

Projektowanie elektroniki do środowisk ekstremalnych

na przykładzie odwiertowego sensora naprężenia z komunikacją elektromagnetyczną

Agenda

- o prezentacji
- środowiska ekstremalne i ich wyzwania
- komponenty w środowiskach ekstremalnych
- techniki w produkcji elektroniki ekstremalnej
- o technikach odwiertowych
- o elektronice do zastosowań w odwiertach
- projekt: sensor naprężeń – front-end analogowy
- projekt: układy przetwarzania mocy
- projekt: interfejs komunikacyjny EM-MWD

O prezentacji

- 1. Nie próbuję akademicko wyczerpać tematu – raczej dokładniej opowiedzieć o rzeczach, o których coś wiem w czasie 45 minut**
- 2. Będzie miszmasz językowy polsko-angielski**
- 3. Czas na krótkie pytania/dyskusje co kilka slajdów**
- 4. Zaprezentowany projekt miał kilka wersji/podejść/wariantów – opowiem: ile mogę oraz najciekawsze technicznie rozwiązania**
- 5. Niektóre użyte w prezentacji grafiki mogą być chronione prawami autorskimi – użyte tutaj jako "fair use" dla celów edukacyjnych**

Czas na pytania

...

Środowiska ekstremalne: charakterystyka

1. Ekstremalna temperatura otoczenia: ambient > 130 °C, ekstremalne zmiany, gradienty itp
2. Ekstremalne ciśnienie: > 10 bar lub próżnia
3. Wilgotność, zanurzenie w wodzie, narażenie chemiczne i na korozje
4. Shock & vibration: > 5 g
5. Podwyższone promieniowanie jonizujące
6. Zewnętrzne pola elektryczne/magnetyczne, szczególne warunki EMC
7. Lifetime i longevity: > 10 lat bez serwisu

Środowiska ekstremalne: przykłady

	Temperatura	Ciśnienie	Wibracje	Wilgotność	Promieniowanie	EM	Lifetime
przestrzeń kosmiczna	!	?	!		!!	?	!!
głęboki ocean		!!	!/*	!!			!!
odwierty: down-hole	!!	?	!!	?	*		
pole walki militarnej	?		!	?	!!		
osensorowanie silników odrzutowych	!!		!!				!
under-the-hood automotive	!		!				
medycyna: rezonans magnetyczny, tomografia			?		!	!!	

Czas na pytania

...

Środowisko podwodne i rozwiązania techniczne

Warunki:

- **ekstremalne ciśnienie: ok 1 bar na 10m głębokości**
 - typowe głębokości: szelf kontynentalny do ok. 250m,
 - średnia głębokość oceanów: ok. 3.5km,
 - maksymalna głębokość oceanu ok. 11 km
- **temperatura w zasadzie stała +4 °C od pewnej głębokości**
- **ciągłe narażenie na korozję**
- **w zależności od aplikacji: możliwy ekstremalnie długi czas życia**

Rozwiązania techniczne:

1. **Elektronika w azocie o ciśnieniu atmosferycznym (np. SEM)**
2. **Elektronika w oleju dielektrycznym o ciśnieniu otoczenia (np. ROV)**

Środowisko podwodne i rozwiązania techniczne

Elektronika w azocie o ciśnieniu atmosferycznym (np. SEM):

- gruba obudowa metalowa (duża masa)
- złącza wytrzymujące różnice ciśnień
- elektronika zwykle nieserwisowalna: derating, FMECA, redundancja,
- elektronika zwykle o długim lifetime-ie: data retention
- droga oddawania ciepła: do obudowy, poprzez np. wedge-lock



Source: Baker Hughes

Środowisko podwodne i rozwiązania techniczne

Elektronika w oleju dielektrycznym o ciśnieniu otoczenia (np. ROV):

- obudowa wypełniona olejem dielektrycznym i wyrównywaniem ciśnień (niska masa)

- elektronika bezpośrednio narażona na ciśnienie:

✗ kondensatory elektrolityczne

✗ baterie

✗ rezystory węglowe

✗ kwarcy

✗ bezpieczniki topikowe

✗ przekaźniki / elektromechanika

✗ transoptory / światłowody

✗ złącza zapadkowe itp..

✓ suche tantale, polipropylen, ceramiki

✓ każde inne

✓ rezonatory ceramiczne

✓ PTC/polimerowe (*)

✓ SSR

- efekty uboczne: doskonałe chłodzenie, doskonała izolacja (do czasu dostania się słonej wody)

- dobra praktyka: conformal coating



Source: Oceaneering

Środowisko przestrzeni kosmicznej

Narażenie na promieniowanie: zjawiska single-event (błędy lub uszkodzenia) – stosuje się układy radiation-hardened, alternatywne półprzewodniki (wide bandgap) itp., derating napięciowy

Ekstremalne wibracje

Możliwe ekstremalne temperatury (niskie!)

Nieserwisowalne, lifetime elektroniki = lifetime projektu

Środowisko rezonansu magnetycznego

Ekstremalne pole magnetyczne: 1.5T – 3T - 7T -... : całkowite wyeliminowanie elementów indukcyjnych a czasem też innych komponentów ferromagnetycznych (np. nikiel w rezystorach)

Ekstremalna czułość cewek odbiorczych na EMI – w wąskich pasmach (np.. 64MHz dla 3T)

Do przetwarzania mocy częściej stosuje się układy liniowe i pompy ładunku

Środowisko odwiertów

Ekstremalnie wysokie temperatury (plus wysokie gradienty)

Ekstremalne wibracje i uderzenia

Czasem ekstremalne ciśnienie (zależnie od mechaniki)

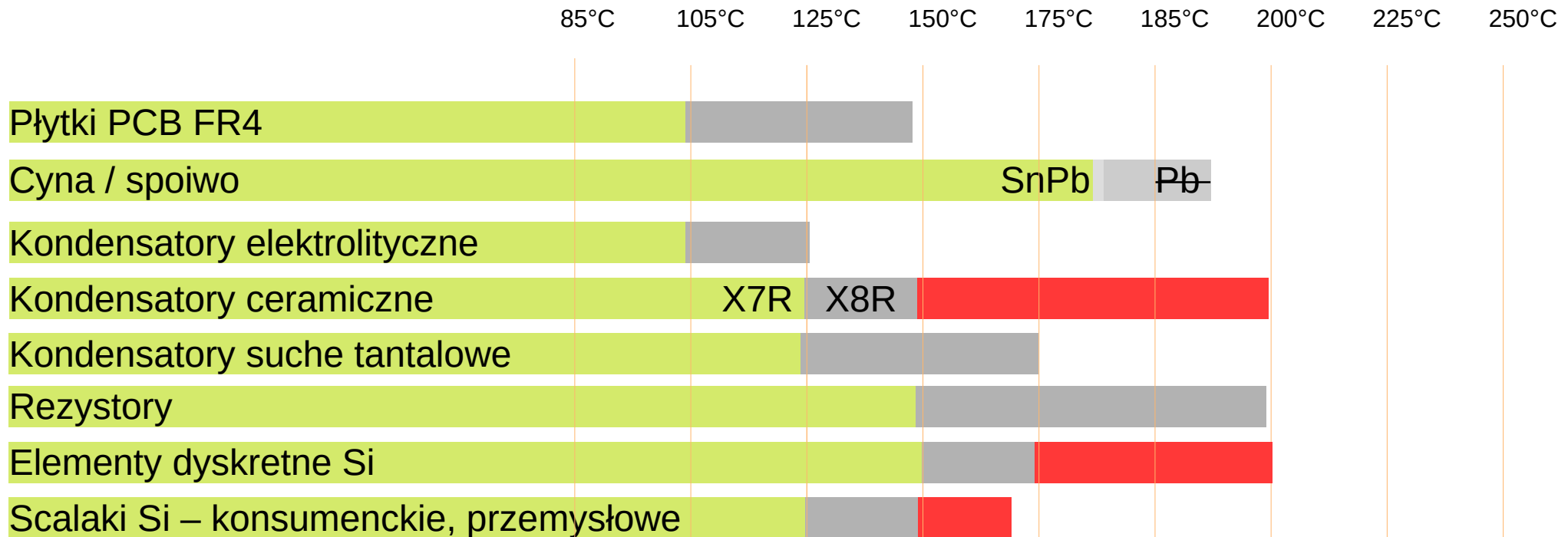
Promieniowanie występuje, ale jest wykorzystywane do pomiarów (gamma) – nie analizuje się wpływu na układy

