
Elektronske komponente in senzorji

Standardizacija

Uvod

Definicija: Usklajenost z veljavnimi predpisi (standardi)

Prednosti:

- Prinese zagotavljanje in kontrolo kakovosti
- Lažja izmenjava in izbor elementov pri načrtovanju in usklajenost med proizvajalci
- Lažje iskanje elementa (ekvivalenta) v primeru izpada osnovnega produkta.

Vrste standardov - Po področju veljavnosti

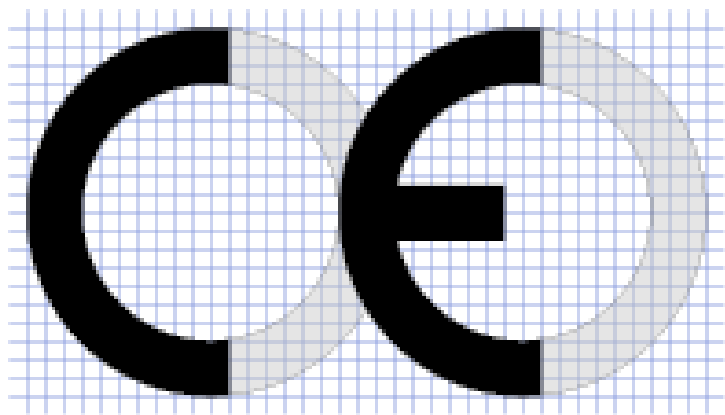
- Nacionalni
 - Nemčija (DIN)
Deutsche Industrie Norm
 - ZDA (MIL STD xxx)
Military standard – industrija je prevzela vojaške standarde
 - Mednarodni (skupnost držav)
 - IEC
(International Electrotechnic Commission)
 - ITU
(International Telecommunication standard)
- Splošna organizacija za standarde ISO
(International Organization for Standardization)

Vrste standardov - po lastnostih

- Standardi na področju kvalitete (vse večje potrebe po kvaliteti in zanesljivosti elementov)
 - Ni samo *končna kontrola električnih lastnosti elementa*
 - Ampak tudi *kontrola celotnega procesa izdelave*
 - Osnova za to je *sledljivost* – vsak produkt je individualno voden, kar omogoča točno analizo problema v primeru variacije proizvodnega procesa. ISO9000 omogoča proizvajalcu kvaliteto, zanesljivost, sledljivost
- Standardi na področju varstva okolja
 - ISO14000: procesi, izdelki
- EMC standardi (Electromagnetic Compatibility)
- RoHS (Restriction of Hazardous Substances) smernica

CE ali "CE" znak

"Conformité Européenne"



"Conformité Européenne"



"China Export"

Conformité Européenne znak mora biti na vseh izdelkih. S tem znakom proizvajalec jamči, da je izdelek skladen z EU normami (zdravje, varstvo okolja).

Komponente, sestavi in senzorji

Zanesljivost

Zanesljivost (ang. reliability)

- Zanesljivost elektronskega elementa ali sistema je verjetnost, da bo deloval v okviru zjamčenih podatkov proizvajalca pod predpisanimi pogoji delovanja preko zjamčenega časovnega obdobja, pri čemer število odpovedi ne presega obljubljenega!
- Je verjetnost preživetja elementa

POGOSTOST ODPOVEDI (Failure Rate, FR)

- FR je razmerje med :
 - število vseh odpovedi in
 - številom prisotnih elementov N
 - časom delovanja t .

$$FR = \frac{\textit{št. odpovedi}}{N \cdot t}$$

Današnji elementi so zelo zanesljivi → FR je majhna, zato je osnovna enota 1 **FIT** (Failure In Time)

$$1 \textit{ FIT} = 10^{-9} \frac{\textit{odpovedi}}{\textit{element h}}$$

Mean Time Between Failures (MTBF)

- Število odpovedi na milijon ur delovanja izdelka
- Je najbolj razširjen podatek o življenjski dobi izdelka
- Je bolj pomemben podatek za industrijo kot za potrošnika
- Zanesljivost **popravljivega** izdelka opišemo običajno z MTBF
- Zanesljivost **nepopravljivega** izdelka opišemo običajno z MTTF (Mean Time **To** Failure)

Mean Time To Repair (MTTR)

- Čas, potreben za popravilo okvarjenega elementa.
- V delujočem sistemu gre običajno za zamenjavo elementa
- MTTR je zato ponavadi povprečni čas, potreben za zamenjavo elementa
- Če MTTR narašča, to običajno podraži dolgoročno uporabo, zaradi časa nedelovanja (down-time) dokler ne prispe nadomestni del.
- MTTR se uporabniki izognejo tako, da kupijo nadomestne dele na zalogo
- Slednje je povezano s časom amortizacije elementa.

Failure In Time (FIT)

- Je drugačen način podajanja MTBF.
- Podaja število predvidenih odpovedi na 10^9 ur delovanja elementa.
- FIT običajno opisujejo v enotah:
 - 1000 naprav / 10^6 ur
 - ali 10^6 naprav v 1000 urah.
- FIT se običajno podaja z intervalom zaupanja CL (Confidence Limits).

MTBF - Primer

- Enota je delovala 316 ur. Med tem je odpovedala 4x. Določite MTBF enote.
- $MTBF=79 = 316(h)/(4 \text{ odpovedi})$
- Kakšna je verjetnost, da bo enota delovala 79 ur brez odpovedi? Ali lahko določimo?

Funkcija odpovedi (Failure function $F(t)$)

- Failure oz. **Un**reliability function
- $F(t)$ je verjetnost, da bo element, ki pravilno deluje v času $t = 0$, **odpovedal** do časa t .

Lastnosti $F(t)$:

- $t < 0 \rightarrow F(t) = 0$
(element deluje do $t=0$)
- $0 < t < t' \rightarrow 0 < F(t) < F(t')$
(večji časi - večja verjetnost za odpoved)
- $t \rightarrow \infty \rightarrow F(t) \rightarrow 1$
(za zelo velike čase element zagotovo odpove)

Funkcija zanesljivosti (Reliability function, $R(t)$)

- $R(t)$ je verjetnost, da bo element, ki deluje v $t=0$, **preživel** do časa t
- $R(t)$ je verjetnostno nasprotje $F(t)$:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Funkcija verjetnostne gostote : $f(t)$

- $f(t)$ podaja verjetnost za **odpoved** (**Failure**) na časovno enoto.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

- Z integracijo dobimo obratno zvezo, ki podaja funkcijo odpovedi F kot integral funkcije verjetnostne gostote za odpoved f

$$F(t) = \int_0^t f(t') dt' \quad [F(0) = 0]$$

Povprečni čas do odpovedi MTTF (Mean Time To Failure)

- MTTF je povprečni čas do odpovedi oz.
- MTTF je povprečni življenjski čas elementa

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Pogostost odpovedi: $FR(t)$ (Failure Rate)

- Je normirano število odpovedi na časovno enoto v trenutku t .
- Drugo ime: $\lambda(t)$.

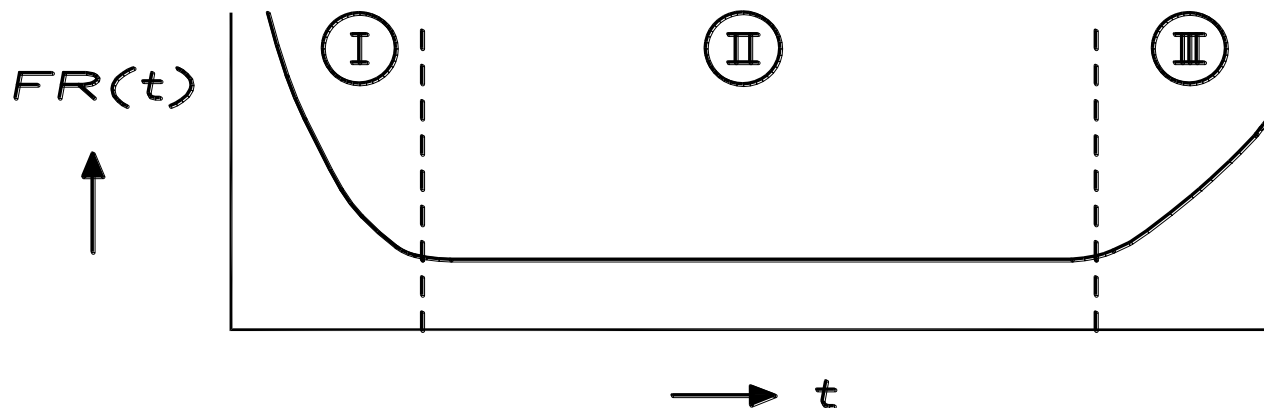
$$\lambda(t) = FR(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

$$FR(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

$$\lambda(t) = FR(t) = -\frac{d \ln R(t)}{dt}$$

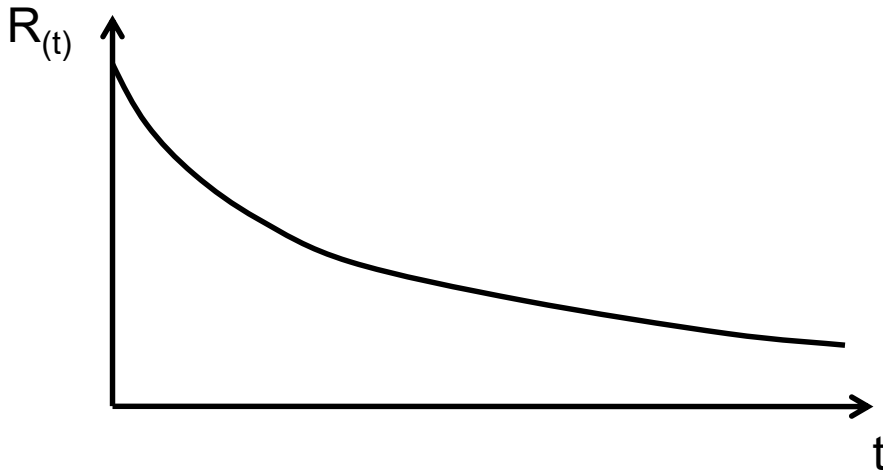
Potek "življenja elementa" (Reliability bathtub curve)

- Zgodnje odpovedi (ang. **Infant mortality**)
grobe napake pri izdelavi (mehanske poškodbe, zamenjava materiala)
- Normalna uporaba (ang. **random-constant failure mode**)
(padec na tla, zalitje z vodo, napetostni sunek)
- Iztrošenost (ang. **wearout period**)
iztrošenost kritičnih materialov (oksidacija žarilne nitke v žarnici, korozija metalizacije v PCB/IC).



Funkcija zanesljivosti (Reliability function, $R(t)$)

- Izbor poteka $R(t)$ je pogojen z lastnostmi mehanizmom odpovedi.
- Običajna oblika $R(t)$, ki jo srečamo v inženirskih problemih je eksponentno padajoča.



Lastnosti $R(t) = 1 - F(t)$:

$t < 0 \rightarrow R(t) = 1$
(element deluje do $t=0$)

$0 < t < t' \rightarrow 0 < R(t) < R(t')$
(večji časi - manjša verjetnost preživetja)

$t \rightarrow \infty \rightarrow R(t) \rightarrow 0$
(enkrat element gotovo odpove \rightarrow zanesljivost = 0)

Eksponentna porazdelitev zanesljivosti

- Eksponentna porazdelitev je primerna, kadar je pogostost odpovedi $FR(t)$ **neodvisna od časa**.
- **Uporabna** za opis elementov v **področju normalne uporabe** (področje II banje).

$$R(t) = e^{-\int_0^t FR_0 dt} = e^{-FR_0 t}$$

$$FR(t) = \text{const} = FR_0$$

$$F(t) = 1 - e^{-FR_0 t}$$

Element	FR_0/FIT	MTTF/let
upor	20	5.800
kondenzator (plastični)	2	58.000
Al elektrolitski kondenzator	2500	46
polprevodniški element, IC	100	1160
spajkani kontakt	1	116000

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = + FR_0 e^{-FR_0 t}$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} t FR_0 e^{-FR_0 t} dt = \frac{1}{FR_0}$$

Weibullova porazdelitev zanesljivosti

- Weibullova porazdelitev lahko glede na vrednosti konstant α , β . opiše vsa tri področja banje.

$$\lambda = FR(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1}$$

- $\beta < 1 \rightarrow$ FR upada s časom;
(zgodnje odpovedi; področje I banje)
- $\beta > 1 \rightarrow$ FR raste s časom;
(obdobje iztrošenosti; področje III banje)
- $\beta = 1 \rightarrow$ FR se s časom ne spreminja
(normalne uporabe; področje II banje)
enako eksponentni porazdelitvi

Weibullova porazdelitev zanesljivosti

- Weibullova porazdelitev glede na vrednosti konstant α , β opiše vsa tri področja banje.

$$\lambda = FR(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

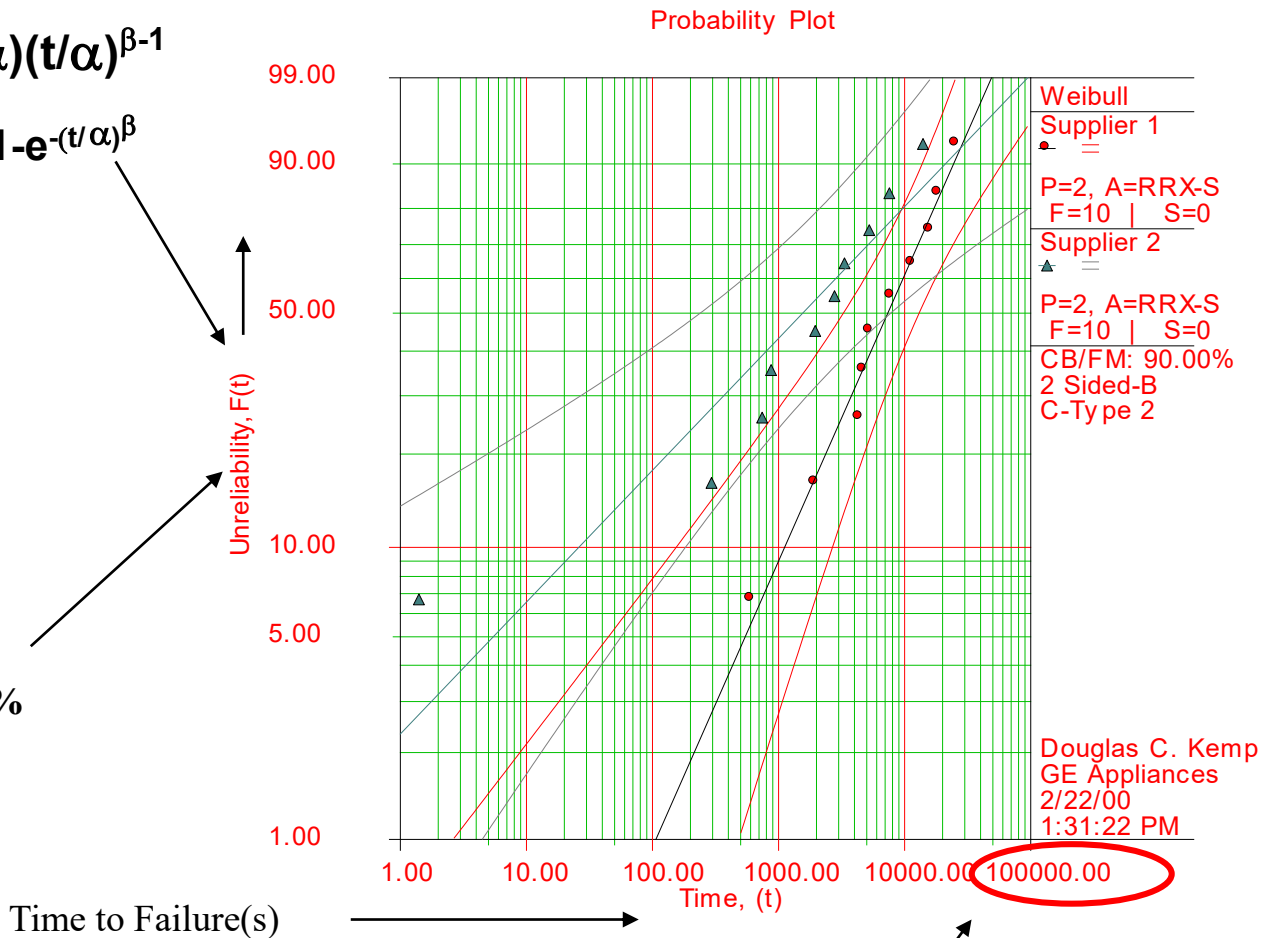
Potek funkcije odpovedi F(t) - Weibull

Generated by: ReliaSoft's Weibull++ 5.0 - www.Weibull.com - 888-886-0410

$$\lambda = (\beta/\alpha)(t/\alpha)^{\beta-1}$$

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

$$F(t) = (1 - R(t))100\%$$



$\beta_1=1.00, \eta_1=10604.63, \rho=0.99$
 $\beta_2=0.46, \eta_2=3439.41, \rho=0.93$

Ob času t bo odpovedalo 100% populacije

Potek pogostosti odpovedi - Weibull

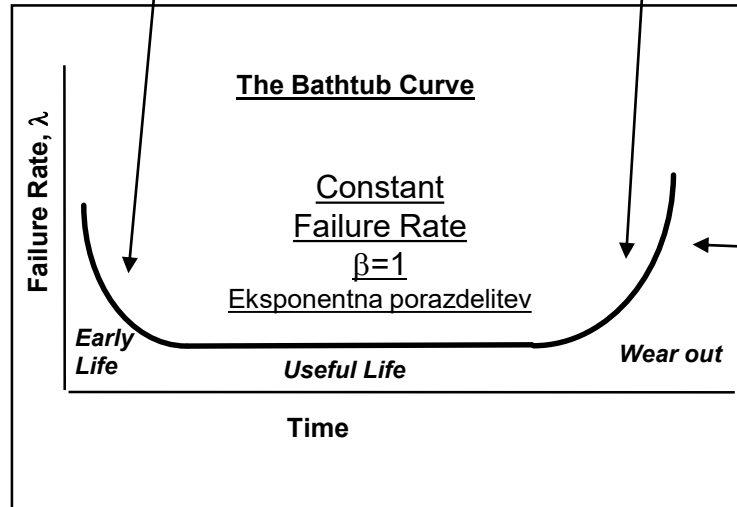
$$\lambda = (\beta/\alpha)(t/\alpha)^{\beta-1}$$

$$R(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

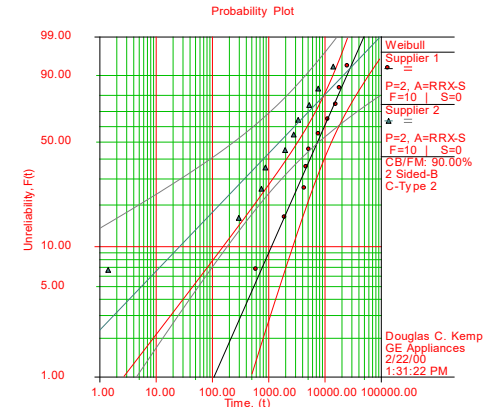
$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

Padajoča
pogostost odpovedi
 $\beta < 1$

Naraščajoča
pogostost odpovedi
 $\beta > 1$



Generated by: ReliaSoft's Weibull++ 5.0 - www.Weibull.com - 888-886-0410



$\beta_1=1.00, \eta_1=10604.63, p=0.99$
 $\beta_2=0.46, \eta_2=3439.41, p=0.93$

Naklon Weibullove karakteristike določa, kje točno na krivulji banje se nahaja izdelek

Komponente, sestavi in senzorji

Obremenitve elementov

Vrste obremenitev (stress)

- Okoljska: T, vlaga, tlak, veter, sonce, dež
- Mehanska: Šok, Vibracije, Rotacija, Abrazija
- Električna: ON-OFF cikel, tolerance napetosti, obremenitev, šum
- Elektromagnetna: ESD, E-polje, B-polje, Izgube moči
- Radiacijska: X-žarki (neionizirajoče), Gama žarki (ionizirajoče)
- Biološka: Plesen, Alge, Bakterije, Prah
- Kemične: Alkohol, Ph

Faktorji obremenitve (stress factor)

- Na pogostost odpovedi λ lahko vpliva več faktorjev obremenitve oz. obremenitev (π):
- Splošno uporabljeni faktorji obremenitve
 - π_T = Temperaturni
 - π_V = Električni faktor obremenitve
 - π_E = Okoljski faktor obremenitve
 - π_Q = Faktor obremenitve kvalitete

- Pogostost odpovedi

$$\square \lambda = \lambda_B * \pi_T * \pi_V * \pi_E * \pi_Q$$

λ_B = osnovna pogostost odpovedi komponente

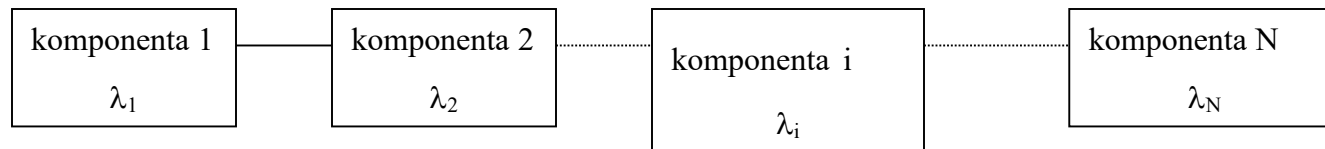
Standardi s področja zanesljivosti

- MIL-HDBK-217F
 - Izračun zanesljivosti elementa v obdobju zgodnjega cikla razvoja
 - Izračun zanesljivosti elementa v obdobju pozne cikla razvoja
- Bellcore (TR-TSY-000332):
 - Razvit v Bell Communications Research za splošno uporabo v elektronski industriji (in posebej za telekomunikacije)
 - Najvišji faktor obremenitve ima električna obremenitev
 - Podatki na osnovi testiranja delovanja v lab. in realnem okolju, analize, podatkovnih listov in standarda US MIL Std 217
 - Faktorji obremenitve: okoljski, kvaliteta, električni, termični

Standardi s področja zanesljivosti

- HRD4 (Hdbk of Reliability Data for Comp, Issue 4):
 - Razvit za telekomunikacije (British Telecom Materials and Components Center)
 - Vključuje faktorje obremenitve termična, električna, okoljska, obremenitev kvalitete
 - Standard describes generic failure rates based upon a 60% confidence interval around data collected via telecom equipment field performance in the UK
- CNET:
 - Razvit za telekomunikacije (Francoski nacionalni center za komunikacije)
 - Podoben HRD4, vključuje faktorje obremenitve termična, električna, okoljska, obremenitev kvalitete je prevladujoča

Zaporedna metoda izračuna zanesljivosti elektronskega sistema



Problemi

- Komponente nimajo nujno konstantne pogostosti odpovedi λ

$$\lambda_{ss} = \sum \lambda_i$$

- Metoda ne opisuje dobro uporabe komponent in obremenitev
- Če ena komponenta odpove, ne odpove nujno vse vezje
 - Primer: Blokirni kondenzator odpove kot odprte sponke

Standardne pogostosti odpovedi v FIT

Component Type	Method A - λ	Method B - λ	Method C - λ	Method D - λ	Method E - λ
BJT/FET	5.0	3.8	3.2	7.6	4.0
Switch	5.0	44.0	30.0	1.0	20.0
Metal Film Res	0.7	2.5	0.05	0.05	0.2
Carbon Res	18.2	2.7	1.0	1.1	2.6
Varistor, tc Res	6.0	1.0	10.0	1.0	10.0
Electrolytic Cap	210	22.0	120	16.0	120
Polyester Cap	8.5	2.0	3.0	0.5	7.0
Tantalum Cap	15.0	7.0	8.0	4.0	10.0
Ceramic Cap	2.0	1.0	0.5	0.25	1.2
Si PN, Schottky, PIN Diode	2.4	1.6	3.6	1.6	2.4
Zener Diode	3.2	13.6	17.4	18.8	70.0
LED	9.0	15.0	280	65.0	1.0
BJT Dig IC <100 Gates	20.0	138	2.3	1.0	6.7
BJT Dig IC < 1000 Gates	30.0	150	4.0	1.5	10.0
MOS Dig IC < 1000 Gates	27.3	301	9.0	1.0	13.3
MOS Dig IC => 1000 Gates	55.0	550	16.0	2.2	31.0
EM Coil Relay	385	302	220	715	44.0
SSR, Optocoupler	120	105	47.0	190	12.0
BJT Linear IC < 1000 Transistors	14.0	27.0	4.3	1.0	50.0
MOS Linear IC < 1000 Transistors	19.0	54.0	9.0	1.0	13.3
Transformer < 1VA	33.0	90.0	70.0	60.0	50.0
Transformer > 1VA	3.0	9.0	7.0	6.0	5.0

Standardne pogostosti odpovedi v FIT

Component Type	Method A - λ	Method B - λ	Method C - λ	Method D - λ	Method E - λ
Plastic Shell Connector, Plug, Jack	100.0	55.0	150.0	120.0	105.0
Metal Shell Connector, Plug, Jack	33.0	18.0	57.0	40.0	35.0
Pb, NiCd, Li, Lio, NiMH Battery	7.0	1.0	50.0	8.0	22.0
Quartz Crystal Thru Hole	115.0	113.8	113.2	117.6	114.0
Quartz Crystal SMT	15.0	34.0	30.0	51.0	20.0
Quartz Oscillator Module CMOS	10.0	12.5	10.5	20.0	15.0
Diode Bridge	4.8	1.6	3.6	1.6	2.4
LED Display	19.0	115.0	280	165.0	21.0
LCD Display	119.0	215.0	380	1165.0	206.0
BJT Linear IC > 1000 Transistors	114.0	217.0	41.3	91.0	150.0
MOS Linear IC > 1000 Transistors	29.0	74.0	19.0	21.0	113.3

Standardni faktorji obremenitve

- Definicije faktorjev obremenitve

- π_T = Temperature Stress Factor = $e^{[T_a/(T_r-T_a)]} - 0.4$

T_a = največja dovoljena temperatura delovanja,
 T_r = največja nazivna temperatura delovanja, $T_r > T_a$

- π_V = C/R/T električni faktor obremenitve =

$$\pi_V = e^{[(V_a)/V_r-V_a]-2.0}$$

V_a = največja dovoljena napetost delovanja
 V_r = največja nazivna napetost delovanja, $V_r > V_a$

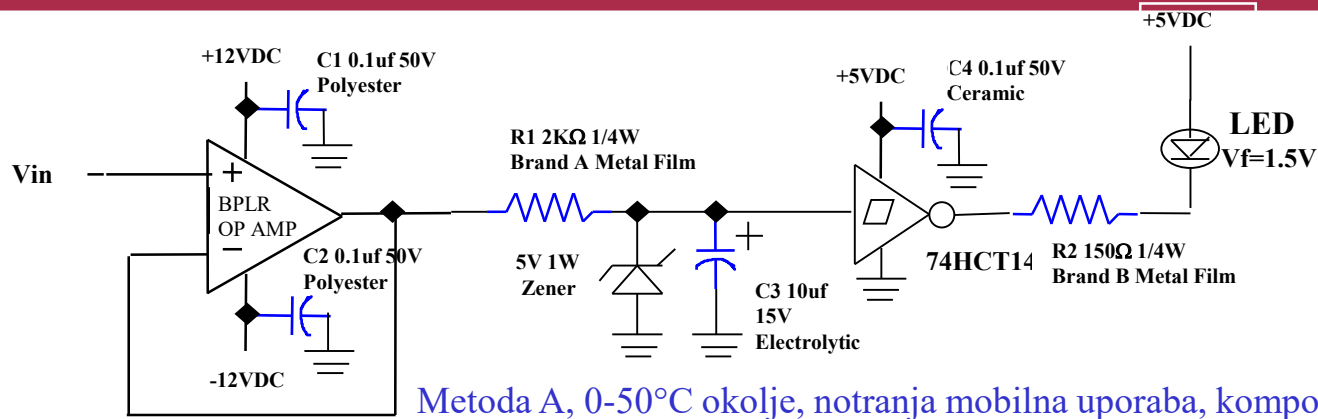
- π_E = Okoljski faktor obremenitve

- Indoor Stationary = 1.0
- Indoor Mobile = 2.5
- Outdoor Stationary = 3.0
- Outdoor Mobile = 5.0
- Automotive = 7.0

- π_Q = Quality Factor (dobavitelji komponent in sestavljanje)

- Vojaške specifikacije MIL komponent = 0.75
- 100 ur "Burn In" cikel = 0.75
- Komerzialne komponente od proizvajalca = 1.0
- Komerzialne komponente od distributerja = 1.25
- Ročno sestavljene komponente = 3.0

Standardni faktorji obremenitve



Metoda A, 0-50°C okolje, notranja mobilna uporaba, komponente od distributerja

Komponenta	Max Tr	Max Vr	π_T	π_V	π_E	π_Q	λ_{FITS}
C1	105C	50V	2.082	0.186	2.5	1.25	10.29
C2	105C	50V	2.082	0.186	2.5	1.25	10.29
C3	85C	15V	3.773	0.223	2.5	1.25	552.2
C4	125C	50V	1.548	0.151	2.5	1.25	1.46
R1	120C	20V	1.643	0.232	2.5	1.25	0.83
R2	150C	6V	1.249	0.549	2.5	1.25	1.50
Zener Diode	100C	N/A	2.318	1.0	2.5	1.25	23.18
Op Amp	125C	36V	1.548	1.0	2.5	1.25	67.73
74HCT14	125C	7V	1.548	1.649	2.5	1.25	217.77
LED	85C	N/A	3.773	1.0	2.5	1.25	106.16

991.37 Fits → 115.1 Yrs MTRF

Standardni faktorji obremenitve

- Upori, potenciometri $\leq 50\%$ max. moči
- Kondenzatorji/Upori $\leq 60\%$ max. delovne napetosti
- Tranzistorji $\leq 50\%$ max. delovne napetosti
- Večina komponent in vezij ima temperaturno odvisne parametre, ki jih zajema TC (temperaturni koeficient)

Komponente, sestavi in senzorji

Staranje

Staranje

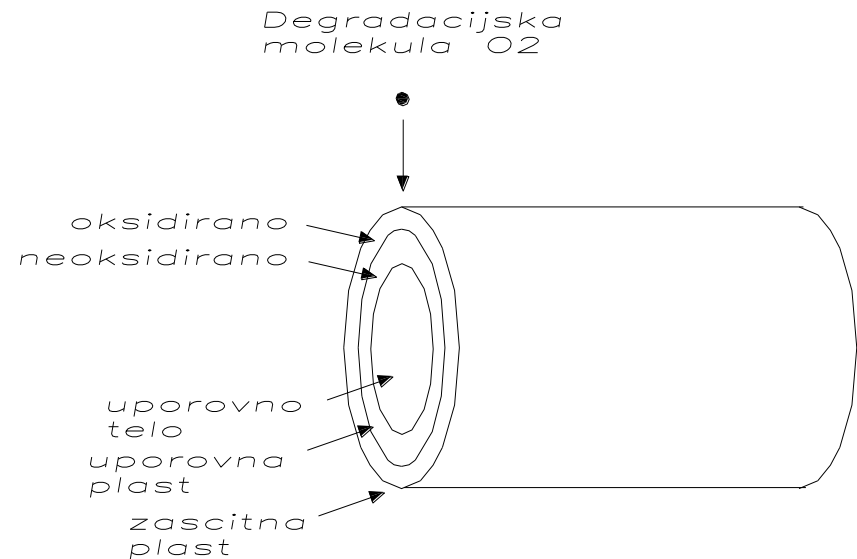
- Počasno spreminjanje strukture elementa, zaradi degradacijskih procesov, med dolgoletnim delovanjem.

Opis degradacijskih procesov

- Degradacijski procesi so škodljivi, počasni fizikalni ali kemijski procesi, ki potekajo v elementu kot posledica vplivov iz okolice ali iz elementa samega.
- Primer:
 - kemijske reakcije zaradi prisotnih agresivnih snovi (korozija metalizacijske linije v PCB/IC)
 - mehanske razpoke v strukturi zaradi temperaturnih šokov pri segrevanju in ohlajanju elementa

Degradacija CF upora - difuzija

- Molekule O_2 iz okolice zaradi povišane temperature v obremenjenem uporu tekom let počasi **difundirajo** v globino strukture.
- Molekula O_2 prodre do uporabne plasti,
- Plast oksidira → uporabni material se spremeni v izolator.
- Znan tak primer je degradacija CF upora, kjer pri oksidaciji uporabne plasti nastaja CO_2 :



Degradacija CF upora

- Uporovna plast se med dolgoletnim procesom staranja stalno tanjša
- Upornost upora $R(t)$ s časom stalno raste.
- Tako spremembo upornosti imenujemo **degradacija upora** ΔR .
- Ko $R(t)$ preseže od proizvajalca predpisano maksimalno dopustno vrednost upornosti R_{\max} ga je potrebno zamenjati z novim.
- To je **odpoved** elementa

$$R(t) \geq \Delta R_{\max} = R_{\max} - R_0$$

Temperaturna in časovna odvisnost degradacije

- Degradirano področje je določeno, s povprečno globino difuzijskega vdora L degradacijske molekule (O_2) v strukturo elementa.
- Pri difuziji je povprečna globina vdora L podana z enačbo

$$L = \sqrt{Dt}$$

- $t \rightarrow$ čas degradacijskega procesa [leta]
- $D \rightarrow$ difuzijska konstanta molekule O_2 v CF uporu

Difuzija

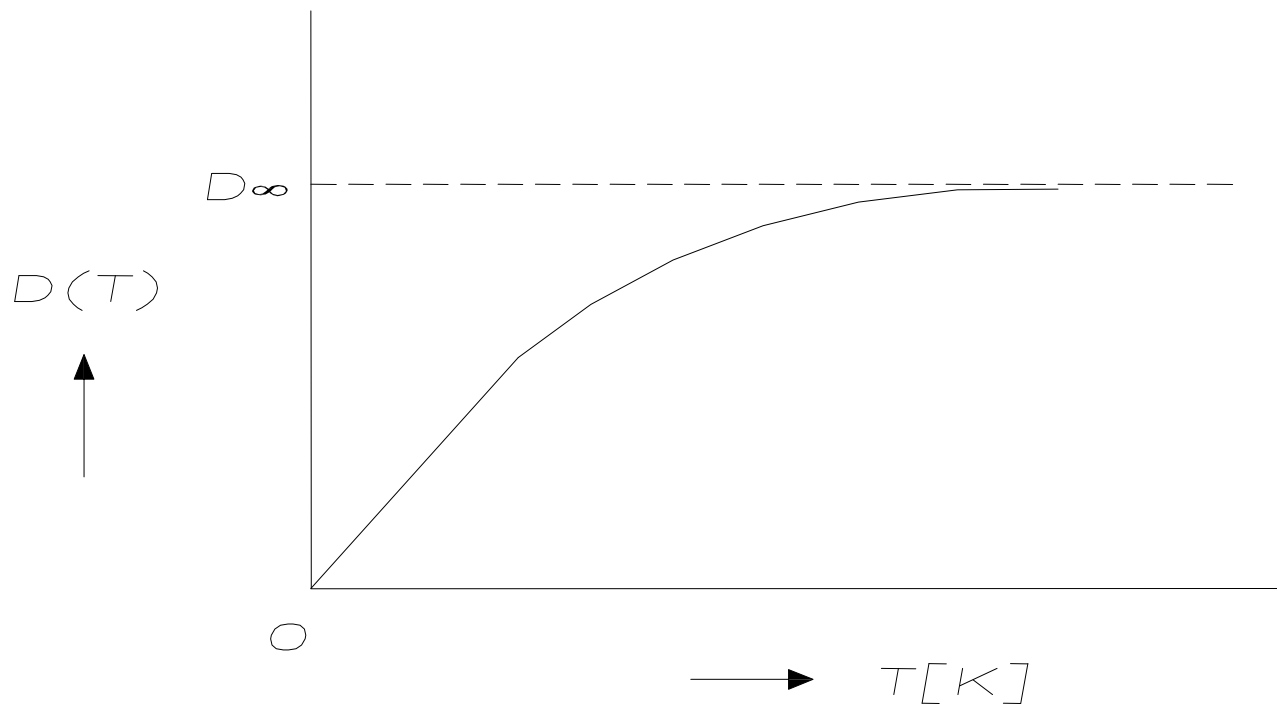
- Difuzija je izmenjevalno preskakovanje atomov po kristalni rešetki zaradi termičnega gibanja atomov
- Difuzijska konstanta raste s temperaturo, kot opisuje **Arrheniusova temperaturna odvisnost**

$$D = D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$

- D_{∞} → limitna vrednost D za visoke temperature
- E_{aD} → aktivacijska energija difuzijskega procesa $E_{aD} \approx 1 \dots 2$ eV
- k → Boltzmannova konstanta $k = 8.6 \cdot 10^{-5}$ eV/K
- T → absolutna temperatura [K]

Difuzija

$$D = D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$



Degradacija CF upora

$$L = \sqrt{Dt} = \sqrt{D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}} \cdot t} \quad R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$\Delta R(T, t) \propto \sqrt{D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{k \cdot T}} \cdot t} \propto D_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot \sqrt{t}$$

- $D_{\infty} \rightarrow$ limitna vrednost D za visoke temperature
- $E_a = E_{aD}/2 \rightarrow$ aktivacijska energija $E_a \approx 0.5 \dots 1\text{eV}$
- $k \rightarrow$ Boltzmannova konstanta $k = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$
- $T \rightarrow$ absolutna temperatura [K]

Pospešeno staranje in testiranje

- Staranje lahko pospešimo z intenziviranjem različnih parametrov, ki pospešujejo degradacijske procese
- Proces intenziviranja takega parametra imenujemo **obremenitev** (stress), posledico tega imenujemo **pospešeno staranje**

Uporaba pospešenega staranja

- S pospešenim staranjem povzročijo visoko odpoved v tovarni.
- Tisti, ki preživijo, so preživeli obdobje otroške umrljivosti
- Slabi elementi odpovedo že v tovarni in jih izločijo, na tržišče pridejo dobri elementi z višjo zanesljivostjo.
- Pospešeno staranje se uporablja za:
 - določitev življenjskih časov elementov (MTTF, FIT)
 - določitev **aktivacijske energije** (E_a) degradacije

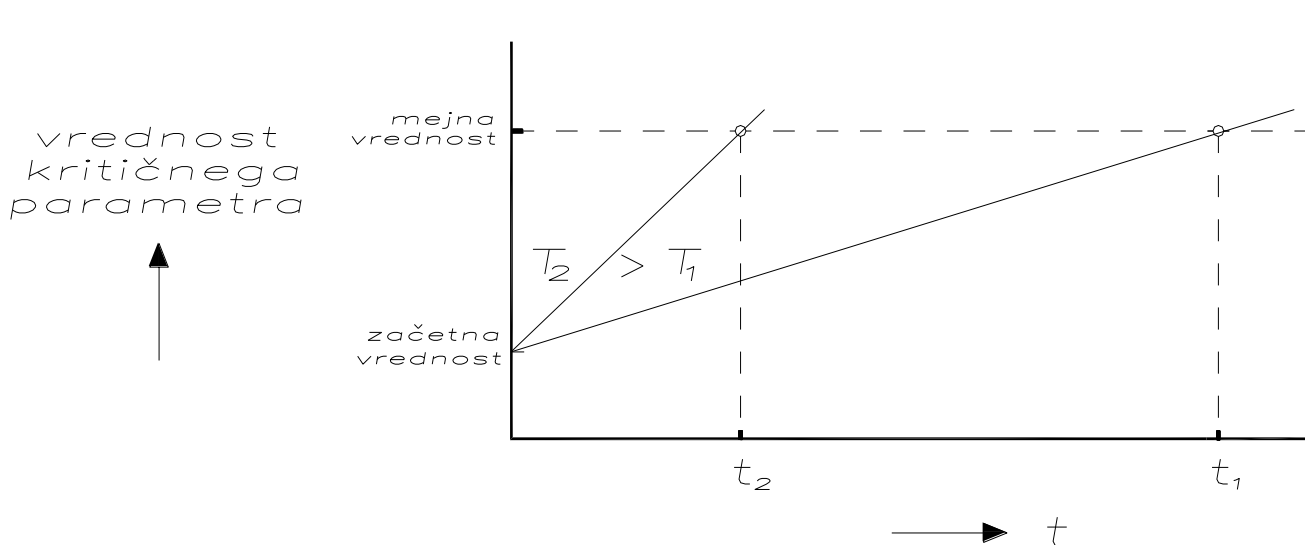
Pospešeno staranje s povišano temperaturo

- Hitrost degradacije je določena s hitrostjo degradacijske reakcije (Reaction Rate, RR)
- Pri degradaciji CF upora → hitrost oksidacije uporovne plasti
- RR je pri oksidaciji uporovne lasti določena z globino vdora L in časom
- Zato ima RR običajno enako temperaturno odvisnost kot L:

$$RR(T) = RR_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$

Pospešeno staranje CF upora

- Meritev $R(t)$ pri različnih temperaturah:.
- Dobimo rezultat meritve pri temperaturah ($T_2 > T_1$)
- Zaradi degradacije $R(t)$ raste \rightarrow element odpove, $R(t) = R_{\max}$.
- Če dvignemo temperaturo meritve $T_2 > T_1$ potekajo degradacijske reakcije hitreje in degradacija narašča bolj strmo
- Hitrejša odpoved elementa pri višjih temperaturah ($t_{\text{odp}2} < t_{\text{odp}1}$) oz. pospešeno staranje elementa
- Večja, ko je hitrost reakcije RR pri temperaturi T krajši je čas do odpovedi pri tej temperaturi $t_{\text{odp}}(T)$



$$RR(T) = RR_{\infty} \cdot e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$

$$\frac{t_{\text{odp}1}}{t_{\text{odp}2}} = \frac{RR_2}{RR_1} = e^{\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

Pospešitveni faktor (acceleration factor AF_x)

- Pospešitveni faktor zaradi povišane temperature AF_T je razmerje RR pri temperaturah ($T_2 > T_1$)
- Za kolikokrat pospešimo degradacijski proces, če dvignemo temperaturo iz T_1 na T_2

Pospešitveni faktor AF_T - primer

- Določi pospešitveni faktor AF_T pri pospešenem staranju s podatki:
- $E_a = 1 \text{ eV}$, $T_1 = 50^\circ\text{C}$
- Temperatura pospešenega staranja $T_2 = 125^\circ\text{C}$!

$$T_2 = 398\text{K}, T_1 = 323\text{K}$$

$$AF_T = \frac{t_{odp1}}{t_{odp2}} = \frac{RR_2}{RR_1} = e^{\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \approx 300$$

Pospešitveni faktor AF_T

Kakšen je AFT , če je element 40 let (350.000 ur) na $T_1=60^\circ\text{C}$ za različne povišane temperature T_2

$T_2 [^\circ\text{C}]$	AF_T	Ekv. čas (40 let@ T_1)	$E_a = 1 \text{ eV}$ $T_1 = 60^\circ\text{C}$
60	1	40 let = 350 400 h	
85	11.5	30 000 h	
125	300	1200 h	
150	$1.7 \cdot 10^3$	200 h	
200	$3.1 \cdot 10^4$	11 h	
250	$3.2 \cdot 10^5$	1.1 h	
300	$2.2 \cdot 10^6$	0.2 h	

Določanje FIT/MTTF in E_a

- Življenjski čas je povprečni čas, ki ga element ali sistem preživi od začetka svojega delovanja do odpovedi.
- Eksperimentalno ugotavljanje pri sobni temperaturi trajalo predolgo MTTF , saj tipične življenjske dobe znašajo 10 in več let, posameznih elementov pa še mnogo dalj !
- Zato degradacijo oz. staranje skušamo pospešiti z intenziviranjem nekega parametra, ki pospešuje degradacijske procese ter tako skrajšamo življenjske čase in s tem čas meritev

Določanje MTTF - primer

- Element uporabljamo na 125°C
- Element ima eksponentni potek funkcije zanesljivosti ($R(t)=\exp(-\lambda t)$)
- $MTTF \approx 4500$ ur.
- Normalna uporaba komponente je pri sobni temperaturi ($T \approx 25^\circ\text{C}$)
- Kakšna je funkcija odpovedi (FR)?
- Koliko % elementov bo odpovedalo pred predvidenim življenjskim časom (40000 ur), če je $AF_T \approx 35$ za podani temperaturi?

$$MTTF(T = 125^\circ\text{C}) = 4500h$$

$$MTTF(T = 25^\circ\text{C}) = 4500h \cdot 35 = 157500h$$

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \approx 35$$

$$FR = \lambda = \frac{1}{MTTF(25^\circ\text{C})} = \frac{1}{157500h}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

$$F(40000h) = 1 - R(40000h) = \left(1 - e^{-\lambda \cdot 40000h}\right) \cdot 100\% = 22.43\%$$

Pospešeno staranje s povišano napetostjo

- Hitrost reakcije degradacijskih procesov narašča zaradi lokalnega Jouleovega segrevanja, elektromigracije materialov itd.
- Hitrost degradacije raste z napetostjo:

$$RR(T, V) = K_V(T) V^{g(T)}$$

- $K_V(T)$ → konstanta degradacije z Arrheniusovo temperaturno odvisnostjo
- $g(T)$ → potenca napetostne degradacije, odvisna od temperature ($g(T) \approx 1 \dots 5$)

AF_V

- Akceleracijski faktor za staranje s povišano napetostjo ($V_2 > V_1$):

$$AF_V = \frac{t_1(V_1)}{t_2(V_2)} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^g$$

$$RR(T, V) = K_V(T) V^{g(T)}$$

Pospešeno staranje s povišanim tokom

- Posledica obremenitve s povišanim tokom so lokalna Joulova segrevanja, elektromigracije materiala → pospešena degradacija
- Hitrost degradacije raste tokom J :

$$RR(T, J) = K_J(T) J^{h(T)} \quad AF_J = \frac{t_1(J_1)}{t_2(J_2)} = \left(\frac{J_2}{J_1}\right)^h$$

- $h \rightarrow (h \approx 1 \dots 4) \quad (J_2 > J_1)$

Pospešeno staranje s povišano vlago (η)

- Pospešen vdor majhnih molekul vode v strukturo elementa, kjer povzročijo degradacijo.
- Pri tem voda prinese iz okolice ali pa izpira (leaching) iz materiala ohišja agresivne nečistoče → dodatna degradacija

$$AF_{\eta} = e^{A E_{a\eta} (\eta_t^2 - \eta_a^2)}$$

- A → konstanta degradacije
- $E_{a\eta}$ → aktivacijska energija degradacije
- η_t, η_a → relativna vlaga testiranja, ambienta

Pospešeno staranje s kombinirano obremenitvijo

- Kombinacija različnih degradacijskih efektov
→ kombinirano pospešeno staranje s povišano temperaturo in vlago.
- Tako pospešeno staranje se izvaja v avtoklavu s povišano temperaturo in relativno vlago

$$AF_{T,\eta} = AF_T \cdot AF_\eta$$

Elektronske komponente in senzorji

Upori

Pregled poglavja

- Oznake uporov z IEC barvno kodo
- Oznake uporov z IEC številčno kodo
- Renardove lestvice
- Nazivna moč
- Stabilnost
- Mejna napetost, kritična upornost
- Impulzno krmiljenje
- Upori pri VF
- Šum na uporih

Razdelitev uporov in njihove značilnosti

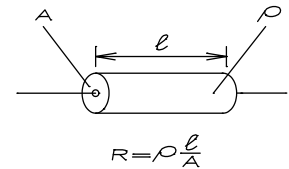
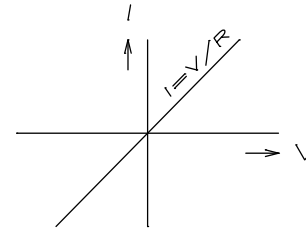
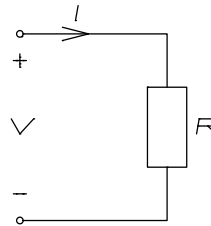
- Linearni upori
 - Plastni upori (CF, MF)
 - Žični upori
 - Specialni upori
- Nastavljivi upori
 - Nelinearni upori
 - NTC termistorji
 - PTC termistorji
 - Varistorji

Razdelitev uporov in njihove značilnosti

- Ohmska upornost je določena z Ω zakonom: $U=R*I$ oz. $U_{ef}=R*I_{ef}$
- Pretvorba energije v toploto – Joulov zakon: $P=I^2*R$ oz. $P_{ef}=I_{ef}^2*R$
- Pri VF razmerah enačbi za P_{ef} in U_{ef} ne držita več:
 - skin efekt
 - sevanje EM energije v prostor
 - dielektrične izgube izolatorjev
 - histerezne izgube magnetnih materialov

Linearni upori

- Eni najpogostejših elementov v elektronskih vezjih.
- Električni simbol elementa,
- $I(U)$ karakteristiko in
- Zveza med tokom in napetostjo je linearna (Ohmov zakon), zato pravimo tem uporom tudi linearni upori



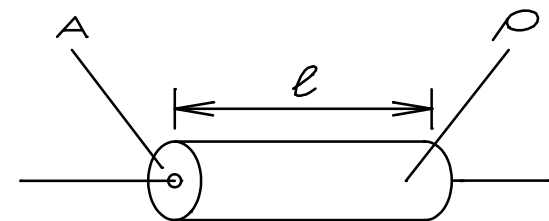
$$I = \frac{U}{R} = G \cdot U$$

Linearni upori

- R totalna, enosmerna, (angl. Direct Current - DC) upornost
- $G = 1/R$ totalna prevodnost upora.
- Upornost je pri enostavnih razmerah določena s:
 - specifično upornostjo uporovnega materiala ρ [Ohm-cm] in
 - geometrijo upora (presek A , dolžina l)

$$I = \frac{U}{R} = G \cdot U$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$



$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Osnovne značilnosti uporov

- Nazivna upornost (R_n)
- Toleranca (lestvice)
- Temperaturni koeficient upornosti (TK_R)
- Kritična upornost R_c
- Mejna napetost U_L
- Degradacija po času delovanja ($\Delta R/R$)

Nazivna (ang. nominal) upornost R_n

- **Nazivna upornost R_n :**
Pričakovana vrednost upornosti danega upora, ki se od dejanske upornosti upora R ne sme razlikovati več kot je toleranca uporovne družine (ΔR).
- **Toleranca (ΔR)** je največje relativno odstopanje izmerjene upornosti R od nazivne upornosti R_n

Nazivna upornost R_n - primer

- Kupljeni upor ima kataloške podatke: $R_n = 10 \text{ k}\Omega$, toleranca uporovne družine je $\pm 10\%$.

Kakšno izmerjeno upornost R upora lahko pričakujemo?

- Rešitev: Toleranca $\Delta R/R_n = (R - R_n)/R_n = 10\% = 0.10$

Največje odstopanje izmerjene upornosti je:

$$\Delta R = \pm 0.10 * R_n = \pm 1 \text{ k}\Omega \rightarrow R = [9 \dots 11 \text{ k}\Omega]$$

Kaj je dobra tehnologija izdelave?

- Pri dobri tehnologiji odstopanje izmerjenih upornosti *Gaussovo* porazdelitev okrog **želenih** nazivnih vrednosti R_n
- Pri **dobri tehnologiji** je največ izdelanih uporov v bližini želene vrednosti, z oddaljenostjo od te vrednosti pa število uporov upada.

Intervali dopustnega odstopanja

- Če bi proizvajalec jamčil **točne** vrednosti uporov, bi od vseh proizvedenih uporov uporabil zelo majhen del, v limitnem primeru celo noben upor ne bi bil uporaben
- Zato vpeljejo intervale dopustnega odstopanja upornosti prodajanih uporov.
- To omogoči uporabo vseh dobrih uporov, saj vsak proizvedeni upor pade v interval dane širine.
- Dopustna odstopanja od nazivnih vrednosti se imenujejo **tolerančni razredi** oz. **tolerance**.
- Posledica: Izmerjena upornost upora bo odstopala od R_n največ za dano toleranco.

Renardove lestvice

- Kakšen je optimalen izbor nazivnih vrednosti, da bo izmed izdelanih elementov izmet čim manjši?
- Če bi proizvajalec določil vrednosti linearno:
... , $1\text{k}\Omega$, $2\text{k}\Omega$, $3\text{k}\Omega$... $99\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$, $101\text{k}\Omega$, ...
 - visoke upornosti $R \approx 100\text{k}\Omega$ so zelo dobro približane
 - nizke upornosti $R \approx 1\text{k}\Omega$ so zelo slabo približane, v najslabšem primeru na 50% natančno
- Tak izbor nazivnih vrednosti **ni** primeren, saj so lastnosti električnega vezja določene z največjim **relativnim odstopanjem** elementov od nazivnih vrednosti v vezju

Renardove lestvice

- Ali je mogoč tak izbor nazivnih vrednosti, da bi bile vse upornosti v najslabšem primeru približane z enako toleranco?
- Da, če so nazivne vrednosti **členi nekega geometričnega zaporedja**.
- Takemu izboru nazivnih vrednosti rečemo **Renardova lestvica**.
- n -ti člen določen z izrazom:

$$N_n = a \cdot r^{n-1}$$

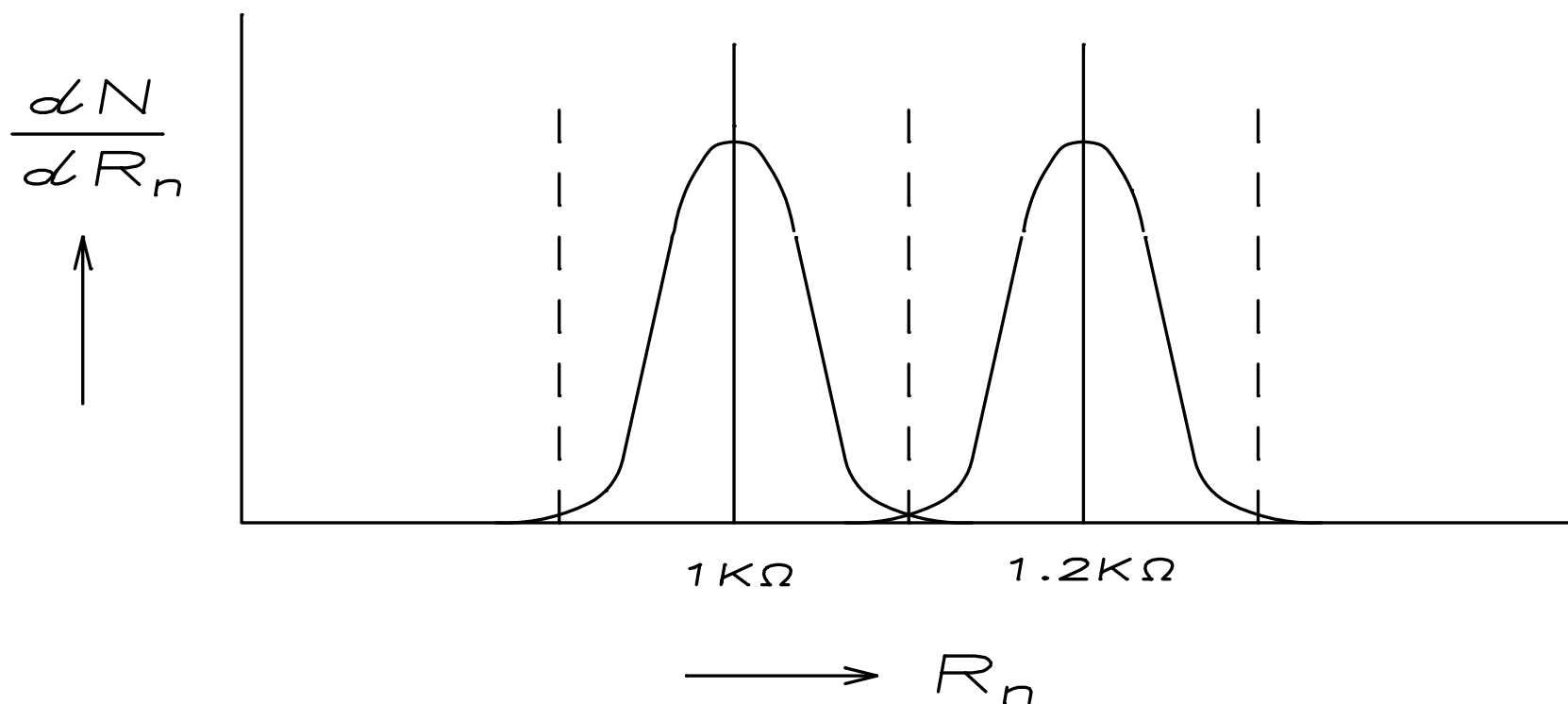
n → indeks geometričnega zaporedja (1,2,3 ...)

a → prvi člen zaporedja ($n=1$)

r → razmerje geometričnega zaporedja ($r = N_{n+1}/N_n$)

Tolerančni razredi (ang. preferred numbers)

Pri izdelavi velikega števila uporov končne, izmerjene upornosti izdelanih uporov vedno odstopajo od želenih nazivnih upornosti R_n uporovne družine (1 k Ω , 1.2 k Ω , 1.5 k Ω ...).



Dekadne Renardove lestvice

Vrednosti se ponavljajo znotraj dekade
(1..10, 10..100, 100...1000 itd.)

$$a = 1$$

$$r = \sqrt[k]{10}$$

$k \rightarrow$ število nazivnih vrednosti na dekado.
(tipično $k=12$, $k=24$, $k=48$, $k=96$, $k=192$)

Za lestvico uporov E12 (12 vrednosti na dekado) so nazivne vrednosti uporov (centri Gaussovih porazdelitev):

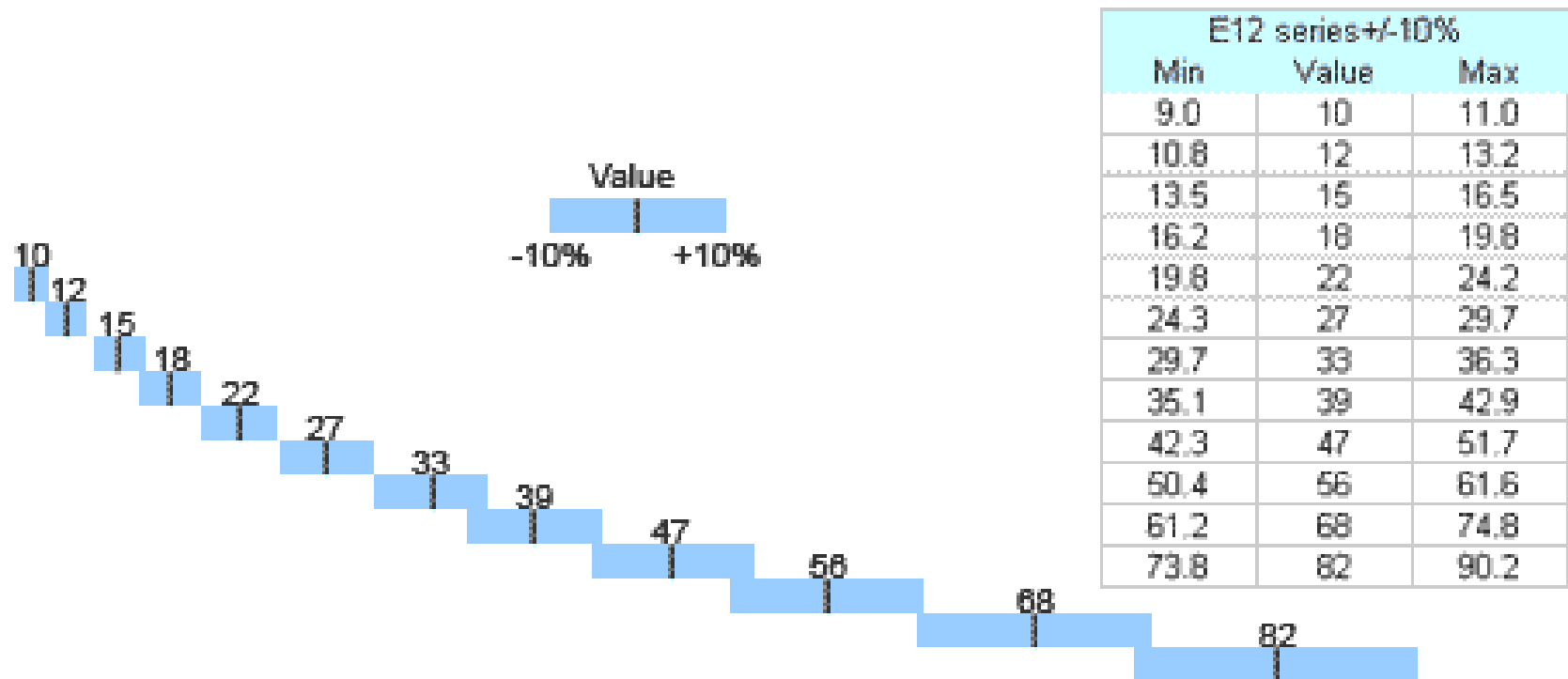
Dekada 1..10: 1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2

Dekada 10..100: 10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82

Renardova lestvica E12

Maksimalna odstopanja oz. tolerančni razredi so konstantni ($\pm 10\%$) po vsej lestvici !

E12 → Renardova lestvica s toleranco 10%



Ostale Renardove lestvice

Renardove lestvice se uporabljajo pri izboru nazivnih vrednosti:

- R,
- C,
- U_{ZENER}

	členov/dekad o	toleranca
E12	12	10%
E24	24	5%
E48	48	2%
E96	96	1%
E192	192	0.5%

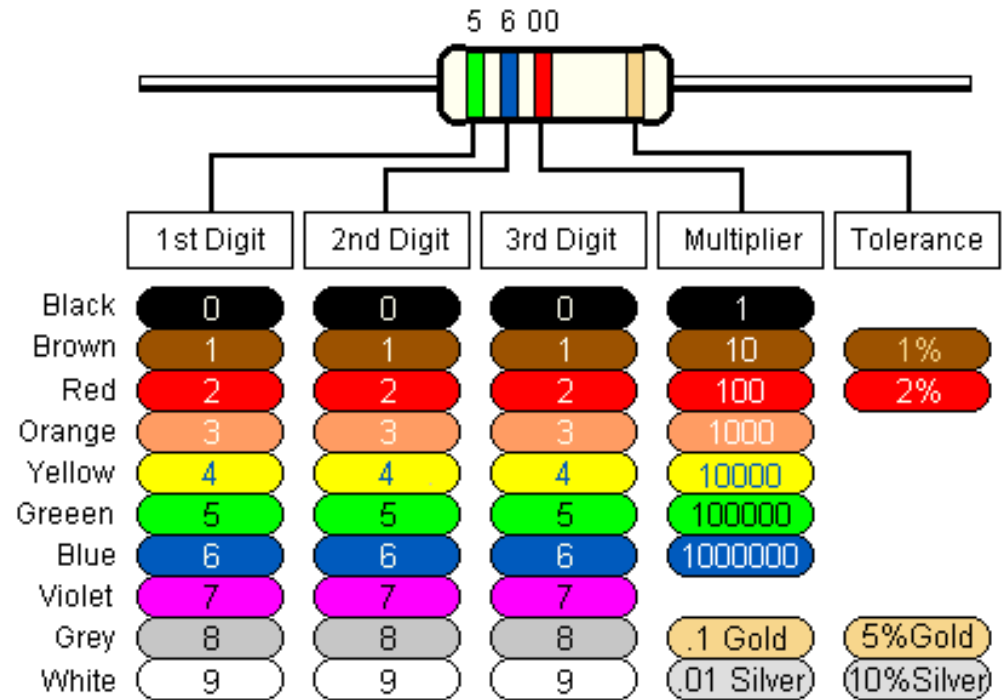
Oznaka uporov z barvno kodo IEC

Mednarodna barvna koda IEC (International Electrotechnical Commission) podaja z barvnimi kolobarji na uporih osnovne podatke:

- nazivno upornost,
- toleranco upornosti,
- temperaturni koeficient upornosti
- zanesljivost (MIL)

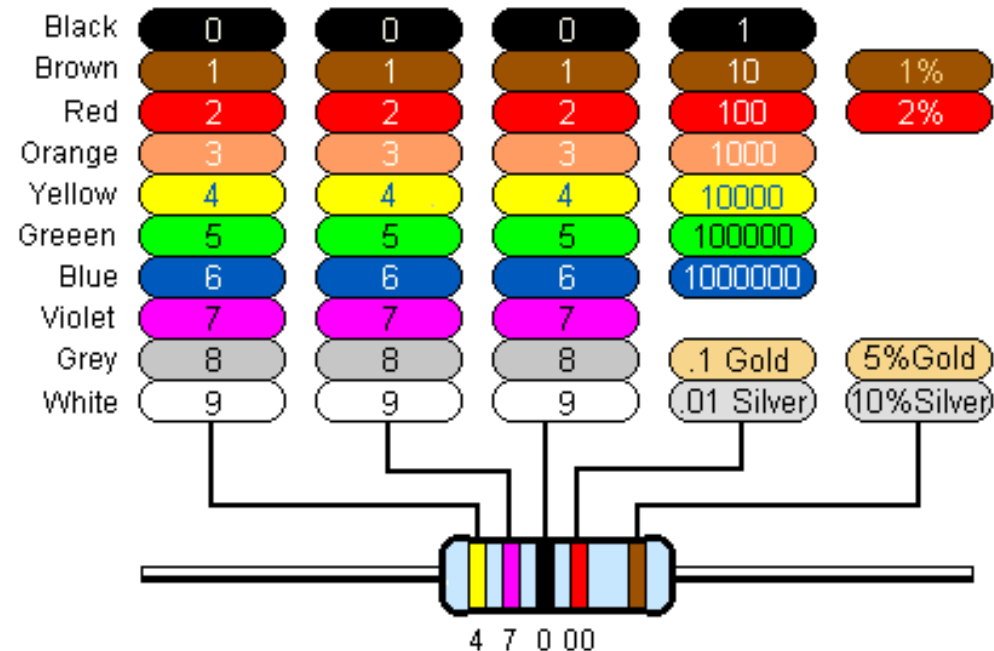
Barvna koda IEC iz 4 kolobarjev

- 1., 2. → cifri števila (R_{12})
- 3. → multiplikator (m)
 $R_n = R_{12} * 10^m$
- 4. → toleranca



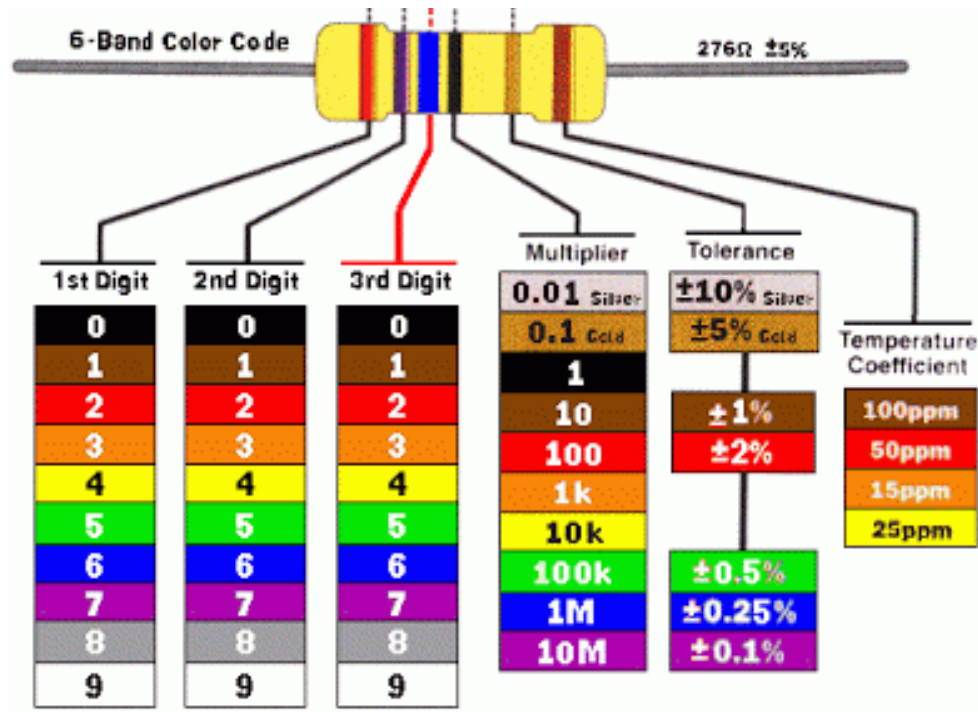
Barvna koda IEC iz 5 kolobarjev

- 1., 2., 3. → cifre števila (R_{123})
- 4. → multiplikator (m)
 $R_n = R_{123} * 10^m$
- 5. → toleranca



Barvna koda IEC iz 6 kolobarjev

- 1, 2, 3 → cifre števila (R_{123})
- 4 → multiplikator (m); $R_n = R_{123} * 10^m$
- 5 → tolerance upornosti
- 6 → (odebeljen) TK_R



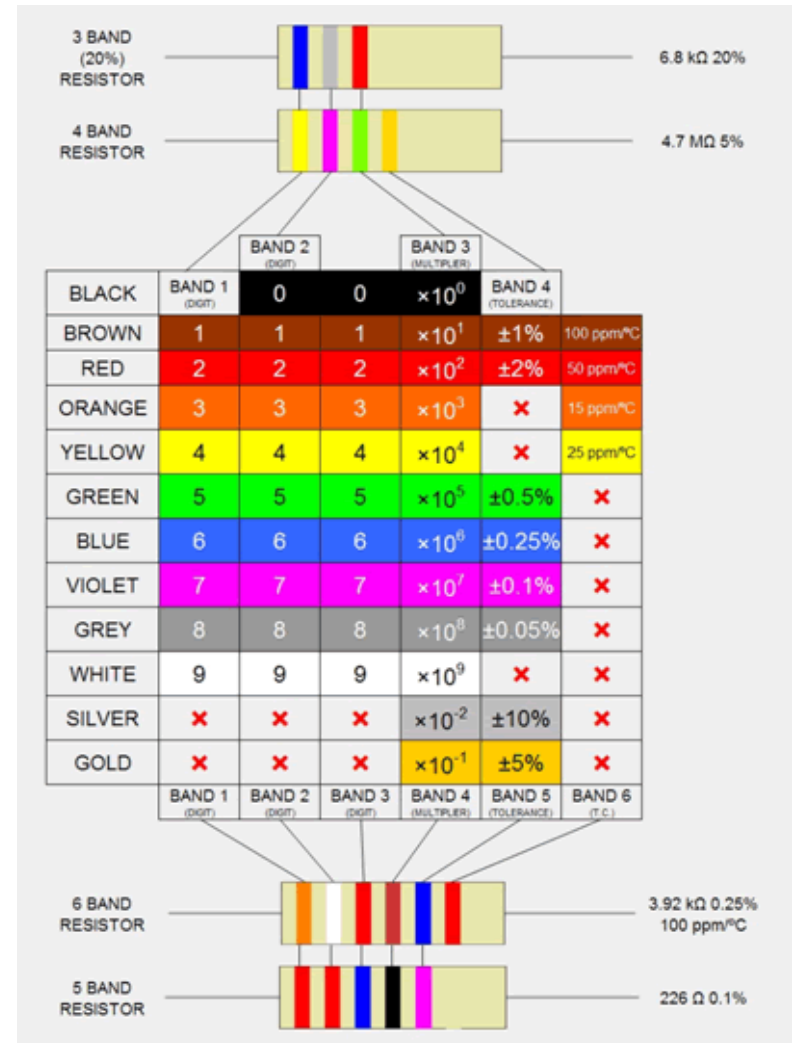
Oznaka uporov z barvno kodo IEC

- Določi lastnosti upora z danimi barvnimi kolobarji:

rjava	črna	črna	rdeča	rjava	rjava
-------	------	------	-------	-------	-------

1	0	0	2	1	100
---	---	---	---	---	-----

100	$\times 10^2$	1 %	100ppm/K
-----	---------------	-----	----------



Izjeme pri barvnem označevanju

- **Kolobar zanesljivosti** (ang. reliability band):
Upori, ki so proizvedeni po vojaških specifikacijah, imajo dodaten kolobar za zanesljivost. Zanesljivost je izražena kot FR (failure rate) v (%)/1000 ur obratovanja. Redko srečamo v komercialni uporabi. Zvečine so ti kolobarji na uporih s 4 kolobarji. (MIL-HDBK-199)
- **En sam črn kolobar** (kratkostičnik, zero-ohm resistor):
Uporablja se za premostitev (žica). Zaradi strojev za polaganje komponent – žico je stroju težje položiti kot standardni upor.
- **Upor s 5 kolobarji, ki ima 4. kolobar zlat ali srebrn:**
Starejši upori: 1. in 2. → cifri vrednosti, 3. → multiplikator, 4. → toleranca, 5. → TK_R (ppm/K)
- **Zamenjave barv:**
Pri HV uporih sta lahko zlata in srebrna barva zamenjani z rumeno in sivo → zlata in srebrna barva vsebujeta kovinske delce.

Oznaka močnejših uporov s številčno kodo IEC

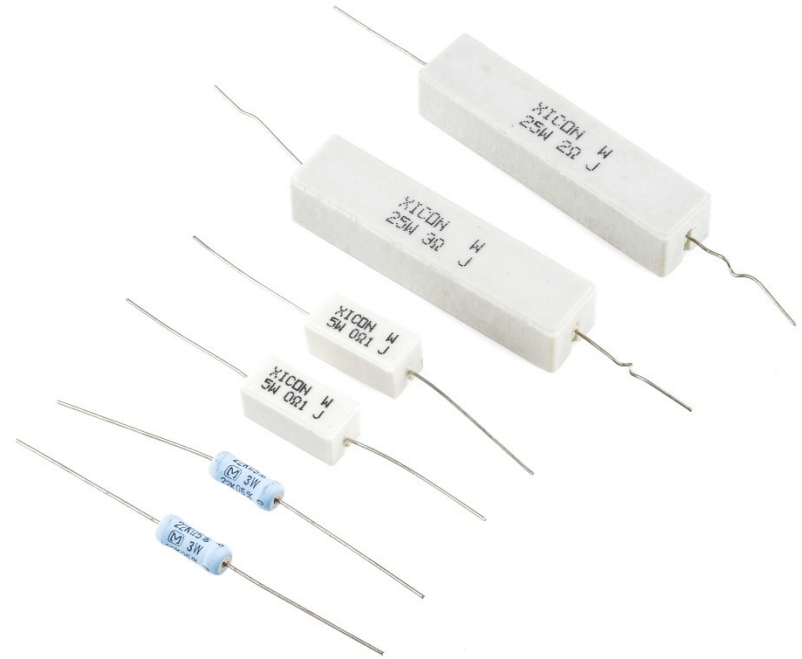
Oznaka podaja $R_n(\Omega)$ in ΔR :

- Upornosti reda $1\Omega \dots 1000\Omega$:
številka \rightarrow podaja $R_n(\Omega)$.
Namesto Ω je dodana črka R ali E
 $R_n(\Omega) = 75\Omega \rightarrow$ oznaka na upor: 75, 75R oz. 75E
- Upornosti $\geq 1k\Omega$:
črke, ki podajajo velikostni razred $R_n(\Omega)$.
 $R_n(\Omega) = 75 k\Omega \rightarrow$ oznaka na upor: 75K
 $R_n(\Omega) = 75 M\Omega \rightarrow$ oznaka na upor: 75M
- Decimalna vejica je nadomeščena s črko dekade
 $R_n(\Omega) = 0.15 \Omega \rightarrow$ oznaka na upor: 0R15
 $R_n(\Omega) = 5.5 \Omega \rightarrow$ oznaka na upor: 5R5
 $R_n(\Omega) = 1700 \Omega \rightarrow$ oznaka na upor: 1K7



Toleranca upora s črkami

B	$\pm 0.1 \%$
C	$\pm 0.25 \%$
D	$\pm 0.5 \%$
F	$\pm 1 \%$
G	$\pm 2 \%$
J	$\pm 5 \%$
K	$\pm 10 \%$
M	$\pm 20 \%$
Q	$-10 \dots +30 \%$
T	$-10 \dots +30 \%$
S	$-20 \dots +50 \%$



Oznaki za nazivno upornost sledi oznaka za toleranco upora, ki je podana s črkami.

Velike vrednosti toleranc (Q, T, S) srečamo pri nekaterih vrstah kondenzatorjev, kjer odstopanje vrednosti navzgor ne moti (gladilni kondenzatorji)

IEC označevanje SMD uporov

R47

0.47 Ω

4R7

4.7 Ω

47R

47 Ω

K47

470 Ω

4K7

4.7 k Ω

47K

47 k Ω

M47

470 k Ω

4M7

4.7 M Ω

R464

0.464 Ω

464R

464 Ω

4K64

4.64 k Ω

471

470 Ω

472

4.7 k Ω

473

47 k Ω

474

470 k Ω

475

4.7 M Ω

4640

464 Ω

470

47 Ω

THESE STYLES ARE
AMBIGUOUS AND
ARE RARELY USED

0

00

000

0000

SHORT-CIRCUITING "ZERO-OHM LINKS" OR "JUMPERS"

IEC označevanje SMD uporov

- SMD upori (0603 ali 0805)
- Na uporu so trije/štirje znaki (številke/črke)
- Če so vsi trije znaki številke, gre **zelo verjetno** za E24 lestvico.
- Način označevanja je podoben označevanju s kolobarji:
Prvi številki → številki vrednosti, 3. → multiplikator



E96 IEC označevanje SMD uporov

Številki/črka:

- Številki → prve tri števke vrednosti
- Črka → multiplikator

Črka	multiplikator	Črka	multiplikator	Črka	multiplikator
Z	1m	A	1	D	1K
Y/R	10m	B/H	10	E	10K
X/S	100m	C	100	F	100K

01C → 10kΩ
(100x100)

85A → 750Ω
(750x1)

01B → 1kΩ
(100x10)

01D → 100kΩ

30C → 20kΩ



E96 lestvica za označevanje SMD uporov

Code	Value	Code	Value	Code	Value	Code	Value	Code	Value	Code	Value
01	100	17	147	33	215	49	316	65	464	81	681
02	102	18	150	34	221	50	324	66	475	82	698
03	105	19	154	35	226	51	332	67	487	83	715
04	107	20	158	36	232	52	340	68	499	84	732
05	110	21	162	37	237	53	348	69	511	85	750
06	113	22	165	38	243	54	357	70	523	86	768
07	115	23	169	39	249	55	365	71	536	87	787
08	118	24	174	40	255	56	374	72	549	88	806
09	121	25	178	41	261	57	383	73	562	89	825
10	124	26	182	42	267	58	392	74	576	90	845
11	127	27	187	43	274	59	402	75	590	91	866
12	130	28	191	44	280	60	412	76	604	92	887
13	133	29	196	45	287	61	422	77	619	93	909
14	137	30	200	46	294	62	432	78	634	94	931
15	140	31	205	47	301	63	442	79	649	95	953
16	143	32	210	48	309	64	453	80	665	96	976

Nazivna moč (ang. nominal power) P_n

- Nazivna moč maksimalna dopustna moč, maksimalna moč segrevanja (ang. maximal power dissipation) P_n je maksimalna dopustna moč električne obremenitve, ki jo upor še prenese brez degradacije!
- $P > P_n \rightarrow T_{\text{elementa}} > T_{\text{max}} \rightarrow$ degradacija oz. uničenje elementa.
- Maksimalna temperatura T_{max} je najvišja temperatura, ki jo materiali v elementu še prenesejo brez degradacije.
- T_{max} (navadni upori) $\approx 150^\circ\text{C}$
- T_{max} (močnostni upori) $\geq 250^\circ\text{C}$

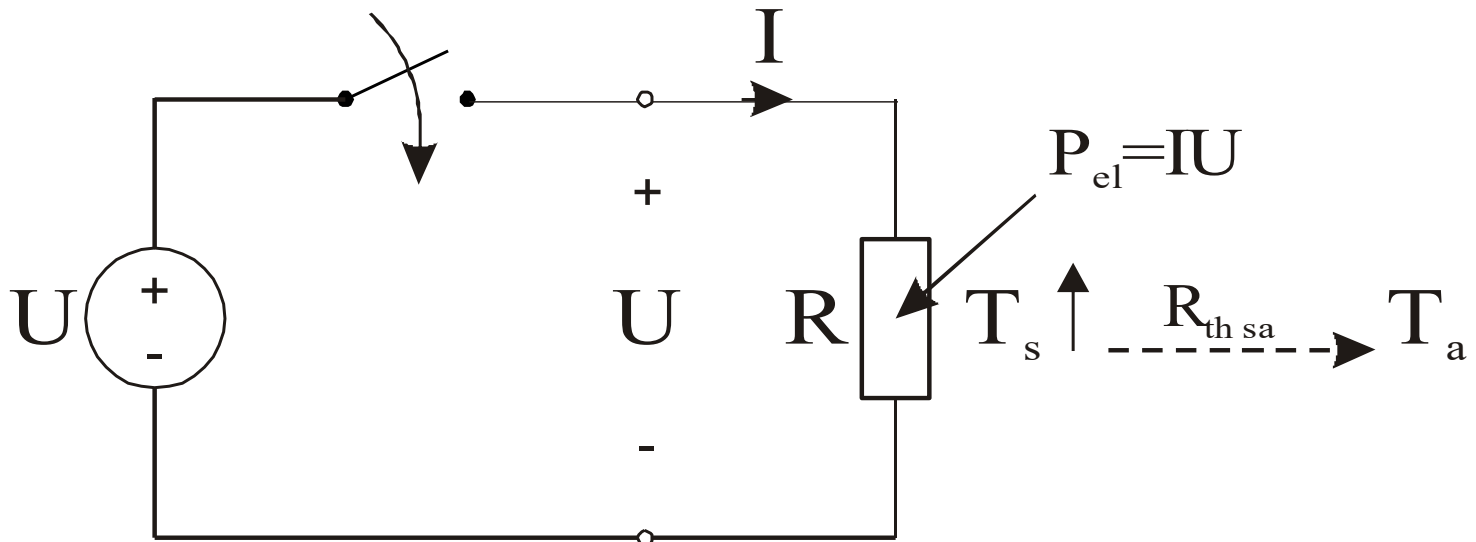
Nazivna moč upora P_n

- P_{segr} → električna moč, ki povzroči segrevanje upora in je določena z električnim tokom I oz. napetostjo U na elementu
- Upor se hladi (prevajanje, sevanje):
- T_S → temperatura površine (ang. surface)
- T_A → temperatura okolice (ang. ambient)

$$P_{segr} = U \cdot I$$

$$P_{odd} = \frac{T_s - T_a}{R_{thSA}}$$

Nazivna moč upora P_n



$$P_{odd} = \frac{T_s - T_a}{R_{thSA}}$$

Termična upornost R_{thSA}

- R_{thsa} → termična upornost (ang. thermal resistance) med tema točkama površina, okolica (surface, ambient)
- R_{th} → mera za učinkovitost odvajanja toplote v okolico.
- Enota R_{th} → [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
- Koliko W element oddaja v okolico pri razliki temperatur ($T_S - T_A = 1^{\circ}\text{C}$).
- T_A *ni* enaka sobni ($T_{sobna} \approx 25^{\circ}\text{C}$), saj so elementi v ohišju
- Tipične vrednosti $T_A \approx [50 \dots 90^{\circ}\text{C}]$

Termično ravnovesje

- Vklop $\rightarrow P_{\text{segr}} = UI \rightarrow$ element se segreva
- T_S raste \rightarrow raste oddajanje toplote
- Ko T_S naraste, da postane:

$$P_{\text{odd}} = P_{\text{segr}} = U * I$$

oddana moč = prejeti moči segrevanja

- T_S se stabilizira:
($T_S = \text{const}$) \rightarrow termično ravnovesje

Termično ravnovesje

- V termičnem ravnovesju velja:

$$P_{segr} = P_{odd} = \frac{T_s - T_a}{R_{thsa}}$$

- Na uporju je napetost $U=5\text{ V}$ in skozenj teče tok $I=1\text{ A}$.
- Termična upornost elementa znaša $R_{THSA} = 10^\circ\text{C/W}$.
- $T_A \approx 70^\circ\text{C}$.
- $T_S = ?$

$$\begin{aligned} T_s &= T_a + R_{thsa} P_{segr} \\ &= 70^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C/W} \cdot 5\text{W} \\ &= 70^\circ\text{C} + 50^\circ\text{C} = \underline{120^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Analogija med elektrotehničnimi in termičnimi problemi

- Enačba za oddajanje toplote je termična analogija Ohmovega zakona:
- **toplotna moč P /električni tok I** , ki teče med dvema točkama (s, a) po toplotnem ali električnem vodniku,
- **je proporcionalen temperaturni/potencialni razliki** med točkama ($T_s - T_a$ oz. $V_s - V_a$)
- **in obratno sorazmeren termični/ohmski upornosti** R_{thsa}/R_{sa} med točkama (s, a)

ELEKTROTEHNIKA	TERMIKA
ΔV_{ab}	ΔT_{ab}
I	P
R_{ab}	R_{thab}
C	C_{th}

$$I = \frac{\Delta V_{sa}}{R_{sa}} \Leftrightarrow P = \frac{\Delta T_{sa}}{R_{thsa}}$$

$$R_{thsa} = \frac{l}{\sigma A}$$

Nazivna moč upora P_n

- Nazivna moč je tista moč segrevanja, pri kateri element ravno doseže maksimalno dopustno temperaturo ($T_S = T_{MAX}$).

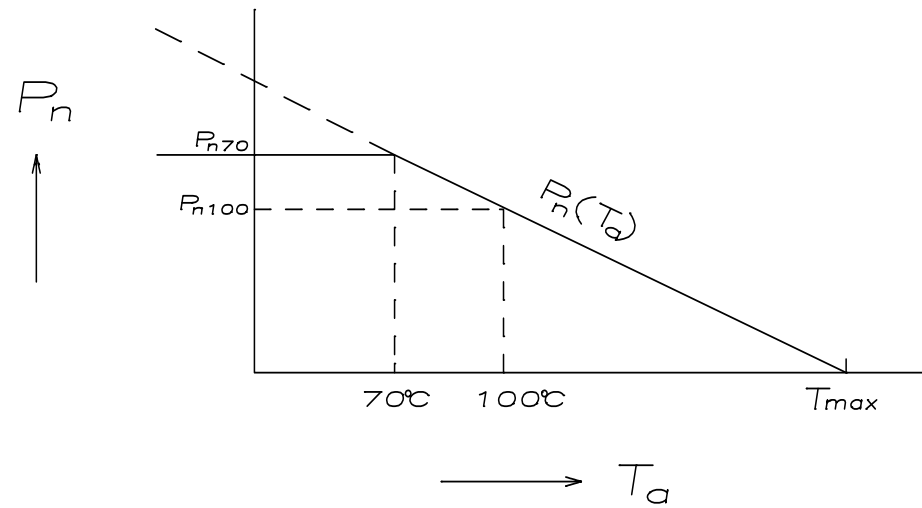
$$P_n = \frac{T_{\max} - T_a}{R_{thsa}}$$

Povečanje P_n

- če povišamo T_{MAX} (temperaturno odpornejši materiali omogočajo višje delovne temperature → večje odvajanje moči)
- znižamo T_A (večja temperaturna razlika → večje odvajanje sproščane moči)
- znižamo R_{THSA} (boljše odvajanje toplote)
- $P_n = P_n(T_A)$
- Pri podatku P_n je vedno podana T_A !
 $T_A \approx 70^\circ\text{C}$

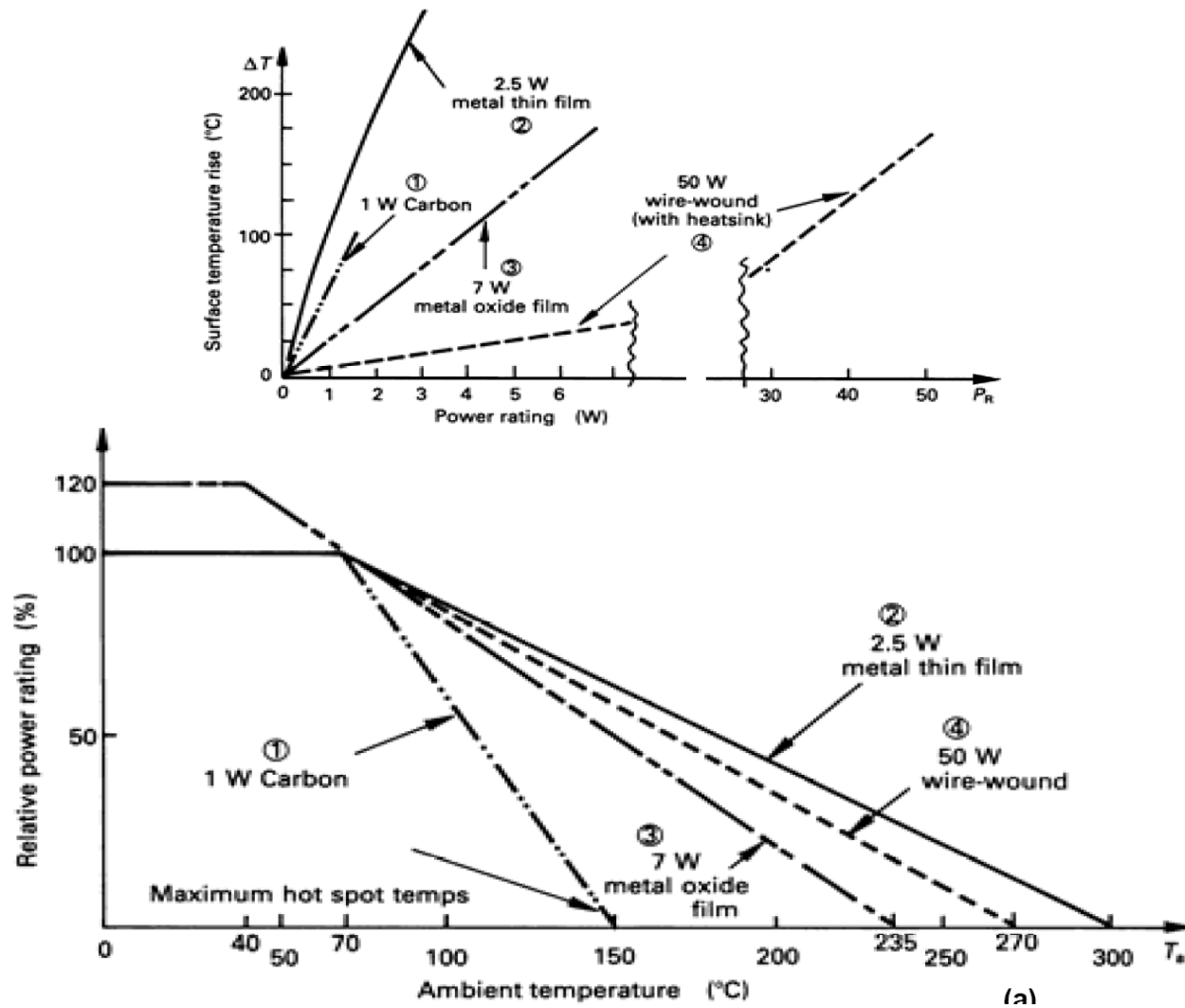
$P_n(T_A) \rightarrow$ Power derating curve

- $P_n = P_n(T_A)$
(T_A je stvar aplikacije)
- Pri drugačnih T_A se lahko P_n zmanjša oz. poveča (črtkana črta).
- Meja:
Zaradi varnosti P_n ne dopustijo povečevati
 $T_{Amin} = 70^\circ\text{C}$
(polna črta)



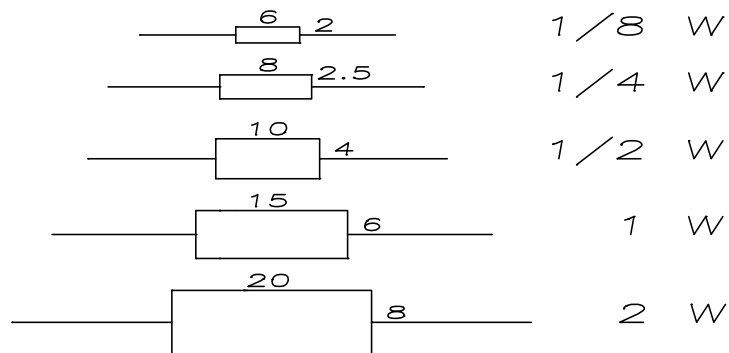
$$P_n = \frac{T_{max} - T_a}{R_{thsa}}$$

$P_n(T_A) \rightarrow$ Power derating curve



Upori za manjše moči ($P_n = 0.1 \dots 3 \text{ W}$)

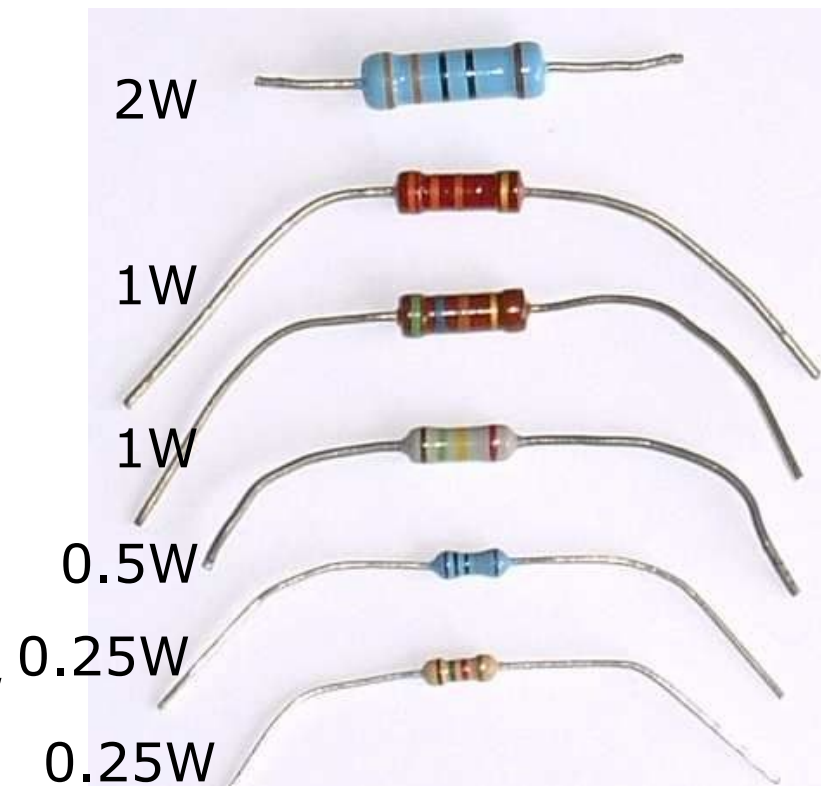
- Zveza med standardnimi dimenzijami uporov (premer, dolžina) in pripadajočo nazivno močjo pri CF cilindričnih uporih:



Moč na SMD uporih ocenimo iz njihove velikosti:

0402, 0603 → $1/16\text{W} \dots 1/10\text{W}$

0805 → $1/10\text{W} \dots 1/8\text{W}$



Upori za večje moči ($P_n = 1 \dots 100 \text{ W}$)

- Večjih dimenzij, iz temperaturno odpornejših materialov → višje maksimalne temperature → višje nazivne moči.



