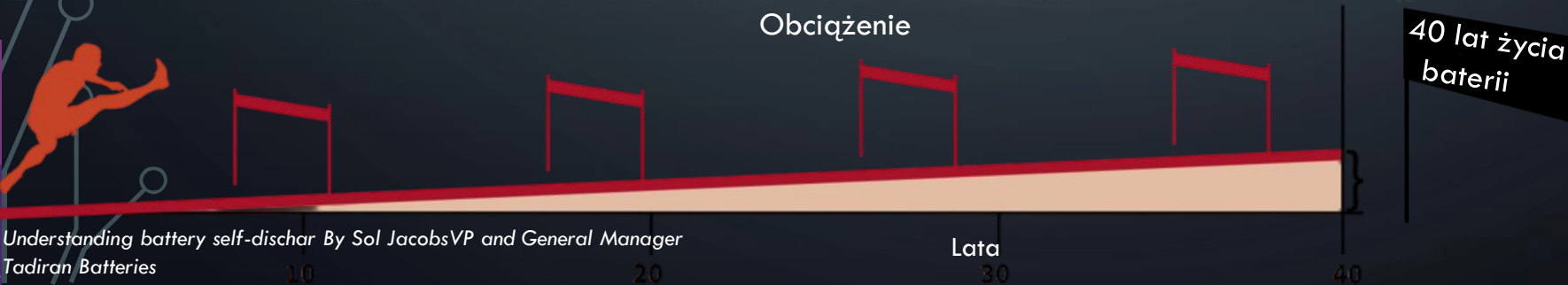
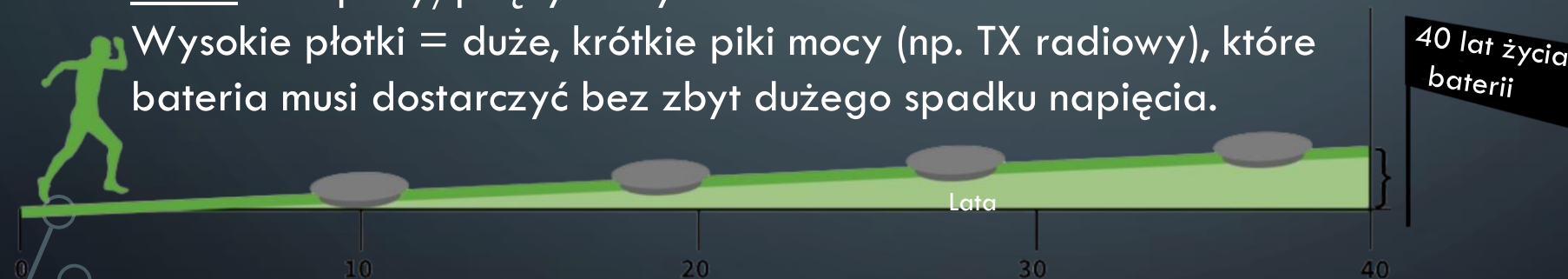
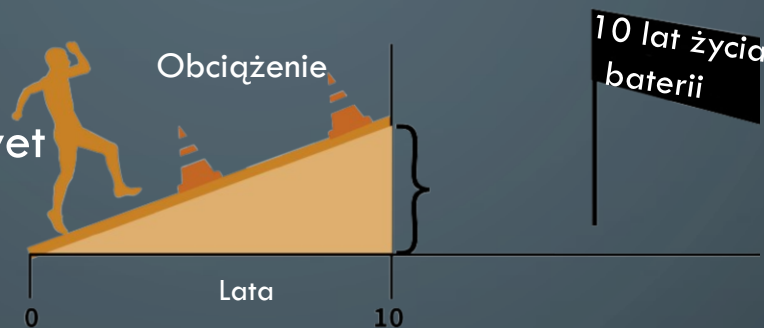
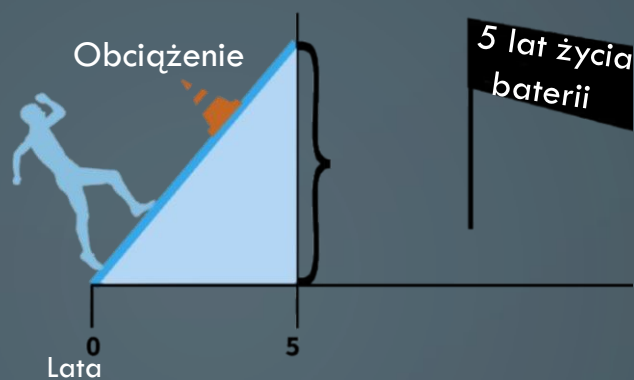
Im dalej „zawodnik” dobiegnie, tym dłużej urządzenie działa (lata pracy)

Nachylenie = samorozładowanie.

Strome wzniesienie „zjada” zapas energii nawet bez obciążenia → krótsza żywotność kalendarzowa.

Płotki = impulsy/prądy szczytowe.

Wysokie płotki = duże, krótkie piki mocy (np. TX radiowy), które bateria musi dostarczyć bez zbyt dużego spadku napięcia.



High Rate Alkaline / Li-MnO₂ Duży „rozmiar obciążenia” (wysoki prąd ciągły), **strome nachylenie** (wyższy self-discharge).

•Efekt: krótki „bieg” – ~**5 lat**. Dobrze do dużych prądów, gorsze do wieloletnich aplikacji standby.

Medium-rate bobbin Li-SOCl₂ Średnie prądy, umiarkowany self-discharge.

•Czas życia ~**10 lat**. Do umiarkowanych obciążeń i okazjonalnych impulsów.

Low-rate / low self-discharge bobbin Li-SOCl₂ Małe prądy ciągłe, **bardzo mały samorozładunek** (płaska trasa).