Typowy lifetime 1000h

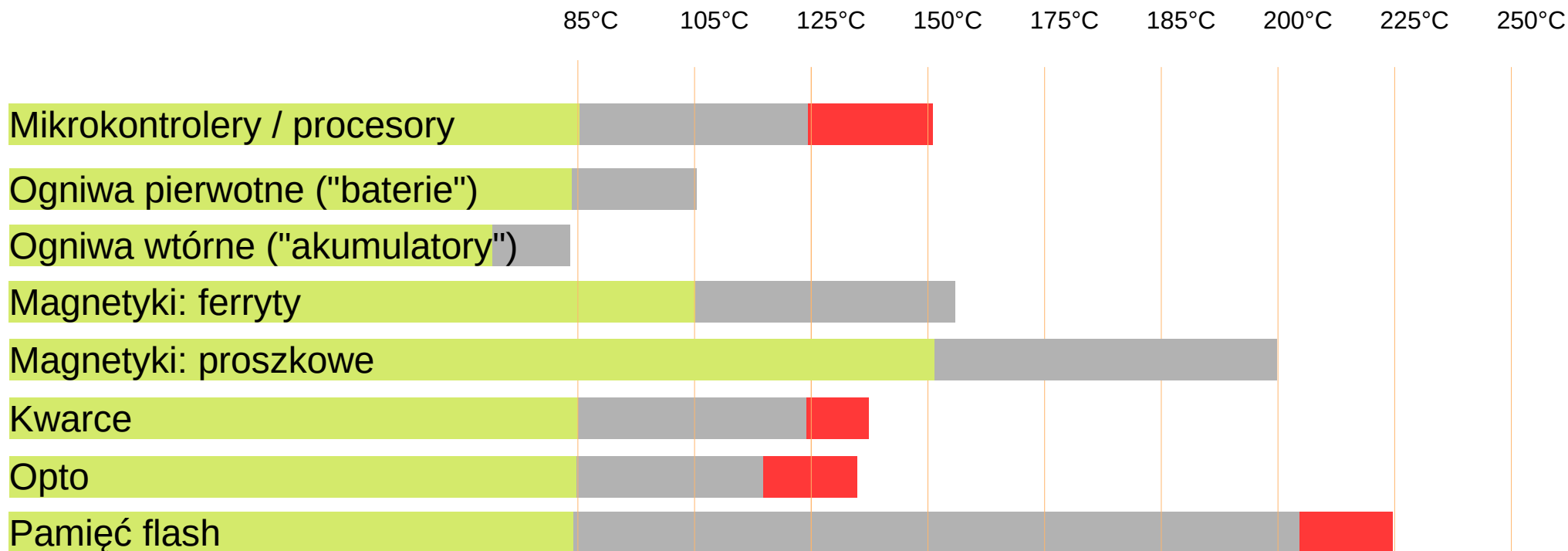
Czas na pytania

...

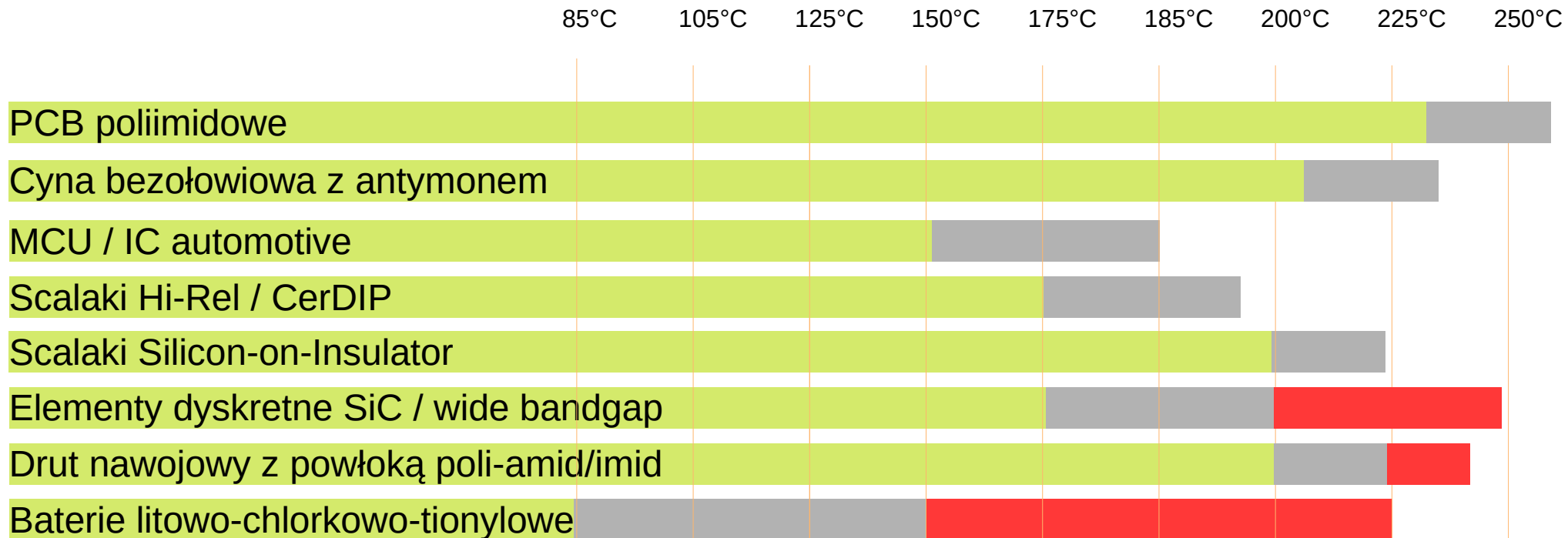
Elektronika "normalna" a temperatury pracy



Elektronika "normalna" a temperatury pracy



Elektronika specjalizowana a temperatury pracy



Czas na pytania

...