Hladilno telo

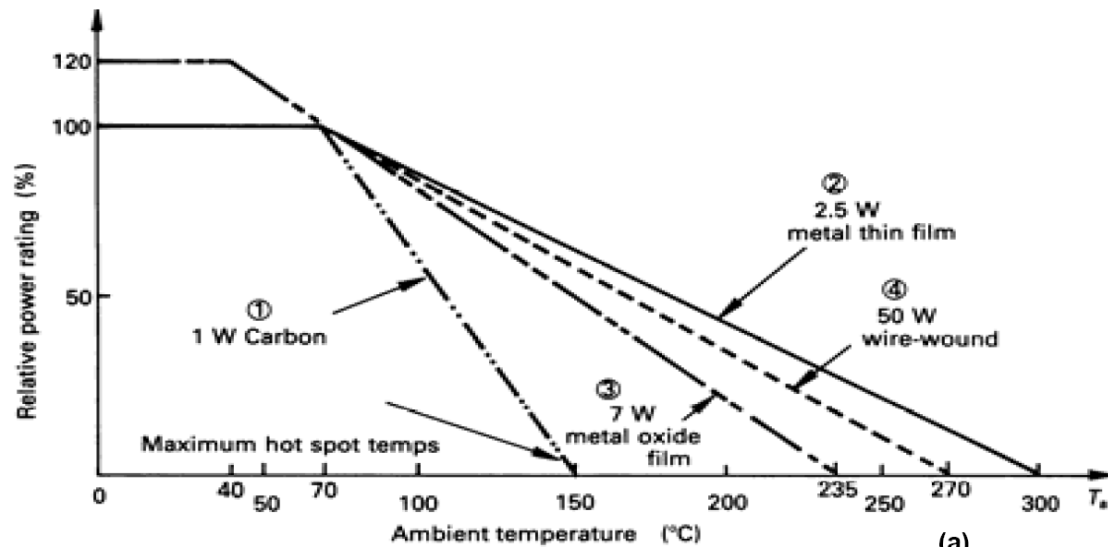
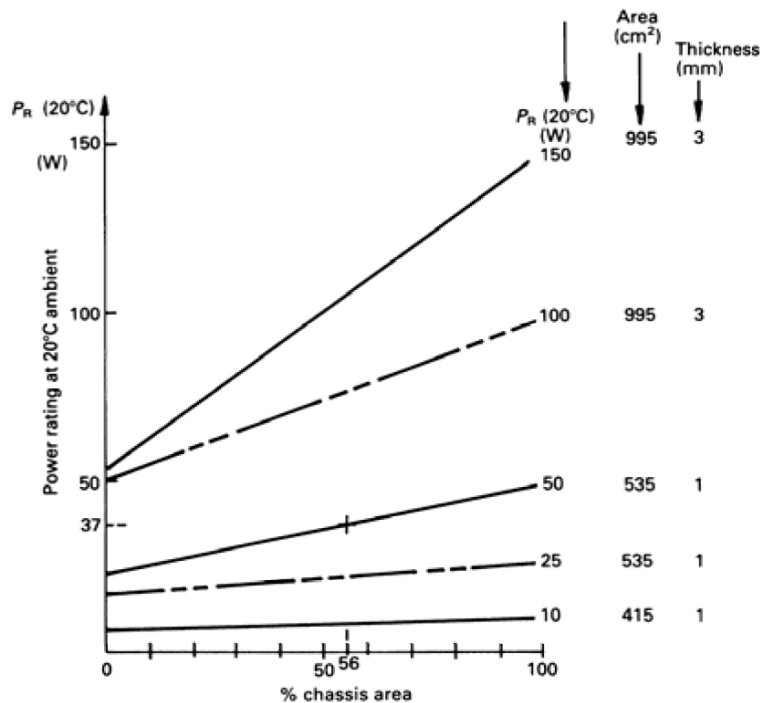
- A [cm^2] ... **sevalna površina**, ki oddaja toploto (element+hladilno telo ...)
- σ [$\text{W}/^\circ\text{Ccm}^2$] ... **konstanta toplotne izmenjave**
Pomeni koliko W odvede 1 cm^2 sevalne površine pri $\Delta T = T_S - T_A = 1^\circ\text{C}$. Namesto σ srečamo alfa oz. specifična **toplotna prestopnost** upor \rightarrow okolica.
- Zaradi dodatka hladilnega telesa se **zniža termična upornost**, torej dobimo višje P_n .
- **Prisilno hlajenje:**
 - zračno hlajenje (z ventilatorji) in
 - tekočinsko hlajenje (DI voda, mineralna/silikonska olja) na toplotnih izmenjevalcih odlaga odvečno toploto v okolico

$$R_{thsa} = \frac{1}{\sigma A}$$



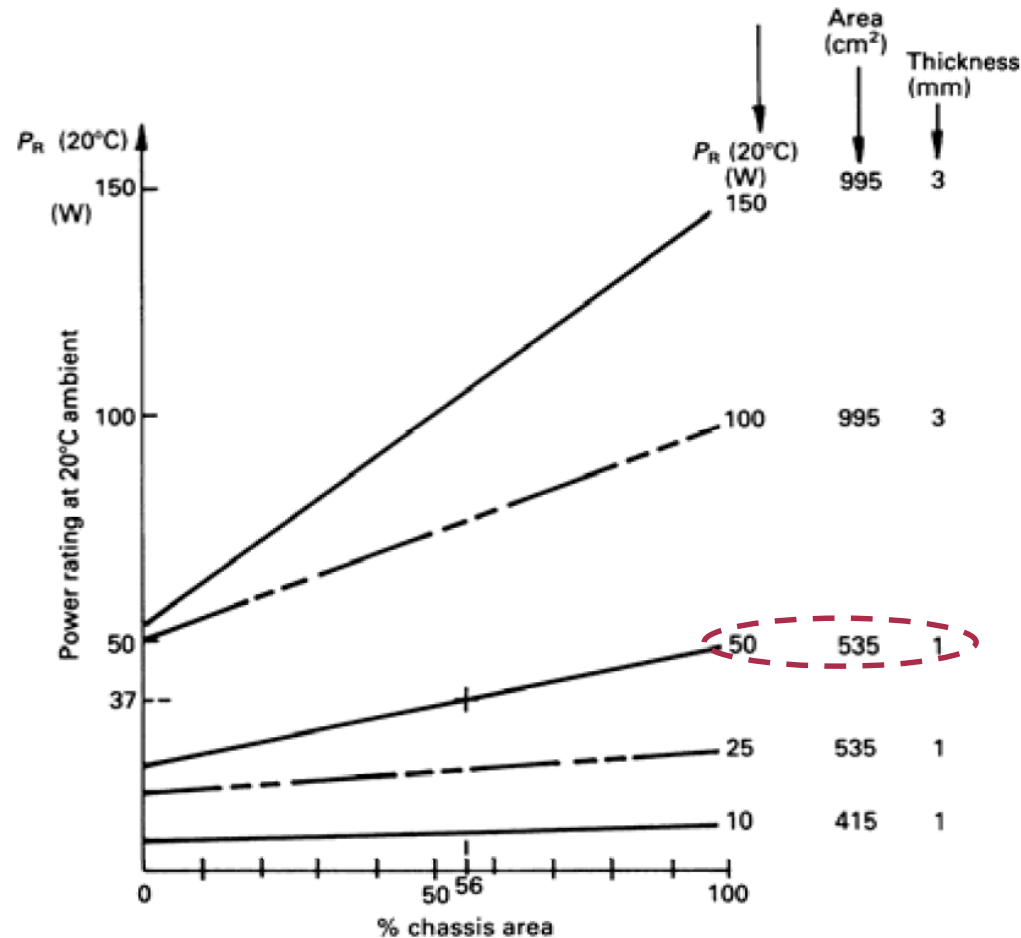
Hladilno telo

- Kakšna moč se sprošča na žičnem uporu z Al hladilnikom?
- Upor ima nazivno moč 50W @ $T_a=120^\circ\text{C}$. Površino hladilnega telesa zmanjšamo na 300cm^2 . Debelina hladilnika je 1 mm.



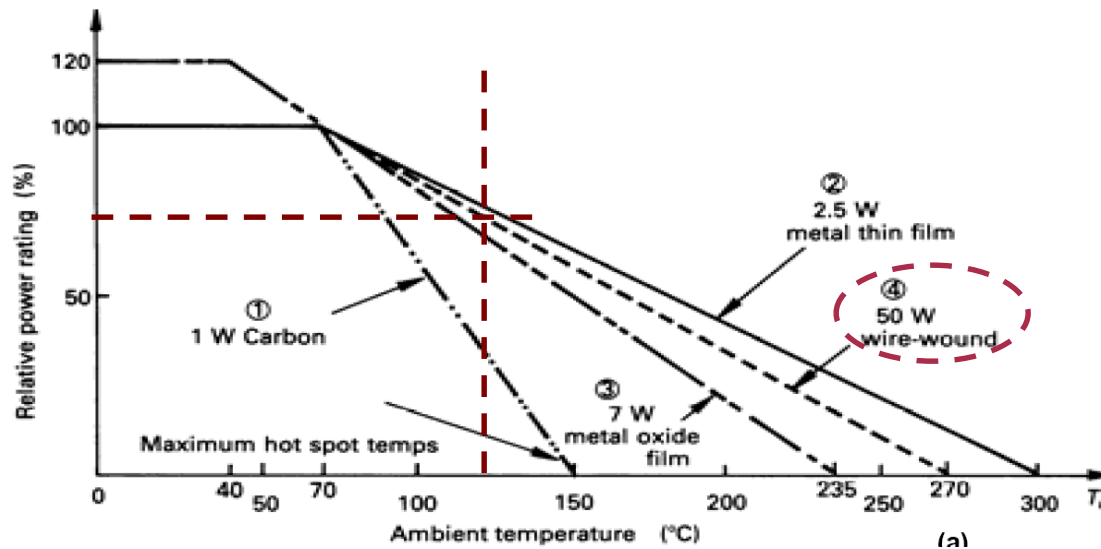
Hladilno telo

- Žični upor zahteva za sproščanje $P_n = 50\text{W}$ potrebno površino hladilnika 535 cm^2 debeline 1 mm .
- Če ga zmanjšamo na 300 cm^2 , se na upor lahko troši ustrezno manjša nazivna moč
- Iz grafa sledi ($P_n = 37.5\text{ W}$ @ $(300/535 = 56\%)$) površine hladilnika.



Hladilno telo

- Pri temperaturi okolice $T_a = 120\text{ }^\circ\text{C}$ se na uporabo lahko sprošča samo še 75% nazivne moči.
- Pri teh razmerah se lahko na uporabo troši največ $0.75 \cdot 37.5\text{ W} = 28.1\text{ W}$

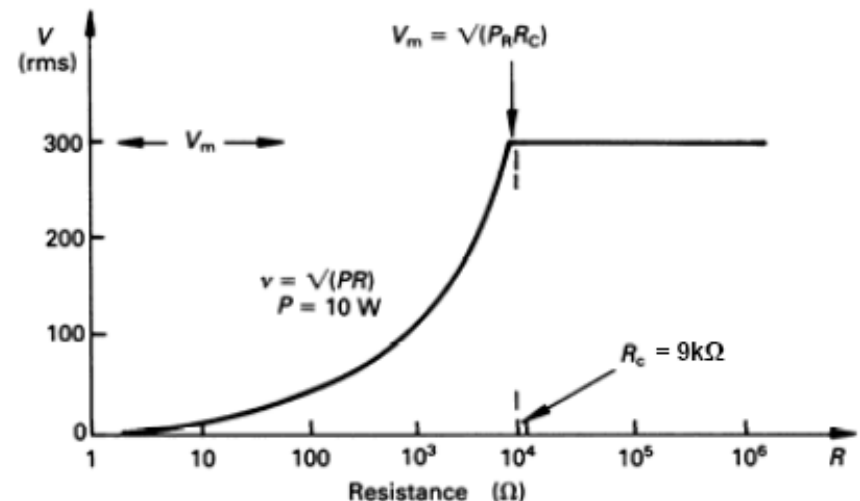


Kritična upornost R_c

- Če upor segrevamo z nazivno močjo P_n , potem termične omejitve določajo koliko sme biti največja nazivna upornost R_n
- To velja predvsem za nizke upornosti do **kritične upornosti** R_c , kjer se pojavi **nazivna** (ang. nominal) napetost U_n , ki jo upor še prenese brez degradacije.

$$P_n = U_n \cdot I_n = \frac{U_n^2}{R_n} = I_n^2 \cdot R_n$$

$$U_n = \sqrt{P_n \cdot R_n}$$



Mejna napetost U_L

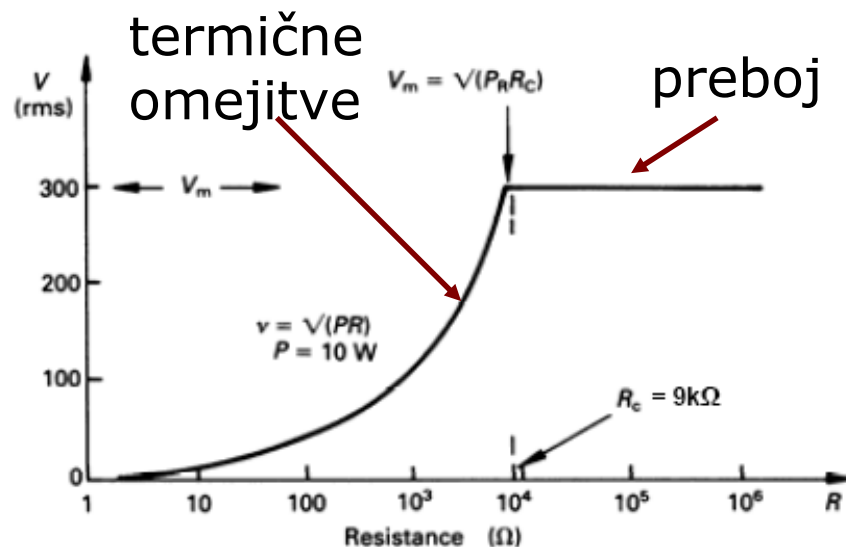
- Pri visokih upornostih ($R \approx 1M\Omega$) nad R_c je maksimalna dopustna napetost določena s **prebojnimi omejitvami**
- $U_L \rightarrow$ maksimalna napetost, ki jo upor še prenese brez preboja; mejna (ang. limit) napetost.
- Namesto U_L se včasih poda R_c , pri kateri se zgodi za dano družino uporov **prehod** od **termičnih omejitev** na **prebojne**.

$$U_n = \sqrt{P_n R_n} = \sqrt{1W \cdot 100M\Omega} = 100kV$$

preboj!

$$U_n = \sqrt{P_n R_n} \quad R_n < R_c \quad \text{segrevanje}$$

$$U_L = \sqrt{P_n R_c} \quad R_n \geq R_c \quad \text{preboj}$$



Nestabilnost uporov

- Nestabilnost elementa (degradacija ali staranje elementa) podaja spremembo lastnosti elementa po dolgoletnem delovanju:

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_t = \frac{R_t - R_0}{R_0}$$

- R_t → spremenjena upornost po dolgoletnem delovanju t ,
- R_0 → začetna upornost upora ob izdelavi.

Nestabilnost uporov

- Zaradi povišanih temperatur v obremenjenem uporu pride po dolgoletnem delovanju do spremembe upornosti zaradi degradacije uporovne plasti (staranje).
- Nezaželene spremembe upornosti so tem manjše, čim stabilnejši so materiali v uporu in čim nižja je temperatura upora T_S

Nestabilnost uporov

- Zaradi eksponentne odvisnosti degradacijskih procesov od temperature je zveza med degradacijo upornosti $\Delta R/R$ in temperaturo upora T_s linearna v pol-logaritemskem merilu

$$\log\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = K(R) \cdot T_s$$

- $K(R) \rightarrow$ pri uporih iste tehnologije imajo nizkoohmski upori večjo stabilnost kot visokoohmski:
nižjeohmski upori \rightarrow **debelejše uporovne plasti** \rightarrow bolj odporne proti opisanim efektom degradacije kot tanke in občutljive plasti višjeohmskih uporov.

Nestabilnost uporov - primer

Pri neki uporovni družini imajo nižjeohmski upori uporovno plast debelino $100 \mu\text{m}$, visokoohmski $1 \mu\text{m}$. Zaradi degradacije so uporovne plasti stanjšane za $0.1 \mu\text{m}$.

Ocenite spremembe upornosti $\Delta R/R$:

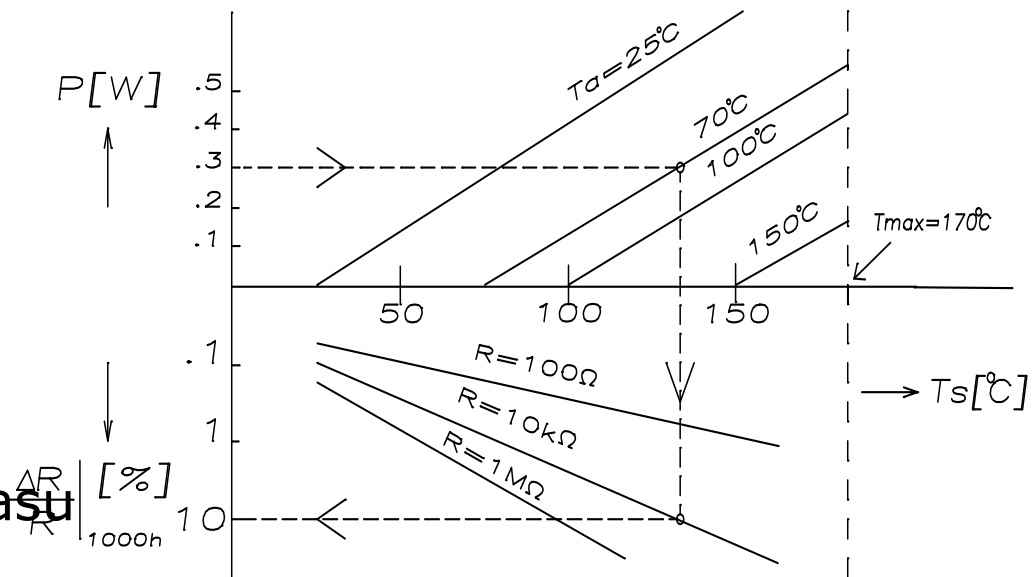
$$\log\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = K(R) \cdot T_s$$

Če je uporovna plast stanjšana za $0.1 \mu\text{m}$:

- pri visokoohmskih uporih upornost zrasla za 10%
- pri nižjeohmskih za 0.1%

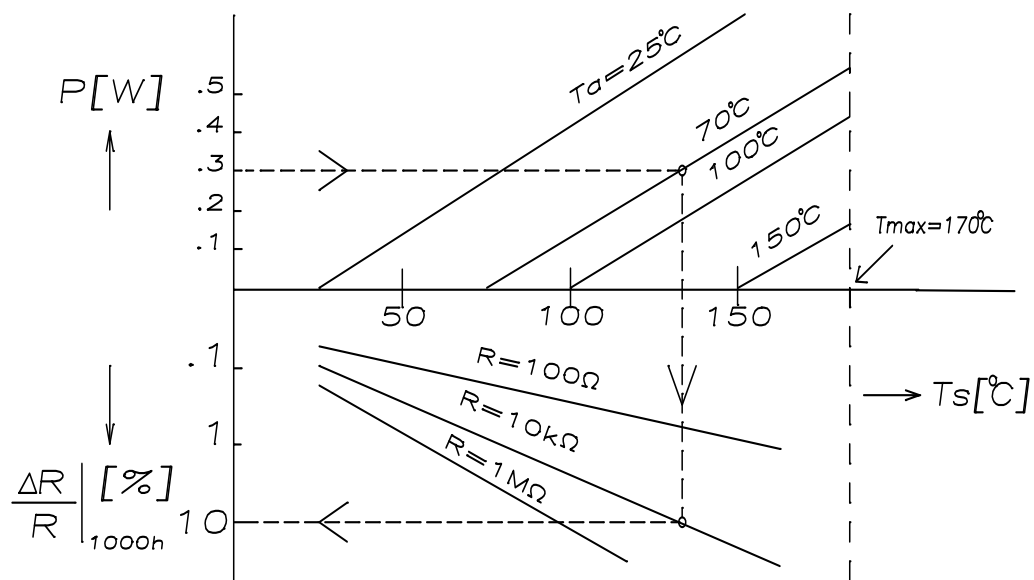
Nomogram upornosti - nestabilnost uporov

- Nestabilnost uporovnih družin je podana grafično z **nomogramom** (večparametrski diagram):
- Podajanje izmerjene relativne spremembe upornosti $\Delta R/R$:
 - pri električnih obremenitvah
 - povišanih temperaturah upora T_s , po daljšem času delovanja (standard je 1000 h)



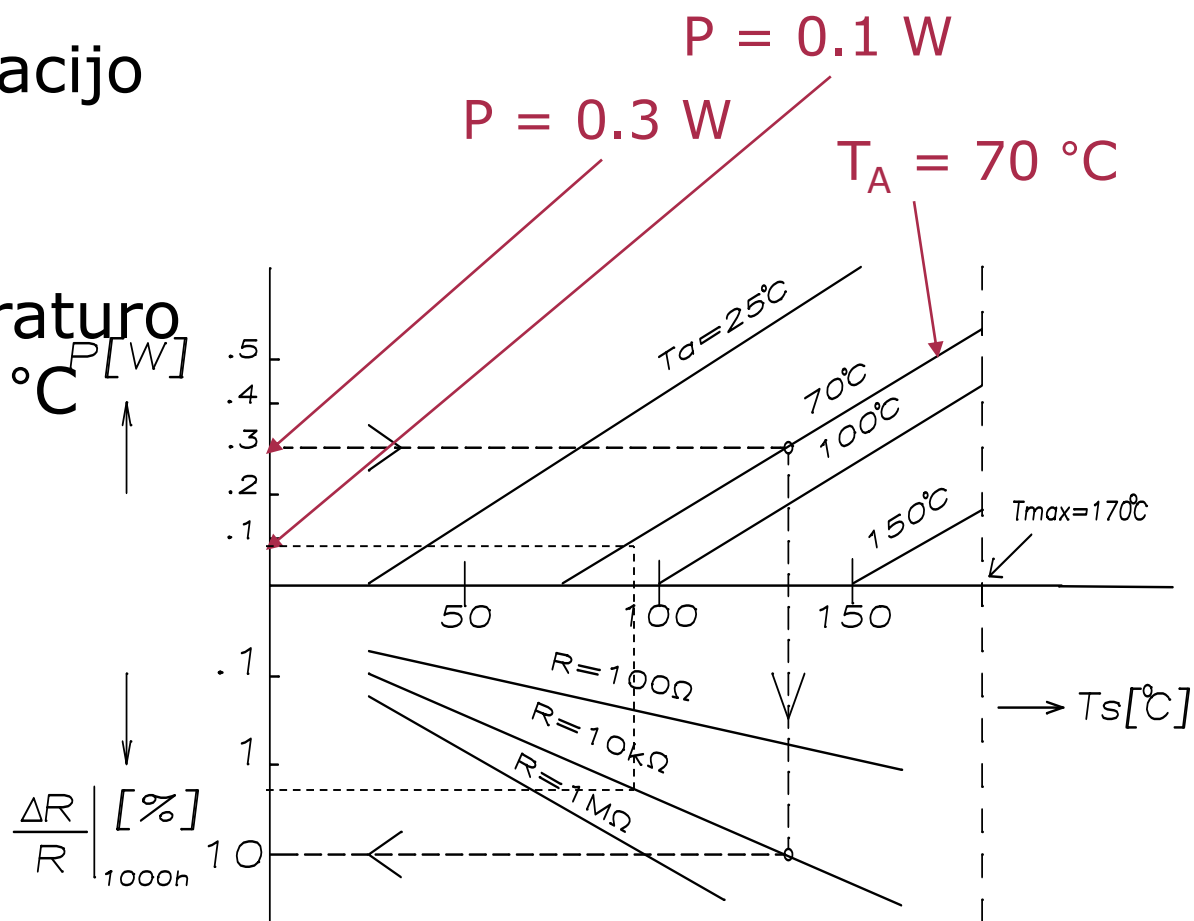
$\Delta R/R @ (1000h; P=0.3W; T_A=70^\circ C)?$

- Ocenite degradacijo upora $\Delta R/R$ po 1000 urah delovanja za upor $R = 10\text{ k}\Omega$, pri:
 - $P = 0.3\text{ W}$
 - $T_A = 70^\circ\text{C}$!
- Določite še degradacijo za primer znižane električne obremenitve $P = 0.1\text{ W}$!



$\Delta R/R @ (1000h; P=0.3W; T_A=70^\circ C)?$

- Iz nomograma določimo degradacijo upora:
 $\Delta R/R = +10\%$
- Določimo temperaturo upora: $T_S = 130^\circ C$



$P=0.3 W \rightarrow P=0.1 W$

$\Delta R/R = +10\% \rightarrow \Delta R/R = +1\%$

$\Delta R/R$ po poljubnem času delovanja

- Degradacijo za poljuben čas $t(h)$ določimo iz vrednosti degradacije za $h=1000$ ur:

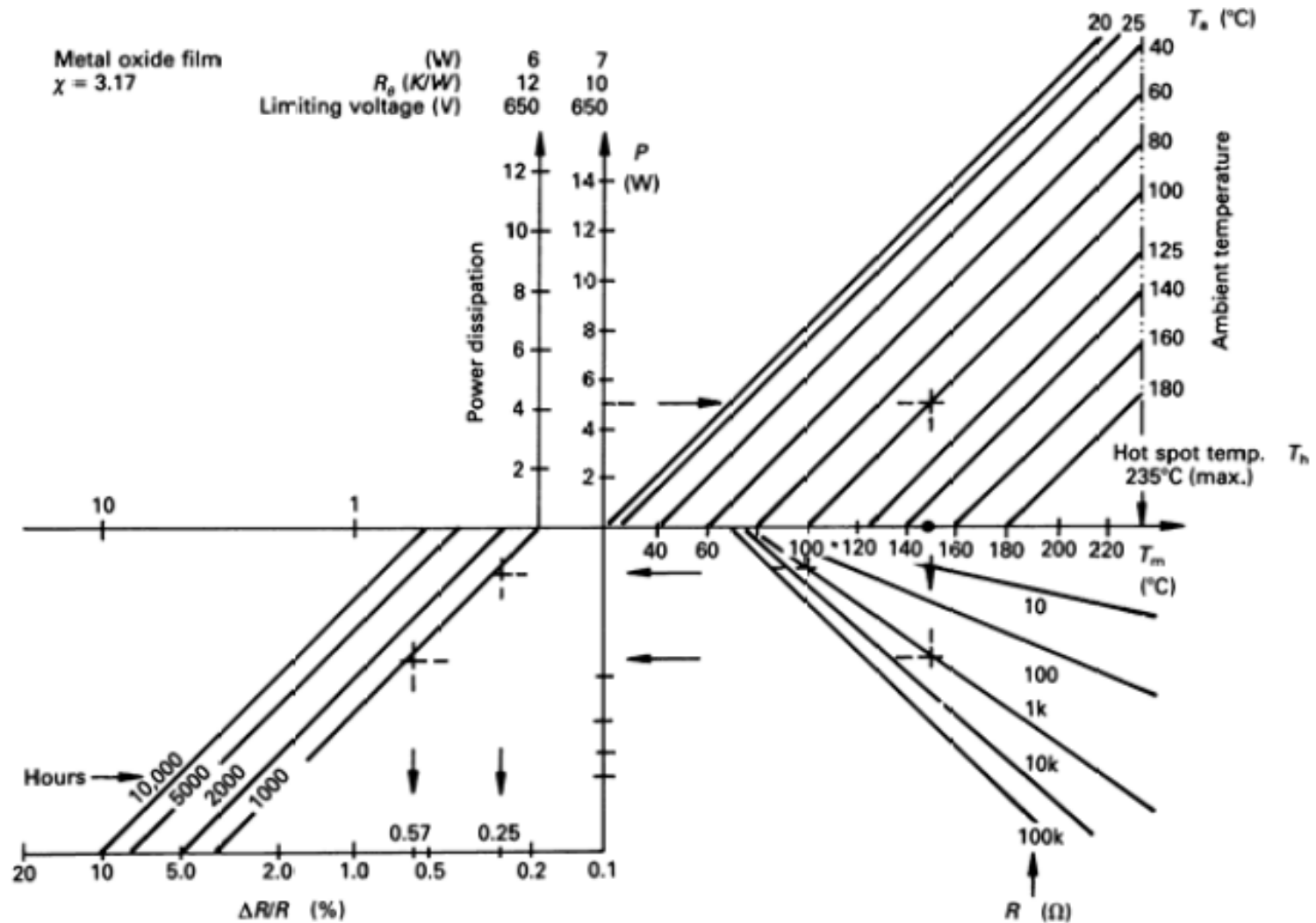
$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_t = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{1000h} \cdot \chi^{\log\left(\frac{t(h)}{1000h}\right)}$$

- Velja za $t \approx [10^{-3} \dots 10^5]$ h
- Osnova χ je odvisna od vrste upora:
 $\chi \approx [1.1 \dots 5]$.

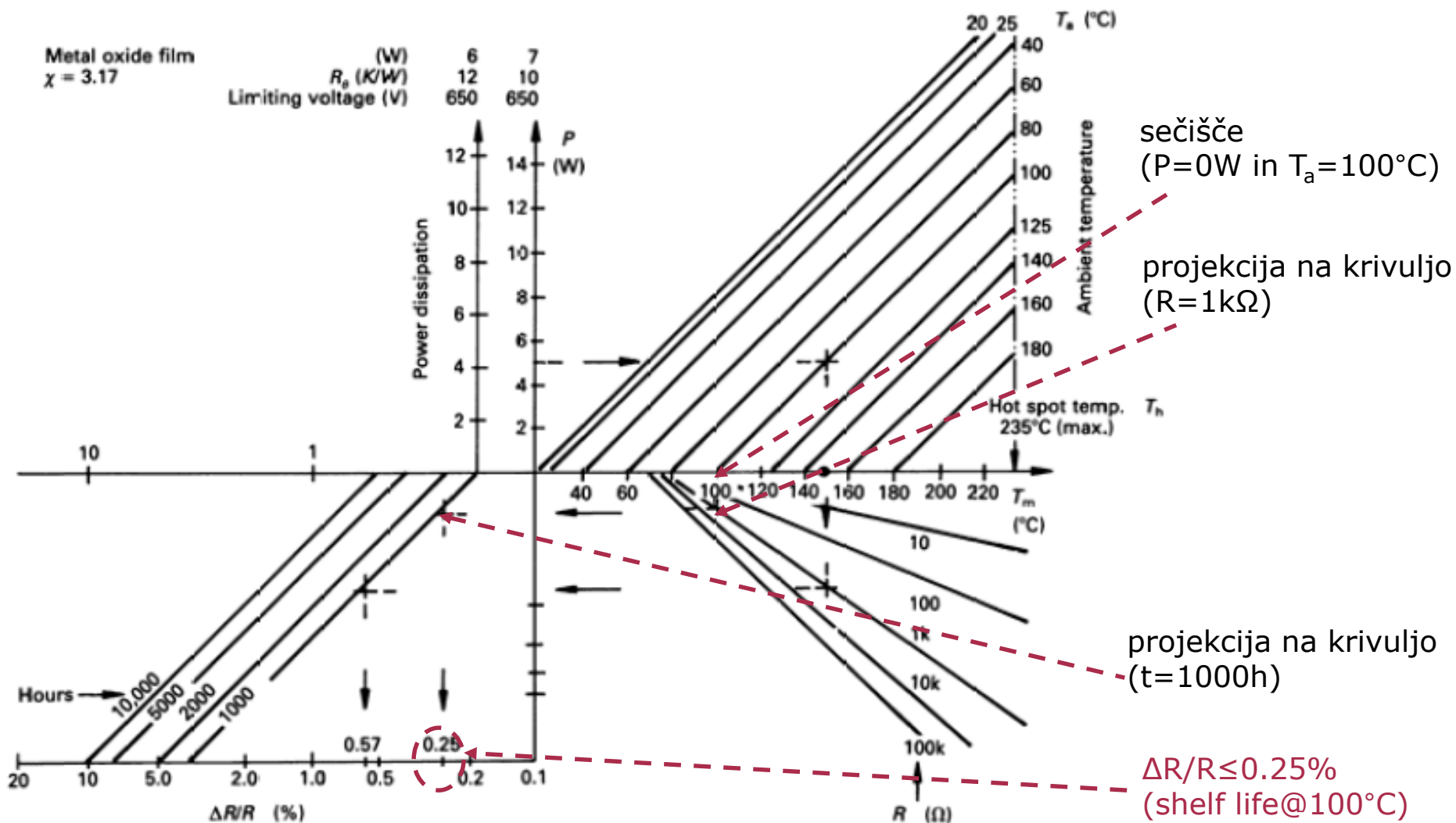
$\Delta R/R @ (T_a = 100^\circ\text{C}, P = 5\text{W})$ po 1000 urah?

- Na MF uporu $1\text{k}\Omega$, 7W se porablja moč 5W .
- Iz nomograma določite ($T_{a\text{max}} = 100^\circ\text{C}$):
 - Stabilnost upora pri ($T_a = 100^\circ\text{C}$) po 1000 urah v načinu pripravljenosti (stand-by) \rightarrow ($P = 0\text{W}$)
 - Temperaturo upora, ko se na njem porablja 5W
 - Spremembo upornosti po 10^3 in **10^5** h delovanja.

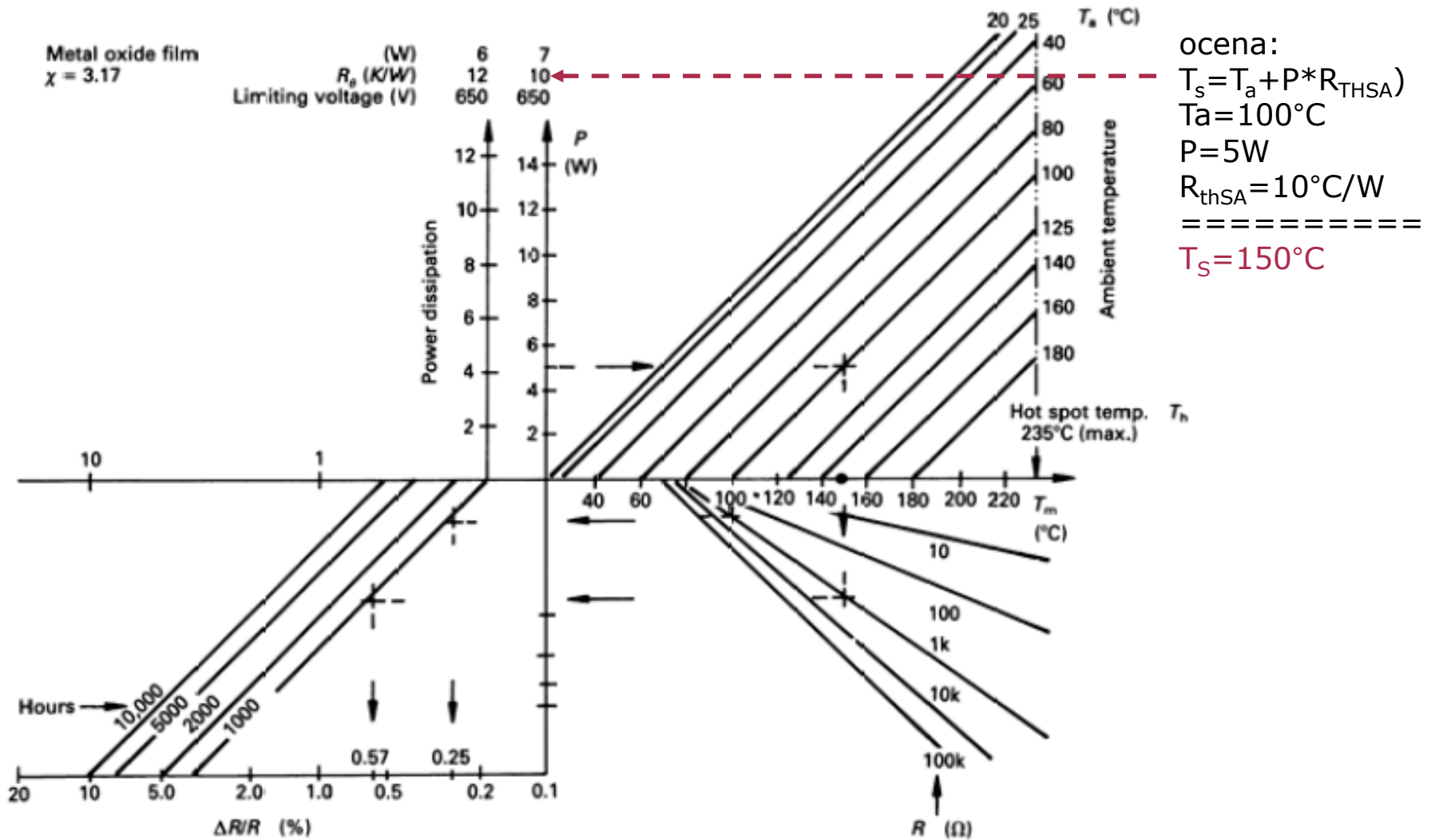
$\Delta R/R @ (T_a = 100^\circ\text{C}, P = 5\text{W})$ po 1000 urah?



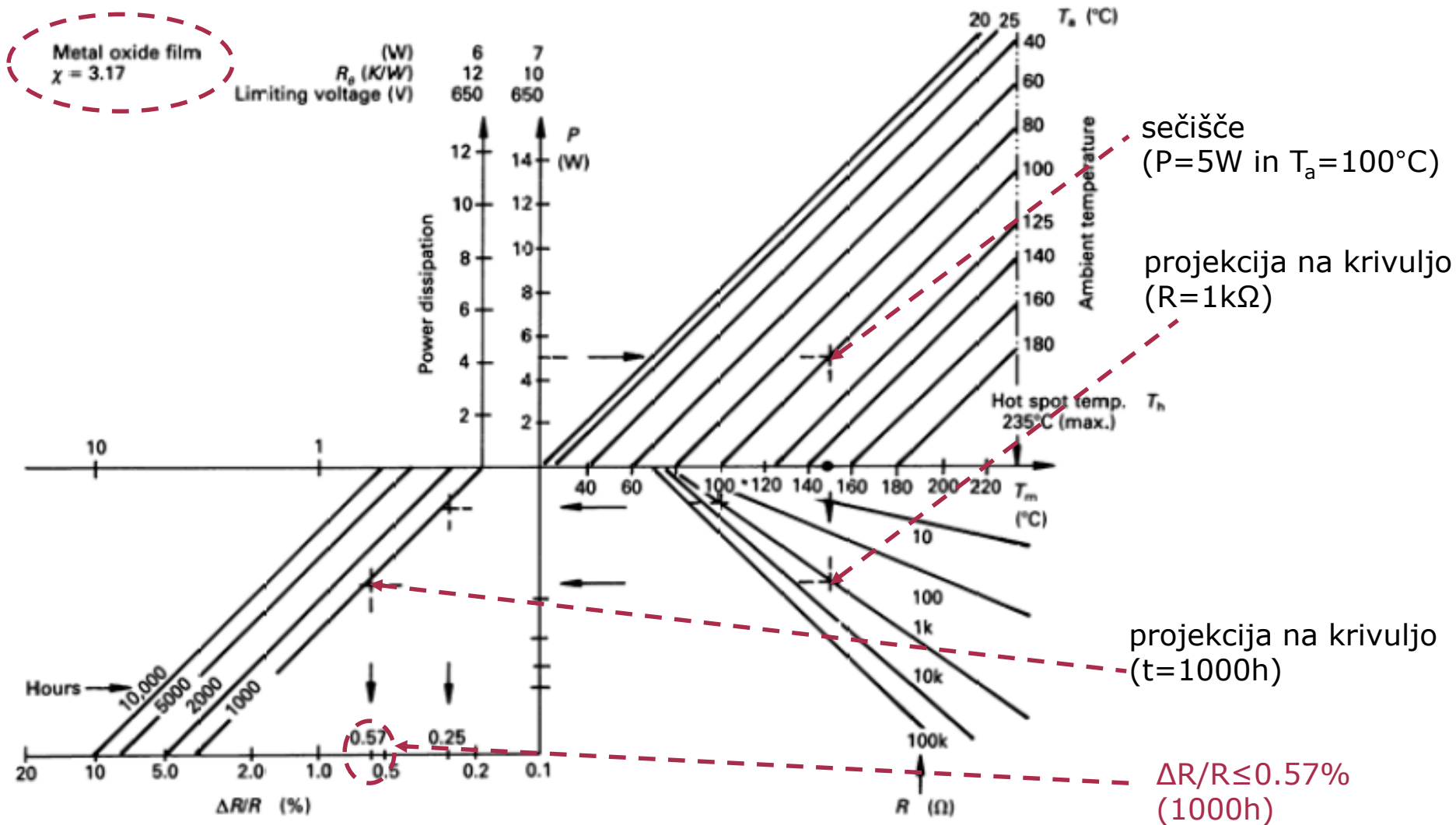
$\Delta R/R @ (T_a = 100^\circ\text{C}, P = 0\text{W})$ po 1000 urah?



T_s ($P=5W, T_a=100^\circ C$)?



$\Delta R/R @ (T_a = 100^\circ\text{C}, P = 5\text{W})$ po 1000 urah?



Degradacija po poljubnem času delovanja

- Določili smo $\Delta R/R=0.57\%$ po 1000 h delovanja.
- Iz nomograma določimo konstanto $\chi=3.17$ za MF družino uporov

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_t = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{1000h} \cdot \chi^{\log\left(\frac{t(h)}{1000h}\right)} = 0.57\% \cdot 3.17^{\log\left(\frac{10^5}{10^3}\right)} = 18.57\%$$

Po 100.000 h delovanja je 95% verjetnosti, da bo $\Delta R \leq 182.5\Omega$ ($R_n = 1k\Omega$)

Znižanje/**zvišanje** degradacije

- Če ocenjena $\Delta R/R$ za predpisano obdobje delovanja presega dopustno, je potrebno po nomogramu:
 - znižati/**zvišati** električno obremenitev P
 - znižati/**zvišati** T_S , ali T_A (hlajenje)
 - izbrati (**manj**) kvalitetno, (**manj**) stabilno vrsto upora (nižji K)

<http://www.vishay.com/docs/28729/28729.pdf>

Impulzno krmiljenje upora

- Pri obravnavi DC električne obremenitve in termičnih omejitev upora smo določili nazivno moč P_n (max. moč)@(max. dopustna temperatura T_{\max})

$$P_n = U_n \cdot I_n = I_n^2 \cdot R_n = \frac{U_n^2}{R_n}$$

Za AC moramo DC vrednosti nadomestiti z efektivnimi.
Prekoračitev $P_n \rightarrow$ prekoračitev $T_{\max} \rightarrow$ uničenje upora

Impulzno krmiljenje upora

- Trenutne vrednosti moči lahko **kratkotrajno** presežejo P_n in upor "preživi" brez degradacije če

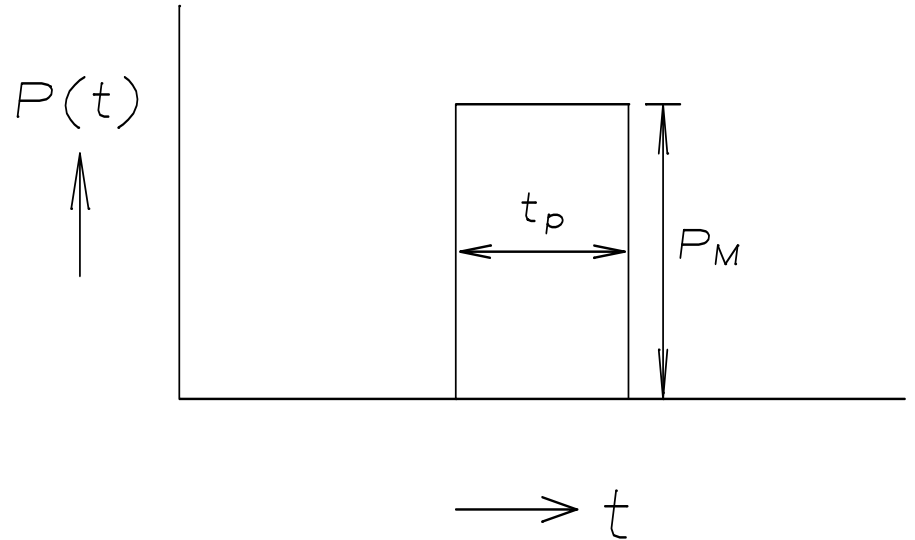
Povprečna moč impulzov ne presega P_n .

$P_{\text{povprečna}} \leq P_n \rightarrow T_S < T_{\text{max}} \rightarrow$ degradacije ni.

- Vrsti impulznega krmiljenja:
 - krmiljenje z enkratnim impulzom in
 - krmiljenje s periodičnimi impulzi:
Enkraten impulz če je čas med dvema pulzoma dovolj dolg ($f < 0.5$ Hz), da se upor do naslednjega impulza ohladi.
- Impulzno krmiljenje je za obravnavo uporov $> 1\text{W}$.

Krmiljenje z enkratnim impulzom

- Potek moči na upor pri enkratnem impulzu, dolžine t_p in moči P_M
- Kakšna je maksimalna moč impulza P_M , ki jo upor še prenese brez degradacije za dano trajanje impulza t_p .
- Če P_M raste \rightarrow t_p pada (povprečna moč)



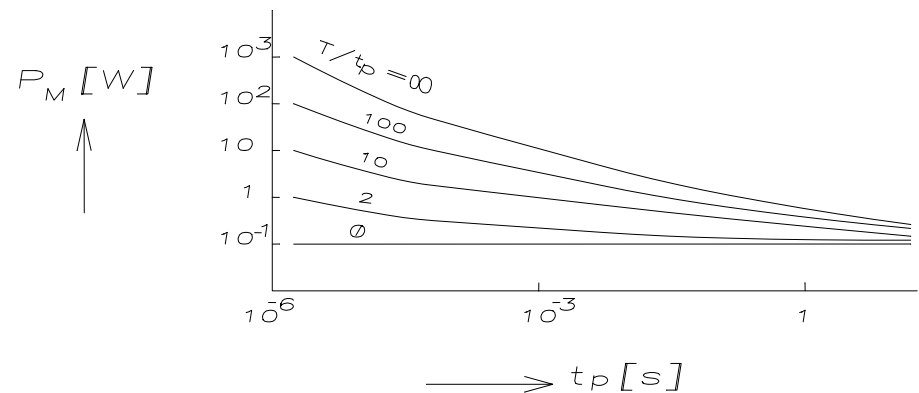
$$P_m = \frac{C}{t_p^K}$$

$$\log P_M \cong -K \log t_P + \log C$$

Krmiljenje z enkratnim impulzom

- Zveza med t_p in močjo P_M v log-log diagramu je upadajoča premica:
- Izmerjene vrednosti dajejo nižje vrednosti za maksimalne dopustne moči impulza.
- Hitrejša degradacija zaradi lokalnih segrevanj, ki jih srečamo pri hitrih spremembah signalov v uporabi na raznih nehomogenostih uporovnih in metalizacijskih plasti, ostrih robovih, konicah itd.
- P_M upada z dolžino impulza t_p
- Za dolge čase ($T/t_p = \infty$) limitira proti $P_n = 0.1\text{W}$.

$$\log P_M \cong -K \log t_p + \log C$$

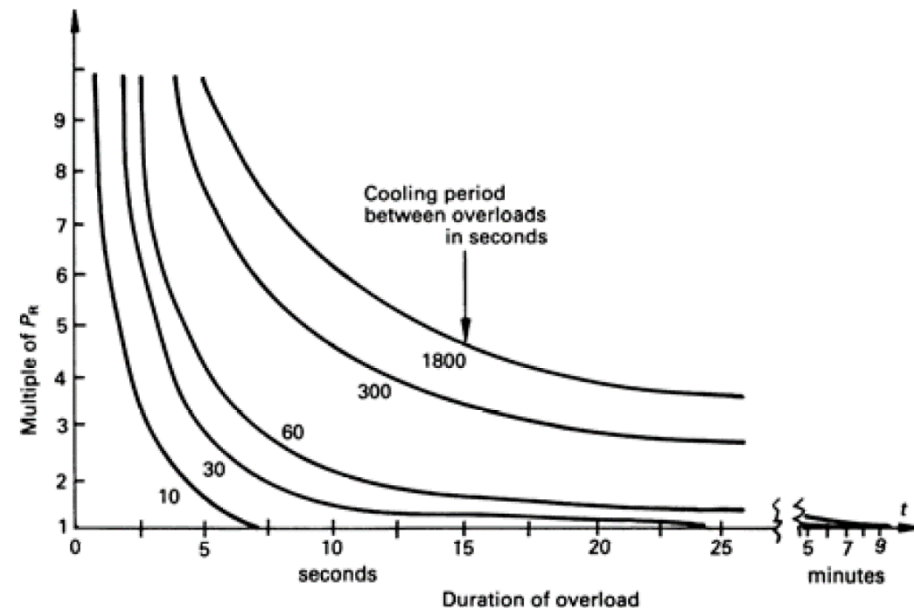


$$P_n = \lim_{T/t_p \rightarrow \infty} P_M(t)$$

Krmiljenje z enkratnim impulzom

- Za pulze $t_p < 100\text{ms}$:
- $c \rightarrow$ specifična toplota upora (J/kg/K)
- $W \rightarrow$ energija pulza v času t_p (J)
- $m \rightarrow$ masa upora (kg)

$$\Delta T = \frac{W}{m \cdot c}$$



Krmiljenje z enkratnim impulzom

- Preko žičnega upora iz 1mm^2 Ni-Cr zlitine (Nichrome) steče tokovni pulz oblike sinusnega polvala s periodo $T=50\text{ms}$ in $I_{\text{RMS}}=100\text{ A}$. Določite dvig temperature ΔT upora.
- Za Ni-Cr zlitino veljajo podatki:
 - specifična upornost $\rho=10^{-6}\Omega\text{m}$
 - specifična toplota $c=500\text{J/kg/K}$
 - gostota materiala $\gamma = 8000\text{ kg/m}^3$

masa upora:

$$m = \gamma \cdot l \cdot A$$

upornost:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

tok:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot \hat{I}_{\text{RMS}} \cdot \sin(\omega t)$$

energija pulza:

$$W = \int_0^{t_p} P(t) \cdot dt = R \cdot \int_0^{t_p} i(t)^2 \cdot dt$$

Non-repetitive pulse rating

$$W = R \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} \left(\sqrt{2} \cdot \hat{I}_{RMS} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right)^2 \cdot dt =$$

$$W = 2 \cdot \hat{I}_{RMS}^2 \cdot R \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \cdot dt =$$

$$W = 2 \cdot \hat{I}_{RMS}^2 \cdot R \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} \left(1 - \cos\left(2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right) \right) \cdot dt$$

$$W = 2 \cdot \hat{I}_{RMS}^2 \cdot R \cdot \frac{T}{2} = 2 \cdot 10^4 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot R$$

$$W = 500 \cdot R = 500 \cdot \frac{\rho \cdot l}{A}$$

<http://www.vishay.com/docs/21031/wwsurgee.pdf>

Non-repetitive pulse rating

$$W = 500 \cdot R = 500 \cdot \frac{\rho \cdot l}{A}$$

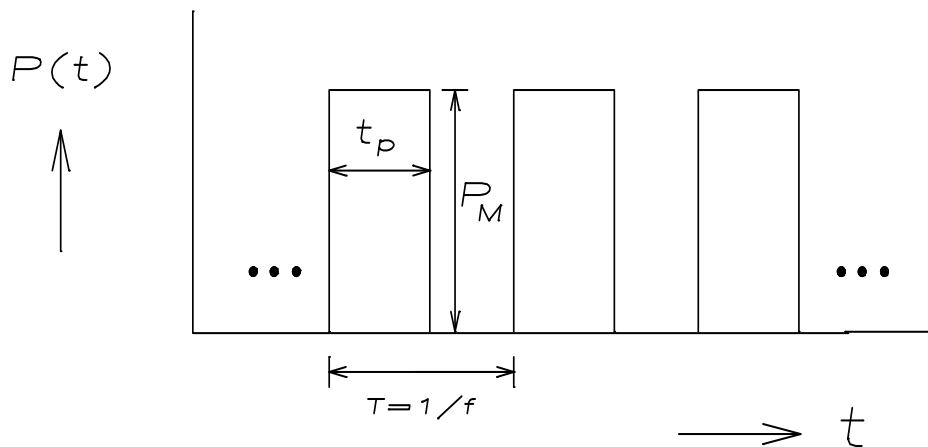
$$\Delta T = \frac{W}{m \cdot c} = 500 \cdot \frac{\rho \cdot l}{A} \cdot \frac{1}{\gamma \cdot l \cdot A} \cdot \frac{1}{c}$$

$$\Delta T = \frac{500 \cdot \rho}{c \cdot \gamma \cdot A^2} = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{8000 \cdot 500 \cdot 10^{-12}} = 125K$$

<http://www.vishay.com/docs/21031/wwsurgee.pdf>

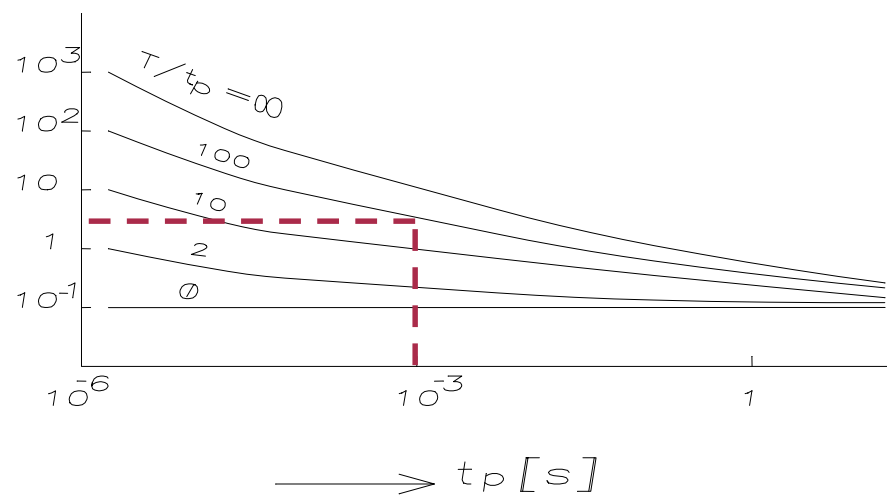
Krmiljenje s periodičnimi impulzi

- $P(t)$ pri periodičnih impulzih, s periodo T oz. $f = 1/T$
- Zahteva:
$$P_M(t_p) \leq P_n$$
$$T_S < T_{max}$$
da ni degradacije.
- Element se pri impulzni obremenitvi s P_M v trajanju t_p ne sme segreti bolj kot pri enosmerni obremenitvi z nazivno močjo P_n .



Krmiljenje s periodičnimi impulzi

- S pomočjo diagrama določi maksimalno P_M [W] dopustno moč P_M za: ↑
periodične pulze
($t_p = 1\text{ms}$, $T = 100\text{ms}$)
- $T/t_p = 100$
- iz diagrama ocenimo pri $t_p = 1\text{ms}$ maksimalno dopustno moč $P_M = 5\text{W}$



Hitri impulzi

Pogoj za hitre pulze:

$$P_M(t_p) \leq P_n \text{ vendar } T_S > T_{max}$$

- Pride do lokalnih segrevanj in T_S lokalno preseže T_{max} , čeprav velja da $P_M(t_p)$ ne preseže nazivne moči P_n !
- Proizvajalci zato podajajo še dodatne omejitve P_{MAX} , U_{MAX} , I_{MAX} glede kratkotrajnih visokih impulzov, ki v nobenem primeru ne smejo biti presežene.

Repetitive pulsed power

- Zaporedno RC vezje ($R=1\text{ k}\Omega$, $C=10\text{ nF}$) je priključeno na vir pravokotne napetosti amplitude $U=340\text{ V}$, $f=250\text{ Hz}$. Določite parametre pulzne obremenitev upora.

$$\tau_e = R \cdot C = 10 \cdot 10^{-9} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot 1000 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 10 \mu\text{s}$$

Pulzi se pojavljajo na polperiodo (polnjenje/praznjenje C).
Pulzno delovanje $\rightarrow T/2 \gg 5t_p$

$$f = 250\text{ Hz} \rightarrow T = \frac{1}{f} = 4\text{ ms}$$

$$\frac{\tau_e}{2} = \frac{R \cdot C}{2} = 5 \mu\text{s}$$

$$\frac{T}{\tau_e} = 400$$

Moč eksponentno padajočega pulza

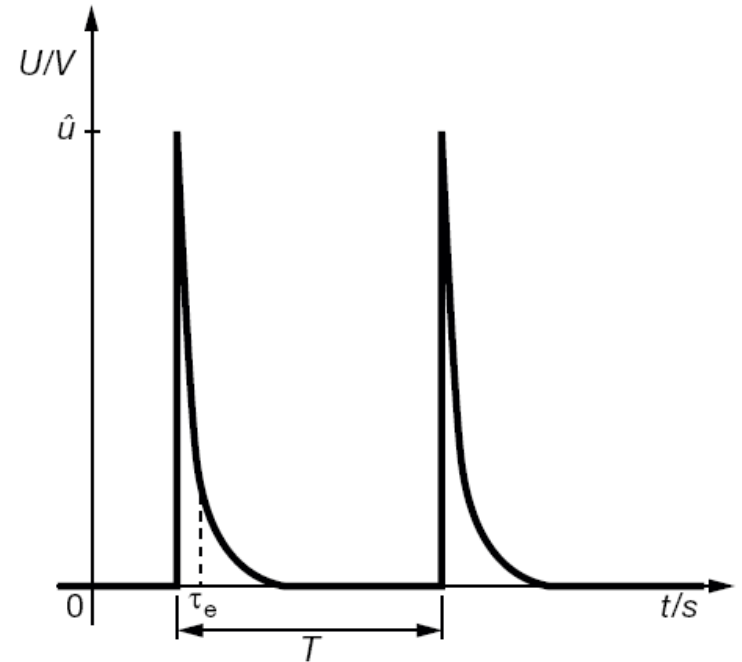
$$\bar{P} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left(\hat{U} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_e}} \right)^2 \cdot dt =$$

$$\bar{P} = \frac{\hat{U}^2}{R} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T e^{-\frac{2}{\tau_e} \cdot t} \cdot dt =$$

$$\bar{P} = \frac{\hat{U}^2}{R} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\tau_e}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2}{\tau_e} \cdot T} \right) \Bigg|_{T \gg \tau_e} =$$

$$\bar{P} \approx \frac{\hat{U}^2}{R} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\tau_e}{2} \Bigg|_{T \gg \tau_e} = \hat{U}^2 \cdot f \cdot \frac{C}{2}$$

$$t_p = \frac{\tau_e}{2} = \frac{R \cdot C}{2} = 5 \mu s$$



Repetitive pulsed power

- Povprečna moč na uporu (ustaljeno stanje):

$$\bar{P} = \frac{C \cdot \hat{U}^2 \cdot f}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-9} \cdot 340^2 \cdot 250}{2} = 0.144W$$

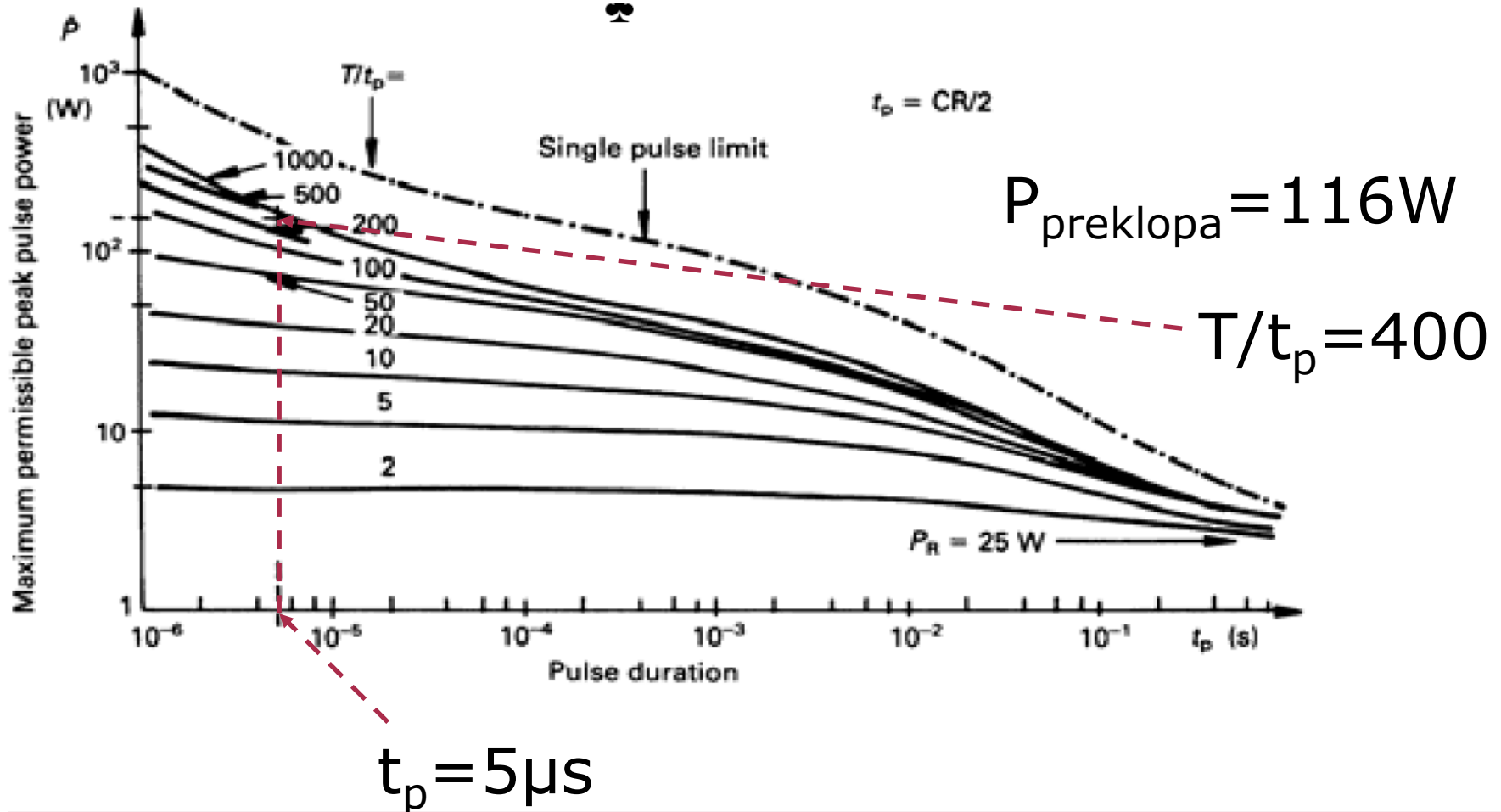
- Moč na uporu ob preklopu generatorja:

$$\hat{P} = \frac{U^2}{R} = \frac{340^2}{1000} \approx 116W$$

- Najvišja napetost na uporu: $U_{\max} = U = 340V$.

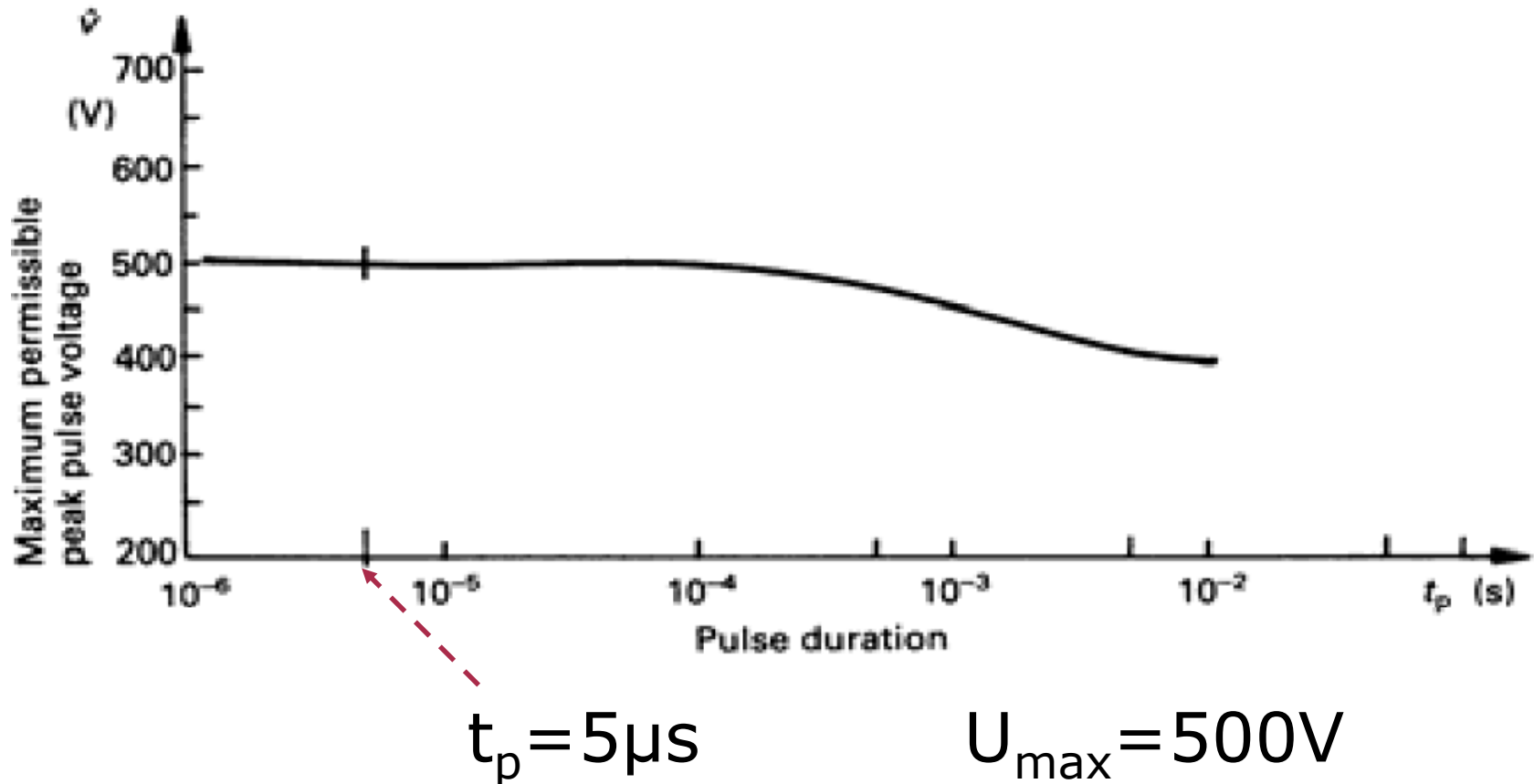
Repetitive pulsed power

- Za 2.5 W MF upor najdemo iz kataloga graf:



Repetitive pulsed power

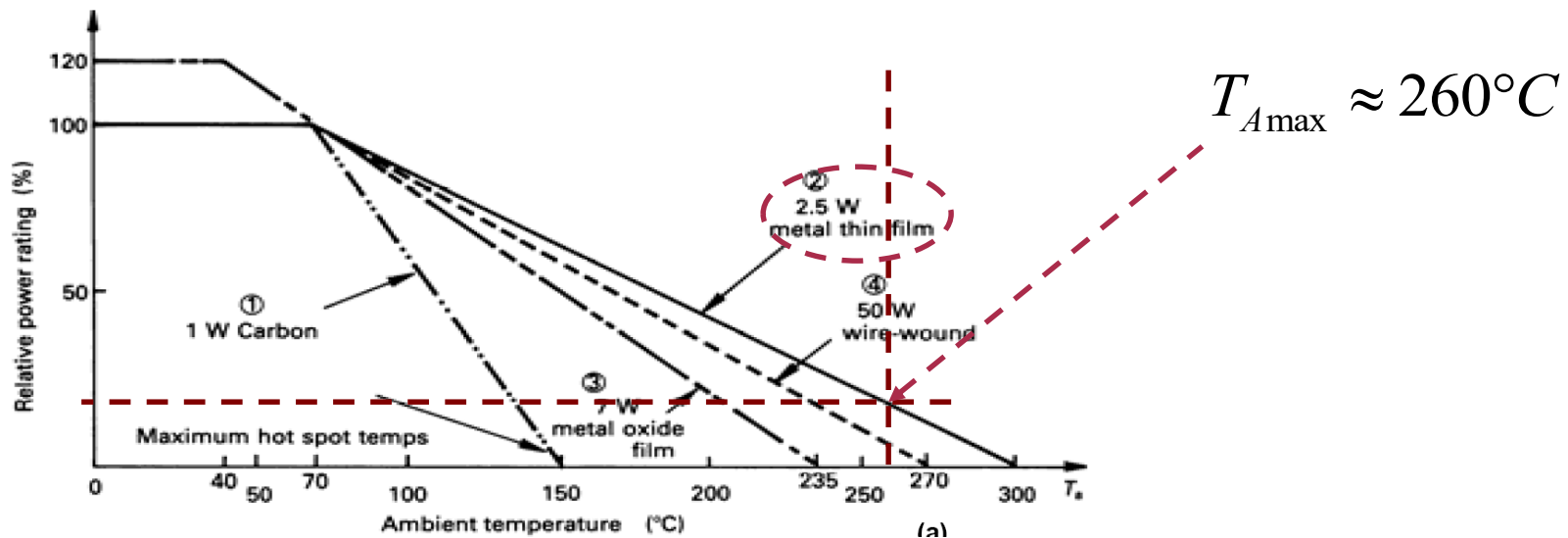
- Za 2.5W MF upor najdemo iz kataloga graf:



Repetitive pulsed power

- Izračunamo % povečanja temperature, glede na % povprečne trošene moči proti nazivni

$$\frac{\bar{P}}{P_n} = \frac{0.14W}{2.5W} = 5.6\%$$

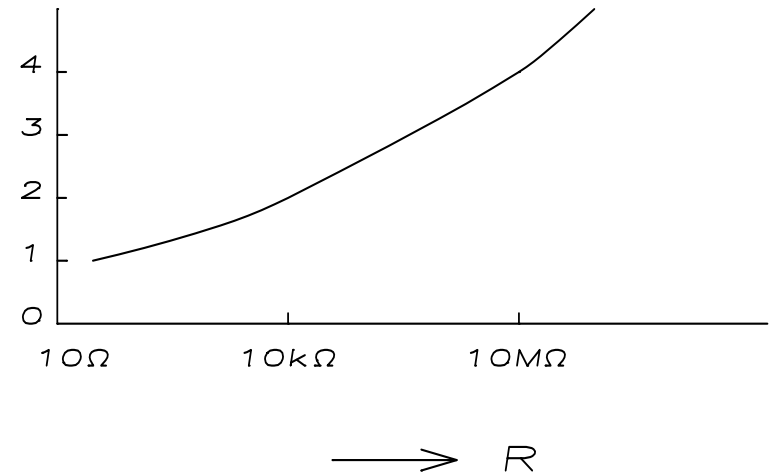
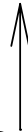


<http://www.vishay.com/docs/28810/pulseloadhandling.pdf>

$\Delta R/R$ pri različnih standardnih obremenitvah

- Pogosto je podatek izmerjena relativne spremembe upornosti $\Delta R/R$ pri različnih standardnih obremenitvah.
- Z **naraščajočo** vrednostjo upornosti v splošnem relativne spremembe upornosti **rastejo**.
- Vzrok: visokoohmski upori imajo pri izdelavi tanjše plasti \rightarrow bolj občutljive in se relativno hitreje spreminjajo
- Električna obremenitev:
 $T_A = 70^\circ\text{C}$, $P=P_n$, $t = 1000$ h
- Temperaturna obremenitev: $T_A = 155^\circ\text{C}$, $t = 1000$ h
- Obremenitev z vlago: $T_A = 40^\circ\text{C}$, $\eta = 95\%$, $t = 56$ dni

$$\frac{\Delta R}{R} [\%]$$



$\rightarrow R$

Temperaturni koeficient upornosti - TK_R

- Uporovne lastnosti resničnih materialov se spreminjajo s temperaturo → $R=R(T)$
- Temperaturne lastnosti elementov in materialov podajamo s temperaturnimi koeficienti (TK, TC ali alfa).
- Temperaturni koeficient ima ponavadi dodan še indeks, ki podaja veličino, katere temperaturno odvisnost koeficient opisuje: Temperaturni koeficient upornosti TK_R .

Temperaturni koeficient upornosti - TK_R

- TK so definirani kot **razmerje** relativne spremembe opazovane veličine in spremembe temperature.

$$TC_R = \frac{\left(\frac{dR}{R}\right)}{dT} = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = \frac{d(\ln(R))}{dT}$$

$$TC_R = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \cdot 10^6 [ppm / ^\circ C]$$

R_1 = upornost pri referenčni temperaturi (25°C) v Ω

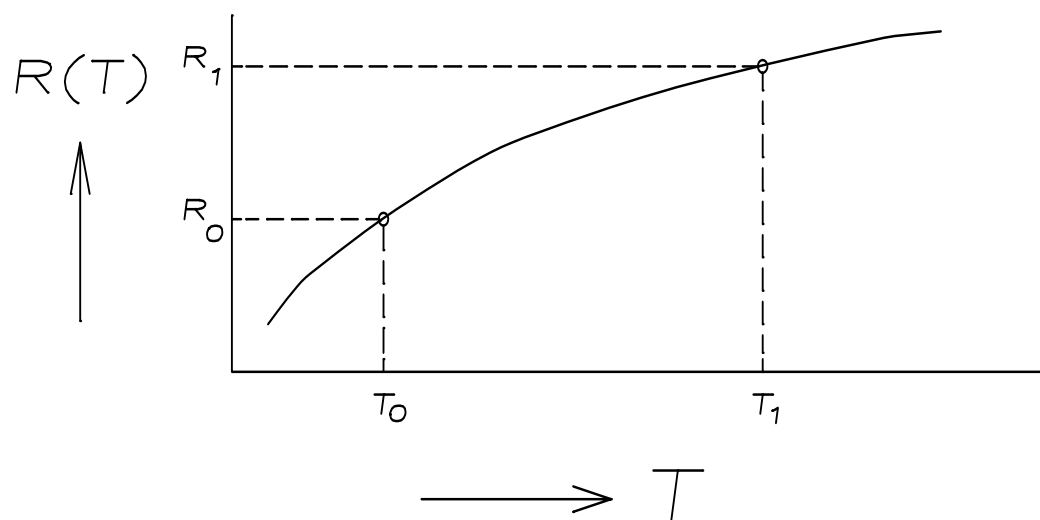
R_2 = upornost na temperaturi testiranja (-55 ...155°C) v Ω

T_1 = +25 °C (sobna temperatura)

T_2 = -55°C ... +155°C temperatura testiranja

Temperaturna odvisnost upornosti

- Pri linearnih uporih so temperaturne odvisnosti upornosti majhne: Spreminjanje upornosti s temperaturo $R(T)$ je počasno.



Za opis $R(T)$ zato uporabimo razvoj v Taylorjevo vrsto okrog referenčne temperature ($T_0 \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

$$R(T) = R(T_0) + \left. \frac{dR}{dT} \right|_{T_0} (T - T_0) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2R}{dT^2} \right|_{T_0} (T - T_0)^2 + \dots$$

Temperaturna odvisnost upornosti

- Pri običajnih linearnih uporih višji členi Taylorjeve vrste upadajo po velikosti proti 0, zaradi **relativno majhnih** sprememb upornosti s temperaturo.
- Temperaturno odvisnost upornosti s prvimi tremi členi

$$R(T) = R(T_0) + \left. \frac{dR}{dT} \right|_{T_0} \cdot (T - T_0) + \frac{1}{2!} \cdot \left. \frac{d^2R}{dT^2} \right|_{T_0} \cdot (T - T_0)^2 + \dots$$

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha_R \cdot (T - T_0) + \beta_R \cdot (T - T_0)^2]$$

$R_0 = R(T_0) \rightarrow$ referenčna upornost

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \left. \frac{dR}{dT} \right|_{T_0} \quad \text{naklon} \\ \text{krivulje}$$

$$\beta_R = \frac{1}{2R} \left. \frac{d^2R}{dT^2} \right|_{T_0} \quad \text{ukrivljenost} \\ \text{krivulje}$$

Temperaturni koeficient upornosti - TK_R

- Pri dobrih linearnih uporih je temperaturna sprememba upornosti ($dR(T)/R$) majhna,
- Okoli ($T_0 \approx 25^\circ\text{C}$) je $R(T)$ podobna premici \rightarrow zadošča linearen opis (kvadratni člen zanemarljiv, $\beta_R \approx 0$)

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha_R \cdot (T - T_0)] = R_0 \cdot [1 + \alpha_R \cdot \Delta T] = R_0 \cdot [1 + TC_R \cdot \Delta T]$$

Material (T=20°C)	ρ [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	TC_R [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]
Cu	0.017	+4300
Al	0.028	+4200
Au	0.024	+3800
Ni	0.075	+6500
NiCr 80/20	1.0	+100
ϵ	40	-200

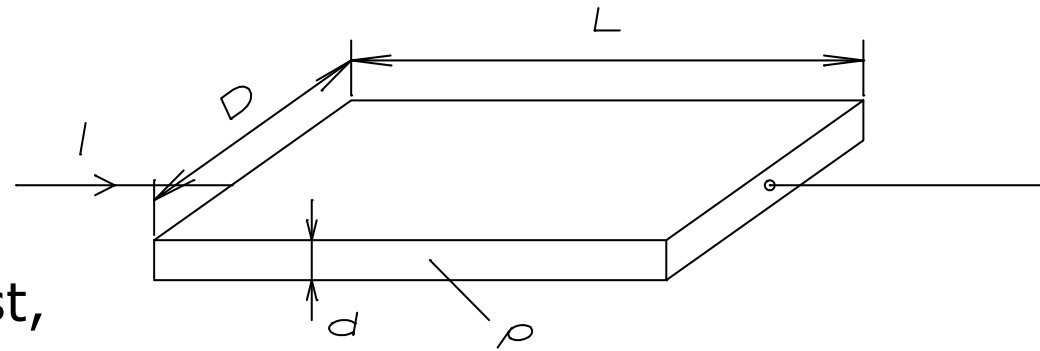
Plastna upornost R_{sh}

- Plastni upori: Tanka uporovna plast na substratu (podlagi).
- Upornost plasti \rightarrow plastna upornost R_{sh} (ang. sheet resistance).
- R_{sh} merimo hitro, enostavno, natančno in nedestruktivno.
- Uporaba v elektroniki, pri karakterizaciji mikroelektronskih tehnologij in načrtovanju uporov.
- R_{sh} :
 - homogena (lastnosti materiala so v vsaki točki konstantne)
 - nehomogena uporovna plast

Homogena uporovna plast: $\rho = \text{konst}$

- Uporovna proga:

- $L \rightarrow$ dolžina,
- $D \rightarrow$ širina,
- $d \rightarrow$ debelina,
- $\rho \rightarrow$ specifična upornost,
- $I \rightarrow$ tok upora



- V enačbi združimo:

- lastnosti uporovne plasti (ρ/d) in
- geometrijske lastnosti plasti (L/D)

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = \rho \cdot \frac{L}{D \cdot d} = \left(\frac{\rho}{d} \right) \cdot \left(\frac{L}{D} \right)$$

$$R_{SH} = \frac{\rho}{d}$$

$$R = R_{SH} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)$$

Upornost kvadrata - R_{\square}

- Če postavimo $L = D \rightarrow$ kvadrat $\rightarrow R_{sh} = R_{\square}$
plastna upornost je upornost "kvadrata" uporovne plasti

$$R_{\square} = \rho \cdot \frac{L}{A} = \frac{\rho \cdot D}{D \cdot d} = \frac{\rho}{D} = R_{sh} \quad R = R_{SH} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)$$

- Enota plastne upornosti je $[\Omega]$.
- Enota R_{\square} je $[\Omega/\square]$ (ang. ohm-per-square).
"Per square" \rightarrow dimenzija ni pomembna, pomembna je geometrija (kvadrat).

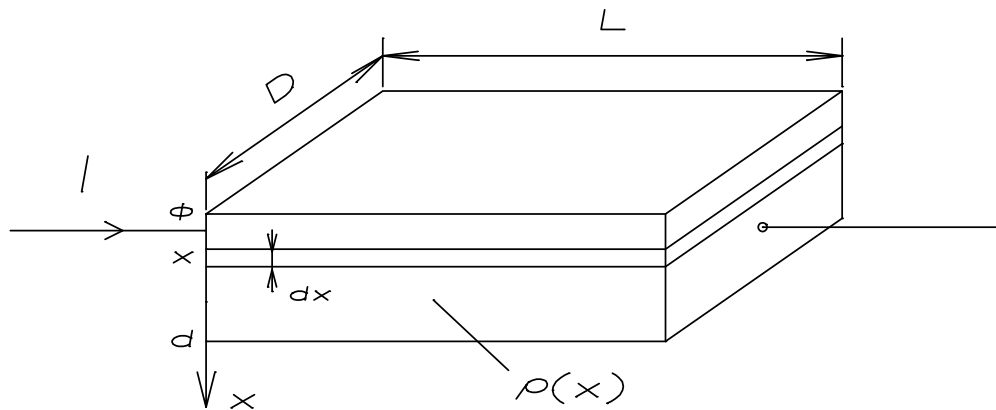
Nehomogena uporovna plast:

$\rho \neq \text{konst}$

- Specifična upornost po volumnu materiala se spreminja $\rightarrow \rho = \rho(x, y, z)$
- Difundirani upor v integriranih vezjih
 $\rho = \rho(x) \rightarrow$ koncentracija prostih nosilcev naboja \rightarrow prevodnost plasti $\sigma(x)$ od površine v globino upada.
- Uporabimo izračun s plastno upornostjo.