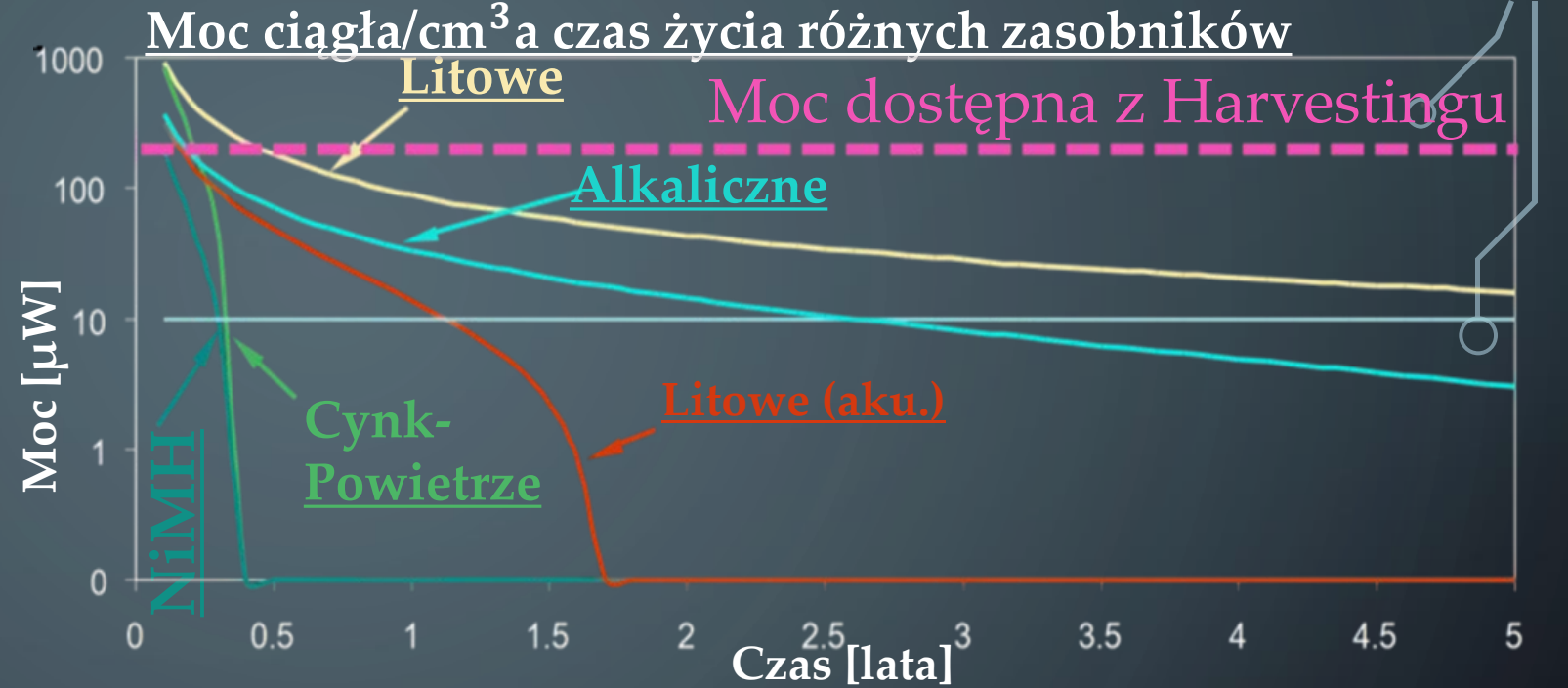
•„Maratończyk”: **do ~40 lat** przy mikropoborach; impulsy tylko niewielkie/krótkie.

•Rdzeń o **niskim samorozładowaniu + Hybrid Layer Capacitor** (superkondensator) do „zbierania” i oddawania **impulsów TX**.

•Dzięki HLC płotki są „pokonywane” bez męczenia ogniwa → **długi czas życia (do 40 lat)** mimo okresowych dużych pików.

Zasobniki – czas życia baterii a

• Krzywe baterii **opadają**, bo im dłuższy wymagany czas życia, tym **mniejszą średnią moc** możesz z nich czerpać (samorozładowanie/utrata pojemności „zjadają” budżet).



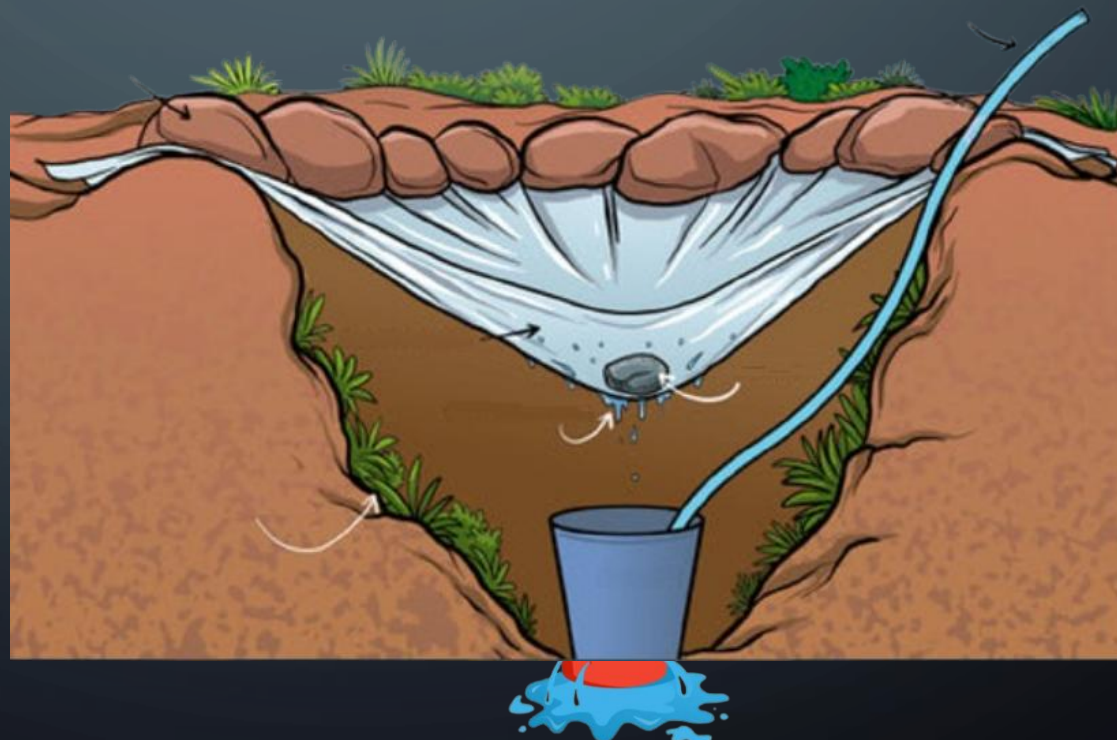
- Jeśli **średnia moc systemu** $\leq$ różowa linia, to EH pokryje zasilanie ciągłe (przy buforze).
- Jeżeli **krzywa baterii** dla wymaganego czasu leży **poniżej** zielonej linii, to **sama bateria** o tej objętości **nie wystarczy** bez częstych wymian – EH może wydłużyć życie lub pozwolić zejść poniżej progu samorozładowania.
- Przecięcie **szarej linii wymagań mocy** (10 μW) z daną krzywą mówi, **na ile lat wystarczy dany zasobnik**; jeśli zielona linia jest **powyżej** tej poziomej, **harvesting utrzyma urządzenie w nieskończoności** (z przerwami buforowanymi).

CHARAKTERYSTYKA ZASOBNIKÓW NIEDOCENIANE PRĄDY UPŁYWU-PODSUMOWANIE

**Fremeni patrzący na twoje
prądy upływu w systemi EH**

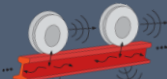
Wrogiem systemu który śpi
95% czasu są upływy, nie
wielkość baterii, czy też
chwilowy brak dostępności
energii

Teza: Niedoceniać prądów upływu
to wybieranie dziurawego wiadra do
przechowywania wody, na której
pozyskanie wylaliśmy siódme poty
wykazując się kunsztem
inżynierskim.



Nikt tego nie potwierdził naukowo.
Prywatna, moja obserwacja.