Strategie projektowe w układach wysokich temperatur

Good Ideas:

- uważny design, dobór elementów, minimalne straty własne
- optymalizacja pasywnego oddawania ciepła do ambientu
- odprowadzenie ciepła do cieczy chłodzącej
- prostota układu, co się da dyskretnie

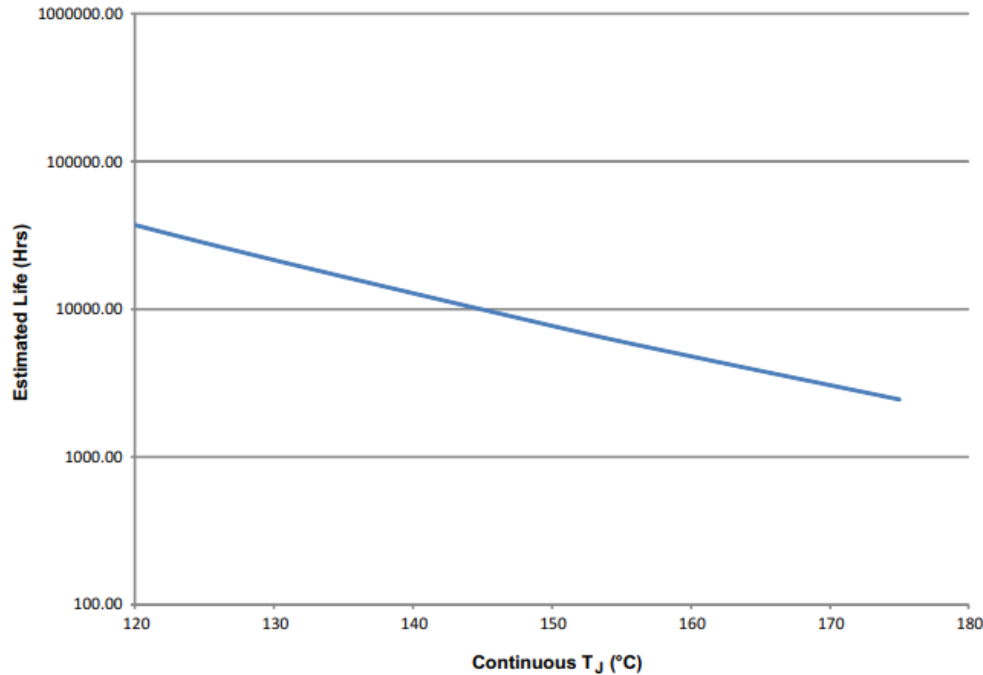
Bad Ideas:

- "jakoś to będzie"
 - redundancja
 - moduły peltiera itp.
-
- wysoko-specjalizowane układy hi-rel
 - vacuum-flask / termos

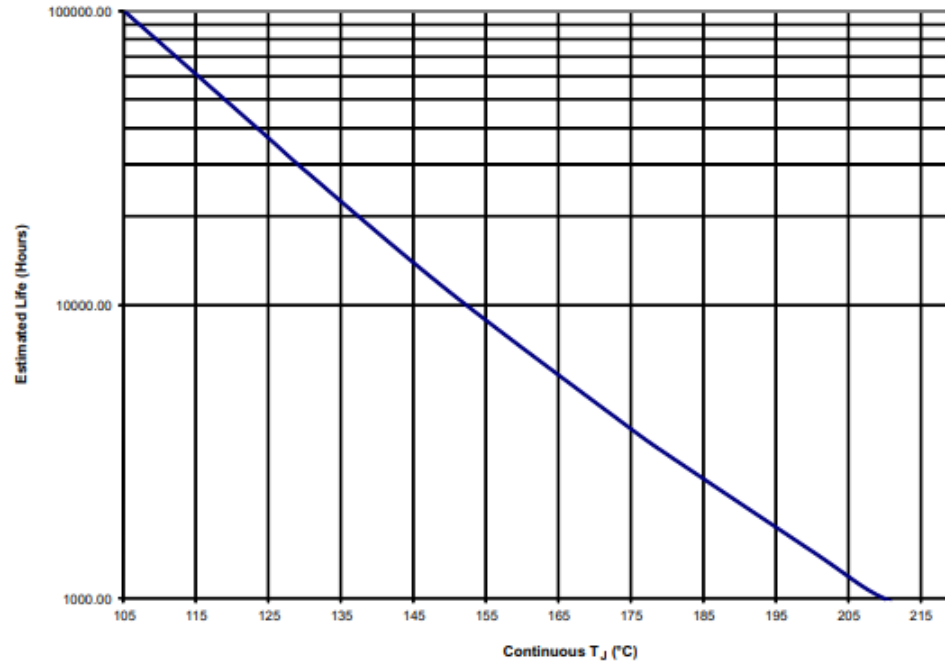
Układy wysokich temperatur: zagadnienia praktyczne

- powyżej pewnego progu temperatury cena komponentów rośnie wykładniczo
- powyżej pewnego progu temperatury czas życia spada wykładniczo (zasada Arrheniusa)
- elektrycznie optymalne komponenty niespecjalizowane są w "złych" obudowach: producenci nie optymalizują komponentów pod kilkustopniowy wzrost temperatury pracy
- z temperaturą rosną wszystkie prądy upływów
- charakterystyki temperaturowe: spadające V_{gs-th} mosfetów, V_{be} bipolarów, stabilne zenery są w zakresie 5-6V
- temperatury ścieżek na PCB mają znaczenie
- testować, testować testować

Układy wysokich temperatur: zagadnienia praktyczne: IC



Układy wysokich temperatur: zagadnienia praktyczne: flash





Układy wysokich temperatur: zagadnienia praktyczne: zener/opamp

BZV55-xxx	Sel	Working voltage V_Z (V)		Differential resistance r_{dir} (Ω)				Temperature coefficient S_Z (mV/K)		
				$I_Z = 1$ mA		$I_Z = 5$ mA		$I_Z = 5$ mA		
		Min	Max	Typ	Max	Typ	Max	Min	Typ	Max
		2V4	B	2.35	2.45	275	600	70	100	-3.5
	C	2.2	2.6							
2V7	B	2.65	2.75	300	600	75	100	-3.5	-2.0	0
	C	2.5	2.9							
3V0	B	2.94	3.06	325	600	80	95	-3.5	-2.1	0
	C	2.8	3.2							
3V3	B	3.23	3.37	350	600	85	95	-3.5	-2.4	0
	C	3.1	3.5							
3V6	B	3.53	3.67	375	600	85	90	-3.5	-2.4	0
	C	3.4	3.8							
3V9	B	3.82	3.98	400	600	85	90	-3.5	-2.5	0
	C	3.7	4.1							
4V3	B	4.21	4.39	410	600	80	90	-3.5	-2.5	0
	C	4.0	4.6							
4V7	B	4.61	4.79	425	500	50	80	-3.5	-1.4	0.2
	C	4.4	5.0							
5V1	B	5.0	5.2	400	480	40	60	-2.7	-0.8	1.2
	C	4.8	5.4							
5V6	B	5.49	5.71	80	400	15	40	-2.0	1.2	2.5
	C	5.2	6.0							
6V2	B	6.08	6.32	40	150	6	10	0.4	2.3	3.7
	C	5.8	6.6							
6V8	B	6.66	6.94	30	80	6	15	1.2	3.0	4.5
	C	6.4	7.2							
7V5	B	7.35	7.65	30	80	6	15	2.5	4.0	5.3
	C	7.0	7.9							
8V2	B	8.04	8.36	40	80	6	15	3.2	4.6	6.2