Nehomogena uporovna plast: $\rho \neq \text{konst}$

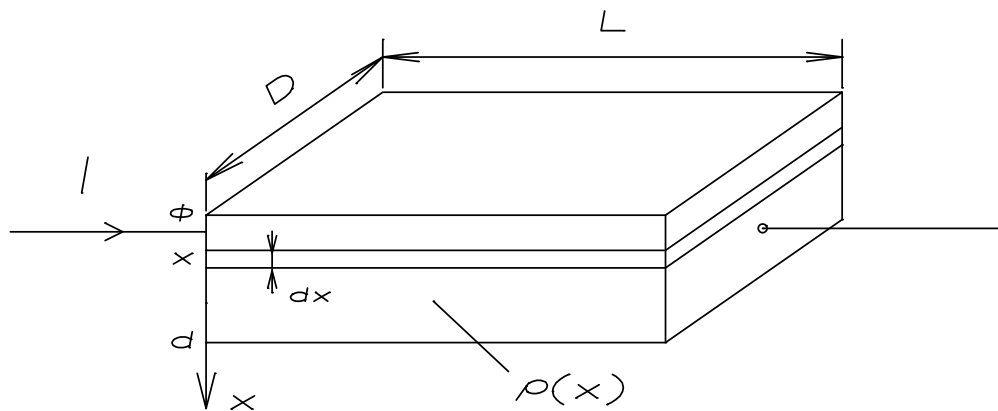
- Specifična upornost $\rho = \rho(x)$
Specifična prevodnost $\sigma = \sigma(x)$
- Upor razrežemo na tanke plasti (dx), da je specifična prevodnost $\sigma(dx)$ znotraj plasti dx konstantna.



$$dG = \sigma(x) \cdot \frac{D \cdot dx}{L}$$

Nehomogena uporovna plast: $\rho \neq \text{konst}$

- Celotno prevodnost upora G dobimo s seštevanjem prevodnosti tankih plasti dG
- dG so vezane vzporedno glede na priključka upora.



$$dG = \sigma(x) \cdot \frac{D \cdot dx}{L}$$
$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\int_0^d \sigma(x) dx} \frac{L}{D}$$

Nehomogena uporovna plast: $\rho \neq \text{konst}$

- Problem je analitični izračun R_{sh}
- V praksi R_{sh} **ne izračunamo**, ampak jo **merimo**.
- Meritev R_{sh} poteka enako v primeru homogene in nehomogene plasti.

$$R = \frac{l}{G} = R_{SH} \cdot \left(\frac{L}{D} \right) = \frac{l}{d \int_0^L \sigma(x) dx} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)$$

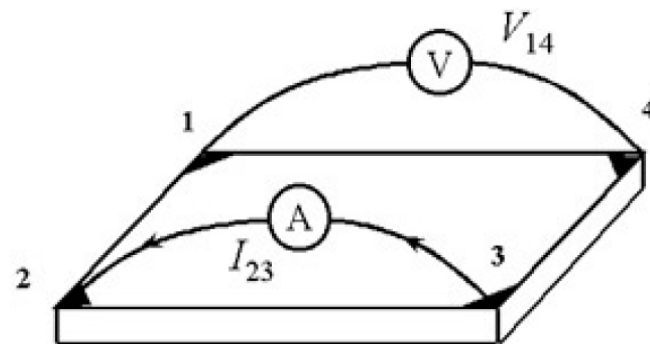
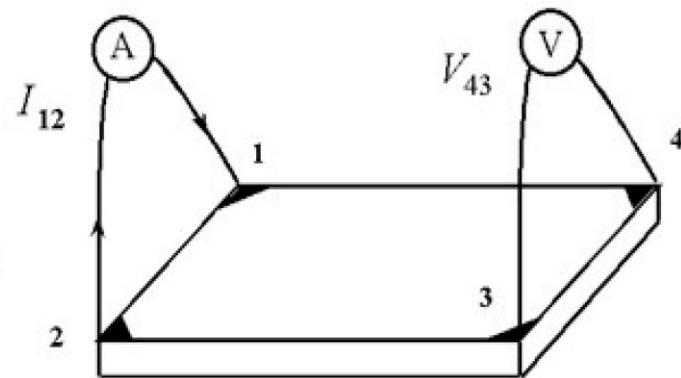
$$R_{sh} = \frac{l}{d \int_0^L \sigma(x) dx} = \frac{\bar{\rho}}{d}$$

Van der Pauw merilna metoda

- Uporabljena v polprevodniški industriji za določanje upornosti enakomernih vzorcev.
- Tanka plošča **poljubne** oblike $R_A = V_{43} / I_{12}$ s 4 ohmskimi kontakti na robovih (po možnosti na vogalih)
- Če izmerimo upornosti R_A in R_B lahko določimo R_{SH} po enačbi:

$$e^{-\pi \cdot \frac{R_A}{R_{SH}}} + e^{-\pi \cdot \frac{R_B}{R_{SH}}} = 1$$

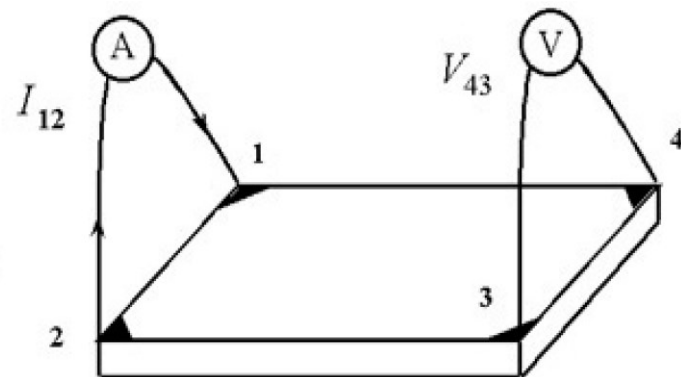
$$R_B = V_{14} / I_{23}$$



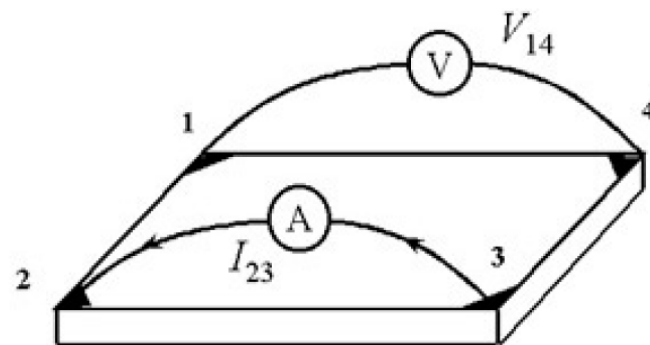
Van der Pauw merilna metoda

- R_A : Med točki 1 in 2 priključimo tokovni generator in merimo napetost med točkama 4 in 3.
- R_B : Med točki 2 in 3 priključimo tokovni generator in merimo napetost med točkama 1 in 4.

$$R_A = V_{43} / I_{12}$$



$$R_B = V_{14} / I_{23}$$



Natančnejša Van der Pauw metoda

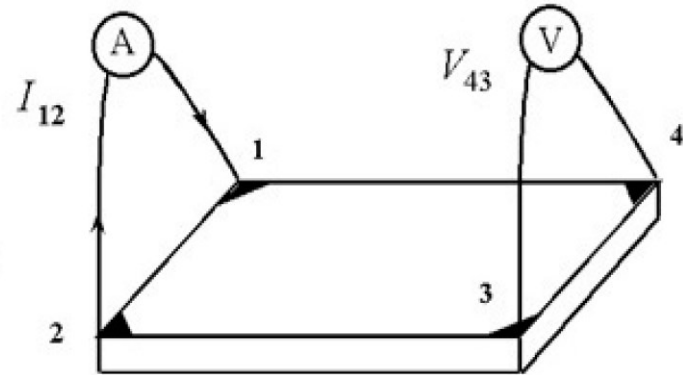
- Izmerimo lahko še preostali upornosti, pri čemer položaja tokovnega generatorja in voltmetra zamenjamo.
- Dobimo R_A' in R_B' :

$$R_A' = \frac{V_{12}}{I_{34}} \quad R_B' = \frac{V_{41}}{I_{23}}$$

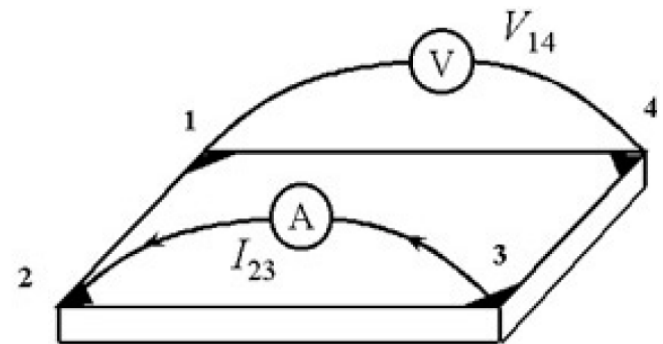
$$R_{vertical} = \frac{R_A + R_A'}{2} \quad R_{horizontal} = \frac{R_B + R_B'}{2}$$

$$e^{-\pi \cdot \frac{R_{vertical}}{R_{SH}}} + e^{-\pi \cdot \frac{R_{horizontal}}{R_{SH}}} = 1$$

$$R_A = V_{43} / I_{12}$$



$$R_B = V_{14} / I_{23}$$



Obračanje polaritete meritve

- Pri meritvah upornosti lahko polariteti obeh (tokovnega generatorja in voltmetra) obrnemo. Izmerimo nove vrednosti upornosti z indeksom R_{rev} (ang. reversed)
- Z meritvijo dodatnih upornosti izničimo vpliv kontaktnih napetosti in termoelektričnih potencialov zaradi Seebeck-ovega efekta.

$$R_{\text{vertical}} = \frac{R_A + R_A' + R_{A\text{rev}} + R_{A\text{rev}}'}{4} \quad R_{\text{horizontal}} = \frac{R_B + R_B' + R_{B\text{rev}} + R_{B\text{rev}}'}{4}$$

$$e^{-\pi \cdot \frac{R_{\text{vertical}}}{R_{SH}}} + e^{-\pi \cdot \frac{R_{\text{horizontal}}}{R_{SH}}} = 1$$

Obračanje polaritete meritve

- V idealnem primeru velja:

$$R_{\text{horizontal}} = R_{\text{vertical}} = R$$

$$e^{-\pi \cdot \frac{R_{\text{vertical}}}{R_{SH}}} + e^{-\pi \cdot \frac{R_{\text{horizontal}}}{R_{SH}}} = 1$$

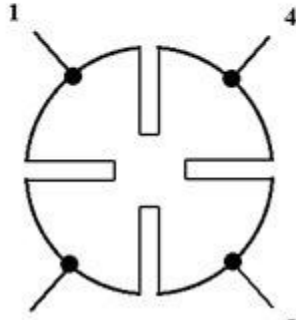
$$2 \cdot e^{-\pi \cdot \frac{R}{R_{SH}}} = 1$$

$$\pi \cdot \frac{R}{R_{SH}} = \ln(2)$$

$$R_{SH} = \frac{\pi \cdot R}{\ln(2)}$$

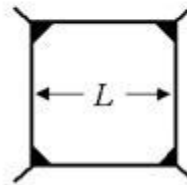
Postavitve merilnih kontaktov

Cloverleaf



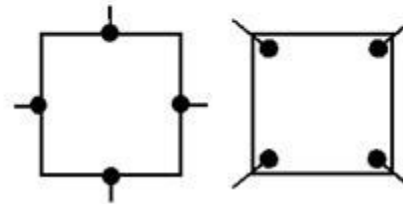
meritev za
mikropodročja

Square or
rectangle:
contacts at
the corners



običajna

Square or rectangle:
contacts at the edges
or inside the
perimeter

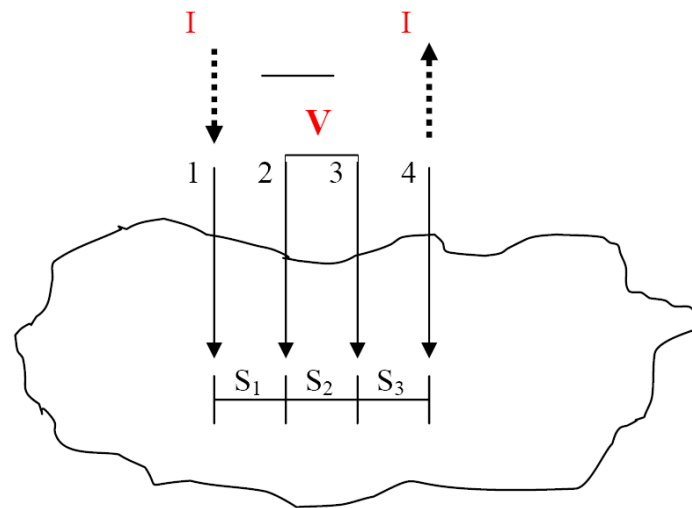


neuporabna

- http://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Pauw_method

Štiritočkovna meritev R_{sh} (ang. four-point probe)

- Najbolj pogosta metoda za meritev R_{SH} materiala.
- Štiri merilne točke kontaktirajo material v ravni črti ali kvadratu.
- Princip: leta 1916 (Wenner) za meritev upornosti zemlje
- Metoda minimizira parazitne vplive kontaktnih upornosti R_C .
- Tok skozi notranji sondi $\approx 0 \rightarrow$ (kontaktna upornosti ≈ 0)



$$V_2 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right)$$

$$V_3 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_3} \right)$$

$$V = V_2 - V_3$$

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot S \cdot \frac{V}{I} \Big|_{S_1=S_2=S_3=S}$$

Štiritočkovna meritev R_{sh} (ang. four-point probe)

R_{SH} je določena z izmerjenim razmerjem V/I .
Izrazi so odvisni od razmerja med:

- debelino plasti (d) in
- razdaljo med sondami (S) (če je plast neomejena)

- Tanke plasti: $d \ll S$

$$R_{sh} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{V}{I} = 4.53 \cdot \frac{V}{I}$$

- Debele plasti: $d \gg S$

$$R_{SH} = 2\pi \cdot \frac{V}{I} = 6.283 \cdot \frac{V}{I}$$

Four-point probe v praksi

- V idealnem primeru:
 - Merjenec je neskončen v horizontalni smeri
 - Debelina merjenca (d) je:
 $d < 0.4 \cdot S$ ($S \rightarrow$ razmak med konicami)
 - Temperatura meritve je 23°C
 - Razmak med konicami (S) je **res** konstanten

Potem velja:

$$R_{sh} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{V}{I} = 4.53 \cdot \frac{V}{I}$$

Upornost plasti:
($d \rightarrow$ debelina plasti)

$$R[\Omega\text{cm}] = R_{sh} \cdot d$$

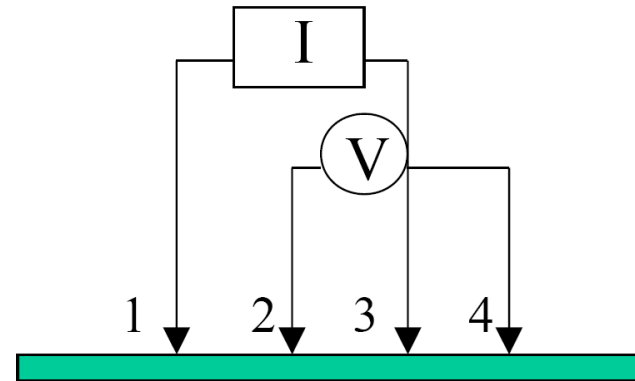
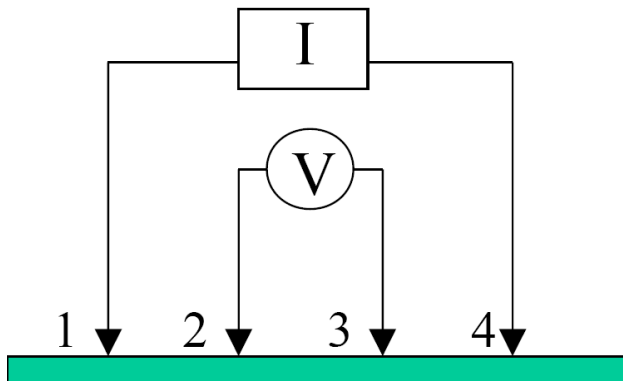
Four-point probe v praksi

- Za merilno točnost ($\leq 0.5\%$) moramo upoštevati korekcijske faktorje (CF):
 - CF_{geo} (geometrijski) izmerimo z metodo dvojne konfiguracije konic (ang. dual configuration technique). Predpostavljena vrednost je $CF_{geo}=4.532$. Metoda dvojne konfiguracije konic odpravlja variacije razmakov med konicami (S)
 - CF_d (debeline) vsebuje izračun popravka odčitka V/I , da dobimo resnični R_{SH} kot funkcijo razmerja (d/S)
 - CF_T (temperatura) korigira prirastek iz naslova temperaturnega koeficienta merjene plasti (TC_R)

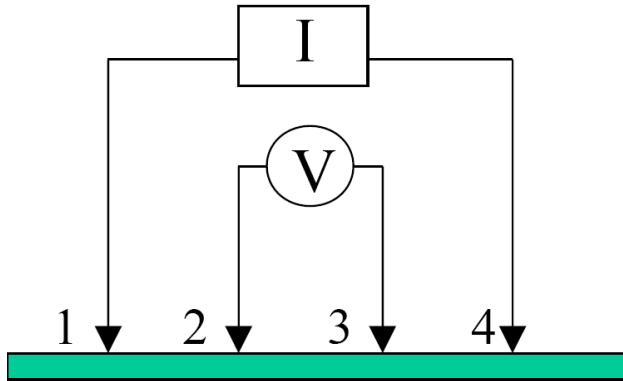
$$R_{sh} = \left(CF_{geo} \cdot CF_d \cdot CF_T \right) \cdot \frac{V}{I}$$

Metoda dvojne konfiguracije konic

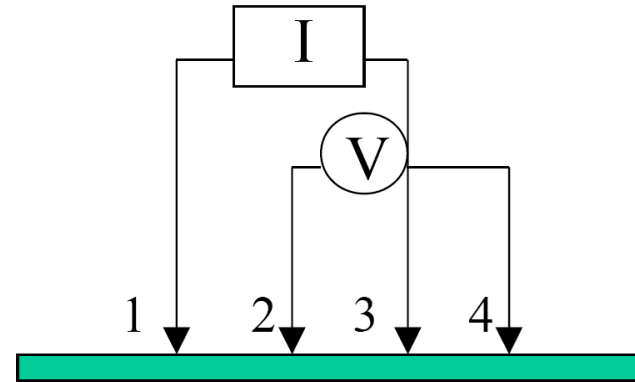
- Metoda dvojne konfiguracije konic (Dual Configuration Method) (NIST Special Publication 260-131)
- Dvojna konfiguracija konic glede na vezavo voltmetra in tokovnega vira.
- Napake zaradi geometrije (CF_{geo}) se močno zmanjšajo (dosežemo točnost merilne metode $\leq 0.5\%$)
- Metoda je uporabna za površine, katerih robovi so vsaj $3 \cdot S$ oddaljeni od merilnih konic



Metoda dvojne konfiguracije konic



$$R_A = \frac{V_{23}}{I_{14}}$$



$$R_B = \frac{V_{24}}{I_{13}}$$

$$CF_{geo} = -14.696 + 25.173 \cdot \frac{R_A}{R_B} - 7.872 \cdot \left(\frac{R_A}{R_B} \right)^2$$

Korekcija debeline (CF_d)

- Idealna predpostavka je bila, da ves tok teče tik pod površino tanke plasti.
- Z naraščajočo debelino plasti to ne drži (ASTM Standard Designation:F 84-99)
- CF_d je funkcija razmerja debeline plasti (d) in razmaka konic (S):
 - $CF_d=1 \rightarrow (d/S) \leq 0.4$
 - CF_d (tabela) $\rightarrow 0.4 < (d/S) \leq 3.45$
 - $CF_d=2 \cdot \ln(2)/(d/S) \rightarrow (d/S) > 3.45$

0.5	0.998161	2.3	0.566431
0.6	0.992574	2.4	0.546482
0.7	0.982332	2.5	0.527658
0.8	0.966831	2.6	0.509916
0.9	0.94645	2.7	0.493203
1	0.921956	2.8	0.477415
1.1	0.894378	2.9	0.46251
1.2	0.864725	3	0.448425
1.3	0.833992	3.1	0.43512
1.4	0.802958	3.2	0.422509
1.5	0.772222	3.3	0.41056
1.6	0.742216	3.4	0.399227
1.7	0.7132	3.5	0.388468
1.8	0.685429	3.6	0.378256
1.9	0.65897	3.7	0.36853
2	0.633832	3.8	0.359269
2.1	0.610077	3.9	0.350443
2.2	0.587616	4	0.342024

Korekcija temperature (CF_T)

- ASTM Standard Designation: F 84-99
- $\Delta T \rightarrow$ temperaturna razlika [K]
- $TC_R \rightarrow$ temperaturni koeficient materiala @ ($T_A \approx 23^\circ\text{C}$)

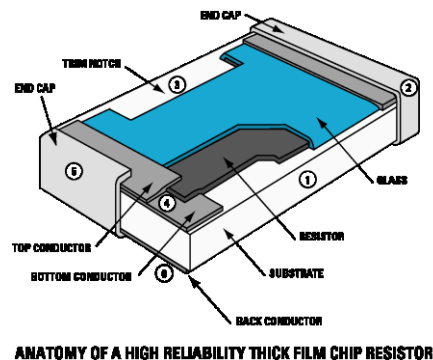
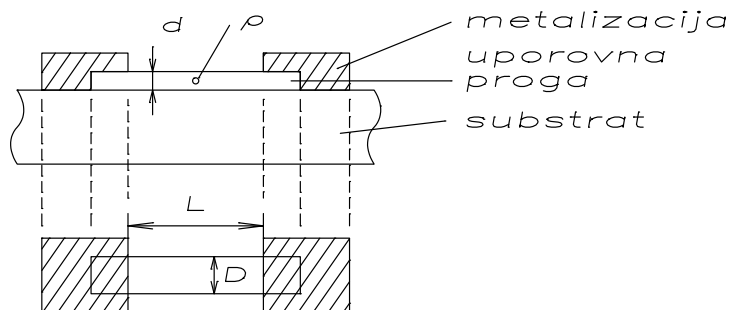
$$CF_T = 1 - TC_R \cdot \Delta T$$

Načrtovanje plastnih uporov

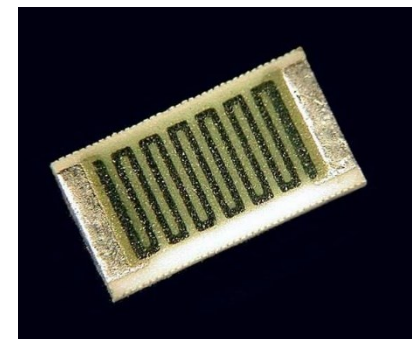
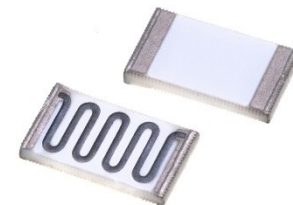
- Pri plastnih uporih je uporovno področje izvedeno z uporovno plastjo.
- Načrtovanje izvedemo s plastno upornostjo.
- Izhodiščni podatki pri načrtovanju:
 - plastna upornost uporovne plasti R_{sh} ,
 - priporočena optimalna širina uporovne proge D ,
 - zelena upornost upora R
 - Določiti je potrebno dolžino uporovne proge L

Trakasti plastni upori

- Uporovna plast (trak/proga)
- Primeri uporov:
 - Tankoplastni (thin film)
 - Debeloplastni (thick film) (hibridne tehnologije),
 - Difundirani upori (IC)

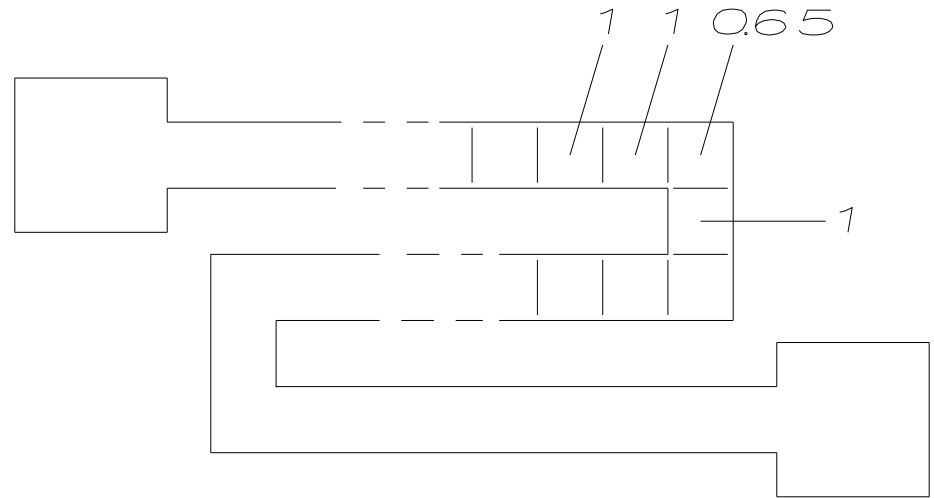


ANATOMY OF A HIGH RELIABILITY THICK FILM CHIP RESISTOR



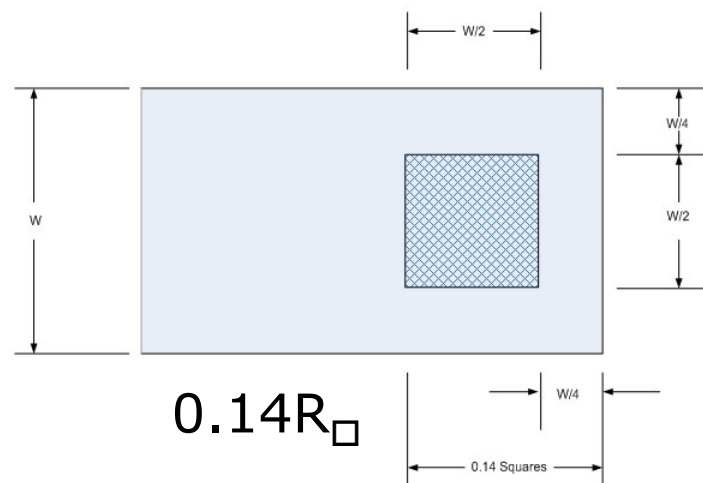
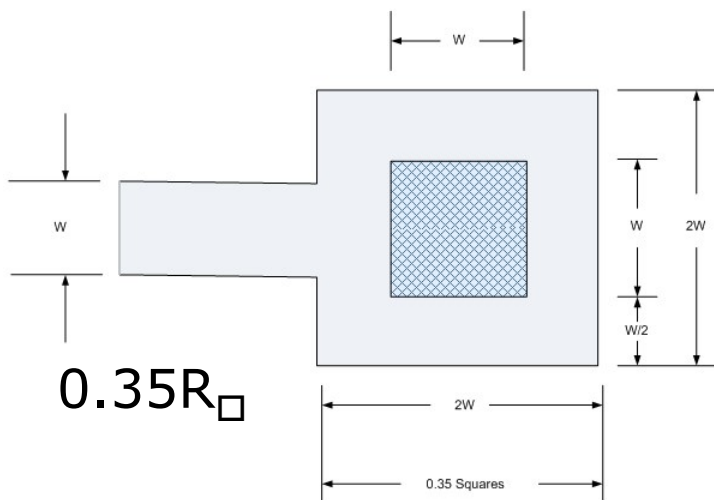
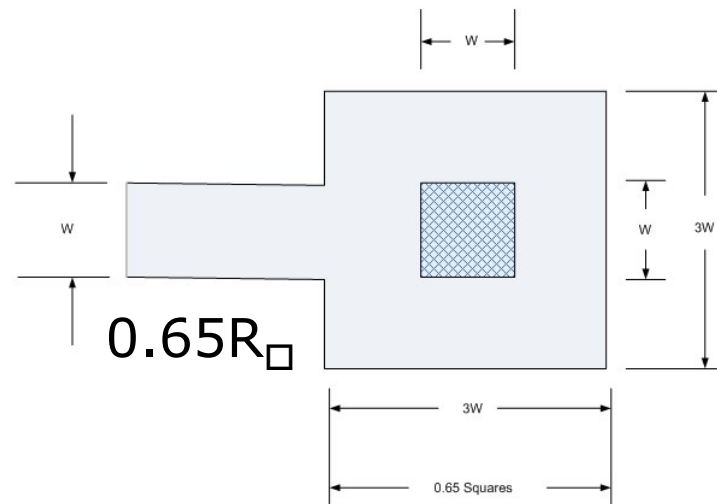
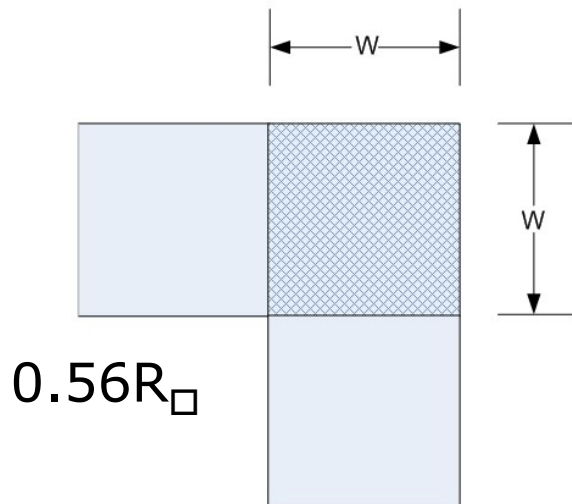
Trakasti plastni upori

- Zavite uporovne proge (meandriran upor) obravnavamo s štejem števila kvadratkov.
- Pri kvadratih v ogliščih moramo upoštevati, da zaradi krajše poti le-ti manj prispevajo k upornosti - prispevek vogalnega kvadrata je $0.56 * R_{sh}$, ne $1 * R_{sh}$
- Meandrirane upore srečamo v integriranih vezjih zaradi boljše izrabe površine.



$$R = R_{sh} \frac{L}{D}$$

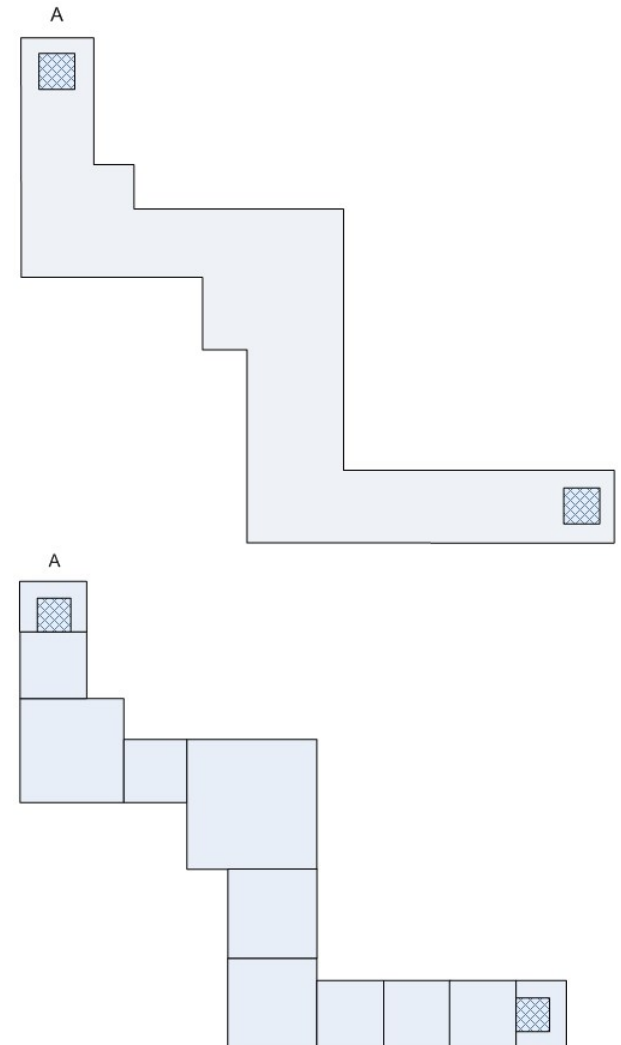
Trakasti plastni upori



Izračun upornosti trakastega upora

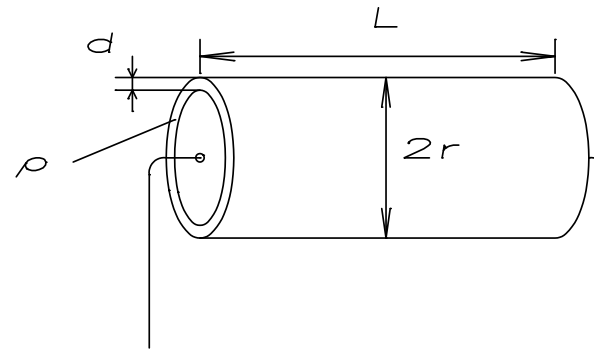
- Upor sestavlja:
 - 6 polnih kvadratov,
 - 2 kvadrata s konektorji
 - 3 vogalni kvadrati
- Upornost $R_{\square} = 0.5 \text{ m}\Omega/\square$
- Prispevki kvadratov:
 - Polnih: $6 * 0.5 \text{ m}\Omega = 3 \text{ m}\Omega$.
 - Konektorjev:
 $((2 * 0.14) * 0.5 \text{ m}\Omega = 0.14 \text{ m}\Omega)$
 - Vogalnih:
 $((3 * 0.56) * 0.5 \text{ m}\Omega = 0.84 \text{ m}\Omega)$
- Skupna upornost
 $R_{AB} = 3.0 + 0.14 + 0.84$
 $R_{AB} = 3.98 \text{ m}\Omega$

VIR: [EDN\(4/2013\)](#)



Cilindrični plastni upori

- Primer so navadni valjasti upori majhnih upornosti
- tanka uporovna plast nanesena na plašču cilindričnega uporovnega telesa.
- Uporovna plast je mnogo tanjša od polmera valja ($d \ll r$).
- Plašč valja po dolžini prerežemo in razvijemo ($D=2\pi r$)

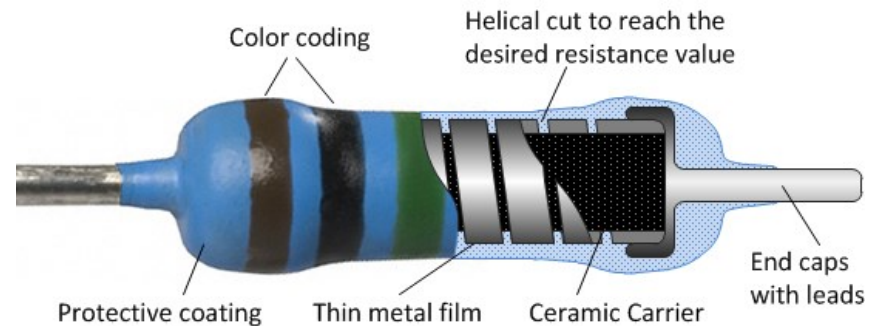
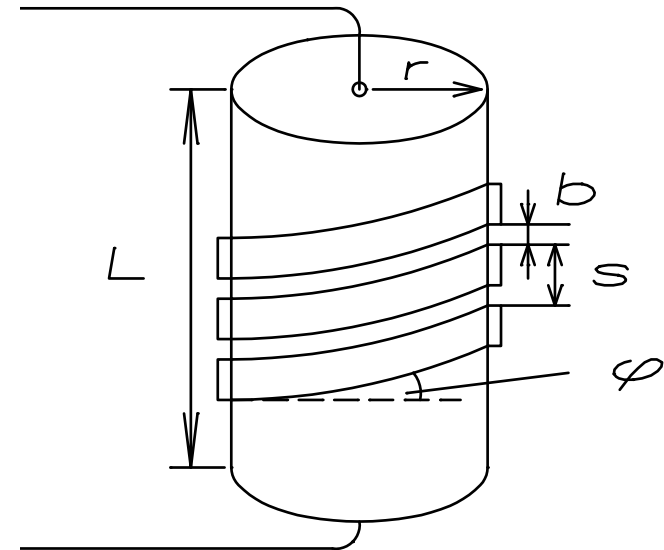


$$R = R_{sh} \cdot \frac{L}{D} = R_{sh} \cdot \frac{L}{2\pi r}$$

Cilindrični rezkani upori

- Upornost upora povečamo tako, da povečamo L in zmanjšamo $A \rightarrow$ v uporovno progo vrezkamo spiralo
- Upornost določata tudi:
 - širina reza b in
 - korak navoja s
- širina uporovne proge: $s - b$
- upornost ovoja: $R_{sh} 2\pi r / ((s-b)\cos(\phi))$
- število ovojev: L / s

$$R = R_{sh} \cdot \frac{2\pi r}{s - b} \cdot \frac{1}{\cos \phi} \cdot \frac{L}{s}$$



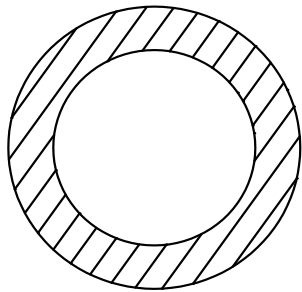
Upori pri VF

- Pri NF je upor opisan z R_n
- Pri VF signali se pojavita še efekta:
 - kožni pojav (ang. skin effect)
 - vpliv parazitnih elementov (kapacitivnosti, induktivnosti)

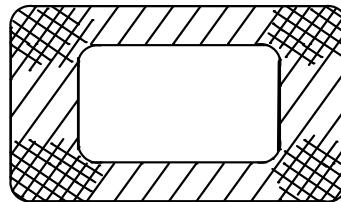
Kožni pojav / izriv toka – skin effect

- Ime pojava → tok teče predvsem po površini vodnika.
- Vzrok: Pri NF je tokovna gostota $j = dI/dA$ po preseku vodnika konstantna.
- Pri VF **magnetno polje narašča** od površine proti sredini vodnika, zato ima **področje v sredini** vodnika **večjo reaktanco** → tok teče predvsem v bolj prevodnem površinskem delu vodnika.

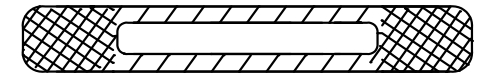
področja visokih tokovnih gostot



Tokovna gostota pri okroglem vodniku: radialno simetrična, največja je v površinskem sloju in upada v globino



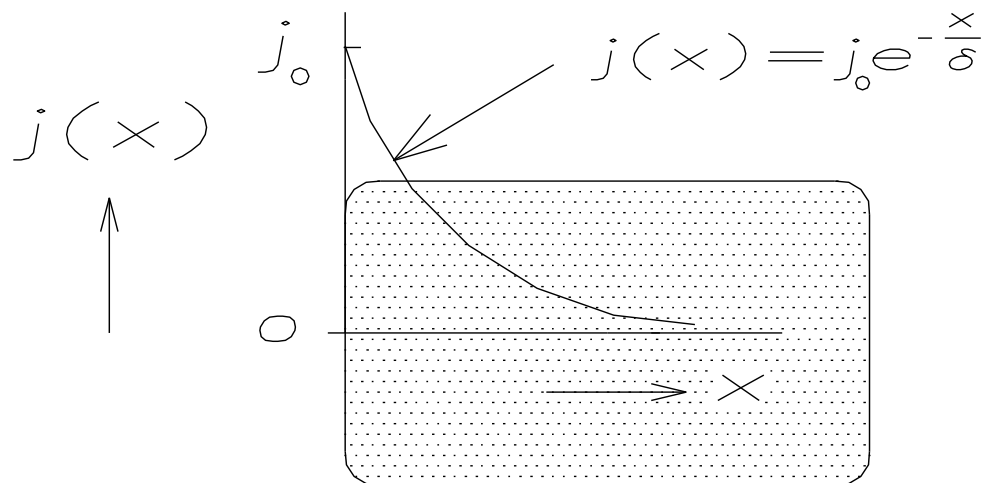
Tokovna gostota pri pravokotnem vodniku: največja v ogliščih, znatna ob stranicah in majhna v notranjosti vodnika.



Tokovna gostota pri trakastem vodniku: največja na robovih traku, znatna na površini traku in majhna v notranjosti.

Analiza kožnega pojava

Tokovna gostota $j(x)$ eksponentno upada od površine v globino:

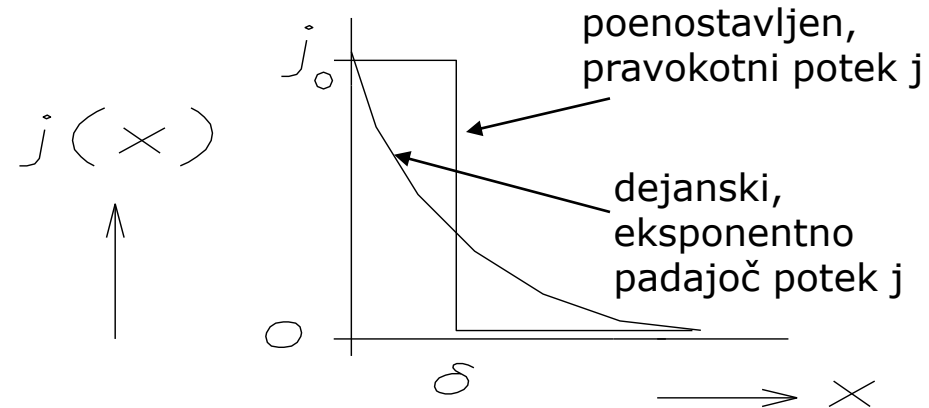


$$j(x) = j_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

j_0 → tokovna gostota
na površini prevodnika ($x=0$)
 δ → vdorna globina

Vdorna globina - δ

- Po preseku vodnika naj teče konstantna tokovna gostota j_0 v površinskem sloju vdorne globine δ .
- Vdorna globina nastopi tam, kjer j upade na ($1/e \approx 37\%$) vrednosti ob površini (j_0)
- Razmerje (I/A) oz. integral tokovne gostote po preseku vodnika mora biti enak v primeru poenostavitve in eksponentnega upadanja.



$$\int_0^{\infty} j(x) dx = j_0 \cdot \int_0^{\infty} e^{-\frac{x}{\delta}} dx =$$
$$= -j_0 \cdot \delta \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \Big|_0^{\infty} = j_0 \cdot \delta$$

Analiza kožnega pojava

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

- $\rho \rightarrow$ specifična upornost
- $f \rightarrow$ delovna frekvenca
- $\mu \rightarrow$ permeabilnost

Za Cu vodnik @($T_A=20^\circ\text{C}$):

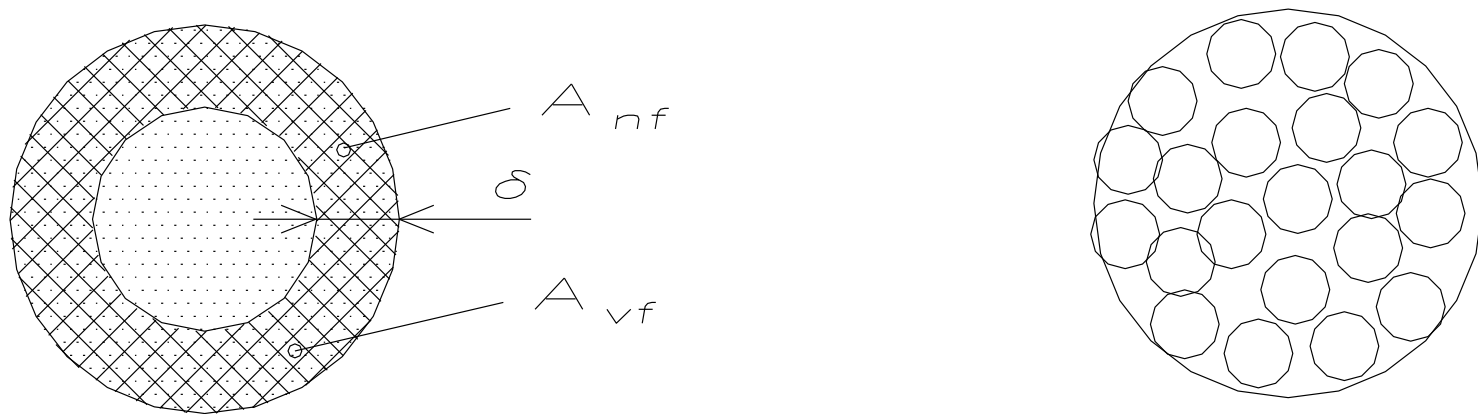
$$\delta[\text{cm}] = \frac{6.7}{\sqrt{f[\text{Hz}]}}$$

Vdorna globina kožnega efekta upada s frekvenco.

Cu, T=20°C	
f	δ
1 Hz	6.7 cm
1 MHz	67 μm
1 GHz	2 μm
10 GHz	0.67 μm

Analiza kožnega pojava

- Pri VF ostane za prevajanje toka le majhen del geometrijskega preseka vodnika



$$A_{vf} = ob \cdot \delta \quad A_{nf} = A_{geom}$$

Efektivni presek vodnika na razpolago za prevajanje pri VF ocenimo iz obsega vodnika ob in vdorne globine kožnega pojava δ

Zmanjšanje vpliva kožnega pojava

- Skin efekt → upornost narašča
- Pri debelih vodnikih relativno več preseka odpade pri dani vdorni globini δ .
- Namesto debele žice → pletenice (ang. litz-wire) iz več tankih vlaken → zaradi majhnega premera vlakna zmanjšanje A_{ef} zanemarljivo.
- Pogoj za odpravo naraščanja upornosti pri VF:

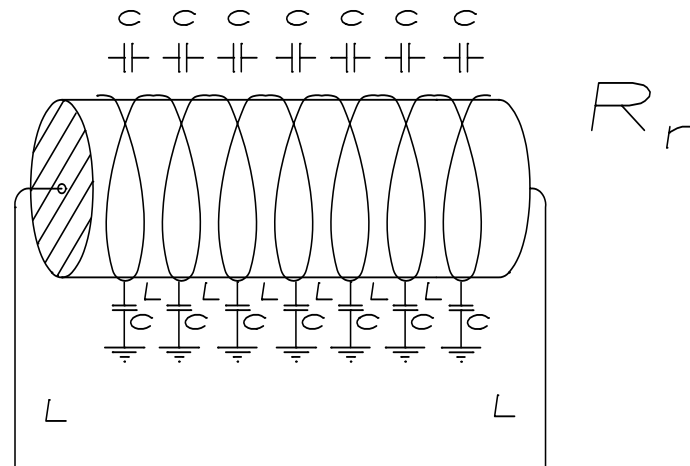
$$D1 \ll \delta$$

($D1$ je premer vlakna pletenice, δ vdorna globina kožnega pojava)

- Pri kablu iz pletenice pri VF ni opaznega povišanja upornosti,
- Pri pletenem uporju ni naraščanja upornosti z naraščajočo frekvenco.

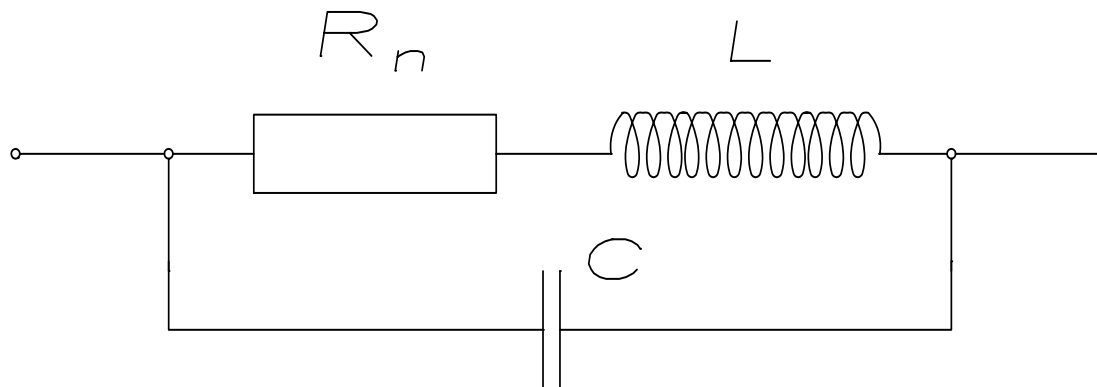
Vpliv parazitnih elementov - žični upor

- R_n je določena z uporovno žico v navitju.
- **Parazitne kapacitivnosti**: prevodni ploskvi, ločeni z izolatorjem, imata značaj kondenzatorja. Parazitni kondenzatorji: metalni ovoji, med katerimi je izolator.
- **Parazitne induktivnosti**: žični upor \rightarrow tuljava.



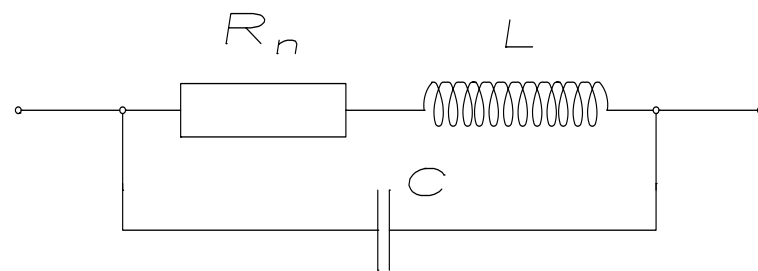
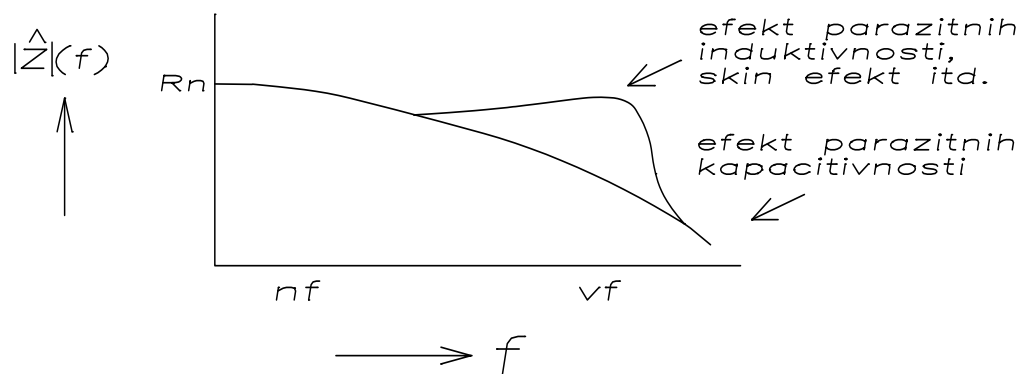
Koncentracija parazitnih elementov

- Točna obravnava (**porazdeljeni** parazitni elementi) je prezahtevna.
- Porazdeljene parazitne elemente nadomestimo s **koncentriranimi** elementi:
 - eno efektivno parazitno kapacitivnostjo C in
 - eno efektivno parazitno induktivnostjo L .
- Lastnosti elementov so podane na osnovi nadomestnih vezij s koncentriranimi elementi.



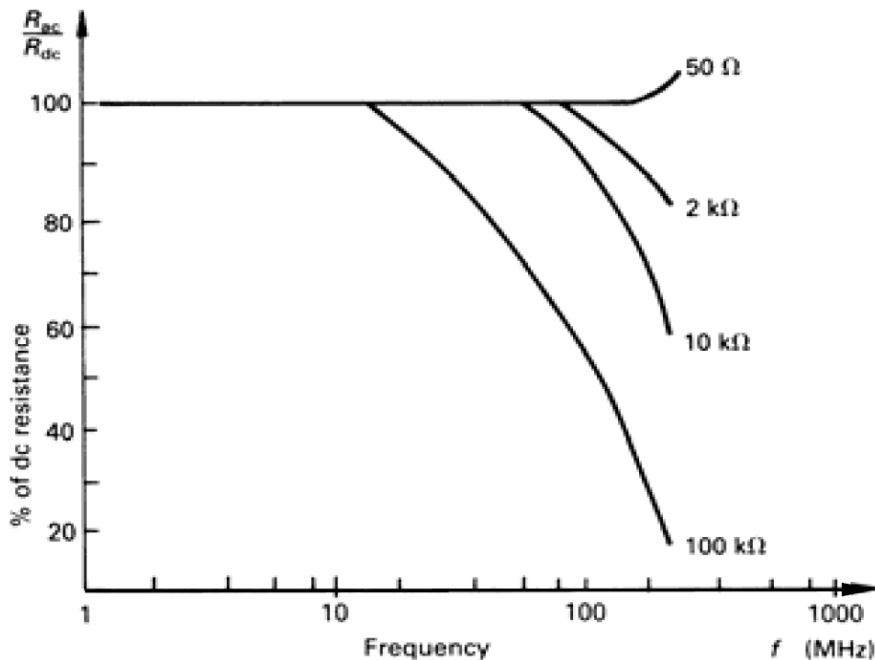
Impedanca upora - $|Z(f)|$

- NF \rightarrow podobno idealnemu uporu z upornostjo $|Z(f)|_{NF} \approx R_n$
- VF \rightarrow parazitne kapacitivnosti in induktivnosti.
- $|Z(f)|_{VF}$ upada zaradi premoščanja ("shuntiranja") upornosti s parazitnimi kapacitivnostmi.
preko katerih teče pri naraščajoči frekvence vedno večji tok.

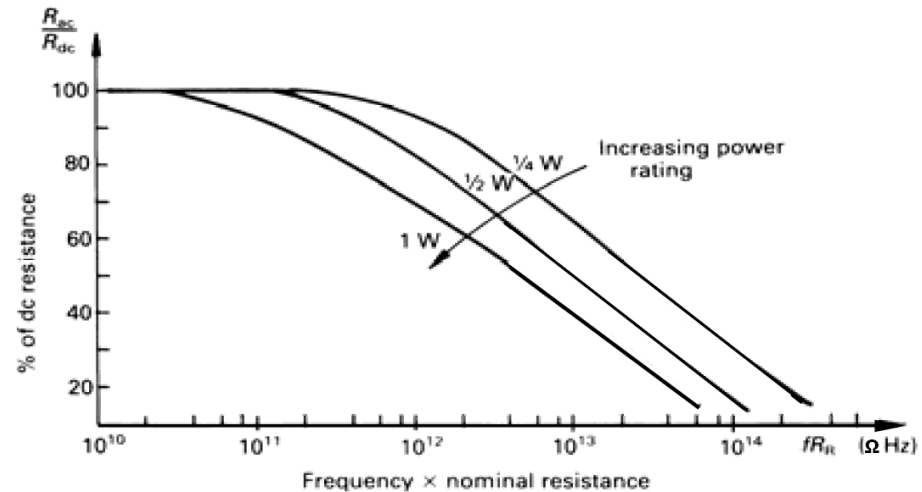


$$\hat{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R_n + j\omega L} + j\omega C}$$

Impedanca resničnega upora



žični 3W upor



CF upori

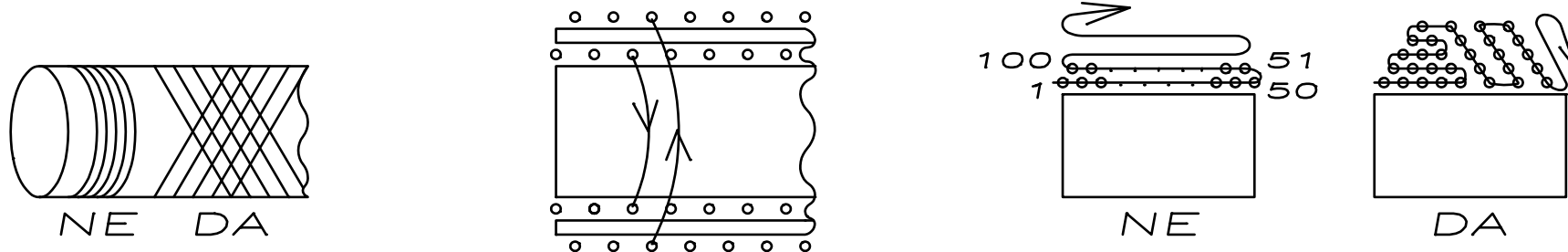
- Frekvenčna odvisnost upornosti (R_{ac}) je odvisna od tipa upora:
 - Pri plastnih uporih \rightarrow vpliv stresanih kapacitivnosti
 - Pri žičnih uporih \rightarrow skin efekt

Upori za VF delovanje

- Lastnosti uporov so določene s strukturo:
 - Plastni in volumski upori kažejo pri VF razmerah upadanje upornosti zaradi premoščanja upora s parazitnimi C.
 - Naviti žični upori in spiralizirani plastni upori → neugodni (parazitna L)
- Za VF so primerni miniaturni nespiralizirani tankoplastni upori (tanka uporovna plast → neznaten skin efekt)
 - nima velikih parazitnih L → nima ovojev in
 - nima velikih parazitnih C in L elementov ker je majhen (majhne A elektrod → manjša parazitna C) (manjši A elektrod → manjša parazitna L).
- Izboljševanje VF lastnosti → znižanje parazitne C in L.

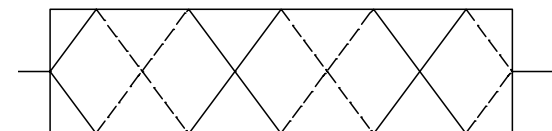
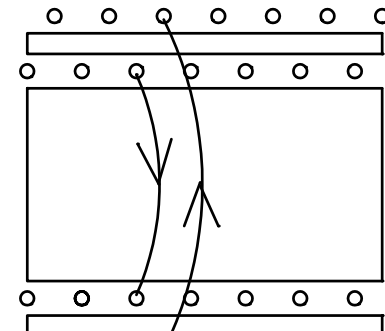
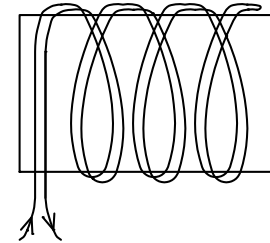
Zmanjševanje parazitnih kapacitivnosti

- Povečanje razdalje med ovoji (d) ($C = \varepsilon A/d$). Ovoji ne tečejo paralelno drug ob drugem, ampak se sekajo pod kotom, ali pa z vmesno izolacijsko plastjo med sloji navitja (leva slika).
- Distančniki (srednja slika)
- Navijanje v slojih (desna slika):
 - izmenično v nasprotnih smereh
 - ovoji se ne srečajo po velikem številu ovojev. V nasprotnem primeru je namreč med takimi ovoji velika potencialna razlika na majhni razdalji (debelina izolacijskega laka), kar ima za posledico velike parazitne C .



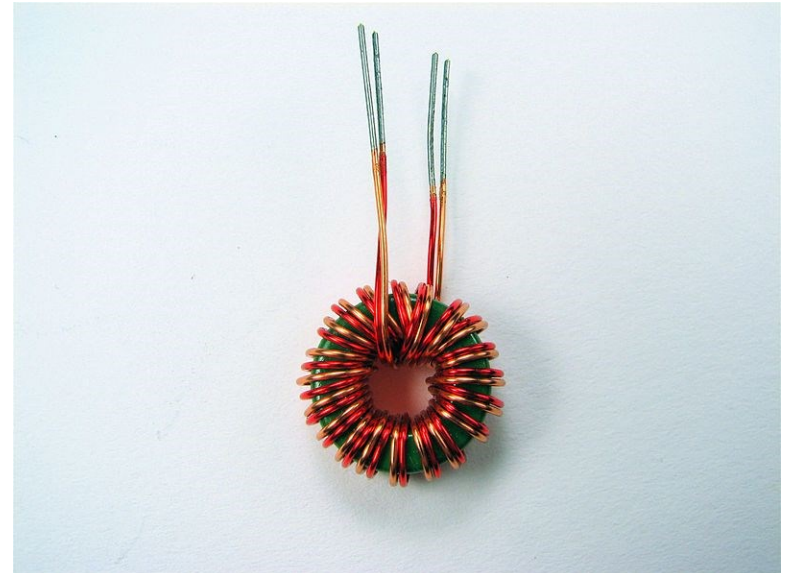
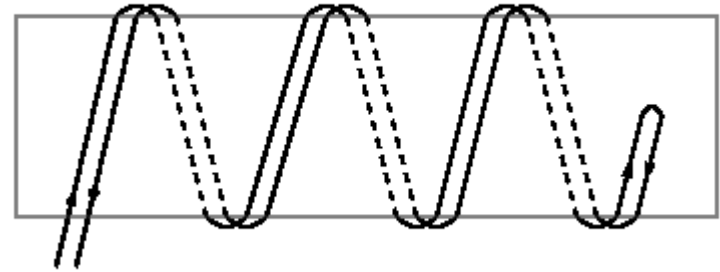
Zmanjševanje parazitnih induktivnosti

- Z zmanjšanjem preseka navitja A ($L = \mu N^2 A / l$). VF upori so zato naviti na sljudno ploščico.
- S kompenzacijo magnetnega pretoka z **antiinduktivnimi** navijanji:
 - bifilarno naviti upori ali
 - izmenično naviti sloji
 - Ayrton-Perry navijanje,
 - nizko parazitno C (ovoji se sekajo pod pravim kotom)
 - nizko parazitno L (magnetni pretok je kompenziran, saj ima vsak ovoj paralelno še ovoj s tokom v nasprotni smeri!)



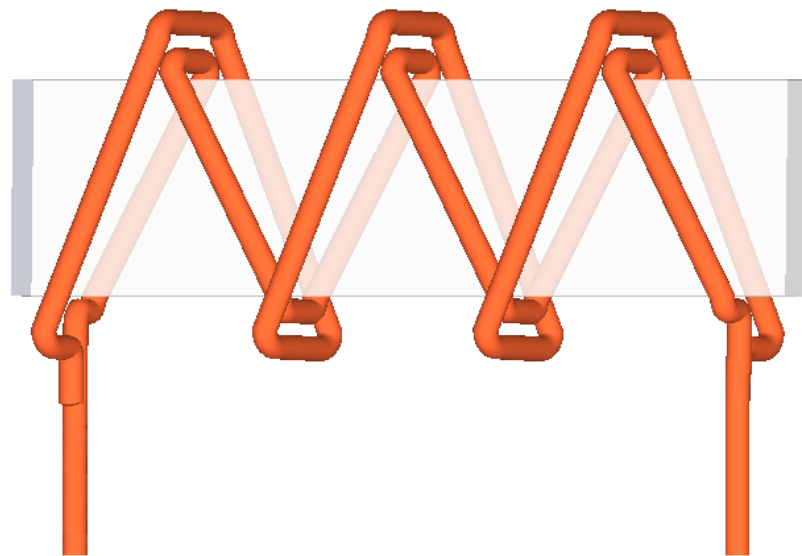
Bifilarno navijanje

- **Antiinduktivno** navijanje
- Bifilarna navitja imajo induktivnost v (sofaznem) "common-mode" načinu, ne pa tudi v diferencialnem (protifaznem) načinu.
- Uporabljajo za dušitev sofaznih motenj v komunikacijskih vezjih (npr. Ethernet PHY, USB, HDMI)



Ayrton-Perry navijanje

- Iz dveh ločenih žic, navitih v nasprotni smeri okrog izolacijskega telesa
- Obe navitji imata enako število ovojev in sta na koncih povezani vzporedno.
- Magnetni polji navitij se medsebojno izničujeta, zato dobimo majhno parazitno L.
- Med soležnima ovojem a enega in drugega navitja je majhna napetost, zato je med ovoji majhna parazitna C.
- Slabost tega navijanja je poraba žice: dvojna dolžina žice je vezana vzporedno: Za doseganje iste upornosti je potrebno v primerjavi z navadnim navijanjem uporabiti štirikratno dolžino žice (dvojno na vsako navitje)



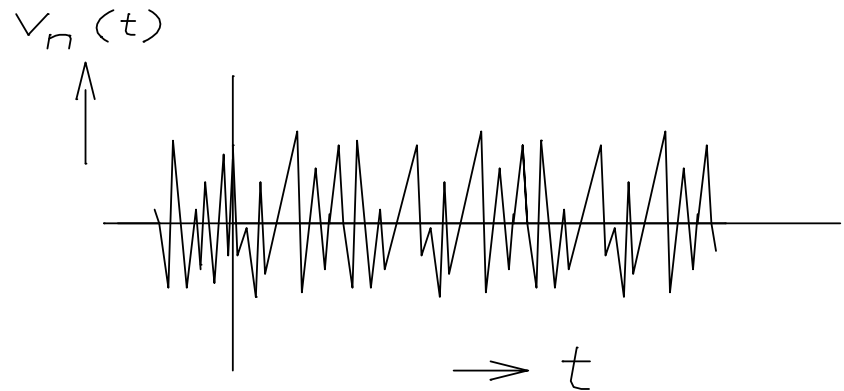
Uporaba Ayrton-Perry navijanja

- Pulzno delovanje vezij (fast rise resistors)
- Tipične reaktance uporov s tovrstnimi navijanju so $L < 1\mu\text{H}$ (500Ω)
- $C < 0.8\text{pF}$ ($1\text{M}\Omega$)
- Dvižni čas pravokotnega signala preko takega upora je tipično $t_R < 20\text{ ns}$, ob tem da ohranja lastnosti toleranc, TC_R in stabilnosti žičnih uporov.

<http://riedon.com/blog/tag/high-frequency-response/>

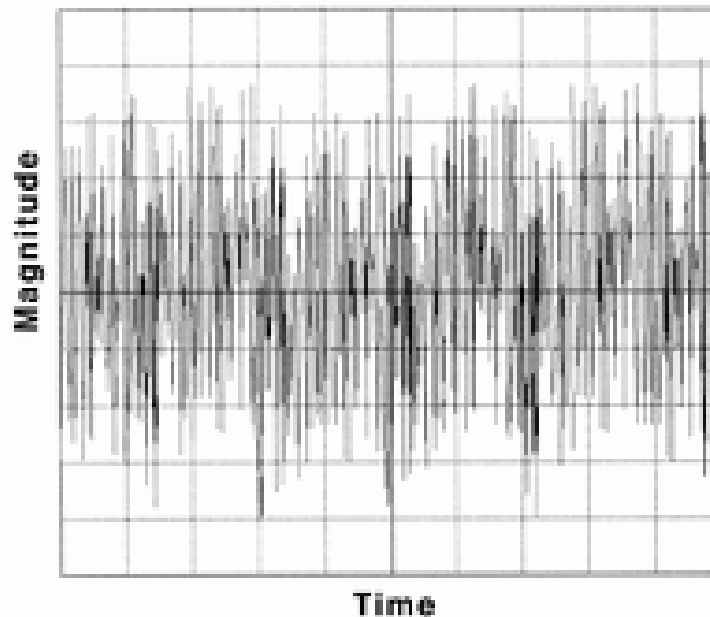
Šum

- Šum (ang. noise) → različne vrste majhnih fluktuirajočih napetosti ali tokov.
- Šumne veličine indeksiramo s črko n , npr. šumna napetost v_n
- Šum je osnovna omejitev za delovanje elementov in vezij pri majhnih signalih.
- Vedno morajo biti namreč delovni signali večji od prisotnega šuma, sicer so izgubljeni v šumu oz. jih ne moremo izločiti iz šuma in uporabiti (razmerje S/N).



Karakterizacija šuma

- Majhne, neperiodične, naključne spremembe napetosti $v_n(t)$, ki gredo na časovni osi $\pm\infty$
- Za časovni opis šuma bi rabili neskončno podatkov \rightarrow odpade.



Karakterizacija šuma

- Povprečna vrednost šuma je 0 (naključna narava šuma)
- Obstaja pa efektivna vrednost šumne napetosti (ang. RMS root-mean-square)

$$\overline{v_n} = \int v_n(t) dt = 0$$

$$V_{nRMS} = \sqrt{\overline{v_n^2(t)}} = \sqrt{\int v_n^2(t) dt}$$

Šum na uporih: Termični šum

- Prvič ga je študiral John B. Johnson (Bell Labs) leta 1928.
- Johnson je meritve predstavil Harry Nyquistu, ki je razložil ozadje šuma s termodinamko, zato včasih ta šum imenujemo Nyquistov ali Johnson-Nyquist šum.

Šum na uporih: Termični šum

- Nastane zaradi naključne narave termičnega gibanja elektronov v snovi.
- Ob tem pride do naključnega pojavljanja **presežkov/primanjkljajev** elektronov po strukturi elementa.
- Po Poissonovi enačbi ($dE/dx = \rho/\varepsilon$) naboji rodijo električno polje → napetost prek upora (šum)
- Gibanje elektronov in s tem termični šum naraščata s temperaturo.
- Termični šum podaja Nyquistova enačba:

$$\sqrt{v_n^2} = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

k → Boltzmannova konstanta

T → absolutna temperatura [K]

R → upornost danega upora

Δf → frekvenčni pas signalov na uporu

Šum na uporih: Termični šum

- Nyquistova enačba pri sobni temperaturi :
 $T=300\text{K}$, $4kT=10^{-20}\text{Ws}$

$$\sqrt{v_n^2} [\mu\text{V}] = 10^{-4} \sqrt{R[\Omega] \Delta f[\text{Hz}]}$$

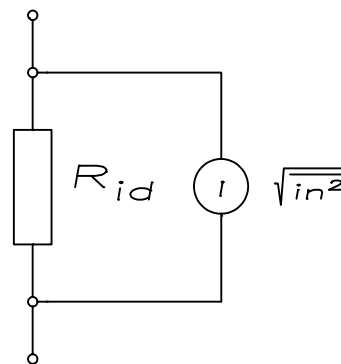
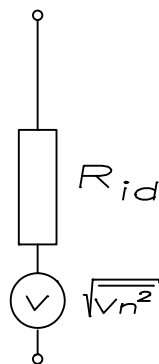
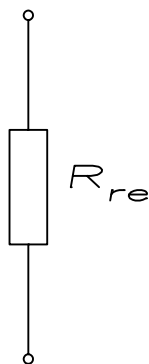
- Termični šum pri uporih $R=1\text{k}\Omega$ v frekvenčnem pasu 100kHz pri sobni temperaturi!

$$\sqrt{v_n^2} = 10^{-4} \cdot \sqrt{10^3 \cdot 10^5} \mu\text{V} = 1 \mu\text{V}$$

Znižamo z zmanjšanjem upornosti R ali frekvenčnega pasu Δf , kar pomeni spremenjeni načrt elektronskega vezja, ali pa uporabimo hlajenje vezij in naprav na nizke temperature (T).

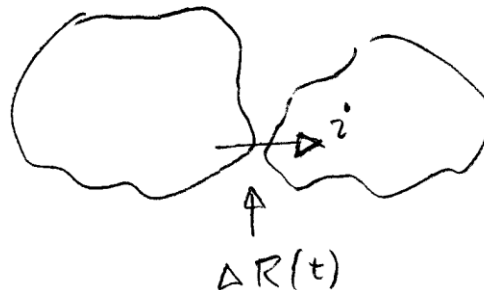
Šum na uporih: Termični šum

- Nadomestno vezje resničnega upora:
 - idealni element (upor) brez šuma
 - z zaporedno vezanim **napetostnim šumnim generatorjem**.
- Mejna frekvenca termičnega šuma je določena z naravno frekvenco elektronov (10^{13} Hz)
- Neodvisen od frekvence → po analogiji z lastnostmi bele svetlobe → **beli šum** (ang. white noise)



Šum na uporih: Tokovni šum

- Tokovni šum (current, excess noise) → nastane zaradi naključnega spreminjanja kontaktnih upornosti $\Delta R(t)$ med zrni materiala.
- Zaradi frekvenčnega poteka spada pod $1/f$ šum (pink noise)
- To povzroči naključne spremembe toka pri konstantni pritisnjeni napetosti (šum).



- Spremembe kontaktnih upornosti $\Delta R(t)$ med zrni materiala (grafitna zrna pri CF uporih, polikristali kovine pri MF uporih). Spremembe upornosti opišemo z RMS vrednostmi.

Šum na uporih: tokovni šum

- Tokovni šum opišemo s pomočjo efektivne vrednosti sprememb kontaktnih upornosti
- Enačbo delimo z zvezo po Ohmovem zakonu, dobimo zapis v relativni obliki

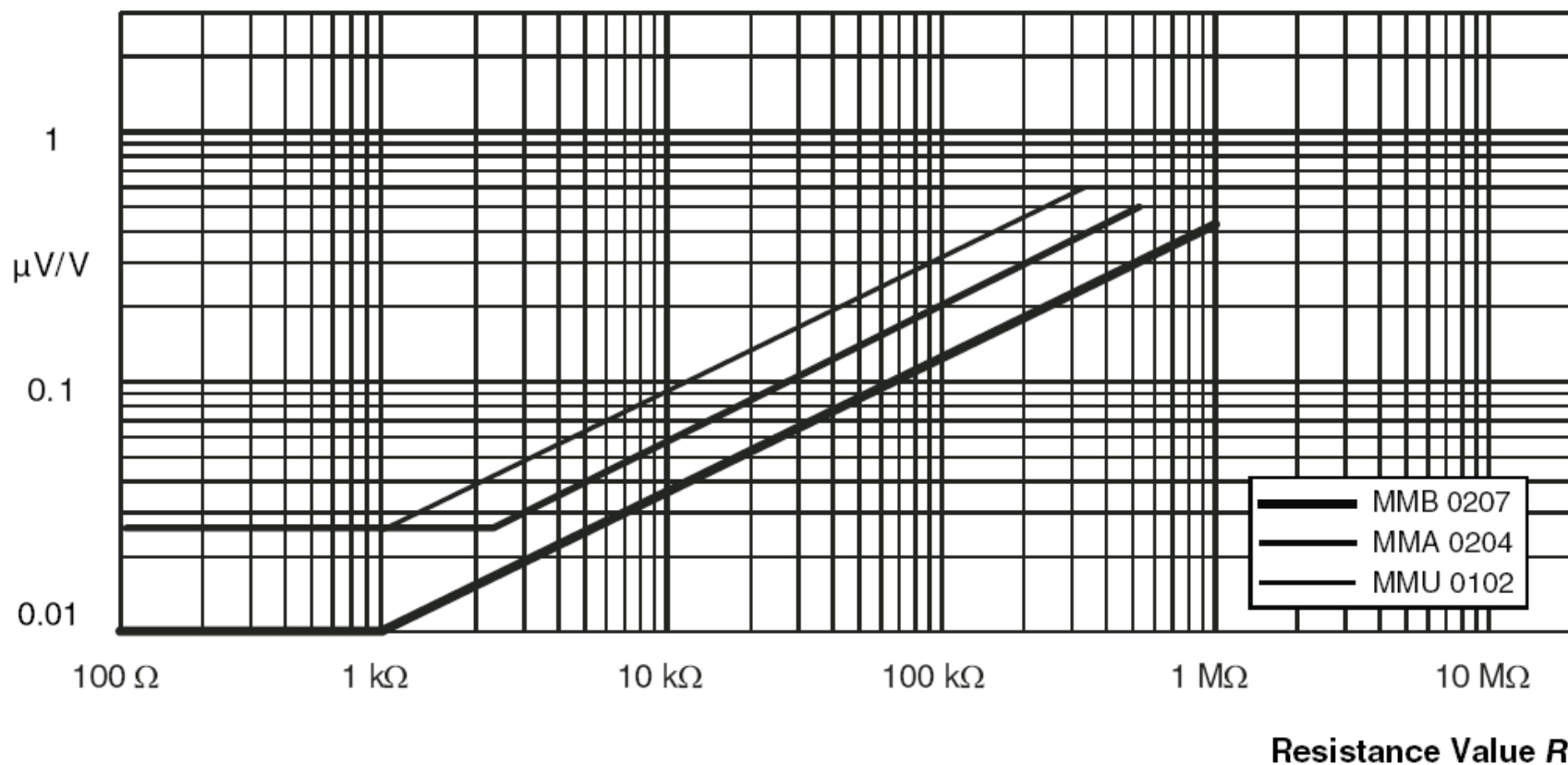
$$\sqrt{\overline{v_n^2}} = \sqrt{\overline{\Delta R_n^2}} \cdot I \qquad \frac{\sqrt{\overline{v_n^2}}}{V} = \frac{\sqrt{\overline{\Delta R_n^2}}}{R}$$

Relativne spremembe upornosti oz. napetosti na uporu so pri tokovnem šumu enake ne glede na tok upora. Tokovni šum običajno podajajo z relativno spremembo napetosti [$\mu\text{V}/\text{V}$] oz. z relativno spremembo upornosti [$\mu\Omega/\Omega$].

Velikost tokovnega šuma

- Tokovni šum je odvisen od strukture in tehnologije upora. Pri dobri tehnologiji je tokovni šum za:
 - CF upore reda nekaj $\mu\Omega/\Omega$ oz. $\mu V/V$, na frekvenčno dekada.
 - Pri metalnih uporih je tokovni šum vsaj za red velikosti manjši
- Za širše frekvenčno področje seštejemo prispevke po dekadah - množimo podatek ene dekade s številom dekad.

Velikost tokovnega šuma



<http://www.vishay.com/docs/28714/melfpre.pdf>

Šum pri drugih elektronskih elementih

- Največ prispevajo upori in aktivni elementi,
- Šumni prispevek
 - kondenzatorjev,
 - tuljav in
 - izvorovje zanemarljiv

Šum na aktivnih elementih

- Velik prispevek k celotnemu šumu vezja
- Prevladujoč je $1/f$ (flicker) šum, obstaja zrnati šum (shot noise)
- Obravnavo šuma vezja običajno izvedemo s pomočjo šumnih nadomestnih vezij:
 - z idealnim elementom brez šuma in
 - šumnimi generatorji.
- Šumni signali so vedno **majhni signali** (reda μV) zato pri obravnavi šuma lahko uporabimo linearna **nadomestna vezja** aktivnih elementov **za majhne signale v delovni točki.**

Zrnati šum (shot noise)

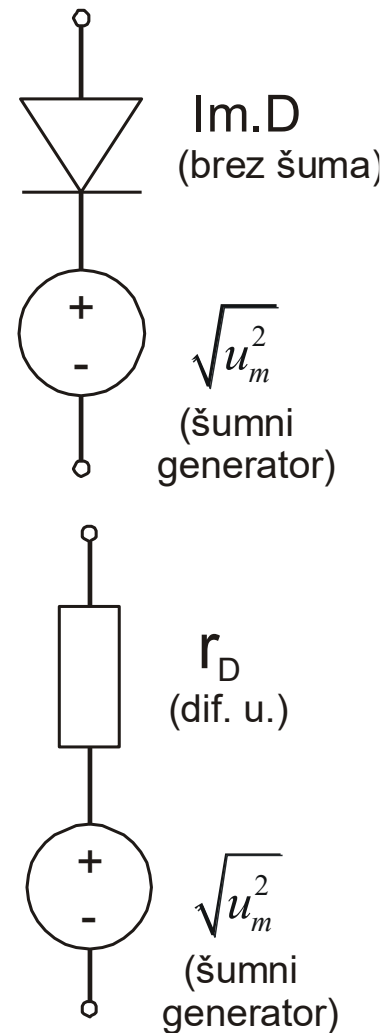
- **Zrnati šum** (shot noise) se pojavi, kadar morajo elektroni v komponenti premagati potencialno bariero z lastno kinetično energijo
- Kinetična energija je porazdeljena med elektrone naključno, velja to tudi za prehode elektronov in zato tudi električni tok šumi.
- Zrnati šum srečamo v elementih, ki krmilijo tok z višino potencialne bariere (MOS, BJT).

Šumno nadomestno vezje diode

- Diodo s šumom nadomestimo z:
 - idealno diodo brez šuma in
 - ustreznim šumnim generatorjem:

$$i_n = 2 \cdot q \cdot I_D \cdot \Delta f$$

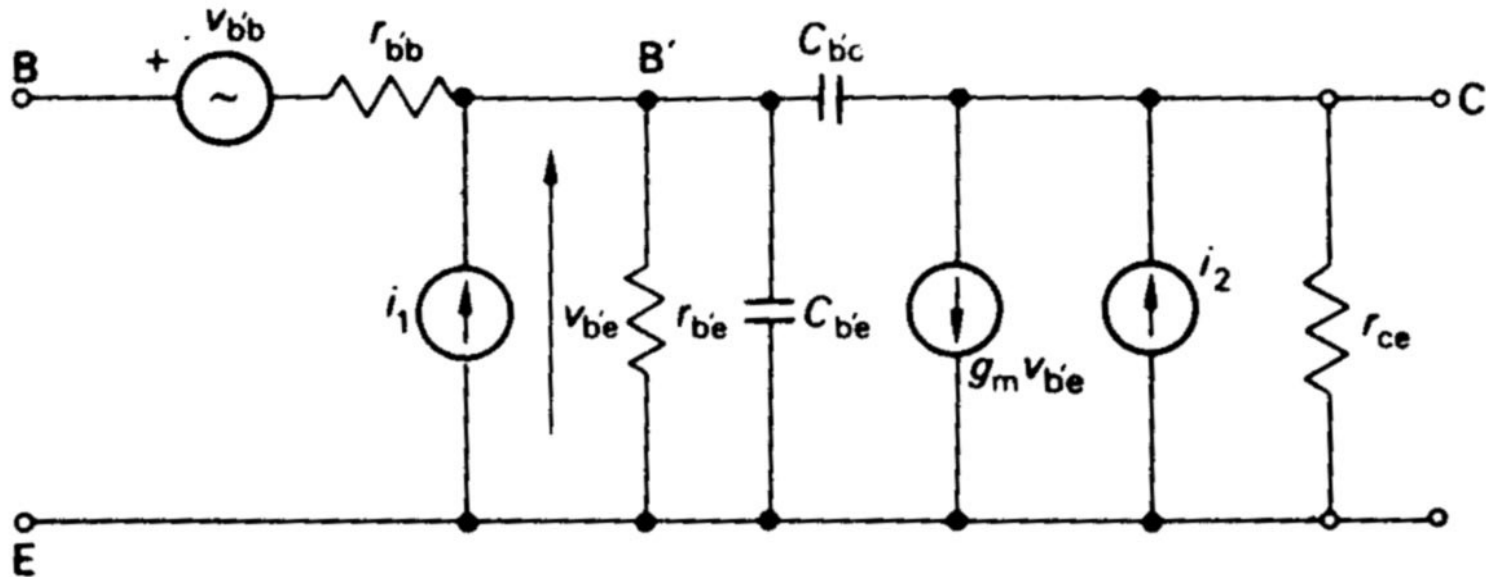
Diodo nadomestimo z nadomestnim vezjem diode za majhne signale (z njeno diferencialno upornostjo r_D)



Šumno nadomestno vezje BJT

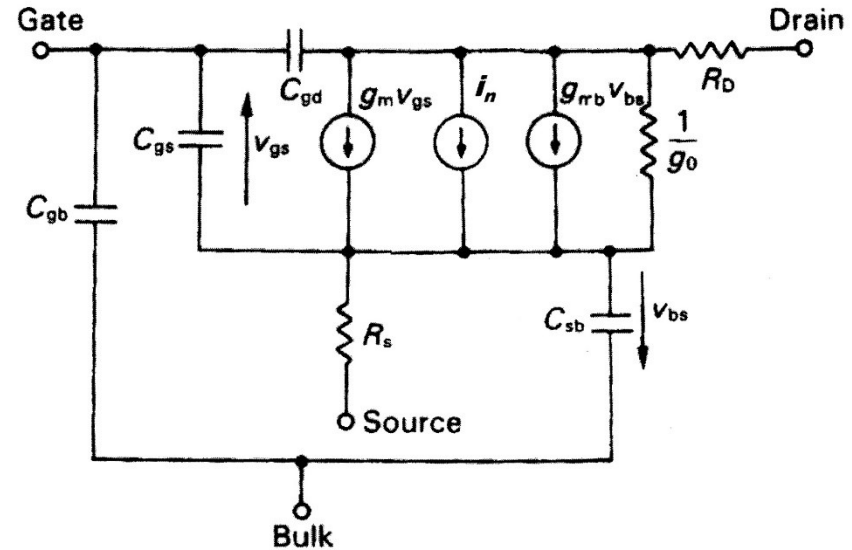
- Dodamo prispevka zrnatega (shot) šuma
 - v BE vejo → šumni generator i_1
 - v CE vejo → šumni generator i_2

$$i_1 = 2 \cdot q \cdot I_B \cdot \Delta f \qquad i_2 = 2 \cdot q \cdot I_C \cdot \Delta f$$



Šumno nadomestno vezje MOS

- Pri MOS tranzistorju dodamo med ponor (D) in izvor(S) šumni generator i_n , sestavljen iz prispevka:
 - termičnega in
 - (1/f) šuma.



Zaradi **nekoreliranosti** izvorov šumov seštevamo kvadrate RMS toka šumnih generatorjev:

$$\overline{i_n^2} = \overline{i_{nth}^2} + \overline{i_{nfl}^2} =$$

$$\overline{i_n^2} = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_{ch}} + \frac{2 \cdot K_f \cdot I_{DS}}{L^2} \ln \left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)$$

Določitev šuma v vezju

- Elemente nadomestimo z ustreznimi šumnimi nadomestnimi vezji (nadomestnimi vezji za idealne elemente pri majhnih signalih in šumnimi generatorji), kar vodi do linearnih vezij v delovni točki.
- Z metodo superpozicije določimo trenutno šumno napetost $v_{nx}(t)$ v izbrani točki vezja "x", v kateri želimo določiti vrednost šuma.
- Šumne generatorje obravnavamo kot običajne generatorje, katerih časovna odvisnost $v_n(t)$ je v celoti poznana.
- Rezultat je šumna napetost v izbrani točki vezja $v_{nx}(t)$, ki je zaradi linearnosti problema (superpozicija) linearno odvisna od vseh prisotnih šumnih generatorjev:

$$v_n(t) \Big|_x = a_1 v_{n1}(t) + a_2 v_{n2}(t) + \dots$$

Pozor: **S časovnim rezultatom si ne moremo pomagati!**

Določitev šuma v vezju

$$v_n(t) \Big|_x = a_1 \cdot v_{n1}(t) + a_2 \cdot v_{n2}(t) + \dots$$

- Izraz $v_n(t)$ kvadriramo
- Povprečimo (mean): mešani členi $v_{ni}(t) \cdot v_{nj}(t)$ odpadejo (šumni generatorji so nekorelirani)
- Ker so nekorelirani, so integrali za $(i \neq j)$ vsi 0

$$\frac{1}{T} \int_0^T v_{ni}(t) \cdot v_{nj}(t) dt = 0 \quad i \neq j$$

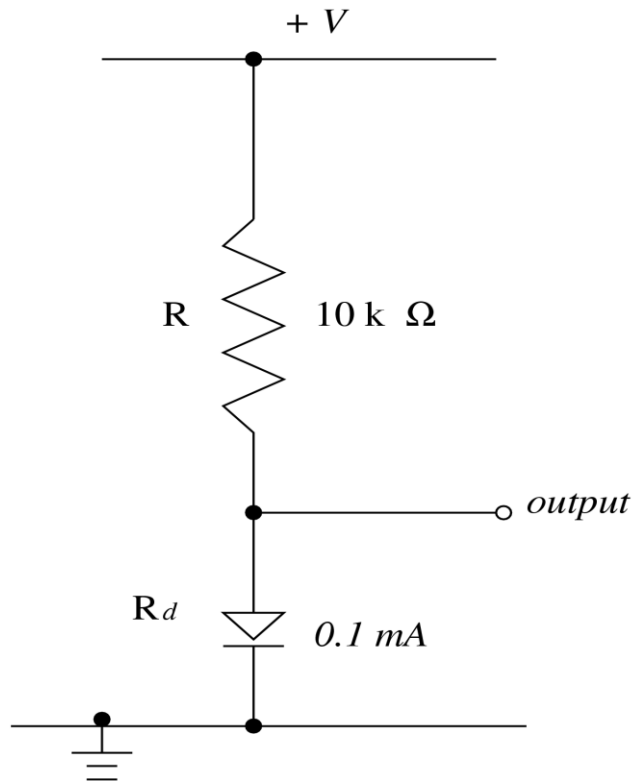
Določitev šuma v vezju

- Členi, različni od 0, so pri indeksih $i=j$: $v_{ni}(t) \cdot v_{ni}(t)$ kar vodi do kvadrata povprečja šumne napetosti.
- Ostanejo kvadrati vrednosti posameznih šumnih generatorjev, uteženi s koeficientom a_i^2

$$\overline{v_n^2} \Big|_x = a_1^2 \cdot \overline{v_{n1}^2} + a_2^2 \cdot \overline{v_{n2}^2} + \dots$$

Primer določitve šuma v vezju

Dioda je vezana zaporedno z uporom $10\text{k}\Omega$. Preko obeh elementov teče tok 0.1 mA . Določite šumno napetost izhoda za pasovno širino 1MHz .



Johnsonov šum na uporu znaša $4RkTB$
za pasovno širino B , $kT=4\cdot 10^{-21}$

$$\begin{aligned}\overline{V_J^2} &= 4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R \\ &= 4 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 10^6 \cdot 10^4 \\ &= 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ V}^2\end{aligned}$$

Primer določitve šuma v vezju

- Na diodi je tokovni generator zrnatega šuma (shot noise), kar na uporu dodatno povzroči šumno napetost:

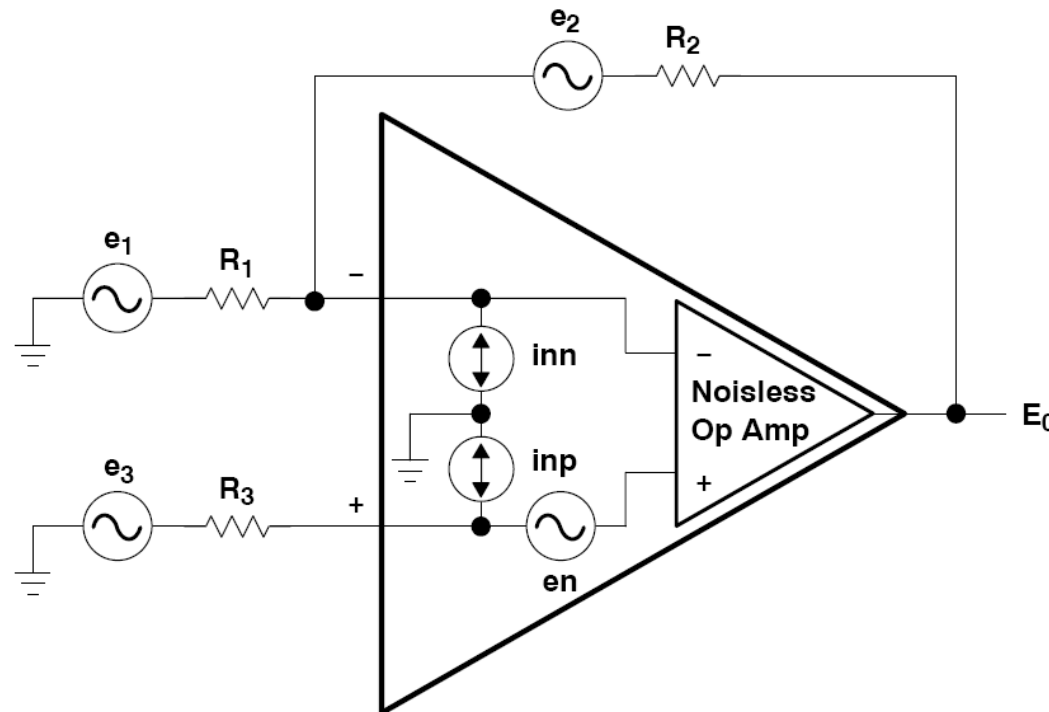
$$\begin{aligned}\overline{V_s^2} &= 2 \cdot q \cdot I \cdot B \cdot R^2 \\ &= 2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 \cdot 10^8 \\ &= 3.2 \cdot 10^{-9} V^2\end{aligned}$$

- RMS vsota obeh prispevkov šuma na izhodu je:

$$\begin{aligned}\overline{V_{out}^2} &= \overline{V_s^2} + \overline{V_j^2} = 3.2 \cdot 10^{-9} V^2 + 0.16 \cdot 10^{-9} V^2 \approx 3.4 \cdot 10^{-9} V^2 \\ V_{out} &= \sqrt{3.4 \cdot 10^{-9} V^2} = 5.9 \cdot 10^{-5} V\end{aligned}$$

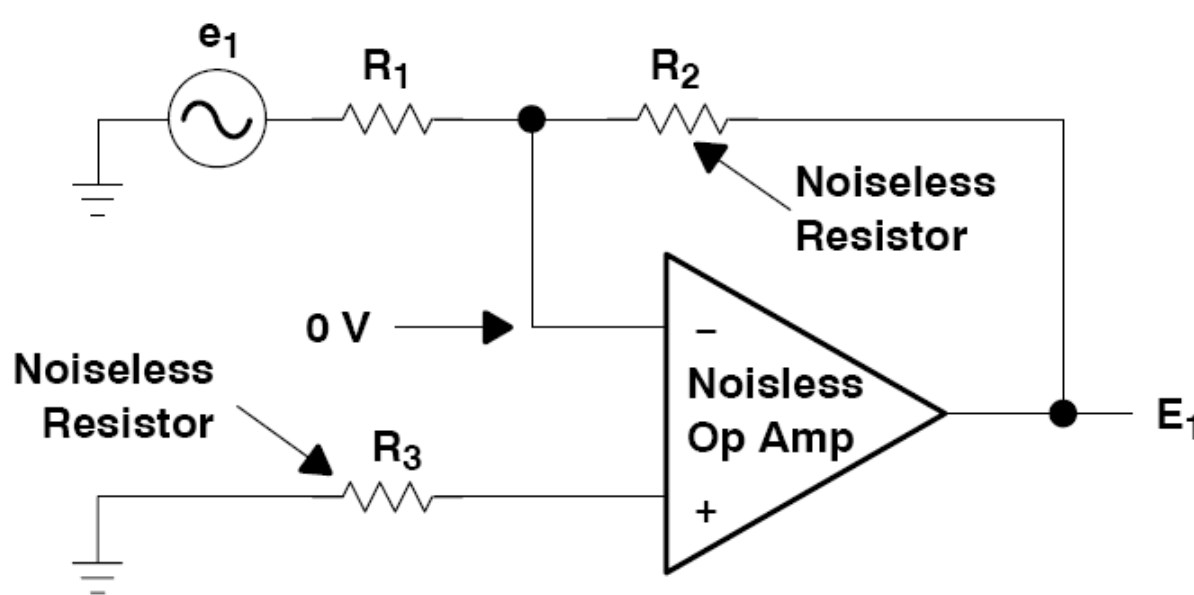
Primer določitve šuma v vezju

- Aktivne elemente nadomestimo s šumnimi modeli proizvajalca
- Vhod vezja vežemo na 0V (signal = 0)



Primer določitve šuma v vezju

- Po principu superpozicije, izoliramo vsakega od šumnih virov – ostale elemente jemljemo kot idealne (brez šuma).

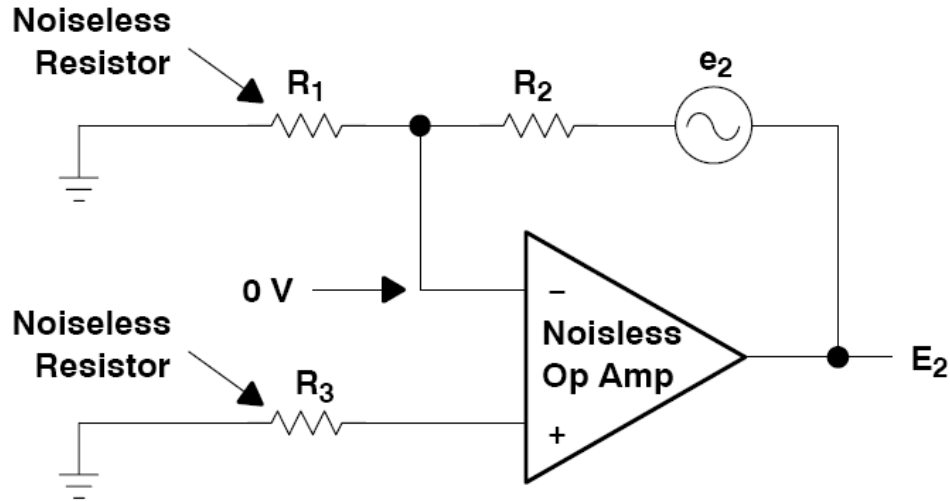


$$\overline{E_1} = \overline{e_1} \frac{R_2}{R_1}$$

$$\overline{E_1}^2 = \overline{e_1}^2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

$$\overline{e_1}^2 = \int 4kTR_1 df$$

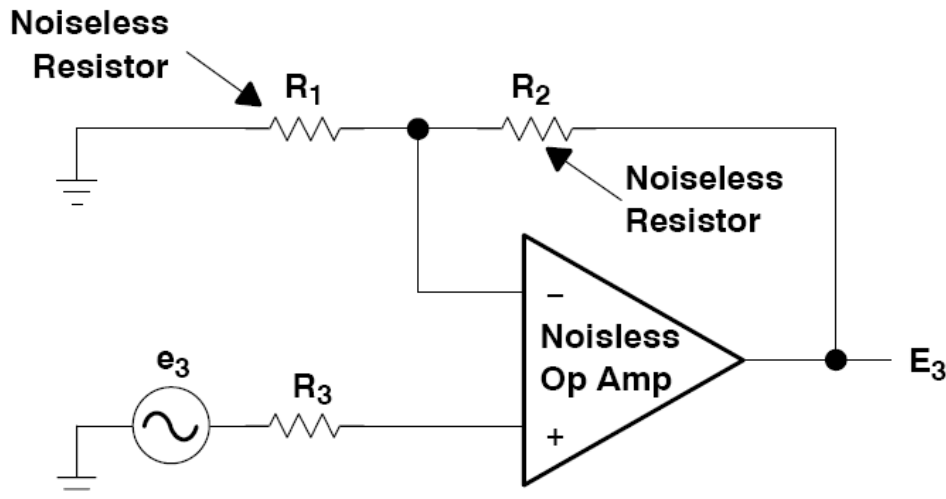
Primer določitve šuma v vezju



$$\overline{E_2} = \overline{e_2}$$

$$\overline{E_2}^2 = \overline{e_2}^2$$

$$\overline{e_2}^2 = \int 4kTR_2 df$$



$$\overline{E_3} = \overline{e_3} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

$$\overline{E_3}^2 = \overline{e_3}^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2$$

$$\overline{e_3}^2 = \int 4kTR_3 df$$

Primer določitve šuma v vezju

- Kvadrat izhodne šumne napetosti (E_{Rrms}) dobimo kot vsoto kvadratov posameznih prispevkov šumnih generatorjev (superpozicija)

$$E_{Rrms} = \sqrt{\overline{E}_1^2 + \overline{E}_2^2 + \overline{E}_3^2}$$

- Vstavimo prispevke šumnih generatorjev (termični šum) in izrazimo:

$$E_{Rrms} = \sqrt{\int \left[4kTR_1 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 + 4kTR_2 + 4kTR_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right] df}$$

Primer določitve šuma v vezju

- Izraz velja za izhodno šumno napetost ob predpostavki **idealnega** operacijskega ojačevalnika
- Izhodno šumno napetost preračunamo na vhod preko ojačenja ojačevalnika:

$$A_n = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

$$E_{iRms}^2 = \left(\frac{E_{Rrms}}{A_n} \right)^2 = \int \frac{\left[4kTR_2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) + 4kTR_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right] df}{\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2}$$

Primer določitve šuma v vezju

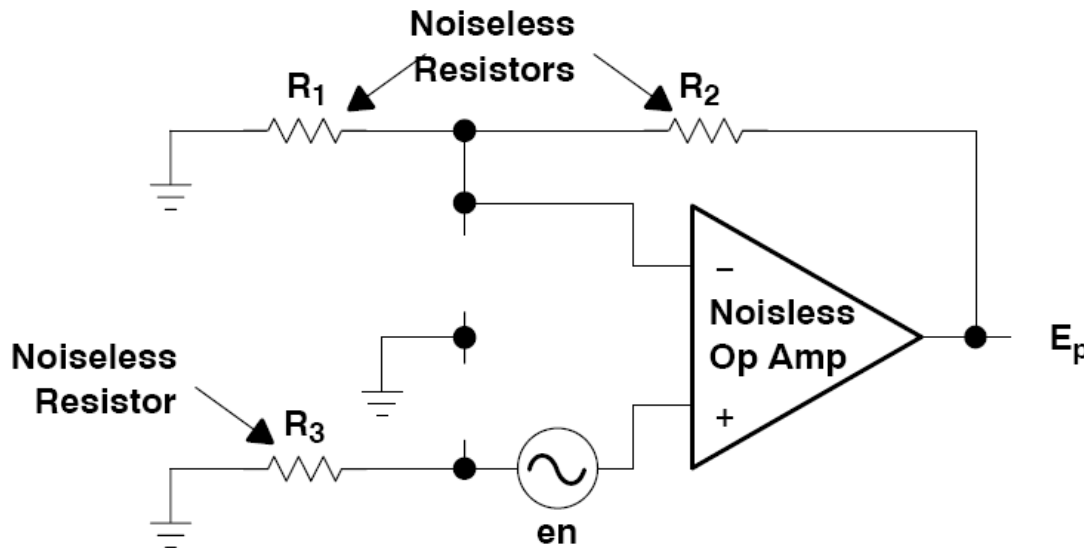
$$E_{iRrms}^2 = \left(\frac{E_{Rrms}}{A_n} \right)^2 = \int \frac{\left[4kTR_2 \left(\frac{R_1+R_2}{R_1} \right) + 4kTR_3 \left(\frac{R_1+R_2}{R_1} \right)^2 \right] df}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1} \right)^2}$$

$$E_{iRrms}^2 = \int 4kT \left[\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) + R_3 \right] df \quad \Rightarrow \quad E_{iRrms} = \sqrt{\int 8kTR_3 df}$$
$$R_3 = \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

R3 običajno izberemo tako, da je enak nadomestni upornosti vzporedne vezave R1 in R2.