Zestawienie Zasobników i Harvesterów

Źródło zasilania	Gęstość mocy [$\mu\text{W}/\text{cm}^3$]	Gęstość energii [J/cm ³]	Średnia roczna gęstość mocy [$\mu\text{W}/\text{cm}^3/\text{a}$]	Konieczny wtórny zasobnik?	Regulacja napięcia	Dostępność komercyjna
Bateria 	–	2880	90	Nie	Nie	Tak
Akumulator 	–	1080	34	–	Nie	Tak
Mikroogniwo paliwowe 	–	3500	110	Być może	Zależy	Nie
Superkondensator 	–	50–100	1.6–3.2	Nie	Tak	Tak
Radioaktywne (⁶³ Ni) 	0.52	1640	0.52	Tak	Tak	Nie
Słońce (na zewnątrz) 	15000	–	–	Zazwyczaj	Zależy	Tak
Słońce (wewnątrz) 	10	–	–	Zazwyczaj	Zależy	Tak
$\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 	40	–	–	Zazwyczaj	Zależy	Tak
Energia człowieka 	330	–	–	Tak	Tak	Nie
Przepływ powietrza 	380	–	–	Tak	Tak	Nie
Zmiany ciśnienia 	17	–	–	Tak	Tak	Nie
Wibracje 	200	–	–	Tak	Tak	Nie

Architektury systemów EH ogólnie

Wspomagany bateryjnie

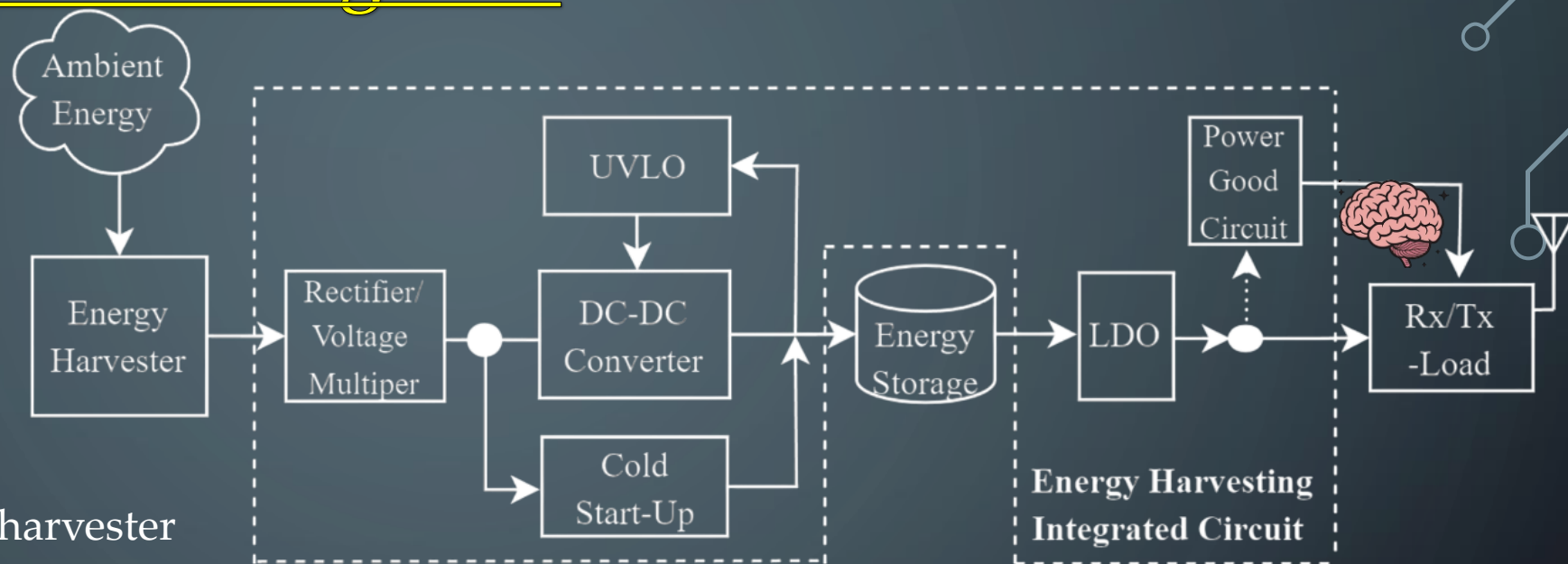
- Bateria = główne źródło zasilania
- Harvester jedynie *odciąża* baterię → rzadsze ładowanie / wymiana

- **W pełni autonomiczny**

- Brak baterii – jedynie harvester
- Funkcjonalność ograniczona dostępnością energii
- Zasila niekrytyczne urządzenia

Autonomiczny-Hybrydowy

- Harvester zasila **zasobnik** (bateria / superkondensator)
- System może przetrwać przerwy w źródle, przy bardzo małym poborze



Cold start = budzenie układu z „energetycznego zera” – specjalna, mało sprawna ścieżka startowa musi pokryć własne straty, upływy magazynu i jeszcze odłożyć trochę energii, zanim system może przejść w normalny tryb pracy.

Obciążenie może być

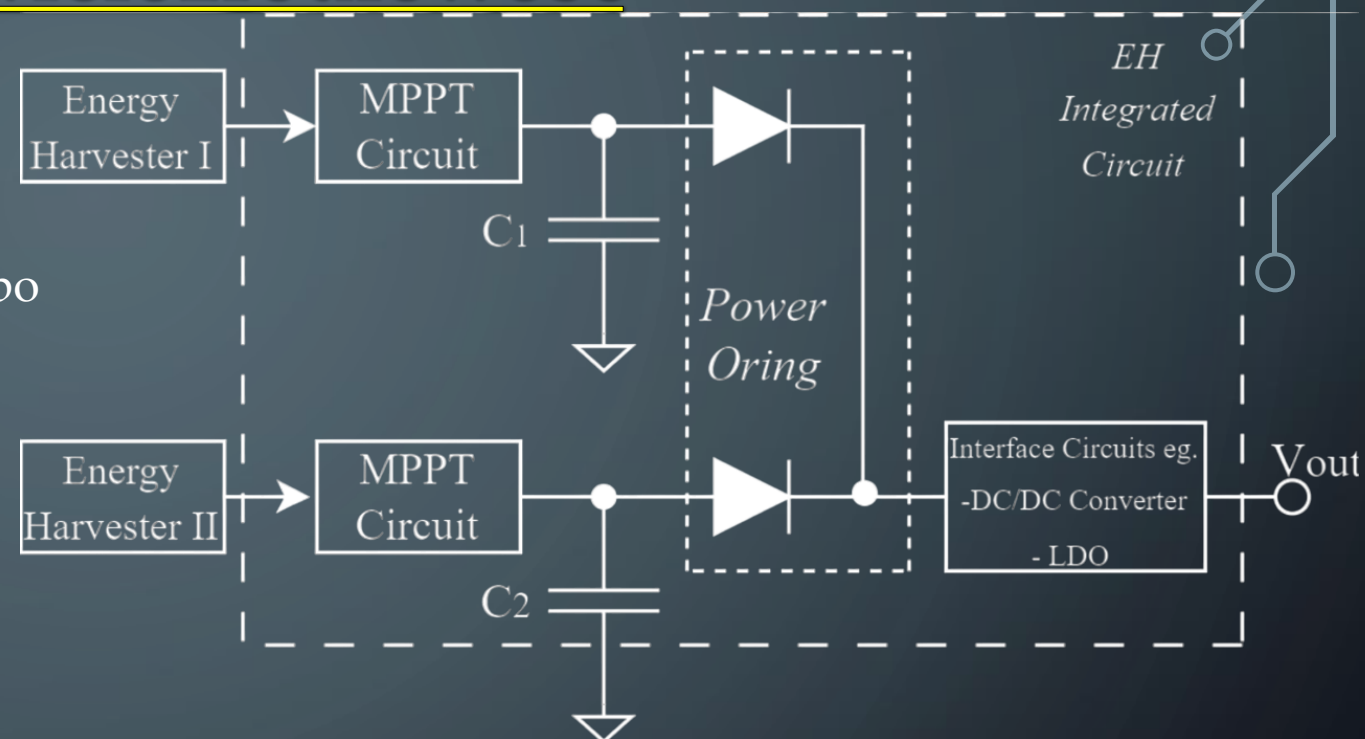
jednocześnie mózgiem całego systemu, z uwagi na możliwości oraz elastyczność (SoC/ MCU)