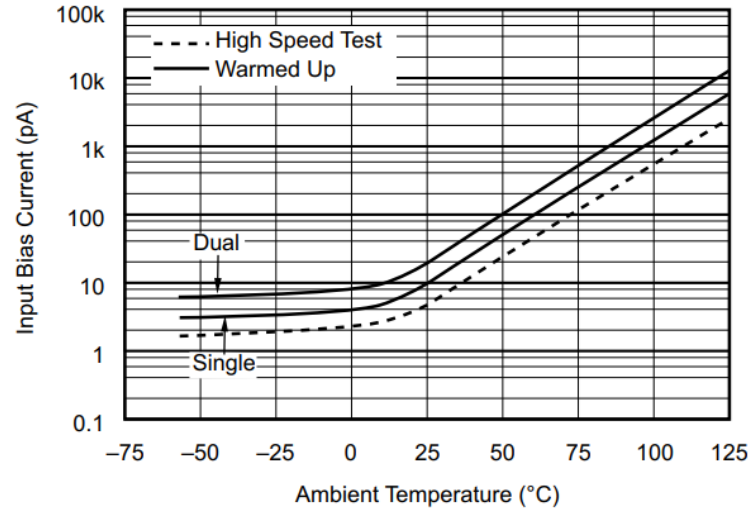


Figure 15. Input Bias Current vs Temperature

Układy wysokich temperatur: zagadnienia praktyczne: perełki

Tanie i dobre:

1. Tranzystory SiC-mosfet od ST: 200 °C
2. Tranzystory bipolarne Zetex E-Line: 200 °C
3. Rdzenie proszkowe stopy MPP/sendust/hi-flux Mag-Inc: 200 °C
4. Mikrokontrolery Microchip dsPIC33: 150 °C
5. Mikrokontrolery automotive Infineon Motix : 175 °C

Specjalizowane:

1. Laminaty PCB poliimidowe, np. Shengyi SH-260, Isola P95
2. Texas Instruments hi-rel
3. Analog devices hi-rel
4. Honeywell Aerospace (rad-hard)
5. Cissoid

Środowiska ekstremalne: zagadnienia produkcyjne

Technika zalewania silikonem (potting) całego złożenia PCB:

- poprawia odbiór ciepła od najcieplejszych elementów
- radykalnie zwiększa odporność na wibracje

Lakierowanie conformal coating:

- polepsza odporność na wilgoć oraz pył i kurz

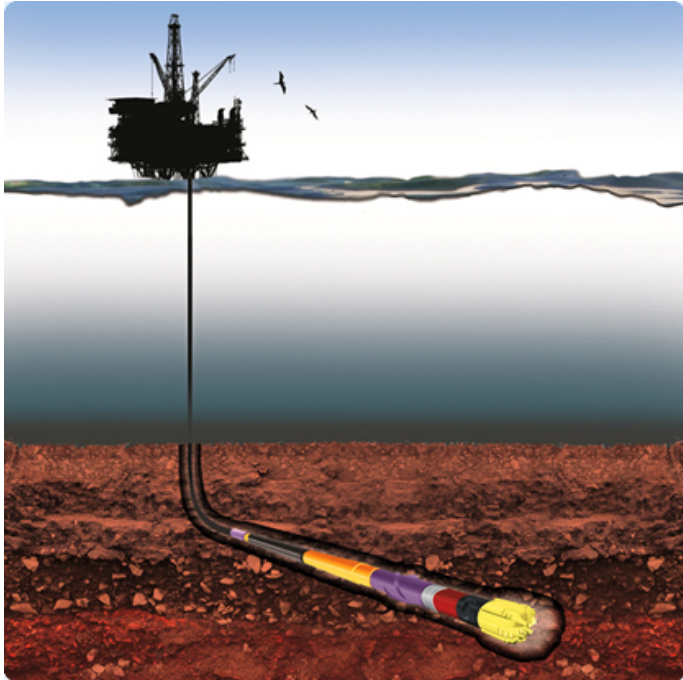
Laminaty PCB mają drastycznie różne charakterystyki nasiąkania wilgocią

Projekt optymalnego odprowadzania ciepła z komponentu do PCB (brak thermal relief-ów, thermal vias w padach i wokół) znacząco utrudnia lutowanie, w szczególności ręczne – natomiast może mieć kluczowy wpływ na Rth

Czas na pytania

...

Down-hole drilling



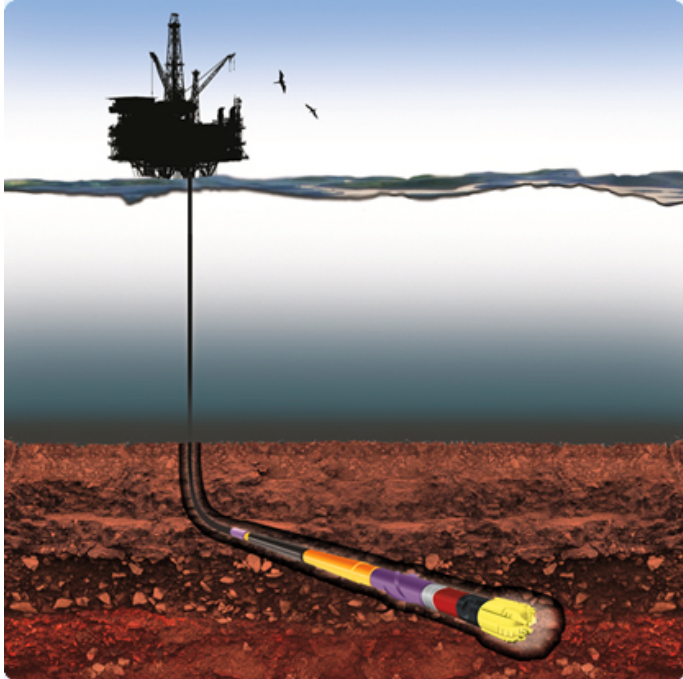
Cele odwiertów / branże:

- Oil & Gas
- energia geotermalna
- geotechnika / nauka

Jak to działa:

- narzędzie odwiertowe składa się z segmentów na przegubach
- wiertło na końcu – różne "bity", napędzane hydraulicznie

Rodzaje odwiertów



Środowisko:

- lądowy
- podwodny

Kierunek:

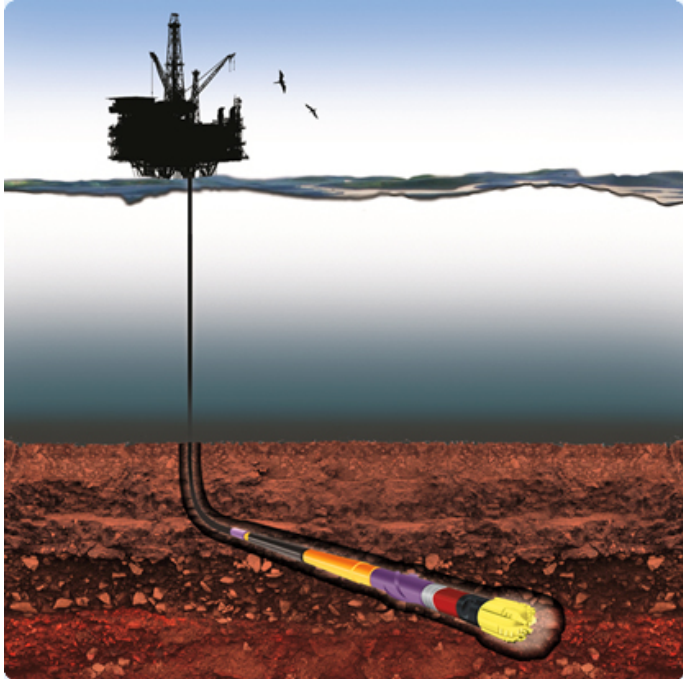
- pionowy
- kierunkowy
- horyzontalny
- geosteering

Sprzężenie zwrotne:

- logging-while-drilling (LWD)
- measuring while-drilling (MWD)



Down-hole drilling: wyzwania



- temperatura: typowy gradient geotermalny: 25°C / km
- shock / vibration: typ. 50g / 30g
- wysokie ciśnienia
- bardzo trudne środowisko telekomunikacyjne + dystans
- zwykle bardzo wąsko wewnątrz narzędzia do odwiertów
- mnogość wielkości do zmierzenia i przesłania:
 - azimuth + inclination
 - wielkości pośrednio świadczące o formacji:
 - rezystywność
 - promieniowanie gamma
 - wibracje
 - naprężenia
 - ...