Primer določitve šuma v vezju

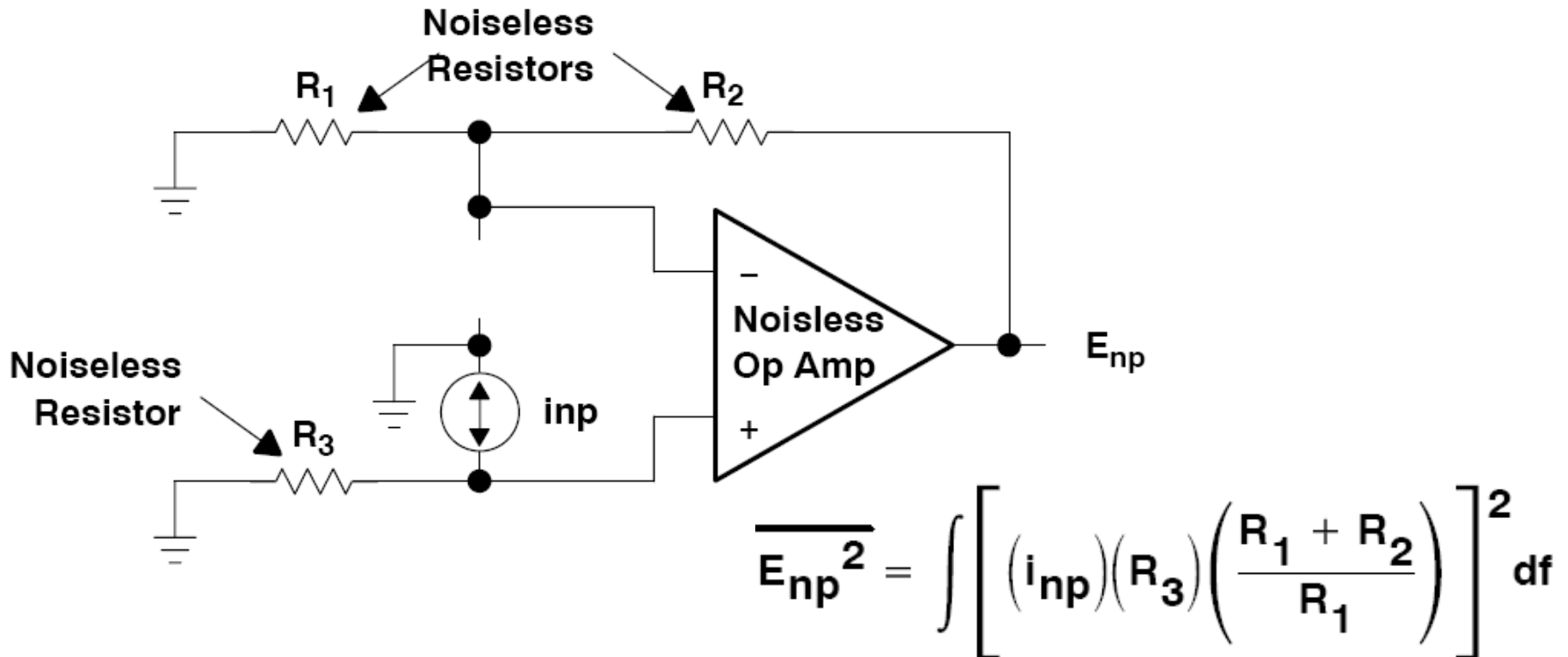
- V vezju predstavimo izračunani prispevek uporov z napetostnim generatorjem $E_{iR_{rms}}$



$$\overline{E_n^2} = \int \left[(en) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right]^2 df$$

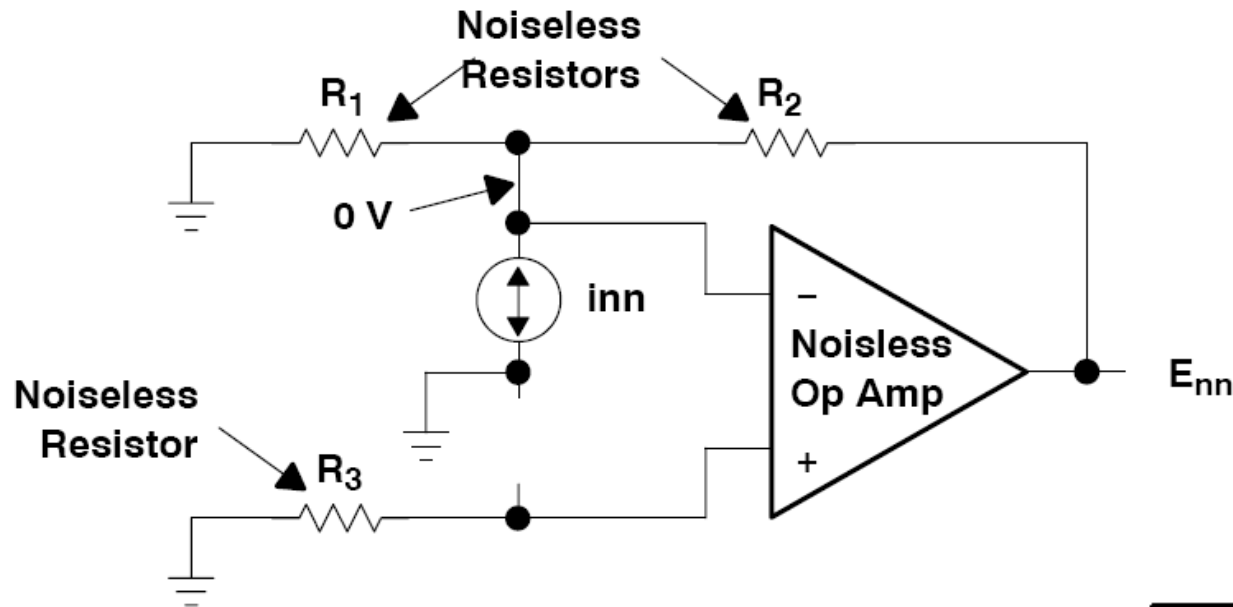
Primer določitve šuma v vezju

- Operacijski ojačevalnik ima s strani proizvajalca podan tokovni šum na vhodu
- Izračunamo šum za neinvertirajoč vhod OPA



Primer določitve šuma v vezju

- Izračunamo šum na invertirajočem vhodu OPA



$$\overline{E_{nn}^2} = \int \left[(i_{nn})(R_2) \right]^2 df$$

Primer določitve šuma v vezju

- Kvadrat izhodne šumne napetosti (E_{OArms}) dobimo kot vsoto kvadratov posameznih prispevkov šumnih generatorjev OPA (superpozicija)

$$E_{oarms} = \sqrt{\overline{E}_n^2 + \overline{E}_{np}^2 + \overline{E}_{nn}^2}$$

- Vstavimo prispevke šumnih generatorjev OPA (kombinacija zrnatega, termičnega in 1/f šuma) in izrazimo:

$$E_{oarms} = \sqrt{\int \left[\left(i_{nn}(R_2) \right)^2 + \left((i_{np})R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 + \left(e_n \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 \right] df}$$

Primer določitve šuma v vezju

- Prispevka šuma uporov in šuma na vhodu OPA RMS seštejemo in dobimo:

$$E_{Trms} = \sqrt{\int \left[4kTR_2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) + 4kTR_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + (i_{nn}R_2)^2 + \left((i_{np})R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 + \left(e_n \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right)^2 \right] df}$$

- Ostane "samo še" izračun integrala preko frekvenčnega obsega vezja:
 - prva dva člena (upori) sta frekvenčno neodvisna (beli šum)
 - zadnji trije členi predstavljajo kombinacijo zrnatega, termičnega in 1/f šuma, kar pomeni, da jih frekvenčno obravnavamo kot beli šum (termični) in 1/f šum

Spekter šuma

- Če opazujemo spekter signala bo izmenični vir sinusne oblike dajal moč samo pri eni (svoji) frekvenci.
- Šumni generator bo razdeljen po celotnem frekvenčnem spektru. Podatke o šumu zato srečamo v obliki "gostote moči šuma" (ang. noise power density)
- Če gre za beli šum je "gostota moči šuma" konstantna preko celotnega frekvenčnega področja.
- Če gre za frekvenčno odvisen šum ($1/f$ šum, ang. flicker noise) dobi "gostota moči šuma" smiselno vrednost. Šum zato srečamo podan v enotah " nV/\sqrt{Hz} "

$$\overline{e^2} / Hz \quad \text{"gostota moči šuma"}$$

$$\overline{e^2} = \int (K_e^2 / f) df \quad \text{"gostota moči } 1/f \text{ šuma" } \rightarrow \text{Napetost}$$

$$\overline{i^2} = \int (K_i^2 / f) df \quad \text{"gostota moči } 1/f \text{ šuma" } \rightarrow \text{Tok}$$

Spekter šuma

- V resničnih vezjih nimamo opravka z neomejeno pasovno širino, ampak imamo običajno spodnjo (f_L) in zgornjo frekvenčno mejo (f_H) delovanja (primer OPA).

$$\overline{e^2} = \int_{f_L}^{f_H} C df = C (f_H - f_L) \quad \text{šumna moč belega šuma}$$

$$\overline{e^2} = \int_{f_L}^{f_H} \frac{K^2}{f} df = K^2 \ln \frac{f_H}{f_L} \quad \text{šumna moč } 1/f \text{ šuma}$$

Šumna mejna frekvenca

- Vhodni šum operacijskega ojačevalnika vsebuje beli šum (termični, zrnati) kot tudi flicker ($1/f$) šum
- Točki frekvenčnega spektra OPA, kjer **beli šum postane enak $1/f$ šumu** pravimo **šumna mejna frekvenca** (ang. noise corner frequency) f_{nc} . Tam velja:

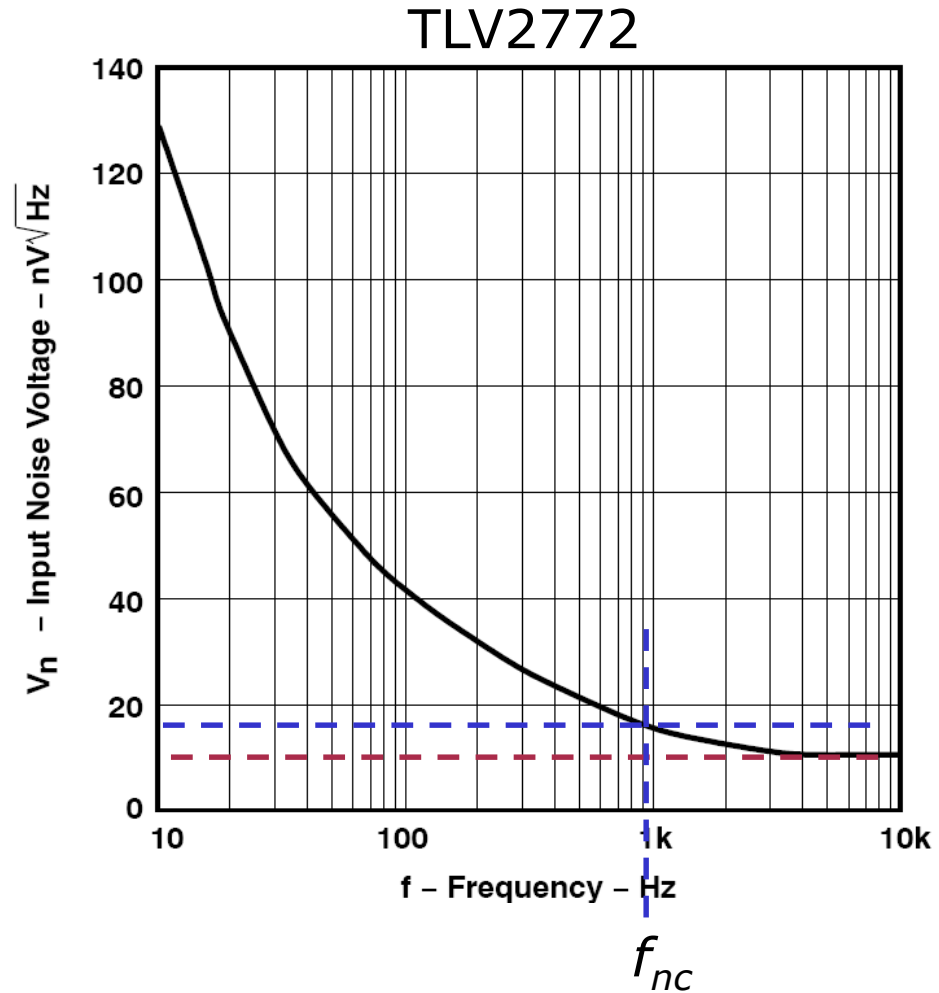
$$\frac{K^2}{f_{NC}} = C$$

- Celoten šum vhoda OPA lahko predstavimo kot:

$$\overline{E^2} = C \left(f_{nc} \ln \frac{f_H}{f_L} + f_H - f_L \right)$$

Določanje šumne mejne frekvence

- Grafično iz grafa vhodnega šuma OPA:
- Pri f_{nc} sta beli in $1/f$ šum enaka, torej bo f_{nc} kjer se graf vhodnega šuma seka z $\sqrt{2}$ * podatkom o belem šumu.
- Beli šum ocenimo iz grafa ob izteku karakteristike (ca. $12 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
- Mejna frekvenco določimo iz grafa, kjer krivulja seka nivo $\sqrt{2} * 12 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} = 17 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Iz grafa razberemo $f_{nc} \approx 1 \text{ kHz}$



Določanje šumne mejne frekvence

- Analitično določanje šumne mejne frekvence preko izračuna komponente $1/f$ šuma preko izračuna K^2 iz podatka o:
 - ekvivalentnem vhodnem šumu (ang. equivalent input noise voltage) pri najnižji podani frekvenci (f_{EINV}), ki je v $1/f$ območju. Za TLV2772 je $130 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ $f_{EINV}=10\text{Hz}$.
 - belem šumu (Za TLV2772 je $12 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$).
 - pasovne širine (je kar enaka f_{EINV})

$$K^2 = \left[(130 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 - (12 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 \right] \times (10 \text{ Hz}) = 167560 (\text{nV})^2$$

Da dobimo končni rezultat moramo dobljeno vrednost K deliti s kvadratom belega šuma

$$f_{NC} = \frac{K^2}{C} = \frac{167560 \text{ nV}^2}{144 \frac{\text{nV}^2}{\text{Hz}}} = 1163 \text{ Hz}$$

Razvrstitev uporov

- Delitev glede na osnovne značilnosti in tehnologije:
 - Ohmski (linearni) upori
 - Fiksni upori (plastni, žični, specialni)
 - Nastavljivi upori (potenciometer, trimer)
 - Nelinearni upori (NTC, PTC, VDR, LDR)

Linearni upori

- Idealno so linearni upori, ker je $I(V)$ karakteristika takega upora premica oz. njegova ohmska upornost R konstantna.
- Pri resničnem uporu naj bi bila njegova ohmska upornost čimbolj neodvisna od zunanjih vplivov kot so npr. temperatura, priključena napetost, vlaga ...

Nelinearni upori

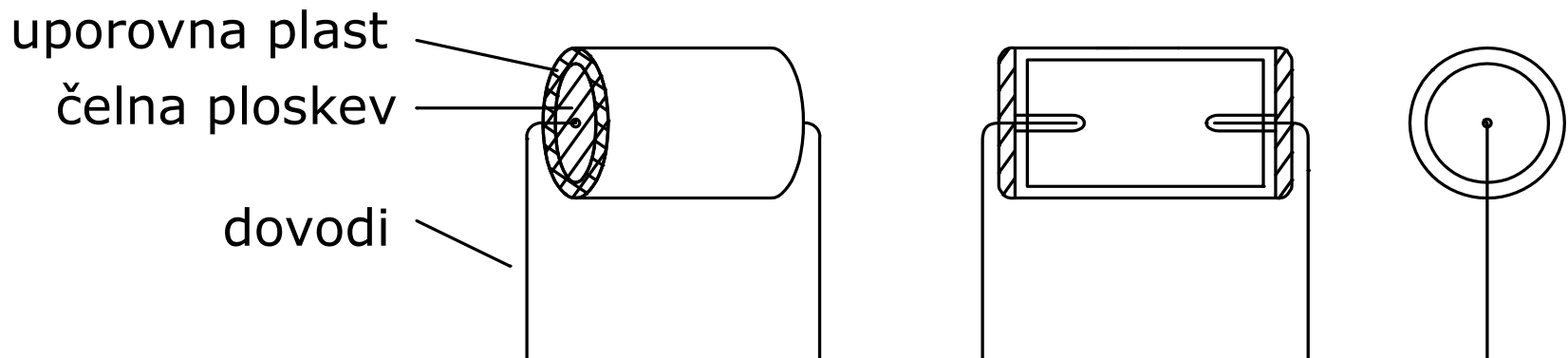
Upornost ni konstantna → odvisna od zunanjega parametra.

Delitev glede na vplivni parameter, ki določa upornost elementa:

- **Temperaturno odvisen upor (termistor)** ($R=R(T)$)
Delitev glede na predznak temperaturnega koeficienta:
 - NTC termistorji (negativni temperaturni koeficient)
 - PTC termistorji (pozitivni temperaturni koeficient)
- **Napetostno odvisen upor (VDR)**
(ang. Voltage Dependent Resistor) → **varistor** ($R=R(U)$)
- **Fotoupor (LDR)**
(ang. Light Dependent Resistor) (jakost osvetlitve elementa)

Plastni upori

- Strukturo plastnega upora:
 - po površini uporabnega telesa (keramični valj - cilindar) je nanesena uporabna plast (cilindar → cilindrični upori),
 - na čelni ploskvi je nanesena metalizacijska plast.
- Delitev glede na material uporabne plasti:
- **CF** (ang. Carbon Film) **ogljenoplastni** upori: uporabna plast je iz zrn ogljika.
- **MF** (ang. Metal Film) **metalplastni** upori: uporabna plast je tanka plast kovine:
 - niklja s primesmi fosforja Ni(P) ali
 - legura niklja in kroma NiCr (nichrome)



Tehnologija izdelave plastičnih uporov

Koraki izdelave plastičnih uporov v grobem:

1. Priprava keramičnih teles uporov:
 1. Izhodiščni material
 2. Začetna obdelava keramičnih valjev
 3. Čiščenje pred nanašanjem uporovne plasti
2. Nanašanje uporovne plasti (CF, MF)
3. Predlakiranje
4. Metalizacija čelnih ploskev
5. Spiranje elektrolita in sušenje
6. Vrezovanje vijačnice v uporovno plast (spiralizacija)

Priprava keramičnih teles uporov

Izhodiščni material so valjasta telesa iz kvalitetne, visoko čiste (high-purity grade) keramike. Na čelnih ploskvah so poglobljena z utori, za kasnejše dovodne žice zaradi zanesljivejšega mehanskega kontakta in boljšega termičnega kontakta, saj se znaten del sproščene toplote na obremenjenem uporu odvaja preko dovodov.

Začetna obdelava keramičnih valjev:

- *brušenje valjev* v vrtečih bobnih, z dodanim grobim brusilnim praškom (korund itd.)
- *poliranje valjev* → enako kot brušenje, le da je dodan finejši polirni prašek.
Rezultat → gladka površina, nujna za izdelavo tankih plasti za visokoohmske upore.
- *jedkanje* v 2% fluorovodikovi (HF) kislini
Rezultat → najedkana površina, potrebna za dobro (adhezijo) uporovnih plasti, bistvena pri nanašanju debelih uporovnih plasti in metalizaciji.

Čiščenje pred nanašanjem uporovne plasti:

- *spiranje* v (DI) vodi ($\rho=100\text{k}\Omega\text{...}1\text{M}\Omega$) z ultrazvokom.
- *sušenje* v centrifugi ali tunnelski peči (tekoči trak skozi visokotemperaturni profil).

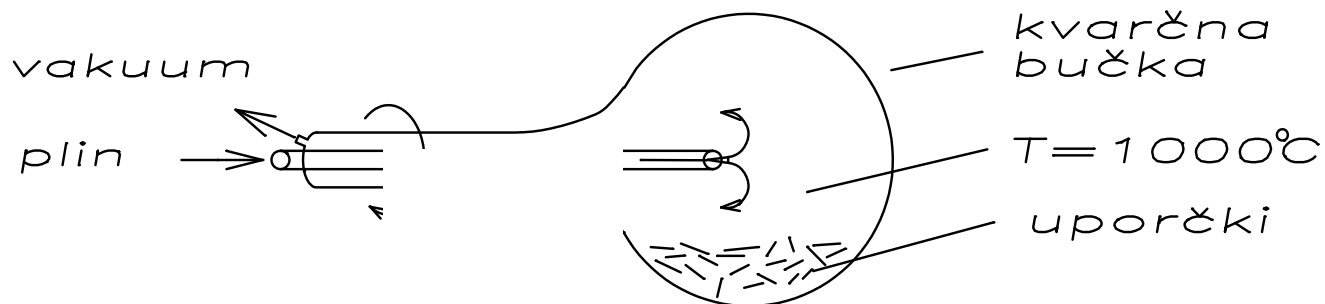
Nanašanje uporovne plasti za CF upore

Nanašanje ogljenih plasti s **pirolizo**
(ang. high temperature pyrolysis)

Piroliza → termični razpad ogljikovodikov (metan, propan @ $T \approx 1000^\circ\text{C}$, $p \approx 0.1 \dots 0.5$ Torr)

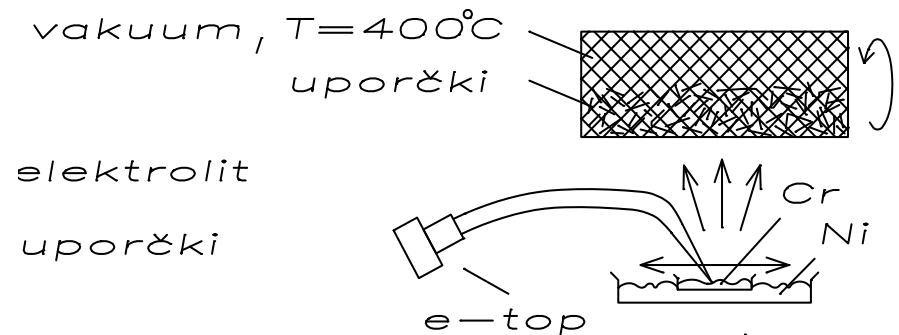
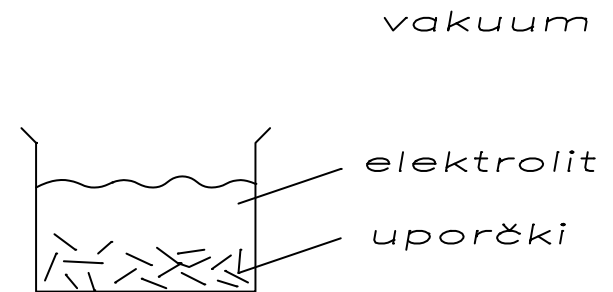


Rezultat → debelina plasti ($d \approx 0.5 \dots 5 \mu\text{m}$) je določena s količino uporov v bobnu, časom depozicije in pretokom plinov.



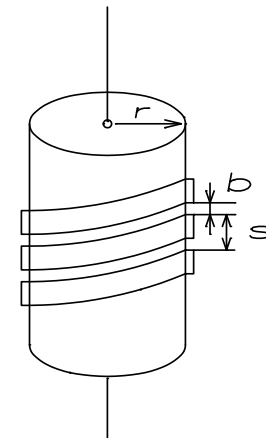
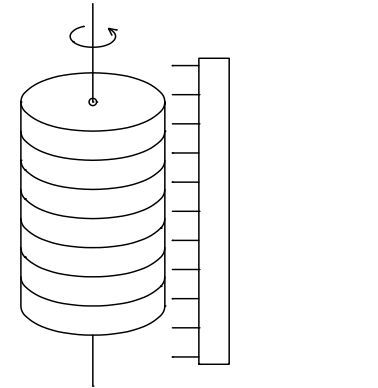
Nanašanje uporovne plasti za MF upore

- *MF plasti za nižje upornosti*
Nanašanje Ni(P) plasti z **breztokovno elektrokemijsko depozicijo**. (electroless plating)
Rezultat → Tanka plast na površini keramičnega telesa, debelina filma je določena s sestavo elektrolita in časom depozicije.
- *MF plasti za višje upornosti*
Nanašanje NiCr plasti z **naprševanjem v vakuumu** 10^{-6} Torr z elektronskim topom na aktivirano površino rotirajočih keramičnih valjčkov.
Rezultat → Debelina filma je določena z močjo na elektronskem topu in časom depozicije.



Tehnologija izdelave plastičnih uporov

5. **Predlakiranje** Ščetka, napojena z lakom, drsi po plašču upora, ki se vrti okrog svoje osi, pri temperaturi 300°C , da se lak na hitro površinsko zasuši. Globinsko sušenje poteka v tunnelski peči na 280°C .
6. **Metalizacija čelnih ploskev** je izvedena z **breztokovno elektrokemijsko depozicijo** bakra in niklja (Cu/Ni).
7. **Spiranje**
8. **Vrezovanje vijačnice (spirale) v uporovno plast (spiralizacija)**
 - Diamantna žaga (do 1000x poveča R_{SH})
 - Laser (do 3000x poveča R_{SH}).



Tehnologija izdelave plastnih uporov

9. Zaključni koraki izdelave plastnih uporov:

- vstavljanje dovodnih žičk
- predtrakiranje
(vpenjanje uporov med para lepilnih trakov)
- čiščenje površine in izboljšava spajkljivosti trak z elementi gre skozi kopel v fluksu
- odebelitev čelne metaliziranih ploskev trak z elementi gre skozi kopel v spajki (Pb/Ag/Sn)
- ultrazvočno čiščenje ostankov fluksa
- električno predtestiranje (P_n , T , t)
- končno lakiranje (električna, mehanska in klima zaščita)
- označevanje upornosti
- končno staranje (P_n , T , t)
- končno 100% testiranje
- končno trakiranje

Lastnosti procesa izdelave plastnih uporov

- Maksimalna R_{SH} CF $\approx 10 \text{ k}\Omega$,
- Maksimalna R_{SH} MF-NiCr $\approx 1.3 \text{ k}\Omega$
(brez spiralizacije \rightarrow maksimalne upornosti za VF upore)
- Spiralizacija daje najvišje upornosti MF-NiCr plast, rezkana z laserjem (do $1 \text{ M}\Omega$).
- TK_R je odvisen od:
 - strukture keramike in podrobnosti obdelave površin in
 - razmer ob nanašanju uporovne plasti (vlaga, ambient).

Klasifikacija v razrede glede na izmerjeni TK_R se vrši po končanem procesu.

Lastnosti procesa izdelave plastnih uporov

- Staranje pri MF uporih **ne spreminja** lastnosti elementa:
Pri procesu staranja se površina prevleče s stabilnim oksidom, ki dodatno ščiti upor pred vplivi okolice (CrO_2 pri NiCr).
- Staranje je pri CF uporih **spreminja** lastnosti elementa:
med staranjem poteka oksidacija uporovne plasti:
$$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$$

 CO_2 difundira skozi zaščitni lak in posledica je izparevanje uporovne plasti. Ta proces se odvija tudi med delovanjem upora.
- CF uporov ne moremo uspešno pospešeno starati na povišani temperaturi, ker se med delovanjem uporovna plast počasi tanjša \rightarrow $R(t)$ narašča \rightarrow element ni stabilen.
Efekt je izrazitejši pri visokoohmskih uporih.

Primerjava CF:MF plastnih uporov

CF:

R_n : 1Ω ... 10MΩ

Lestvice: 5% (E24) 2% (E48) (**srednje**)

T_{max} : 155°C (**nizko**)

P_n : .2W .33W .5W .75W 1W 1.5 W **2W**

V_L : 150V 250V 350V 450V 500V 650V **1kV**

Šum: odvisen od velikosti upornosti in kvalitete tehnologije:

10 Ω	→ 0.1 μV/V
10 kΩ	→ 0.2 μV/V
1 MΩ	→ 1 μV/V

TK_R **negativen**, raste z R_n :

R_n	TK_R
27 Ω ... 100 kΩ	-150 ... -600 ppm/°C
> 100 kΩ	-200 ... -800 ppm/°C

Obremenitve za upornost reda $R_n \approx 10 \text{ k}\Omega$.

Električna obremenitev:	$\Delta R/R = +1\%$
Temperaturna obremenitev:	$\Delta R/R = +1\%$
Obremenitev z vlago:	$\Delta R/R = +0.7\%$

MF:

R_n : 0.22 Ω ... 22MΩ

Lestvice: 5%(E24) 2%(E48) 1%(E96)
0.5%(E192) (**MF natančnejši kot CF**)

T_{max} : 175°C (**večje P_n za iste dimenzije**)

P_n : 0.33 W 0.50 W 0.75 W 1 W **1.5 W**

V_L : 250V 350V 500V **650V**

Šum : odvisen od velikosti upornosti, **nižji kot pri CF uporih!**

< 50kΩ	→ < 0.1 μV/V
< 500kΩ	→ < 0.3 μV/V
> 500kΩ	→ < 0.5 μV/V

TK_R (predznak ±), raste z R_n (**boljši kot CF**)

R_n	TK_R
≤ 100 kΩ	-100 ... +100 *ppm/°C
> 100 kΩ	-250 ... +250 *ppm/°C

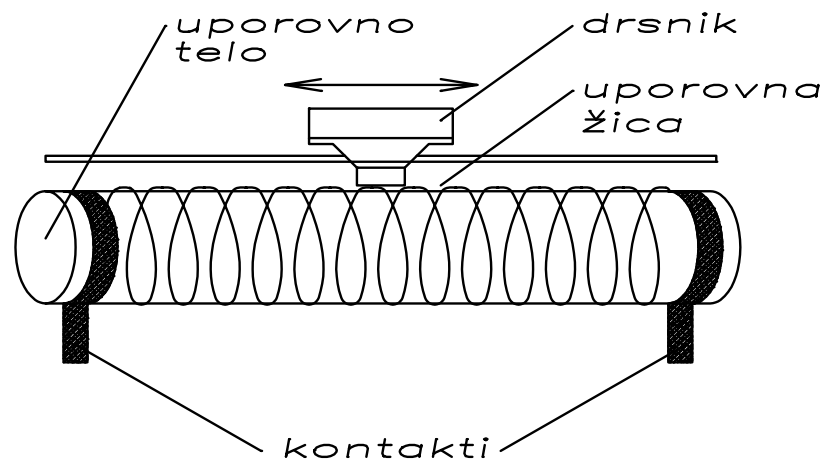
Obremenitve za upornosti reda $R_n \approx 10 \text{ k}\Omega$

Električna obremenitev:	$\Delta R/R = +0.15\%$
Temperaturna obremenitev:	$\Delta R/R = +0.2\%$
Obremenitev z vlago:	$\Delta R/R = +0.3\%$

So stabilnejši od CF uporov

Žični upori

Na keramično uporovno telo, običajno cilindrične ali kvadraste geometrije, je navita uporovna žica. Upor je zaščiten proti vplivom okolice s kvalitetnim, visokoodpornim površinskim premazom (zastekljeno, emajlirano, cementirano itd.). Včasih so ovoji uporovne žice delno odkriti, da jih lahko kontaktiramo z drsnikom (nastavljiv upor)



Lastnosti žičnih uporov

So določene z lastnostmi uporovnega materiala žice.

Material	ρ [Ω mm ² /m]	TK _R [ppm/K]	T _{max} [°C]	Lastnost
NiCr	1	+100 ... +200	1000	NiCr omogoča veliko disipacijo moči
manganin	0.5	+8	200	referenčni upori
konstantan	0.5	-5	500	referenčni upori

- Slabosti: (dragi, zahtevni za izdelavo, velike dimenzije, slabe VF lastnosti)
- Prednosti: (večja točnost, stabilnost, nižji TK_R, višje temperature/moči in nizek šum od plastnih).
- Zaradi nizke T_{MAX} manganina (oksidacija) raje uporabljamo **konstantan** (imena: Eureka, Advance and Ferry)

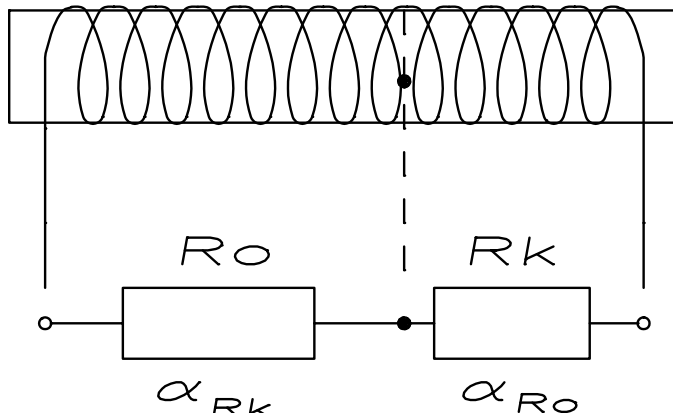
Temperaturna kompenzacija žičnih uporov

Pri temperaturno kompenziranih uporih izkoristimo nasprotni predznak TK_R manganina (Cu86/Mn12/Ni2) ($TK_R = +10$ ppm/K) in konstantana (55Cu/45Ni) ($TK_R = -40$ ppm/K) na področju $[-55^\circ\text{C} \dots 155^\circ\text{C}]$

$$R(T) = R_{o20} \cdot (1 + \alpha_{Ro} \cdot \Delta T) + R_{k20} \cdot (1 + \alpha_{Rk} \cdot \Delta T)$$

$$R(T) = (R_{o20} + R_{k20}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{Ro} \cdot R_{o20} + \alpha_{Rk} \cdot R_{k20}}{R_{o20} + R_{k20}} \cdot \Delta T \right) = const$$

osnovni navoj | kompenzacijski navoj



člen $\Delta T = 0$

$$\frac{R_{k20}}{R_{o20}} = - \frac{TK_{Ro}}{TK_{Rk}}$$

TC_R ppm/K različnih uporovnih materialov

Temperaturno območje	- 55 ... +25 °C	0 ... +25 °C	+25 ... +60 °C	+25 ... +125 °C
Manganin	+ 50	+ 10	- 5	- 80
Zeranin	+ 20	± 2.5	± 5.0	+ 10
Evanohm	+ 5.0	+ 2.5	- 2.5	- 5.0
Tanke plasti	- 10	- 5.0	+ 5.0	+ 10
Debele plasti	- 100	- 25	+ 50	+ 100

VIR: [Vishay](#)

Pregled žičnih uporov

Precizni žični upori

R_n : 1 Ω ... 57 k Ω

Lestvice: 0.5% 0.25% in manj

T_{max} : odvisno od materiala,
(višja kot pri CF in MF)

P_n : 0.4 W ... 1.8 W

TK_R : < ppm/K (zelo majhen)

Električna obremenitev
 $\Delta R/R < 0.25\%$

Obremenitev z vlago
 $\Delta R/R < 0.25\%$

Nizkoohmski žični upori

R_n : 0.1 Ω ... 10 Ω

Lestvice: 10%

T_{max} : odvisno od materiala,
(višja kot pri CF in MF)

P_n : 1 W ... 2 W

TK_R : -50 ... +150 [ppm/K]

Pregled žičnih uporov

Močnostni žični upori

R_n : srednje moči (1 ... 10W):
5 Ω ... 27 k Ω (cementirani)
5 Ω ... 100 k Ω (emajlirani)
večje moči (10 ... 250W):
1 Ω ... 11 k Ω (cementirani)
60 Ω ... 120 k Ω (emajlirani)

Lestvice: 10%, 5%

T_{\max} : 400 °C

TK_R : -50 ... +160 [ppm/K]

Metal Electrode Leadless Face upori

- Tehnološki koraki izdelave SMD upora so podobni CF in MF uporih,
- Razlika: SMD kontakti so izvedeni cilindrično z vtisnjenimi kovinskimi kopicami. Od tod ime MELF (*Metal Electrode Leadless Face*).
- Upore srečamo v obeh plastnih izvedbah: CF in MF

R_n : 10 Ω ... 1 M Ω

$P_n @ (T_A = 70^\circ\text{C})$: 1/4 W

V_L : 250 V

VRSTA UPORA	TOLERANCE	DEGRADACIJA	$TK_R [10^{-6}/^\circ\text{C}]$
CF	5% (rjavi)	< 2%	-250 ... -800
MF	1% (zeleni)	< 1%	-100 ... +100



Kvadrasti SMD upori

- Tehnološki koraki izdelave SMD upora so podobni CF in MF uporih,
- Razlika: Notranja metalizacija in uporovna plast izdelani s **postopkom tiskanja**, zunanja metalizacija pa enako kot v prejšnem primeru **vtisnjene kovinske kapice**.

R_n :	1 Ω ... 10 M Ω jumper (0 Ω) $R < 50\text{m}\Omega$ @(I < 2A)
Lestvica:	5% , 2%
P_n @(T _A = 70°C):	1/4 W
V _L :	200 V
$\Delta R/R$:	< 1.5%
TK _R :	< +200 * 10 ⁻⁶ /°C

Integrirani upori

- Hibridna vezja
 - Tankoplastni upori
 - Debeloplastni upori
- Polprevodniška integrirana vezja
 - Polprevodniški upori

Tankoplastni hibridni upori ($d \approx 1\mu\text{m}$)

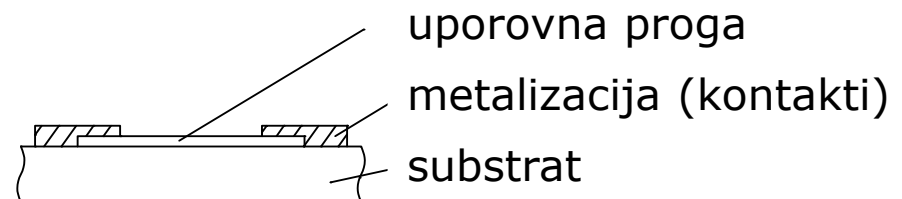
- Na keramičen substrat je nanesena tanka uporovna plast:
- **Nichrome** (NiCr) → Najbolj razširjena vrsta plasti – najmanjši TC_R ($R_{sh} = 50, 100, 200 \Omega/\square$)
- **Tantalov nitrid** (TaN_2) → Neobčutljiv na vlago, električne lastnosti niso tako dobre kot NiCr. Uporablja se pri nizkih močeh ($<20\% P_n$), brez lastnega segrevanja in v okolju visoke vlage (RH=80%).
- **Sichrome** (SiCr) → $R_{sh} = 2000-3000 \Omega/\square$ - visoka upornost na majhnem področju. TC_R , stabilnost sta boljša kot v debeloplastnih tehnologijah.
- Tanelox (Vishay) - združuje prednosti NiCr in TaN_2 , tako da izboljša linearnost TC_R

Nanašanje tankih plasti (PVD)

- **Nanašanje z vakuumsko depozicijo - Physical vapor deposition (PVD):** kondenzacijo uparjene nanašane plasti na substrat (keramika, steklo, rezina Si)
- Metoda nanašanja je vedno **fizikalni** (physical) proces visokotemperaturnega izparevanja v vakuumu s posledično kondenzacijo ali naprševanje (bombardiranje s plazmo) za razliko od **kemijskih reakcij** za nanašanje tankih plasti (chemical vapor deposition CVD)
- Uparjanje lahko dosežemo na različne načine:
 - Z **iskrenjem** (Cathodic Arc PVD) : Iskra, ki se sprazni v tarčo, odnese nekaj materiala v ionizirano paro
 - Z **elektronskim topom** (Electron Beam PVD)
 - S **pulznim laserjem**: ablacija materiala tarče
 - S **plazmo** - naprševanje (Sputter): Z usmerjeno plazmo (koncentrirana z magnetom) odnašamo material, ki se upari in nato deponira na substrat.

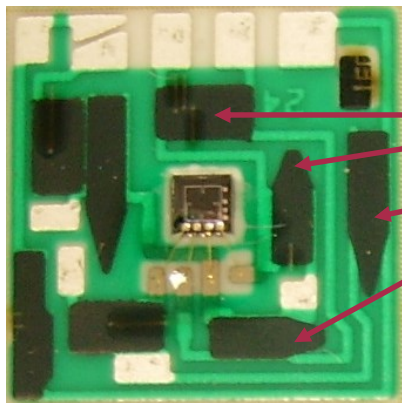
Tankoplastni hibridni upori ($d \approx 10 \text{ nm}-2 \mu\text{m}$)

- Geometrija uporovne proge je izdelana s fotolitografijo:
 - nanos fotorezista,
 - presvetlitev skozi masko,
 - razvijanje - presvetljeni fotorezist se odtopi,
 - **selektivno jedkanje** odkritih površin,
 - odstranitev preostalega fotorezista.
- Nato se isti postopek ponovi z metalizacijo (nanašanje, fotolitografija).



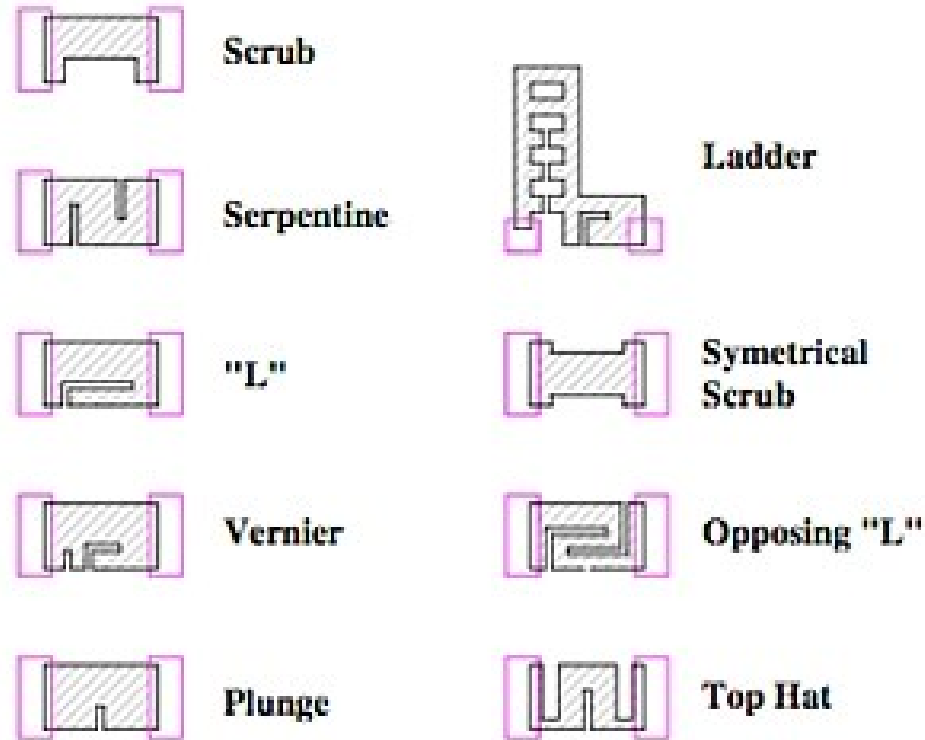
Debeloplastni hibridni upori ($d \approx 10-50 \mu\text{m}$)

- Na keramičen substrat je natiskana (screen printing) uporovna pasta (RuO_2)
- Uporovno plast zapečemo na predpisani temperaturi
- Nato se isti postopek ponovi z metalizacijo (nanašanje, fotolitografija).



Hibridno vezje z debeloplastnimi upori okoli Si sensorja tlaka (HYB d.o.o. Šentjernej)

Trimanje hibridnih uporov

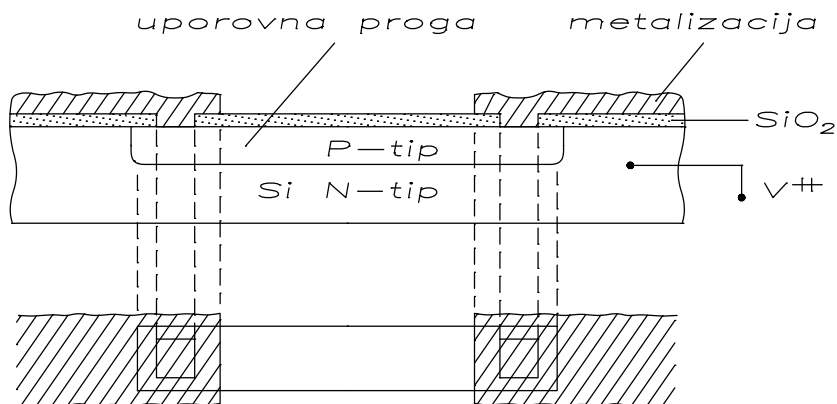


Trim Configurations

VIR: [EDN \(4/2013\)](#)

Polprevodniški upori

- Substrat je monokristal polprevodnika.
- Uporovno progo izdelamo s selektivnim vnašanjem primesi v polprevodnik:
 - z difuzijo ali
 - ionsko implantacijo skozi oksidno masko, nasprotnega tipa od osnovnega substrata. Oksidna maska, kontaktne odprtine in metalizacija so izvedene s fotolitografskimi postopki.
- Depozicija tankih plasti poteka enako kot pri tankoplastnih uporih



Med delovanjem morajo biti vsi elementi (tudi upori) integriranega vezja električno ločeni, kar dosežemo z zaporno polarizacijo PN spoja upor - substrat. Na substrat (bulk) priključimo na najbolj pozitiven potencial v vezju – običajno pozitivna napajalna napetost

Nastavljivi upori

Omogočajo nastavitve upornosti elementa. Sestavljeni so iz uporovne proge, po kateri drsi pomičen drsnik in z lego določa upornost elementa.

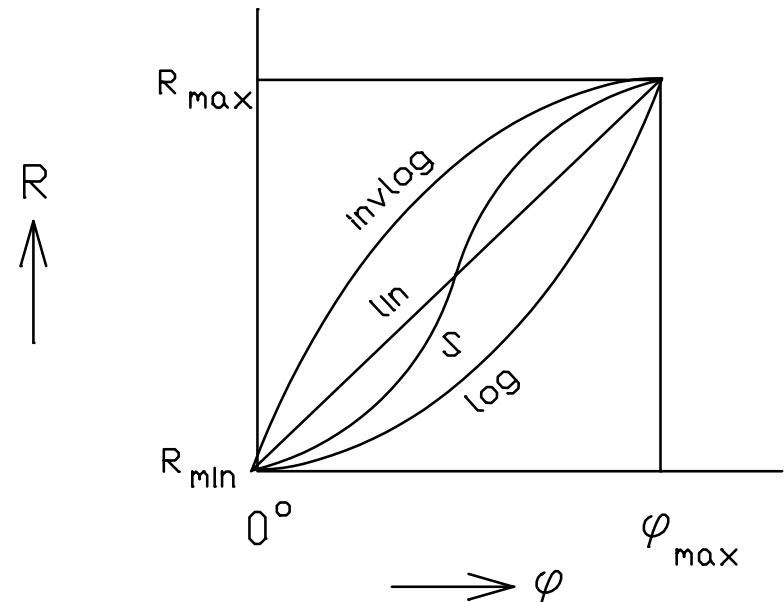
- Pogostost nastavljanja: potenciometer/trimer
- Pomik: (premi, rotacijski)
- Izvedbo uporovne proge (plastni, žični)
- Odvisnost upornosti od lege drsnika (linearni, logaritemski, inverzni logaritemski, "S")

linearni:

$$R(\varphi) = R_{\min} + K\varphi$$

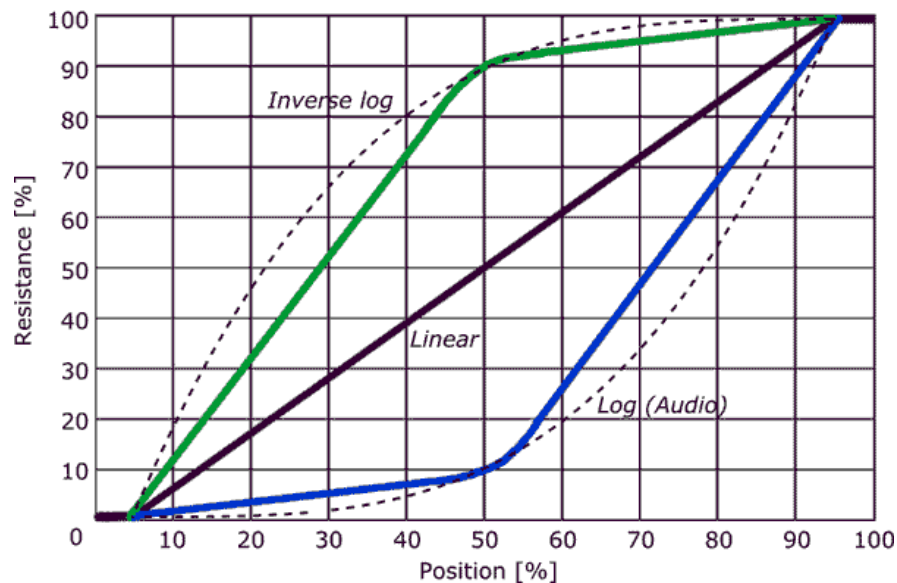
logaritemski:

$$\log \frac{R}{R_{\min}} = K\varphi$$



Odvisnost upornosti od lege drsnika (taper curve)

- Potek je običajno podan med 5 ... 95% rotacije, na katerem dobimo dejansko spremembo upornosti (electrical travel interval).
- **Linearni** (linear taper)
- **Logaritmični** (logarithmic/audio taper) Uporaba za kontrolo avdio glasnosti - človeško uho je na spremembo glasnosti občutljivo logaritemsko. Log potenciometrom sicer pravimo logaritemski, a je krivulja eksponentna (obratna odzivu ušesa)
- **Inverzni logaritemski** (anti-log) za uporabo v simetričnih avdio kontrolah (npr. balance), kjer sta na eni osi povezana log. in anti-log. potenciometra (tandem)
- **"S" taper** se uporablja npr. pri kontroli moči na žarnicah.

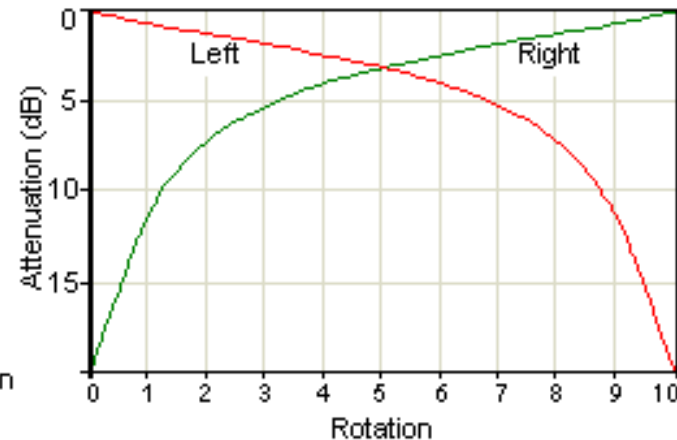
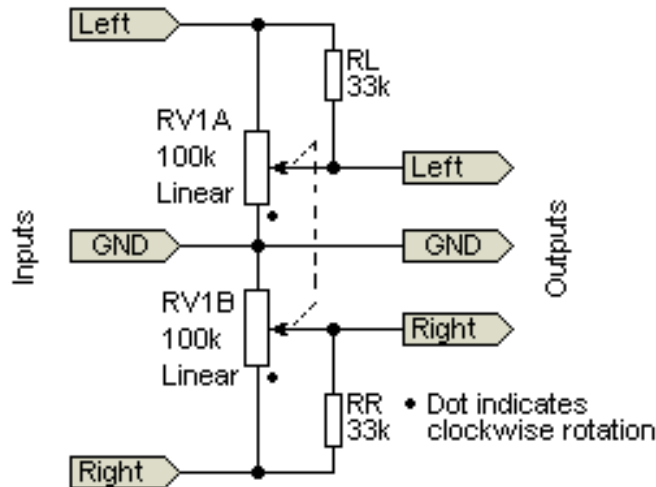
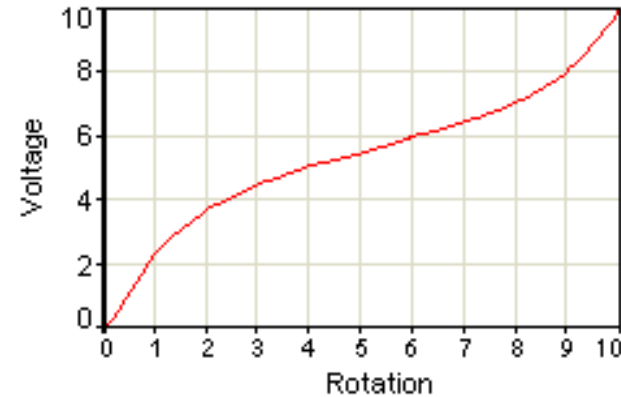
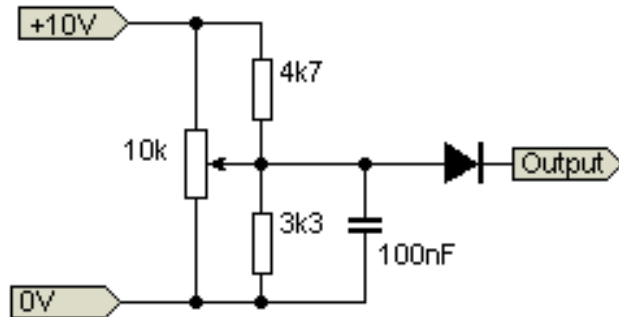


VIR: [RESISTOR GUIDE](#)

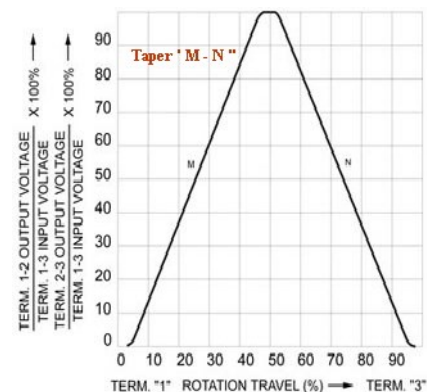
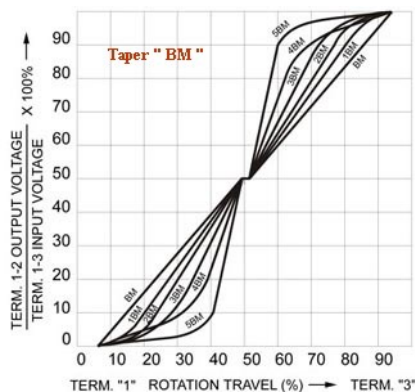
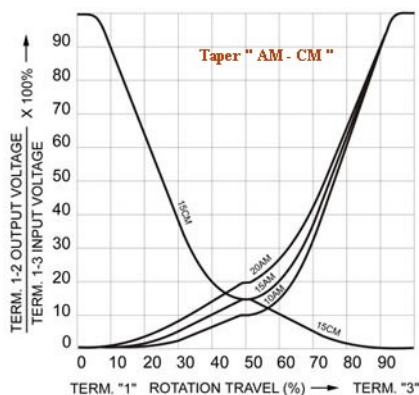
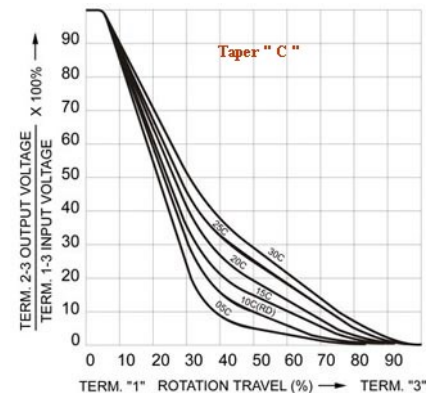
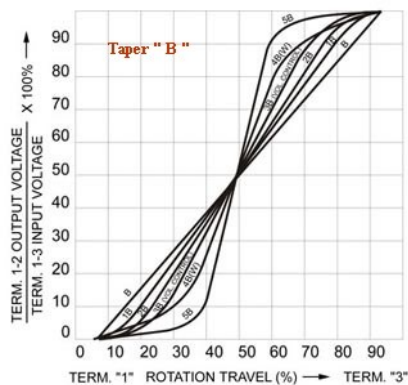
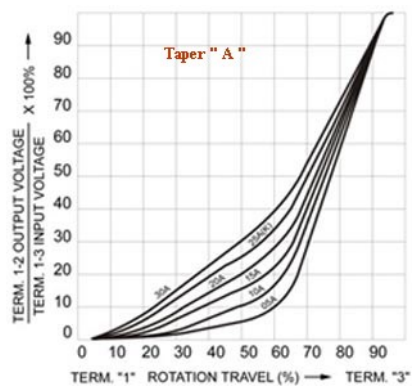
Izvedba "S" in log-antilog potekov z linearnimi potenciometri



VIR: [Elliott Sound Products \(2001\)](#)

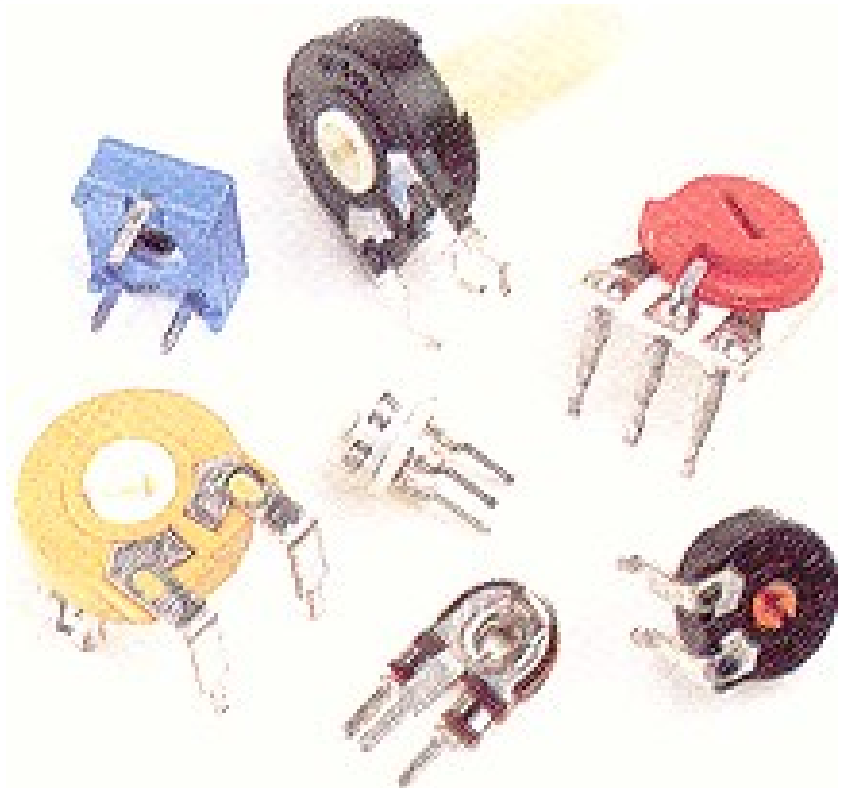


Taper curves



VIR: [ALPHA POTENTIOMETERS](#)

Nastavljivi upori



Osnovni podatki nastavljevih uporov

- R_n : največja upornost nastavljanja
- P_n : največja dopustna moč (ne glede na lego drsnika)
- Največji tok drsnika (ne glede na lego drsnika)
- Največji zasuk ($200^\circ \dots 300^\circ$), včasih 360° (ali brez ustavitve).
- Življenjska doba: zjamčeno število pomikov drsnika (običajni $\approx 10^4$, profesionalni $\approx 10^5 \dots 10^7$)
- Šum: Kontaktni šum kontakta drsnik - uporabna plast. Kontaktni šum je različen za mirujoč in za gibajoč se drsnik.

Tip	$R_n[\Omega]$	$P_n@70^\circ\text{C}$	$TK_R[\text{ppm/K}]$	Karakteristika
rot. oglj.				
pr.drs. oglj.	220-4M7	0.1	+250	lin, log, invlog
rot. ker.	220-10M	0.1	+250	lin, log, invlog
rot. žič.	100-1M	0.5	+200	lin
nav.	2E2-22k	1-2	+100	lin
rot. močn.	0E5-10k	25-100	+200	lin
žič nav.				

Uporaba potenciometrov

Material	Postopek izdelave	Uporaba	Moč (W)
Ogljeno plastni	Tiskana pasta na izolativni (fenolnem) podlagi	Najbolj pogosti, splošna uporaba v nezahtevnih aplikacijah (DC should not be allowed to flow through any pot used for audio control)	0.1 ... 0.5
Kermet	Kermet (kompozit keramika/kovina) metalna uporovna plast na keramičnem substratu	Kvalitetni trimerji in redko tudi potenciometri. Nizek šum in visoka stabilnost. Omejena življenjska doba – zato trimerji (tipično 200 rotacij)	0.25 ... >2
Prevodna plastika	Impregvirana plastika	Zelo kvalitetni (profesionalna, audiofilska uporaba), rotacijski in linearni. Dolga življenjska doba, nizek šum	0.25 ... 0.5
Žični	Izolacijsko ohišje, na katerega je navita uporovna žica. Ovoji žice so zlepljeni.	Visoka moč in praktično neomejena življenjska doba. Upornost je nastavljiva diskretno (v enotah ovoja). Nizek šum	5 ... >50

VIR: [Elliott Sound Products \(2001\)](#)

Upori za meritev toka (current sense resistors)

- Naraščajoča potreba (baterijske naprave)
- Meritve toka običajno prevedemo na meritev napetosti
- Možne rešitve:
 - transformatorji
 - Hallovi senzorji
 - Magnetorezistivni senzorji
 - Merilni upor (enostaven, cenen)
- Težave pri izbiri merilnega upora:
 - Disipacija moči ($1\text{m}\Omega$ upor \rightarrow $10\text{W}@100\text{A}$)
 - Ni izolacije med vezjem z velikim tokom in merilnim vezjem

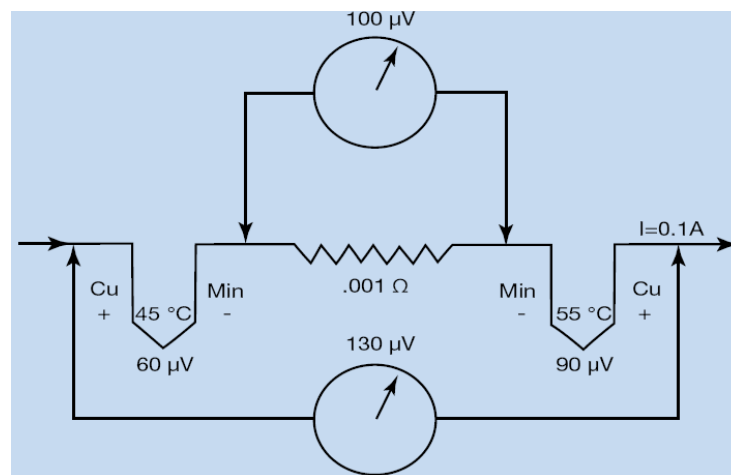
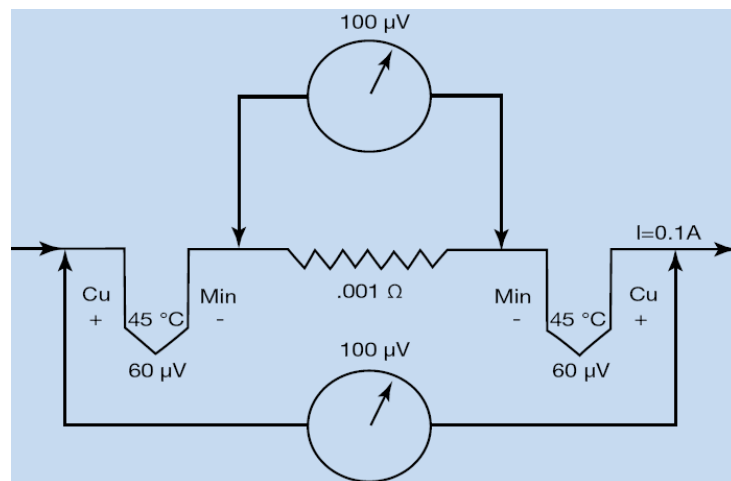
Upori za meritev toka (current sense resistors)

- Nizke upornosti (reda $m\Omega$)
- Nizek TC_R , VC_R
- Nizke induktivnosti za pulzno/AC delovanje ($L < 0.2nH$)
- Termična napetost (**Thermal EMV**) Vezan tokovni upor ima običajno vsaj tri različne kovine:
 - Cu → PCB,
 - Pb/Sn → spajka
 - Posebne zlitine za nizek TCR
- Različne kovine v stiku → termične napetosti med njimi.
- Pomembno za meritev DC razmer (pri AC ni vpliva).

Spoj: Cu/	Termična napetost spoja ($\mu V/^\circ C$)
Evanohm	+ 2.0
Cupron	- 45.0
Manganin	- 3.0
Zeranin	- 1.3
Ni	- 22.0
Au	+ 0.2
Ag	- 0.2
Al	- 4.0

Termična napetost - Upori za meritev toka

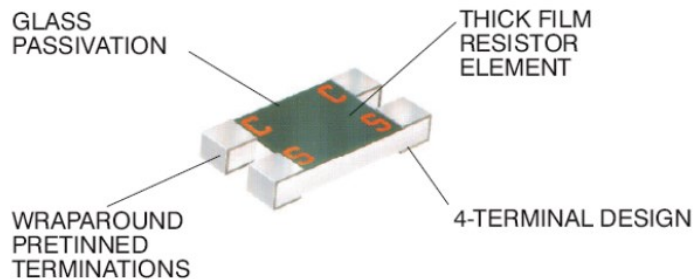
- dokler je upor na isti temperaturi, ni problemov ker se termični napetosti odštevata
- Ko enkrat segrejemo eno mesto upora se pojavita različni termični napetosti



VIR: [Vishay](#)

Upori za meritev toka (current sense resistors)

$P_n@70^\circ\text{C}$	W	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
Upornost	Ω	R01-1R	R003 - R1			
Toleranca	%	$\leq R005$: 5%, $> R005$: 1, 2, 5%			$\leq R005$: 5%, $< R01$: 2, 5%, $\geq R01$: 1, 2, 5%	
Dielektrična trdnost	V	200	200	200	200	
TCR	ppm/K	$\geq R005$... 100			$\geq R01$... 100	
$\Delta T@P_n$	$^\circ\text{C}$	40	80	90	100	



VIR: [TTI](#), [Riedon](#)

Elektronske komponente in senzorji

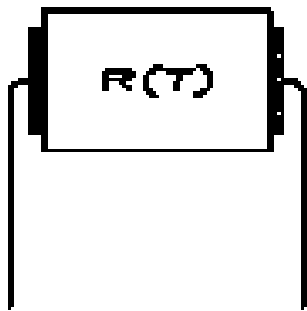
Nelinearni upori

Komponente, sestavi in senzorji

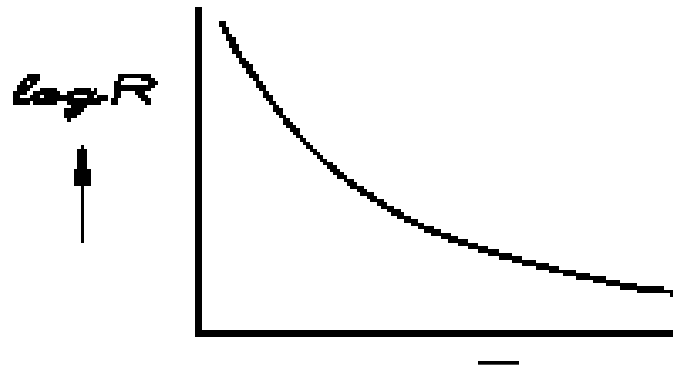
NTC termistorji

NTC termistorji

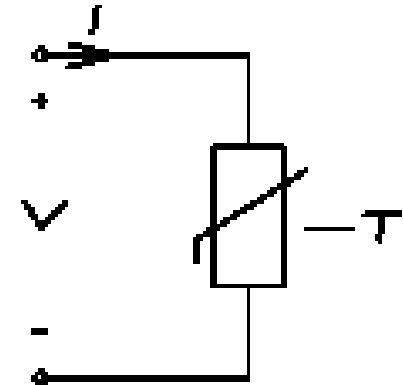
So temperaturno odvisni upori z visokim **negativnim** temperaturnim koeficientom (NTC) upornosti, tipično -1 do $-7\%/K$!



struktura



$R(T)$ karakteristika











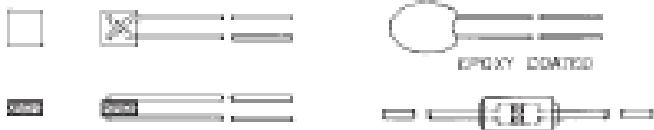

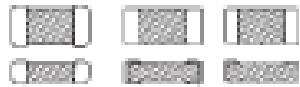

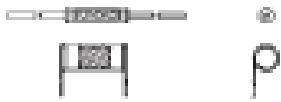

simbol NTC

NTC termistorji

- **Materiali**, za izdelavo NTC termistorjev, so zmesi kovinskih oksidov (dobri izolatorji, ki jih z dodatkom primesi pretvorimo v polprevodniške keramike).
Kovinski oksidi: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn
- **Tehnologija izdelave:**
 - Začetni material je zmes kovinskih oksidov (ZnO prah),
 - Zmesi dodajo primesi in vezivo,
 - Nastalo pasto oblikujejo s pomočjo kalupov in
 - Žgejo (sintranje) pri visoki temperaturi.
 - Kontakti so izdelani z nanašanjem prevodne metalne plasti.
 - Obvezno pospešeno staranje, ker imajo v začetnem obdobju termistorji velike variacije lastnosti.

Vrste NTC

 <p>ADJACENT OPPOSITE</p> <p>BARE BEADS .875 - 1.0 mm DIA.</p>	 <p>ADJACENT WITH STRIPS ADJACENT OPPOSITE</p> <p>GLASS COATED BEADS .13 - 1.5 mm DIA.</p>
 <p>ADJACENT OPPOSITE</p> <p>RUGGEDIZED GLASS BEADS .28 - 1.5 mm DIA.</p>	 <p>MINIATURE GLASS PROBES .4 - 1.5 mm DIA.</p>
 <p>LARGE GLASS PROBES 1.5 - 2.5 mm DIA.</p>	 <p>LARGE GLASS RODS 1.5 - 2.5 mm DIA.</p>
 <p>FAST RESPONSE PROBES 2 - 2.5 mm DIA.</p>	 <p>BEAD IN GLASS BULB 4 - 10 mm DIA.</p>

 <p>CHIPS .25mm x .25mm TO 13mm x 13mm</p>	
 <p>DISKS 1.0mm TO 25.0mm DIA.</p>	
 <p>SURFACE MOUNTS 1mm x 1mm TO 3mm x 3mm</p>	 <p>FLAKES .5mm x .5mm TO 3mm x 3mm</p>
 <p>RODS 0.5mm TO 5mm DIA.</p>	 <p>WASHERS 13mm TO 25mm DIA.</p>

Polprevodniška keramika

Kovinski oksidi so dobri izolatorji, ki jih z dodatkom ustreznih atomov primesi pretvorimo v polprevodniške keramike.

Pogoj za to so primesi - atomi, ki se lahko nahajajo v različnih ionskih stanjih (sprejemajo/oddajajo elektrone)

- N-tip keramike:

- osnovni material Fe: $\text{Fe} \rightarrow \mathbf{Fe^{3+}} + 3e^-$
- **donorska** primes Ti: $\text{Ti} \rightarrow \mathbf{Ti^{4+}} + 4e^-$

- P-tip keramike:

- osnovni material Ni: $\text{Ni} \rightarrow \mathbf{Ni^{2+}} + 2e^-$
- **akceptorska** primes Li: $\text{Li} \rightarrow \mathbf{Li^+} + e^-$

Polprevodniška keramika N-tipa

Keramika na osnovi železovega oksida Fe_2O_3 :

- Molekula Fe_2O_3 je navzven nevtralna, material je brez prostih nosilcev → izolator.
- Pred sintranjem dodamo primesi Ti, ki oddaja elektron **več**
 $\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{4+} + 4\text{e}^-$
- Atom Ti bo 3e^- porabil za vezavo na kisik, četrti elektron je šibko vezan
- Nizke T → termične energije nizke → četrti elektron je vezan → material je izolator.
- Višje T → prosti elektroni dobijo dovolj energije, da se odtrgajo od matične molekule in prispevajo k prevajanju toka → prevodnik
- Z rastočo T raste število prostih nosilcev (**elektroni**) → R materiala pada s temperaturo → NTC

Polprevodniška keramika P-tipa

Keramika na osnovi nikljevega oksida NiO:

- Molekula NiO je navzven nevtralna ($\text{Ni}^{2+}\text{O}^{2-}$), material je brez prostih nosilcev → izolator.
- Pred sintranjem dodamo primesi Li, ki ima elektron **manj**



- Atom Li bo en e^{-} porabil za vezavo na O^{2-} , drug elektron bo ostal nevezan. Pojavijo se nazasedena mesta (vrzeli)
- Nizke T → termične energije nizke → izolator
- Višje T → vrzeli sprejemajo vezane elektrone → prispevajo k prevajanju toka → prevodnik
- Z rastočo temperaturo število prostih nosilcev (**vrzeli**) narašča → R materiala pada s temperaturo → NTC

Temperaturna odvisnost upornosti

V polprevodniški keramiki koncentracija prostih nosilcev eksponentno raste s temperaturo. V keramiki N-tipa:

$$n(T) = n_{\infty} \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

- $\Delta E \rightarrow$ aktivacijska energija, določena z vezalno energijo elektronov
- $kT \rightarrow$ termična energija ($T[\text{K}]$, $k \rightarrow$ Boltzmannova konstanta)
- $n_{\infty} \rightarrow$ maksimalna koncentracija prostih elektronov za visoke temperature, določena s koncentracijo dodanih primesi (vsi ionizirani)

Temperaturna odvisnost upornosti

Temperaturna odvisnost specifične upornosti materiala je zaradi recipročne zveze med ρ in n podana z izrazom:

$$n(T) = n_{\infty} \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

$$\rho(T) = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot n(T)} = \left(\frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot n_{\infty}} \right) \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}} = \rho_{\min} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

Temperaturna odvisnost upornosti

Temperaturna odvisnost upornosti NTC termistorja enostavne geometrije (presek S , dolžina l)

$$\rho(T) = \rho_{\min} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}} \qquad R(T) = \rho \cdot \frac{l}{S} = R_{\min} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

$$R(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

Temperaturna odvisnost upornosti

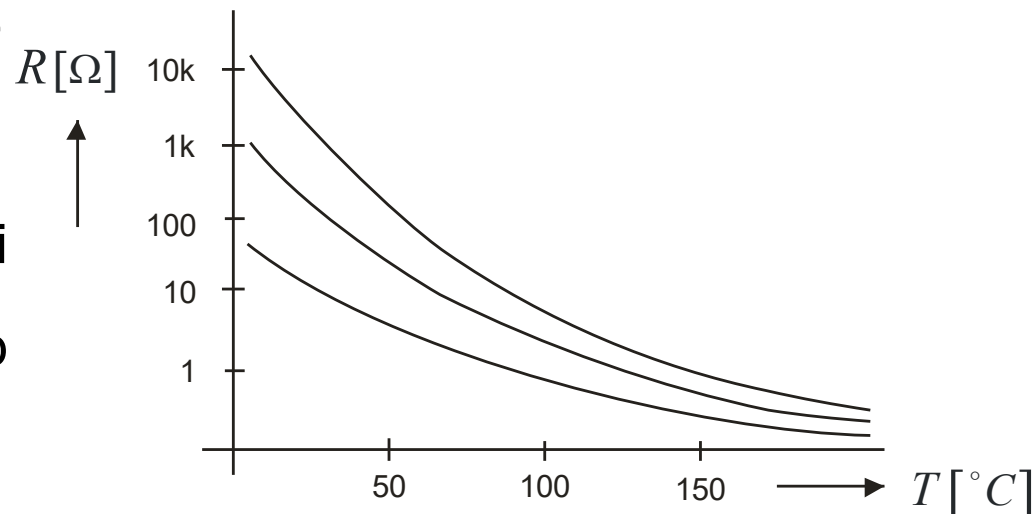
- **Konstanta A** je R_{\min} termistorja za visoke temperature, ki je določena z geometrijo (S, l) in koncentracijo dodanih primesi.

$$R(T) = \rho \cdot \frac{l}{S} = R_{\min} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}}$$

- **Materialna konstanta B:** (ang. material constant) je določena z vezalno energijo prostih nosilcev

$$R(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

- Tipične vrednosti konstante $B \approx (2000 \text{ K} \dots 5000 \text{ K})$.
- Karakteristike $R(T)$ družine NTC termistorjev se zaradi velikih sprememb upornosti in razlik med posameznimi termistorji družine podajajo v pol logaritemskem (ang. semilog) merilu.



Določanje materialne konstante B

- Materialna konstanta B je podana implicitno z izmerjenima upornostima NTC pri različnih temperaturah:
 - $R_1(T_1=25^\circ\text{C}) \rightarrow$ **nazivna upornost** termistorja R_n
 - $R_2(T_2=85^\circ\text{C})$

$$R_1(T_1) = A \cdot e^{\frac{B}{T_1}}$$

delimo enačbi \rightarrow

$$R_2(T_2) = A \cdot e^{\frac{B}{T_2}}$$
$$B = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Temperaturni koeficient upornosti NTC termistorja

TK_R NTC izračunamo z logaritmiranjem in odvajanjem osnovne enačbe termistorja:

$$R(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

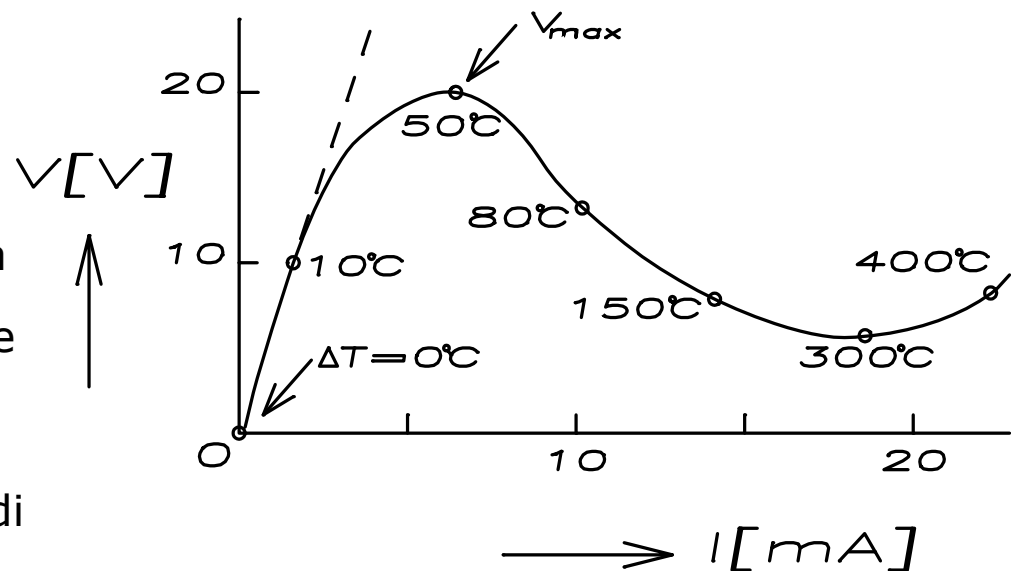
$$TK_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Temperatura je v T[K]!

U(I) karakteristika NTC

Meritev statične (stacionarne) karakteristike U(I):

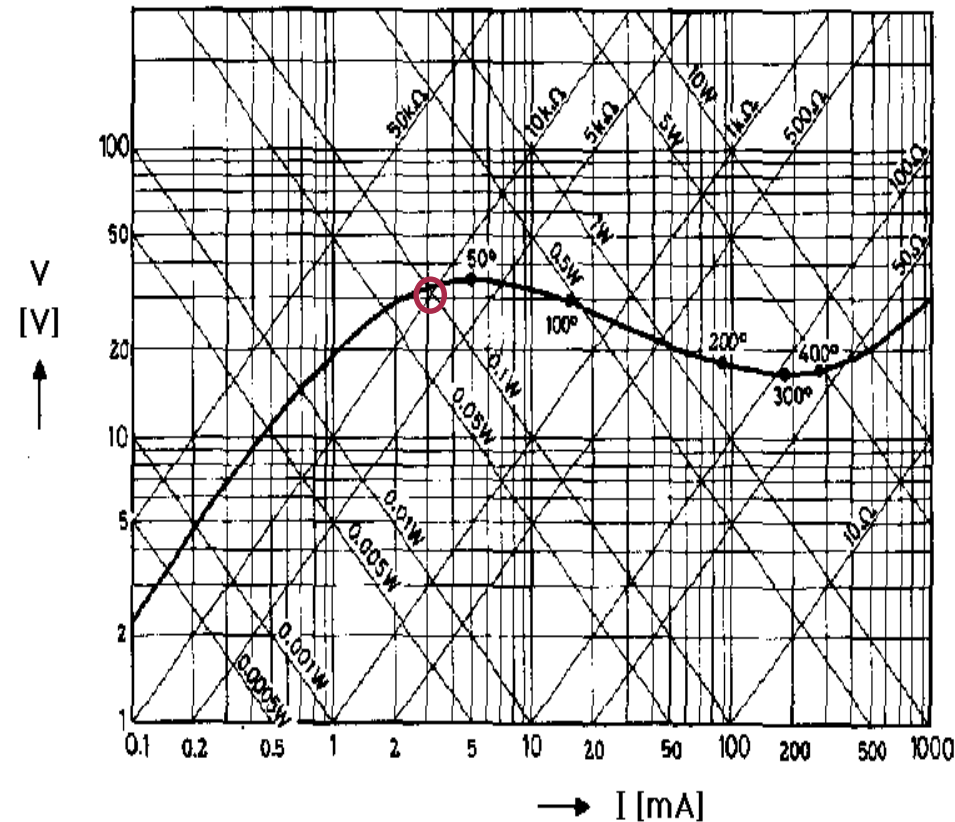
- nastavimo tok in
 - počakamo z meritvijo napetosti, da se temperatura in napetost ne spreminjata več.
- Pri majhnih tokih je zveza linearna, ker so tedaj moči segrevanja ($P=VI$) še nizke, temperatura se zato še ne spreminja in NTC se obnaša kot **običajen ohmski upor**.
 - Pri višjih tokih in napetostih začne temperatura naraščati, upornost NTC naglo upada in zato navzlic naraščajočemu toku upada tudi napetost na elementu, dobimo **področje negativne diferencialne upornosti**. Proizvajalci podajajo na U(I) krivulji kot parameter pripadajoče povišanje temperature elementa nad sobno temperaturo.
 - Pri visokih temperaturah na elementu okrog 300°C začne upornost **ponovno naraščati**, zaradi upadanja gibljivosti nosilcev.



Log-log U(I) karakteristika NTC

Stacionarno $U(I)$ karakteristiko podajajo v log-log diagramu:

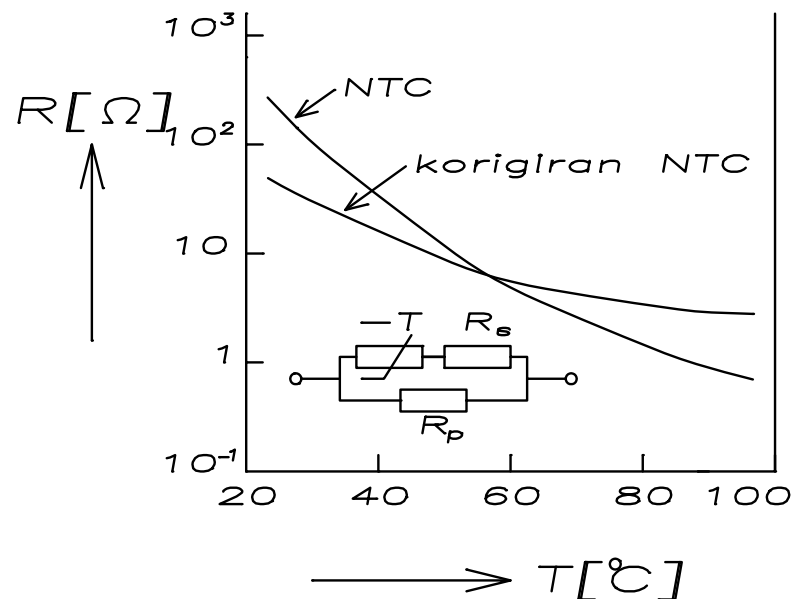
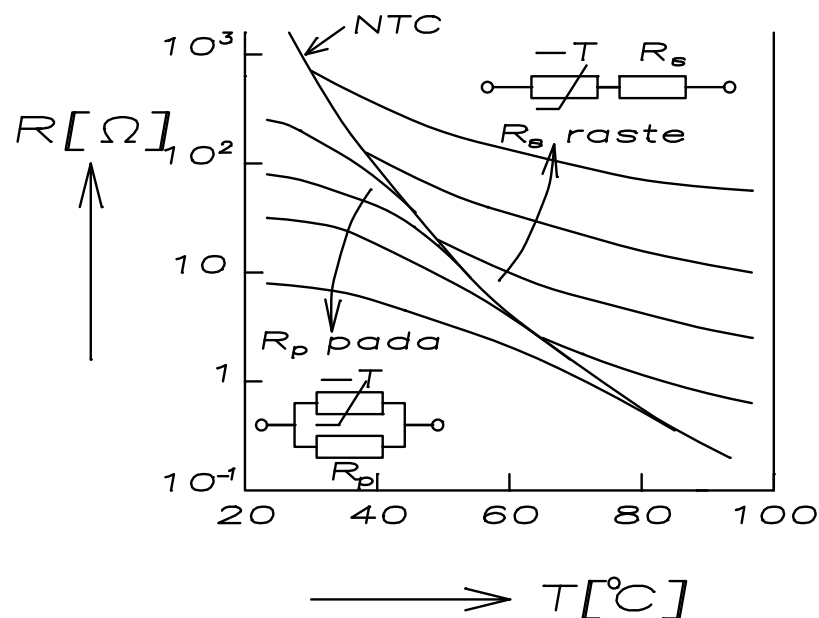
- S tem pokrijejo širše področje tokov in napetosti, kar omogoči vnos podatkov za celo družino NTC termistorjev.
- Črte, ki povezujejo točke, krivulje konstantne moči (UI) in konstantne upornosti (U/I), v log-log $V(I)$ diagramu premice!
- Za vsako delovno točko NTC odčitamo moč na elementu in njegovo upornost.



Oceni P in R NTC v delovni točki:
($U = 30$ V, $I = 3$ mA)
Rešitev: ($P \approx 0.1$ W; $R \approx 10$ k Ω)

Doravnavanje karakteristike

V določenih mejah lahko odvisnost $R(T)_{NTC}$ doravnavamo (trimamo) z dodatkom običajnih ohmskih uporov, ki imajo zanemarljiv TK_R v primerjavi z NTC.



Steinhart-Hart opis NTC

V natančnejših digitalnih merilnikih odvisnost $R(T)_{NTC}$ opišemo z Steinhart-Hart enačbo:

$$T(K) = \frac{1}{a_0 + a_1 \cdot \ln(R_T) + a_2 \cdot [\ln(R_T)]^3}$$

Tipične vrednosti koeficientov (za manjšo natančnost zanemarimo a_2)

T[°C]	a_0	a_1	a_2
-50...0	1.4391E-03	2.6930E-04	1.6534E-07
0...50	1.4405E-03	2.6907E-04	1.6619E-07
50...125	1.4403E-03	2.6904E-04	1.6794E-07

Statične lastnosti NTC

- NTC termistorji so termoelektrični elementi (izkoriščajo odvisnost $R(T)$)
- *Stacionarno stanje* : $T = \text{const}$
Nobena količina se s časom ne spreminja več (termično ravnovesje) ($P_{\text{SEGREVANJA}} = P_{\text{ODDANA}}$).

$$P_{\text{SEGREVANJA}} = U \cdot I = K \cdot (T - T_A)$$

$$K = \frac{1}{R_{TH}}$$

$T \rightarrow$ temperatura NTC,

$T_A \rightarrow$ temperatura ambienta

$K \rightarrow$ termična prevodnost NTC (faktor disipacije)

- Termična upornost NTC $R_{th} \approx 1 \dots 10 \text{ mW}/^\circ\text{C}$
- $R_{th} \rightarrow$ moč, ki dvigne temperaturo NTC za $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, oz. moč, ki jo element oddaja pri $\Delta T = 1^\circ\text{C}$.

Dinamične lastnosti NTC: ohlajanje

Meritev ohlajanja:

- V trenutku $t = 0$ izklopimo tok
- Oddana energija v času dt je enaka zmanjšanju toplotne energije elementa

$$P(t)dt = K \cdot (T(t) - T_A) dt = -H \cdot dT$$

H je toplotna kapaciteta NTC, ki podaja toploto, ki jo mora element sprejeti ali oddati za spremembo temperature elementa $\Delta T = 1^\circ\text{C}$.
($H \approx 0.1 \text{ Ws}/^\circ\text{C}$)

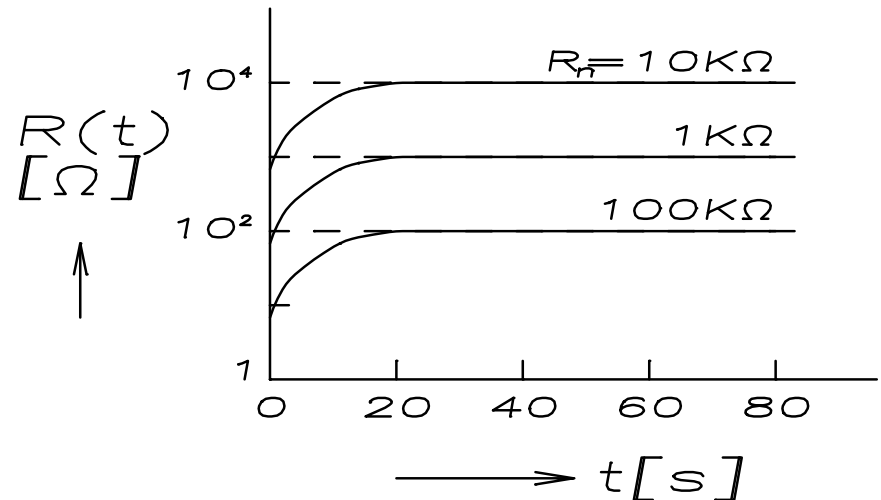
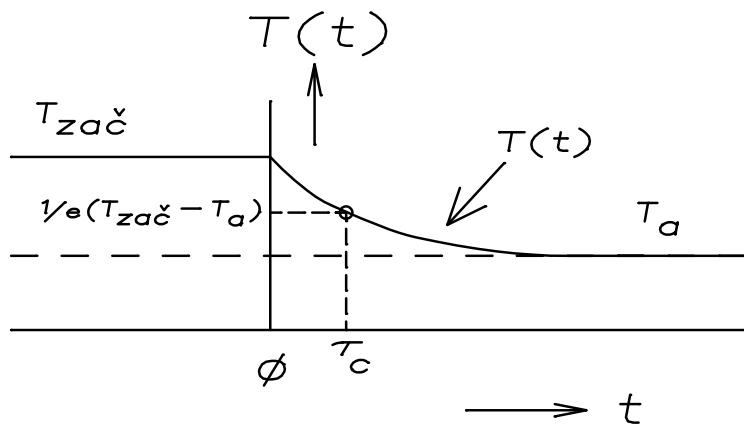
$$\int_{T_{zac}}^{T(t)} \frac{dT}{T - T_A} = -\frac{K}{H} \int_0^t dt$$

$$\frac{1}{\tau_C} = \frac{K}{H}$$

$$T(t) - T_A = (T_{zacetna} - T_A) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_C}}$$

Dinamične lastnosti NTC: ohlajanje

- Začetni presežek temperature ($T_{\text{ZAČETNA}} - T_A$) eksponentno upada s časom proti 0.
- Časovna konstanta ohlajanja, določena z razmerjem H/K , (ang. cooling) ($\tau_C \approx 1 \text{ s} \dots 1 \text{ min}$).
- τ_C je čas, v katerem začetni presežek temperature upade za faktor $1/e$.
- Namesto časovne konstante ohlajanja τ_C je lahko podan $R_{\text{NTC}}(t)$ pri ohlajanju v zraku s standardne $T_{\text{ZAČETNA}} = 85^\circ\text{C}$

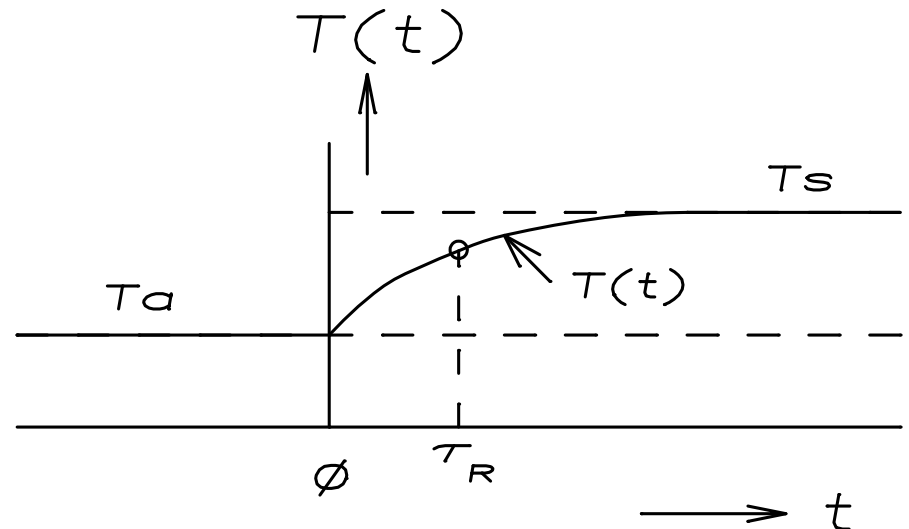


Dinamične lastnosti NTC: segrevanje

Meritev segrevanja:

- Ob ($t < 0$) ima NTC temperaturo okolice ($T_A = 25^\circ\text{C}$)
- Element ob $t=0$ potopimo v silikonsko olje segreto na stacionarno temperaturo (standardna $T_S = 85^\circ\text{C}$)
- Začetno odstopanje temperature od ravnovesne vrednosti $T_S - T_A$ eksponentno upada proti 0.
- Časovni potek temperature NTC $T(t)$ proti ravnovesni vrednosti T_S

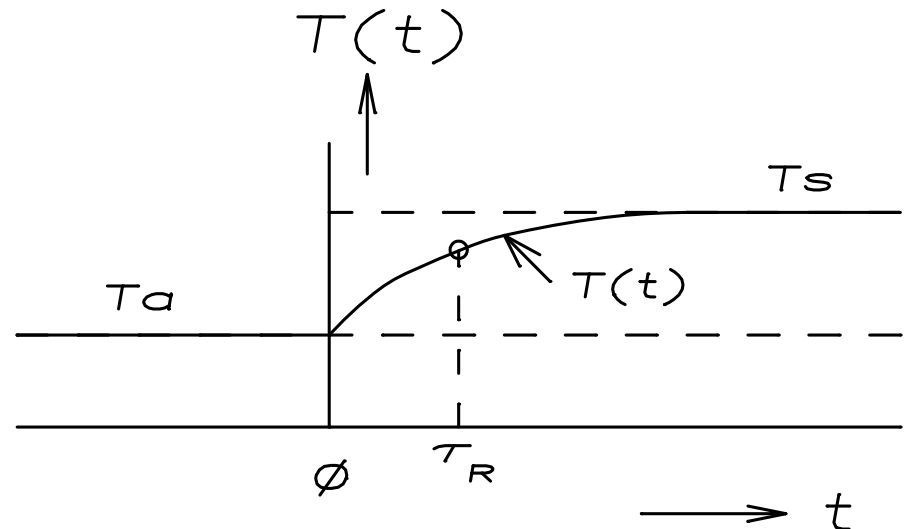
$$T(t) - T_A = (T_S - T_A) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}})$$



Dinamične lastnosti NTC: segrevanje

- Časovna konstanta segrevanja NTC oz. odzivni čas termistorja, (ang. response time)
 $\tau_R \approx 1 \text{ s} \dots 1 \text{ min}$
- τ_R je čas, ko začetno odstopanje temperature naraste na 63% ($1 - e^{-1}$) končne vrednosti

$$T(t) - T_A = (T_S - T_A) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}})$$



Delovanje NTC pri ničelni moči

- Ko NTC deluje kot **senzor temperature** želimo da tok skozenj oz. **lastno segrevanje** ne prispeva bistveno k povišanju temperature elementa.
- Za povišanje temperature NTC zaradi lastnega segrevanja postavimo mejo ΔT_0 ($\Delta T_0 \approx 0.1^\circ\text{C}$)
- Moč na NTC, ki zagotavlja ($\Delta T_0 \approx 0.1^\circ\text{C}$), je **ničelna moč** P_0 :

$$P_0 = K \cdot \Delta T_0$$

Tipično: $K = 10 \text{ mW}/^\circ\text{C}$, $\Delta T_0 \approx 0.1^\circ\text{C} \rightarrow P_0 \approx 1 \text{ mW}$

Osnovni podatki NTC

- Nazivna upornost NTC:
 $R_n \rightarrow$ upornost elementa @ ($T_A = 25^\circ\text{C}$)
 $R_n = 5 \Omega \dots 1 \text{ M}\Omega$
- Lestvice: 20% 10%
- Nazivna moč NTC
 $P_n \rightarrow$ maksimalna moč termistorja, ki jo element trajno prenese brez degradacije.
 $P_n(T_A=55^\circ\text{C}) = 0.1 \text{ W} \dots 1 \text{ W}$
- Temperaturno področje delovanja:
 - pri nazivni P_n : $T_A = -55^\circ\text{C} \dots +55^\circ\text{C}$
 - pri ničelni P_0 : $T_A = -55^\circ\text{C} \dots +1200^\circ\text{C}$

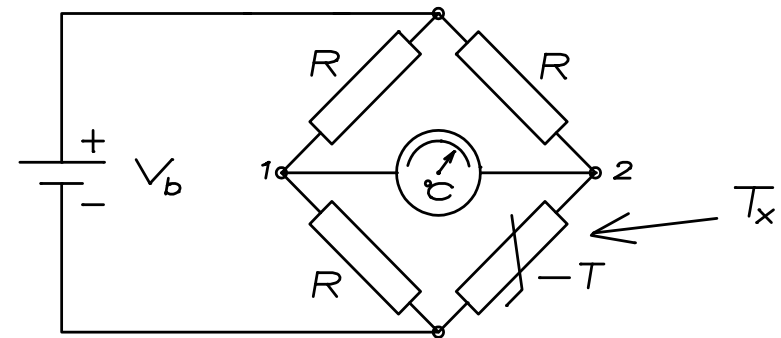
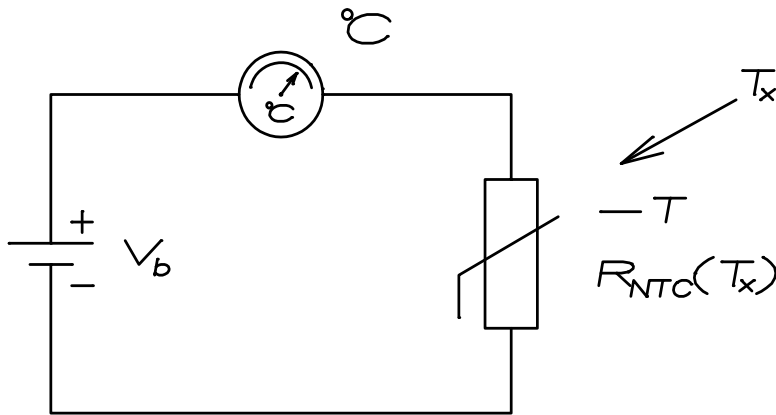
Uporaba NTC

Glede na izkoriščeno osnovno lastnost NTC:

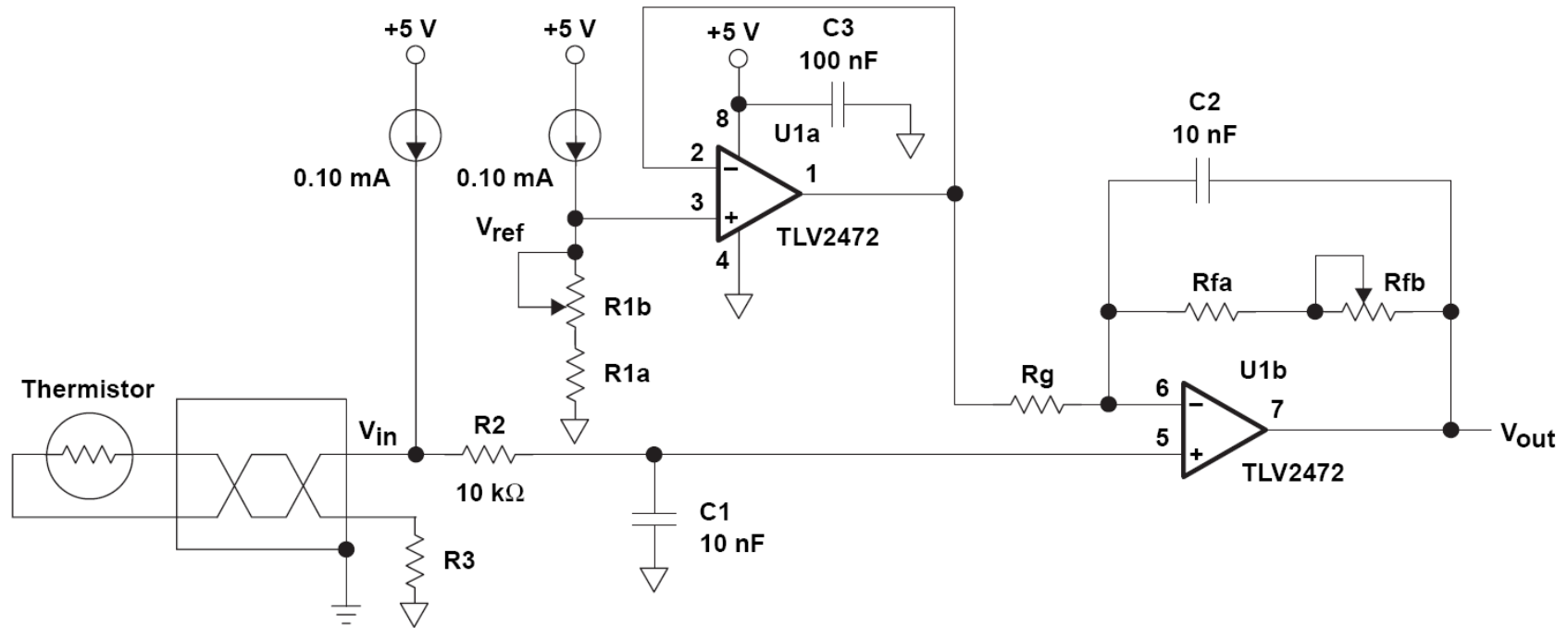
- Odvisnost $R(T)$ od temperature:
 - merjenje in regulacija temperature,
 - temperaturna kompenzacija (upornosti tuljav s pozitivnim TK_R)
- Odvisnosti $R(T)$ zaradi segrevanja z lastnim tokom:
 - merilniki nivojev in pretokov tekočin in plinov (fluidov)
 - merjenje VF moči,
 - omejevanje zagonskih sunkov
- Termična vztrajnost NTC termistorja (prehodni pojav $T(t)$ ob vklopu ali izklopu):
 - zakasnilni členi
- Nelinearnost stacionarne $U(I)$ karakteristike:
 - stabilizacija napetosti
- Negativna diferencialna upornost stacionarne $U(I)$ karakteristike:
 - oscilatorji zelo nizkih frekvenc ($f < 1\text{Hz}$)

Meritev temperature

- Enostavna, cenena meritev temperature z NTC (vode v hladilnem sistemu avtomobila). S spreminjanjem neznane temperature T_x se spreminja tudi temperatura NTC termistorja in s tem njegova upornost.
- Natančnejša meritev temperature je realizirana z mostično izvedbo. Odstopanje upornosti NTC termistorja od ostalih treh uporov mostiča ustvari potencialno razliko med točkama 1 in 2, ki je odvisna od neznane temperature T_x .