Ukł. scalone EH, „nie widzą” pełnego kontekstu

Architektury systemów EH - wieloźródłowość

Power-Oring

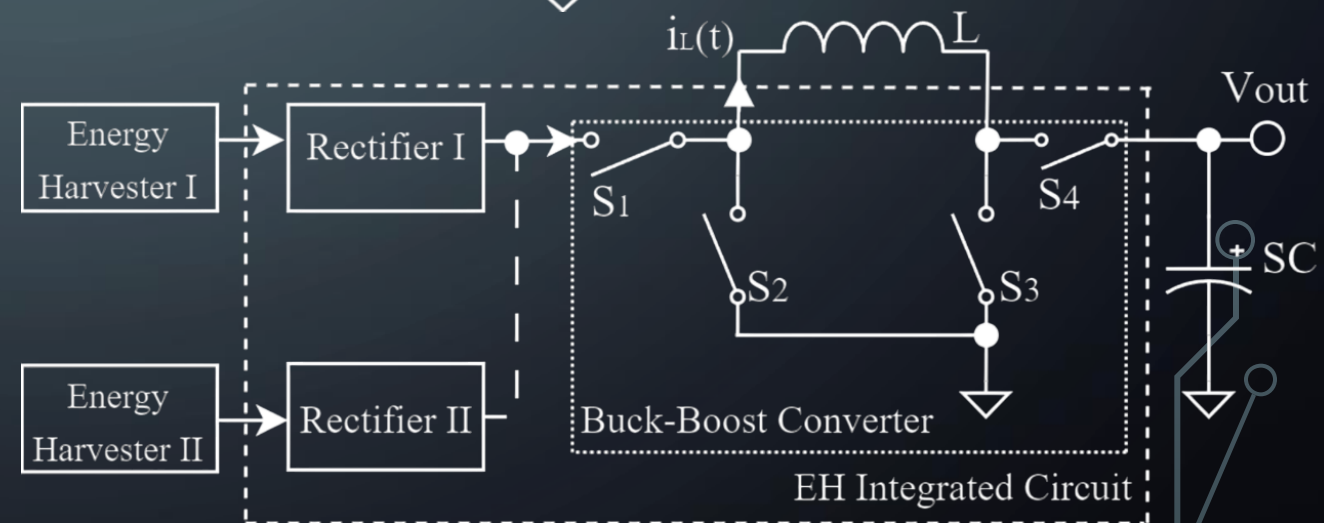
- Każdy harvester ma własny MPPT i prostownik
- **Power ORing** – dobre jako „bieda-multi-source” albo modułowy trik; wygodne, ale marnuje energię
- **Brak jednoczesności** – wygrywa „najwyższy” harvester



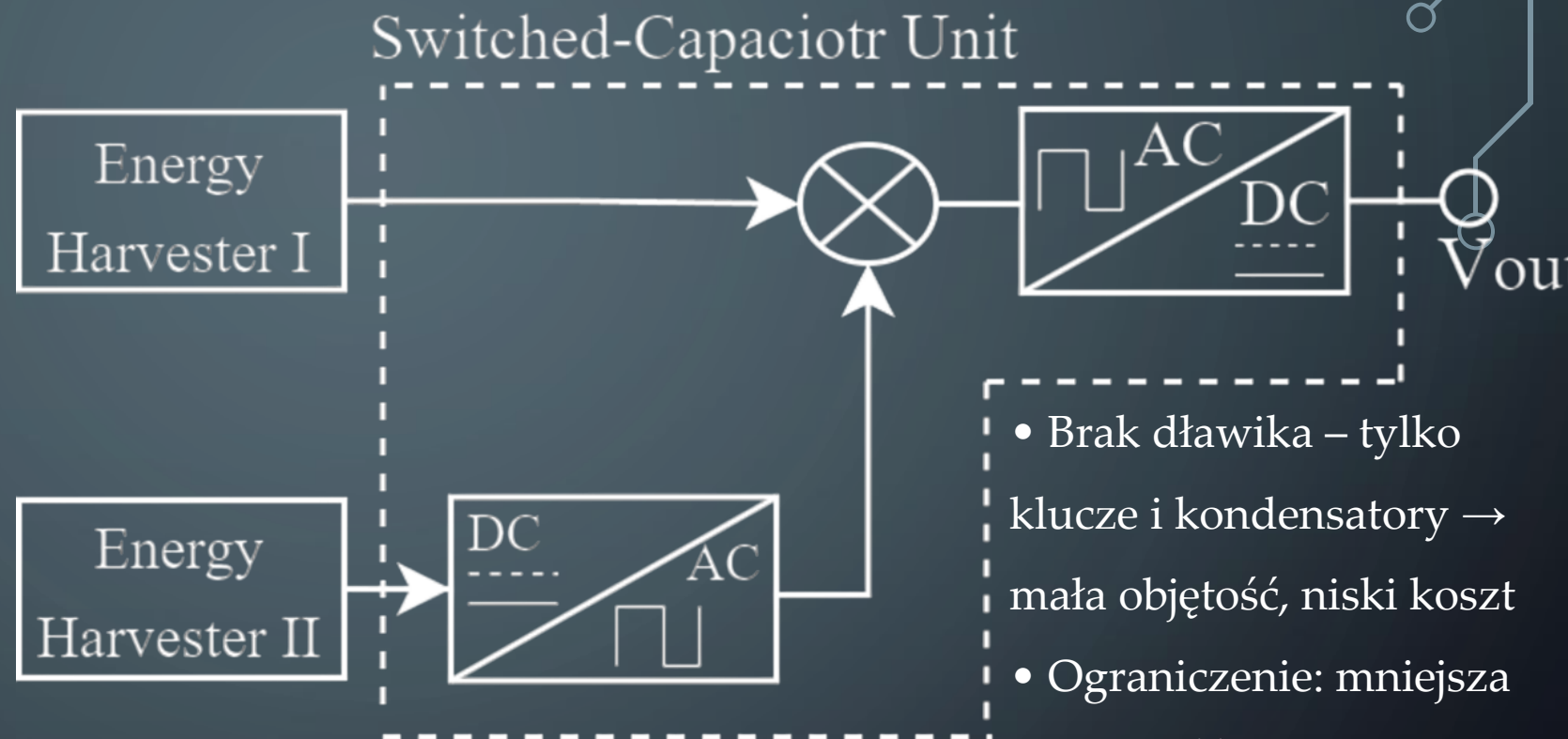
Współdzielony induktor - buck-boost :

- Prostowniki + buck-boost w jednym EH IC
- Klucze S1–S4 przełączają prąd z obu źródeł przez dławik L
- Kondensator SC pełni rolę zasobnika i punktu sprzężenia z V_{out}