Czas na pytania

...

Elektronika odwiertowa: źródła energii

1. Harvesting z przepływu cieczy hydraulicznej ("mud turbine")



Source: Turbine Dynamics

2. Energia chemiczna: jedyną technologią aktualnie skalowalną do wysokich temperatur jest bateria litowo-chlorkowo-tionylowa (LiSOCl₂)

Source: Engineered Power



Elektronika odwiertowa: telekomunikacja

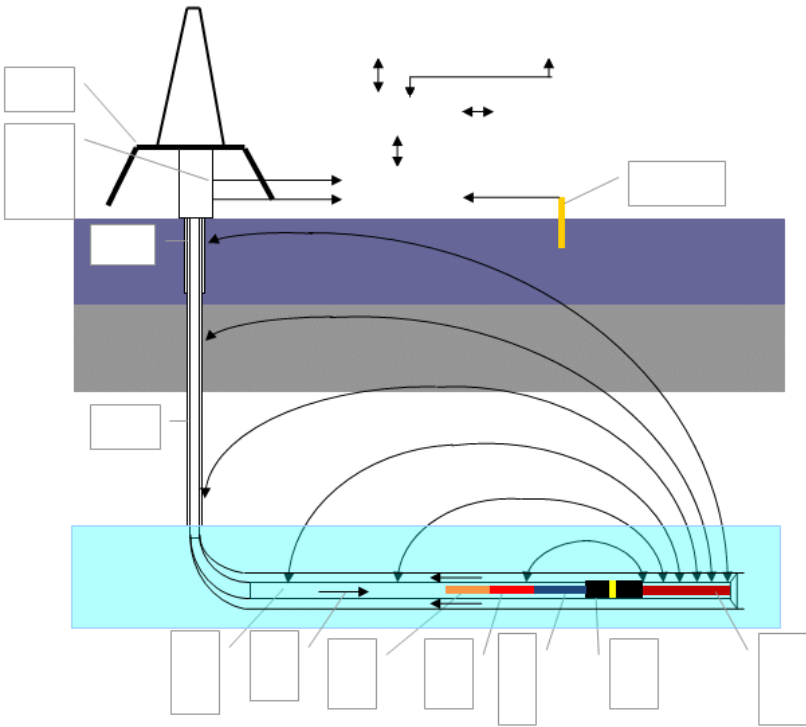
1. Logging-while-drilling / Measuring-while-drilling
2. Modulacja ciśnienia przepływu cieczy hydraulicznej ("mud pulse"):
 - impuls dodatni (wzrost ciśnienia)
 - impuls ujemny (spadek ciśnienia)
 - modulacja ciągła (możliwe FSK, PSK itd..)
3. Komunikacja elektromagnetyczna: wąskopasmowa komunikacja oparta o przepływ prądu pomiędzy izolowanymi (gap-sub) segmentami narzędzia do drillingu
 - typowe pasmo 2-12 Hz
 - gap-sub stanowi wyzwanie mechaniczne



Source: Oilwell solutions



Elektronika odwiertowa: EM-MWD

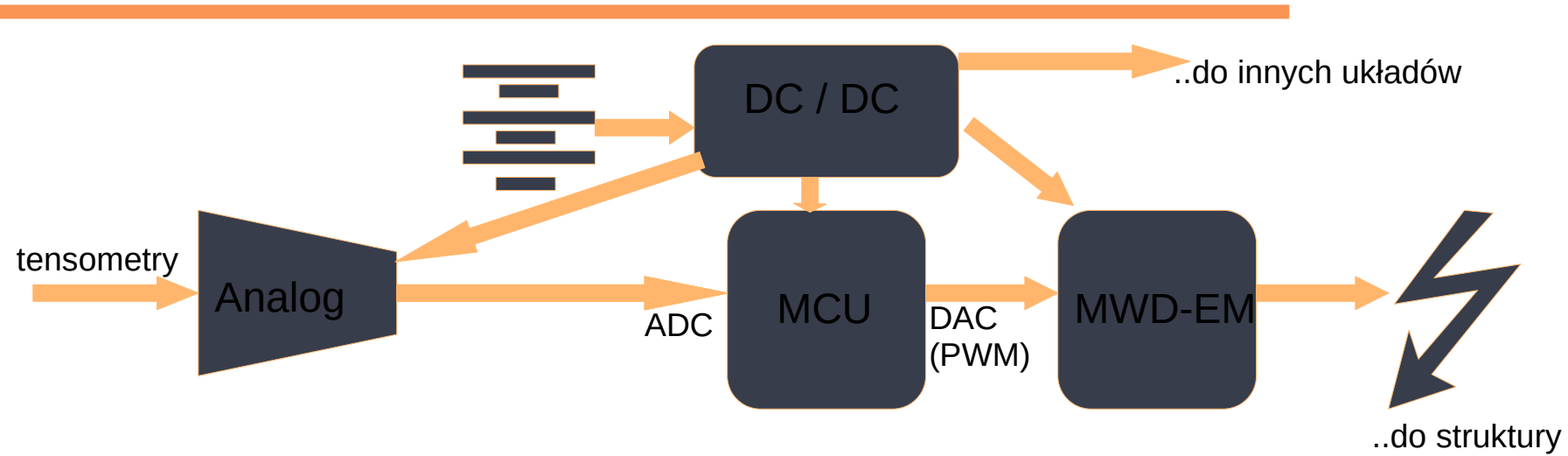


- możliwe FSK, PSK, AM/PM itd..
- przepływności typ do 20 bit/s (choć są dużo szybsze systemy)
- moc elektryczna nadawania: kilkanaście-kilkadziesiąt Watów
- po stronie odbiorczej demodulacja:
 - bardzo niski poziom sygnału (typ 1-10uV)
 - agresywne analogowe tłumienie 50-60Hz
 - sygnał 2-12 Hz głęboko poniżej "szumu"

Czas na pytania

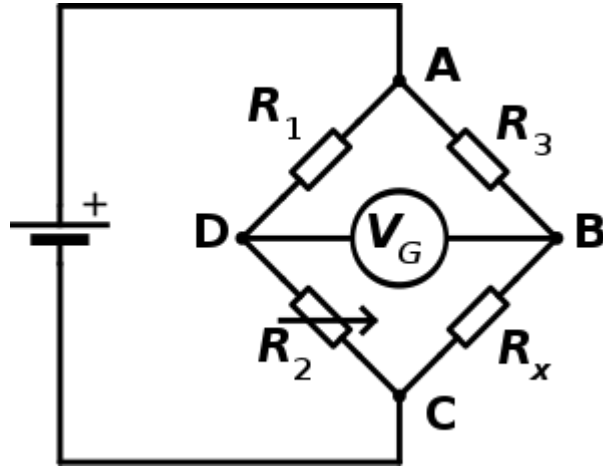
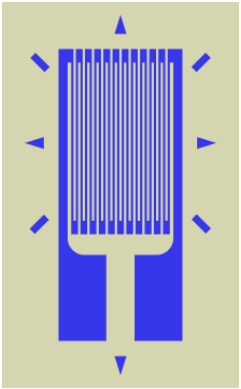
...