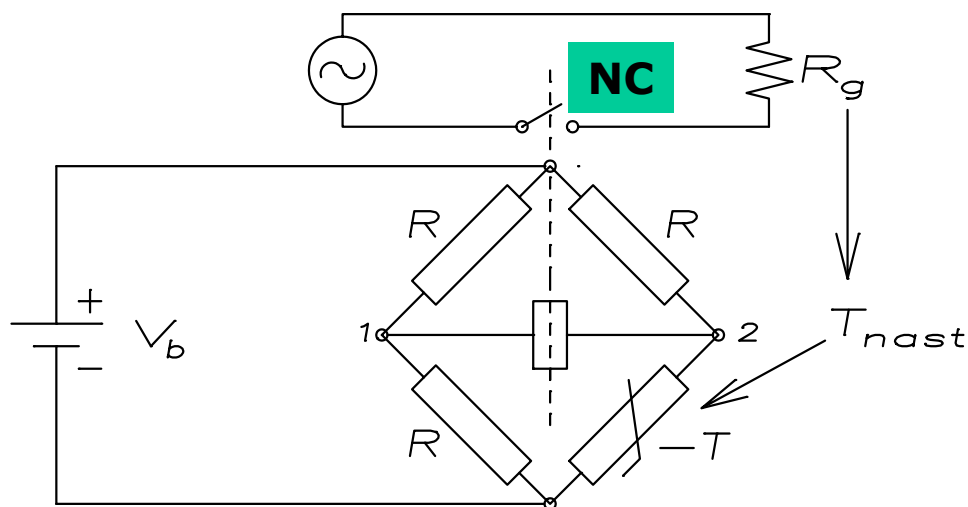
Meritev temperature



VIR: [II](#), 2000

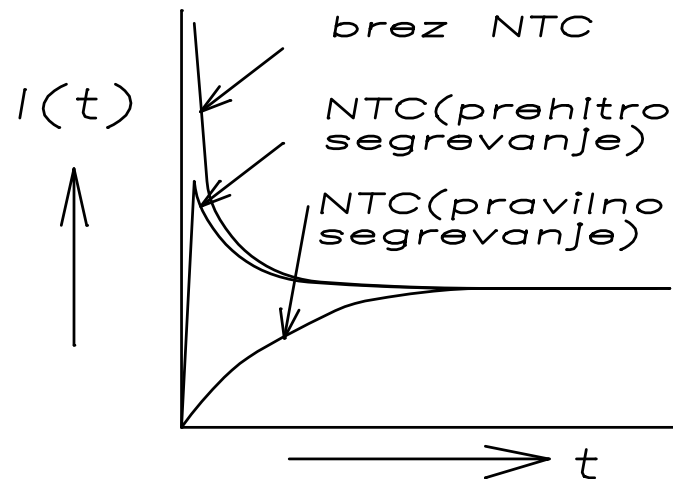
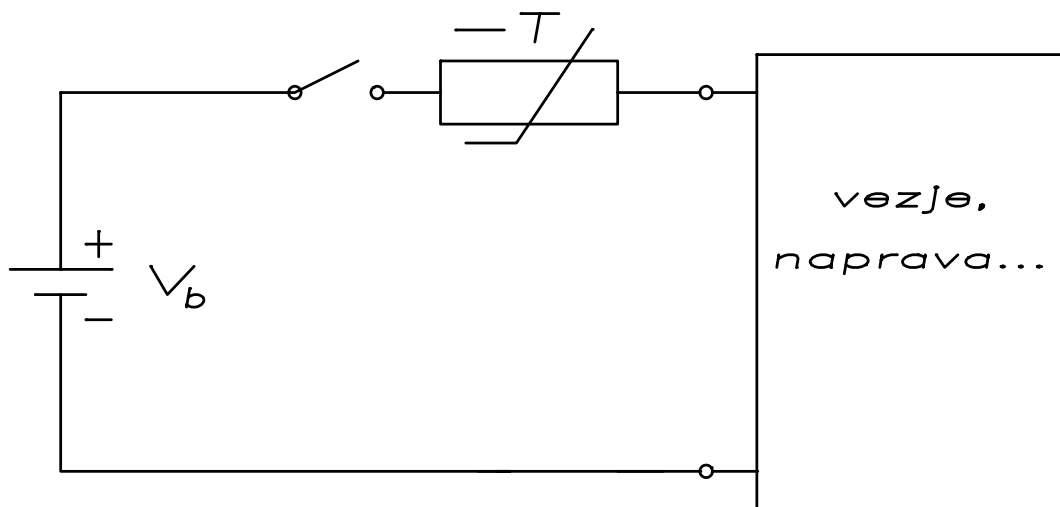
Regulacija temperature - termostatiranje

- Ob primerno izbranih elementih velja, glede na nastavljeno temperaturo T_{nast} , ki jo določimo s spremenljivim uporom R_1 ,
- $T < T_{nast}$, $R_{NTC} > R_1 \rightarrow V_{12} \neq 0$, rele ON, grelec ON, temperatura raste
- $T \approx T_{nast}$, $R_{NTC} \approx R_1 \rightarrow V_{12} \approx 0$, rele OFF, grelec OFF, temperatura pada



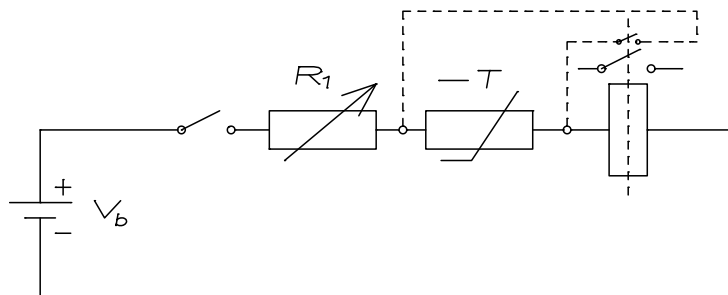
Zaščita stikal in bremen pri vklopu

- Ob vklopu bremena pride pogosto do tokovnega sunka (ang. inrush current), ki skrajšuje življenjsko dobo stikal.
- **Zaporedno** z bremenom vežemo **NTC termistor**.
- NTC termistor v zanki je hladen in ima visoko upornost → začetni tok majhen.
- Po vklopu se NTC termistor zaradi toka preko njega segreva → R_{NTC} pada in tok bremena počasi raste → **mehak zagon** (ang. soft start)



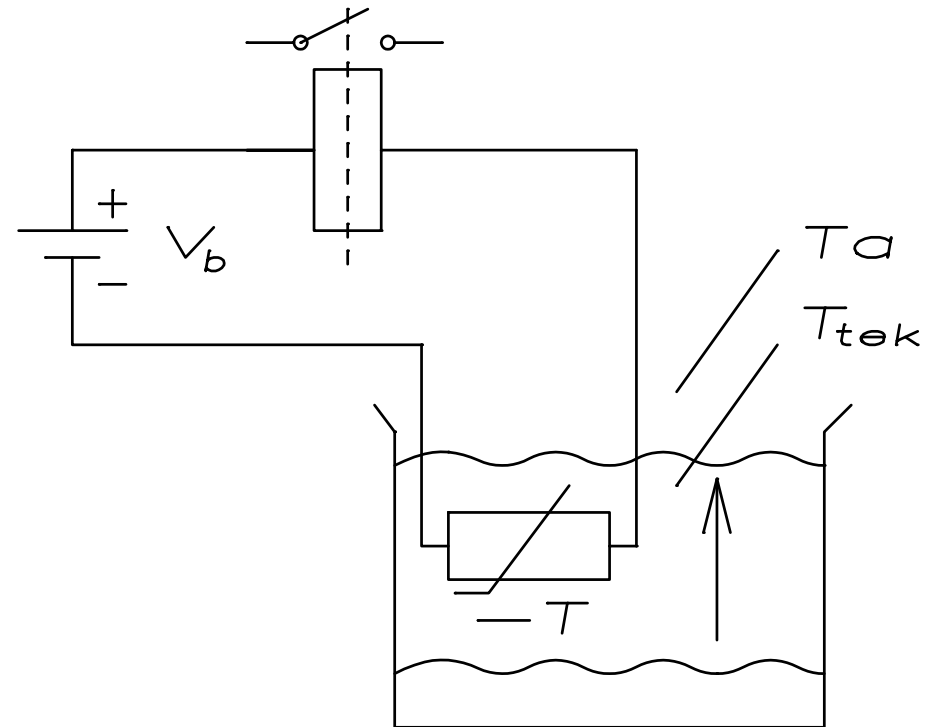
Zakasnilni člen

- Včasih je potrebno, da vezje (npr. rele) vklopi z zakasnitvijo (npr. časovni rele)
- Zakasnilni člen dobimo, če zaporedno z vezjem dodamo NTC.
- Princip delovanja je podoben prejšnjemu primeru.
- Zakasnitev preklopa lahko zvezno nastavljamo, če zaporedno vežemo spremenljiv upor R_1 :
 - Če povečamo upornost R_1 , se bo tok zmanjšal in zakasnitev preklopa se poveča.
- Opisana shema **ne deluje dobro** v primeru, kadar po izklopu takoj sledi ponoven vklop (ang. non-resettable time delay): NTC termistor se namreč nima časa ohladiti in ne pride do zakasnitve vklopa!
- Če dodamo premostitveno vezje, ki kratko stakne NTC, se ta po preklopu ohladi in je ponovno pripravljen za nov zakasnjen vklop.



ON-OFF regulacija nivoja tekočin

- Gladina naraste do NTC
 - spremeni se temperatura NTC zaradi spremenjenih pogojev odvajanja toplote
 - spremeni se R_{NTC}
 - spremeni se tok NTC
 - vklop črpalke
- Gladina upade
 - R_{NTC} se poveča
 - izklop črpalke

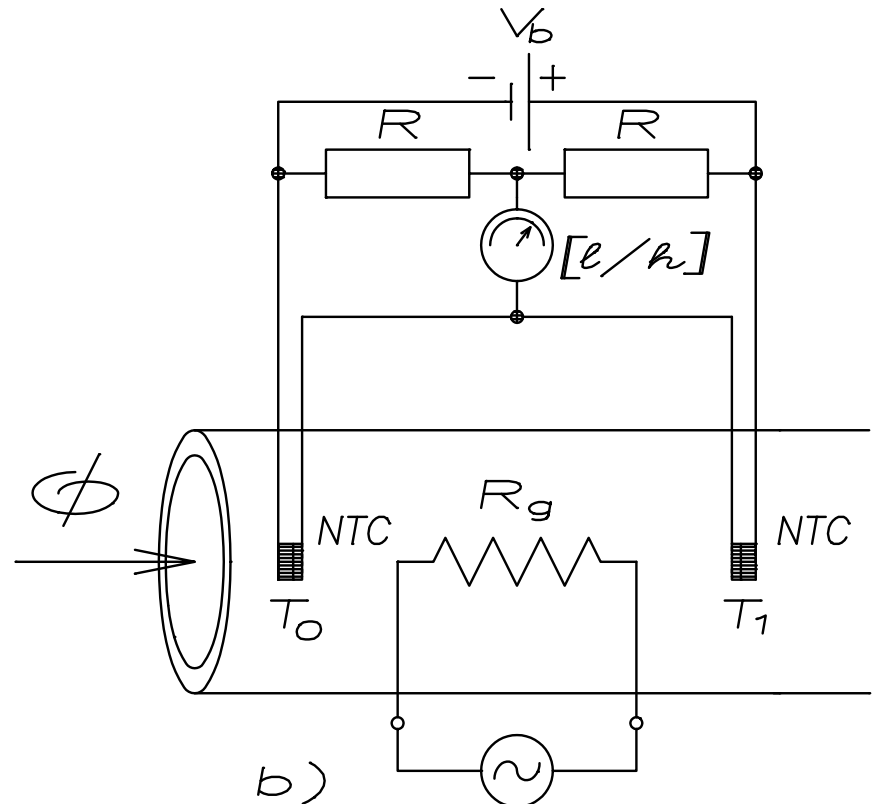


Meritev pretoka fluidov

Meritev pretoka fluidov (tekočin in plinov):

- V pretok fluida postavimo grelec med dva senzorja temperature.
- Manjši, ko je pretok fluida → dlje se fluid zadržuje pri grelcu R_G → bolj se segreje.
- **Razlika temperatur izstopajočega fluida T_1 in vstopajočega fluida T_0 je obratno proporcionalna pretoku Φ .**

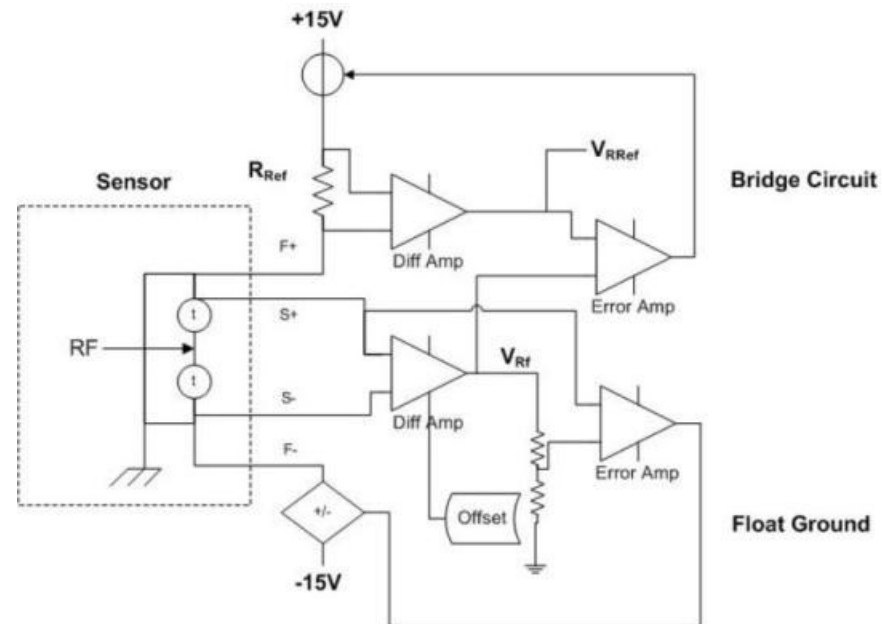
$$\Phi = \frac{K}{T_1 - T_0}$$



ΔT merimo mostično

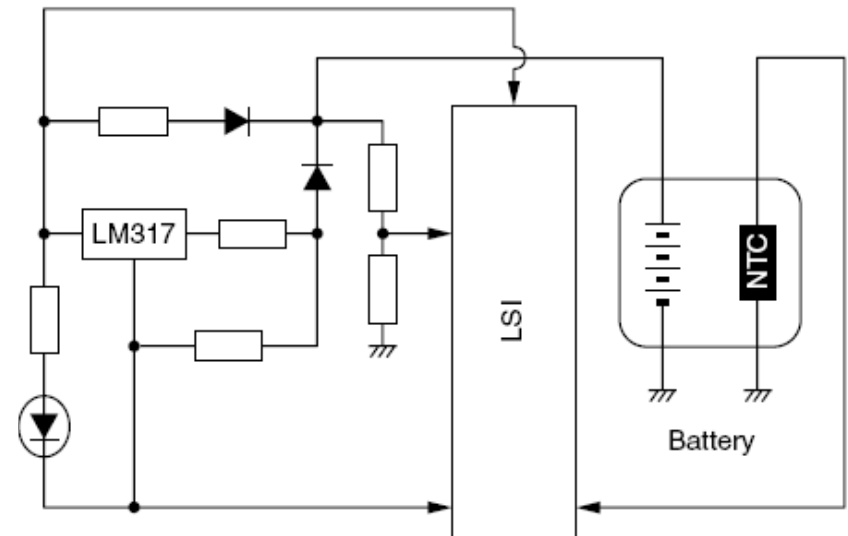
Bolometer

- Meritev dela spektra (npr. IR) elektromagnetnega valovanja ($\approx \mu\text{W}$)
- Na NTC vpade del spektra in ga segreje
- Spremeni se upornost R_{NTC} , \rightarrow sprememba je proporcionalna moči upadlega valovanja
- Običajno je dodan enak, neaktiven NTC, ki ni izpostavljen za kompenzacijo sprememb okolja (T_A)



Nadzor temperature polnjenja baterij

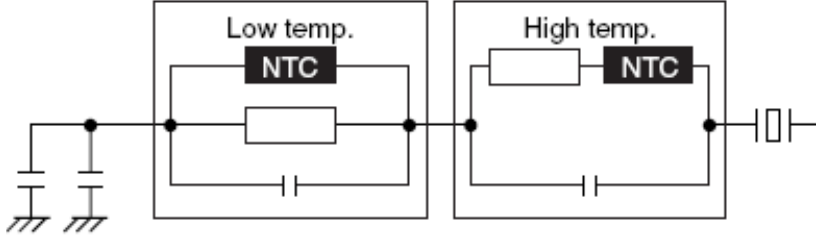
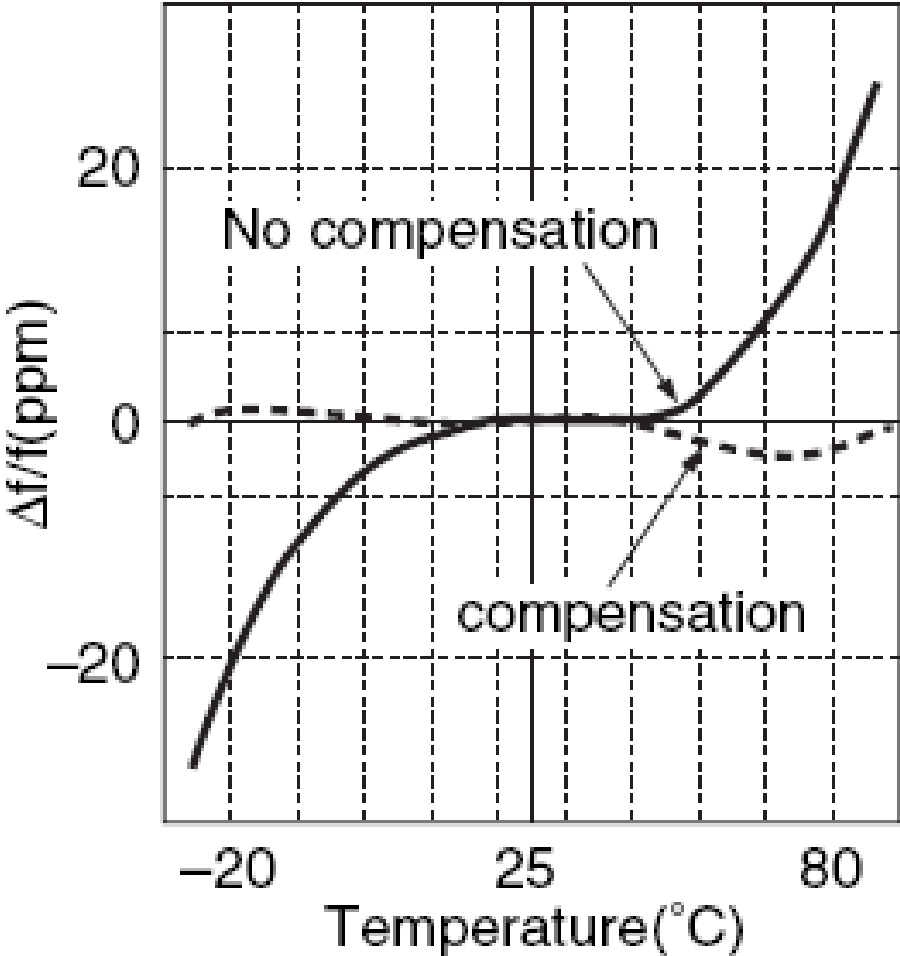
- Li-Ion; Ni-Mh



[TDK, NTC thermistors](#)

[Vishay, Fast Charging Control with NTC Temperature Sensing](#)

TCXO Temperature Compensated Crystal Oscillator



[TDK, NTC thermistors](#)

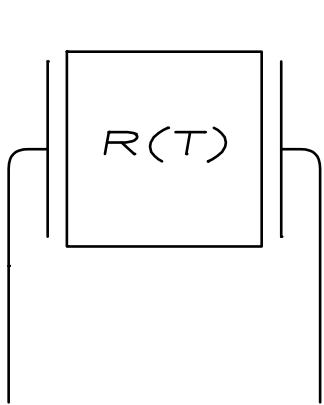
Komponente, sestavi in senzorji

PTC termistorji

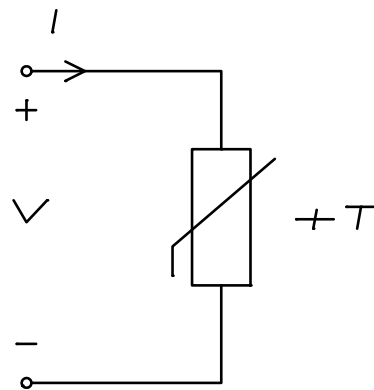
PTC termistorji

So temperaturno odvisni upori z visokim **pozitivnim** TK_R
($TK_R = -5 \dots +80 \text{ \%}/K$)

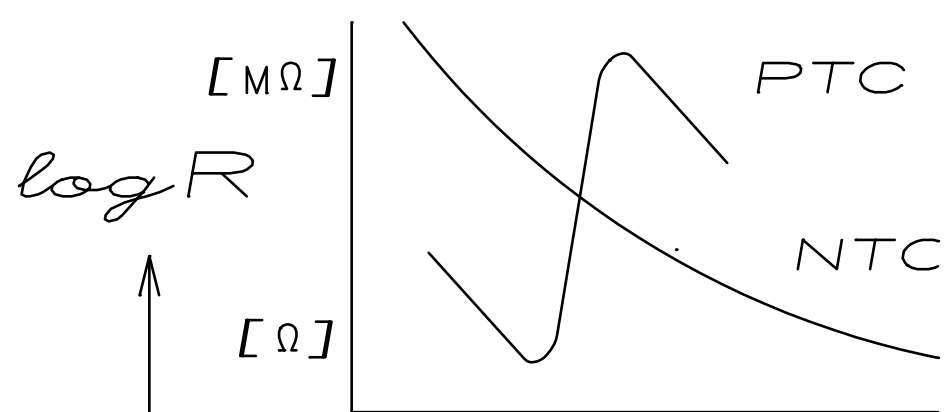
- Klasični PTC termistorji imajo **pozitiven temperaturni koeficient** le v **ozkem temperaturnem intervalu**, izven tega področja pa imajo negativen temperaturni koeficient → se obnašajo kot NTC termistorji!
- V področju pozitivnega temperaturnega koeficienta je temperaturni koeficient zelo velik, mnogo večji kot NTC.



struktura



simbol PTC



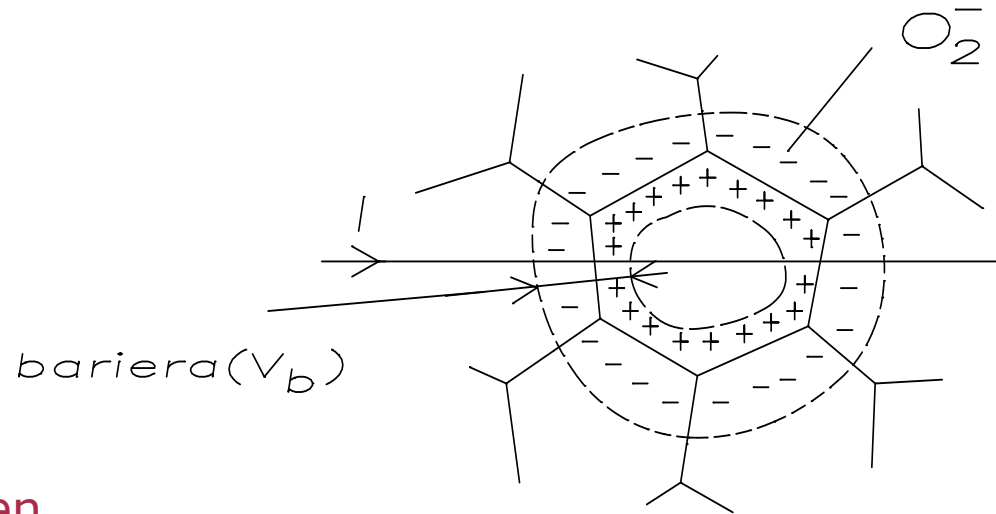
R(T) karakteristika

PTC termistorji

- Materiali za izdelavo PTC termistorjev so **kovinski oksidi s feroelektričnimi lastnostmi** (BaTiO_3 , z dodatkom SrTiO_3).
- Tehnologija je podobna kot pri NTC termistorjih (keramične paste, sintranje ...).
- V osnovnem materialu, npr. BaTiO_3 , nadomestimo med **sintranjem** nekatere atome titana
$$\text{Ti} (\text{Ti} \rightarrow \mathbf{Ti}^{4+} + 4e^-)$$
s primernimi 5-valentnimi atomi, npr. antimona
$$\text{Sb} (\text{Sb} \rightarrow \mathbf{Sb}^{5+} + 5e^-).$$
- Če sintramo polprevodniško keramiko N-tipa v inertni (neoksidativni) atmosferi **brez kisika** dobimo polprevodniško keramiko N-tipa z NTC efektom.
- Če sintramo polprevodniško keramiko N-tipa **v prisotnosti kisika** dobimo polprevodniško keramiko N-tipa s PTC efektom.

PTC efekt

- Kisikovi atomi pri visoki temperaturi sintranja prodirajo v globino materiala najhitreje po mejah med zrnji v zrnati strukturi keramičnega materiala
- Kisikovi atomi se vgradijo predvsem na površini zrn. Kisikov atom teži k stabilnem stanju O_2^- , zato pritegne iz površinskega sloja zrna elektrona in jih veže.
- Zrno je bilo pred vezavo elektronov nevtrarno. Zaradi nastalega primanjkljaja elektronov se pojavi v površinskem sloju zrna **pozitiven prostorski naboj**,
- Za kompenzacijo se na površini zrn pojavi tanka **plast negativnega naboja** na kisikove atome vezanih elektronov.



PTC efekt

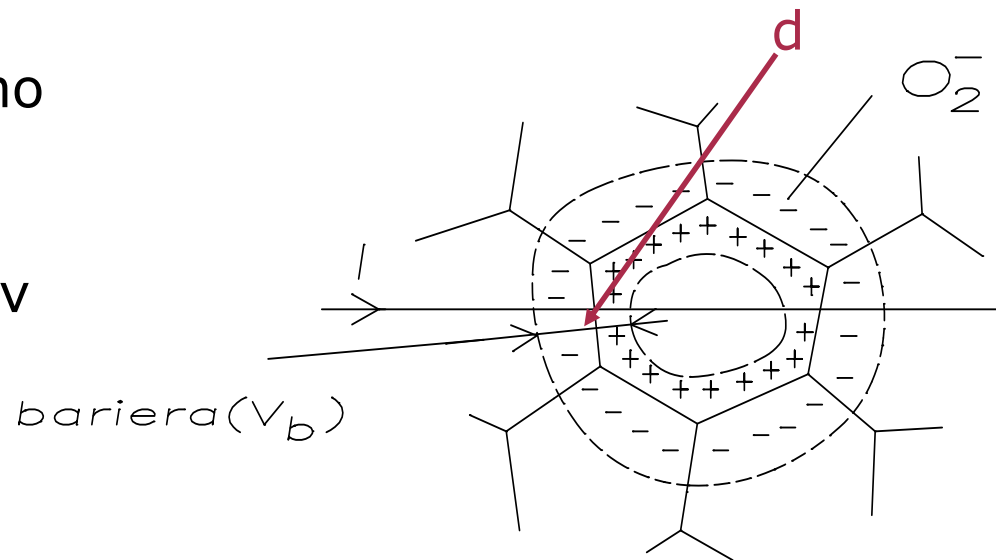
Razmere v površinskem področju zrna so podobne situaciji v osiromašenem področju PN spoja:

- Prostorski naboj v skladu s Poissonovo enačbo ustvari električno polje (E),
- Iz E sledi ΔV preko bariere, ki ga pri PN spoju imenujemo difuzijska napetost, tu pa **potencialna bariera**. (V_b)
- Bariera nima prostih nosilcev → izolator

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$V_b = \frac{q}{2 \cdot \epsilon} \cdot N_D \cdot d^2$$

- q → osnovni naboj,
 N_D → koncentracija vgrajenih donorskih atomov Ti,
 d → širina bariere,
 ϵ → dielektričnost materiala



PTC efekt

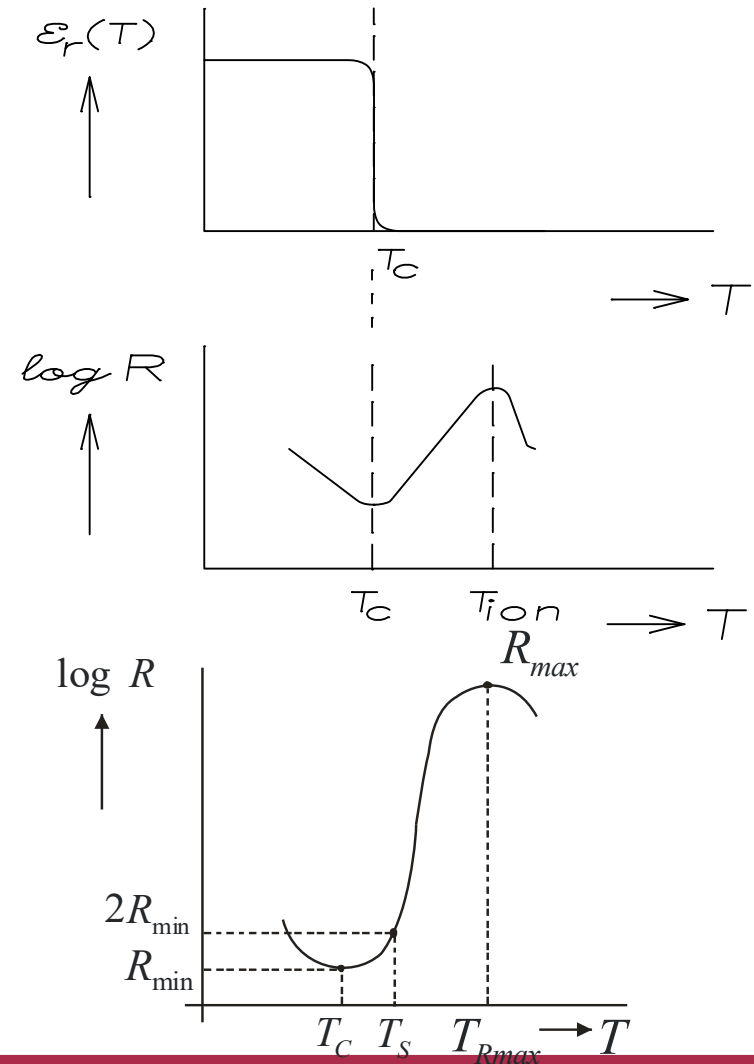
- Bariera nima prostih nosilcev → visoka upornost za gibanje prostih nosilcev
- Ohmska upornost eksponentno narašča z višino bariere V_b
- Upornost materiala zaenkrat upada z naraščajočo temperaturo → izkazuje NTC značaj.

$$R = K \cdot e^{\frac{V_B}{V_T}} = K \cdot e^{\frac{q \cdot V_B}{k \cdot T}}$$

Curiejeva temperatura - T_c

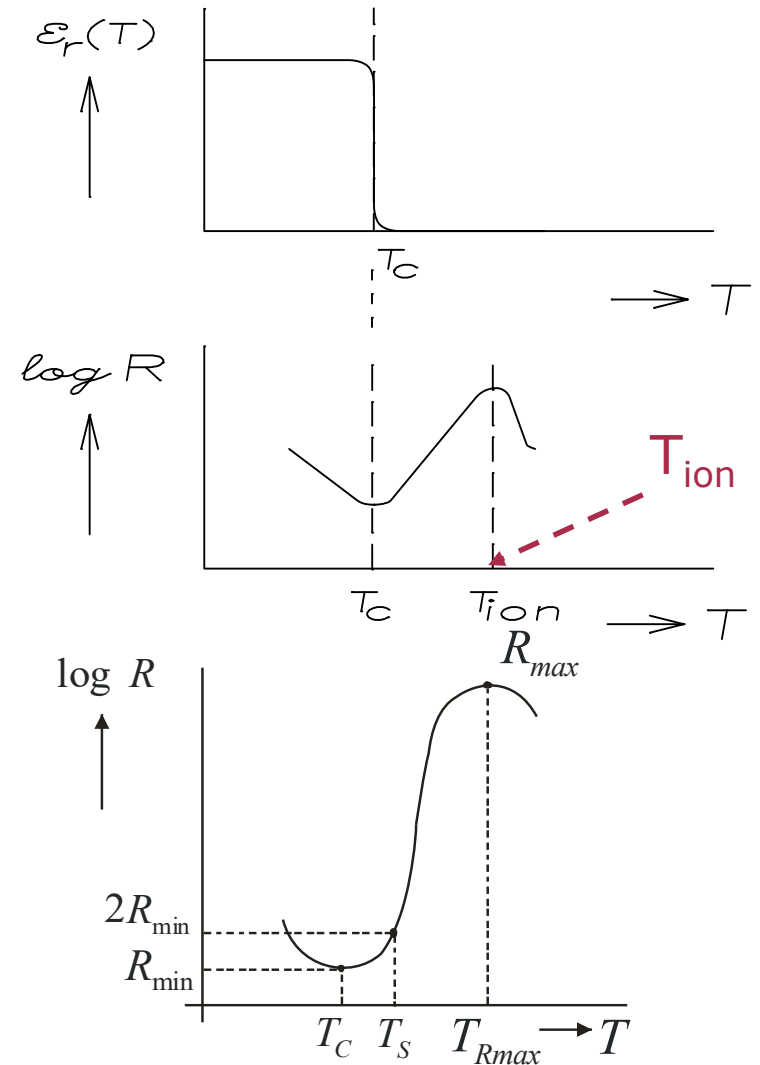
- Padanje upornosti materiala z naraščajočo temperaturo velja do Curiejeve temperature T_c feroelektričnega materiala.
- V feroelektričnih materialih je ϵ velik do T_c , nakar naglo upade.
- Od T_c dalje prevzame odločilen vpliv na upornost materiala temperaturna odvisnost dielektrične konstante $\epsilon_r(T)$
- Višina bariere (V_b) je obratno proporcionalna dielektričnosti materiala (Poisson).
- Zato nad T_c V_b izredno naglo naraste \rightarrow s tem še hitreje naraste tudi ohmska upornost materiala \rightarrow PTC

$$V_b = \frac{q}{2 \cdot \epsilon} \cdot N_D \cdot d^2$$



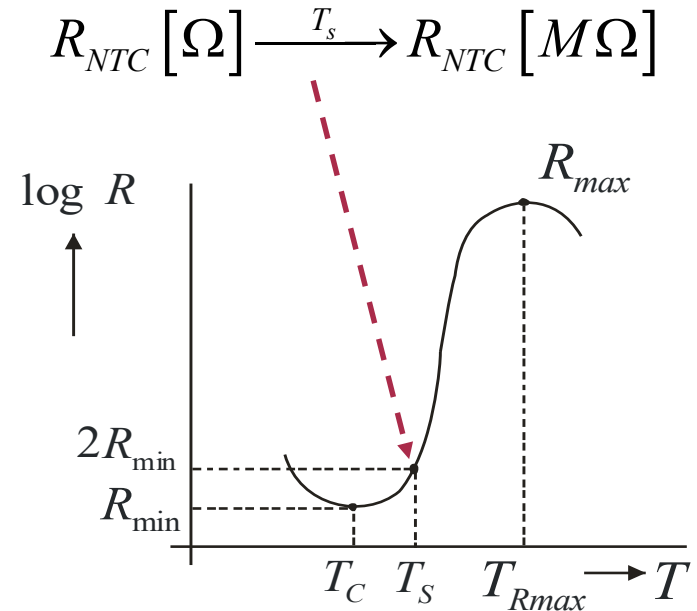
PTC efekt

- PTC efekt se pri višjih temperaturah ($T_{ion} \approx 150 \dots 200^\circ\text{C}$) zaključi, ker pride do novega efekta:
- Termične energije elektronov postanejo dovolj visoke, da se pričnejo osvobajati na kisikove atome vezani elektroni v bariernem področju.
- Bariere zato razpadejo, PTC efekt izgine, material se obnaša kot NTC!



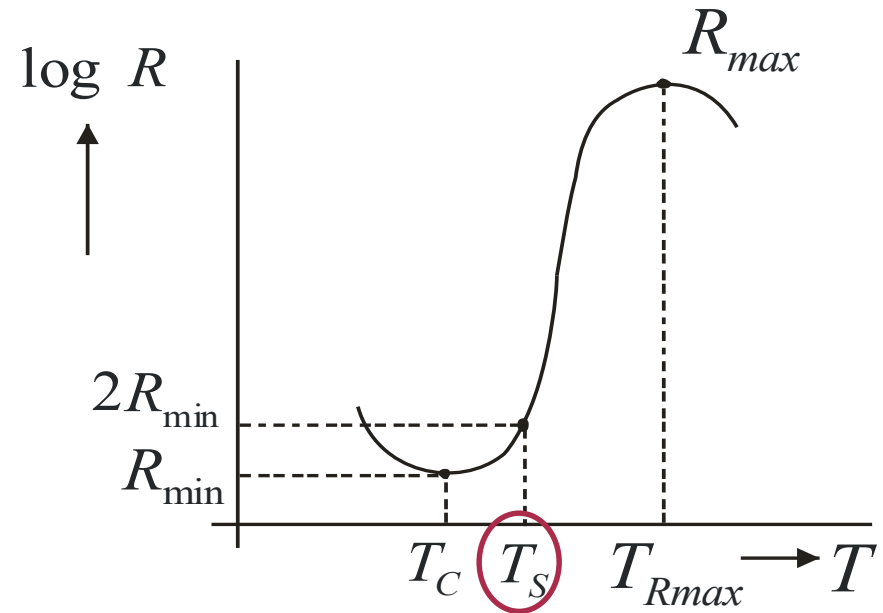
PTC kot stikalo

- PTC termistor se poenostavljeno obnaša kot **temperaturno kontrolirano stikalo**, ki pri dani temperaturi preklopa T_s (ang. switch) preklopi iz nizkoohmskega v visokoohmsko stanje.
- Pri preklopu "stikala" se upornost PTC poveča za faktor $100 \dots 10^4$



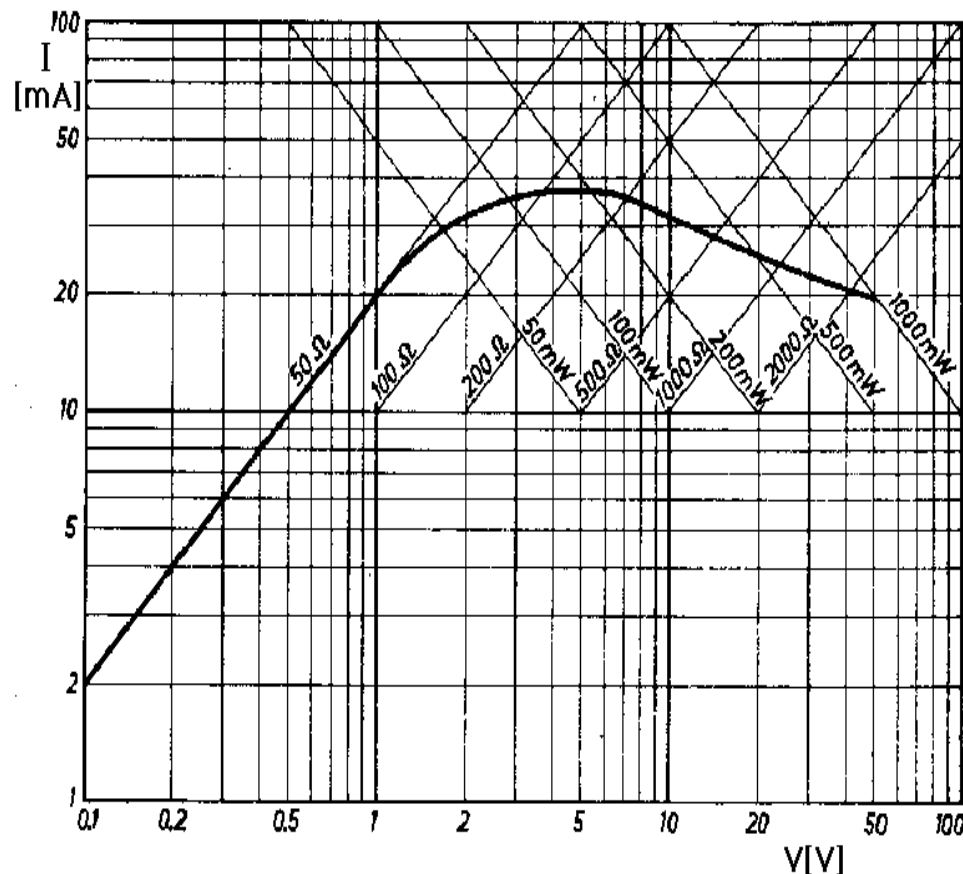
Temperatura preklopa - T_S

- Pri PTC ne podajamo T_C , ampak raje **temperaturo preklopa T_S**
- T_S je temperatura, pri kateri je upornost PTC termistorja narasla na vrednost $2R_{\min}$
- $T_S \approx -30 \dots +200^\circ\text{C}$.



Stacionarna I(U) karakteristika PTC

- Meritev: Na PTC termistor priključimo napetost in počakamo dokler se temperatura in tok elementa ne stabilizirata.
- Pri nizkih napetostih, tokih in močeh je segrevanje zanemarljivo → element ima konstanto upornost in I(V) je linearna kot pri ohmskem upor.
- Pri višjih napetostih pride do segrevanja PTC.
- Ko se PTC segreje na T_S , upornost izredno naglo narašča in tok upada, čeprav napetost raste.
- Na mesto preklopa vpliva temperatura okolice T_A ; pri višji T_A pride do preklopa hitreje, pri nižjih močeh oz. napetostih
- Stacionarna I(U) karakteristika se zaradi velikih sprememb upornosti podaja v log-log merilu.



Osnovni podatki PTC termistorjev

- Upornost pri dveh karakterističnih temperaturah pred in po preklopu, npr. R_{25} in R_{80}
 $R_{25} \approx 1 \text{ k}\Omega \dots 10 \text{ k}\Omega$ $R_{80} \approx (100 \dots 10^4) * R_{25}$
- $T_S \approx -30^\circ\text{C} \dots +200^\circ\text{C}$
- **D** (faktor disipacije, termična prevodnost) → moč, ki je potrebna za spremembo temperature elementa za $+1^\circ\text{C}$
 $D \approx 5 \dots 20 \text{ mW/K}$.
- **H** (toplotna kapaciteta) podaja koliko toplote element prejme ali odda pri spremembi temperature elementa za $+1^\circ\text{C}$,
 $H \approx 0.1 \dots 10 \text{ J/K}$
- TK_R za PTC področje (temperaturni koeficient upornosti)
 $TK_R = +5 \dots +80 \text{ \% / K}$
- $T_{MAX} = -50 \dots +200^\circ\text{C}$
- $U_{MAX} = 10 \dots 500 \text{ V}$
- $\tau_C = 1 \dots 60 \text{ s}$ (hlajenja → cooling time)
- $\tau_r = 1 \dots 60 \text{ s}$ (segrevanja → response time)

Uporaba PTC termistorjev

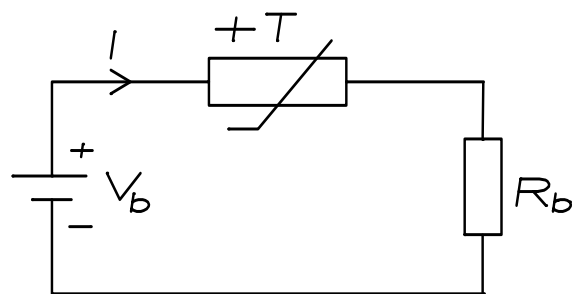
- Pri PTC termistorjih je **nevarno prekoračenje** maksimalne dopustne napetosti U_{max} → izredno naglo naraščanje moči → uničenje elementa
- PTC termistorjev **ne smemo vezati zaporedno**, da bi tako dvignili celotno delovno napetost:
PTC termistorji se med seboj razlikujejo, zato se bo po priklopu napetosti oz. moči najprej segrel en element, prvi dosegel T_S in preklopil v visokoohmsko stanje.
 - Celotna pritisnjena napetost bo na tem elementu → PTC prebije.
 - Če ob tem PTC prebije v neprevodno stanje je zaporedna vezava odpovedala (tok ne teče),
 - Če ob tem PTC prebije v prevodno stanje (kratek stik) je na vrsti naslednji PTC elementu v zaporedni vezavi – in tako do zadnjega.

Uporaba PTC termistorjev

- Uporaba PTC kot temperaturno kontroliranega stikala: pri T_s PTC preklopi iz "sklenenega" (nizkoohmskega) v "razklenjeno" (visokoohmsko stanje)
- Uporaba:
 - Zaščita proti električni preobremenitvi
 - Zaščita stikala pred iskrenjem pri izklopu

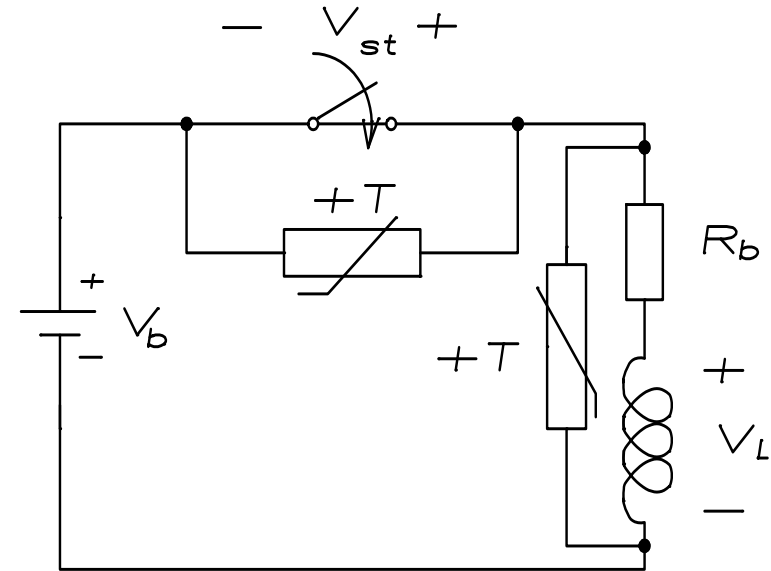
Zaščita proti električni preobremenitvi

- Kadar napetost ali tok narasteta čez določeno mejo, se zaradi sproščane moči PTC termistor segreje do T_s
- PTC preklopi iz nizkoohmskega v visokoohmsko stanje → loči ščiteno breme od previsokega napajanja
- Ko previsoka napetost ali tok upadeta, se PTC ohladi in preklopi v nizkoohmsko stanje in PTC ponovno priklopi breme na napajanje (ang. resettable fuse)



Zaščita stikala pred iskrenjem pri izklopu

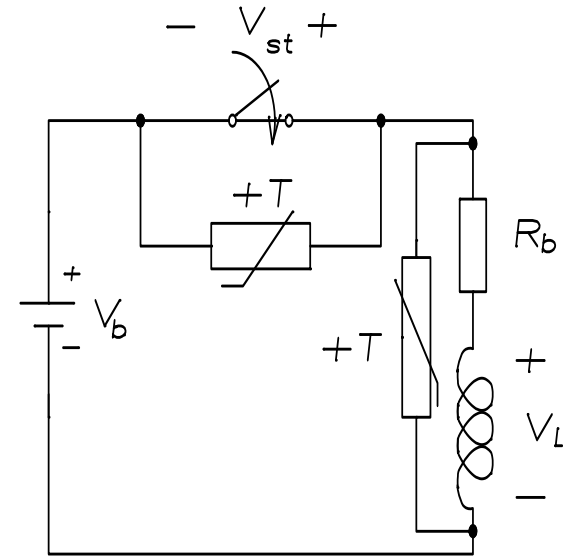
- Zaščita stikal pred iskrenjem je pomembna zaradi:
 - daljše življenjske dobe,
 - nižjih EM motenj (EMI - Electromagnetic Interference),
 - varnosti
- Iskrenja ne bo, če omejimo hkrati in tok in napetost stikala med razmikanjem kontaktov pod določene vrednosti!
- Primer: Stikalo srednjih moči s srebrnimi kontakti:
 $I < 300 \text{ mA}$
 $U < 300 \text{ V}$
- Če je ena od obeh vrednosti presežena, lahko iskrenje samo zmanjšamo, odpraviti ga ne moremo.



Mehak izklop

Iskrenje se pojavlja pri izklopu induktivnega bremena (motorji, releji):

- V trenutku izklopa se na stikalu poleg napajalne napetosti V_b pojavi še celotna inducirana napetost V_{ind} , ki lahko zaradi naglega upadanja toka v trenutku izklopa oz. razmikanja kontaktov doseže trenutno zelo visoke vrednosti
- Časovni odvod toka di_L/dt je v trenutku preklopa **velik in negativen**:
($i_L(t) \rightarrow 0$; $di_L/dt < 0$)



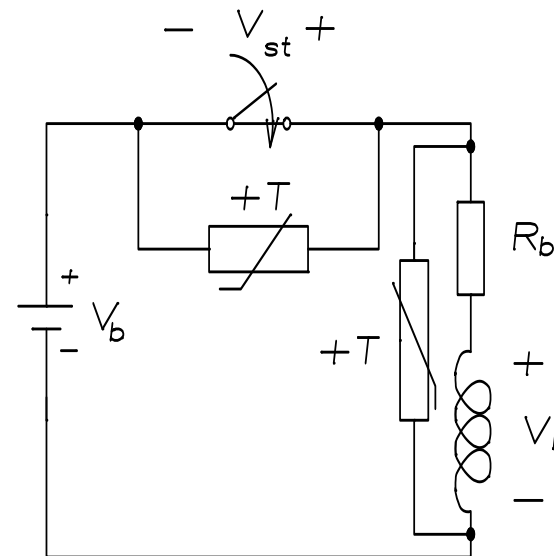
$$V_{st} + V_b = V_L = -L \cdot \left| \frac{di_L}{dt} \right|$$

$$-V_{st} = V_b + L \cdot \left| \frac{di_L}{dt} \right|$$

Zaščita stikala pred iskrenjem pri izklopu

PTC vežemo zaporedno s kontakti stikala:

- Pred preklopom teče celoten tok skozi stikalo,
- PTC je hladen (nizkoohmsko stanje).
- Ob razmikljanju kontaktov stikala napetost na PTC naraste → PTC se segreva → ko doseže T_S preklopi v visokoohmsko stanje ter zavre tok.
- Izklop je "mehak", brez iskrenja in tokovnih/napetostnih sunkov.
- Po izklopu stikala še vedno teče majhen tok skozi PTC.



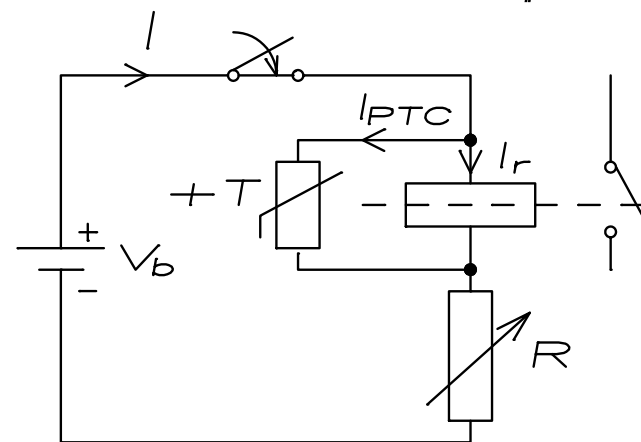
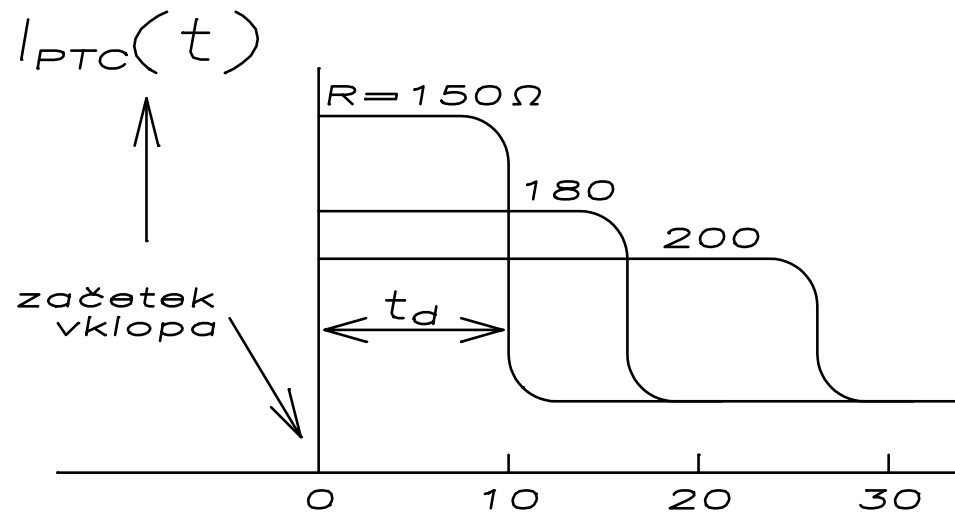
$$V_{st} + V_b = V_L = -L \cdot \left| \frac{di_L}{dt} \right|$$

$$-V_{st} = V_b + L \cdot \left| \frac{di_L}{dt} \right|$$

Zakasnilni člen

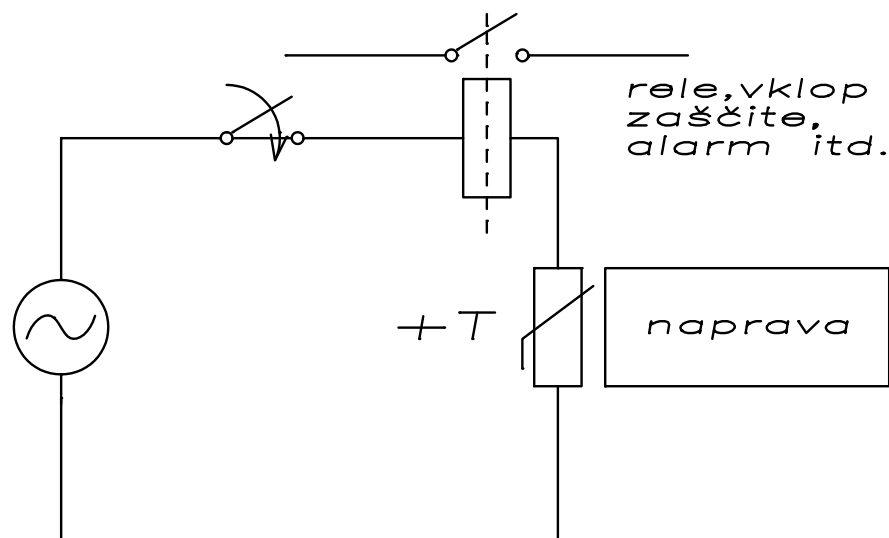
Vezje (rele) vklopimo z zakasnitvijo:

- Zakasnilni člen dobimo, če **vzporedno** k navitju releja vežemo **PTC termistor**
- Ko vklopimo stikalo, je PTC še v hladnem, nizkoohmskem stanju.
- Ves tok teče skozi PTC, rele ne preklopi → PTC se segreva.
- Ko se PTC segreje do T_{sr} , preklopi v visokoohmsko stanje, preneha odžirati tok navitju releja, ki zato preklopi.



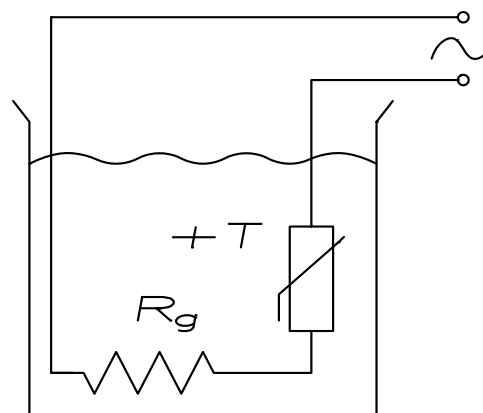
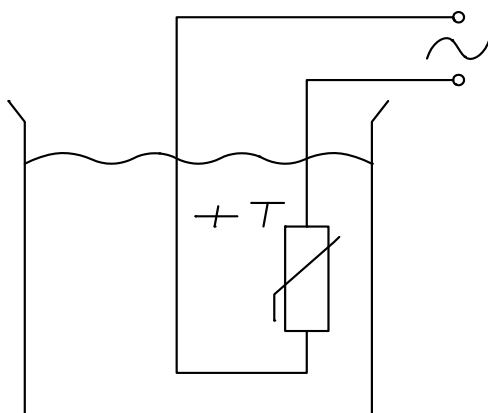
Zaščita poljubnih naprav pred temperaturno preobremenitvijo

- PTC uporabljen kot detektor previsoke temperature ščitene naprave (npr. zaščita navitij elektromotorjev)
- Ko temperatura naprave iz nekega vzroka (P_{el} , T_A) doseže T_S bo PTC termistor preklopil v visokoohmsko stanje



Termostatiranje (ON-OFF regulacija T)

- Vzdrževanje temperature s PTC termistorjem:
 - PTC je kontrolni element in grelec obenem
 - PTC je samo kontrolni element, ki krmili moč na grelcu.
 - Uporaba: Ravnalnik las, osveževalec prostora ...
- Temperatura termostatiranja je določena s T_S PTC termistorja:
 - dokler je temperatura v termostatiranem prostoru pod T_S ,
 - PTC v nizkoohmskem stanju \rightarrow tok teče \rightarrow grelec ON \rightarrow T raste.
 - Pri $T \approx T_S$, PTC preklopi v visokoohmsko stanje, tok $\approx 0 \rightarrow$ grelec OFF, T pada.

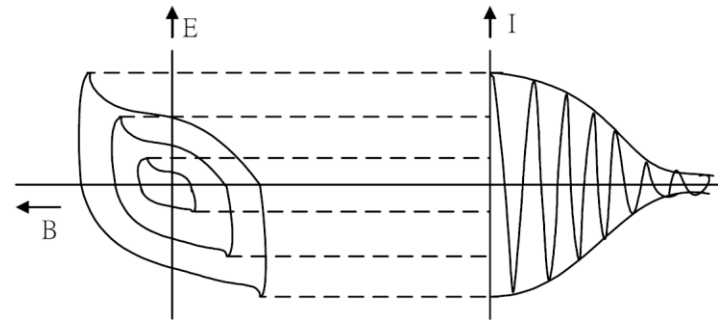


Uporaba PTC kot grelec

- PTC keramični materiali imajo zanimive lastnosti tudi kot grelni materiali.
- Trakovi ali plošče iz PTC polprevodniške keramike služijo lahko kot grelci, ki imajo vrsto prednosti pred klasičnimi grelci:
 - **avtotermostatiranje**: Ko temperatura preseže T_S , se grelec sam izklopi. Ko temperatura upade, se vklopi, itd.
 - **avtostabilizacija**: grelna moč je skoraj neodvisna od variacij napajalne napetosti: Če napetost upade, se zniža temperatura in s tem upornost materiala, zato zraste tok in se s tem dvigne segrevanje na prvotno raven.
 - disipacija moči se odvija v notranjosti grelca, kar podaljšuje njegovo življenjsko dobo

Uporaba PTC: Degaussing

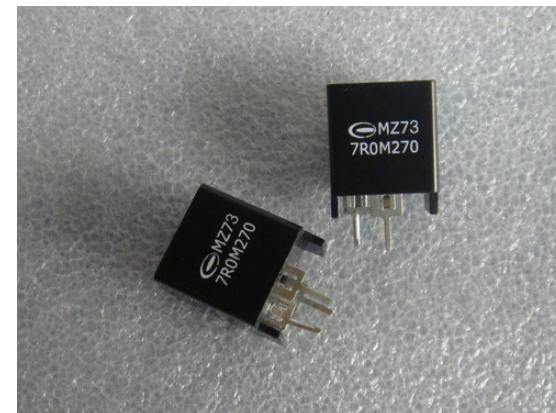
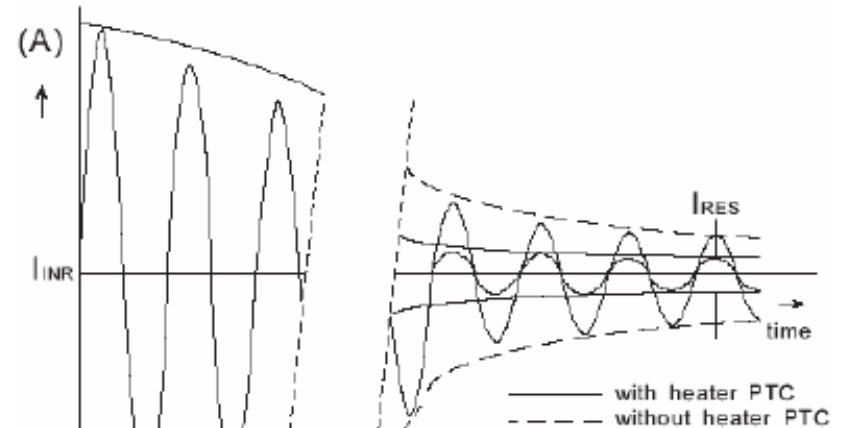
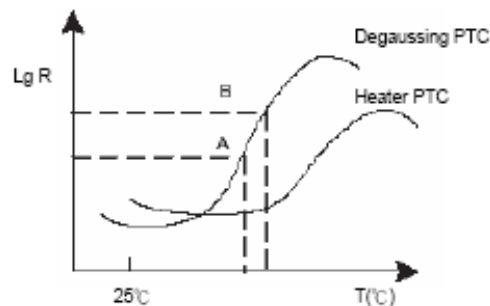
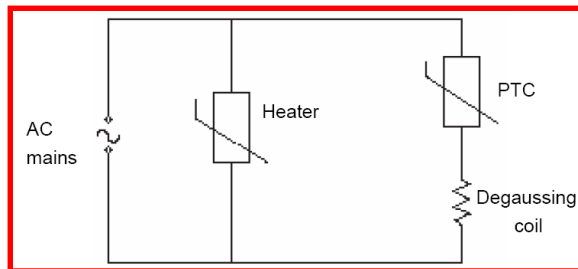
- CRT zasloni imajo kovinsko ploščo za usmerjanje elektronskega žarka. Ta plošča (shadow mask) pobira močna zunanja magnetna polja, ki povzročajo razmazano barvo zaslona.
- Razmazanju barve se izognemo, če ploščo razmagnetimo ($B=0$).
- CRT zasloni imajo v ta namen okoli prednjega dela zaslona navito bakreno tuljavo (degaussing coil).
- Proces razmagnetjenja povzroči, da magnetno polje v cevi zaoscilira s padajočo amplitudo.
- Upadajoče oscilacije magnetnega polja povzročimo s tokovnim pulzom, katerega amplitudo regulira PTC termistor.



VIR: [Wiki](#), [CPTC thermistor](#)

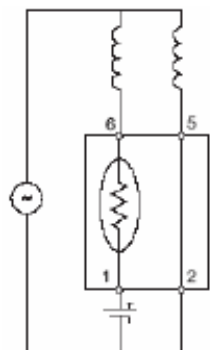
Uporaba PTC: Degaussing

- Pomembni podatki PTC:
- Nazivna upornost R_N
- Nazivna napetost V_R
- Največja napetost V_{MAX}
- Potek upadanja toka skozi element

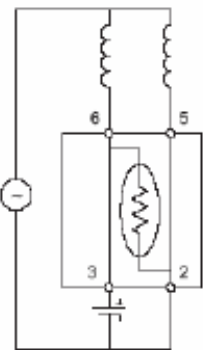


Uporaba PTC: Zagon motorja

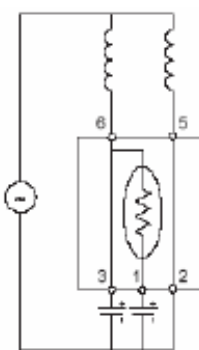
- Za zagon enofaznega motorja uporabimo PTC pri zakasnitvi izklopa pomožnega navitja (ko motor pospeši)



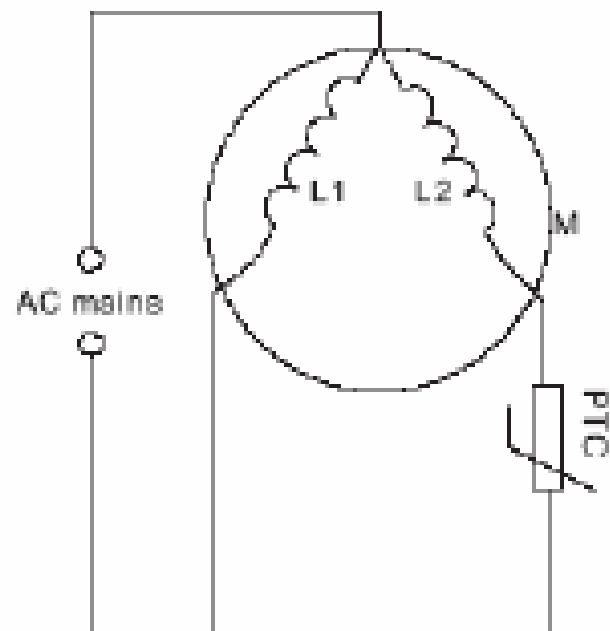
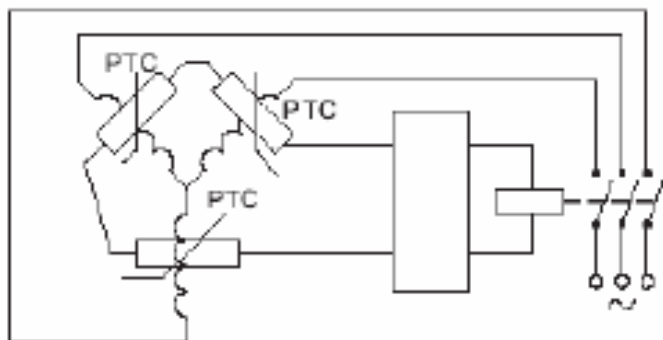
start



drive



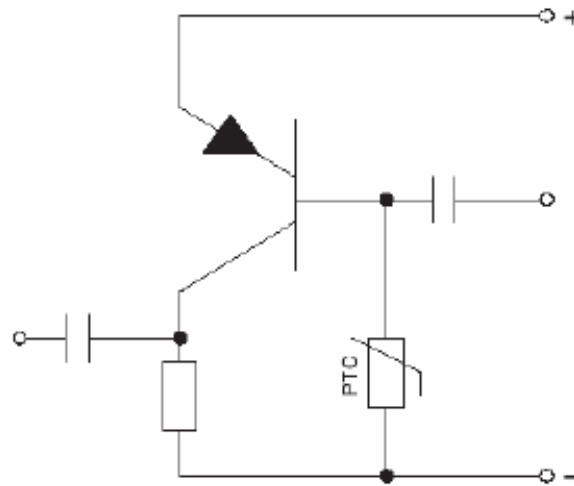
start-drive



Zaščita 3 faznega motorja

Uporaba PTC: Zaščita BJT

- Ob pregrevanju BJT se zmanjša bazni tok zaradi segrevanja PTC in tranzistor se zapre.

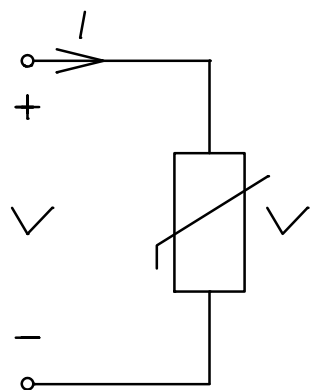


Komponente, sestavi in senzorji

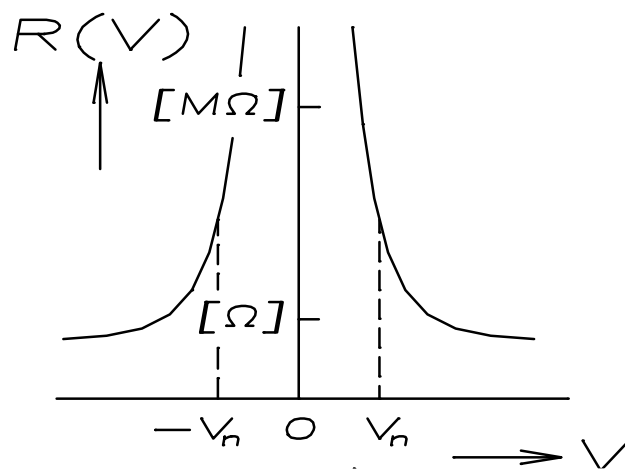
Varistorji

Varistorji

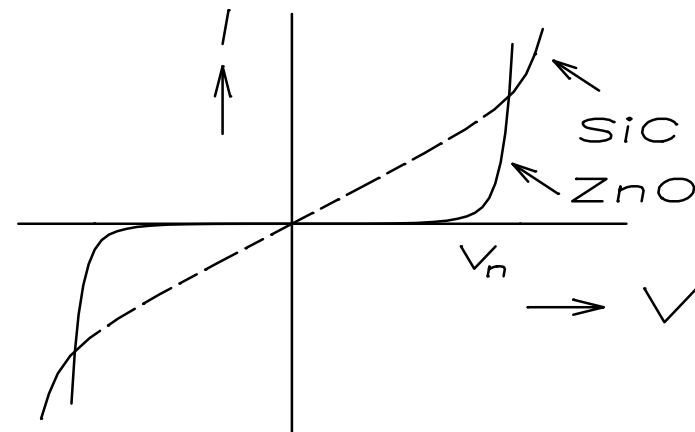
- VDR (Voltage Dependent Resistors - Napetostno odvisni upori), upori z visoko **nelinearno odvisnostjo upornosti od napetosti**.
- Pri prekoračitvi **nazivne (ang. nominal) napetosti** V_n (napetost kolena) upornost elementa naglo upade oz. tok naglo naraste



simbol VDR



$R(U)$ karakteristika



$I(U)$ karakteristika

Delovanje VDR

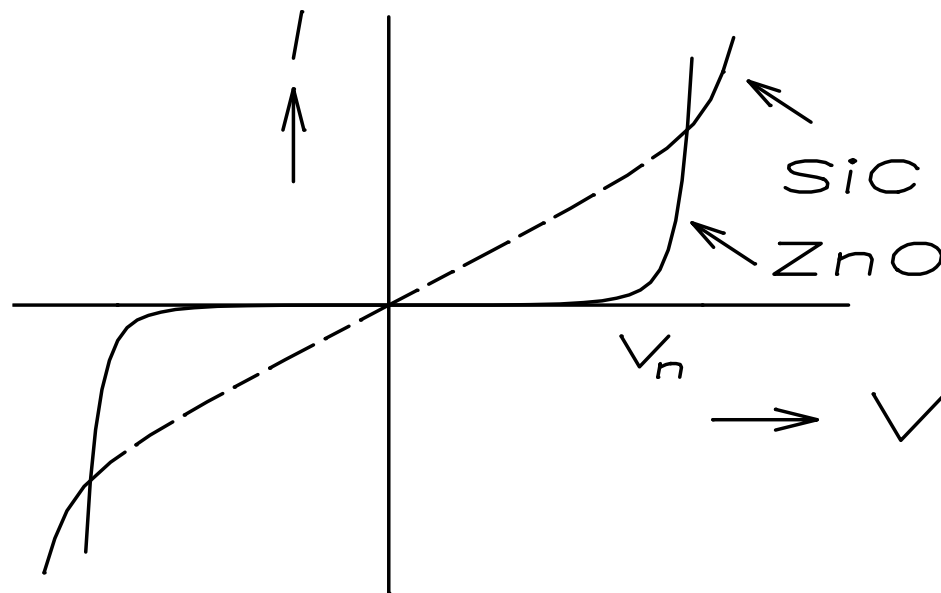
- **Materiali** VDR so kovinski oksidi silicijev karbid (SiC), cinkov oksid (ZnO).
- Tehnologija izdelave varistorjev je podobna ostalim keramičnim tehnologijam.

Delovanje:

- **Pri nizki napetosti**, manjši od nazivne napetosti V_n → kot pri PTC:
 - Na površini zrn so bariere, brez prostih nosilcev → izolatorska področja
 - VDR izkazuje visoko upornost
- **Pri visoki napetosti**, večji od nazivne napetosti V_n
 - Pride zaradi visokih napetosti oz. električnih polj v bariernih področjih do tuneliranja elektronov skozi bariere,
 - Bariere se lokalno segrevajo do zelo visokih temperatur → generacija novih nosilcev → tok raste
 - Upornost varistorja naglo **upade** za **precej razredov velikosti**.
 - Proces imenujemo preboj → naglo upadanje upornosti
Proces preboja je **zelo hiter** v primerjavi z ostalimi zaščitnimi elementi (Zener dioda)

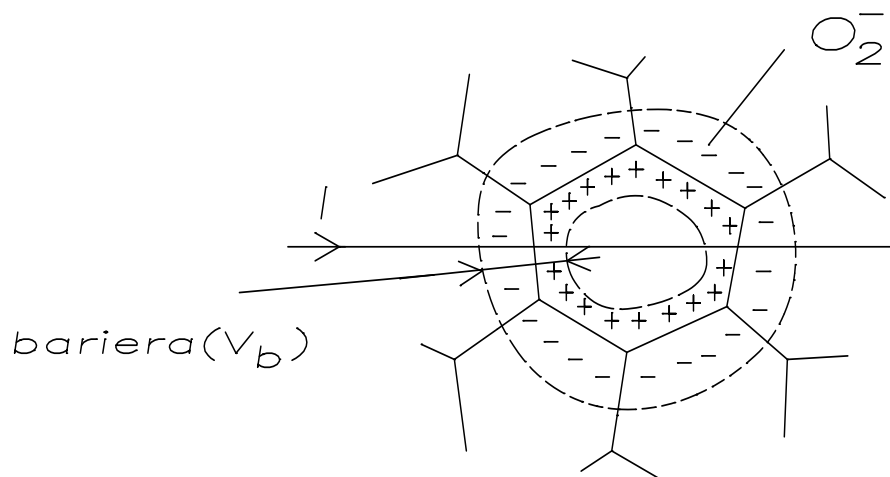
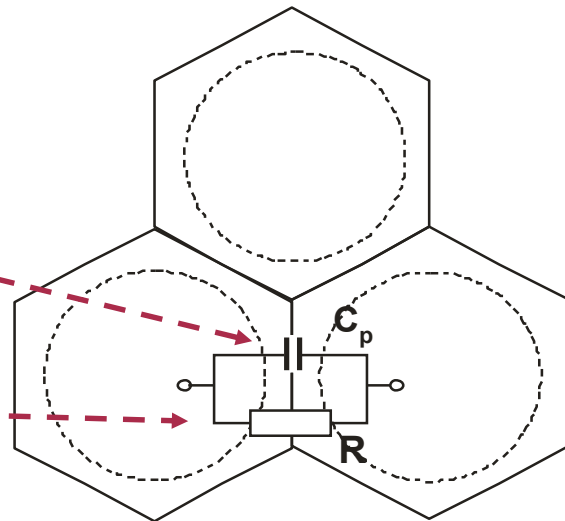
Statična I(U) karakteristika varistorjev

- Nelinearnost statične I(V) karakteristike varistorja je določena s pojavi v bariernih področjih na mejah med kristalnimi zrn materialih.
- $V_{VDR} < V_n \rightarrow$ visoka upornost \rightarrow tokovi majhni
- $V_{VDR} > V_n \rightarrow$ R varistorja upada \rightarrow tokovi hitro naraščajo.
- VDR deluje enako pri obeh polarizacijah ($V_{VDR} > 0$ in $V_{VDR} < 0$) zato je **uporaben za izmenično (AC) delovanje**.
- AC delovanje je prednost VDR pred Zener diodo. Pri Zener diodi moramo uporabiti dve
- ZnO varistorji imajo bolj izrazit napetostni prag (V_n) kot SiC varistorji \rightarrow prevladujejo ZnO VDR.



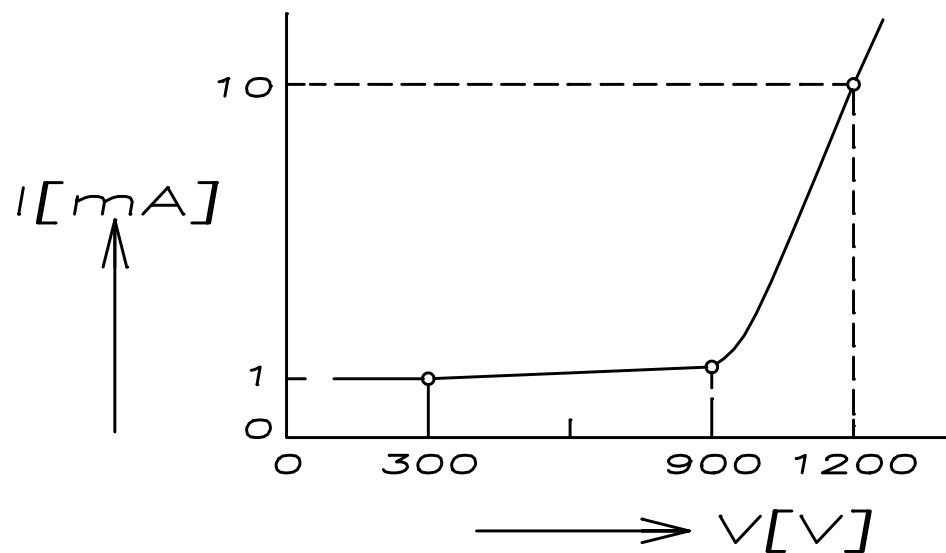
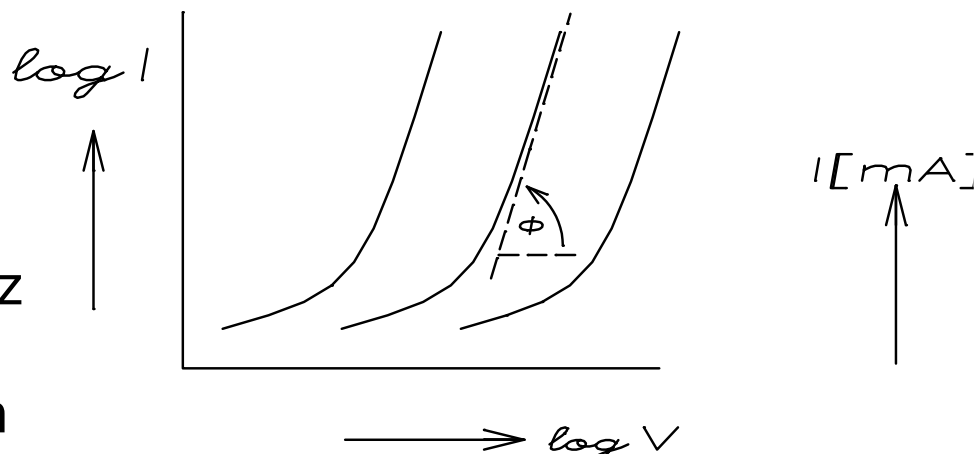
VF delovanje VDR

- Upoštevamo še parazitne kapacitivnosti bariernih področij C_p
- C_p so vezane vzporedno (premostitev) z upornostjo barrier R , zato pri VF signalih toki naraščajo oz. upornost varistorja upada.
- ZnO varistorji so frekvenčno boljši od SiC varistorjev,
 $f_{\text{UPORABE}}(\text{SiC}) \approx 1 \dots 10 \text{ kHz}$



Statična I(U) karakteristika varistorjev

- I(V) karakteristike so zaradi velikih variacij napetosti in tokov podane v log-log merilu
 - I(V) karakteristiko podajajo z vrednostmi napetosti in tokov v treh značilnih točkah po toku:
 - pod kolenom $U(I=1\text{ mA})$
 - v kolenu $U(I=2\text{ mA})$
 - nad kolenom $U(I=10\text{ mA})$
- oz. po napetosti:
- pod kolenom $I(U=300\text{ V})$
 - v kolenu $I(U=900\text{ V})$
 - nad kolenom $I(U=1200\text{ V})$



Analitični opis VDR → V(I)

- V(I) odvisnost varistorja je podana z dvema konstantama C, β
- Konstanta β je odvisna od materiala:
 - $\beta(\text{SiC VDR}) \approx 0.15 \dots 0.40$
 - $\beta(\text{ZnO VDR}) \approx 0.02 \dots 0.035$
- Konstanta C je zaradi velikih variacij podana redkeje, $C \approx 10 \div 5000 \text{ V/A}^{\beta}$.
- Zaradi variacij C opis V(I) ni razširjen.

$$V(I) = C \cdot I^{\beta}$$

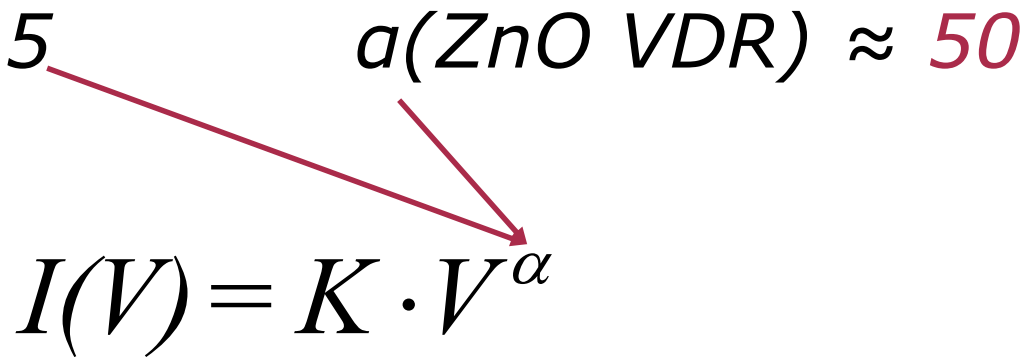
Analitični opis VDR → I(V)

Bolj razširjen je opis I(V) s konstantama K, a
($K = 1/C^a$; $a = 1/\beta$)

- Konstanta a podaja **strmino naraščanja** toka z napetostjo

$$a(\text{SiC VDR}) \approx 5$$

$$a(\text{ZnO VDR}) \approx 50$$


$$I(V) = K \cdot V^a$$

Temperaturne lastnosti VDR

- Področje delovanja VDR: $-25 \dots +125^{\circ}\text{C}$ za delovanje pri ničelni moči oz. pri zanemarljivem lastnem segrevanju
- VDR so močno temperaturno odvisni elementi.
- Glavna **temperaturna odvisnost** se skriva v odvisnosti **konstante C** od temperature, odvisnost $\beta(T)$ je zanemarljiva.
- Temperaturna odvisnost VDR je določena s TK_C :

$$V(I) = C \cdot I^{\beta}$$

$$TK_C = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dT}$$

TK_C je velik in negativen;

$$TK_C \approx -0.1\%/^{\circ}\text{C}$$

Temperaturni koeficient pri konstantnem toku $\rightarrow TK_I$

- VDR napajamo tako, da je tok skozi njega konstanten.
- Pri neki spremembi temperature varistorja T vzdržujemo konstanten tok I in opazujemo relativno spremembo napetosti.
- Temperaturni koeficient varistorja je razmerje med relativno spremembo napetosti pri spremembi temperature:

$$TK_I = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \Big|_I = \frac{d}{dT} (\ln C - (1 - \beta) \cdot \ln I) \Big|_I \approx TK_C$$

TK_C $\frac{d\beta}{dT} \neq 0$

Pri **konstantnem toku varistorja** je pri spremembi temperature relativna **sprememba napetosti majhna in negativna**, praktično enaka TK_C

Temperaturni koeficient pri konstantni napetosti → TK_V

- VDR napajamo tako, da je napetost na njem konstantna.
- Pri neki spremembi temperature varistorja T vzdržujemo konstantno napetost U in opazujemo relativno spremembo I .
- Temperaturni koeficient varistorja bo razmerje med relativno spremembo toka pri spremembi temperature:

$$TK_V = \frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dT} \Big|_V = \frac{d \ln(V/R)}{dT} \Big|_V = \frac{d}{dT} [\ln V - \ln R] \Big|_V =$$

$$TK_V = -\frac{d}{dT} (\alpha \cdot \ln C - (\alpha - 1) \cdot \ln V) \Big|_V \approx -\alpha \cdot TK_C$$

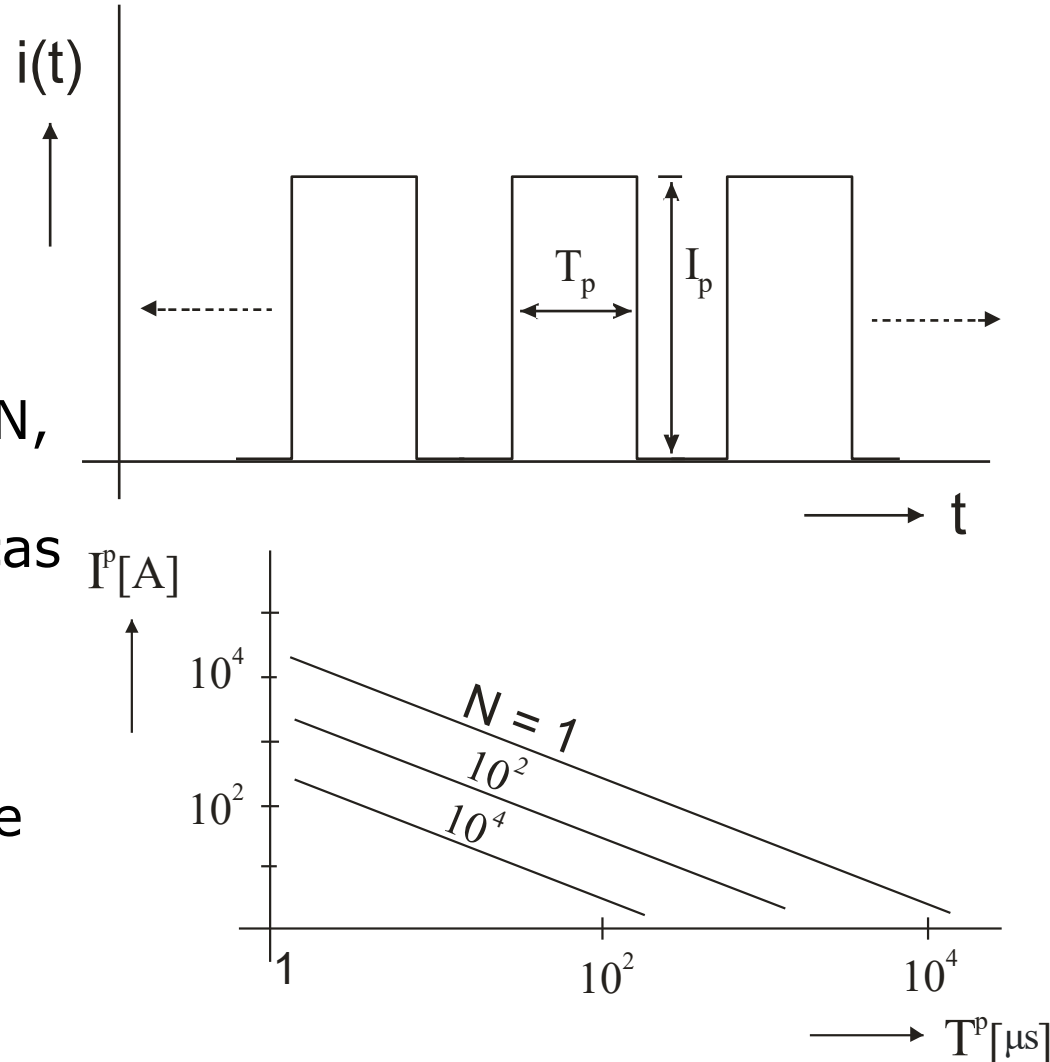
$$\frac{d\alpha}{dT} \neq 0$$

Pri konstantni napetosti na varistorju je pri spremembi temperature relativna sprememba toka velika in pozitivna,
Tipično: $-\alpha \cdot TK_C = 5\%/^{\circ}\text{C}$ za ZnO VDR ($\alpha = 50 \rightarrow TK_C = 0.1\%/^{\circ}\text{C}$)

Obremenljivost varistorjev

Običajno so varistorji impulzno obremenjeni:

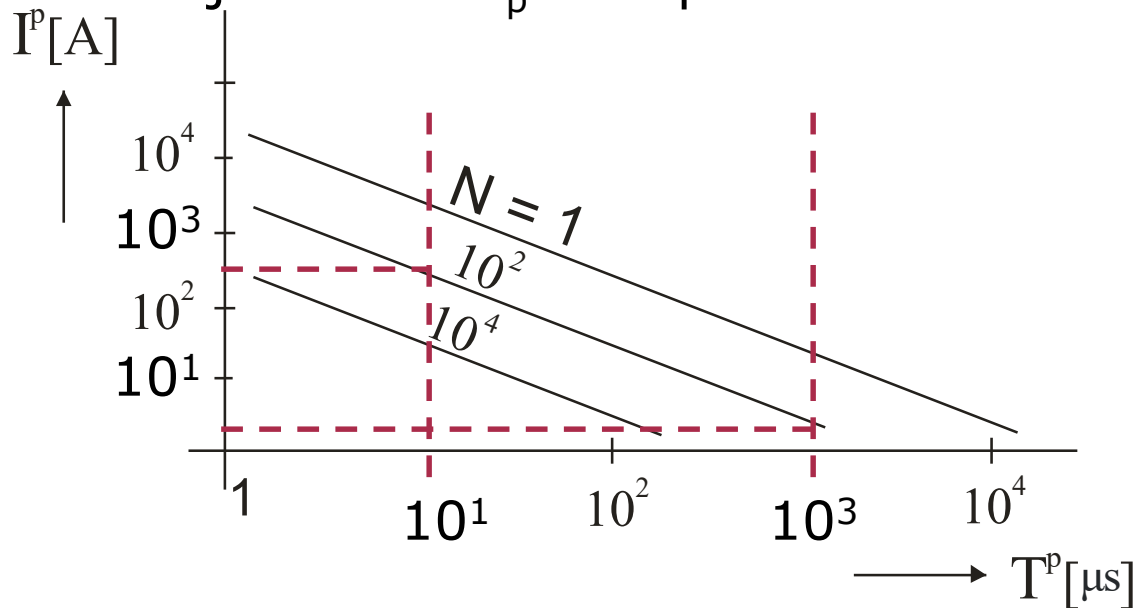
- Kakšno obremenitev VDR preživi brez degradacije?
- Odgovor je **obremenljivost**:
- Maksimalno število pulzov N , ki jih VDR preživi brez degradacije. Pri tem je T_p čas trajanja pulza, I_p je amplituda pulza.
- Število pulzov N upada s časom trajanja in amplitudo pulzov



Obremenljivost varistorjev

VDR z danim grafom obremenljivosti mora prenesti obremenitev z $N = 100$ tokovnimi pulzi dolžine $T_p = 100\mu\text{s}$. Kolikšna je maksimalna dopustna amplituda pulzov I_p ?

- Kaj če pulze skrajšamo na $T_p = 10\mu\text{s}$?