Najbardziej popularna technika – dobra sprawność



Architektury systemów EH - wieloźródłowość



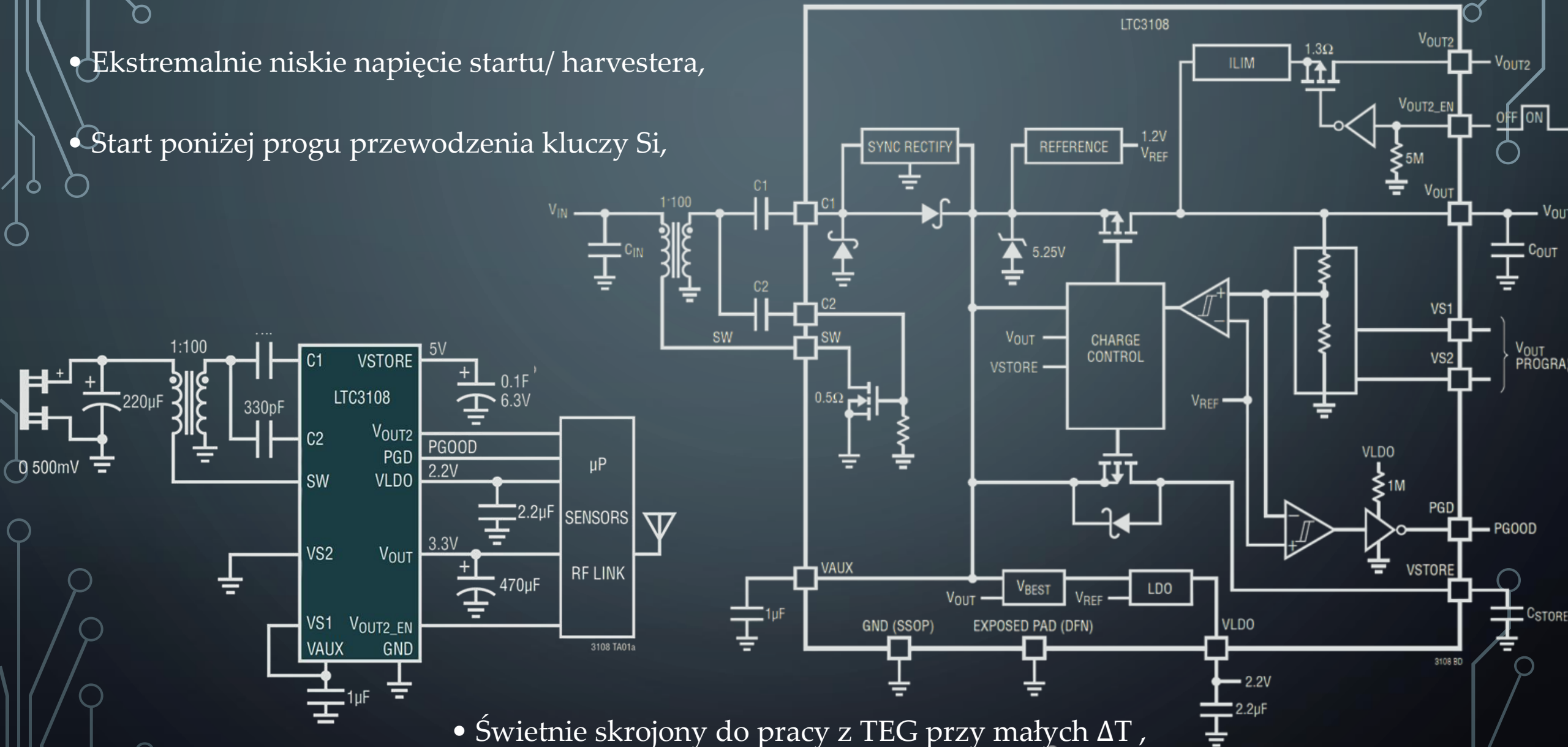
- Brak dławika – tylko klucze i kondensatory → mała objętość, niski koszt
- Ograniczenie: mniejsza sprawność przy dużych prądach, moc raczej μW – mW

Przy większych mocach/spadkach napięcia sprawność spada, trudniejsze skalowanie do szerokiego zakresu V_{in}/V_{out} ,

- Przykład: **Energy Harvester I** – DC (np. PV), **II** – AC (np. wibracje)
- Jednostka **Switched-Capacitor**:
 - przetwarza sygnał AC → DC i podbija napięcie
 - miesza prądy z obu źródeł na wspólny kondensator wyjściowy

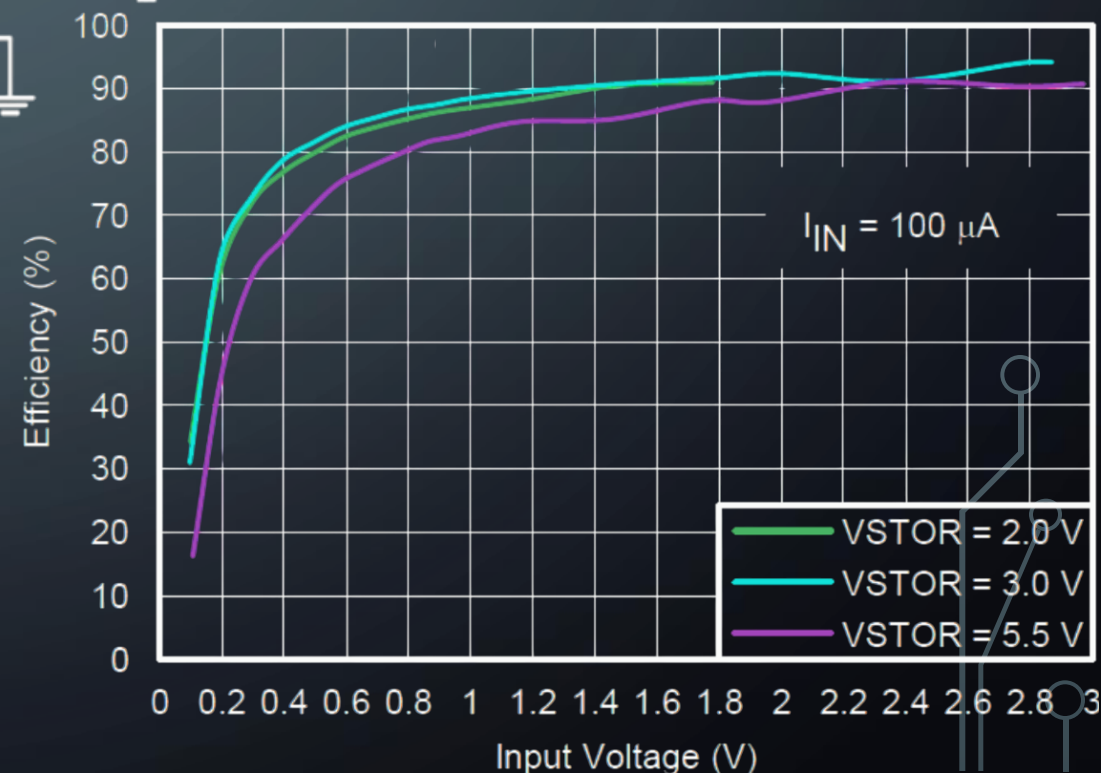
Dedykowane ukł. scalone EH- LTC3108/9 Ultra Low Steup Up Conv.