Projekt: bloki



Projekt: front-end analogowy

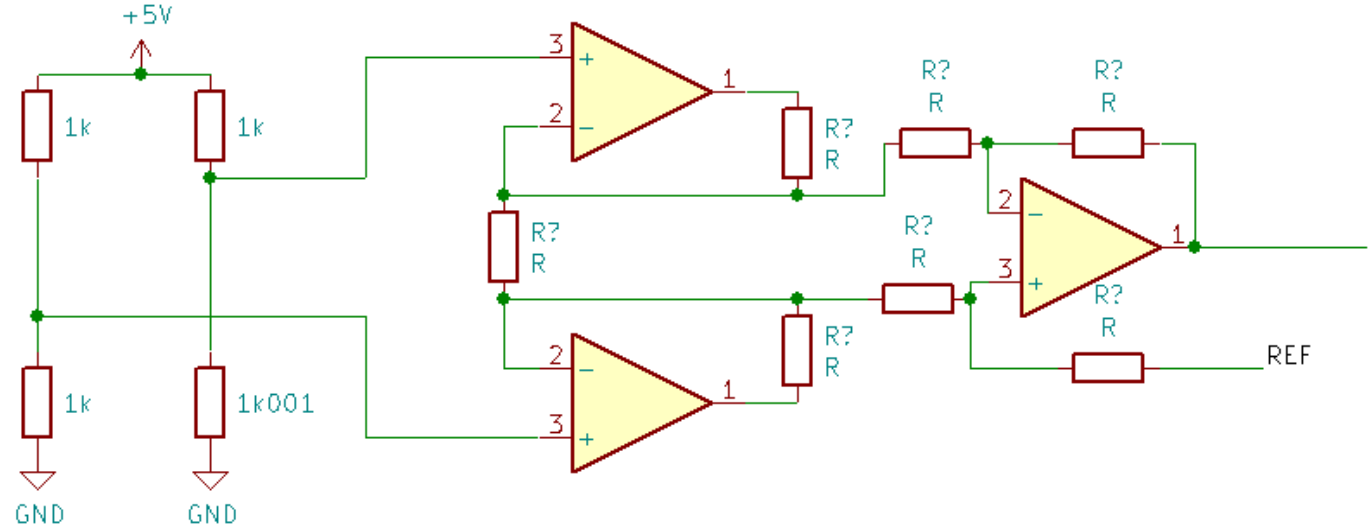
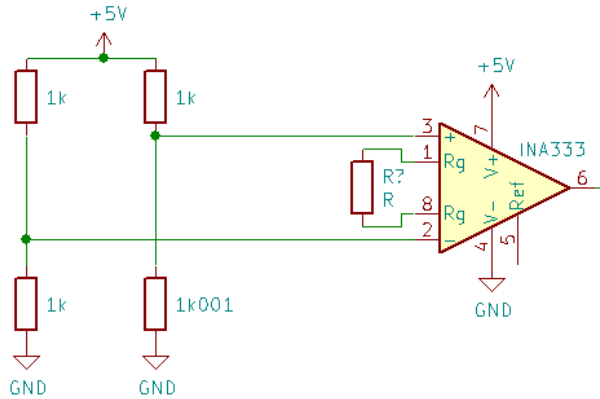
1. Mostek pomiarowy wheatstone'a: 4 tensometry



Source: wikipedia



Projekt: front-end analogowy





Projekt: front-end analogowy

JFET input?

Instrumentation?

Zero drift?

VOLTAGE OFFSET					
Offset	$V_S = \pm 15 \text{ V}^1$		250		μV
Average Temperature Coefficient	$T_A = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$		1		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset RTI vs. Supply (PSR)	$V_S = \pm 15 \text{ V}$	100			dB
INPUTS					
	Valid for REF and FB pair, as well as +IN and -IN				
Input Bias Current ²	$T_A = +25^\circ\text{C}$	20	27		nA
	$T_A = +85^\circ\text{C}$		24		nA
	$T_A = -40^\circ\text{C}$		30		nA
Average Temperature Coefficient	$T_A = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	30			$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current	$T_A = +25^\circ\text{C}$		1		nA
	$T_A = +85^\circ\text{C}$		1		nA
	$T_A = -40^\circ\text{C}$		1		nA
Average Temperature Coefficient	$T_A = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$	0.5			$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Impedance					

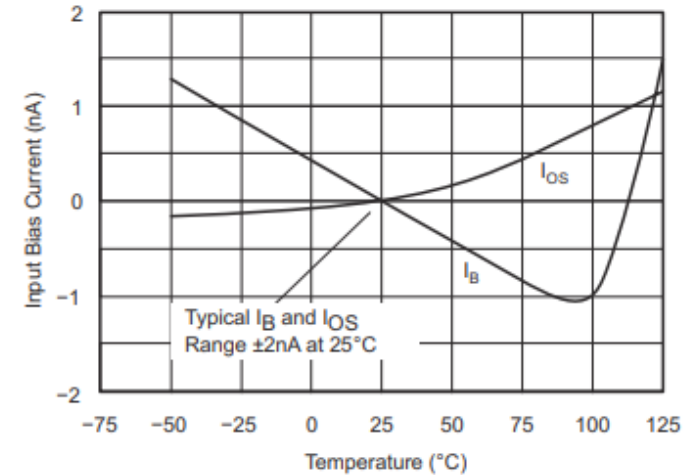
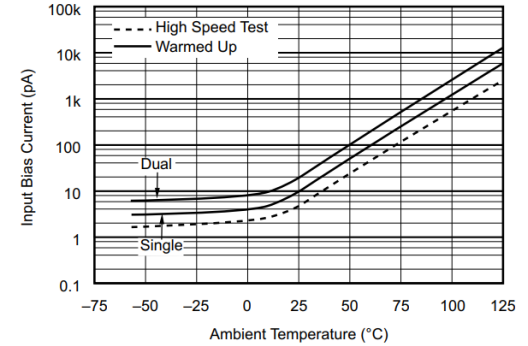


Figure 7-12. Input Bias Current vs Temperature

Projekt: front-end analogowy

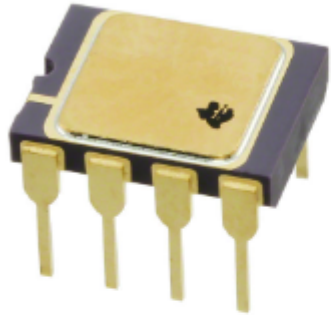


Image shown is a representation only. Exact specifications should be obtained from the product data sheet.

INA333SJD

Digi-Key Part Number 296-43526-5-ND

Manufacturer [Texas Instruments](#)

Manufacturer Product Number INA333SJD

Description IC INST AMP 1 CIRCUIT 8CDIP

Detailed Description Instrumentation Amplifier 1 Circuit Rail-to-Rail 8-CDIP SB

Customer Reference

Datasheet  [Datasheet](#)

EDA/CAD Models [INA333SJD Models](#)

In-Stock: 5

Can ship immediately
Due to temporary constrained supply, Digi-Key is unable to accept backorders at this time.