$T_p = 100 \mu\text{s},$	$N = 100$	\rightarrow	$I_p = 5 \text{ A}$
$T_p = 10 \mu\text{s},$	$N = 100$	\rightarrow	$I_p = 50 \text{ A}$

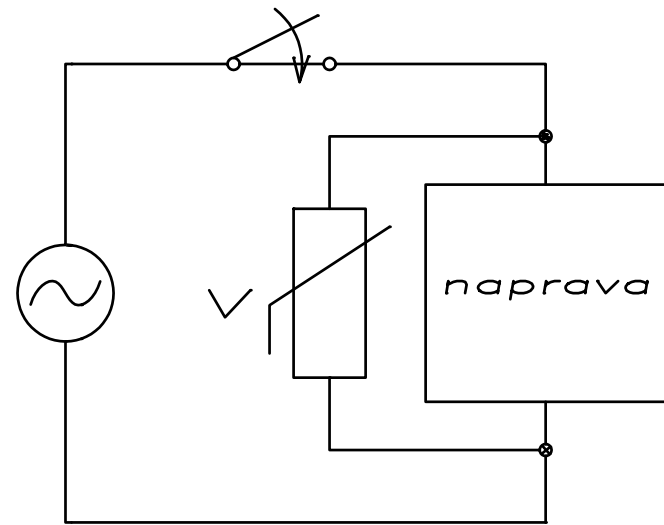
Osnovni podatki VDR

- $P_n \approx 0.1 \dots 1\text{W}$
- $U_n \approx 10\text{V} \dots 1\text{kV}$
- $T_{\text{DELOVANJA}} \approx -25 \dots +125^\circ\text{C} @(P_0)$
 $T_{\text{DELOVANJA}} \approx -25 \dots +55^\circ\text{C} @(P_n)$
- $f_{\text{DELOVANJA}} \approx 1 \text{ kHz} \dots 10 \text{ kHz} (\text{SiC VDR})$

Uporaba: Omejevanje napetosti na bremenu

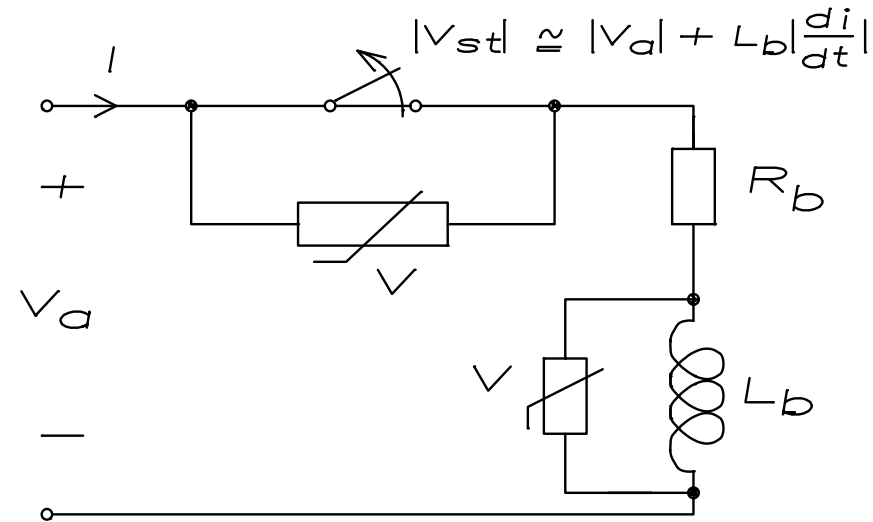
VDR kot **zaščitni element** vežemo **vzporedno** k varovani napravi:

- Kadar hoče napajalna napetost preseči nazivno napetost varistorja V_n → skozi varistor steče velik tok in napetost na varistorju ne bo presegla njegove nazivne napetosti V_n .
- Presežna moč se sprošča na varistorju, nazivna moč elementa P_n pri dani temperaturi ambianta T_A mora biti primerno velika



Uporaba: Zaščita pred iskrenjem pri izklopu

- Varistor dodamo **vzporedno** k stikalu.
- Varistor v trenutku izklopa omeji napetost na stikalu pod nazivno napetost $V_n \rightarrow$ zmanjša iskrenje
- Pri izklopu induktivnih bremen vsa induktivna bremena zaščitimo s paralelnimi varistorji



Elektronske komponente in senzorji

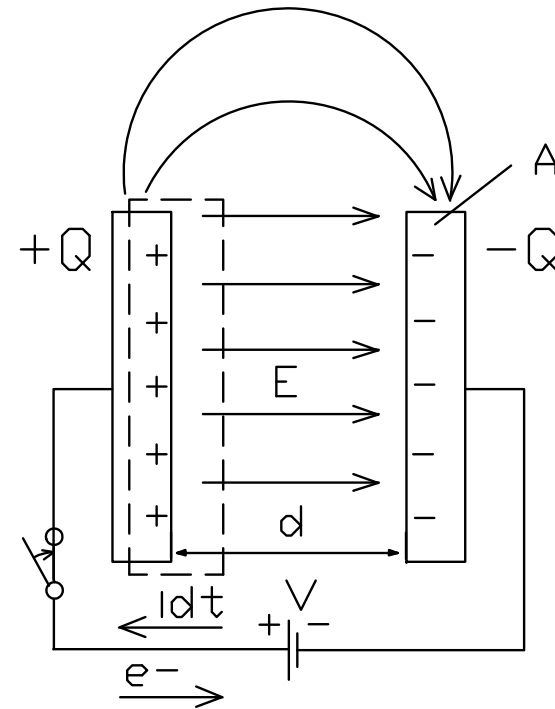
Kondenzatorji

Kondenzatorji

Ko kondenzator priključimo na napetostni vir, steče kratkotrajen tok, na ploščah se pojavi naboj Q in med ploščama poljska jakost E . Ravnovesje se vzpostavi, ko postane po Kirchoffovem zakonu vsota napetosti v zanki enaka nič.

Če odstranimo napetostni vir, naboj na ploščah nabitega kondenzatorja ostane in ga lahko hranimo do morebitne kasnejše izpraznitve.

Po tej osnovni lastnosti, zmožnosti hranitve naboja, je element dobil tudi svoje ime - kondenzator (condenser, capacitor)



$$E = \frac{V}{d}$$

Kondenzatorji

$C \rightarrow$ količina naboja dQ , ki jo shrani ali odda pri neki spremembi napetosti dV

$$C(V) = \frac{dQ(V)}{dV}$$

Če C ni odvisna od napetosti:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Dielektrik

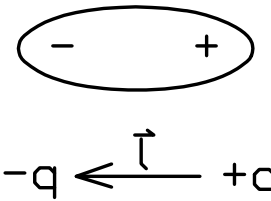
Material med ploščama kondenzatorja:

- Mehanska ločitev elektrod (preprečuje kratek stik)
- Višjo prebojno napetost (dobri dielektriki → višje prebojne trdnosti kot zrak)
- Poveča kapacitivnost (za faktor relativne dielektričnosti ϵ_r)

Polarizacija dielektrika – polarne molekule

- V primeru polarnih molekul dielektričnega materiala centra pozitivnega naboja (+q) in negativnega naboja (-q) ne sovpadata.
- Razdaljo med njima označimo z l (smer od +q proti -q)
- Molekula ima dipolni moment:

$$\vec{p} = q \vec{l}$$



$$a) \vec{E}=0, \vec{p}>0$$

Polarizacija dielektrika – nepolarne molekule

- $E=0 \rightarrow$ centra pozitivnega in negativnega naboja sovpadata ($l = 0$; $p=0$)
- $E \neq 0 \rightarrow$ zaradi nasprotnih električnih sil se centra pozitivnega in negativnega naboja razmakneta \rightarrow induciran električni dipolni moment

$$\vec{p} = 0$$



$$b) \vec{E}=0, \vec{p}=0$$



$$-q \leftarrow \vec{l} \rightarrow +q$$

$$c) \vec{E}>0, \vec{p}>0$$

Polarizacija

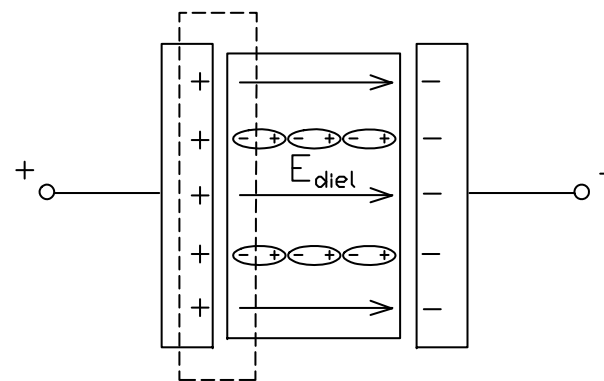
Polarizacija dielektrika opisuje stopnjo urejenosti električnih dipolov v dielektriku:

- $E=0 \rightarrow$ molekule neurejene, vse smeri so zastopane enakomerno \rightarrow totalni dipolni moment na enoto volumna oz. **polarizacija je enaka 0**
- $E \neq 0 \rightarrow$ polarne molekule se uredijo v smeri polja \rightarrow V primeru nepolarnih molekul pride pred tem najprej do inducirane dipolnega momenta ko se zaradi nasprotnih električnih sil razmakneta centra pozitivnega in negativnega naboja in s tem vzbudi dipolni moment. Nato se inducirani dipolni momenti uredijo v smeri polja.
- $E \neq 0 \rightarrow$ se električni dipolni momenti v dielektričnem materialu uredijo oz. **dielektrik se polarizira.**
- Opisana ureditev dipolov ima važne posledice za lastnosti kondenzatorja:
 - pozitivne (npr. povečanje kapacitivnosti) in
 - negativne (npr. dielektrična absorpcija)

Kondenzator z dielektrikom

- Dipoli se pod vplivom električnega polja uredijo.
- Zato se del naboja na ploščah nevtralizira preko induciranih dipolov v dielektriku
- Zato ima poljska jakost nižjo vrednost kot v primeru brez dielektrika
- Relativna dielektričnost (ϵ_r) dielektrika je faktor, za katerega se polje (napetost) na kondenzatorju zniža po vstavitvi dielektrika med plošče

Dielektrik	ϵ_r
vakuum, zrak	1
sljuda	5
stekla	5 ... 10
feroelektriki (TiO_2)	170
specialne keramike	10^{+5}

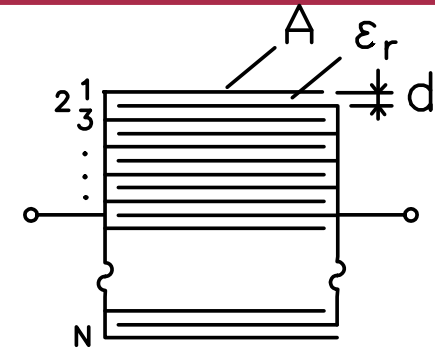


$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Kapacitivnost resničnih kondenzatorjev

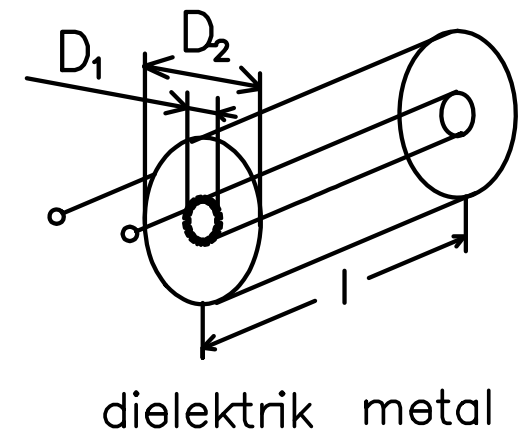
Ploščati (blok) kondenzator
z N dielektričnimi plastmi

$$C = 0.0885 \cdot \epsilon_r \cdot (N - 1) \cdot \frac{A}{d} \quad C[pF] \quad \text{dimenzije[cm]}$$



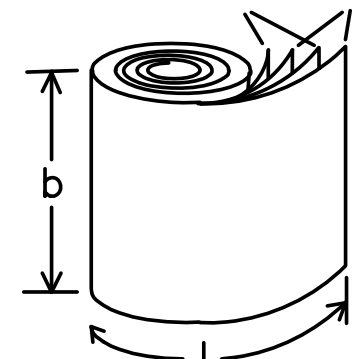
Cilindrični kondenzator

$$C = 0.556 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{l}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} \quad C[pF] \quad \text{dimenzije[cm]}$$



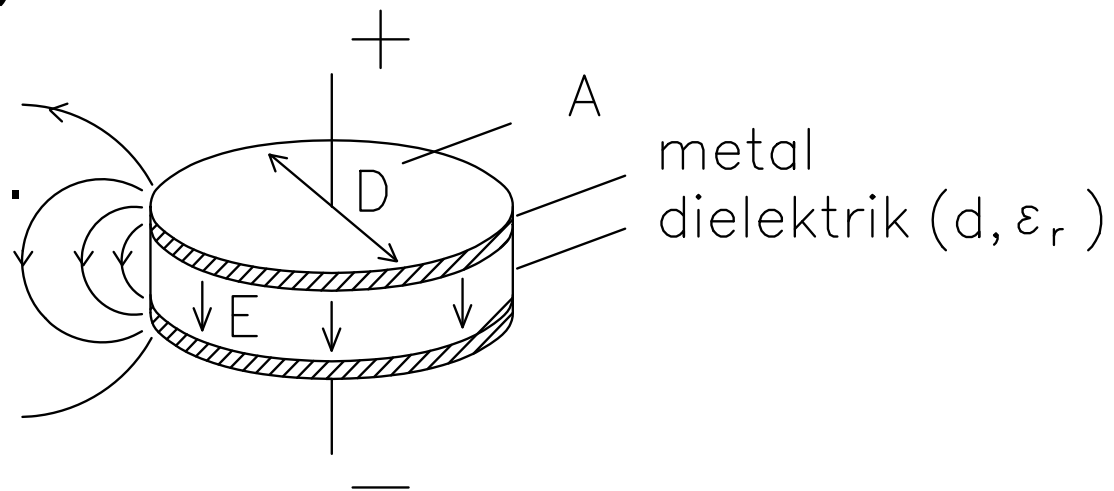
Naviti cilindrični kondenzator

$$C = 0.177 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{b \cdot l}{d} \quad C[pF] \quad \text{dimenzije[cm]}$$



Kapacitivnost resničnih kondenzatorjev

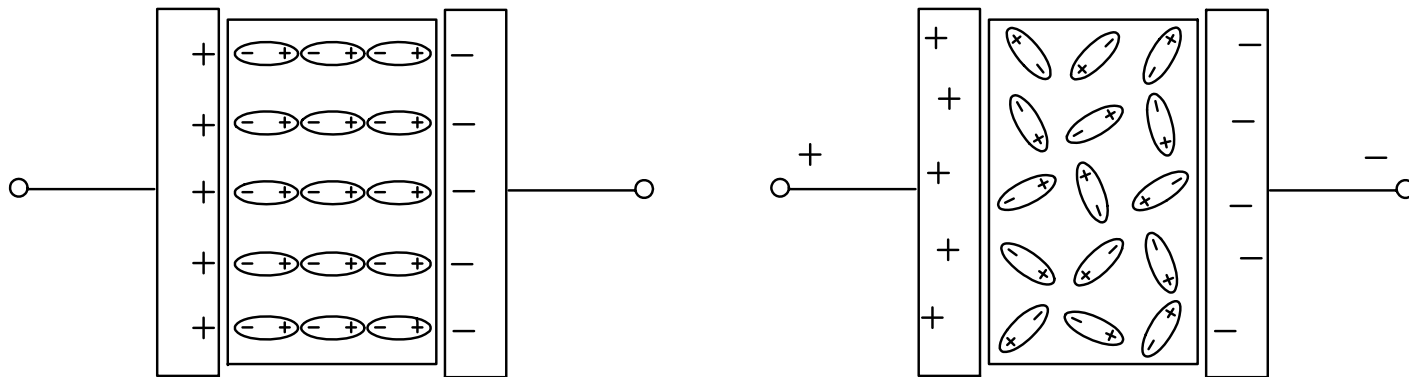
- Pri poenostavljeni izpeljavi kapacitivnosti je zanemarjen vpliv izhajanja električnega polja na robu kondenzatorja.
- Drži precej točno za ($d \ll D$)
- Če je $d \approx D$ moramo upoštevati tudi izhajanje (leakage) električnega polja.
- Natančnejša analiza kapacitivnosti vodi do korekturnih členov v izrazih za izračun kapacitivnosti.



$$C \cong 0.0885 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} + 1.5 \cdot \frac{d}{D} \left[\ln \left(25 \cdot \frac{D}{d} - 1.305 \right) \right] \quad C [pF] \quad \text{dimenzije [cm]}$$

Dielektrična absorpcija

- C nabijemo → na hitro izpraznimo → $U_C = 0$
- Če čez nekaj časa pomerimo napetost na odprtih sponkah, ugotovimo, da se ponovno pojavila neka napetost!
- Vzrok za to je **dielektrična absorpcija**



Dielektrična absorpcija

- Praznjenje C:
Dielektrik je polariziran → dipoli urejeni → del naboja na ploščah vezan oz. absorbiran na dielektrik.
 - Na hitro spraznimo → odteče le nevezani naboj
 - Absorbirani (vezan) naboj se osvobaja počasneje, v skladu s hitrostjo prehajanja dielektrika iz urejenega polariziranega stanja v neurejeno nepolarizirano stanje → to je naboj, ki ga izmerimo po spraznitvi
 - Prehajanje naboja traja od nekaj milisekund do nekaj ur.
- Polnjenje kondenzatorja:
 - ko se napetost na kondenzatorju ustali še vedno izmerimo majhen tok - zaradi dodatne absorpcije naboja v dielektriku, ki se počasi polarizira proti končnemu stanju
- Oba pojava sta dielektrična absorpcija
- Dielektrična absorpcija je podana z vrednostjo novonastale napetosti V_R (Reappearing Voltage), ki se ponovno pojavi po nekem dogovorjenem času od trenutka izpraznitve kondenzatorja.

Dielektrična absorpcija

Povzroči:

- **Upadanje kapacitivnosti pri VF**
(zaradi absorbiranega/vezanega naboja na razpolago manjši prosti naboj od celotnega → nižja kapacitivnost)
- **Nastanek časovnih zakasnitev** pri popolnem polnjenju in praznjenju kondenzatorja pri vzbujanju z AC signali. Del energije se porabi za obračanje dipolov.

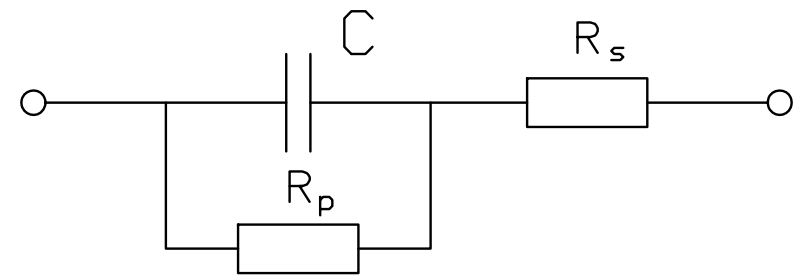
Lastnosti resničnega kondenzatorja

- Idealni kondenzator \rightarrow C brez parazitnih elementov \rightarrow pri izpraznitvi vrne vso vloženo energijo.
- Resnični kondenzator vsebuje tudi po strukturi **porazdeljene parazitne upornosti in induktivnosti**.
- Pri izpraznitvi ne vrne vse vložene energije, ker se del izgubi oz. pretvori v toploto, ki segreva kondenzator.

NF opis resničnega kondenzatorja

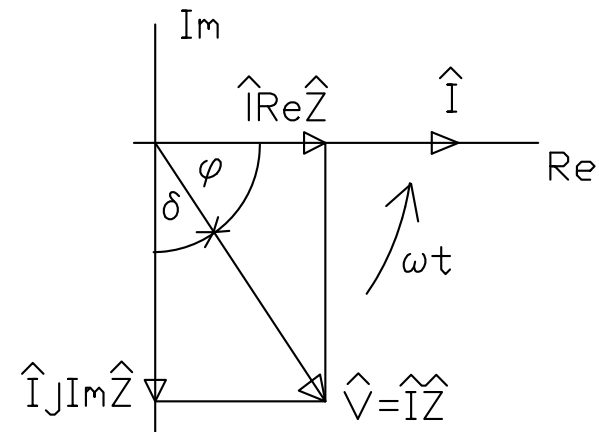
Nadomestno vezje s parazitnima upornostima, paralelno R_p in serijsko R_s

$$\hat{Z} = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C}$$
$$= \text{Re } \hat{Z} + j \text{Im } \hat{Z}$$



$$\text{Re } \hat{Z} = \frac{R_s + R_p + R_s (R_p \omega C)^2}{1 + (R_p \omega C)^2}$$

$$\text{Im } \hat{Z} = -\frac{R_p^2 \omega C}{1 + (R_p \omega C)^2}$$



NF opis resničnega kondenzatorja

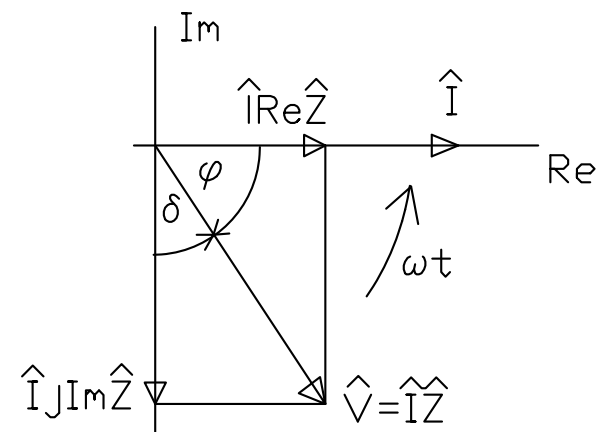
- R_p kondenzatorja podaja izgube v dielektriku oz. segrevanje kondenzatorja:
 - ohmske izgube oz. segrevanje zaradi izolacijskih tokov skozi dielektrik (frekvenčno neodvisen prispevek)
 - polarizacijske izgube oz. segrevanje zaradi rotacije dipolov pri AC signalih (frekvenčno odvisen prispevek) $R_p \approx G\Omega$ (upada s frekvenco).
- R_s kondenzatorja podaja izgube oz. segrevanje kondenzatorja zaradi ohmskih upornosti v resničnem kondenzatorju (upornost dovodnih žic, kontaktne upornosti, upornosti običajno tankih metalnih folij ali plasti). $R_s \approx 100m\Omega$.

Izgube v resničnem kondenzatorju

Fazni kot φ je manjši od $\pi/2$ za izgubni kot δ

Izgubni faktor $\text{tg}\delta$
določa izgube oz.
segrevanje
kondenzatorja
(loss factor, dissipation
factor)

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$$



Analitična določitev izgub

$$\begin{aligned} p(t) &= i(t)v(t) \\ &= I_M \sin \omega t V_M \sin(\omega t - \varphi) \\ &= \frac{I_M V_M}{2} \cos \varphi - \frac{I_M V_M}{2} \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

- Prvi člen predstavlja **moč**, ki je časovno neodvisna in se zato stalno troši ter tako vedno prispeva k **segrevanju oz. izgubam kondenzatorja**.
- Drugi člen predstavlja **izmenično moč**, ki jo kondenzator v celoti le prejema in oddaja ter zato ne prispeva k segrevanju oz. izgubam.

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\ &= \frac{I_M V_M}{2} \cos \varphi \\ &= I_{ef} V_{ef} \cos \varphi \end{aligned}$$

Izgubni kot δ je majhen:

$$\cos \varphi = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) = \sin \delta \cong \operatorname{tg} \delta$$

$$P = I_{ef} \cdot V_{ef} \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C \cdot V_{ef}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V_{ef}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta$$

Segrevanje - izgube kondenzatorja

Izgube so proporcionalne izgubnemu faktorju $\text{tg}\delta$:

- Dober kondenzator →

$$\text{tg}\delta < 10^{-4} \text{ oz. kvaliteta } Q = 1/\text{tg}\delta > 10^4$$

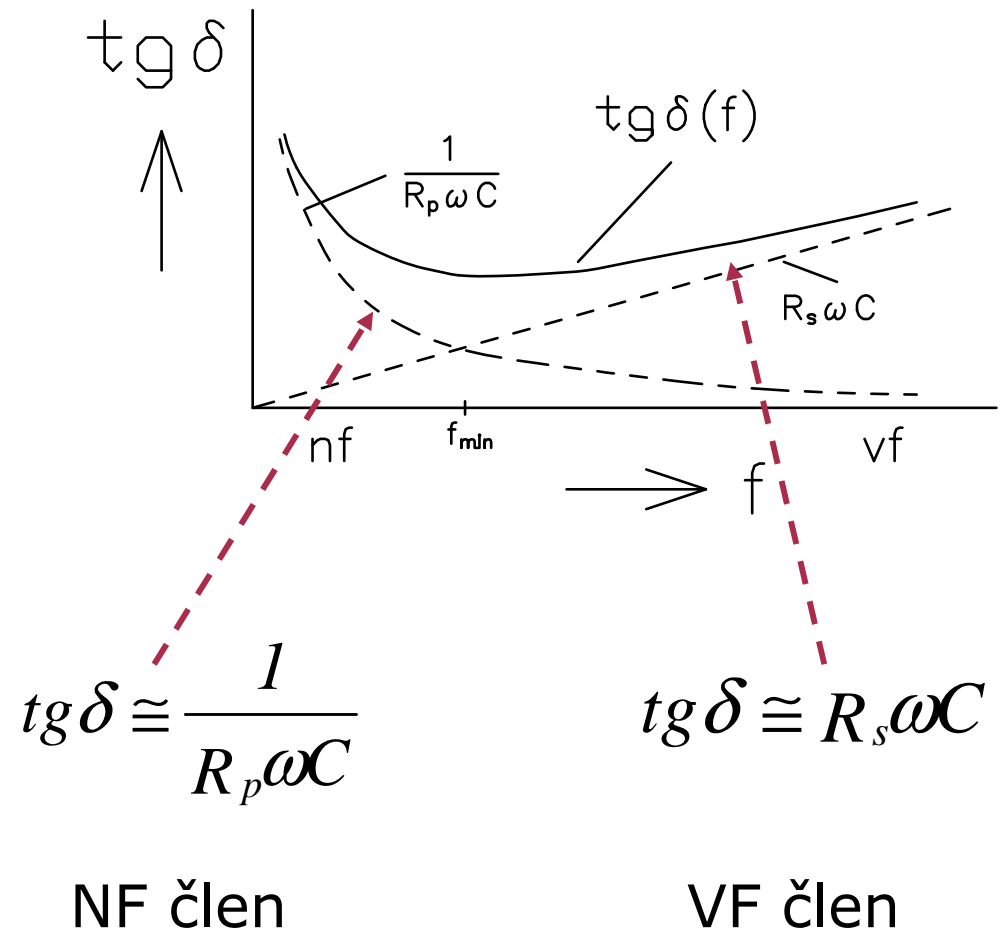
Frekvenční potek $\text{tg}\delta$

$$R_p \gg R_s$$

$$\text{tg}\delta = \frac{|\text{Re}\hat{Z}|}{|\text{Im}\hat{Z}|} = \frac{R_s + R_p + R_s(R_p\omega C)^2}{R_p^2\omega C}$$

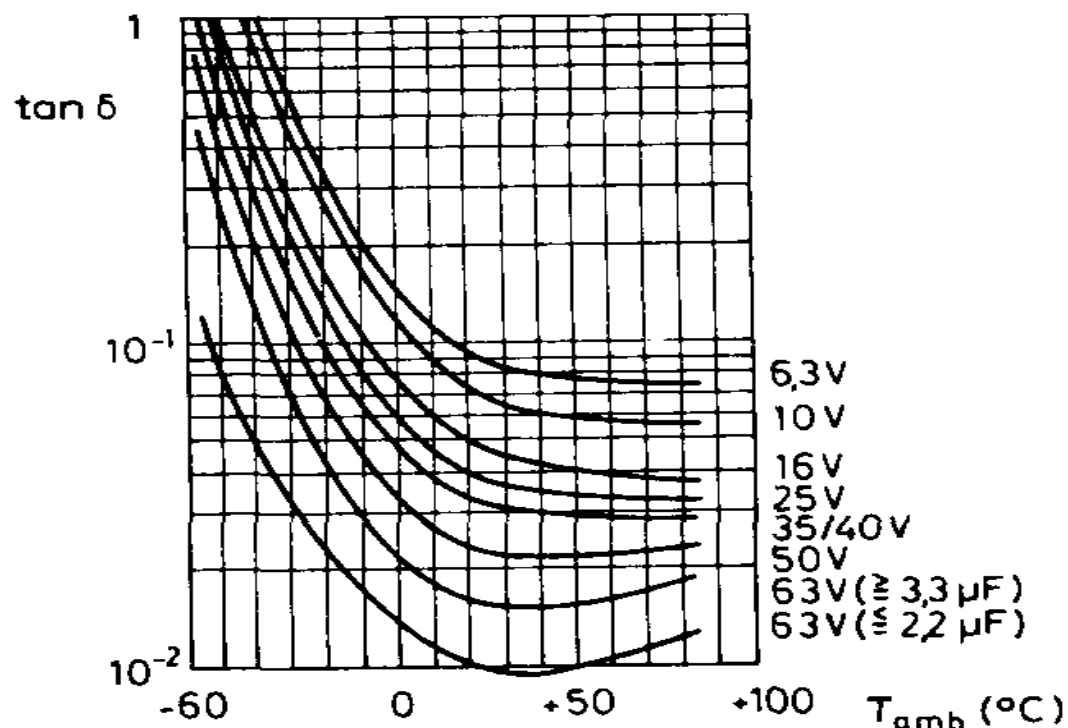
$$\text{tg}\delta = R_s\omega C + \frac{1}{R_p\omega C} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)$$

$$\text{tg}\delta \cong R_s\omega C + \frac{1}{R_p\omega C}$$



Temperaturni potek $\text{tg}\delta$

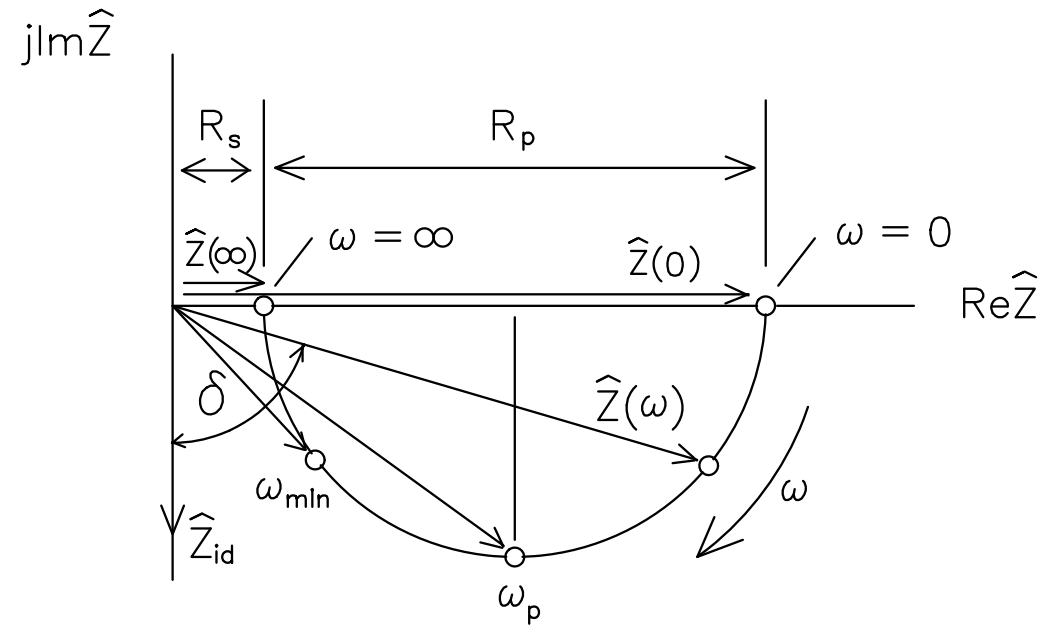
- S temperaturo se spreminjajo vsi elementi nadomestnega vezja R_S , R_p in C
- Izmerjeni diagrami: $\text{tg}\delta(T) \big|_f$ oz. $\text{tg}\delta(f) \big|_T$



VF analiza impedance kondenzatorja

$$\hat{Z} = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C} = R_s + \frac{R_p}{1 + j\frac{\omega}{\omega_p}}$$

$$\omega_p = \frac{1}{R_p C} = \frac{2\pi}{\tau_p}$$



- Karakteristična kotna frekvenca ω_p
- τ_p čas izpraznitve kondenzatorja skozi R_p

VF analiza impedance kondenzatorja

- Potek impedance v treh očitnih primerih:

$$\hat{Z} = R_s + \frac{I}{\frac{I}{R_p} + j\omega C} = R_s + \frac{R_p}{1 + j\frac{\omega}{\omega_p}}$$

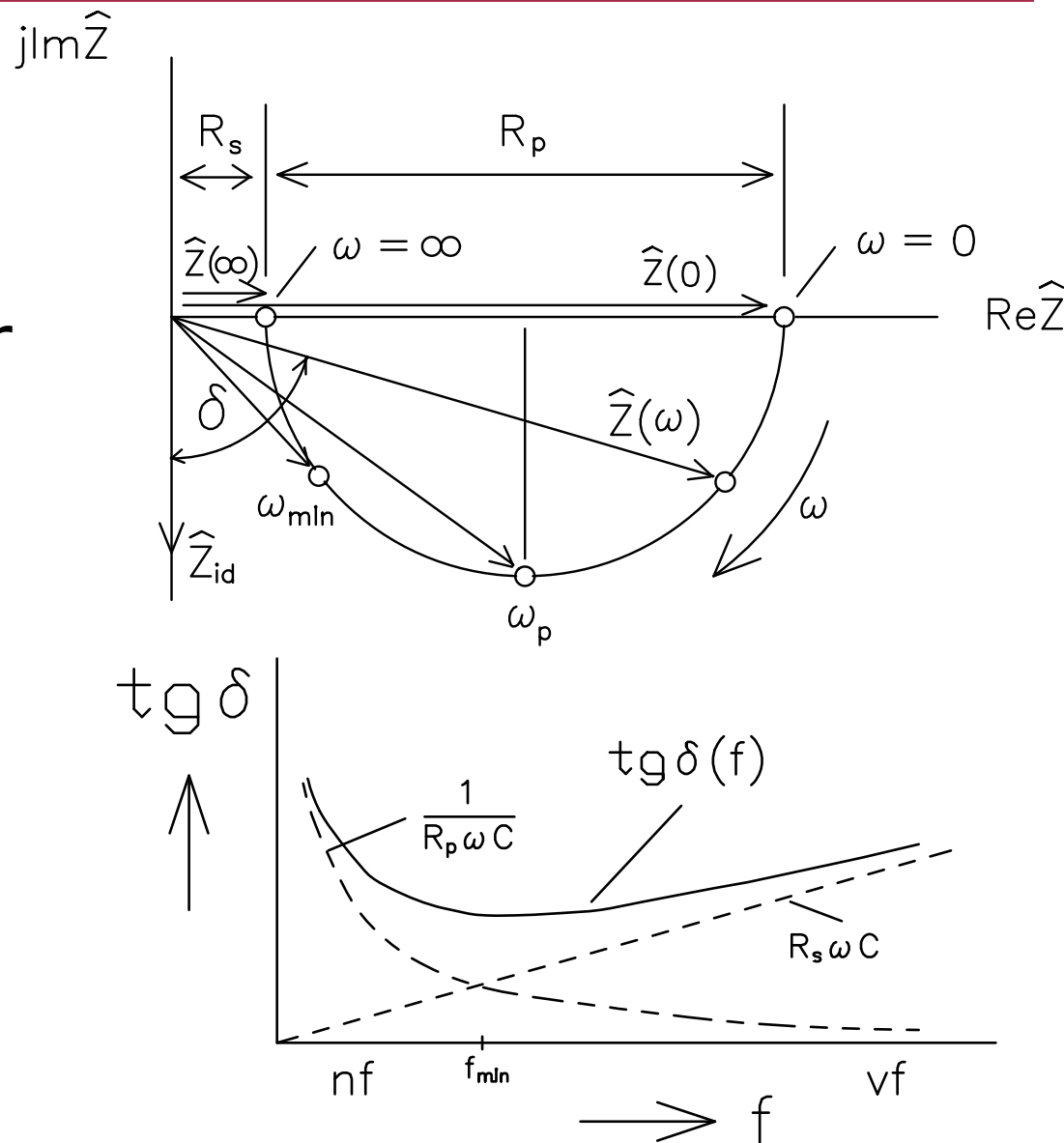
$$\omega \rightarrow 0 \text{ (nf primer): } \quad Z(0) = R_s + R_p$$

$$\omega \rightarrow \omega_p: \quad Z(\omega_p) = R_s + \frac{R_p}{2} - j\frac{R_p}{2}$$

$$\omega \rightarrow \infty \text{ (vf primer): } \quad Z(\infty) = R_s$$

VF analiza impedanca kondenzatorja

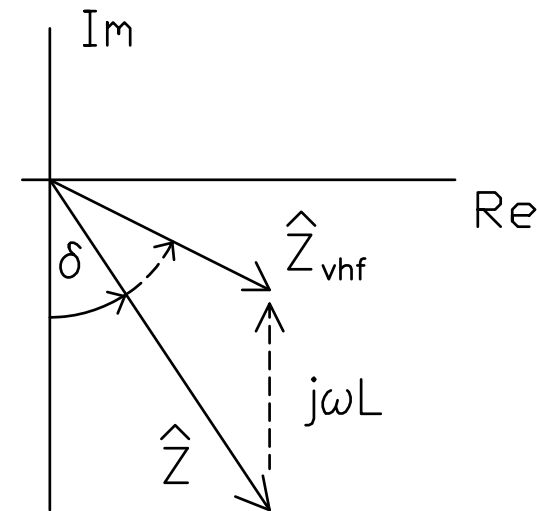
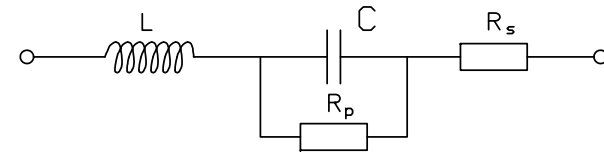
- Med temi točkami poteka impedanca zvezno po krožnici.
- Pri ω_{opt} ima kondenzator najmanjše izgube oz. izgubni kot



VHF impedanca kondenzatorja

- Pri VHF → parazitne induktivnosti L .
- Analizo frekvenčnega poteka VHF impedance iz VF primera:

$$\hat{Z}_{vhf} = \hat{Z} + j\omega L$$



ESR

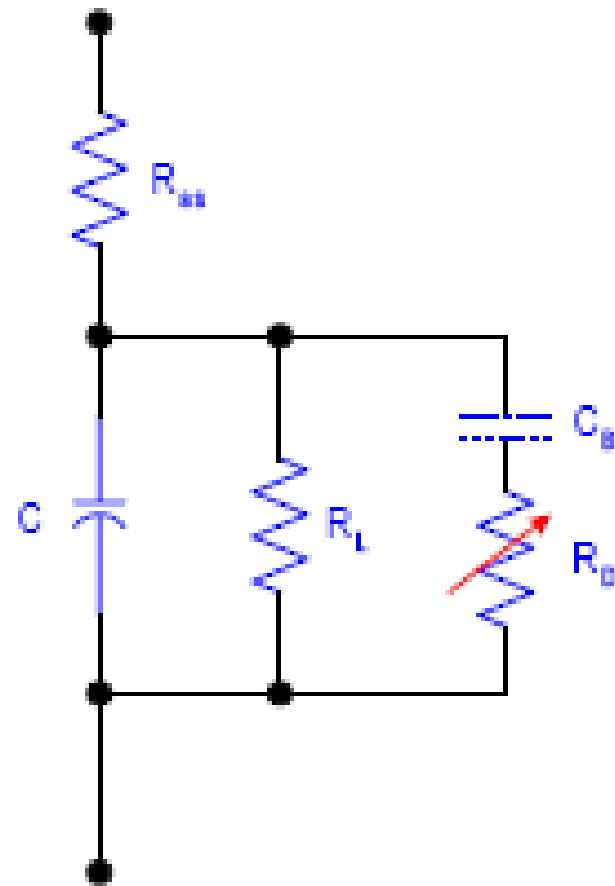
- Ekvivalentna serijska upornost (ang. Equivalent series resistance)
- Združitev **vseh** izgub v eni upornosti (ESR):
 - ESR zato ni enak R_S ! \rightarrow $ESR \gg R_S$
 - ESR vedno predstavlja upornost pri AC razmerah pri določeni frekvenci (tipično 100kHz; 25°C)
 - Meri se z:
 - ESR metrom
 - z osciloskopom in RMS A in V-metri.



ESR

- Prispevek R_p razdelimo na frekvenčno odvisen (R_D) in neodvisen (R_L) del:
 - ohmske izgube $\rightarrow R_L$: segrevanje zaradi izolacijskih tokov skozi dielektrik
 - polarizacijske izgube $\rightarrow R_D(f)$: segrevanje zaradi rotacije dipolov pri AC signalih
- $R_s \rightarrow$ segrevanje kondenzatorja zaradi ohmskih upornosti $R_s \approx 100\text{m}\Omega$.

$$ESR = \frac{\text{tg}(\delta)}{\omega \cdot C} = \omega \cdot R_s \cdot C + \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C} + \frac{1}{\omega \cdot R_D \cdot C}$$

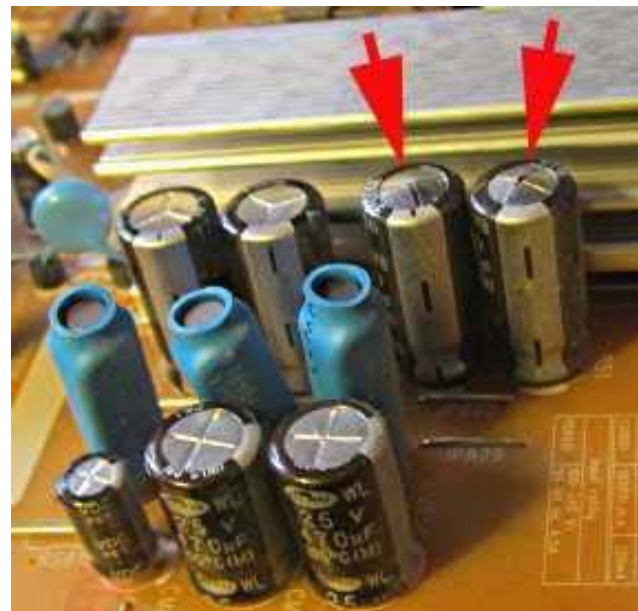


Zakaj je pomemben ESR?

- Sčasoma (staranje) se ESR kondenzatorjev povečuje.
- Stikalni napajalnik ima na izhodu LC kombinacijo za glajenje izhodne napetosti. Eno izmed glajenih napetosti (običajno 5V za PC napajalnik) uporablja za krmilni signal povratne vezave PWM generatorja.
- Če napetost izhoda pade (npr. zaradi obremenitve), PWM generator poveča razmerje signal/pavza in tako kompenzira padec izhodne napetosti.
- Naj izhodna napetost **pade zaradi povečanja ESR** (ne obremenitve) gladilnega kondenzatorja na 5V liniji
- PWM generator poveča razmerje signal/pavza
- To posledično dvigne ostale napetosti napajalnika
- In to uniči vezja (diski, matične plošče), priključena na ostale napajalne napetosti.

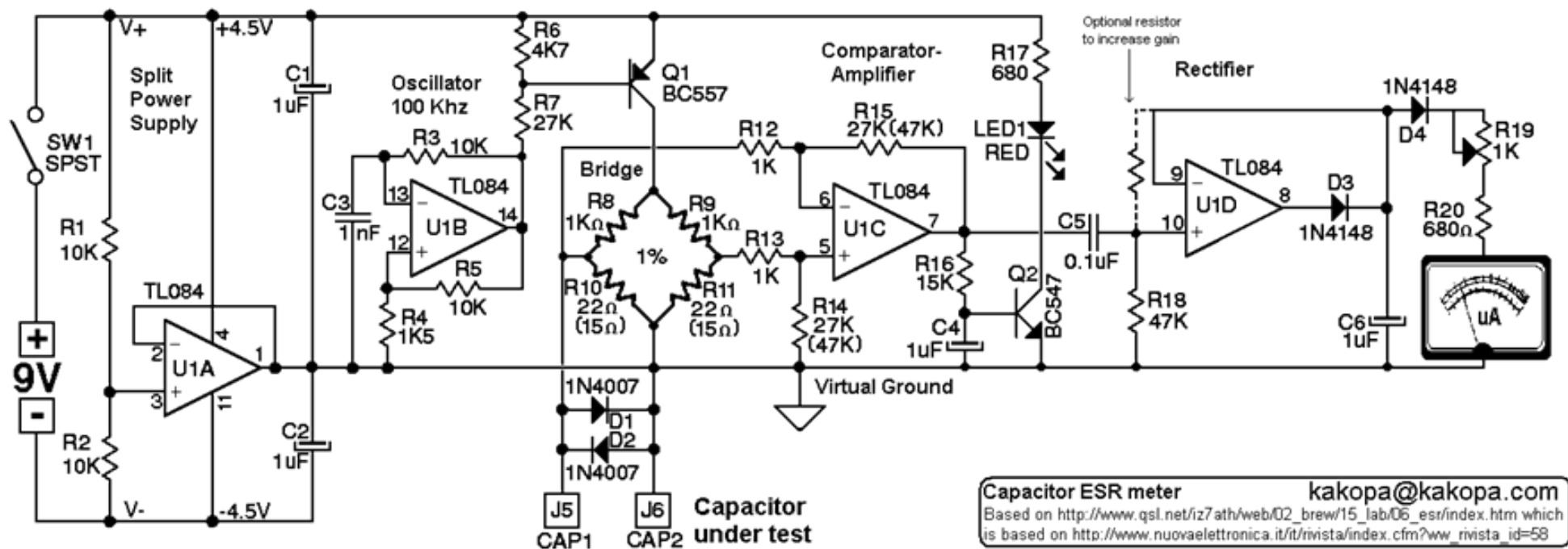
Vpliv ESR

- Al ELKO imajo relativno visok ESR, ki se povečuje s starostjo, temperaturo okolice in velikostjo valovitosti toka na njem.
- Točna meritev ESR običajno ni potrebna, ker je povečevanje ESR hiter proces.
- Defektne kondenzatorje običajno spoznamo po tem, da so "napihnjeni" (bulge) ali pa puščajo DC tok (leak).



Meritev ESR

- VF generator pravokotnega pulza (100kHz) (U1B)
- Mostiček
- Odštevalnik signalov (U1C)
- Usmernik (U1D)



VIR: kakopa.com

Temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C

Temperaturna odvisnost kapacitivnosti:

- $\varepsilon_r(T)$
- debelina dielektrika $d(T)$
(raztezki dielektrika \rightarrow upadanje C)

Uvedemo temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C :

$$C(T) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(T) \frac{A}{d(T)} \quad TK_C = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r(T)}{\partial T} - \frac{1}{d} \frac{\partial d(T)}{\partial T}$$

Temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C

- TK_C se podaja v [ppm/K] ob znani:
 - referenčni temperaturi ($T_{ref} \approx 20^\circ\text{C}$)
 - referenčni kapacitivnosti C_{ref}

$$TK_C = \frac{1}{C} \frac{\Delta C}{\Delta T} = \frac{1}{C_{ref}} \frac{C(T) - C_{ref}}{T - T_{ref}}$$

$$C(T) = C_{ref} [1 + TK_C (T - T_{ref})]$$

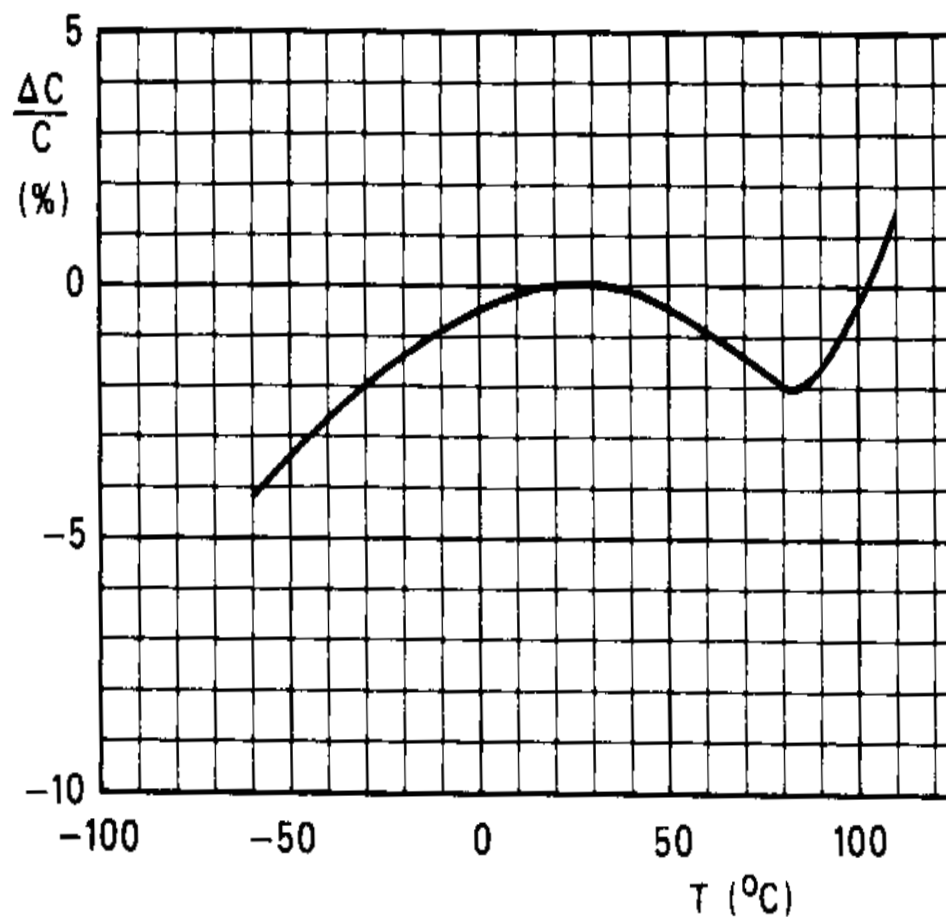
Temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C

TK_C podan kot izmerjeni diagram $\Delta C/C_{20}(T)$.

$$C(T) = C_{20} \left(1 + \frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_T \right)$$

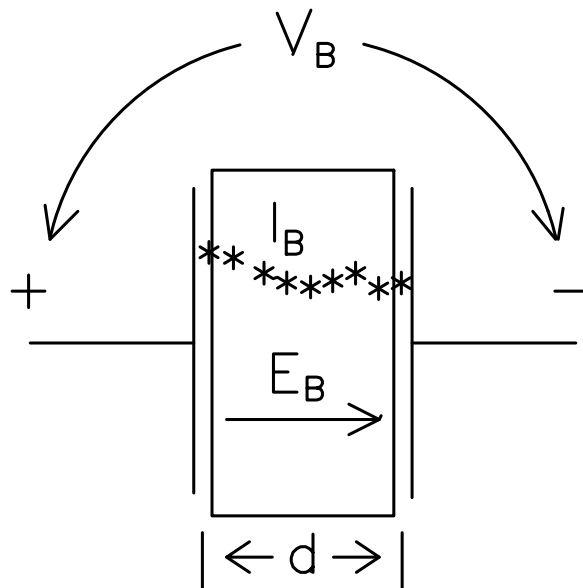
$$TK_C = \frac{\frac{\Delta C}{C}}{\Delta T} = \frac{\frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_{T_2} - \frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_{T_1}}{\left(1 + \frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_{T_1} \right) (T_2 - T_1)}$$

$$TK_C = \frac{\frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_2} - \frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_1}}{\frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_1} (T_2 - T_1)}$$



Preboj kondenzatorja

- Visoka napetost → preboj:
tok med elektrodama začne naglo naraščati
- Prebojna napetost V_B (Breakdown Voltage)
- Prebojna napetost je odvisna od lastnosti dielektrika v kondenzatorju:
 - dielektrične trdnosti E_B [V/mm],
(maksimalna E , ki jo dielektrik še prenese)
 - debeline dielektrika d



$$V_B = E_B d$$

Dielektrik	Dielektrična trdnost E_B [kV/mm]
zrak	3
transformatorsko olje	10
stekla, keramike	20
plastični dielektriki	250

čas meritve: nekaj minut!

Preboj v dielektriku

- Dielektrik ni idealen izolator in ni homogen material
višje napetosti → prisotni majhni tokovi
- Nizki tokovi povzročijo lokalna segrevanja in s tem močno povišane lokalne temperature.
- Lokalna ionizacija materiala in s tem do nastanka novih nosilcev naboja.
- Toki se zato še povečajo, s tem se spet povišajo lokalno segrevanje in temperature, pride do generacije novih nosilcev naboja itd.
- Ta termični pobeg → preboj v dielektriku

Odvisnost prebojne napetosti V_B

V_B pada:

- pri povišanju temperature ambienta (zaradi znižanja specifične upornosti)
- pri povišanju vlage ambienta (zaradi višje prevodnosti površinskega sloja kot posledica absorbcije vlage)
- pri višjih frekvencah (zaradi trenutno močno povišanih vrednosti toka $i = C dv/dt$)
- pri časovno daljših obremenitvah (odpornost materiala proti preboju se z rastočim časom električne obremenitve zmanjšuje - visoka napetost počasi "načne" obremenjeni material)

Korona

- Pri VF signalih visokih napetosti pride zaradi visokih E do ionizacije zračnih mehurčkov v kondenzatorju/ v zraku okolice → korona (iskrenje/cvrčanje)
- Nastopa ob ostrih metalnih robovih ("špicah") v kondenzatorju, kjer so zaradi majhnih krivinskih radijev električna polja še zlasti visoka.
- Zaradi korone lahko odžge dielektrik, stalijo se metalne plasti.
- Korono preprečujemo s kvalitetnejšimi dielektriki brez zračnih mehurčkov ter načrtovanjem (ni omenjenih ostrih robov)

Komponente, sestavi in senzorji

**Družine
kondenzatorjev**

Značilnosti kondenzatorskih družin

- Papirni kondenzatorji
- Plastični kondenzatorji (plastni – film cap.)
- Keramični kondenzatorji
- Sljudni kondenzatorji
- Stekleni kondenzatorji
- Zračni kondenzatorji
- Elektrolitski kondenzatorji
- Specialni kondenzatorji

Ime po vrsti dielektrika, pri elektrolitskih kondenzatorjev → po materialu anode

Papirni kondenzatorji

- Dielektrik je kondenzatorski papir ($d=5 \dots 25 \mu\text{m}$), impregniran z mineralnimi olji, voski ali epoxyem (higroskopičnost).
- To prinese višje prebojne napetosti, vendar tudi nekoliko višje izgube $\text{tg}\delta$.
- Pri nemetalizirani izvedbi so Al elektrode iz tankih metalnih folij ($d \approx 5 \mu\text{m}$)

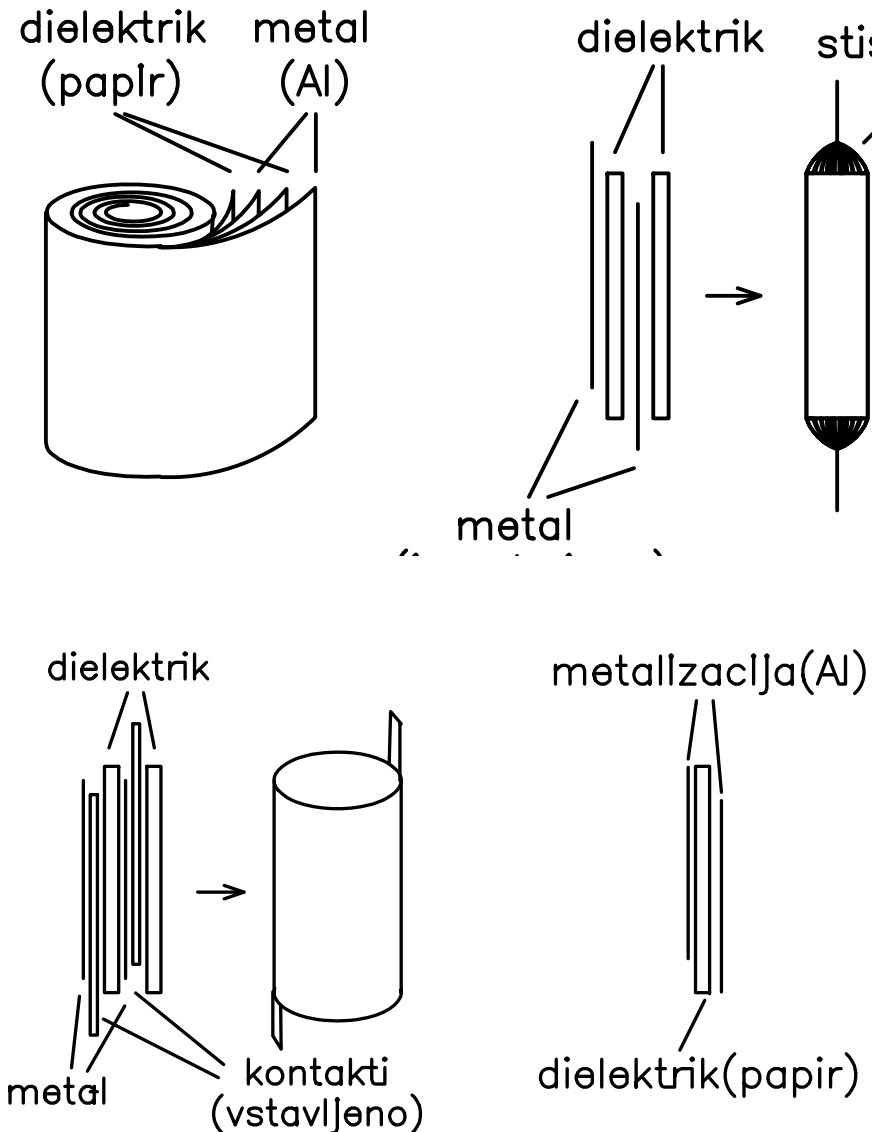


VIR: westfloridacomponents.com

Izvedbe papirnih kondenzatorji

Izvedbe kontaktov:

- **izmaknjene folije**
ena elektrodna folija v celoti pomaknjena navzgor, druga pa navzdol.
Po končanem navijanju konce stisnemo in privarimo dovodne žice ter tako omogočimo dober ohmski dostop do celotne površine elektrod.
- **vstavljeni kontakti** v tem primeru zamikov folij ni, vse folije si stojijo simetrično nasproti ena drugi. Kontakti so v tem primeru izvedeni enostavno z vstavitvijo dveh izvodov na primerna mesta v naviti strukturi kondenzatorja



Lastnosti papirnih kondenzatorjev

Odvisne od gostote papirja in njegove impregnacije.

- $\epsilon_r = 3 \dots 6$, pada s frekvenco in ima majhen pozitiven TK_ϵ .
- $\text{tg}\delta$ (50 Hz, 25 ... 60°C) = 30 ... 60*10⁻⁴ (srednje), raste s temperaturo in frekvenco.
- Frekvenčni obseg ≤1 kHz (nizek)
- Izolacijska upornost je odvisna od vlage in temperature, pri sobni temperaturi znaša tipično 10⁴ MΩ/mF (srednje).
- TK_C (20 ... 60°C) = 50 ... 200 ppm/°C
- Prebojna napetost V_B upada s temperaturo (večje segrevanje → večje izgube).
- Enosmerna V_B je 2x ... 3x višja od izmenične:
Pri izmeničnem delovanju do ionizacije mehurčkov zraka, ki so vedno prisotni v papirju in med folijami, ioni zažigajo papir in metal, pride do uničenja.

Lastnosti papirnih kondenzatorjev

Uporaba:

- Impregniran papir (vosek, olje, epoxy) se je uporabljal v starejših kondenzatorjih.
- Uporabljajo se **zelo zelo redko** – v VN aplikacijah
- Nadomestili so jih plastični plastni kondenzatorji (plastic film)

Slabosti:

- Velikost (pF/cm^3)
- Papir je higroskopičen
- Absorbirana vlaga poveča dielektrične izgube ($\text{tg } \delta$) in zmanjša R_p
- Metalizirane izvedbe samo za aplikacije z nizkim tokom

Metalizirani papirni kondenzatorji

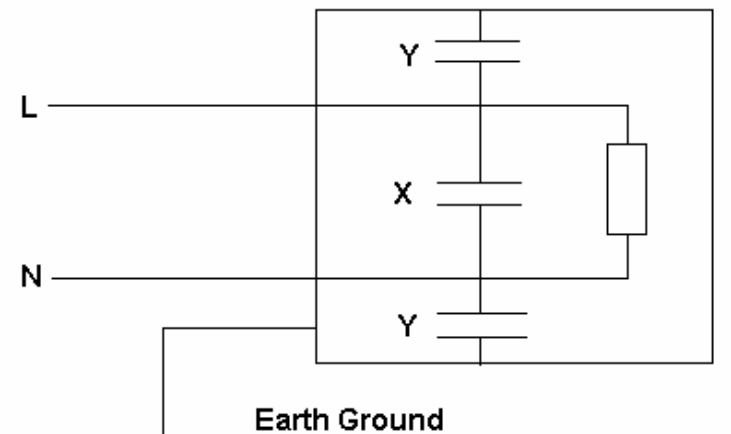
- Metalna folija je nadomeščena s tanko metalizirano plastjo na papirju, ki se jo nanese z naparevanjem kovin Al ali Zn v vakuumu.
- Debelina metalizacije $d \approx 2 \dots 6 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, plastna upornost okrog 1Ω .
- Temperaturno področje do 110°C
- Uporaba:
 - Za odpravo EMI/RFI motenj (X in Y razred)
 - Bela tehnika
 - TV/HiFi filtri za napajanje
 - Osvetlitev
 - Industrijski napajalniki
 - Stand-by aplikacije (slaba gorljivost)

Kondenzatorji za odpravo EMI /RFI motenj

Kondenzatorji za odpravo EMI motenj (EMI suppression capacitors) se vežejo na vhod vezja, da zmanjšujejo vhodno impedanco.

- Razred X so kondenzatorji, vezani med L in N vezja (line-to-line).
- V primeru odpovedi X kondenzatorja potencialne nevarnosti za električni udar ni
- Najbolj pogosti X2 kondenzatorji
- Razred Y so kondenzatorji, vezani na šasijo (line-to-ground). Običajno so nižjih vrednosti.
- V primeru odpovedi kondenzatorja Y obstaja potencialna nevarnost za električni udar

EMI/RFI Suppression



X razred dielektrik:

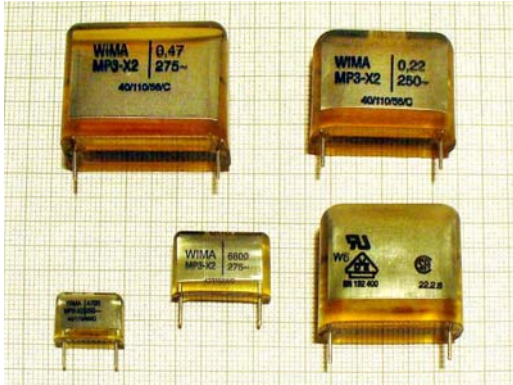
- poliester,
- polipropilen,
- keramika,
- papir

Y razred dielektrik:

- keramika (pogost) in
- papir (olja, epoxy)

VIR: [Illinoiscapacitor](#)

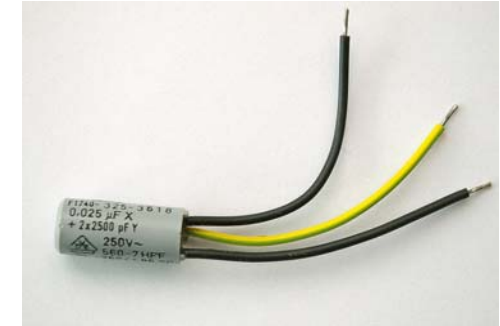
Kondenzatorji za odpravo EMI /RFI motenj



Metaliziran
papierni X2
kondenzator



Polipropilenski
(MKP) X2
kondenzator



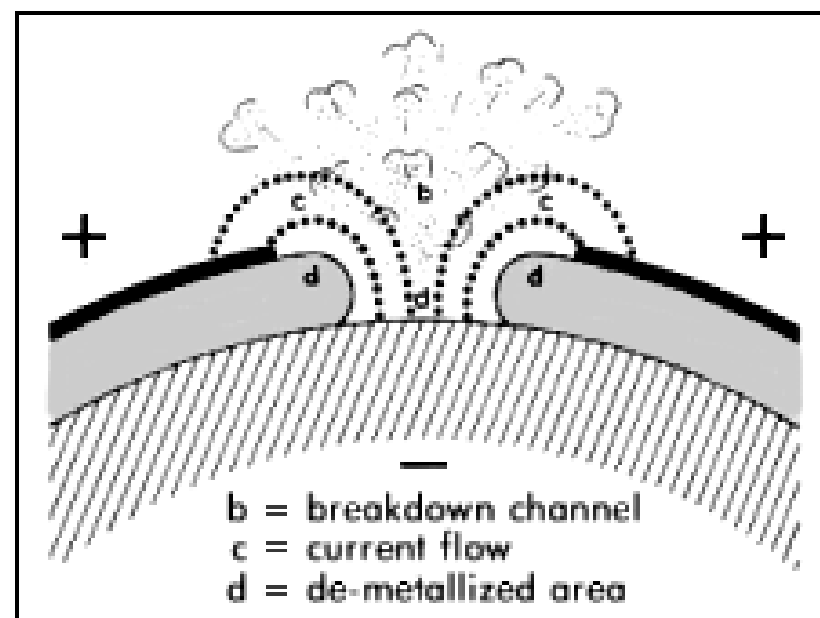
Kombiniran
X in Y
kondenzator

Meje EMI/RFI motenj so definirane v EMC direktivi EN 50081.

VIR: [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/X2_capacitor), WIMA

Avtoregeneracija

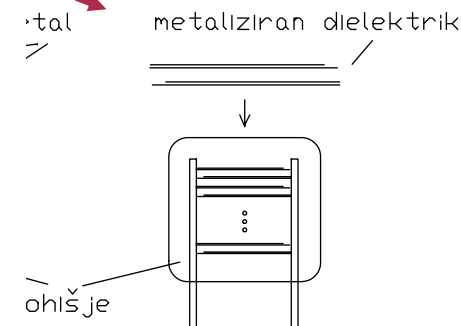
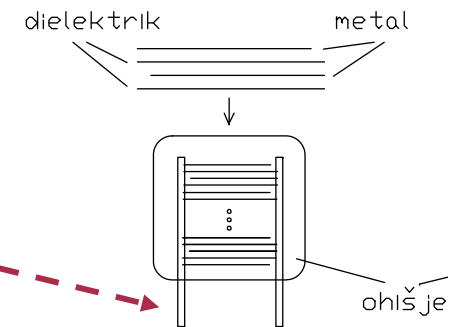
- **Avtoregeneracija:** (ang. self-healing) na mestu, kjer zaradi nekega defekta pride do lokalnega preboja, tanka metalizacija zaradi lokalnega segrevanja enostavno izpari, defektno mesto samo sebe izolira.
- Pri metaliziranih izvedbah kondenzatorjev zaradi odprave zračnih mehurčkov ne more priti do ionizacije in s tem do zažiga dielektrika:
 - višja dopustna napetost
 - manjše dimenzije kondenzatorja, zaradi tanjših plasti
- To je mogoče zaradi zelo tankih metaliziranih plasti, medtem ko v primeru ločene metalne folije prej pride do zažiga dielektrika in uničenja kondenzatorja.



Plastični kondenzatorji

Izvedbe:

- naviti plastični kondenzatorji,
- blok kondenzatorji (zlaganje lističev folij)
 - nemetalizirana in
 - metalizirana
- Struktura se nahaja v kovinskem ohišju, zalita v primeren material (epoksidna smola).
- So kvalitetnejši od večine ostalih vrst glede izolacijske upornosti, izgub tgδ, časovne konstante, frekvenčnega obsega itd. Slabši so le glede volumske kapacitivnosti [pF/cm^3] v primerjavi z elektrolitskimi in keramičnimi.



Dielektrik – polistiren (PS)

- Stirofleks (Siemens) / Polistiren (Philips) / Polistirol.
- Gladka, prozorna folija odličnih lastnosti:
 - Visoka izolacijska upornost $10^{17} \dots 10^{19} \Omega \text{ cm}$,
 - nizke izgube $\text{tg}\delta = 1 \dots 10 \cdot 10^{-4}$
 - majhen, linearen in negativen temperaturni koeficient
 $\text{TK}_C = -100 \dots -200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$,
 - majhna dielektrična absorpcija $0.02 \dots 0.1\%$,
 - nizka absorbcija vlage $< 0.1\%/\text{dan}$,
 - visoka dielektrična trdnost $E_B = 275 \text{ kV/mm}$
 - zmerna dielektričnost $\epsilon_r = 3.75$
 - visoka časovna stabilnost
- Slabost polistirena → ne moremo metalizirati



Polistirenski (PS) kondenzatorji

- E12 → E96
- Stabilen in negativen $TK_C = -150 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$,
- Visoka izolacijska upornost $1\text{M}\Omega/\mu\text{F}$,
- $V_n \approx 25 \dots 1600 \text{ V}$ (visok)
- $f > 100 \text{ MHz}$,
- neobčutljivi na vlago,
- $\text{tg}\delta = 1 \dots 10 \cdot 10^{-4}$ (nizke izgube)
($f = 100 \text{ Hz} \dots 10 \text{ kHz}$), naraščajo pri VF,
- izredno velike RC konstante $> 10^5 \text{ s}$ (za $C > 1\text{mF}$)

Lastnosti PS kondenzatorjev

Uporaba:

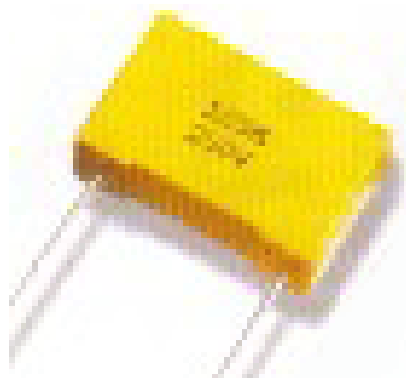
- RF aplikacije nizke moči in precizna analogna vezja, avdiofilska vezja (visoka časovna stabilnost, majhne VF izgube nizek TK_C)
 - Oscilatorskih vezjih,
 - medfrekvenčnih filtrih,
 - integratorjih z velikimi časi integracije,
- Za temperaturno kompenzacijo (negativen TK_C) v kombinaciji s tuljavami s feritnimi jedri (pozitiven TK_L)
- Za stabilizacijo resonančne frekvence oscilatorjev

Slabosti:

- Temperatura delovanja +85 °C (polistiren se topi)
- So fizično veliki
- Konstrukcija ne omogoča SMD izvedbe (zato danes redki)

Poliestrski (PET) kondenzatorji

- Drugo ime: Mylar
- Poliester ima slabše dielektrične lastnosti kot polistiren
- Poliester **lahko metaliziramo**:
 - nemetalizirana in
 - metalizirana izvedba
(prednost – tanke elektrode → majhno ohišje)



Poliestrski (PET) kondenzatorji

Uporaba:

- Dolgo časa so veljali kot cenena klasika v DC vezjih za široko potrošnjo, v impulznih vezjih, kot vezne kondenzatorje
- Visokonapetostne izvedbe do 25 kV
 - VN filtri in
 - VN kaskade

Slabosti:

- Temperaturno manj stabilni kot papirni kondenzatorji
- Nimajo dobrih toleranc ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$) – danes obstaja cenovna alternativa!
- Neprimerni za RF aplikacije zaradi velikih dielektričnih izgub
- Neprimerni za visoke tokove zaradi navite izvedbe (pregrevanje)
- Ni SMD izvedbe

Polikarbonatni (PC) kondenzatorji

Polikarbonat – termoplastični polimer – enostaven za obdelavo (thermoforming):

- Mehansko izredno stabilen (Lexan stekla)
- Dielektrična konstanta: 3.2
- **Zelo stabilen** do visokih temperatur (-55...125°C)
- Nizek TK_C : ± 80 ppm/°C
- nizek $tg\delta$: 0.0007@50Hz; 0.001@1MHz
- visoka izolacijska upornost,
- visoka dielektrična trdnost (38 kV / mm)
- Slabost → **visoka občutljivost na vlago** (0.16%)
- Obstaja metalizirana izvedba, ki ji pri VN kondenzatorjih dodajo še impregniran papir. Metalizirana izvedba je **avtoregenerativna**

Polikarbonatni (PC) kondenzatorji

- Bili so razširjeni v vezjih splošne uporabe - danes niso več.
- Vodilni proizvajalec (Bayer) je leta 2000 namreč ustavil proizvodnjo polikarbonata kot dielektrične plasti.
(VIR: [Wima](#))
- Uporaba za nove aplikacije ni priporočljiva, ker so dobavitelji redki.

Zamenjave za polikarbonat kot dielektrik

- Polietilen naftalat (PEN)
- Polifenilen sulfid (PPS)
- Polimid (PI)
- Politetrafluoroetilen (PTFE; TEFLON)

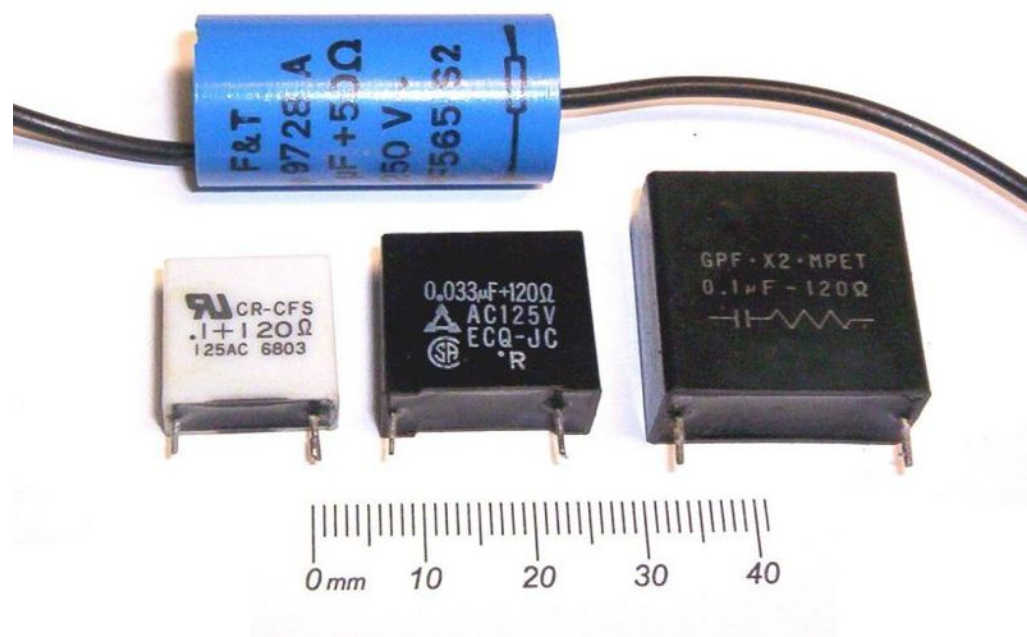
- Najbolj razširjena zamenjava za polikarbonat je PPS:
 - Praktično enaka dielektrična konstanta (podobna velikost kondenzatorjev)
 - Širše temperaturno območje (do 250°C) in
 - Nižji TK_C

Polipropilenski (PP) kondenzatorji

- Polipropilen (PP) - najbolj popularen dielektrik:
 - $\epsilon_r = 2.2$
 - zelo nizke izgube $\text{tg}\delta < 10 \cdot 10^{-4}$
 - dobra temperaturna in časovna stabilnost,
 - visoka maksimalna temperatura delovanja (125°C),
 - visoka dielektrična trdnost $E_B = 350 \text{ kV/mm}$,
 - neobčutljivost na vlago (absorbpcija $< 0.1\%$ / dan),
 - **konstanten nizek negativen** TKC ($-250 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$),
 - visoka izolacijska upornost ($10^{+5} \text{ M}\Omega/\text{mF}$).
 - primeren za kondenzatorje za velike moči, če ga impregniramo s sintetičnimi olji.
- Polipropilenski kondenzatorji:
 - nemetalizirana in
 - metalizirana z Zn (Al ni primeren). $d \approx 4 \dots 25\mu\text{m}$
- Uporaba:
 - za delo pri VF (zelo nizke izgube $\text{tg}\delta$)
 - S/H vezja, oscilatorji, resonatorji, napajalniki, pretvorniki, avdio
 - Vrednosti od 1 to $100 \mu\text{F}$ @ 440 VAC → zagonski kondenzatorji za enofazne elektromotorje

"Snubber" kondenzatorji

- "Snubber" kondenzatorji prenesajo visok vršni tok, ki se pojavlja ob tranzientnih napetostih. Take napetosti se pojavljajo ob veliki spremembi toka (di/dt) v stikalnih vezjih
- Osnovni namen "snubber" RC vezja je, da absorbira energijo napetostnega pulza, ki nastane ob razklenitvi stikalnega elementa → zaščita stikalnega elementa
- Dodatni namen "snubber" vezja je izboljšava EMC preko:
 - zmanjšanja tranzientne napetosti ob razklenitvi stikalnega elementa
 - zmanjšanje iskrenja stikalnih kontaktov (vžigalna tuljava → avto)
 - omejevanje hitrosti naraščanja napetosti (dV/dt) na polprevodniških stikalnih elementih (triak, tiristor, IGBT, BJT)
- "Snubber" kondenzatorji mora imeti zelo majhen ESL in ESR ter visok vršni tok. Morajo biti zelo zanesljivi, saj ob odpovedi običajno odpove tudi stikalni element, ki ga ščiti.
- Za "snubber" kondenzatorje se zvečine uporabljajo **polipropilenski** kondenzatorji



Polisulfon in TEFLON kondenzatorji

Podobni polikarbonatnim.

Razlike:

- Višje temperaturno območje
- E6
- Profesionalni elementi
- Uporaba (ko cena ni faktor):
 - pri visokih temperaturah,
 - nizkih izgub $\text{tg}\delta$,
 - **izredno** visoke izolacijske upornosti
 - stabilnost ter zanesljivost elementa.

Dielektrik	Polisulfon	PTFE
T obseg	-55 ... +150°C	-55 ... +200°C
TK_C	+ 30.10 ⁻⁶ /°C	+ 60.10 ⁻⁶ /°C
$\text{tg}\delta$	< 15.10 ⁻⁴	< 10.10 ⁻⁴
Izolacijska upornost	100 MΩ/mF (150°C)	100 MΩ/mF (250°C)

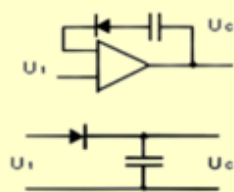
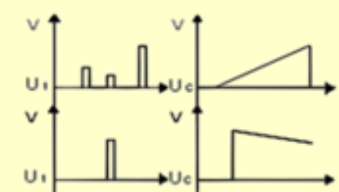
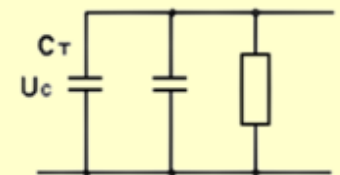
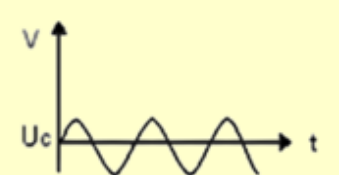
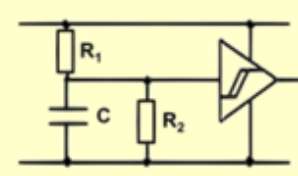
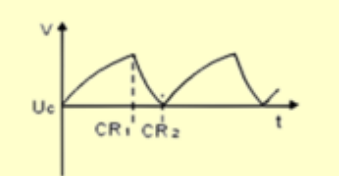
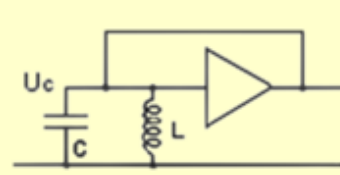
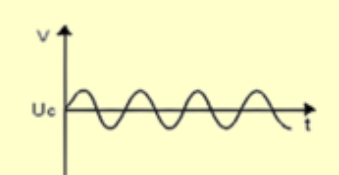
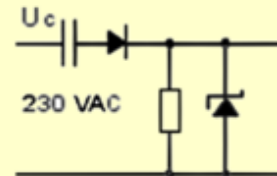
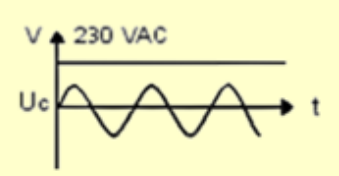
- Slabosti:
 - Cena
 - Velikost (nizka dielektrična konstanta)

Primerjava plastnih kondenzatorjev

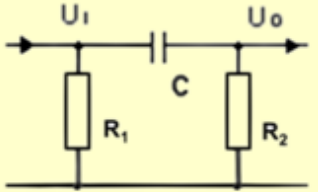
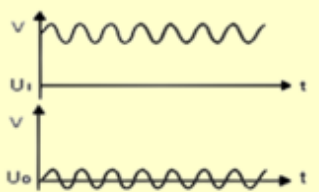
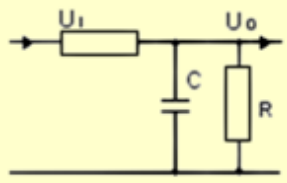
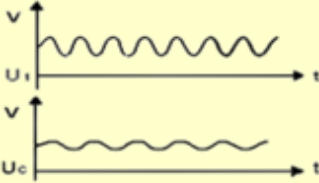
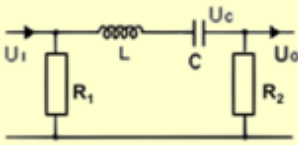
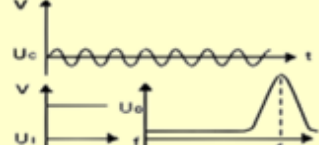
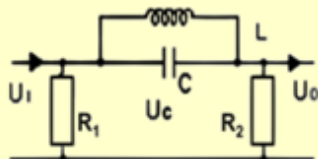
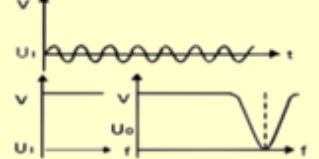
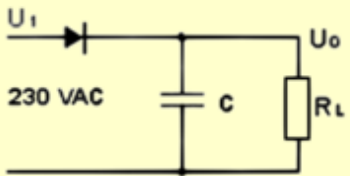
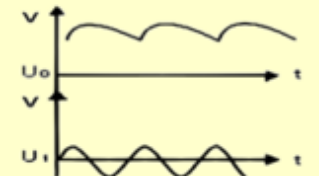
Lastnost	PET	PEN	PPS	PP	
Relativna dielektričnost @ 1 kHz	3.3	3.0	3.0	2.2	
Minimalna debelina plasti (μm)	0.7–0.9	0.9–1.4	1.2	2.4–3.0	
Absorpcija vlage (%)	majhna	0.4	0.05	<0.1	
Dielektrična trdnost ($\text{V}/\mu\text{m}$)	580	500	470	650	
Komercialne testne napetosti ($\text{V}/\mu\text{m}$)	280	300	220	400	
Področje DC napetosti (V)	50–1000	16–250	16–100	40–2000	
Območje kapacitivnosti	100 pF–22 μF	100 pF–1 μF	100 pF–0.47 μF	100 pF–10 μF	
Temperaturno področje ($^{\circ}\text{C}$)	–55 to +125 /+150	–55 to +150	–55 to +150	–55 to +105	
$\Delta\text{C}/\text{C}$ po temperaturnemu področju (%)	± 5	± 5	± 1.5	± 2.5	
tg(δ) ($\cdot 10^{-4}$)	@ 1 kHz	50–200	42–80	2–15	0.5–5
	@ 10 kHz	110–150	54–150	2.5–25	2–8
	@ 100 kHz	170–300	120–300	12–60	2–25
	@ 1 MHz	200–350	–	18–70	4–40
Časovna konstanta $R_{\text{Insul}} \cdot \text{C}$ (s)	@ 25 $^{\circ}\text{C}$	$\geq 10,000$	$\geq 10,000$	$\geq 10,000$	$\geq 100,000$
	@ 85 $^{\circ}\text{C}$	1,000	1,000	1,000	10,000
Dielektrična absorpcija (%)	0.2–0.5	1–1.2	0.05–0.1	0.01–0.1	
Specifična kapacitivnost ($\text{nF} \cdot \text{V}/\text{mm}^3$)	400	250	140	50	

VIR: [Wikipedija](#)

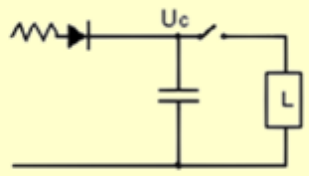

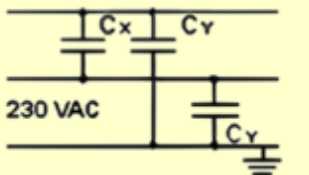
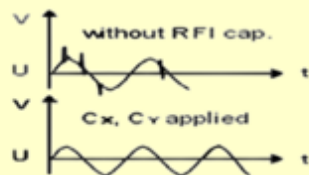
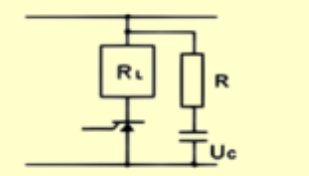

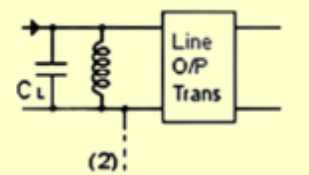

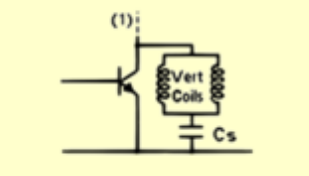
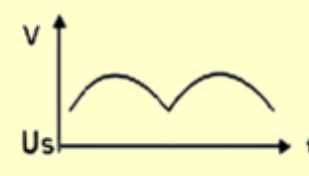
Uporaba plastnih kondenzatorjev

Capacitor purpose	Circuit application	Waveform	Capacitor requirements
<p>Sample and hold A-D converters</p> <p>Peak voltage detectors</p>	 <p>The first diagram shows a sample and hold circuit with an operational amplifier, a switch, and a capacitor U_c. The second diagram shows a peak-to-peak detector circuit with a diode and a capacitor U_c.</p>	 <p>The first waveform shows a series of pulses U_1 and a capacitor voltage U_c that ramps up to the peak of each pulse. The second waveform shows a single pulse U_1 and a capacitor voltage U_c that rises to the peak and then decays.</p>	<p>Low dielectric absorption, High insulation resistance</p>
<p>Temperature compensating (other components)</p>	 <p>A circuit diagram showing a capacitor C_T and a resistor connected to a voltage source U_c.</p>	 <p>A sinusoidal waveform showing voltage V versus time t, with the amplitude labeled U_c.</p>	<p>Dedicated negative temperature characteristic</p>
<p>Timing</p>	 <p>A circuit diagram showing a resistor R_1, a capacitor C, and a resistor R_2 connected to an operational amplifier.</p>	 <p>A waveform showing voltage V versus time t, with the amplitude labeled U_c. The time constants CR_1 and CR_2 are indicated.</p>	<p>Stable capacitance. High insulation resistance</p>
<p>Oscillating</p>	 <p>A circuit diagram showing a capacitor C, an inductor L, and an operational amplifier connected in a feedback loop.</p>	 <p>A sinusoidal waveform showing voltage V versus time t, with the amplitude labeled U_c.</p>	<p>Low dissipation factor, Stable capacitance</p>
<p>Voltage dropper</p>	 <p>A circuit diagram showing a capacitor U_c, a diode, and a resistor connected to a 230 VAC source.</p>	 <p>A sinusoidal waveform showing voltage V versus time t, with the amplitude labeled U_c and the source labeled 230 VAC.</p>	<p>Good reliability</p>

Uporaba plastnih kondenzatorjev

Capacitor purpose	Circuit application	Waveform	Capacitor requirements
Coupling or blocking			High insulation resistance. Correct voltage, Low self-inductance
Decoupling or bypassing			High insulation resistance, Low self-inductance
Filtering Pass filter			Low dissipation factor, Stable capacitance
Filtering Stop filter			Low dissipation factor, Stable capacitance.
Smoothing			Comparably high capacitance, Low dissipation factor

Uporaba plastnih kondenzatorjev

Capacitor purpose	Circuit application	Waveform	Capacitor requirements
Energy storage / fast discharge			High pulse rise time rating, High (surge) current carrying capacity
EMI/RFI suppression			Particularly high reliability against active and passive flammability
Snubbing			Low dissipation factor, High pulse rise time rating
TV fly-back tuning			Low dissipation factor, high pulse rise time rating, High dielectric strength
TV S-correction			Low dissipation factor, Good pulse rise time rating

Keramični kondenzatorji –EIA I. razred

- Dielektrik je **stabilna keramika**:
 - dielektričnost ϵ se s časom ne spreminja,
 - odvisnost $C(T)$, $C(V)$ je majhna in linearna.
- $\epsilon_r = 5 \dots 250$
(visoka specifična kapacitivnost, do 30 pF/mm^3)
- $\rho = 10^{+15} \dots 10^{+18} \text{ } \Omega\text{cm}$
- $\text{TK}_\epsilon = +130 \dots -3000 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
(linearen; primeren za temperaturno kompenzacijo)
- $\text{tg}\delta \approx 10 \cdot 10^{-4}$ v širokem frekvenčnem območju
(visok Q , dobre VF lastnosti)
- $E_B = 4 \dots 10 \text{ kV/mm}$
- Stabilni, z majhnimi tolerancami, dolga življenjska doba, relativno majhne izgube oz. visok Q , različne TK_C za temperaturne kompenzacije ter velike (vendar ne maksimalne) specifične kapacitivnosti.

Keramični kondenzatorji –EIA I. razred

1. Najbolj stabilni glede na temperaturno območje
2. Imajo skoraj linearno karakteristiko v uporabnem frekvenčnem področju
3. Dielektrik je:
 1. magnezijev titanat za pozitivni TK_{ϵ} in
 2. kalcijev titanat za negativen TK_{ϵ}
4. Z uporabo kombinacij teh dveh in ostalih dielektrikov lahko dosežemo ϵ_r med 5 in 150 in TK_{ϵ} med 40 ... -5000 ppm/°C
5. Imajo najboljše $tg(\delta)$ od vseh EIA keramičnih kondenzatorjev
6. Obstajajo v 1% (EIA-C0G) lestvici, medtem ko ostale družine v 5% in 10% lestvicah.

Keramični kondenzatorji –EIA I. razred

EIA oznake za temperaturno kompenzirane kondenzatorje:

- Prva črka podaja velikost (številko) TK_C preko temperaturnega območja v ppm/°C
- Druga črka množitelj ($\cdot 10^m$)
- Toleranca TK_C v ppm/C

Primer: C0G razred

$TK_C = 0$ ppm/°C

toleranca $TK_C = \pm 30$ ppm/°C
(oscilatorji, resonančna vezja)

	Vrednost TK_C	Množitelj TK_C		Toleranca TK_C	
C	0.0	0	-1	G	+/-30
B	0.3	1	-10	H	+/-60
L	0.8	2	-100	J	+/-120
A	0.9	3	-1000	K	+/-250
M	1.0	4	+1	L	+/-500
P	1.5	6	+10	M	+/-1000
R	2.2	7	+100	N	+/-2500
S	3.3	8	+1000		
T	4.7				
V	5.6				
U	7.5				

Keramični kondenzatorji – EIA II. razred

- Dielektrik je **nestabilna keramika** (dielektrične lastnosti so precej nestabilne, ker je struktura optimizirana predvsem v smeri velike dielektrične konstante):
 - Dielektričnost ϵ_r se spreminja s časom,
 - odvisnost kapacitivnosti od temperature in napetosti je velika in nelinearna.
- $\epsilon_r = 250 \dots 15.000$
(veliko; **zelo visoke specifične kapacitivnosti** do $500\text{pF}/\text{mm}^3$)
- $\rho = 10^{+16} \Omega\text{cm}$
- TK_ϵ je nestabilen, nelinearen
- $\text{tg}\delta = 50 \dots 500 * 10^{-4}$
- $E_B = 4 \dots 6 \text{ kV}/\text{mm}$ (trajno delovanje: $2 \text{ kV}/\text{mm}$!)

Keramični kondenzatorji – EIA II. razred

- Večja volumska kapacitivnost, za ceno slabše natančnosti in stabilnosti
- Uporaba za razklop (decoupling/bypass), sklop (coupling) – povsod kjer natančnost ni bistvena.
- Tipičnemu kondenzatorju razreda II. se kapacitivnost spremeni za 15% na temperaturnem področju -50°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Izgubni faktor je običajno 2.5%.
- Ima slabšo natančnost (od 10% do $+20/-80\%$).

Keramični kondenzatorji –EIA II. razred

EIA oznake za temperaturno **nekompenzirane** kondenzatorje:

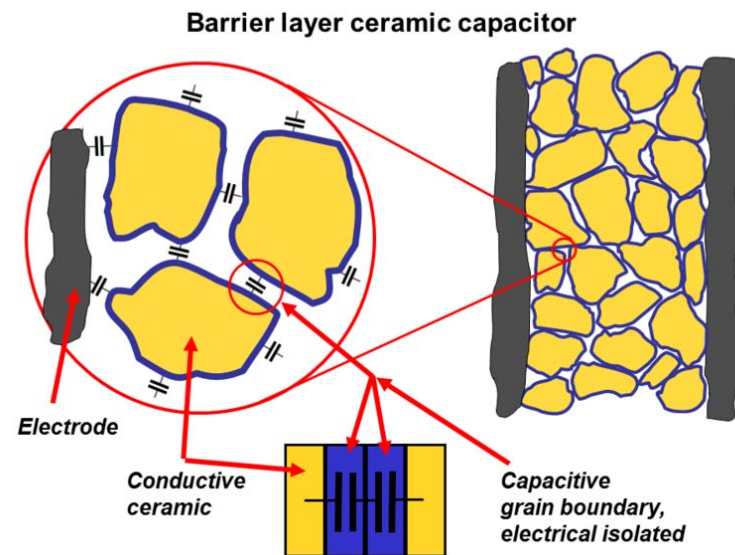
- Spodnja meja temp. območja
- Zgornja meja temp. območja
- Velikost $\Delta C/C_0$ preko temperaturnega območja v ppm/°C

X7R (-55/+125 °C, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$),
 Z5U (+10/+85 °C, $\Delta C/C_0 = +22/-56\%$)
 Y5V (-30/+85 °C, $\Delta C/C_0 = +22/-82\%$)
 X7S (-55/+125, $\Delta C/C_0 = \pm 22\%$)
 X8R (-55/+150, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$)

Sp. meja temperaturnega območja		Zg. meja temperaturnega območja		Sprememba kapacitivnosti	
X	-55C (-67F)	2	+45C (+113F)	D	+/-3.3%
Y	-30C (-22F)	4	+65 (+149F)	E	+/-4.7%
Z	+10C (+50F)	5	+85 (+185F)	F	+/-7.5%
		6	+105 (+221F)	P	+/-10%
		7	+125 (+257F)	R	+/-15%
				S	+/-22%
				T	+22% / -33%
				U	+22% / -56%
				V	+22% / -82%

Keramični kondenzatorji – EIA III. razred

- Dielektriki so specialne keramike z zelo veliko vrednostjo $\epsilon_r = 15.000 \dots 10^5$
- Čim večja dielektričnost, ostalo ni važno.
- Posledica visoke ϵ_r je zelo visoka specifična kapacitivnost do $1\text{nF}/\text{mm}^3$, (elektrolitski $\approx 1\mu\text{F}/\text{mm}^3$).
- Sicer zelo slabi: nestabilni, visoke izgube $\text{tg}\delta$, zelo slaba paralelna upornost R_p



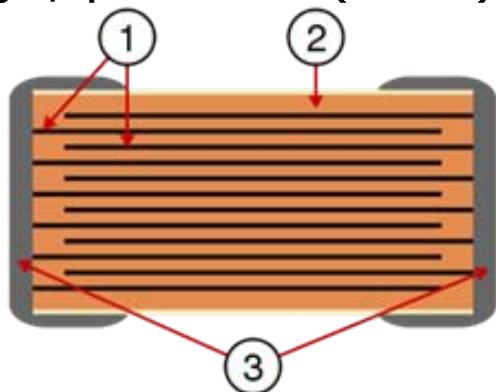
VIR: [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Barrier_layer_ceramic_capacitor)

Keramični kondenzatorji – EIA III. razred

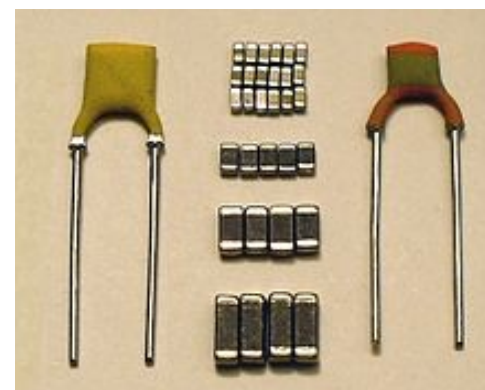
- Še vedno visoka volumska kapacitivnost, slabša natančnost, stabilnost in izgubni faktor
- **Ne zdržijo visokih napetosti**
- Dielektrik običajno barijev titanat ($\epsilon_r=1250$)
- Tipični kondenzator III. razreda ima spremembo kapacitivnosti od -22% do +50% preko temperaturnega področja +10°C ... +55°C.
- Izgubni faktor je 3 ... 5%.
- Slaba natančnost (20% ali -20/+80%).
- Uporaba za razklop (decoupling) in v napajalnikih, kjer natančnost ni zahtevana
- Niso primerni za uporabo v SMPS napajalnikih ker ne zdržijo špic (visoke napetosti)

SMD keramični kondenzatorji

- Večina keramičnih kondenzatorjev je danes v SMD izvedbi
- Klasične kvadraste oblike
- Sestavljen iz keramičnega dielektrika z veliko izmenjujočimi metalnimi elektrodami, kar poveča volumsko kapacitivnost (MLCC) Multilayer ceramic chip capacitor
- Notranji elektrodi sta povezani na izhodna priključka iz zlitine srebro-paladij (AgPd) 65/35, oz. so niklja, prekrit z (NiSn)



Oznaka	Velikost (mm)	Velikost (inch)
1812	4.6 x 3.0	0.18 x 0.12
1206	3.0 x 1.5	0.12 x 0.06
0805	2.0 x 1.3	0.08 x 0.05
0603	1.5 x 0.8	0.06 x 0.03
0402	1.0 x 0.5	0.04 x 0.02
0201	0.6 x 0.3	0.02 x 0.01



disk keramični C (levo, desno)
in SMD MLCC izvedba (sredina)

Sljudni kondenzatorji

- Dielektrik je sljuda (ang. MICA) → naravni silikat aluminijski Al z dodatki atomov K, Mg, O, H.
- Slojevita struktura (cepiti se da na do 0.25 μm tanke lističe)

Lastnosti sljude:

- $\epsilon_r = 7 \dots 8$ izredno stabilna (-55 ... 300°C) in (50 Hz ... 5 GHz)
- $\rho > 10^{15} \Omega\text{cm}$ za izdelavo kondenzatorjev z visoko izolacijsko upornostjo
- $\text{TK}\epsilon \approx 10^{-5}/^\circ\text{C}$ (praktično zanemarljivo)
- $\text{tg}\delta < 2 \cdot 10^{-4}$ (zelo nizke izgube)
- $E_B = 40 \dots 200 \text{ kV/mm}$

Stekleni kondenzatorji

- Dielektrik je trak borsilikatnega stekla, $d \approx 10\mu\text{m}$.
- Malo slabše dielektrične lastnosti kot sljuda:
- $\epsilon_r = 4$
- $\rho > 10^{+10}\Omega\text{cm}$
- $\text{TK}_\epsilon = 100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$
- $\text{tg}\delta \sim 10 \cdot 10^{-4}$
- $E_B = 20 \text{ kV/mm}$

Lastnosti ohrani do visokih temperatur (200°C), visokih napetosti in visokih frekvenc (100MHz).