- Ekstremalnie niskie napięcie startu/ harwestera,
- Start poniżej progu przewodzenia kluczy Si,



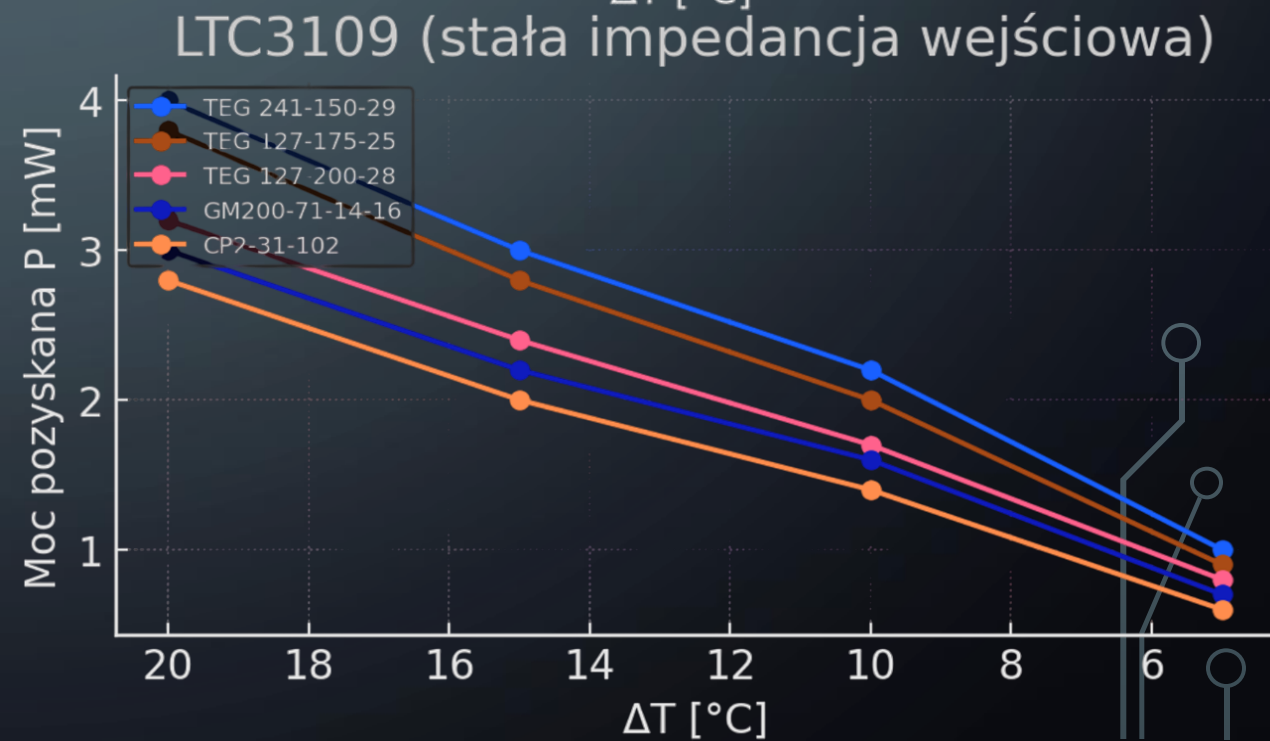
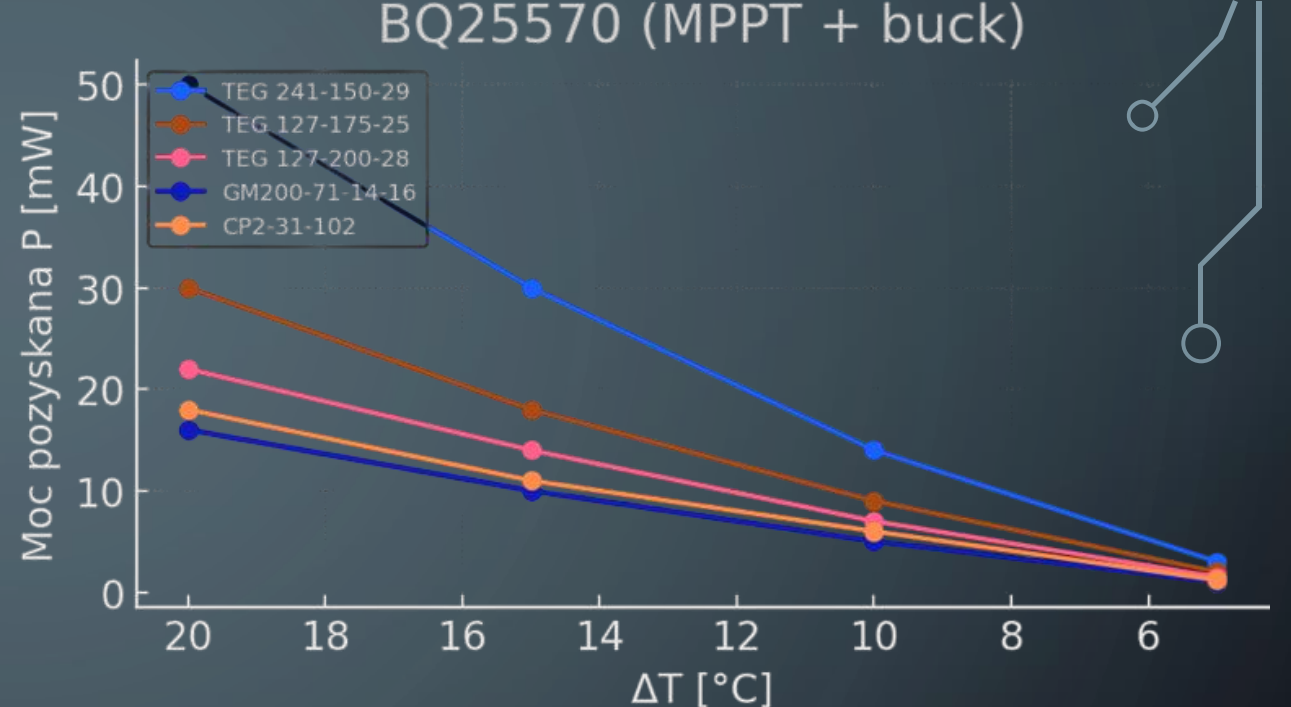
- Świetnie skrojony do pracy z TEG przy małych ΔT ,

BQ25570 wysoko sprawny kontroler MPPT



Zestawienie ukł. scalonych

Parametr	TI BQM255xx	Analog LTC3109
Konstrukcja regulatora	MPPT	Synchroniczny
Polaryzacja wejścia	Unipolarna	Bipolarna
Min. napięcie pozyskiwania	100 mV	30 mV
Sprawność	0,6	0,3
Wyjście	Bez regulacji (unregulated)	Regulowane
Zarządzanie zasobnikiem	Tak	Częściowo
Wyjście „Power Good”	Tak	Tak



Zarządzanie energią – neutralność systemu

$$B_0 + \eta \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)]^+ dt - \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)]^+ dt - \int_0^T P_{leak}(t) dt \leq B$$



Model Kansala:

- $P_s(t)$ – moc z harvestera, $P_c(t)$ – moc obciążenia,
- B – pojemność magazynu, $\eta < 1$, straty $P_{leak}(t)$.