QUANTITY

[Add to List](#)

[Add to Cart](#)

All prices are in USD

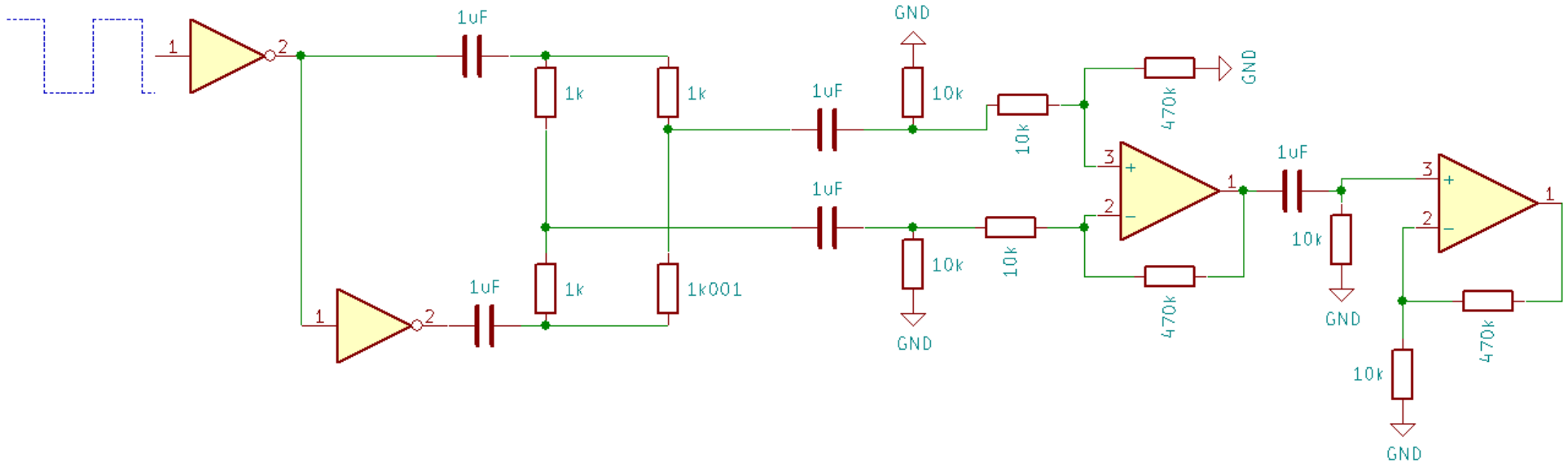
Tube

QTY	UNIT PRICE	EXT PRICE
 1	\$106.85000	\$106.85
10	\$101.33100	\$1,013.31



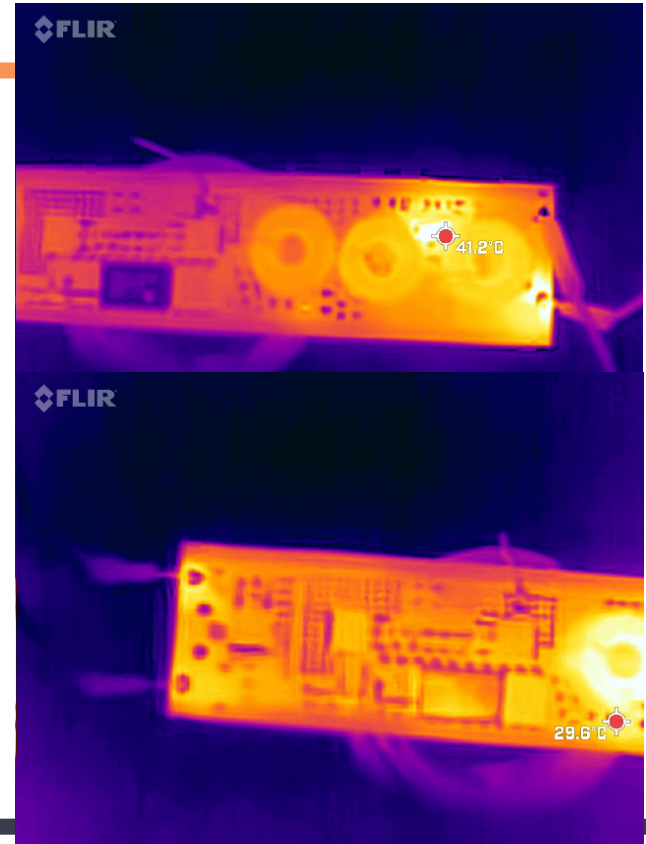
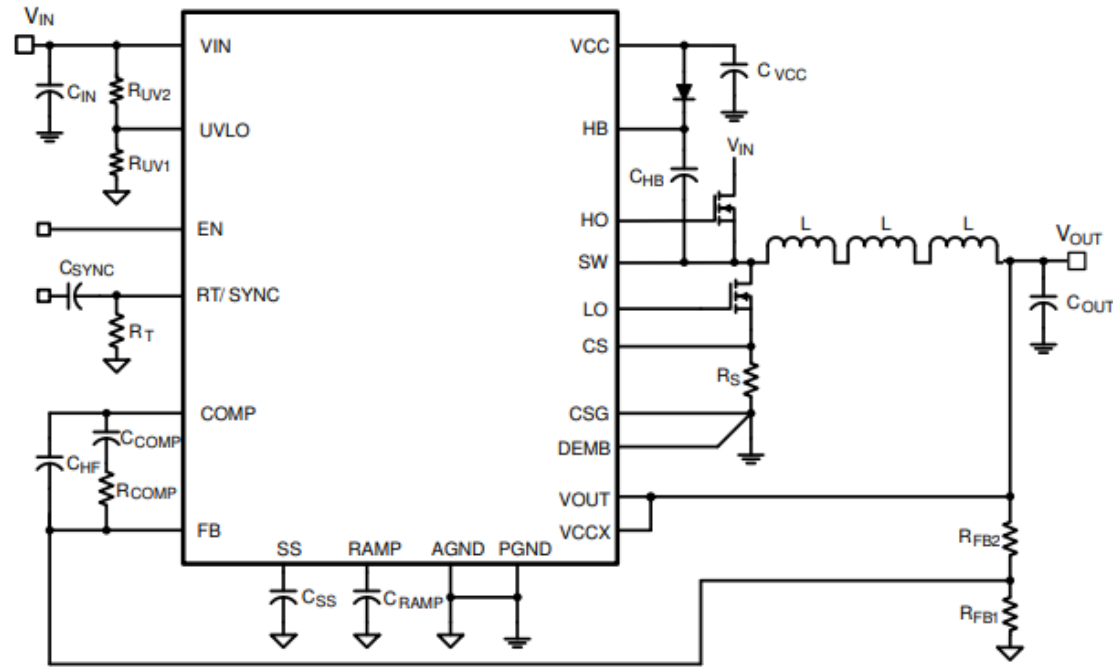
Projekt: front-end analogowy

A może inaczej? (chopper-satbilisation "ręcznie" z prostowaniem synchronicznie po stronie logiki za ADC)