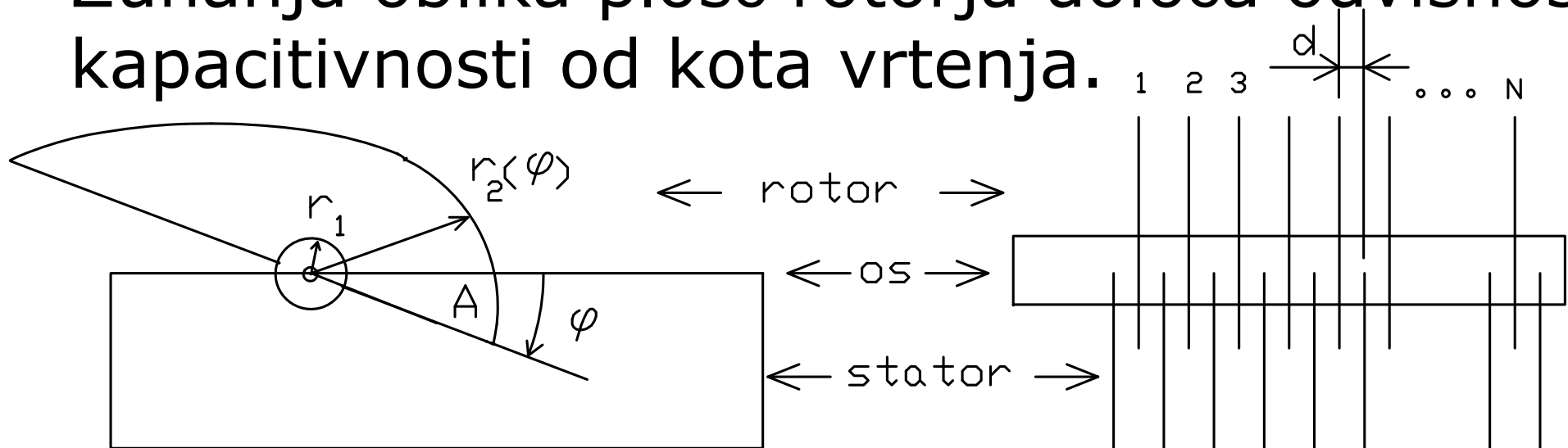
- Izvedbe: zlaganje steklenih in metalnih (Al) lističev, podobno kot pri sljudnih nemetaliziranih kondenzatorjih. Nato postavijo tak blok na visoko temperaturo, da se steklo zatali in s tem kondenzator hermetizira.

Zračni kondenzatorji

- Med ploščami je zrak
- Običajno ima kondenzator dve vrsti plošč: nepomične (stator) in pomične (rotor).
- $TK_C \approx 100 * 10^{-6} / ^\circ C$
- $tg\delta \approx 30 * 10^{-4}$

Zračni kondenzatorji

- Zunanja oblika plošč rotorja določa odvisnost kapacitivnosti od kota vrtenja.



$$dA = \frac{1}{2} r_2 r_2 d\varphi - \frac{1}{2} r_1 r_1 d\varphi = \frac{1}{2} (r_2^2 - r_1^2) d\varphi$$

$$dC = 2N\epsilon \frac{dA}{d} = \frac{\epsilon N}{d} (r_2^2 - r_1^2) d\varphi \quad r_2(\varphi) = \sqrt{r_1^2 + \frac{d}{N\epsilon} \frac{dC}{d\varphi}}$$

Elektrolitski kondenzatorji

Delitev elektrolitskih kondenzatorjev (ELKO)
po:

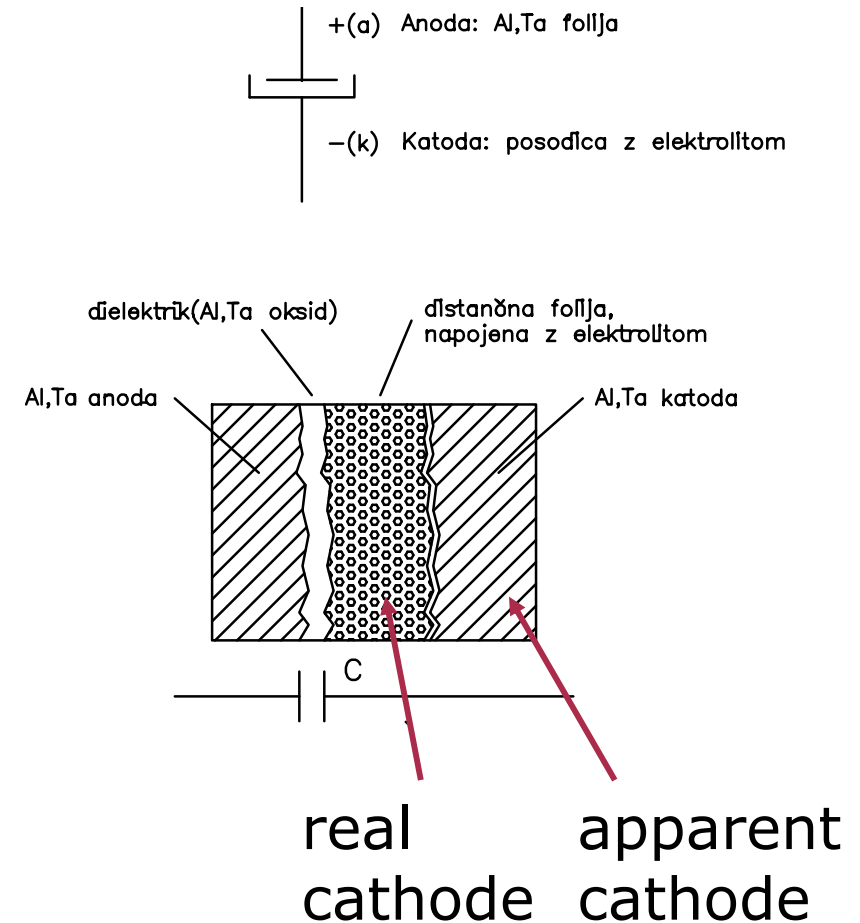
- materialu anode:
 - aluminijevi (Al),
 - tantalovi (Ta)
- vrsti elektrolita:
 - mokri (electrolytic; non-solid),
 - suhi (solid)
- značaju polarizacije:
 - polarni,
 - bipolarni (nepolarni)

Elektrolitski kondenzatorji

Vrsta C	Vrsta dielektrika	ϵ_r	Debelina dielektrika (μm)
Al- ELKO	Al_2O_3	7...10	(0.0013...0.0015/V)
Ta-ELKO	Ta_2O_5	24	(0.001...0.0015/V)
Plastni C	Poliester	3.2	0.5...2
Keramični	BaTiO_3	500...20000	5
Keramični COG	TiO_2	15...250	5

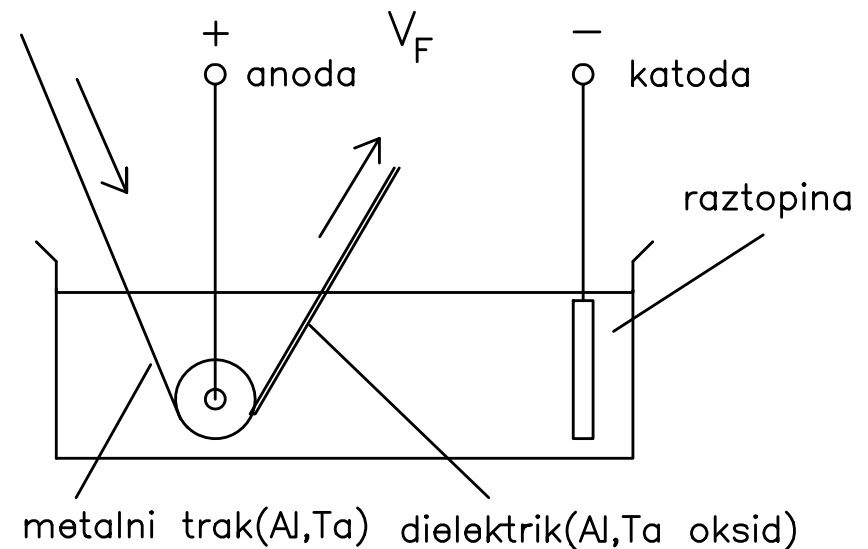
Elektrolitski kondenzatorji

- Dielektrik kondenzatorja je oksid na anodi (Al_2O_3 oz. Ta_2O_5)
- Površina anode je hrapava zaradi večje površine oz. kapacitivnosti,
- Zaradi boljšega električnega kontakta vstavljena med oksidirano anodo in katodo distančna folija, prepojena z dobro prevodnim elektrolitom, zaradi prisotnosti visokih koncentracij vodikovih (H^+) in elektrolitovih (El^-) ionov.
- Elektrolit → "tekoča elektroda", ki čimbolj objame anodo do tankega oksida (velika površina → velika C)



Mokri Al ELKO

- Izhodiščni material: tanek metalni Al trak $d \approx 100 \mu\text{m}$.
- Povečanje hrapavosti površine anode z jedkanjem Al folije v fosforni kislini.
- Ta je porozen \rightarrow še s sintranjem Ta prahu na površino.
- Povečanje površine: 80-100x za nizkonapetostne C in 30-40x za srednje/visoko napetostne C (Al-ELKO)
- Povečanja površine pride za ceno večjega tgđ (do 4x).
- Izdelava dielektrika (anodna oksidacija): V elektrolitu se pod vplivom pozitivne napetosti formiranja na anodi V_F na obeh površinah metalnega traku tvori oksidna plast (Al_2O_3 oz. Ta_2O_5).
- Debelina plasti d je sorazmerna V_F
Al $\rightarrow K_F = 1.5 \text{ nm/V}$,
Ta $\rightarrow K_F = 1 \text{ nm/V}$



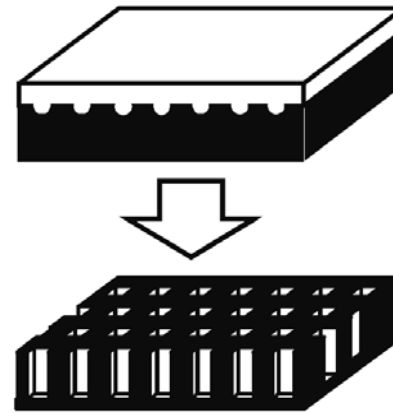
$$d = K_F V_F$$

Mokri Al ELKO

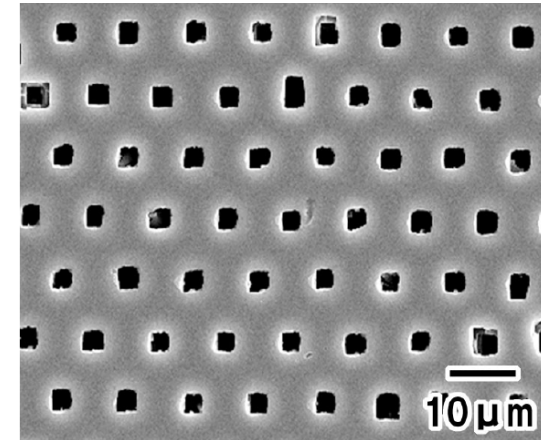
Anodno Al folijo visoke čistosti elektrokemijsko jedkamo v klorovi raztopini z DC, AC ali menjavo AC/DC ali kombinacijo AC/DC toka:

- Fino jedkano površino dobimo z AC elektrolizo → za nizkonapetostne C
- Tunelsko jedkanje z metalno masko dobimo z DC elektrolizo → za srednje/visokoapetostne C

Katodno Al folijo običajno jedkamo z AC elektrolizo za povečanje površine



Nadzor tunelskega jedkanja

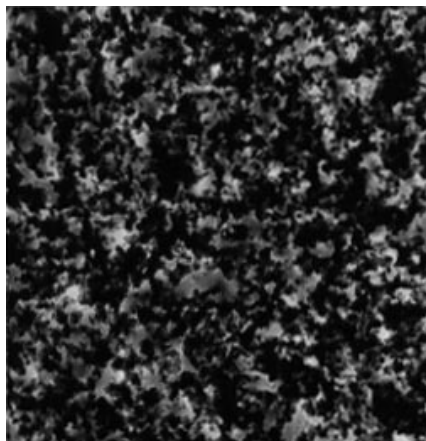


Tunelsko jedkana folija (zgoraj)

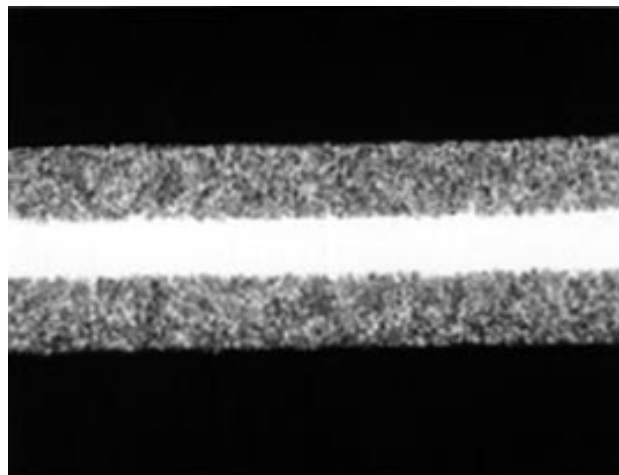
VIR: [Control of Tunnel Etching Sites of Al Foil for Electrolytic Capacitors Using Imprinting Process, Masuda/Nishio](#)

Mokri Al ELKO – jedkanje anode/katode

Fino jedkana folija
(niskonapetostni C)
(pogled zgoraj)



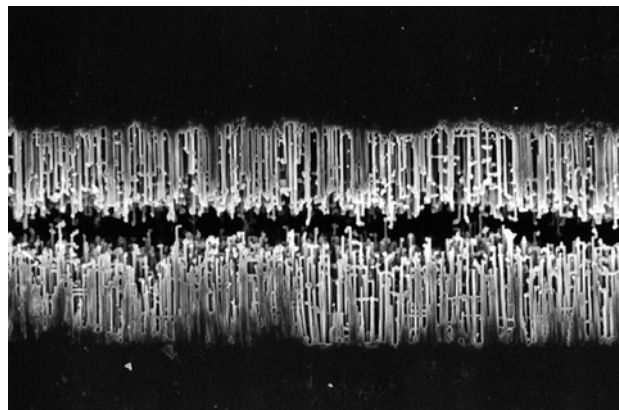
Fino jedkana folija
(niskonapetostni C
presek)



Fino jedkana folija
(srednje/visokonap.)
(pogled zgoraj)



Fino jedkana folija
(srednje/visokonap
presek)



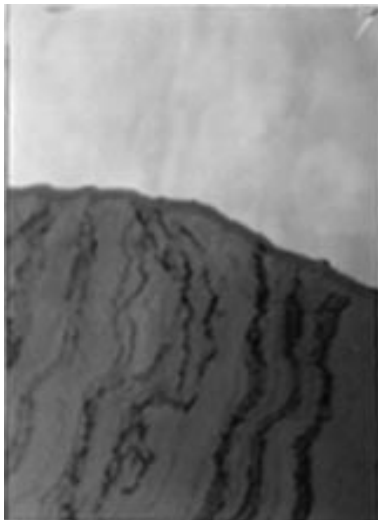
VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

Mokri Al ELKO – dielektrik

- Najedkano Al folijo anodno oksidiramo v raztopini borove kisline, amoniaka in vode.
- Cilj je tvorba aluminijevega oksida na površini (dielektrika) Al- ELKO
- DC napetost na foliji s katero oksidiramo anodo → **napetost formiranja** V_F (forming voltage).
- Debelina dielektrika je *skoraj* proporcionalna $K_F(\text{Al}) = 1.3 \dots 1.5 \text{ (nm/V)}$

VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

Mokri Al ELKO – dielektrik



$V_F=20V$



$V_F=100V$

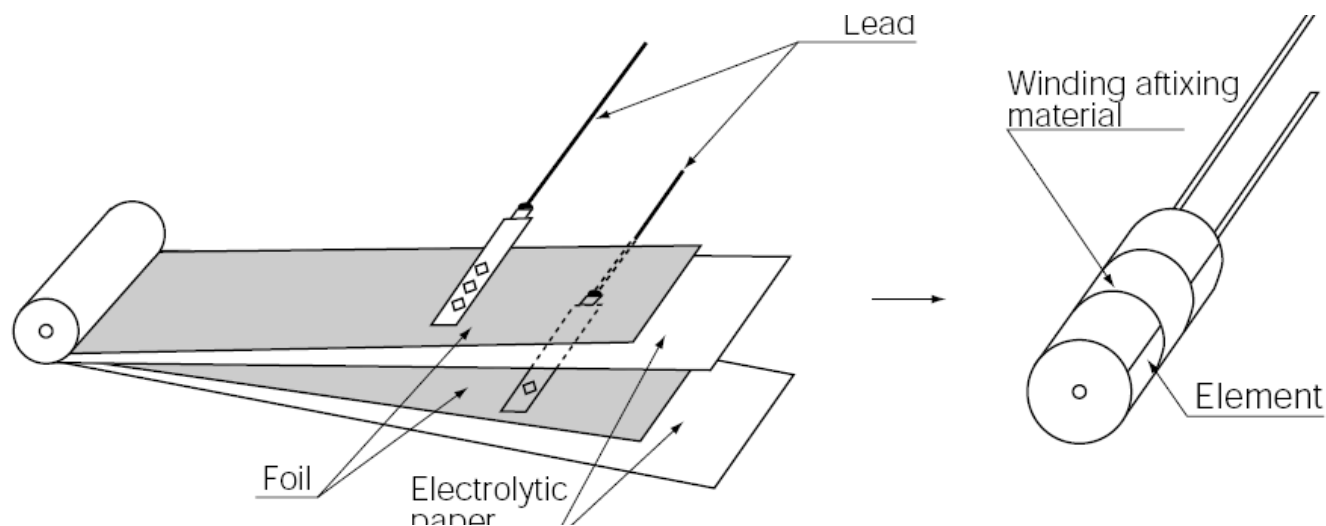


$V_F=250V$

VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

Mokri Al ELKO – elektrolit

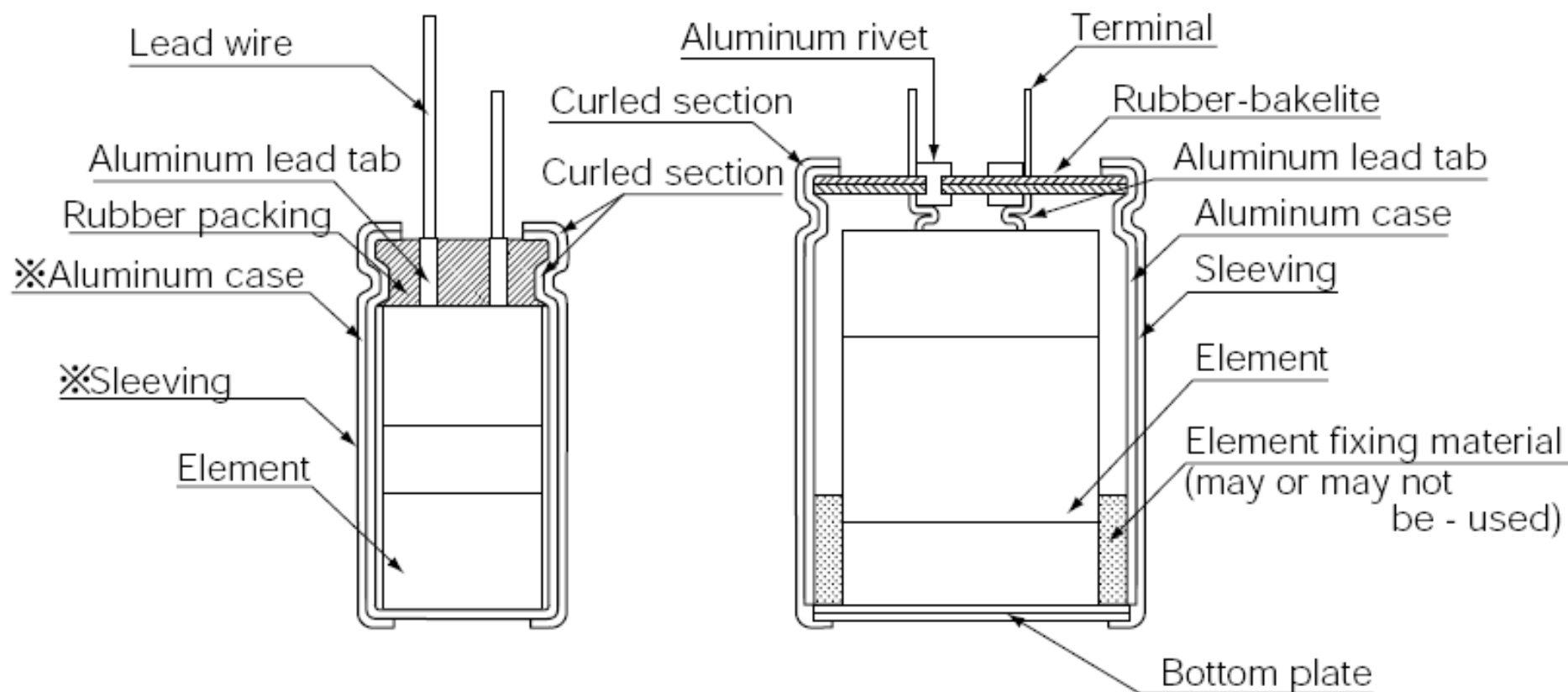
- Navijanje Al anode, Al katode in distančnih folij, prepojenih z elektrolitom (sendvič)
- Ko sendvič zvijemo, električno povežemo anodo in katodo
- Vstavljanje metalnih trakov za kontakte



VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

Mokri Al ELKO – enkapsulacija

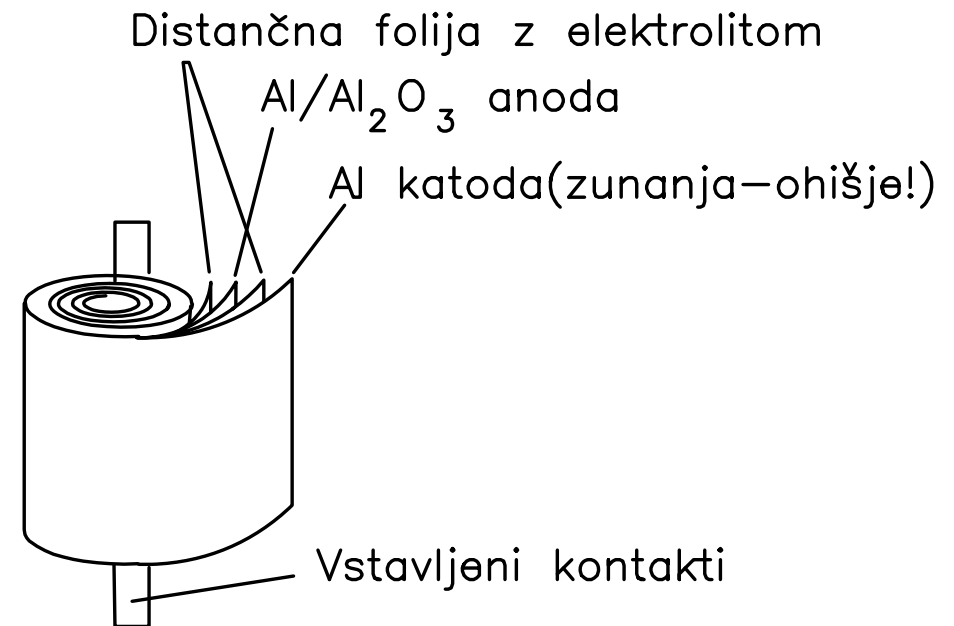
- Zalivanje v smole in zapiranje v kovinsko ohišje.



VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

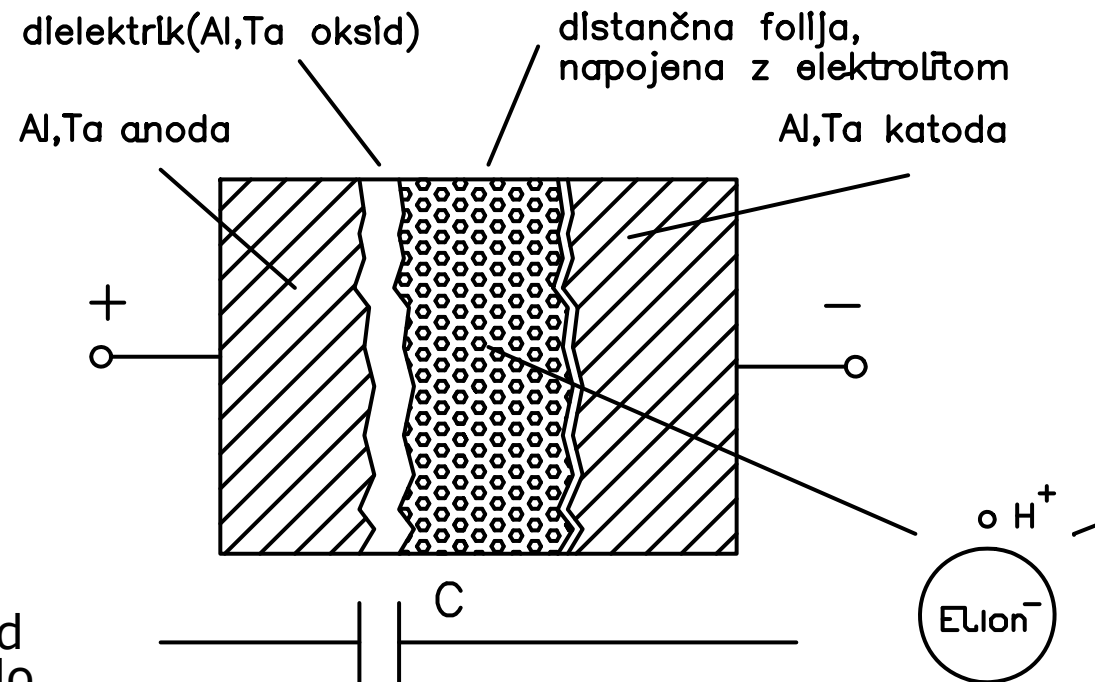
Mokri Al ELKO – varnostni faktor

- Previsoke napetosti povzročijo dodatno oksidacijo v elektrolitu kondenzatorja.
- To poveča debelino dielektrika → zmanjša kapacitivnost,
- Pri oksidaciji nastanejo plini, ki lahko uničijo element.
- Delovna napetost je zato za varnostni faktor ($k \approx 0.8$) nižja od V_F



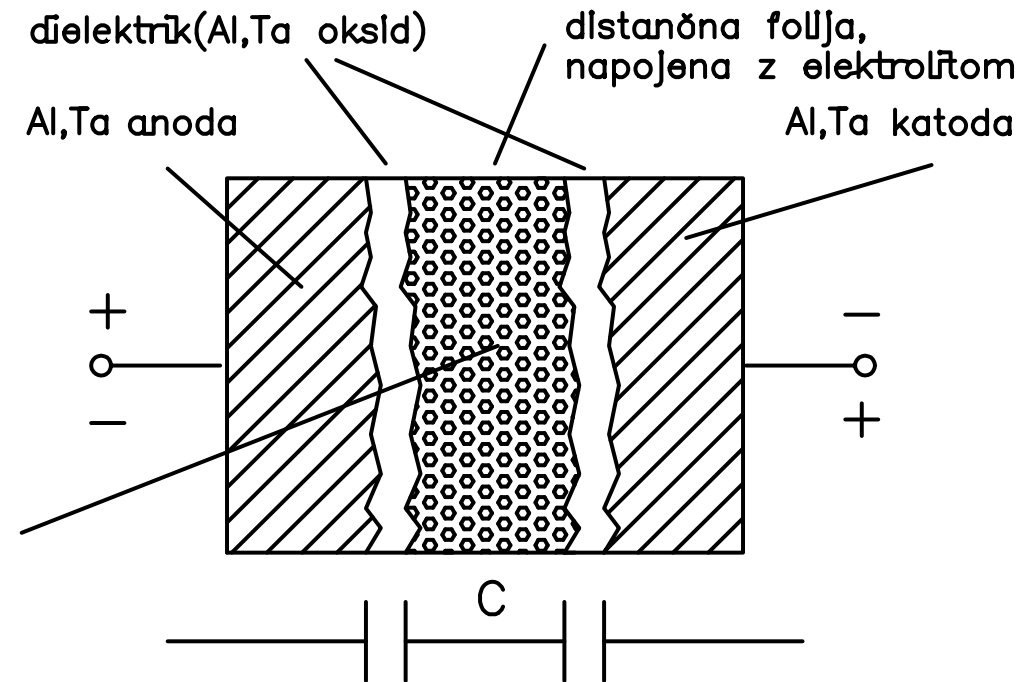
Polariteta ELKO

- Polarizacija(+/-) pritisnjene napetosti je → A je (+), K je (-)
- veliki negativni ioni elektrolita (El^-) ter mali prodorni pozitivni ioni vodika (H^+).
- **Pravilna polarizacija**
A je (+), K je (-):
 $V_{delovna} < V_F$
veliki ioni elektrolita ne prodrejo skozi oksid do anode → toka ni → oksidacije ni.
- **Nepravilna polarizacija**
A je (-), K je (+):
 H^+ ioni prodirajo skozi oksid do anode in se tam razelektrijo, izloča se vodik na anodi, oksid odstopa od anode, zaradi odkritih mest pride do naglega povečanja toka in izločanja plina (ventil)
- Katoda je zaščitena pred agresivnim elektrolitom s tankim oksidom ($V_F = 2V$).
 $V_{delovna} < V_F$ tudi pri nepravilni polarizaciji ne pride do reakcije.



Bipolarni ELKO

- Polarizacija napetosti ni pomembna (bipolarni)
- Struktura je enaka kot v polarnih z veliko razliko: **katoda je oksidirana** z isto V_F kot anoda
- Če je na anodi (-) pol napetosti → katoda je oksidirana → ioni ne morejo prodreti skozi oksid → toka in reakcije ni
- Neobčutljiv za DC/AC **napetost**
 $V_{delovna} < V_F$
- Slabost → 2x nižja kapacitivnost kot polarni



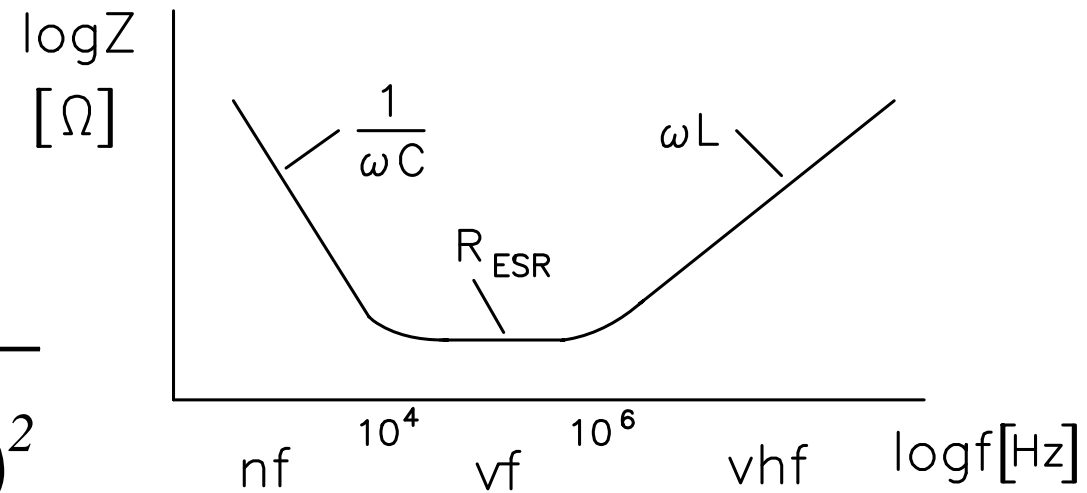
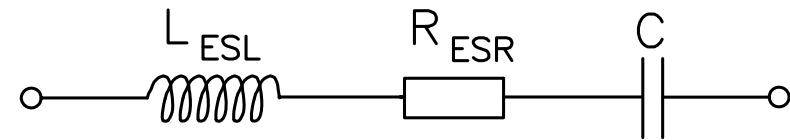
Nadomestno vezje mokrega Al ELKO

Nadomestno vezje ima dva parazitna elementa:

- ekvivalentna serijska upornost R_{ESR} :
ohmske upornosti dovodov, kontaktov,
metalne Al folije, elektrolita
 $R_{ESR} = (10^{-2} \dots 10^2 \Omega)$.
- ekvivalentna serijska induktivnost L_{ESL} :
induktivnost dovodov, navite strukture
metalne Al folije

Impedanca mokrega AI ELKO

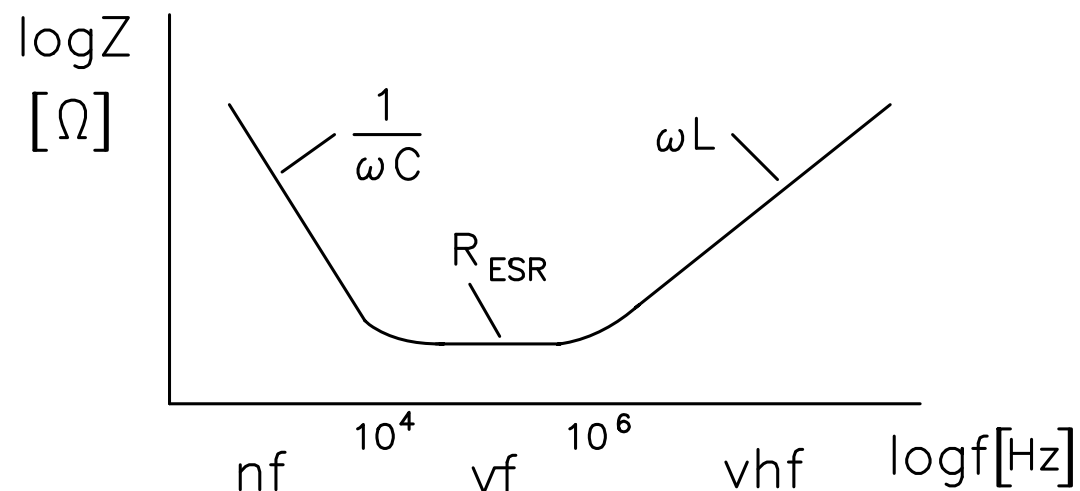
$$\hat{Z} = R_{ESR} + j\omega L_{ESL} + \frac{1}{j\omega C}$$
$$= R_{ESR} - j\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_{ESL}\right)$$



$$Z = \sqrt{R_{ESR}^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_{ESL}\right)^2}$$

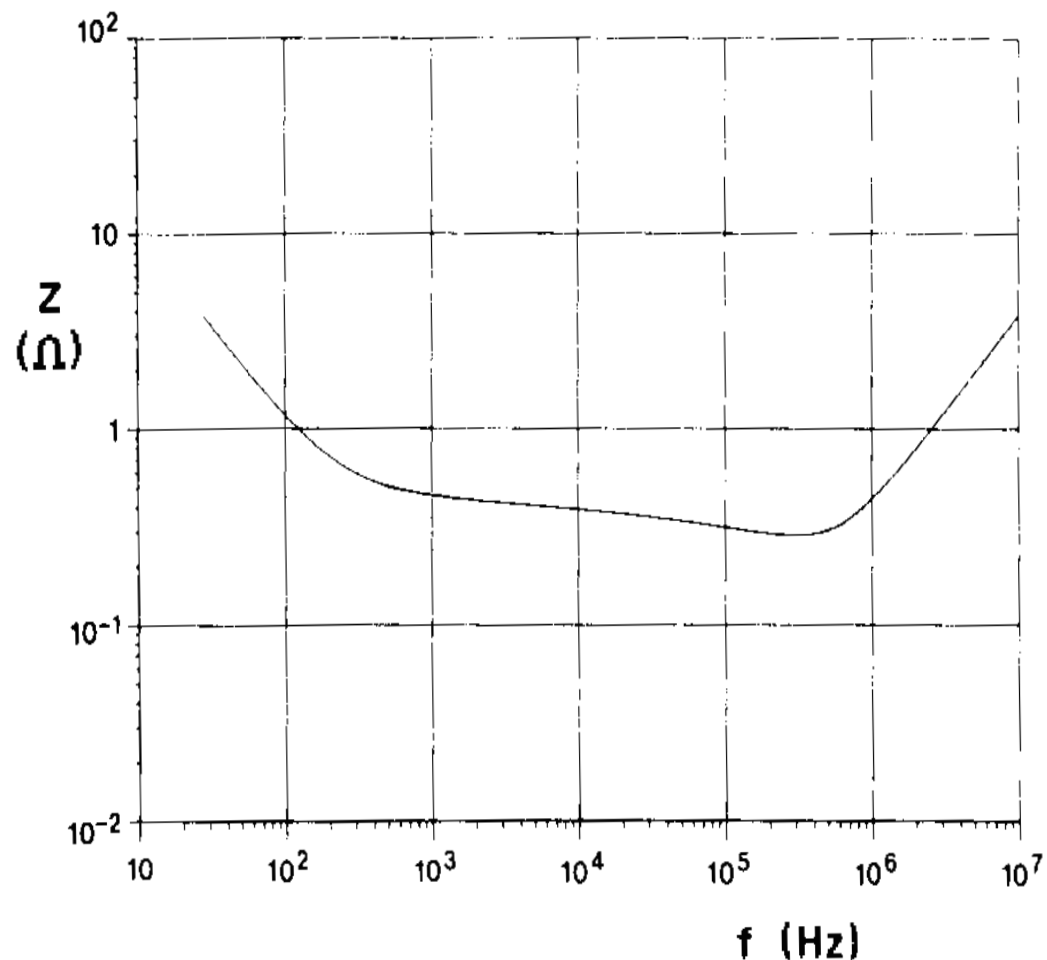
Impedanca mokrega AI ELKO

- **NF ($\omega \rightarrow 0$) :**
 $Z \approx 1/\omega C$ (idealni kondenzator) do $f_{NF} \approx 10\text{kHz}$
- **VF (ω velik) :** $Z \approx R_{ESR}$
(Izgublja uporabne lastnosti)
 $f_{VF} \approx 1\text{MHz}$.
- **VHF (ω zelo velik):**
 $Z \approx L_{ESL}$
- (prevzame lahko induktivni značaj)

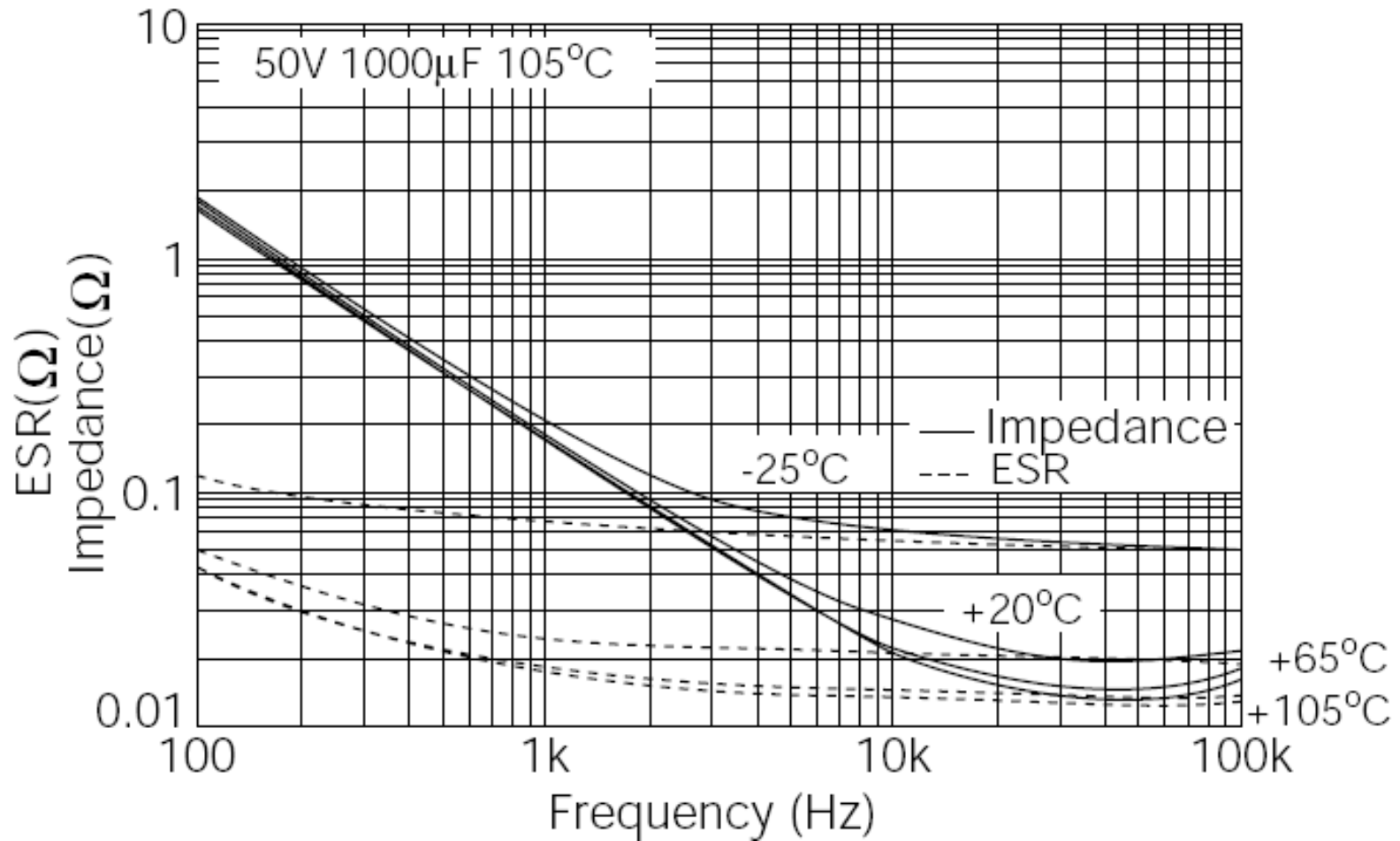


Impedanca mokrega Al ELKO

- $Z(f)$ resničnih elementov precej odstopajo, odvisno od strukture.
- Včasih srednje področje (R_{ESR}) ni izraženo.
- Izmerjeni diagrami odstopajo lahko tudi zato, ker v resnici parametri v nadomestnem vezju niso konstantni, ampak se spreminjajo zaradi najrazličnejših vplivov:
 - R_{ESR} upada s frekvenco in temperaturo.
 - C pogosto upada s frekvenco ter narašča s temperaturo in nazivno napetostjo.
 - Induktivnost L_{ESI} običajno narašča s temperaturo.

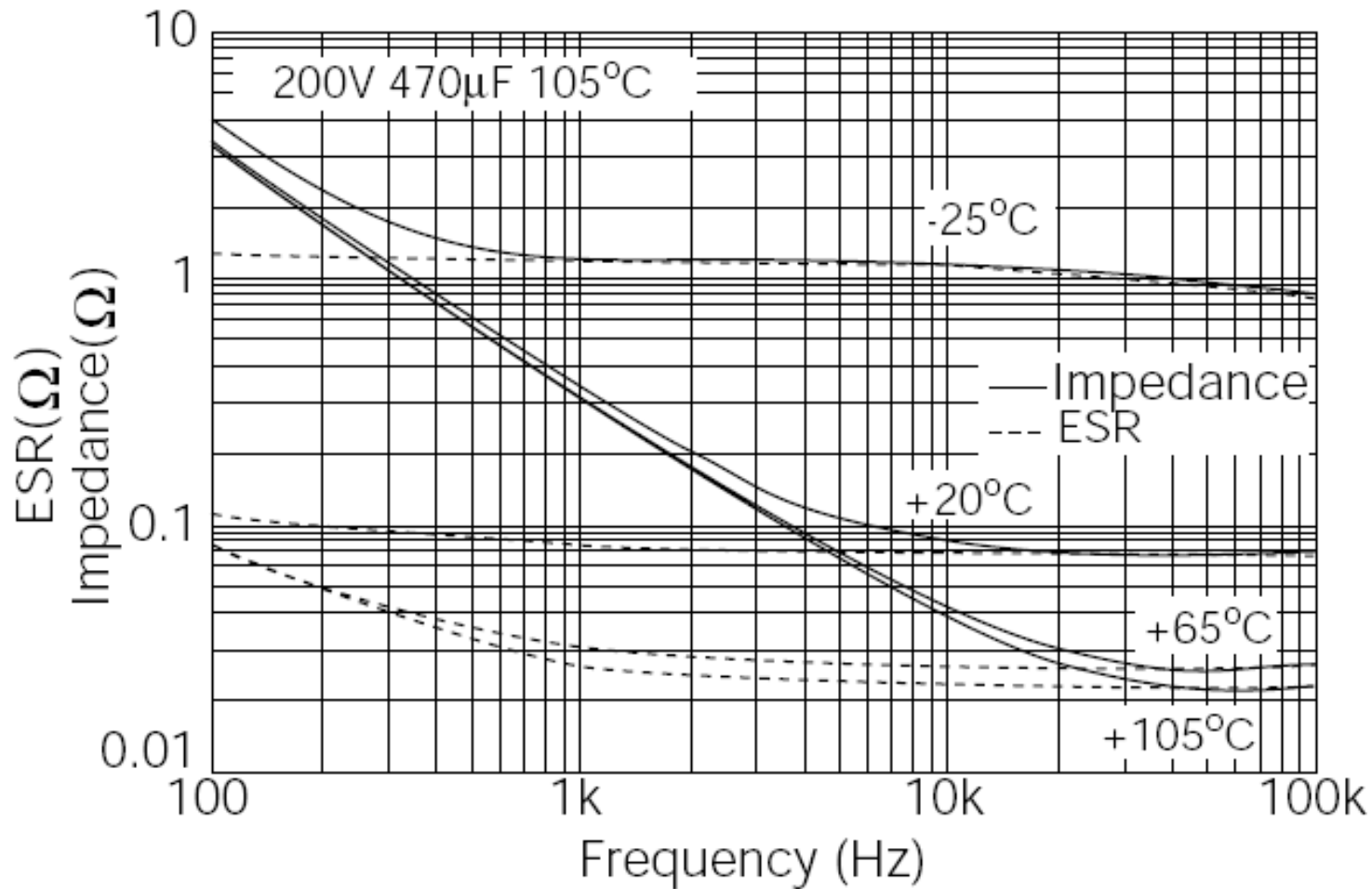


Impedanca mokrega AI ELKO - 1000 μ F/50V



VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

Impedanca mokrega AI ELKO - 470 μ F/200V



VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

Tok puščanja I_p

- Tok puščanja/prečni tok I_p (ang. leakage current) je enosmerni tok, ki teče skozi ELKO zaradi priključene enosmerne napetosti.
- Narašča s temperaturo in upada s časom od priključitve enosmerne napetosti

$C_n V_n [\mu\text{As}]$	$I_p [\mu\text{A}]$	
	tip I (profesionalni)	tip II (neprofesionalni)
≤ 1000	$\leq 10^{-2}C_n V_n$ oz. $1\mu\text{A}^{1)}$	$\leq 5 \cdot 10^{-2}C_n V_n$ oz. $5\mu\text{A}$
> 1000	$\leq 6 \cdot 10^{-3}C_n V_n + 4\mu\text{A}$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}C_n V_n + 20\mu\text{A}$

Tok puščanja I_p

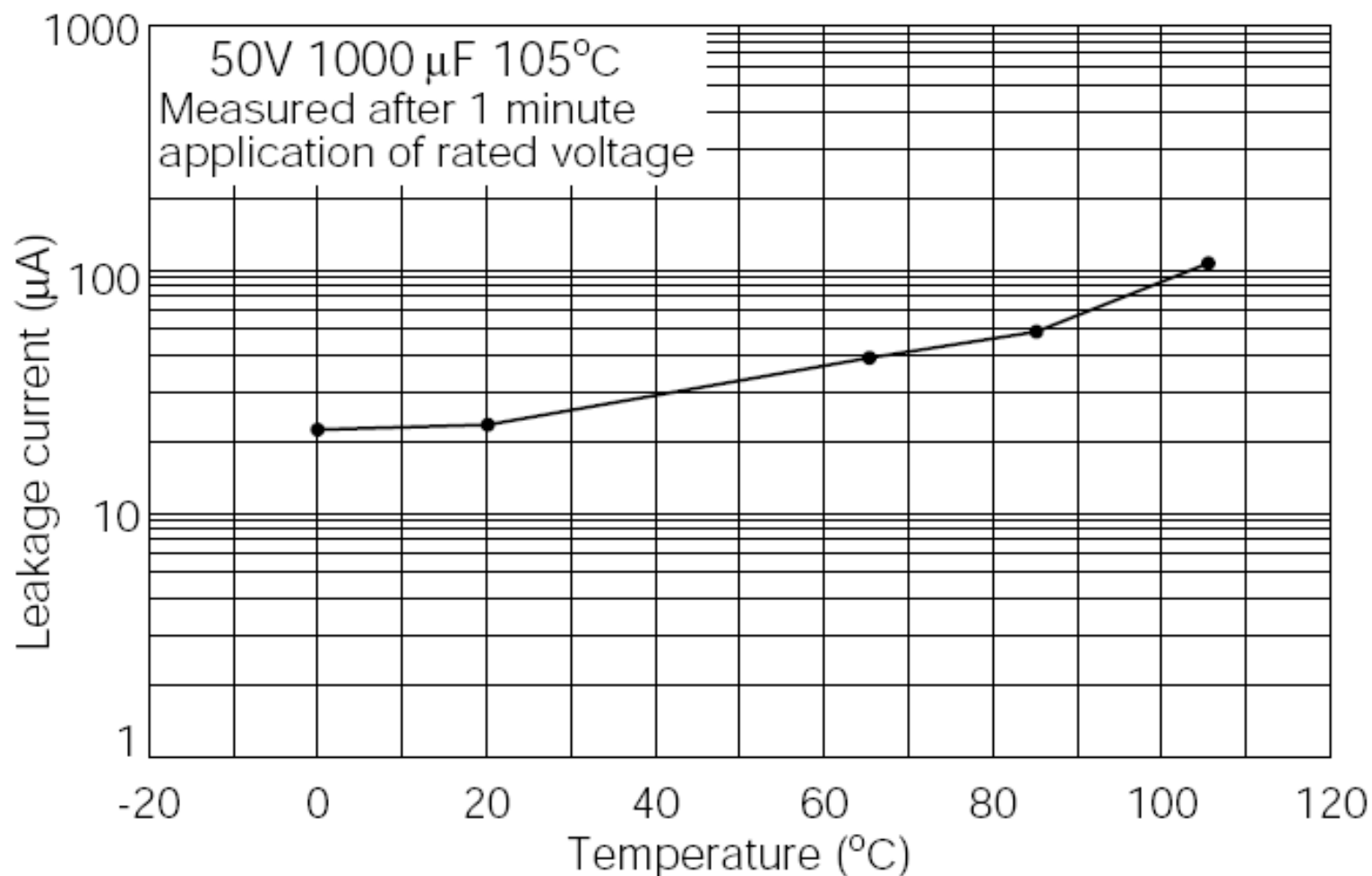
Vzroki za povečanje toka puščanja:

- Polarizacija dielektrika (aluminijeva oksidna plast)
- Razformiranje dielektrika
- Absorbpcija vlage v dielektriku
- Preboj dielektrika zaradi klorovih ali železovih delcev

- Tok puščanja lahko samo zmanjšamo s pravilno izbiro materialov, popolnoma izničiti ga nikdar ne moremo.

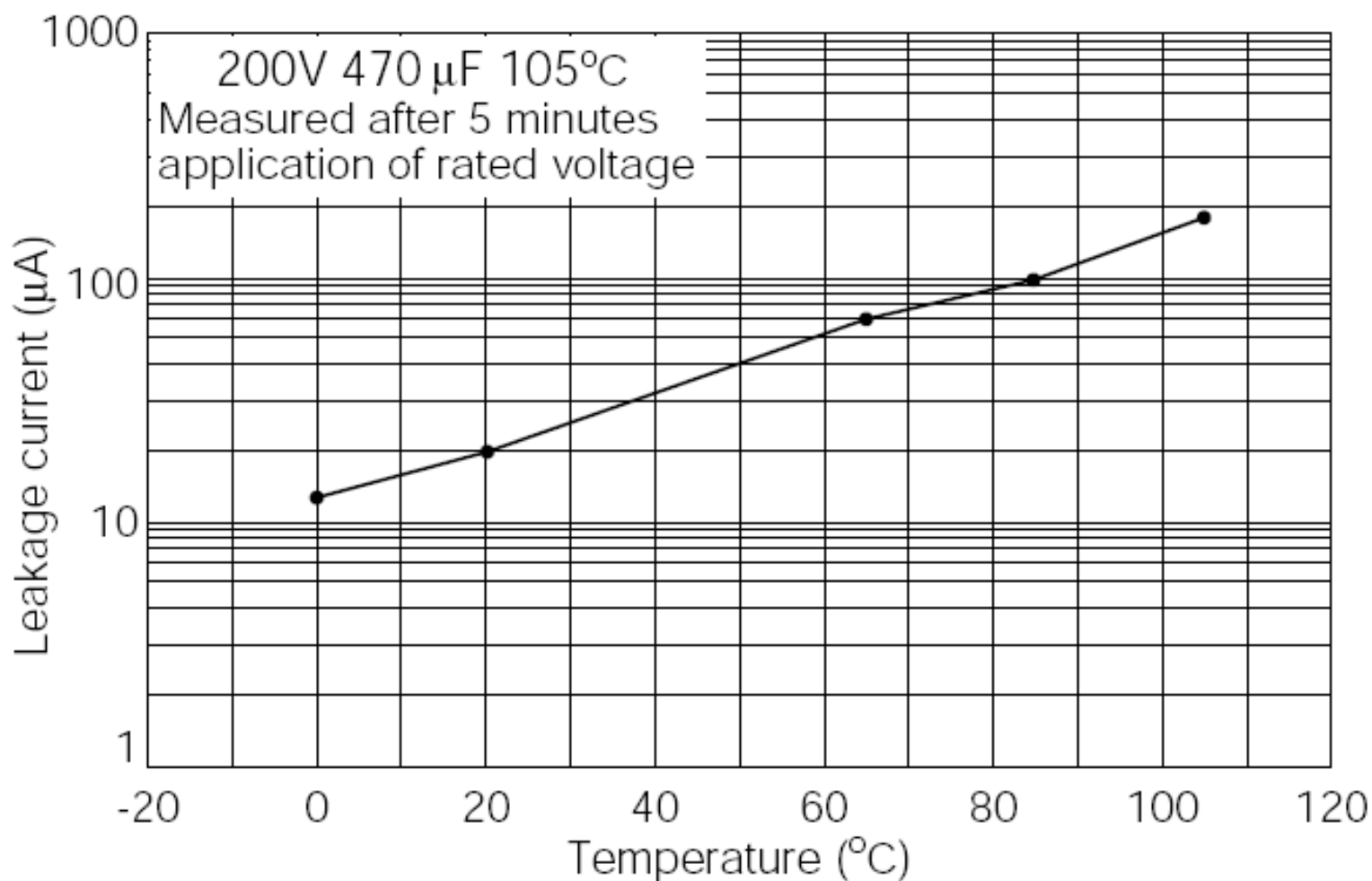
Meritev toka puščanja izvedemo pri nazivni napetosti na sobni temperaturi in vnaprej določenem času.

Tok puščanja I_p - 1000 μ F/50V



VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

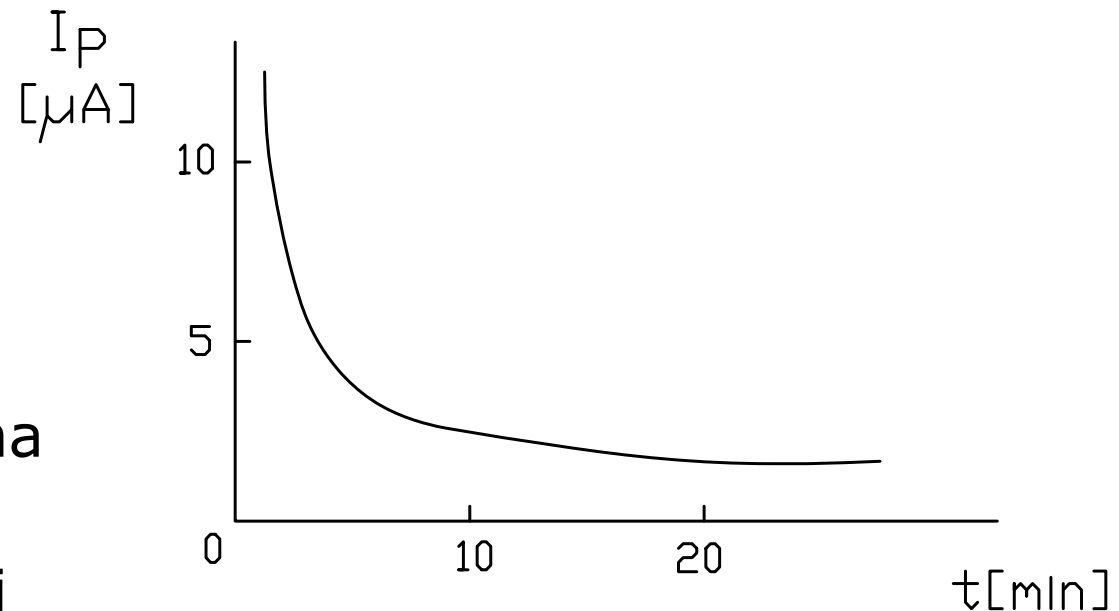
Tok puščanja I_p - 470 μ F/200V



VIR: General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON

Razformiranje/regeneracija oksida

- Če ELKO dalj časa ni bil pod napetostjo, se njegov dielektrik (oksid) lahko raztopi (**razformira**) v agresivnem elektrolitu kondenzatorja
- To povzroči visoke I_p .
- Kondenzator regeneriramo tako, da ga priključimo na nazivno napetost → ponovna formacije oksida.
- Pri tem lahko v začetku toki močno narastejo, tudi do 100x višjih vrednosti
- I_p mora čez čas upasti (graf)



Omejitve električnih obremenitev

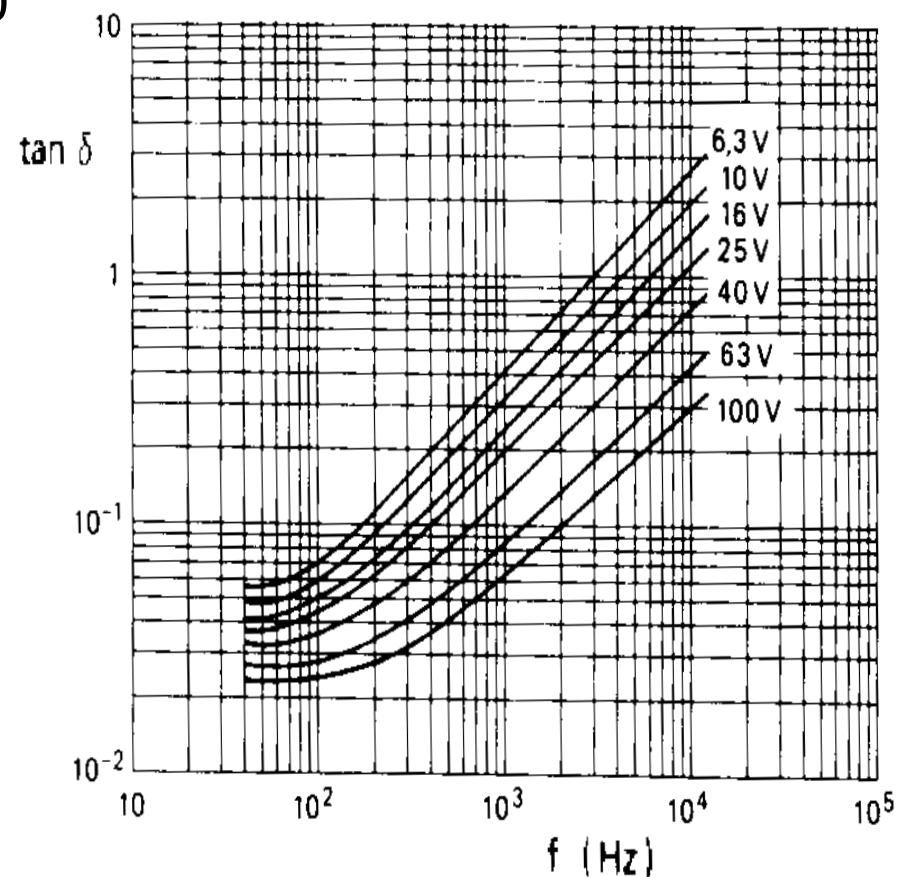
- **Omejitve glede toka:**
(RMS valovitost toka) I_{rmax} .
Omejitve nastopijo zaradi segrevanja kondenzatorja. Povišanje temperature ELKO zaradi električne obremenitve ne sme presežati $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$
- **Omejitve glede napetosti**
Vsota DC+AC napetosti ne sme preseči predpisane nazivne napetosti $V_n = k_F \cdot V_F$

$$P = I_r^2 R_{ESR} = \sigma A (T_C - T_a)$$

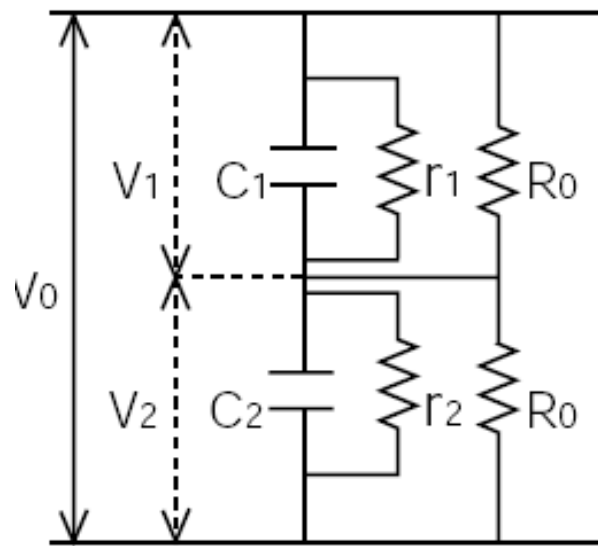
$$V_{rmax} = I_{rmax} \cdot R_{ESR}$$

Lastnosti mokrih Al ELKO

- Lestvice E3, E6.
 - Velike tolerance kapacitivnosti (so nesimetrične v pozitivni smeri)
- | K | M | Q | T | V |
|------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| $\pm 10\%$ | $\pm 20\%$ | $-10/+30\%$ | $-10/+50\%$ | $-10/+100\%$ |
- Omejitev:
 - nizke C: $C \cdot V < 500 \mu\text{As}$
 - visoke C: $C \cdot V < 25000 \mu\text{As}$
 - $\text{tg}\delta \approx 10^{-2} \dots 1$
 - Vrednosti $\text{tg}\delta$:
 - naraščajo s C_n, f
 - upadajo z V_n, T .
 - Označevanje
 - polarni:
anoda $\rightarrow + \rightarrow + \rightarrow +$
 - Bipolarni:
 $+ \text{ na anodi in na katodi.}$



Izenačitvena upornost pri zaporedni vezavi ELKO



- C1 : Aluminum Electrolytic Capacitor No.1
- C2 : Aluminum Electrolytic Capacitor No.2
- r1 : Leakage Current resistance of Capacitor No.1
- r2 : Leakage Current resistance of Capacitor No.2
- V1 : Voltage between terminals in Capacitor No.1
- V2 : Voltage between terminals in Capacitor No.2
- R0 : Balance Resistance
- V0 : Line Voltage

$$i_1 = \frac{V_1}{r_1} \quad , \quad i_2 = \frac{V_2}{r_2} \quad \dots \dots \dots \quad (2 - 3 \cdot 2 - 4)$$

$$V_0 = V_1 + V_2 \quad , \quad V_1 - V_2 = R_0 \times (i_2 - i_1)$$

$$R_0 = \frac{V_1 - V_2}{i_2 - i_1} \quad \dots \dots \dots \quad (2 - 5)$$

Izenačitvena upornost pri zaporedni vezavi ELKO

- Če je nazivna napetost ELKO $V(V)$ in njegova kapacitivnost $C(\mu F)$, potem lahko spremembe toka puščanja za PCB kondenzator na sobni temperaturi opišemo s spodnjo oceno.

$$\begin{aligned}i_{\max} - i_{\min} &= \frac{\sqrt{C \times V}}{2} - \frac{\sqrt{C \times V}}{5} \\ &= \sqrt{C \times V} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{5} \right) \\ &= \frac{3}{10} \sqrt{C \times V} \dots (\mu A)\end{aligned}$$

- Dobljeno variacijo I_p moramo popraviti glede na pogoje delovanja:
- Faktor naraščanja I_p s temperaturo: pri $65^\circ C$ je 2-3, pri $85^\circ C$ 3-5 krat večji (I_p Al ELKO raste s T)
- Tok puščanja je odvisen od napetosti na ELKO in pogojev shranjevanja, zato množimo I_p še z faktorjem variacije toka puščanja.

Izenačitvena upornost pri zaporedni vezavi ELKO

- Določite izenačitveno upornost zaradi razlik v I_p pri zaporedni vezavi 400V, 470 μ F Al-ELKO pri temperaturi 60°C
- Faktor povečanja I_p s temperaturo (60°C) = 2
- Zahtevano uravnoteženje napetosti: 10%
- Faktor variacije $I_p = 1.4$

Uravnoteženje napetosti:

$$V_1 - V_2 = 400 \times 0.1 = 40 \text{ (V)}$$

$$\begin{aligned} i_{\max} - i_{\min} &= \frac{3}{10} \sqrt{C \times V} \times 2 \times 1.4 \\ &= \frac{3}{10} \sqrt{470 \times 400} \times 2 \times 1.4 \\ &= 364 (\mu \text{ A}) \end{aligned}$$

Območje spreminjanja I_p

$$\therefore R_0 = \frac{40}{364 \times 10^{-6}} \approx 109000 \dots\dots 100 \text{ k}\Omega$$

VIR: [Nichicon](#)

Suhi Al ELKO

- Modernejši elementi od mokrih
- Struktura je podobna strukturi mokrih:
 - Navite folije,
 - Distančna folija: namesto papirja → tkanina iz steklenih vlaken,
 - Elektrolit: je prevodna pasta mangan nitrata.
 - Elektrolit se ne izsuši (ker je suh) → **stabilnejši** kondenzatorji.
 - Prevodna pasta večjo prevodnost od mokrih elektrolitov, kar prinese nižjo ekvivalentno serijsko upornost R_{ESR} .
- relativno nizka odvisnost kondenzatorjevih lastnosti od temperature, zlasti okrog sobnih temperatur
- dolga življenjska doba in doba skladiščenja
- večji dopustni enosmerni toki ter toki polnjenja in praznjenja

Tantal ELKO

- So boljši od aluminijevih (višje kapacitivnosti)
- Struktura je podobna kot pri aluminijevih.
- Dielektrik: tantalov oksid Ta_2O_5 , dielektričnost $\epsilon_r = 30$ ($Al_2O_3 \rightarrow 8$),
- $K_F = 1.0 \text{ nm/V}$ (50% nižja od Al!):
 - pri enaki debelini oksida za 50% višjo $V_F \rightarrow$ višja V_n ;
 - pri isti V_n za 50% nižjo debelino oksida \rightarrow višjo C
- Lastnosti Ta_2O_5 :
 - kemijsko bolj stabilen od Al_2O_3 , \rightarrow uporaba agresivnejših in koncentriranih elektrolitov \rightarrow bolj prevodni \rightarrow nižja R_{ESR} .
 - zelo stabilen material tudi \rightarrow kondenzatorji so temperaturno stabilni elementi s širokim temperaturnim obsegom delovanja (-55 ... +125°C).

Tantal ELKO

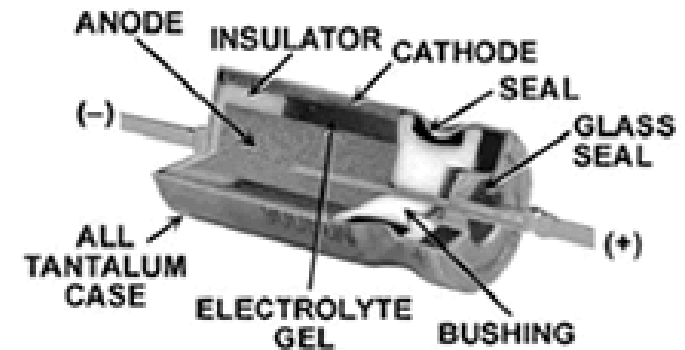
- Nižji valovitost toka kot Al ELKO
- Ne smemo obrniti polaritete napetosti, ali jo preseči (nimajo ventila → radi eksplodirajo), zato niso primerni za stikalne aplikacije, kjer se pojavljajo napetostne špice.
- Dražji od Al ELKO

Naviti mokri Ta ELKO

- Anoda → tanka ($d \approx 10\mu\text{m}$) oksidirana (Ta_2O_5) folija
- Distančna folija → papir ($d \approx 10\mu\text{m}$).
- Elektrolit:
 - litijev klorid (nižje V_n)
 - borova kislina (višje V_n).
- Katoda: Ta folija,
 - neoksidirana folija (polarni)
 - oksidirana folija (bipolarni),
- $C_n \approx 1\mu\text{F} \dots 2200\mu\text{F}$,
- $V_n \approx 15 \dots 125\text{ V}$.



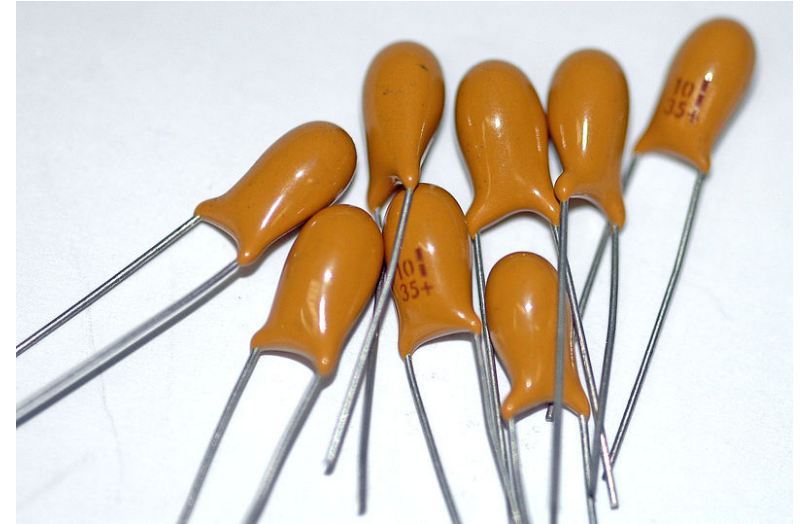
VIR: [Vishay M39006](#)



VIR: [Kemet wet Ta cap.](#)

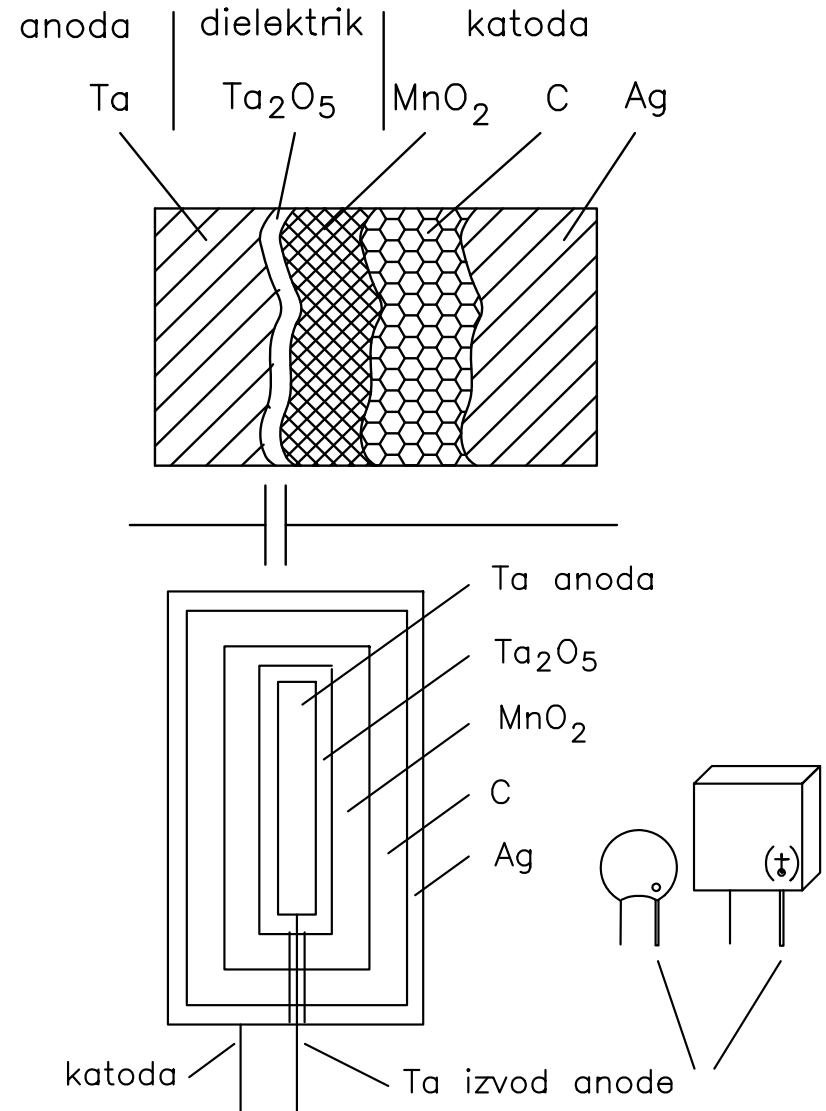
Ploščati mokri Ta ELKO

- Anoda → ploščica Ta
- Kapacitivnost povečana z naravno poroznostjo Ta + sintranjem finega Ta prahu
- Elektrolit:
 - žveplena kislina
 - litijev klorid → zelo nizke R_{ESR} .
- Katoda (obenem ohišje) mora biti na delu, ki je v stiku z elektrolitom, iz srebra.
- $C_n \approx 2,2\mu\text{F} \dots 1200\mu\text{F}$ (E6)
- $V_n \approx 6.3\text{V} \dots 125\text{V}$



Suhi Ta ELKO

- **Nima elektrolita**, ampak trden polprevodniški material MnO_2
→ **trdni (solid) kondenzatorji**
- **Anoda:**
 - ploščica ali žička iz tantala Ta, ki ji površino še povečajo s sintranjem finega Ta prahu na površino.
- **Katoda:**
 - Impregnacija oksidirane anode z manganom nitrata, ki se nato z oksidacijo pretvori v manganov oksid MnO_2 .
 - MnO_2 je polprevodniški material, vendar ima zelo dobro prevodnost.
 - Ponavljamo, dokler plast MnO_2 ni dovolj debela in prevodna.
 - Plast MnO_2 ojačimo s prevodno (C) ali (Ag) prevleko in
 - Prispajkamo izvode.



Lastnosti suhih Ta ELKO

- Suhi boljši od Ta mokrih kondenzatorjev
- $C_n \approx 0,1 \mu\text{F} \dots 2200 \mu\text{F}$ (E6 lestvica)
- $V_n \approx 6.3\text{V} \dots 80\text{V}$
- Temperaturni obseg: $-55^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$
- visoka specifična kapacitivnost
- dobre VF lastnosti
- visoka temperaturna stabilnost
- $I_p \approx 0.5 \dots 5 \mu\text{A}$ (nižji kot pri mokrih)
- $\text{tg}\delta$ raste s frekvenco in pada s temperaturo;
 $\text{tg}\delta < 0.4$ ($f < 10\text{kHz}$) za $1\mu\text{F}/35\text{V}$ kondenzator
- dolg čas skladiščenja in dolga življenjska doba

Označevanje Ta ELKO

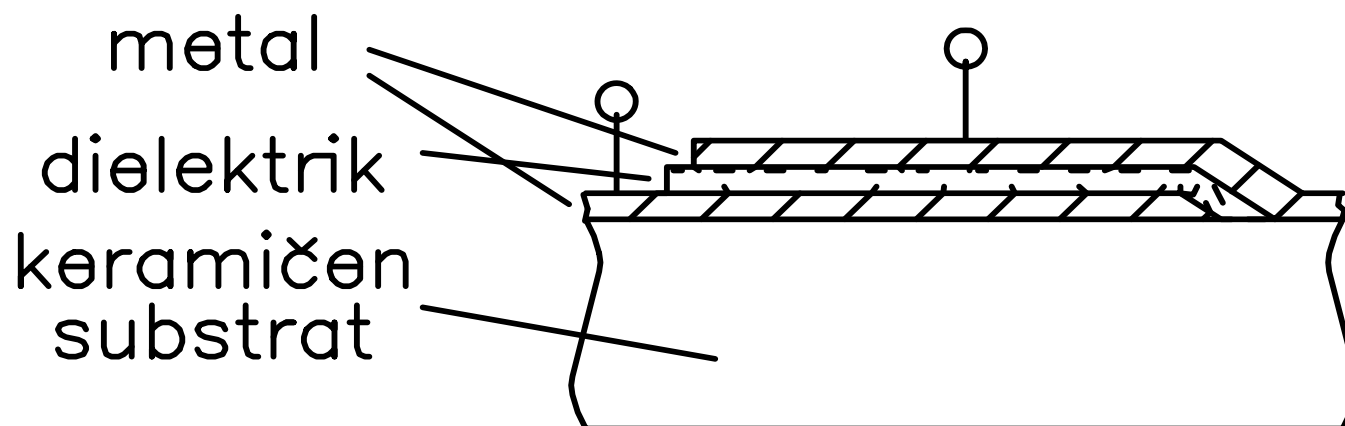
- Pri polarnih kondenzatorjih:
 - pika ali + ob anodi,
 - žični dovod anode debelejši
- Nima varnostnega silikonskega ventila (kot Al ELKO) in zato eksplodira (paziti na polariteto)

Specialni kondenzatorji

- Specialne kondenzatorje v modernih elektronskih tehnologijah:
- **hibridne tehnologije**, ki jih delimo glede na karakteristične debeline nastopajočih plasti na
 - tankoplastne in
 - debeloplastne tehnologije
- **monolitne tehnologije**
glede na izhodiščni material običajno na Si, GaAs ...
- **tiskana vezja**, ki jih delimo na
 - klasična tiskana vezja
(Printed Circuit Board, PCB)
 - tiskana vezja s površinsko montažo
(Surface Mounted Technology, SMT)
- Elementi nastopajo:
 - samostojni (tabletki)
 - kot del vezja (vgrajeni)

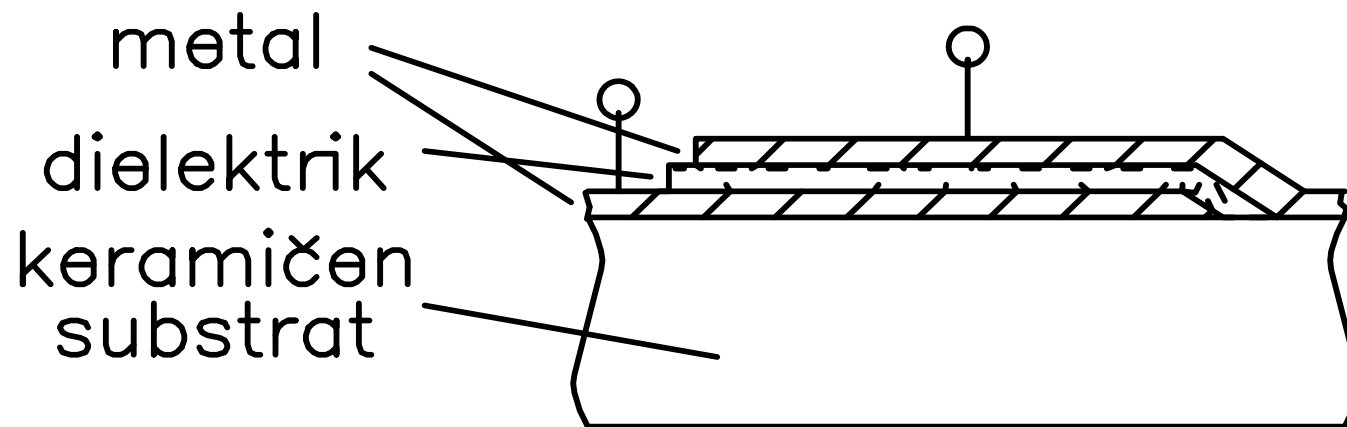
Tankoplastni kondenzatorji

- Nanesemo tanke metalne in dielektrične plasti na substrat (keramika, safir, steklo)
Z vakuumsko depozicijo (uporovno naparevanje, naparevanje z elektronskim topom ali naprševanje)
- $d \approx 1\mu\text{m}$ (tankoplastni)
- Geometrija elementa \rightarrow fotolitografija



Debeloplastni kondenzatorji

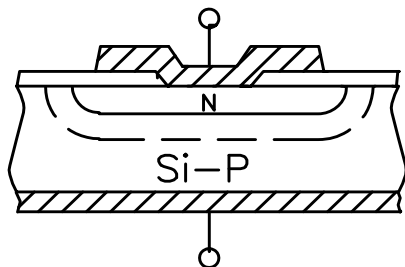
- Struktura enaka kot pri tankoplastnih
- Izdelani so s postopki **tiskanja** ustreznih **metalnih** in **dielektričnih past**.
- $d \approx 10 \dots 100\mu\text{m}$ (debele plasti)
- Geometrija elementa \rightarrow fotolitografija



PN spojni kondenzator

- Dielektrik kondenzatorja je osiromašeno področje PN spoja v zaporni smeri, ki je osiromašeno prostih nosilcev in se zato obnaša kot dielektrik.
- Zaporni polarizaciji PN spoja → polarni kondenzator.
- Izdelan s standardnimi polprevodniškimi tehnološkimi postopki:
 - termične oksidacije,
 - fotolitografije oksidne plasti in nato
 - skozi nastale odprtine selektivnega vnašanja donorskih ali akceptorskih primesi s pomočjo termične difuzije ali ionske implantacije.
- Širina osiromašenega področja je odvisna od zaporne napetosti → $C=C(V_R)$ (varicap)

$$C(V) = \varepsilon \frac{A}{d(V)} = \frac{k}{V^n}$$

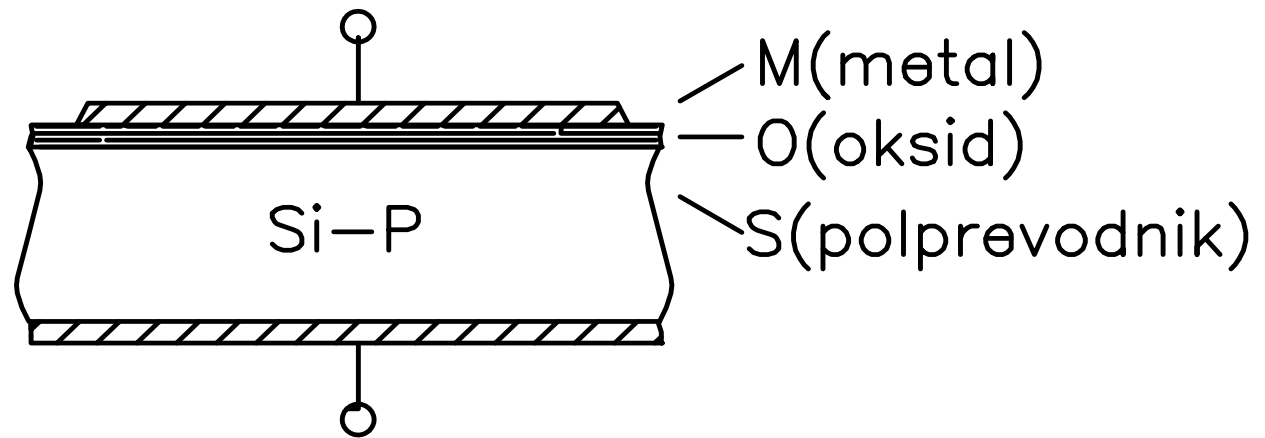


- ε dielektričnost polprevodnika $\varepsilon_r(\text{Si})=12$
- n → odvisna od tipa PN spoja
 - $n=1/2$ → stopničast spoj
 - $1/3$ → linearen spoj,
 - vmes → za ostale tipe PN spojev
- $I_p \approx 50 \text{ nA/mm}^2$, $\text{tg} \delta \approx 100 \cdot 10^{-4}$

MOS kondenzator

- Dielektrik je silicijev oksid SiO_2 ($\epsilon_r(\text{SiO}_2)=4$) ($d_{ox} \approx 0.1 \dots 1 \mu\text{m}$)
- Zgornja elektroda je (Al, Au),
- Spodnja elektroda je dopiran polprevodnik

$$C = \epsilon \frac{A}{d_{ox}}$$



Electrical double-layer capacitors (EDLC)

(EDLC) (**supercapacitor**, ultracapacitors) nimajo trdnega dielektrika. Elektrolit predstavlja prevodno povezavo med dvema aktivnima elektrodama, za razliko od ELKO, kjer je elektrolit del elektrode (katode)

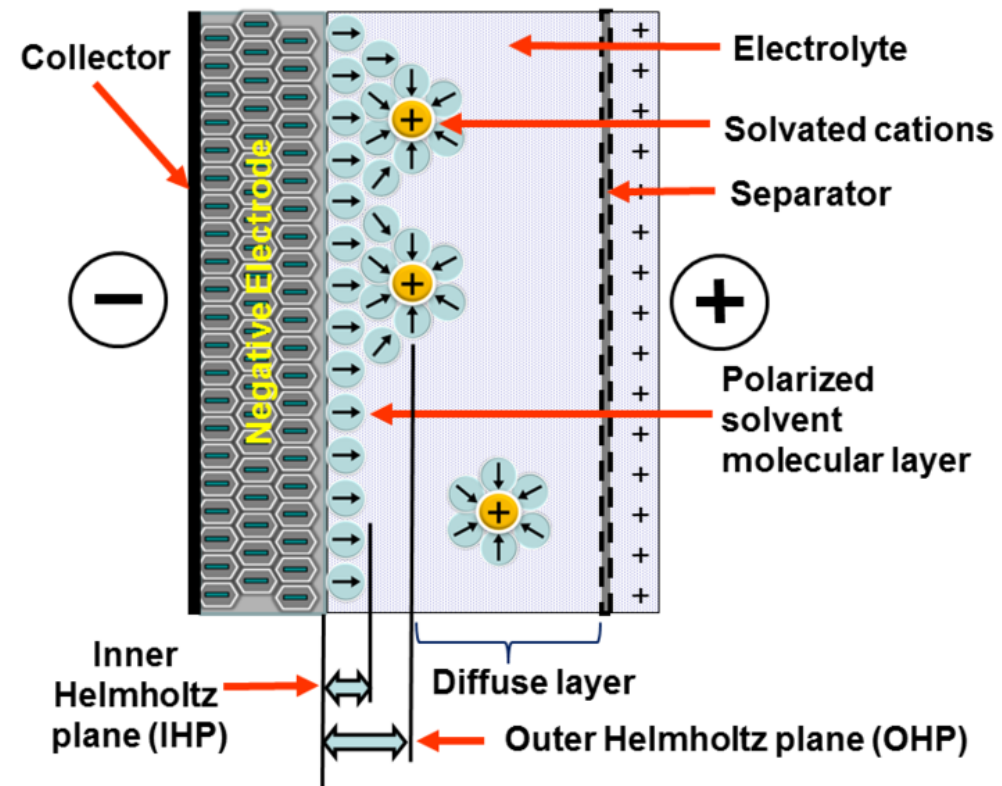
- Delitev po principu hranjenja naboja:
 - Dvojna Helmholtzeva plast (ang. double-layer capacitance)
Hranjenje naboja dosežemo z ločitvijo naboja v dvojni Helmholtzevi plasti med površino prevodne elektrode in elektrolitom (raztopina)
 - Debelina plasti: (0.3 ... 0.8 nm) → visok C
- Psevdokapacitivnost (Pseudocapacitance)
- Oba principa prispevata k celotni kapacitivnosti – razmerje prispevkov je odvisno od načrtovanja elektrod in sestave elektrolita.
- Psevdokapacitivnost lahko poveča velikost kapacitivnosti za razred velikosti čez prispevek dvojne Helmholtzevi plasti.

Lastnosti EDLC

- Materiali za telo: velika poroznost, dobre dielektrične lastnosti
 - Aktiviran ogljik (zrna) iz lupin kokosovih orehov (250 m²/g)
 - Grafen (enoatomska urejena plast C atomov) ima veliko specifično površino, dobra el. prevodnost
 - C nanocevkke na substratu
 - C aerogel (pena) največja spec. površina od vseh (1000 m²/g)

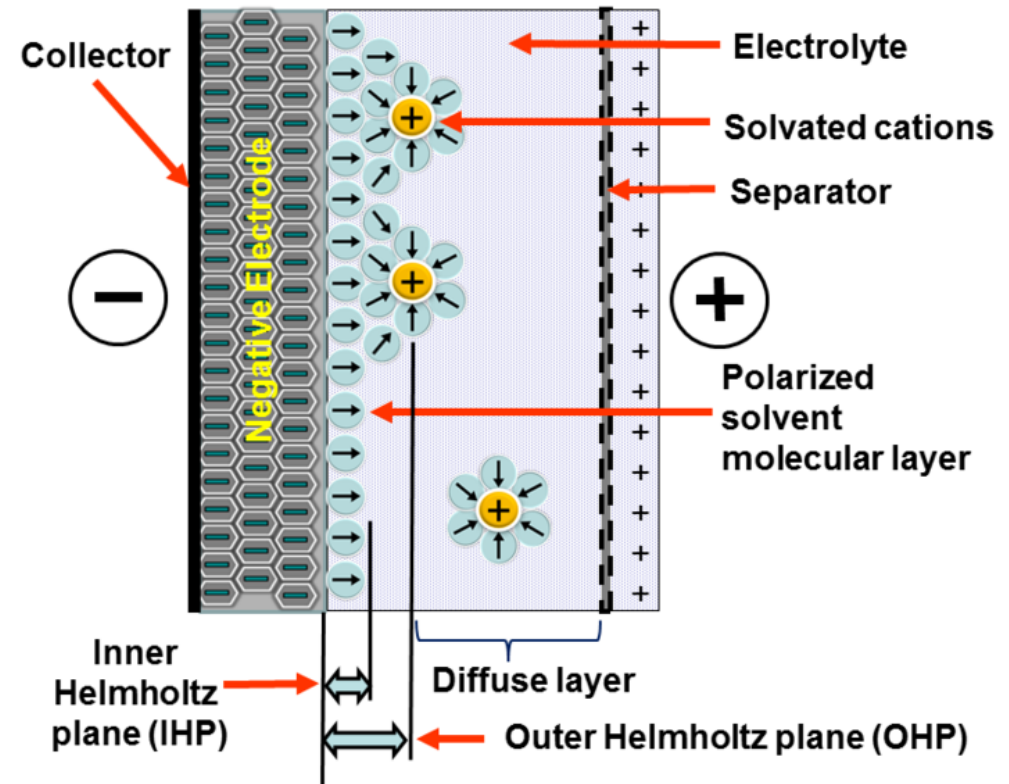
Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- Se pojavlja med prevodno kovinsko elektrodo in sosedno tekočo elektrodo (elektrolit)
- Elektrolit je mešanica pozitivnih in negativnih ionov, raztopljeni v topilu (npr. vodi)
- Na površini elektrode obstaja stična plast tekočega elektrolita in kovinske elektrode, kjer pride do učinka dvojne plasti
- Če na elektrodi priključimo napetost, se ustvarita plasti polariziranih ionov:
 - Ena plast ionov je na površinski mrežni strukturi kov. elektrode,
 - Druga plast ionov (obraten naboj) pa izvira iz raztopljenih ionov, porazdeljenih v elektrolitu.
- Plasti ionov sta ločeni s plastjo molekul topila (npr. voda)



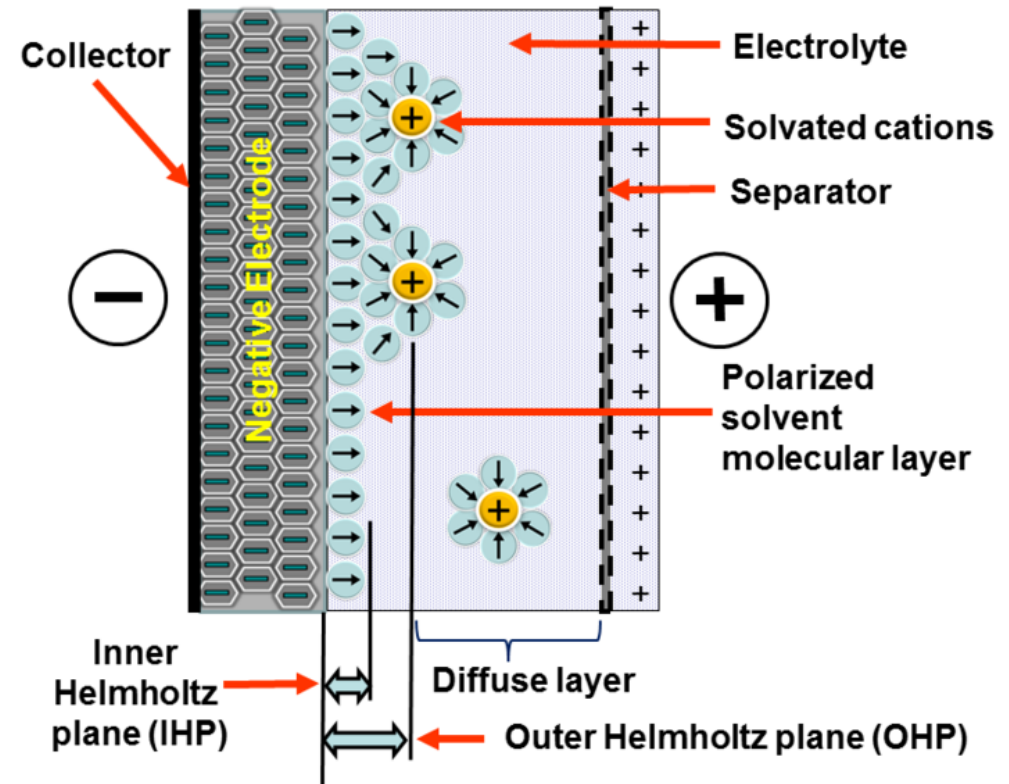
Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- Plast molekul topila tvori notranjo Helmholtzevo ravnino (IHP – inner Helmholtz plane)
- IHP se z adsorpcijo drži površine elektrode in ločuje nasprotno polarizirani plasti ionov – tvori **molekularni dielektrik**.
- Naboj na elektrodi je kompenziran z nasprotnim nabojem v zunanji Helmholtzevi ravnini (OHP – outer Helmholtz plane).
- OHP je področje, kjer se zberejo polarizirani ioni elektrolita.