System EH ma działać „wiecznie” $\Rightarrow$ w długim czasie **nie może zużywać więcej energii niż pozyskuje.**

System jest „energy-neutral”, jeśli w całym horyzoncie czasowym suma pozyskanej energii (po uwzględnieniu sprawności i wycieków) jest $\geq$ sumy energii zużytej – tak, by poziom naładowania magazynu nigdy nie spadł poniżej zera ani nie przekroczył jego maksymalnej pojemności.

Warunek neutralności energetycznej:

energia początkowa + to, co *realnie* zmagazynowaliśmy
– to, co dopaliliśmy z bufora – straty

$\leq$ **maksymalna energia w magazynie B**

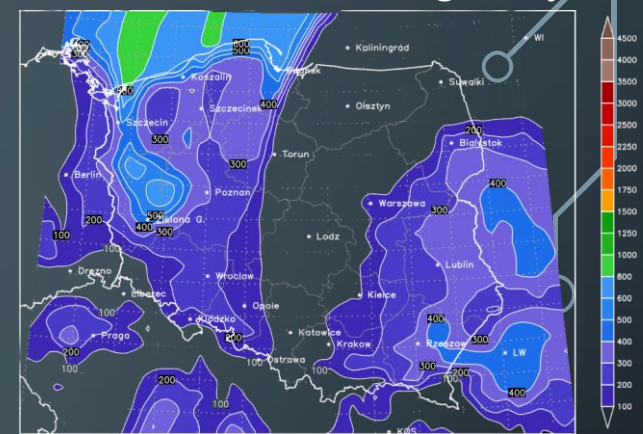
W praktyce liczymy dwa przypadki skrajne:

- **cold-start:** P_{IN} musi pokryć upływy + start przy bardzo niskiej sprawności ($\sim 5\%$),
- **praca ustalona:** $P_{IN} \cdot \eta \geq P_{AVG_systemu} + V_{BAT} \cdot I_{leak}$.

Zarządzanie energią – planowanie

- Z profilu $E_{in}(t)$ (np. roczny profil słońca) wyznaczamy:
 - okresy nadwyżki (Surplus),
 - okresy niedoboru (Deficit).
- Najgłębszy „dołek” z różnicy dopływ–zużycie $\Rightarrow$ minimalna pojemność magazynu B_{nom} .
- Warunek, że „pole pod górką $\geq$ pole pod dołkiem” $\Rightarrow$ minimalna moc harwestera panelu / generatora.
- Układy scalone pomagają na poziomie analogowym:
 - MPPT / stała impedancja wejściowa,
 - limit napięcia magazynu, sygnały *Power Good* / *VOUT_OK*.
- Dobór rozmiaru panelu i pojemności magazynu to dalej zadanie systemowe.

Model meteorologiczny



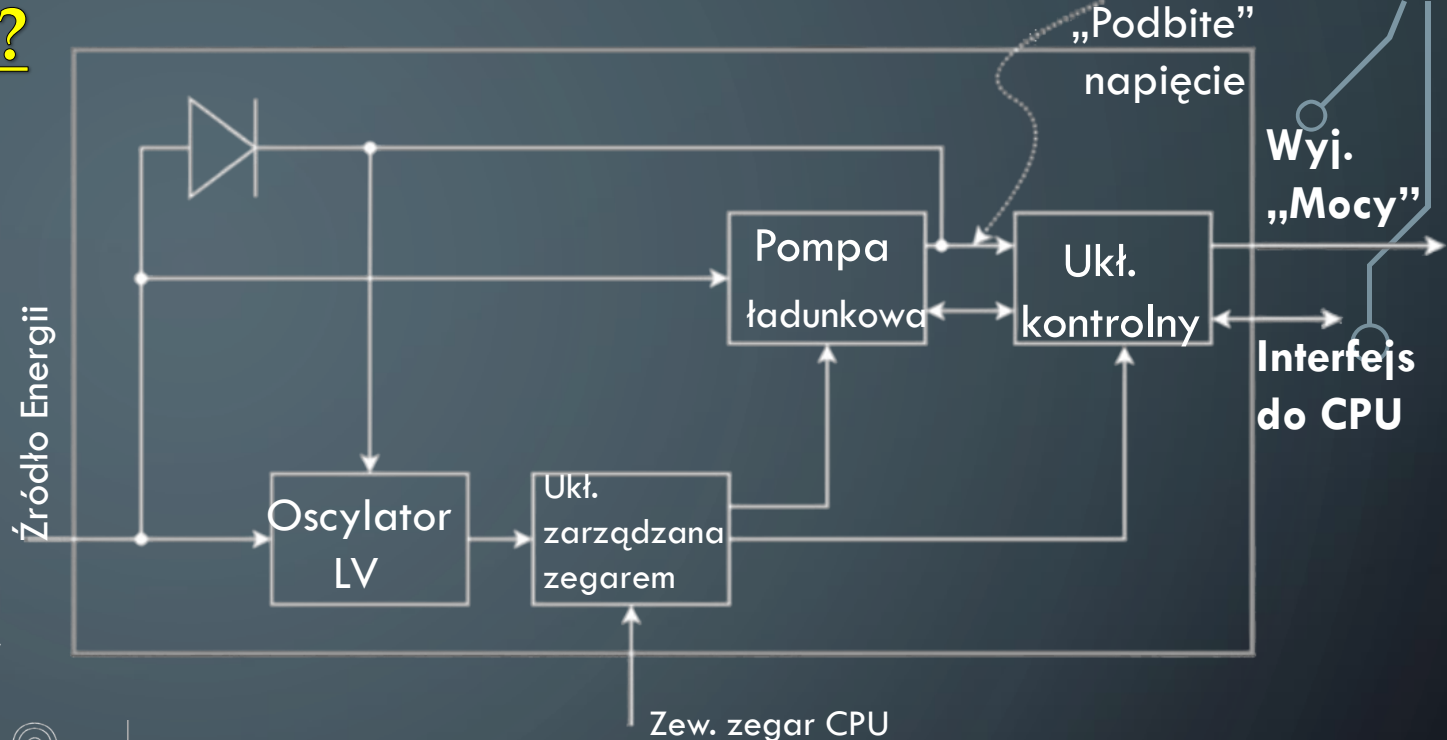
Zarządzanie energią – wnioski

- System EH nie pyta „ile oszczędzić?“, tylko „kiedy wolno wydać energię?“
- **Potrzebne klocki:**
 - prognoza dopływu $\hat{E}_{in}(t)$ (np. model roczny słońca),
 - ocena stanu magazynu (SoC - *State of Charge*, z V_{BAT} , prądu i historii obciążenia),
 - algorytm **DPM (Dynamic Power Management)** sterujący obciążeniem. również
- **Model akumulatora:**
 - z krzywych rozładowania wyznaczamy DoD (*Deep of Discharge*) (V_{BAT} , RL) → tani model SoC do użycia w MCU.
- **Inne strategie dla baterii pierwotnej**
- W dobie AI systemy EH mogą od siebie się uczyć strategii zarządzania – bez AI :)

- **DPM (Dynamic Power Management)** dobiera:
 - częstość pomiarów i transmisji,
 - głębokość uśpienia / duty-cycle, tak, by w długim okresie zachować **energy-neutrality**.
- Porównujemy:
 - **No DPM** – stała, konserwatywna moc,
 - **DPM** – adaptacja do sezonu,
 - „**Jasnowidz**“ (*Clairvoyant*) – idealne, nieosiągalne maksimum.