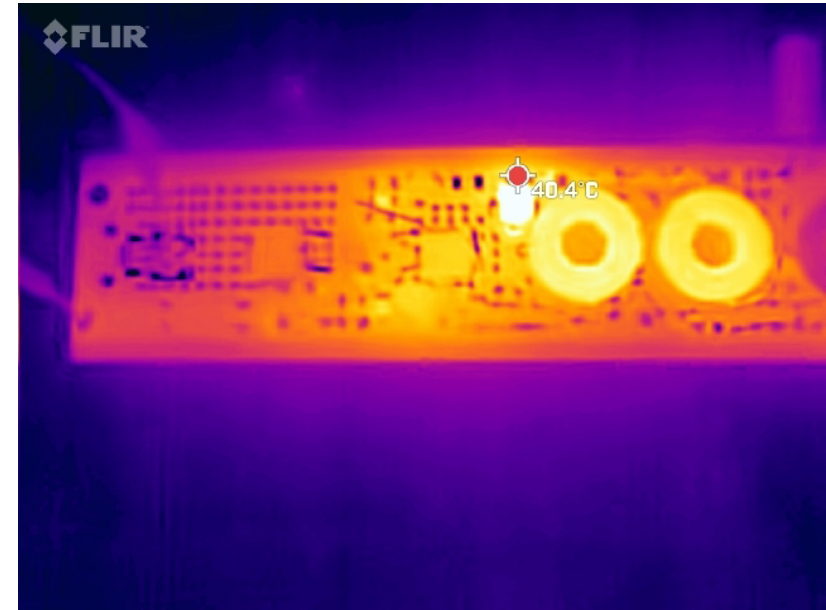
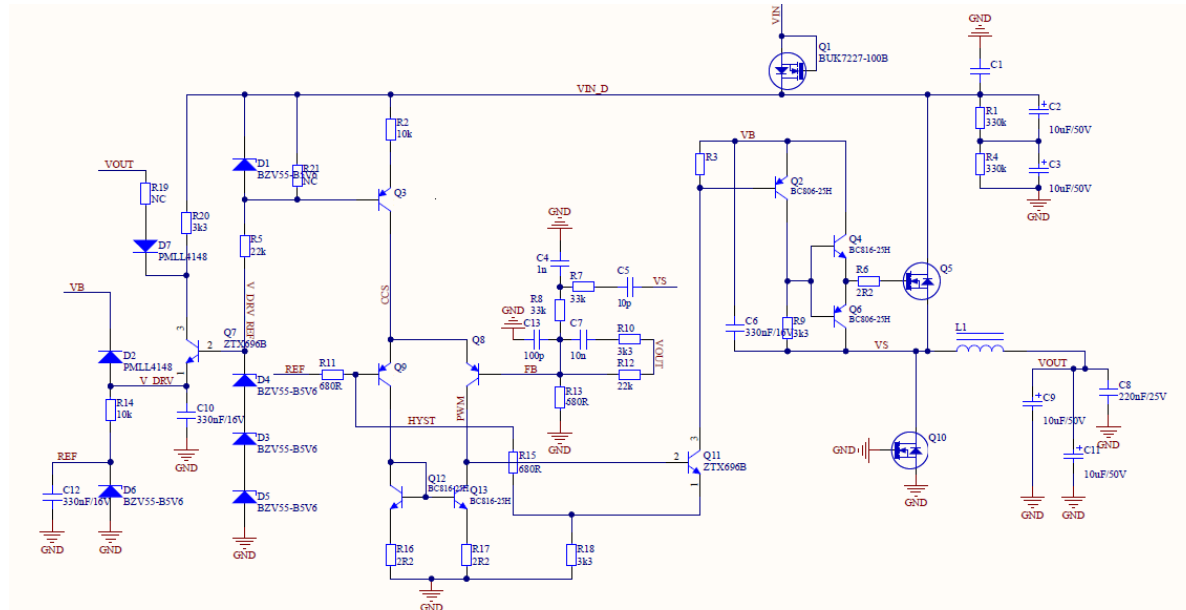


Projekt: przetwornica buck



Projekt: przetwornica buck

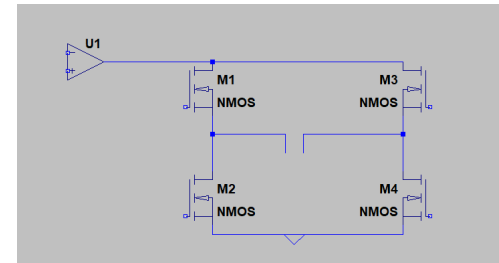
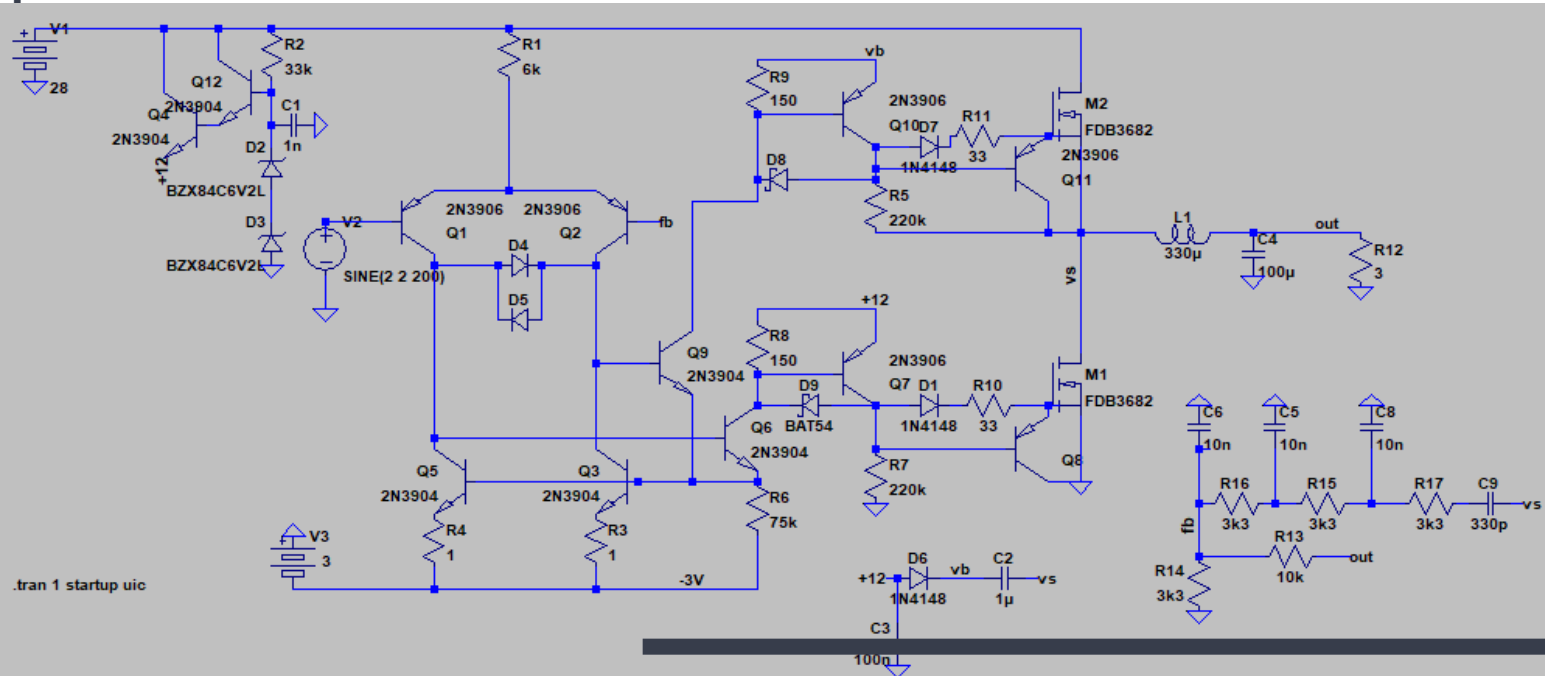
Podjęcie alternatywne: topologia samo-oscyłująca na komponentach 100% dyskretnych min 185 °C





Projekt: stopień drivera EM

Topologia synchronous-buck (wzmacniacz klasy D) samo-oscylicjąca 100% dyskretna plus mostek-H



Dziękuję!

adam@rocksolidelectro.com