Ukł scalone EH to układ nerwowy
Mózg znajduje się na poziomie systemu -> fizycznie w „obciążeniu”. Dobiera strategię energetyczną

CO WDROZONO NA RYNEK?



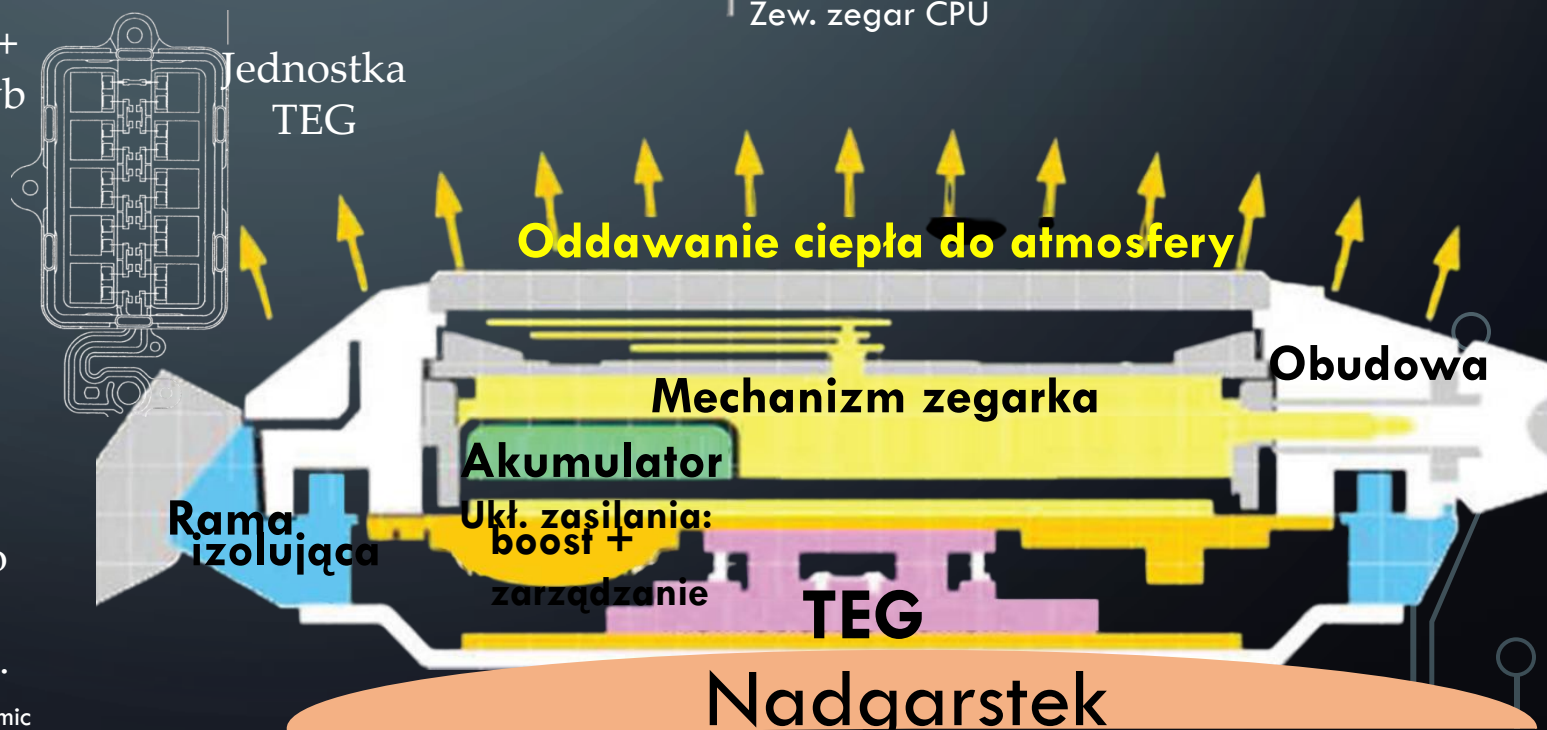
Ścieżka termiczna: dekiel = „gorące”, koperta = „zimne”, izolacja wymusza przepływ przez TEG ($\Delta T \rightarrow \mu W$).

Cold-start: osobny, niskonapięciowy tor (oscylator + SC) ładuje bufor od zera, potem przełączenie na tryb efektywny.

Tryb oszczędzania + feedback: ograniczanie funkcji przy niskiej ΔT ; wskaźnik energii uczy użytkownika „co daje” lepszy kontakt termiczny.

Zarządzanie zegarem: – wolniej przy małej ΔT , szybciej przy nadwyżce mocy.

Magazyn energii: mikro-Li-ion/Li-ion cap o ultraniskich upływach + ochrona na odwrócone ΔT (prostownik/anti-backflow).



Podsumowanie

Wszystkie technologie magazynowania energii mają istotne ograniczenia.

Postęp w bateriach jest wolny w porównaniu z tempem rozwoju wg prawa Moore'a.

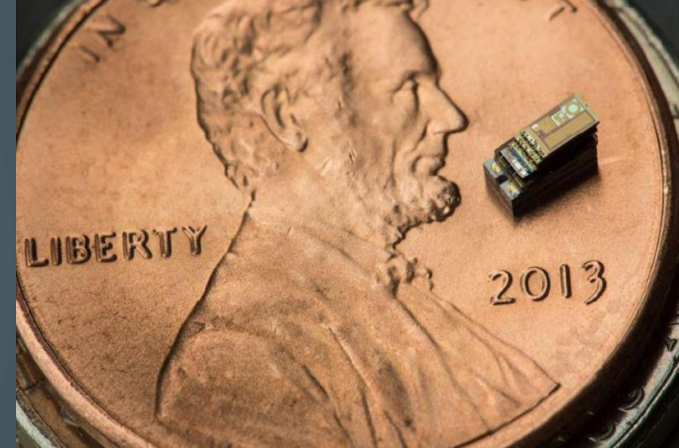
Metody EH są szeroko badane:

- Brak przełomów na miarę „game-changerów”.
- Najbardziej obiecujące: źródła solarne i mechaniczne;

TEG raczej rola uzupełniająca.

- Większa złożoność systemów przez konieczność sterowania/zarządzania energią.

Architektury low-power coraz częściej projektuje się z myślą o podsystemie zasilania (od początku, a nie „na końcu”).



Inteligentny Pył (*ang. Smartdust*)

Korzyści wynikające z nauki o EH/LP:

Pozyskanie innej, wymagającej perspektywy na oszczędzanie energii

Wbrew pozorom – częściowo wspólne architektura, wzorce projektowe
np. prostowanie synchroniczne
jest podobne jak w Elektronice Mocnej,
Dyrektywy Eco Saving etc

DZIEKUJĘ
ZA UWAGĘ.

PYTANIA?

Smart dust developed by University
Michigan, sitting on a penny