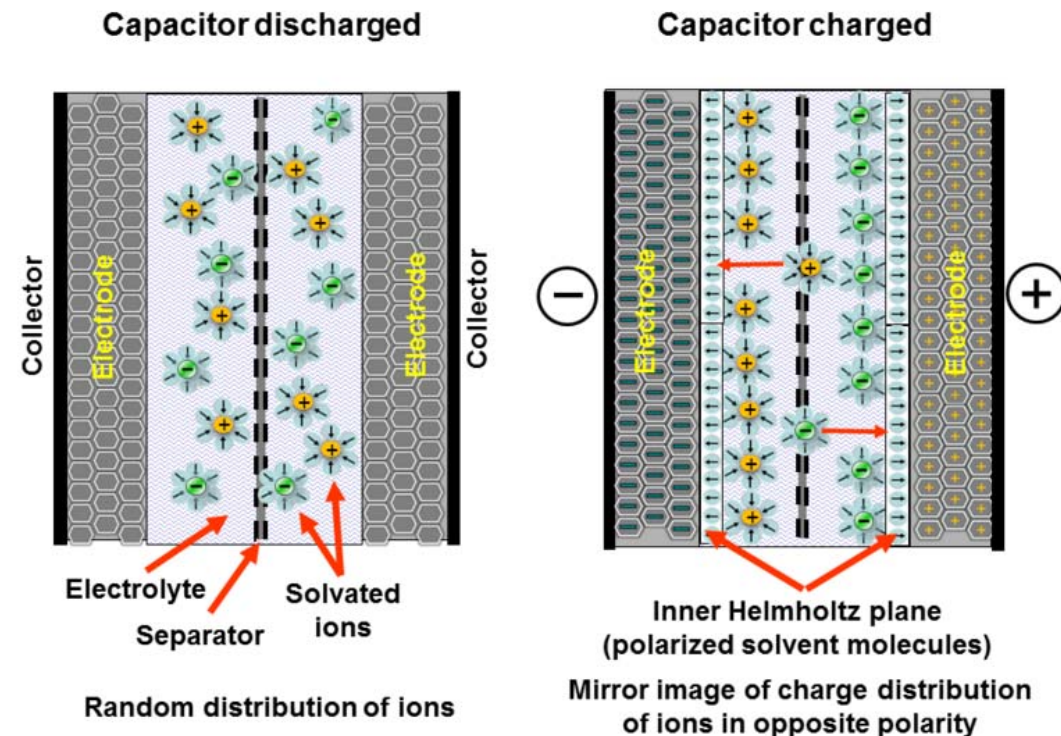
Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- Opisano ločevanje plasti služi hranjenju naboja.
- Naboj v dvojni plasti ustvarja statično električno polje v molekularni IHP plasti molekul topila, ki ustreza priključeni napetosti:
 - "Debelina" nabite plasti kovinske elektrode je okoli 0.1 nm.
 - "Debelina" nabite plasti v elektrolitu je odvisna od velikosti molekul topila ter gibanja/koncentracije ionov v topilu. (0.1 do 10 nm)
- Vsota IHP in OHP prispevkov → skupna debelina dvojne plasti.
- V zelo tanki IHP se ustvarjajo zelo visoka električna polja (npr. $U=2V$; $d=0.4\text{ nm}$ → $E=5\text{ kV/mm}$)



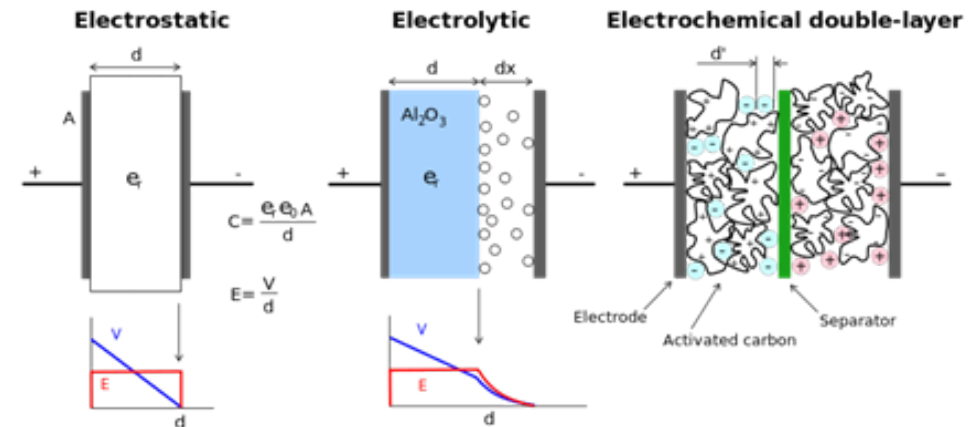
Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- Dvojna plast predstavlja dielektrično plast klasičnega kondenzatorja z debelino molekule.
- Poenostavljen Helmholtzev model kapacitivnosti temelji na diferencialni kapacitivnosti C_d , ki je neodvisna od gostote naboja – odvisna je le od dielektrične konstante ϵ in debeline dvojne plasti δ .
- Če je topilo v elektrolitu voda, potem vpliv visokega električnega polja v plasti ustvari dielektričnost $\epsilon=6$, namesto $\epsilon(\text{voda})=80@ (E=0)$ polja. Debelina ločevalne plasti $\delta \approx 0.3 \text{ nm}$,
- Specifična kapacitivnost 18 F/cm^2 .



Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- V resničnih EDLC učinek dvojne plasti ni edini vzrok povečanju kapacitivnosti (površina elektrod; debelina ločevalne plasti)
- Kapacitivnost je odvisna od strukture/materiala elektrod in mešanice elektrolita in psevdokapacitivnosti
- Zaradi zrcaljenja naboja se na drugi elektrodi ustvarijo enake razmere nasprotne polaritete, torej si celotno strukturo predstavljamo kot dva zaporedno vezana kondenzatorja. V idealnem primeru sta prispevka simetrična $\rightarrow C/2$

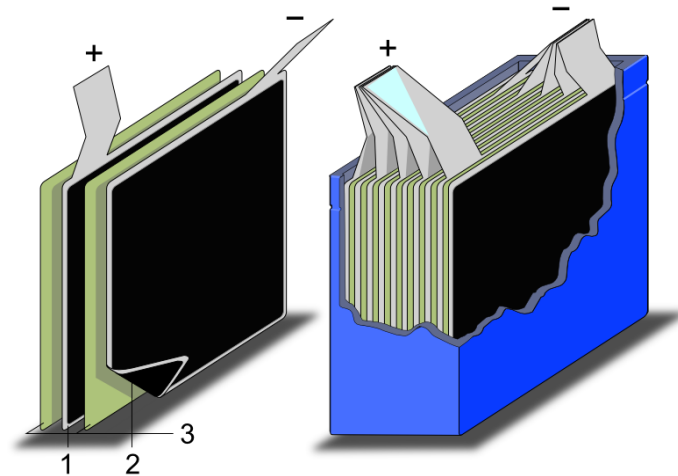
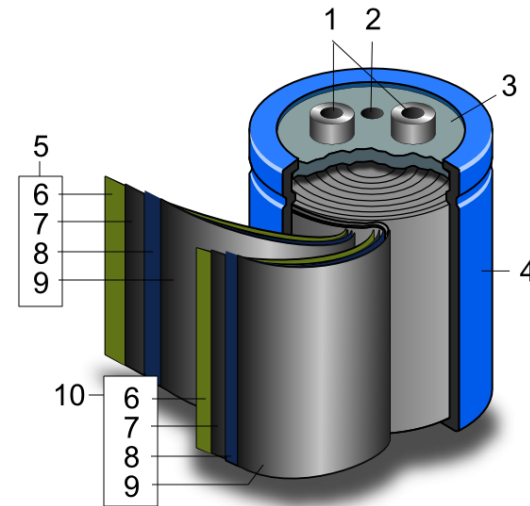


Delitev EDLC

- Delitev glede na načrtovanje elektrod:
 - DLC - ogljikove elektrode
 - Psevdokondenzatorji – elektrode iz kovinskih oksidov/prevodnih polimerov
 - Hibridni kondenzatorji
(DLC + psevdokondenzator učinek)
(Li-ion kondenzatorji)

Struktura EDLC

1. Priključka
2. Varnostni ventil
3. Pokrov
4. Al ohišje
5. + pol
6. Distančnik
7. Ogljikova elektroda
8. Zbiralna elektroda
9. Ogljikova elektroda
10. - pol



VIR: [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor)

EDLC : Baterije

- Najvišja specifična kapacitivnost/gostota energije ($>6\text{kW/kg}$)
- Ogromne kapacitivnosti (10^4 krat večje od ELKO)
do $12\text{ kF @ }V_n=1.2\text{ V}$
- Premoščajo razlike med kondenzatorji in baterijami
(baterije imajo 10x večjo kapacitivnost kot EDLC)
- Dosegajo gostote energije ca. 10% baterij
- Gostote moči so pa 10 do 100 krat večje od baterij
(polnilni, praznilni cikel mnogo hitrejši)
- Število polnilnih in praznilnih ciklov (10^5) večje kot pri baterijah
- Enostavno polnjenje – ni treba zaščite pred prenapolnjenjem.
- Dolga življenjska doba
- Nizka ESR
- Visoka zanesljivost
- Okolju prijazni materiali (Pb free) /nekorozivni elektrolit

Slabosti EDLC

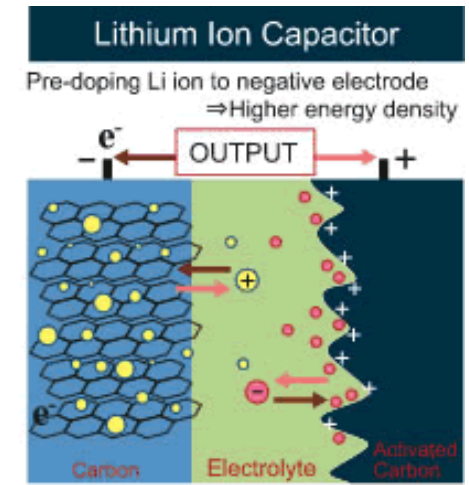
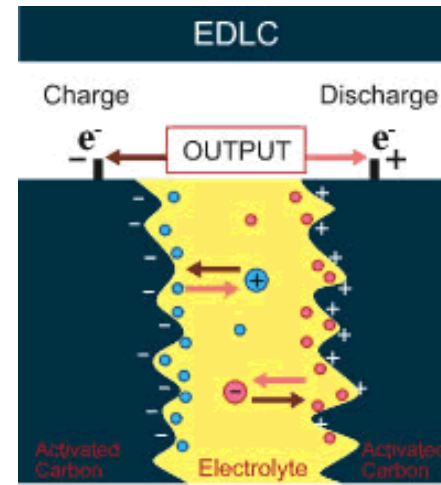
- Velika dielektrična absorbcija
- Velika samopraznenje (50% v nekaj dneh)
- Nizke delovne napetosti (1.2 ... 5V)
- Vsi EDLC so polarizirani (+ elektroda je vedno na anodi, določeni s prostorskim nabojem). Polariteta je določena z načrtovanjem asimetričnih elektrod. Če načrtujemo simetrične elektrode je polariteta določena s polariteto V_F

Uporaba EDLC

- Baterija za SRAM elemente (majhen, dolgotrajen tok)
- KERS (Kinetic energy recovery system): zelo kratek pulz velikega toka

Li-Ion kondenzator (LIC)

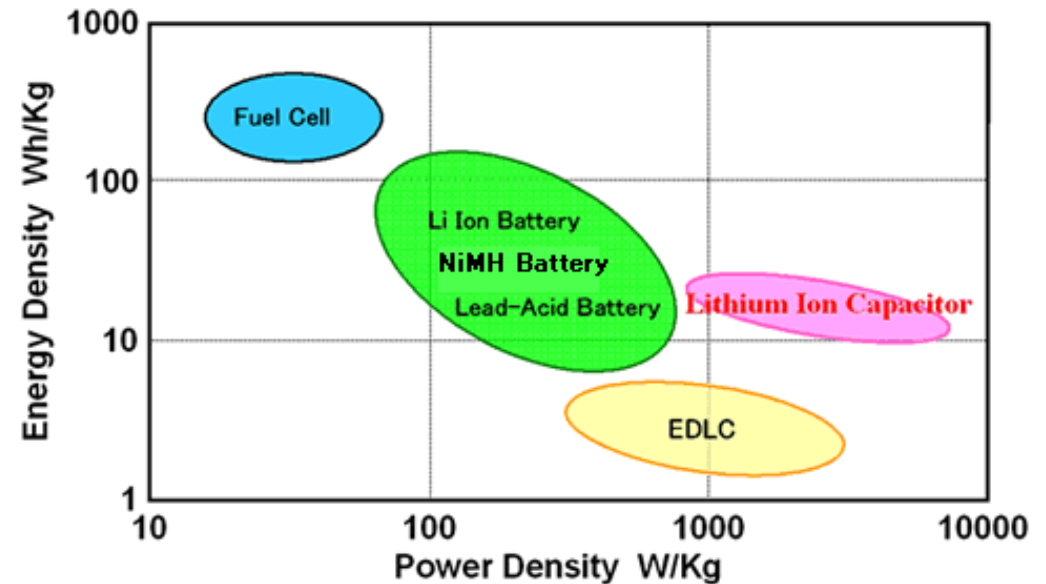
- Li-ion kondenzator (LIC) je hibridna vrsta EDLC, ki združuje principa delovanja litijeve baterije z EDLC
- Katoda: aktivni ogljik – (dvojna plast)
- Anoda: ogljik, dopiran z Li ioni (to poveča izhodno napetost)
- Elektrolit: litijeva sol
- Delovna napetost: 3.8 ... 4.0V
- ESR: 150 ...200 mΩ



VIR: [JSR Micro](#)

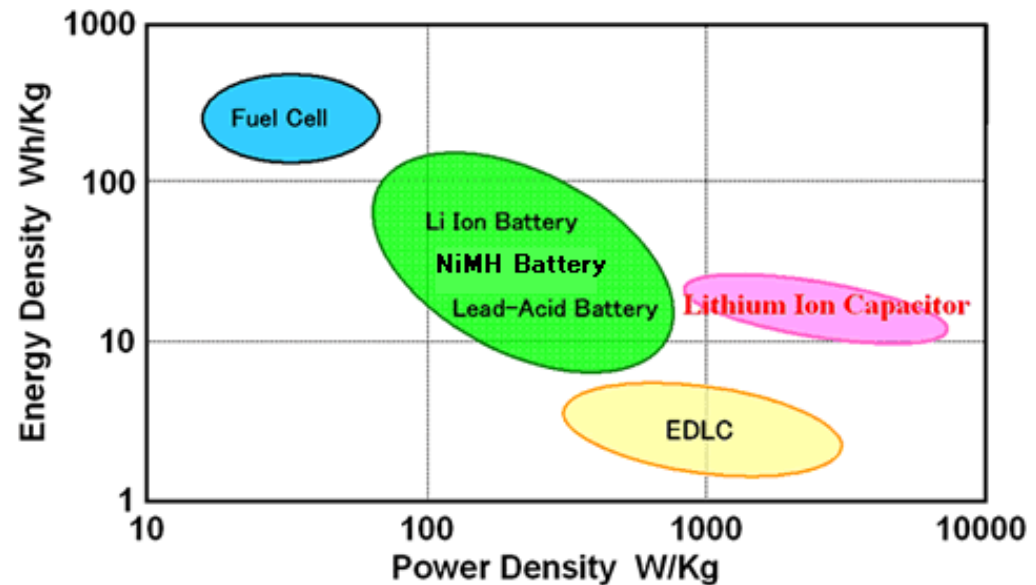
Lastnosti LIC

- Visoka kapaciteta (velika anoda) 2-3kF@4V
- Visoka gostota energije (14 Wh/kg)
- Visoka gostota moči
- Visoka zanesljivost
- Temperaturno področje uporabe: -20 ... 70 °C.
- Majhno samopraznjenje: (<5% padca napetosti @ 25°C v treh mesecih; EDLC do 50% v nekaj dneh)
- C€na: 105€/100F (Farnell)



Uporaba LIC

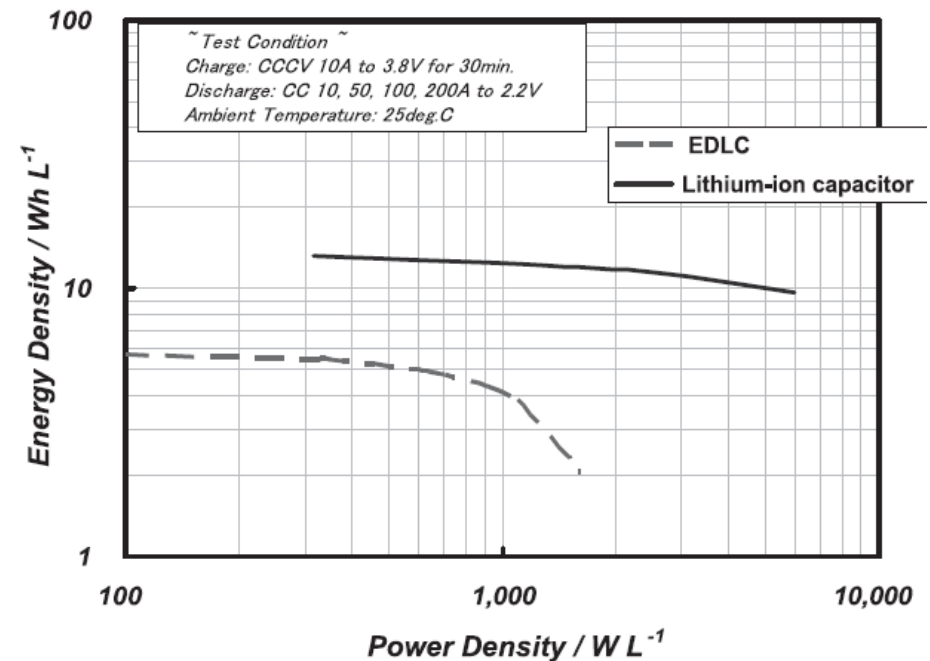
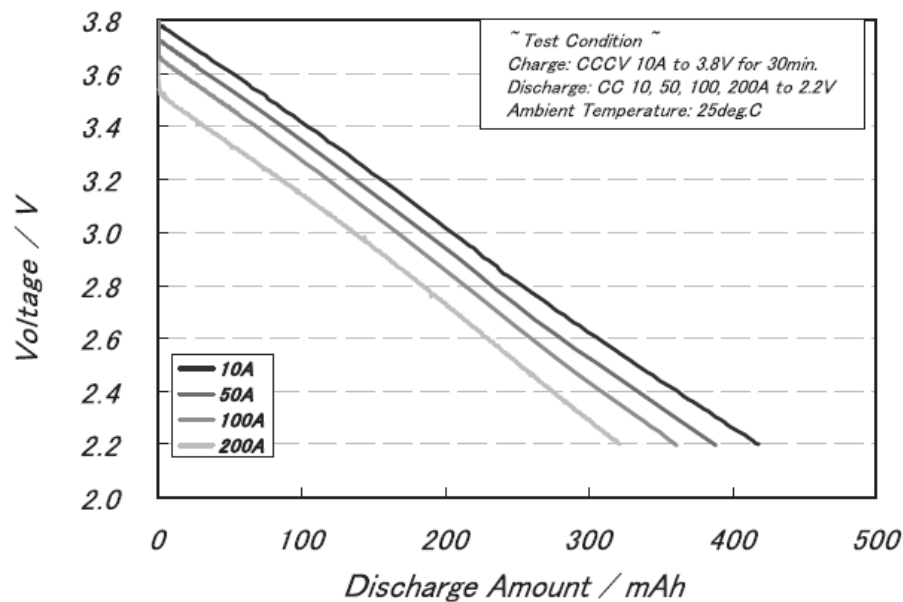
- LIC imajo večjo gostoto energije v primerjavi z Li-Ion baterijami (LIB)
- LIC so varnejši kot LIB (termični pobeg)
- LIC imajo višje delovne napetosti kot EDLC
- LIC imajo podobne gostote moči, a večje gostote energije kot EDLC
- Število polnjenj/praznjenj je podobno EDLC → mnogo boljše kot pri LIB



Uporaba LIC

VIR: [NEC](#)

Evaluation Items		Phase 1	Phase 2 (Improved model)
Rated voltage	Upper limit	3.8V	3.8V
	Lower limit	2.2V	2.2V
Cell size	L × W × H	192 × 95 × 5.4 mm	192 × 95 × 5.5 mm
	Weight	190g	190g
Initial performance	Capacitance	1,200F	1,100F
	ESR	1.3mΩ	1.0mΩ
	DC-IR	1.8mΩ	1.3mΩ



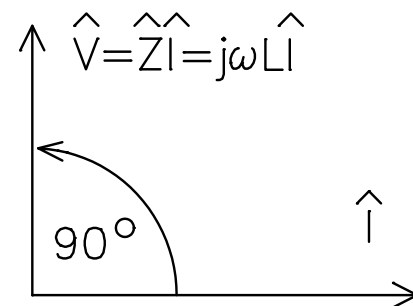
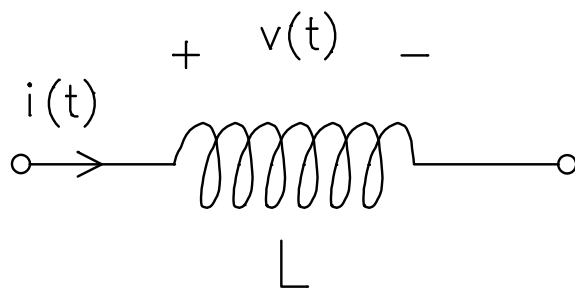
Elektronske komponente in senzorji

Tuljave

Tuljave

- Pasivni element v električnih vezjih, ki se upira (**dušilke**) hitrim spremembam toka, ki teče skozi tuljavo.

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$



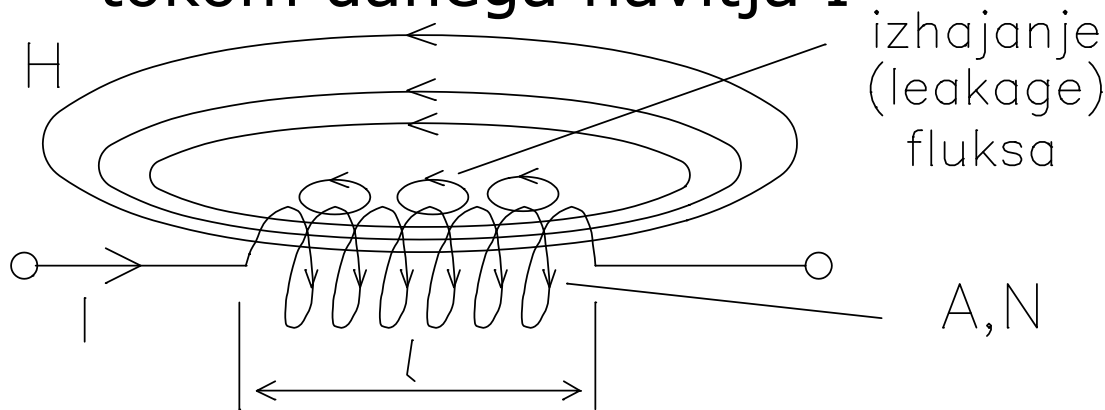
- L induktivnost tuljave
- Osnovna enota Henry [1H = 1Vs/A] →
v praksi manjše vrednosti (mH, μ H, nH)

Komponente, sestavi in senzorji

Zračne tuljave

Induktivnost zračnih tuljav

- Induktivnost tuljave je definirana kot razmerje med vzbujenim magnetnim sklepom ψ in vzbujevalnim tokom danega navitja I



$$L = \frac{\psi}{I}$$

- Pri popolnem magnetnem sklepu, kjer ni izhajanja magnetnega pretoka (fluksa) φ , je magnetni sklep navitja z N ovoji podan z izrazom

$$\psi = N\varphi$$

Magnetni pretok Φ

- Izračunamo ga po analogiji Ohmovega zakona za magnetiko iz:
 - magnetne napetosti θ_m in
 - magnetne upornosti (**reluktance**) R_m

$$\varphi = \frac{\Theta_m}{R_m}$$

$$\theta_m = \int \vec{H} dl = NI$$

$$R_m = \sum_i \frac{l_i}{\mu_i A_i} \cong \frac{l}{\mu_0 A}$$

Induktivnost zračnih tuljav

- Pri določitvi magnetne napetosti θ_m zanemarimo izhajanje (ang. leakage) magnetne poljske jakosti H .
- Pri poenostavljeni določitvi reluktance R_m :
 - upoštevamo zrak ($\mu_r = 1$)
 - zanemarimo prispevke zunaj tuljave.
- Magnetne lastnosti materiala podaja permeabilnost $\mu = \mu_0 \mu_r$
 - μ_0 permeabilnost vakuumu ($\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$ H/m)
 - μ_r relativna permeabilnost materiala (zrak: $\mu_r = 1$)

Induktivnost zračnih tuljav

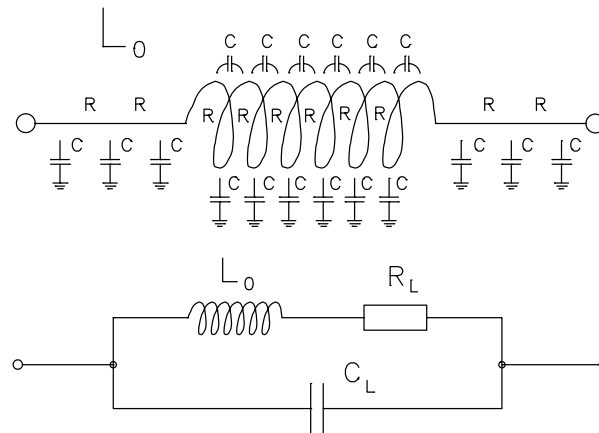
$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{N \cdot \Theta_m}{I \cdot R_m} = \frac{N^2 \cdot I}{I \cdot \frac{l}{\mu_0 A}} = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

- Zaradi privzetih predpostavk in poenostavitev induktivnost L je **precej približno** opisuje RESNIČNE lastnosti tuljave.

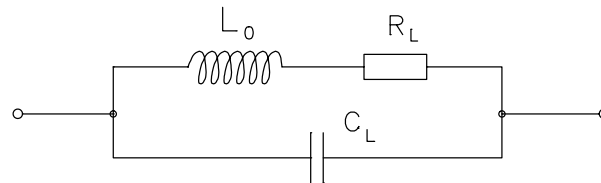
Resnične zračne tuljave

- Poleg induktivnosti L_0 ima še parazitne, po strukturi **porazdeljene** upornosti in kapacitivnosti.
- Porazdeljene parazitne komponente niso primerne za obravnavo in jih zato **koncentriramo** v efektivne vrednosti:
 - efektivna parazitna upornost tuljave R_L in
 - efektivna parazitna kapacitivnost tuljave C_L .

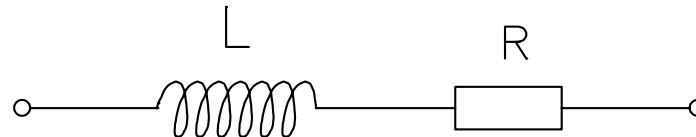


Resnične zračne tuljave

- Parazitna upornost tuljave R_L : ohmskih upornostih navitja, dovodnih žic ...
- Parazitna kapacitivnost tuljave C_L : kapacitivnost med sosednjimi ovoji navitja, med ovoji navitja in maso, med dovodnimi žicami ...
- Splošno nadomestno vezje resnične tuljave izhaja iz koncentriranih elementov L_0 , R_L , C_L

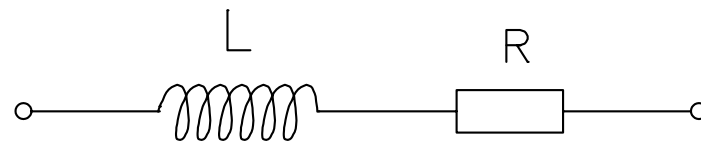


- V praksi je vpliv parazitnih kapacitivnosti zanemarljiv:

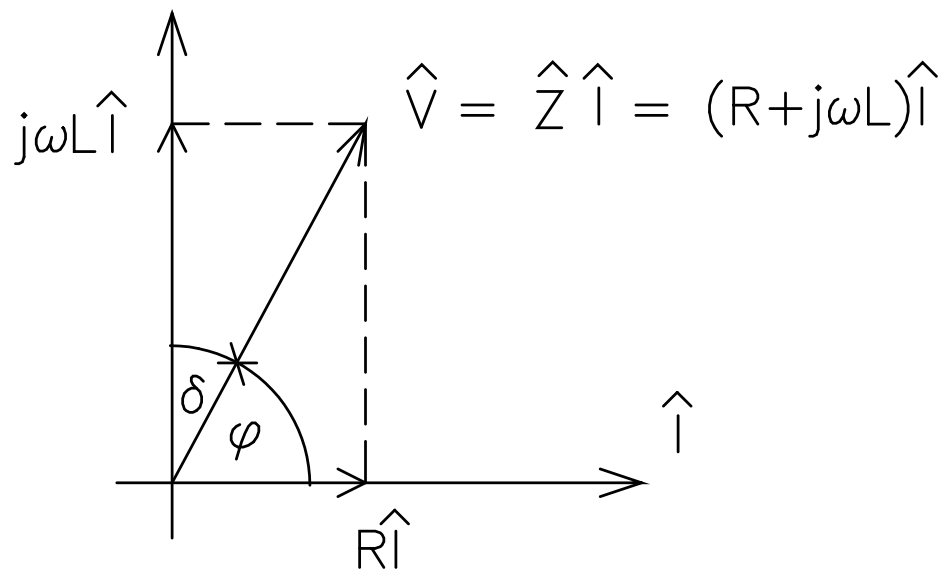


Impedanca resnične tuljave

- Zaradi upornosti tuljave R fazni kot φ ni več enak $\pi/2$ kot pri idealni tuljavi, ampak zmanjšan za nek kot δ .
- Kot δ opisuje odstopanje RESNIČNE tuljave od idealne, podaja izgube oz. segrevanje tuljave in ga zato imenujemo tudi **izgubni kot** δ .



$$Z = R + j\omega L$$

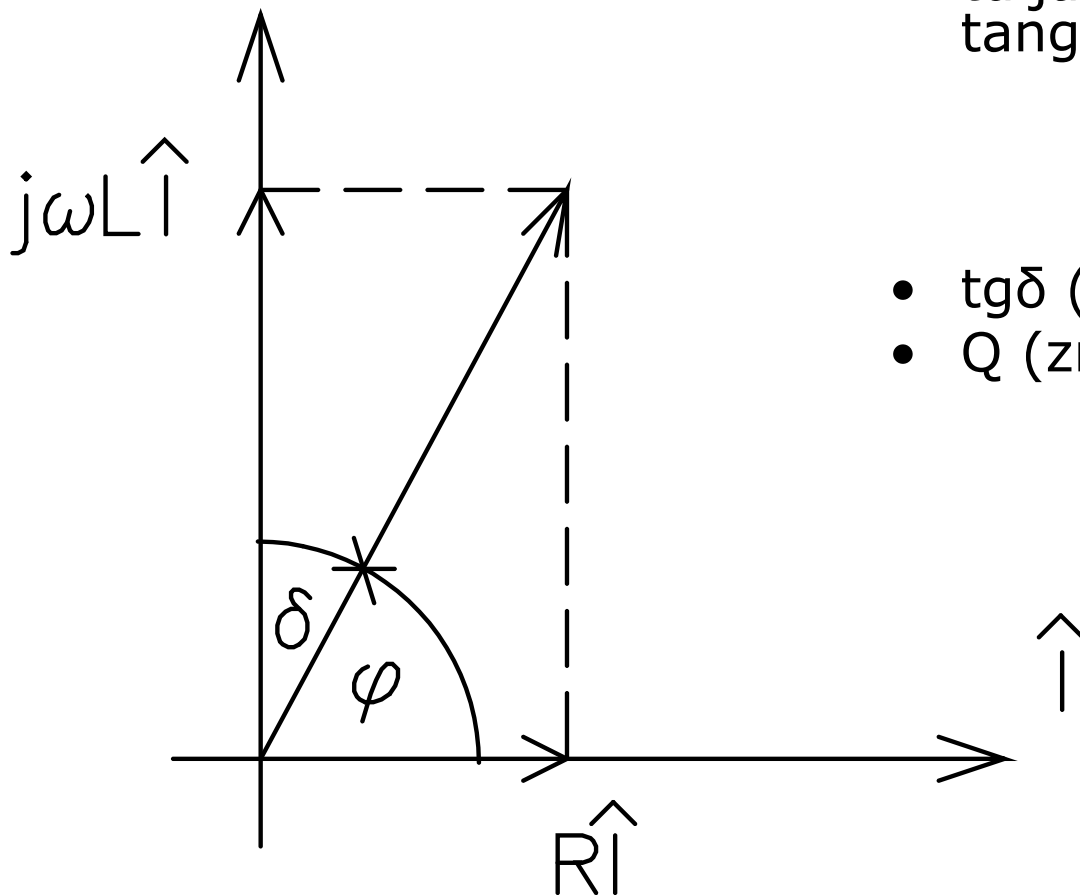


Izgubni faktor resnične tuljave $\text{tg}(\delta)$

- Izgubni faktor tuljave, ki je v recipročni zvezi s kvaliteto tuljave Q , je definiran kot tangens izgubnega kota:

$$\text{tg}\delta = 1/Q$$

- $\text{tg}\delta$ (zračne) $\approx 10^{-2}$
- Q (zračne) ≈ 100



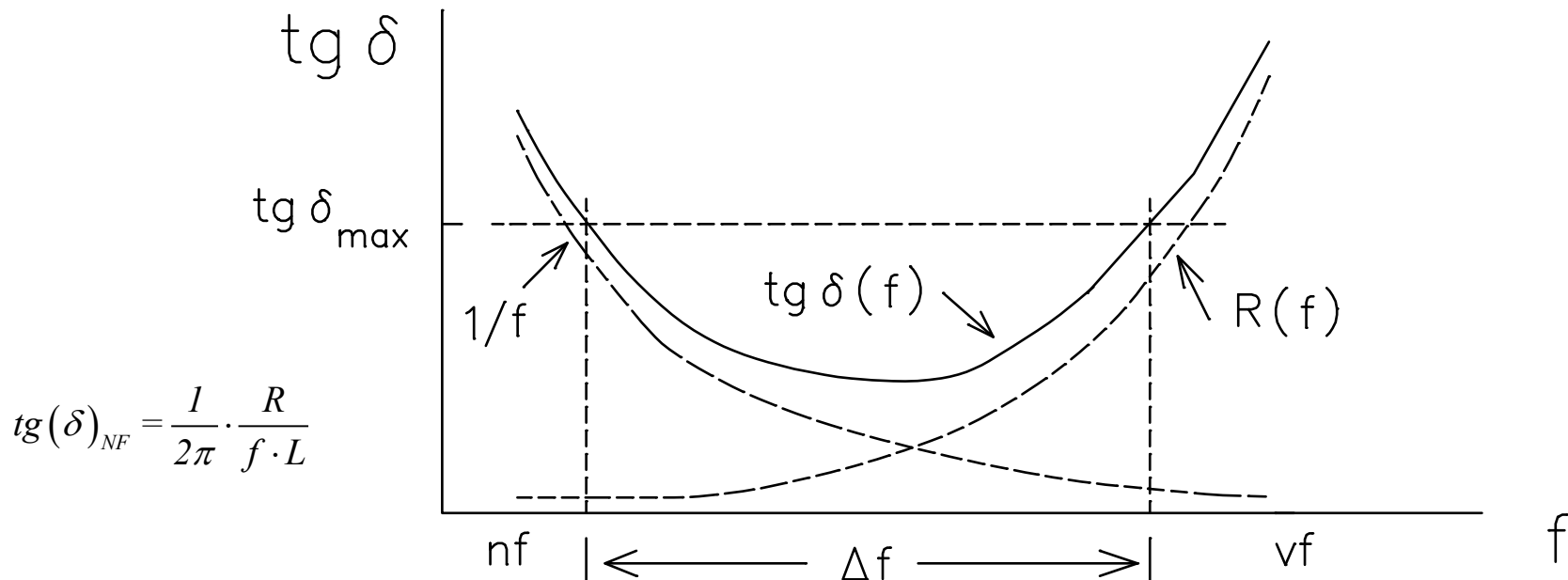
Frekvenčna odvisnost izgub tuljave

- Za dobro tuljavo (visok $Q \rightarrow$ nizek $\text{tg}\delta$) morajo biti efektivne ohmske izgube oz. efektivna ohmska upornost \rightarrow čim manjša

$$\text{tg}(\delta) = \frac{\text{Re}(\hat{Z})}{\text{Im}(\hat{Z})} = \frac{R}{\omega \cdot L} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R}{f \cdot L}$$

Frekvenčna odvisnost izgub tuljave

- **NF:** parametri L , R se še neodvisni od f
($\text{tg} \delta \propto 1/f$)
- **VF:** L , R nista več konstantna:
 - naglo narašča efektivna ohmska upornost tuljave $R \rightarrow$ naraščanje izgub tuljave pri VF
- Vsaka tuljava ima optimalno frekvenčno področje delovanja – določamo ga s projektiranjem (geometrije tuljave, premer žice)



Efektivna upornost tuljave

- Efektivna ohmska upornost tuljave:
 - ohmska upornost navitja R_{Ω}
 - kožni efekt (ang. skin effect) R_S ,
 - efekt bližine (ang. proximity effect) R_P ,
 - dielektrične izgube R_D
 - magnetne izgube R_M
- Efektivna upornost tuljave je vsota izgubnih prispevkov

$$R = R_{\Omega} + R_S + R_P + R_D + R_M$$

Ohmska upornost navitja

- Ohmska upornost navitja za homogeno področje enostavne geometrije

$$R_{\Omega} = \rho \frac{l}{A}$$

- ρ specifična upornost materiala žice ($\rho_{\text{Cu}} = 1.72 \mu\Omega/\text{cm}@T=25^{\circ}\text{C}$),
- l dolžina žice in
- A presek žice.

Ohmska upornost navitja

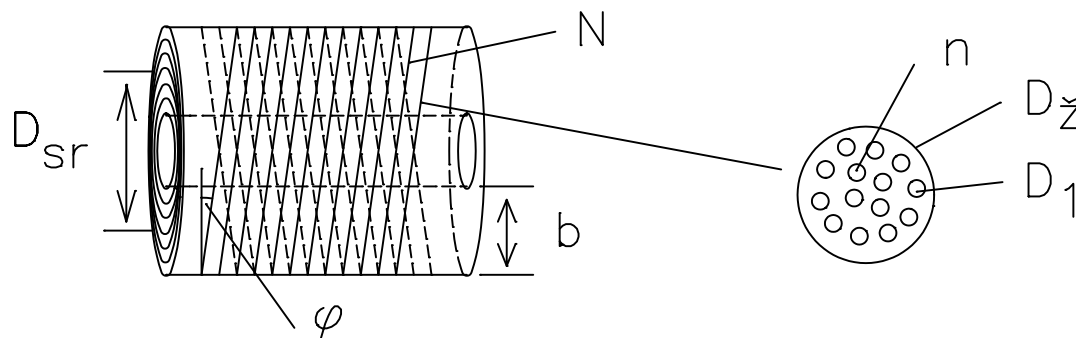
Izrazi za oceno upornosti navitja:

- Vstavimo specifično upornost $\text{Cu}@(T=25^\circ\text{C})$ v primeru materiala x ali druge temperature izraz korigiramo z razmerjem upornosti ρ_x/ρ_{Cu}
- Dolžino žice ocenimo s pomočjo srednjega premera ($l = \pi * D_{\text{sr}} * N$)
- Če je navitje navito pod kotom φ , se dolžina (l) poveča za faktor $1/\cos(\varphi)$

$$R_{\Omega} = \rho \frac{l}{A}$$

Ohmska upornost pletenice z n vlakni

- Pletenica z n vlakni preseka D_1 namesto zunanjega preseka pletenice $\pi \cdot D_z^2 / 4$ vzamemo efektivni presek $n \cdot \pi \cdot D_1^2 / 4$
- V pletenici so vlakna zavita \rightarrow / se poveča
Efekt je tem večji, čim večje je število vlaken n.
- Faktor a \rightarrow prirastek dolžine žice zaradi navijanja vlaken v pletenici



n	3	9	28
a	1.02	1.04	1.06

$$R_{\Omega} = 0.68 \cdot \frac{D_{sr} \cdot N \cdot a \cdot l}{D_1^2 \cdot n \cdot \cos \varphi}$$

Kožni efekt

- Pri VF tok teče predvsem v površinskem sloju prevodnika, notranji deli vodnika kažejo visoko upornost in zato ne sodelujejo pri prevajanju → efektivni presek prevodnika se zmanjša → upornost naraste → VF vodniki so vedno PLETENI (pletenica).
- Kožni efekt raste:
 - s frekvenco f in
 - s premerom posameznega vlakna D_1

Kožni efekt

Uvedemo faktor z ($R[\mu\Omega]$; $D_1[\text{mm}]$; $f[\text{kHz}]$)

$$z = 0.335 \cdot D_1 \cdot \sqrt{f}$$

Prirastek upornosti zaradi kožnega efekta R_S :

$$R_S = F(z) \cdot R_\Omega$$

z	F
0	0
2.2	0.1
5.0	1.0
16	5.0
90	30

Kožni efekt

$D_1 = 1$ mm. Pri kateri frekvenci bo zaradi kožnega efekta upornost navitja narasla za 10% ?

Prirastek upornosti za 10% $\rightarrow F = 0.1$

$$z = 2.2 = 0.335 \cdot D_1 \cdot \sqrt{f}$$

z	F
0	0
2.2	0.1
5.0	1.0
16	5.0
90	30

$$f_{+10\%} = \left(\frac{2.2}{0.335 \cdot D_1} \right)^2 = 43 \text{ kHz}$$

10X tanjša žica
 \rightarrow povišanje upornosti za 10% nastopilo pri 100X višji frekvenci.

Efekt bližine (ang. Proximity effect)

- Podaja naraščanje upornosti tuljave zaradi vpliva oz. motenja toka v nekem ovoju navitja zaradi magnetnih polj sosednjih ovojev.
- Navoji nekega navitja so v medsebojni interakciji:
 - Magnetno polje ovoja moti s silo magnetnega polja \mathbf{F} na gibajoč se električni naboj (\mathbf{q}) tok v sosednjih ovojih.
- Oviranje električnega toka predstavlja dodatno povečanje upornosti navitja in s tem dodatne izgube tuljave → povečanje ohmske upornosti R_p .

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times B)$$

Efekt bližine (ang. Proximity effect)

- Efekt raste:
 - s frekvenco in
 - z zmanjševanjem premera žice D_z (majhen $D_z \rightarrow$ ovoji bolj skupaj) in
- za opis pojava vpeljemo z enako kot prej:
($R[\mu\Omega]$; $D_1[\text{mm}]$; $f[\text{kHz}]$)

$$z = 0.335 \cdot D_1 \cdot \sqrt{f}$$

Efekt bližine (ang. Proximity effect)

Povečanje upornosti R_p :

- $G(z)$ → podaja izgube zaradi efekta bližine
- k → geometrijski faktor, odvisen od razmerja l/D (dolžina/premer tuljave)

$$z = 0.335 \cdot D_l \cdot \sqrt{f}$$

$$R_p = \left(k \cdot N \cdot \frac{D_z}{D} \right)^2 \cdot G(z) \cdot R_\Omega$$

I/D	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
k	20	12	8	6	4	3

z	G
0	0
2.2	0.22
5.0	0.75
16	2.7
90	16

Dielektrične izgube

- V resnični tuljavi so dielektrični materiali (tuljavnik, izolacija žice itd.) z danimi dielektričnimi lastnostmi (ϵ_r , $\text{tg}\delta$ itd.).
- Zato se pojavijo (pri VF) dielektrične izgube oz. segrevanje tuljave (R_D) zaradi izgub v dielektričnih materialih

$$R_D = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \text{tg}\delta \cdot C \cdot L^2 \cdot f^3$$

R_D [Ω]

- $\text{tg}\delta$ → izgubni faktor dielektrika
- C → parazitna kapacitivnost tuljave [pF]
- L → induktivnost tuljave [μH]
- f → frekvenca [MHz]

Magnetne izgube

Čim so v tuljavi magnetno aktivni materiali, se pojavijo (pri VF) izgube oz. segrevanje v teh materialih.

- Prispevki k magnetnim izgubam tuljave R_M :
 - histerezne,
 - remanentne in
 - vrtilne izgube.
- Za opis teh izgub vpeljemo ustrezne efektivne upornosti, ki podajajo ustrezne izgube oz. segrevanje tuljave

$$R_M = R_H + R_R + R_V$$

Histerezne izgube

- Segrevanje zaradi rotacije magnetnih dipolov, ki sledijo izmeničnemu magnetnemu polju.
- Odvisne od histerezne zanke materiala.

$$R_H[\Omega] = h \cdot L \cdot H_{\max} \cdot f$$

- h → koeficient histereznih izgub, odvisen od magnetnega materiala ($h \approx 1 \dots 100 \cdot 10^{-3} \text{ cm/A}$)
- $L[H]$ → induktivnost tuljave
- $H[\text{A/cm}]$ → amplituda magnetne poljske jakosti
- $f[\text{kHz}]$ → frekvenca.

Remanentne izgube

- Izgube zaradi zaostajanja (fazni premik) pri $Vf \rightarrow$ magnetni dipoli ne morejo več slediti hitrih sprememb magnetnega polja.

$$R_R[\Omega] = r \cdot L \cdot f$$

- $r \rightarrow$ koeficient remanentnih izgub, odvisen od magnetnega materiala ($r \approx 1 \dots 10^*10^{-3}$),
- $L[H] \rightarrow$ induktivnost tuljave
- $f[kHz] \rightarrow$ frekvenca.

Vrtinčne izgube

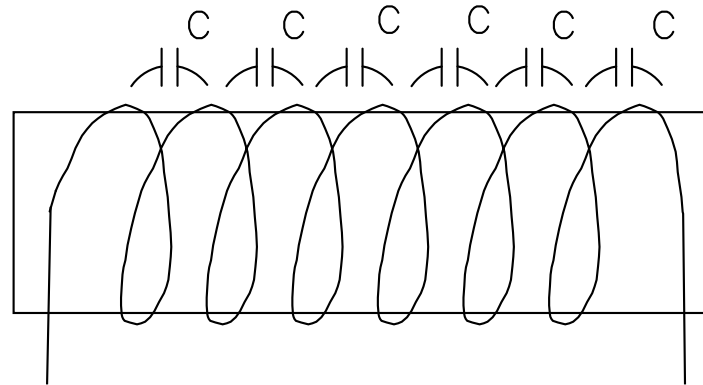
Zaradi spremenljivega toka in s tem magnetnega polja se dodatno inducirajo vrtinčni tokovi (ang. eddy currents) → dodatne izgube (segrevanje) tuljave.

$$R_V[\Omega] = v \cdot L \cdot f^2$$

- v → koeficient vrtinčnih izgub, odvisen od materiala ($v \approx 10^{-2} \dots 1$ msec),
- L [H] → induktivnost tuljave
- f [kHz] → frekvenca

Parazitna kapacitivnost tuljave

- Pri tuljavah imamo med sosednjimi ovoji (ločeni z izolacijo) potencialne razlike.
- Tuljavnik in izolacija žice → dielektrik
- V dielektriku se vzpostavi električno polje → pride do dielektrične polarizacije materiala → parazitne kapacitivnosti



Parazitna kapacitivnost tuljave

- Porazdeljene parazitne kapacitivnosti koncentriramo v efektivno parazitno kapacitivnost tuljave C_L .
- C_L je odvisna od:
 - geometrijskih razmer tuljavne strukture
 - prisotnih dielektričnih materialov.

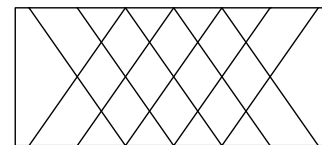
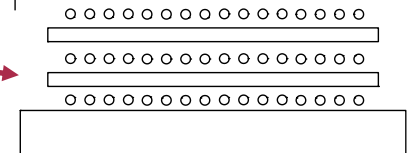
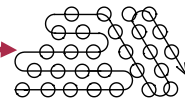
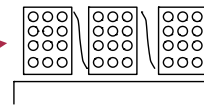
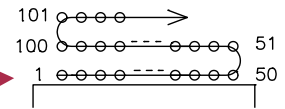
$$C_L = \frac{\pi \cdot D \cdot (1 + 0.08 \cdot \epsilon_r)}{8.3 \cdot \log \left(\frac{p}{D_z} + \sqrt{\left(\frac{p}{D_z}\right)^2 - 1} \right)}$$

- C_L [pF];
- premer tuljave D [cm],
- dielektričnost ϵ_r ,
- premer žice D_z [cm]
- korak ovoja p

**Večslojne tuljave →
z meritvijo**

Zmanjševanje parazitnih kapacitivnosti

- **izbira dielektričnih materialov:**
dielektrični materiali (tuljavniki, izolacija žic - lak, svila) → nizek ϵ_r , $\text{tg}\delta$!
- **Antikapacitivna navijanja tuljave:**
zmanjšujejo električna polja v strukturi
 - Običajno navijanje → visoke kapacitivnosti → na majhni razdalji skupaj ovoji z veliko potencialno razliko.
 - Segmentno navijanje
 - Stožčasto navijanje
 - Navijanje z distančniki
 - Križno navijanje, (samonosilen → ni tuljavnika)
Ovoji so skupaj na majhni razdalji le v točki križanja



Komponente, sestavi in senzorji

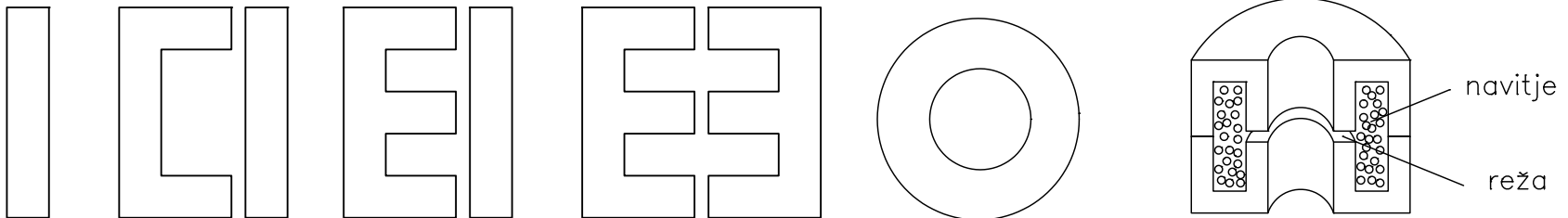
Tuljave z jedrom

Tuljave z jedrom

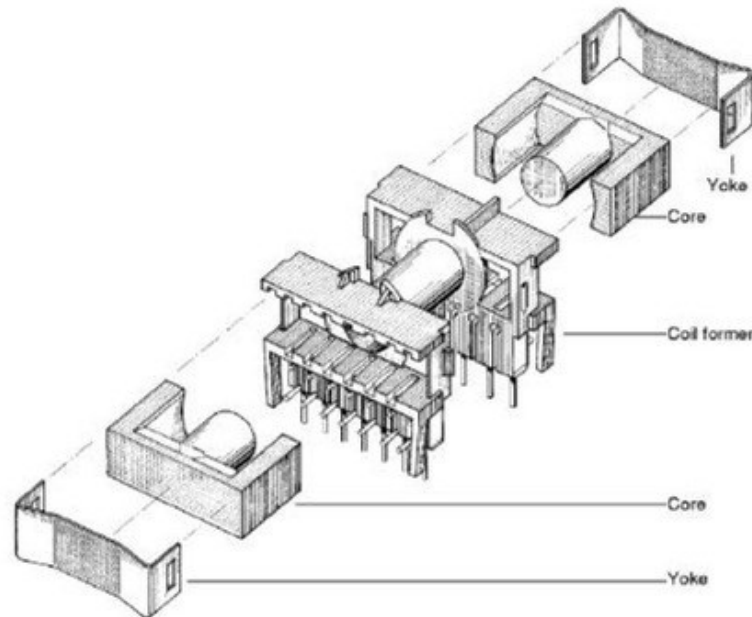
- Pri tuljavi z jedrom vstavimo v navitje in okrog njega magnetno aktivni material tako, da **se magnetni fluks v celoti zaključuje** po tem materialu:
 - višja induktivnost
 - višja kvaliteta
 - višja temperaturna stabilnost
 - nižji parazitni komponenti R_L , C_L

Magnetni materiali - Feriti

- **Feriti** → keramike na osnovi železovih oksidov (MgFe_2O_4 , CuFe_2O_4 , MnFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , ZnFe_2O_4)
- Izdelava feritnih elementov je keramična tehnologija (priprava mešanice kovinskih oksidov, dodajanje veziva, stiskanje paste v kalupe, sintranje)
- **Polikristaliničen material** (sestavljani iz drobnih kristalnih zrn, ki so znotraj posameznega zrna dobro prevodna, meje med posameznimi zrnji predstavljajo visoke upornosti oz. izolatorske meje)
- **Vrtinčnih tokov** v takem materialu **praktično ni** do zelo visokih frekvenc [MHz]



Magnetni materiali - Feriti



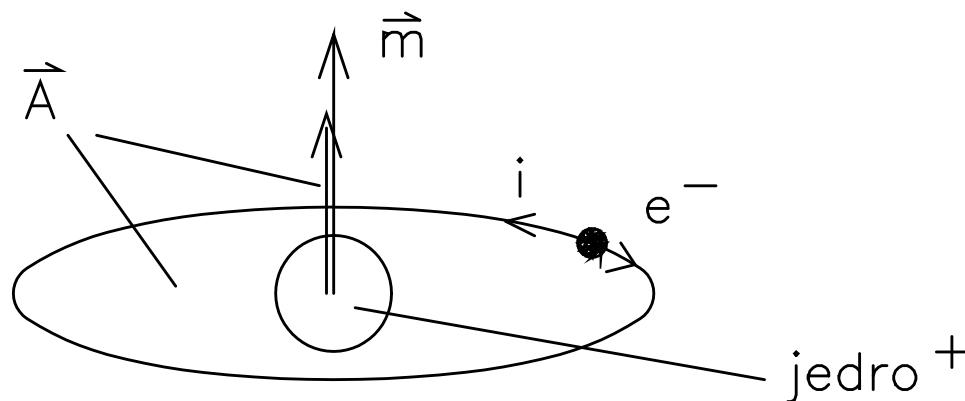
VIR: [FERRITES and Accessories](#),
Siemens Matsushita Components,
ETD49

Osnovne lastnosti magnetnih materialov

- V vsaki snovi so vedno, zaradi njene mikroskopske zgradbe, prisotni tudi **magnetni dipoli**: ko v atomu elektroni krožijo okrog jedra
- To mikroskopsko gibanje naboja oz. ustrezní električni tok ustvarja **magnetni dipolni moment (\vec{m})**:
- V prisotnosti magnetnega polja na magnetne dipole deluje "urejajoči" navor ($\vec{\Gamma}$)

$$\vec{m} = I A$$

$$\vec{\Gamma} = \vec{m} \times \vec{B}$$



Osnovne lastnosti magnetnih materialov

- **Nemagnetni** materiali → prispevki magnetnih dipolov so kompenzirani znotraj posameznega atoma ali molekule → magnetnih učinkov navzven ni čutiti.
- V **magnetno aktivnih** materialih → material je sestavljen iz **magnetnih domen**, področij v katerih se magnetni dipoli uredijo vsi v isto smer.
- V odsotnosti zunanjšega magnetnega polja velja, da so smeri urejenosti posameznih domen zastopane z enako verjetnostjo.
- Material **ni magnetiziran** → njegova **magnetna polarizacija enaka nič** (magnetni dipolni moment na enoto volumna je nič)

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_V \vec{m} = 0$$

Osnovne lastnosti magnetnih materialov

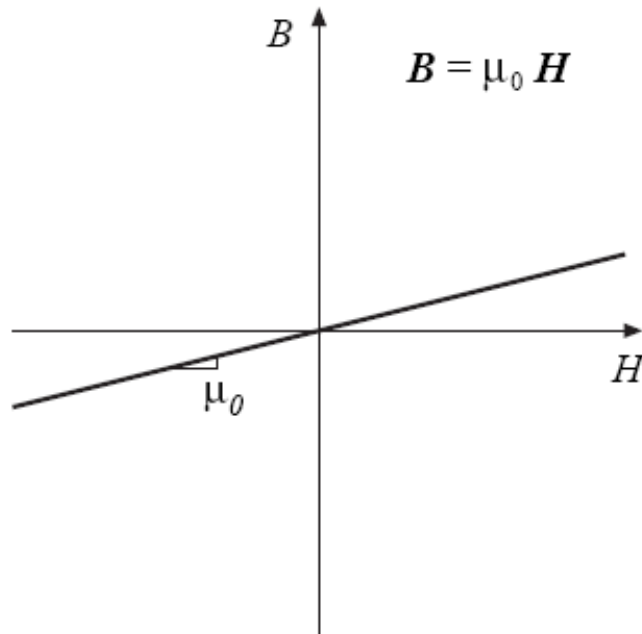
- V materialu ustvarimo visoko magnetno poljsko jakost H ,
- Domene se uredijo $\rightarrow (M \neq 0)$
- Poveča se gostota magnetnega pretoka (B) v materialu.

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

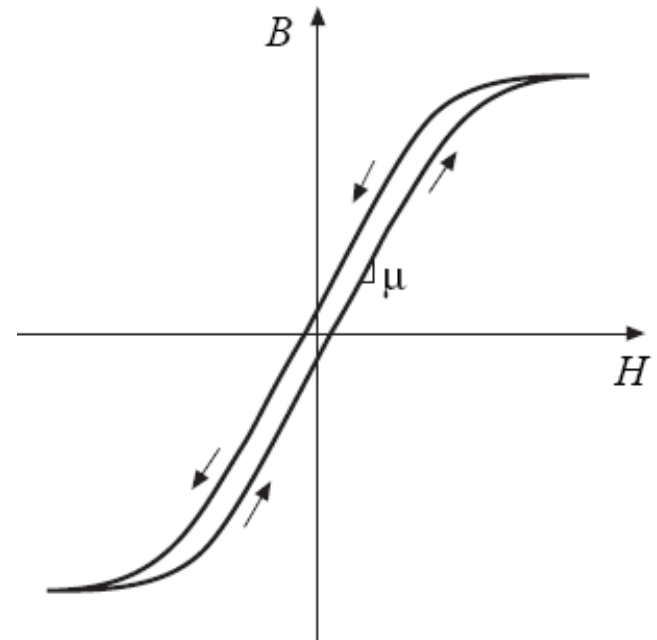
- Zveza med M in H pri feritnih materialih ni linearna

$$B = B(H) = \mu_0 \cdot \mu_r(H) \cdot H = \mu \cdot H$$

Magnetilna krivulja

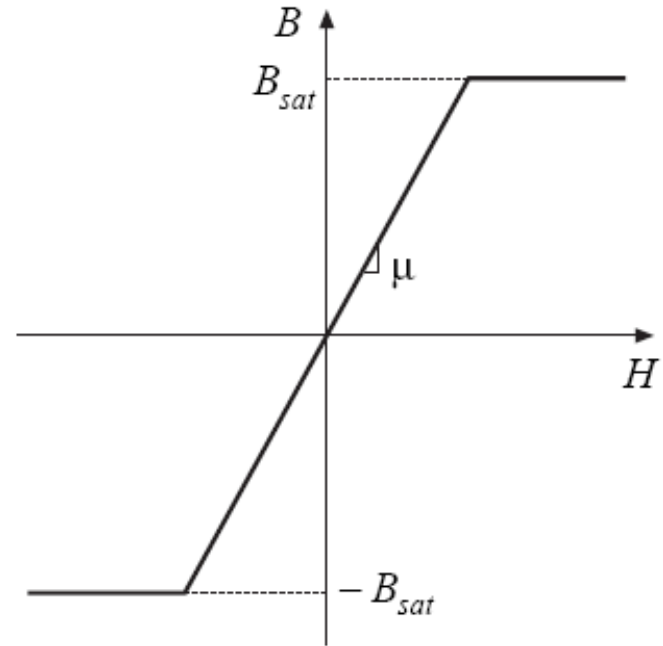
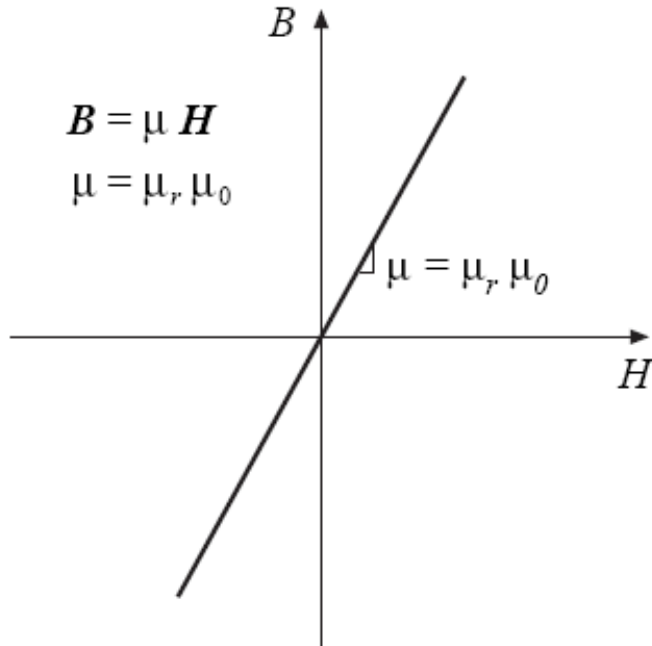


$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
(zrak)



Nelinearna, s
histerezo in
nasičenjem

Magnetilna krivulja

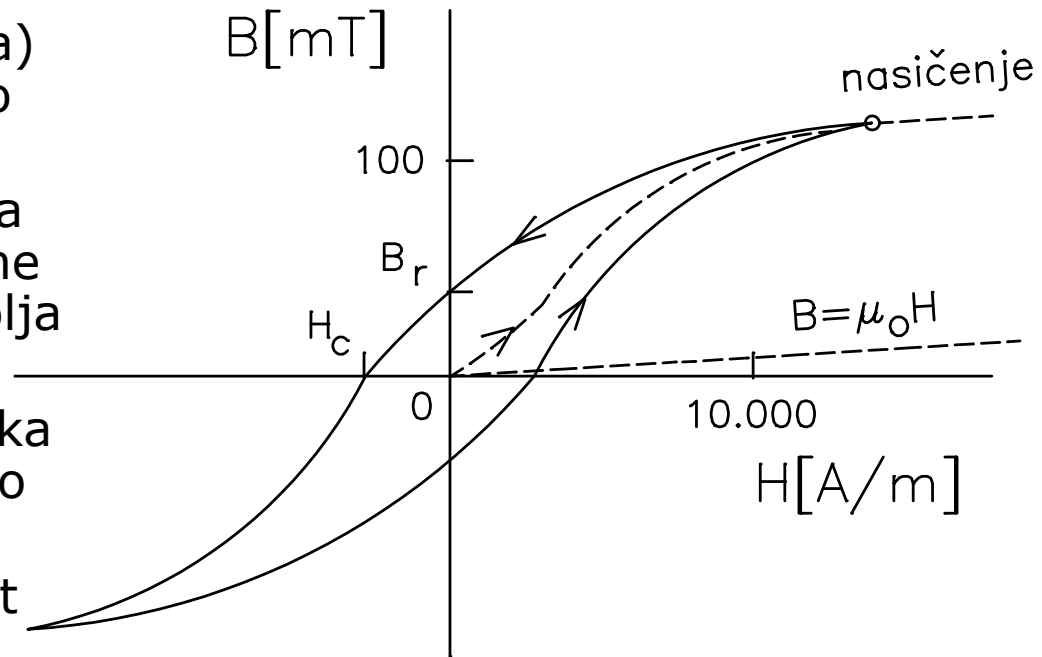


$$\mu_r = 10^3 \dots 10^5$$

$B_{sat} = 0.3-0.5$ T, feriti
0.5-1 T, praškasta železna
1-2 T, laminirana železna

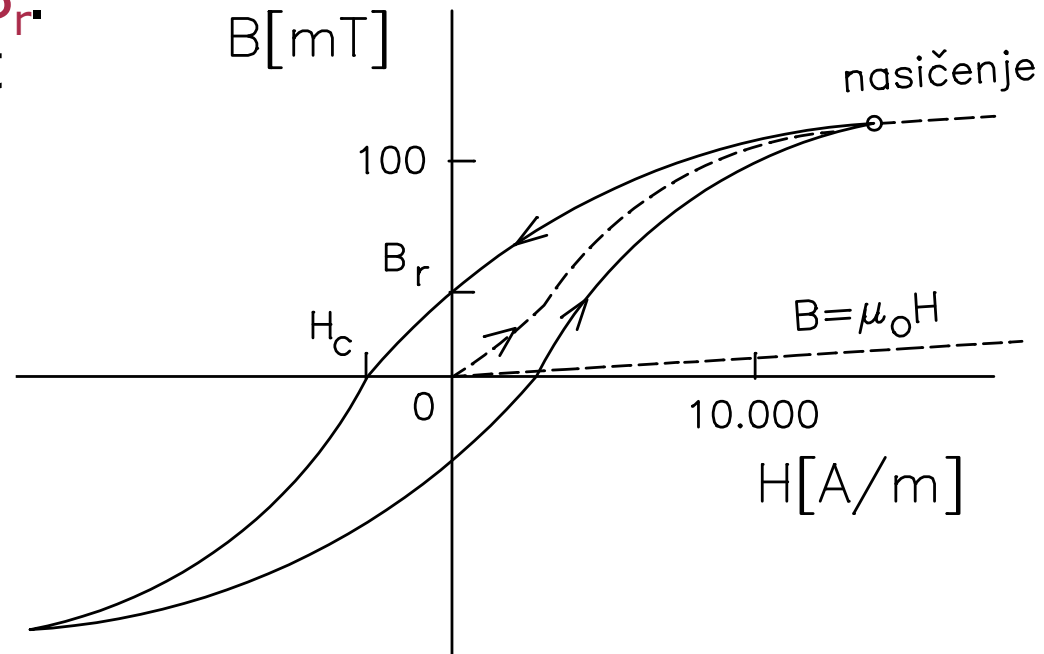
Magnetilna krivulja

- Zveza B in H je **magnetilna krivulja**
- Če začnemo z magnetenjem **nemagnetiziranega** (deviškega) materiala, se gibljemo po tako imenovani **deviški krivulji**.
- V bližini izhodišča je ta krivulja linearna in razmere reverzibilne → v primeru zmanjševanja polja vračamo po isti poti.
- Pri večjih poljih postane deviška krivulja nelinearna, razmere so ireverzibilne:
- Če se magnetna poljska jakost izmenično spreminja, potuje delovna točka po magnetilni krivulji



Magnetilna krivulja

- $H=0 \rightarrow$ še vedno obstaja (ang. remain) **remanentna gostota magnetnega pretoka B_r** . Material se obnaša kot stalni magnet.
- To lahko odpravimo samo z dovolj veliko magnetno poljsko jakostjo v nasprotni smeri, **koercitivno H_c** , (ang. coerce) da se material razmagneti ($B=0$).



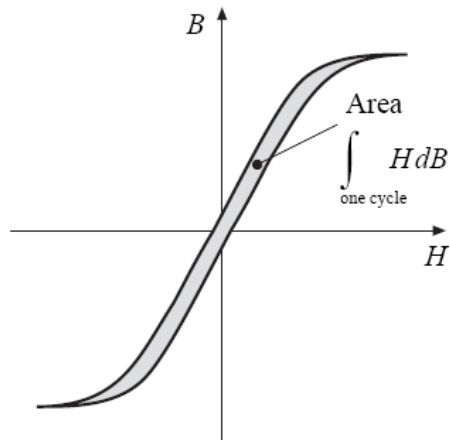
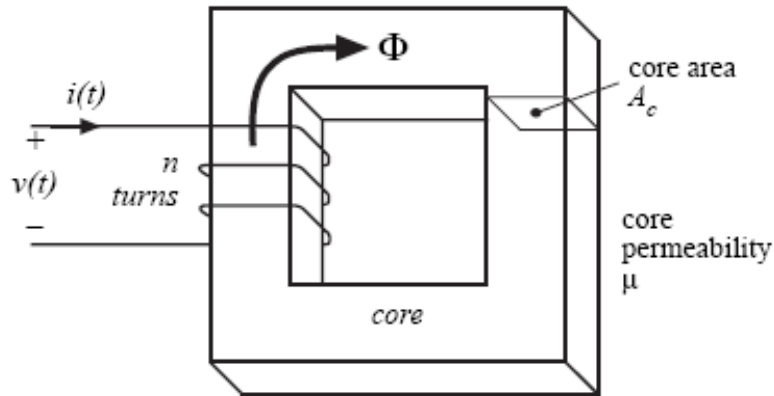
Izgubna energija magnetenja

- Površina magnetilne krivulje je **izgubna energijo magnetenja** pri enem ciklu ΔW_m ($V \rightarrow$ volumen magnetnega materiala)
- **Magnetne izgube (P)** v magnetnem materialu pri izmeničnih signalih frekvence f

$$\Delta W_m = V \int_{V_{jedra}} H dB$$

$$P = \Delta W_m f$$

Histerezne izgube



$$W = \int_{\text{one cycle}} v(t)i(t) dt$$

$$v(t) = n A_c \frac{dB(t)}{dt} \quad H(t) l_m = n i(t)$$

$$W = \int_{\text{one cycle}} \left(n A_c \frac{dB(t)}{dt} \right) \left(\frac{H(t) l_m}{n} \right) dt$$

$$= (A_c l_m) \int_{\text{one cycle}} H dB$$

$$P_H = (f) (A_c l_m) \int_{\text{one cycle}} H dB$$

Histerezne izgube

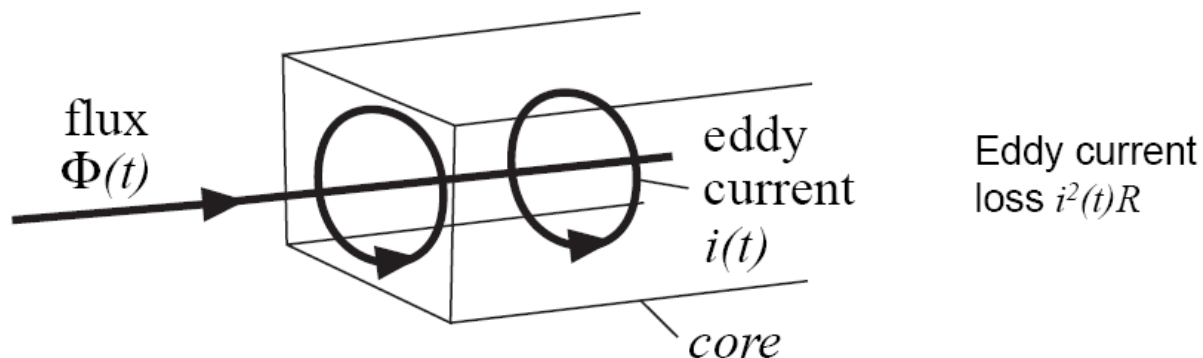
- Histerezne izgube so odvisne od frekvence ($\approx f$)
- Odvisne od največje gostote magnetnega pretoka
- Histerezne izgube opisuje Steinmetzova enačba:

$$P_H = K_H f B_{\max}^\alpha (\text{core volume})$$

- Parametra K_H in α sta določena eksperimentalno.

Vrtinčne izgube

- Materiali za magnetna jedra so sorazmerno dobri prevodniki električnega toka.
- Po Lenzovem pravilu magnetna polja v jedru tvorijo el. tokove ("vrtinčne tokove"), ki tečejo v jedru.
- Vrtinčni tokovi tvorijo magnetni pretok, ki **nasprotuje** magnetnemu pretoku jedra in posledično **preprečujejo**, da bi se magnetni pretok jedra enakomerno razširil po jedru.

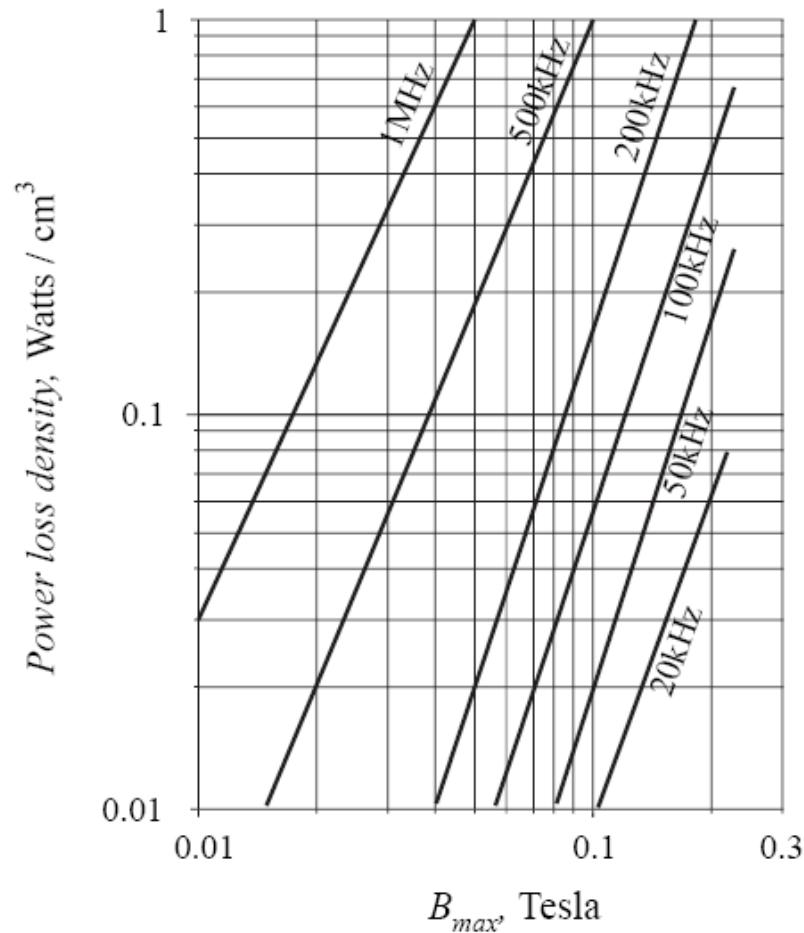


Vrtinčne izgube

- Izmenični pretok inducira napetost $v(t)$ v jedru po Faradayevem zakonu.
- Velikost inducirane napetosti bo sorazmerna s frekvenco vzbujanja f .
- Če je impedanca jedra čisto ohmska ($Z = R$), so izgube zaradi vrtinčnih tokov proporcionalne $i(t) = v(t)/R$.
- Velikost toka $i(t)$ je sorazmerna frekvenci f .
- Izgube zaradi vrtinčnih tokov bi bile $i^2(t)R \rightarrow (P_E \approx f^2)$
- Steinmetzova enačba, ki opisuje vrtinčne izgube:

$$P_E = K_E f^2 B_{\max}^2 (\text{core volume})$$

Podajanje skupnih izgub v jedru



$$P_{fe} = K_{fe} B_{max}^{\beta} A_c I_m$$

Histerezna zanka magnetnega materiala

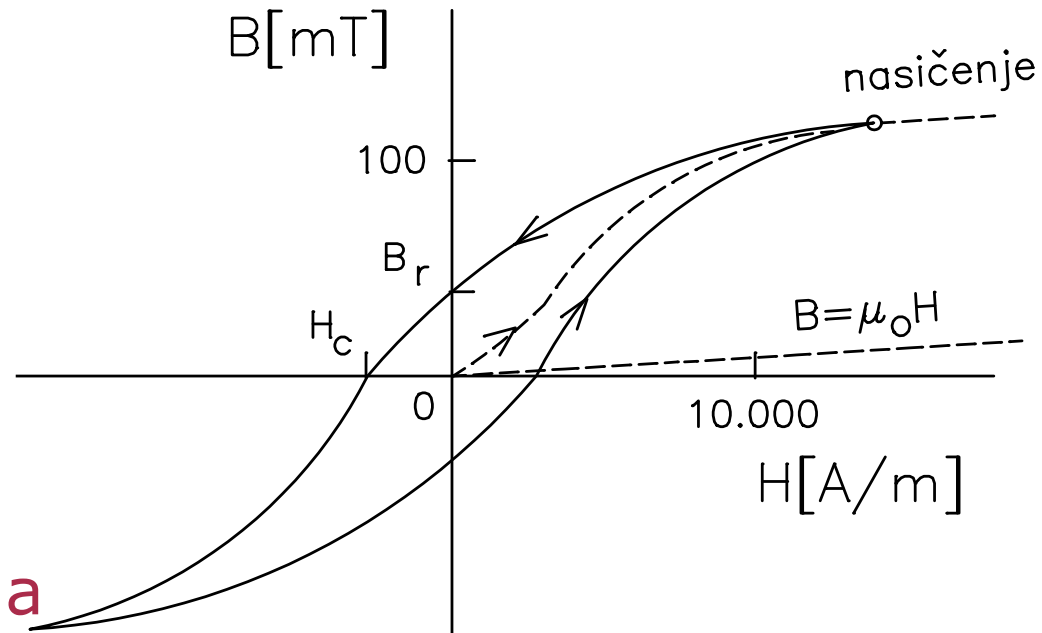
Vrsta jedra	B_{sat}	Izgube v jedru	Uporaba
Laminirana železna, jeklena	1.5 -2.0 T	visoke	50-60 Hz transformatorji, tuljave
Praškasta jedra praškasta železna jedra Zlitine (molypermalloy)	0.6 -0.8 T	srednje	1 kHz transformatorji, 100 kHz filter tuljave
Feriti Mn-Zn Ni-Zn	0.25 -0.5 T	nizke	20 kHz -1 MHz transformatorji, izmenične tuljave

Histerezna zanka magnetnega materiala

- Površina magnetilne krivulje je histerezna zanka magnetnega materiala.
Glede na velikost histerezne zanke ločimo:
 - Mehkomagnetni materiali → ozka histerezna zanka → nizke magnetne izgube oz. segrevanje (motorji, generatorji, transformatorji).
 - Trdomagnetni materiali → široka histerezna zanka → zaradi visokih vrednosti B_r , H_c (trajni magneti)

Začetna permeabilnost (μ_i)

- Pri tuljavah s feritnimi jedri so prisotna **šibka polja** \rightarrow magnetni material se nahaja v področju **pod nasičenjem**
- V področju pod nasičenjem \rightarrow **začetna permeabilnost feritnega materiala** μ_i , (ang. initial) (permeabilnost za majhne vrednosti H)



$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H=0}$$

Začetna permeabilnost (μ_i)

- Druge oblike definicije μ_i z odvodom
- Pri majhnih AC signalih izražena z razmerjem kompleksorjev
- μ_i je eden od osnovnih podatkov feritnega materiala
- Proizvajalci merijo in podajajo $\mu_i(T, f)$
- Tipične vrednosti μ_i :
 - 3000±30% (močnostne apl.)
 - 15000±30% (visoka μ_i)
 - 2200±25% (25°C) (low loss)
 - 20 ... 2000 (–20°C) (VF aplikacije)

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

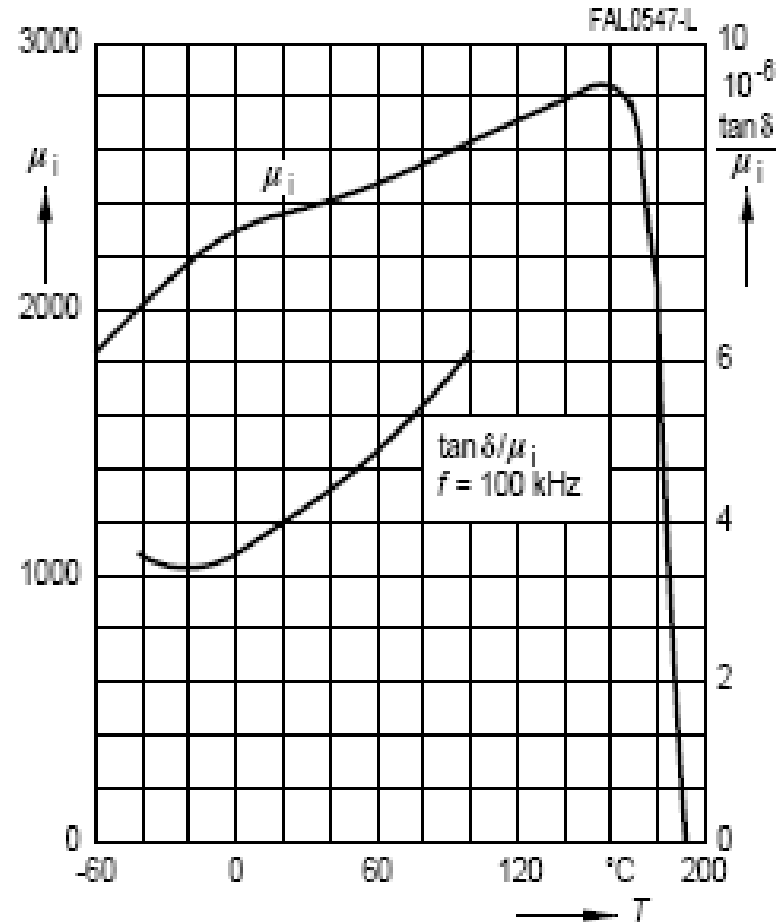
$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H=0}$$

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left. \frac{\widehat{B}}{\widehat{H}} \right|_{H=0}$$

VIR: [Kolektor](#) (Iskra Feriti)

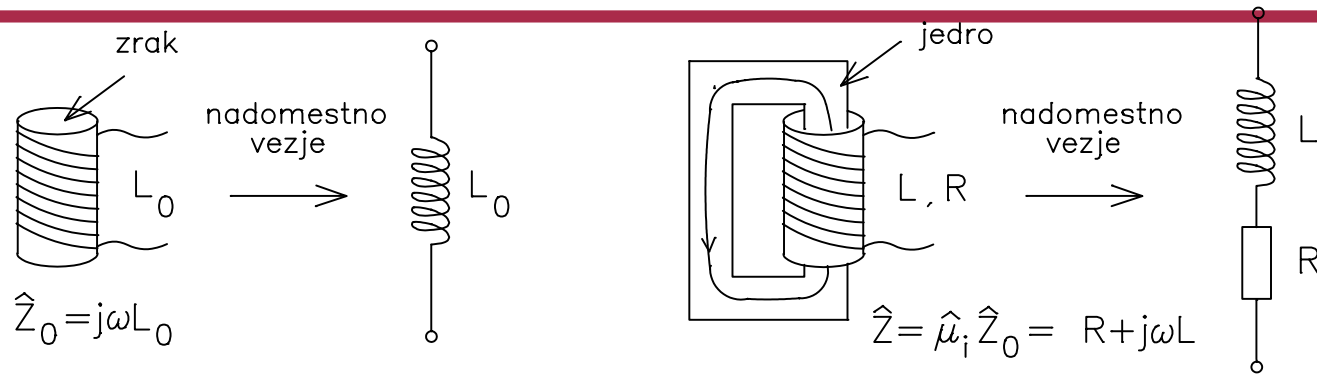
Začetna permeabilnost (μ_i)

- Vsak feritni material ima karakteristično Curiejevo temperaturo T_C ($T_C > 200^\circ\text{C}$ za Mn-Zn ferite).
- Permeabilnost je največja tik pod njo
- Nad T_C permeabilnost naglo upade in nad T_C material nima več magnetnih lastnosti.
- Ko presežemo T_C material sicer izgubi magnetne lastnosti, vendar se te povrnejo nazaj, ko se jedro ohladi.



VIR: EPCOS, [SIFFERIT materials](#); Material N48

Kompleksna permeabilnost



$$Z_0 = j\omega L_0$$

$$Z = R + j\omega L$$

$$Z = \mu_i Z_0 = (\mu'_s - j\mu''_s) \cdot j\omega L_0$$

$$L = \mu'_s L_0$$

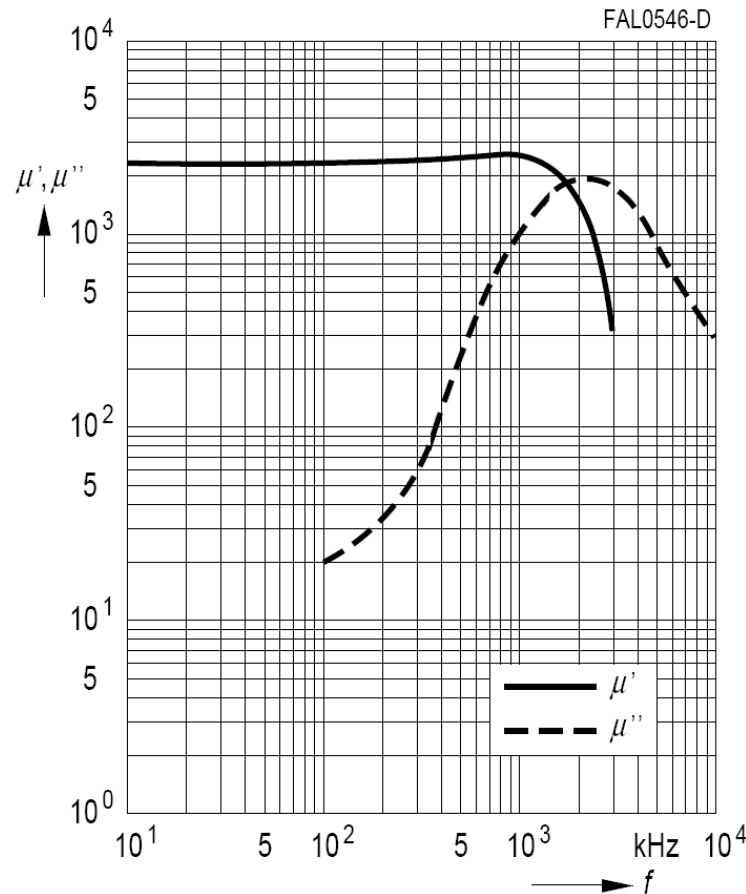
$$R = \mu''_s \omega L_0$$

$$\mu'_s = \frac{L}{L_0}$$

$$\mu''_s = \frac{R}{\omega L_0} = \frac{R}{\omega L} \mu'_s = \mu'_s \operatorname{tg} \delta$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q} = \frac{\mu''_s}{\mu'_s}$$

Kompleksna permeabilnost

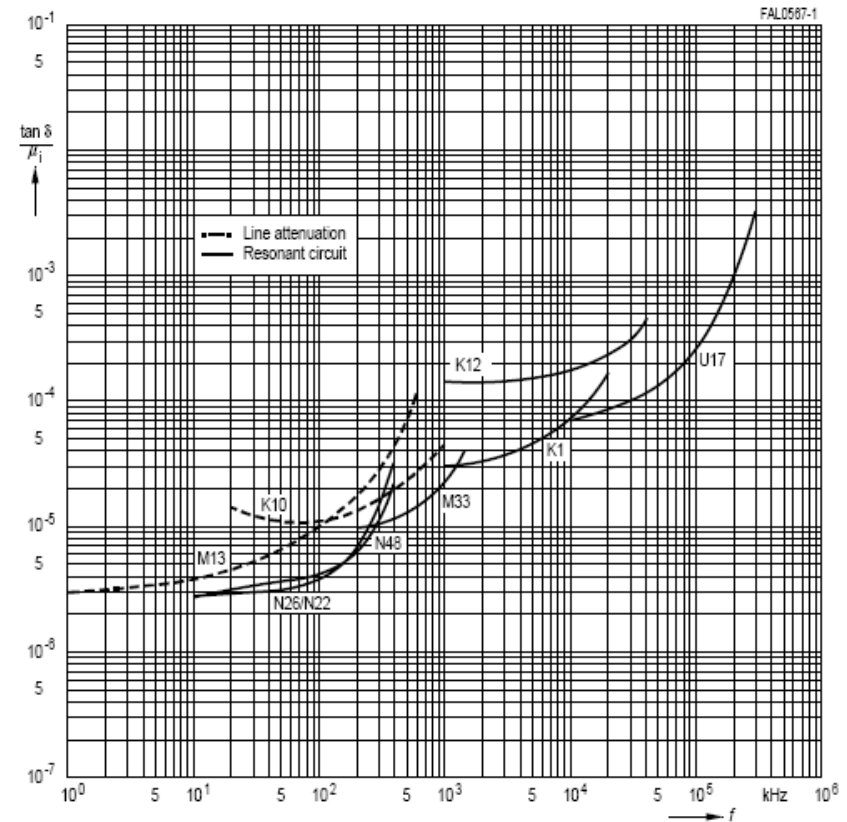


$$\mu'_s = \frac{L}{L_0}$$
$$\mu''_s = \frac{R}{\omega \cdot L_0}$$

VIR: EPCOS, [SIFFERIT materials](#); Material N48

Normalizirane izgube ferita

- Potek μ'_s in μ''_s (f) je osnovni podatek vsakega ferita
- Dober feritni material:
- velika $\mu_i \rightarrow$ veliko povečanje induktivnosti in majhne izgube $\text{tg}\delta$
- Zaradi lažje primerjave feritov se podaja $\text{tg}\delta/\mu_i$
- Razmerje $\text{tg}\delta/\mu_i$ so **normalizirane izgube** ferita.
- $\text{tg}\delta/\mu_i$ je podan samo v področju, kjer ima od vseh feritnih materialov najnižje normalizirane izgube
- tipična vrednost $< 10 \cdot 10^{-6}$ (100kHz)



VIR: EPCOS,
[SIFFERIT materials](#)

Normalizirane izgube ferita

Uporaba	Frekv. območje	Material	Specifična aplikacija
Tuljave visoko Q v resonančnih vezjih in filtrih	up to 0,1 MHz	N 48	Filtri v telefoniji, MW IF filters 0,2 – 1,6 MHz
	1,5 – 12 MHz	M 33	
		K 1	
	6 – 30 MHz	K 12	VHF filtri <100 MHz
		U 17	
Atenuacija na kom. linijah	up to 2 MHz	M 13	Balun transformatorji
Širokopasovni transformatorji (e.g. antenski MW, SW, VHF, TV) ISDN transformatorji , (xDSL) transformatorji, tuljave za izničenje interferenčnih motenj	up to 3 MHz	T 46	ISDN transformatorji, Prilagoditev impedance
		T 42	
		T 38	Tokovno kompenzirane tuljave
		T 37	
	up to 5 MHz	N 30	Tokovno kompenzirane tuljave
		N 26	RF transformatorji <10 MHz
		M 33 up to 250 MHz	
		K 1	
	K12 up to 400 MHz		
	U 17		
Senzorji, ID sistemi	up to 1 MHz	N 22	Induktivna stikala (proximity switch) < 2 MHz
		M 33	
	up to 100 MHz	FPC	

Normalizirane izgube ferita

					Power capacities					
Core shape	Material	Volume mm ³ V	f _{typ} KHz	f _{cutom} KHz	Push-pull converter		Single-ended converter		Flyback converter	
					P _{trans} (f _{typ}) W	P _{trans} (f _{cutom}) W	P _{trans} (f _{typ}) W	P _{trans} (f _{cutom}) W	P _{trans} (f _{typ}) W	P _{trans} (f _{cutom}) W
ETD29	N59	32100	750	1500	428	614	304	436	261	375
	N49		500	1000	209	300	148	213	127	183
	N62		25	150	103	151	52	55	45	47
	N27		25	100	51	94	33	38	28	32
	N67		100	300	161	286	115	189	98	163
	N87		100	500	225	522	160	237	137	204
ETD34	N59	60200	750	1500	676	970	480	689	412	592
	N49		500	1000	330	473	234	336	201	289
	N62		25	150	162	244	84	89	72	77
	N27		25	100	80	151	53	61	45	52
	N67		100	300	255	452	181	303	155	260
	N87		100	500	356	824	253	383	217	329
ETD39	N59	82100	750	1500	1016	1458	721	1035	620	889
	N49		500	1000	495	711	352	505	302	434
	N62		25	150	244	409	139	152	120	130
	N27		25	100	120	241	84	102	72	88
	N67		100	300	383	680	272	478	234	410
	N87		100	500	535	1239	380	639	326	549
ETD44	N62	109000	25	150	405	703	238	261	205	225
	N27		25	100	200	406	141	176	121	151
	N67		100	300	636	1129	452	801	388	688
	N87		100	500	889	2059	631	1097	542	942
ETD49	N62	139000	25	150	629	1081	367	401	315	344
	N27		25	100	310	629	218	270	188	232
	N67		100	300	989	1754	702	1241	603	1066
	N87		100	500	1380	3197	980	1686	842	1448
ETD54	N62	293000	25	150	943	1700	573	635	492	545
	N27		25	100	411	845	292	376	251	323
	N67		100	300	1482	2629	1052	1871	904	1607
	N87		100	500	2069	4791	1469	2644	1262	2271
ETD59	N62	412000	25	150	1576	2807	948	1046	814	899
	N27		25	100	777	1595	552	703	474	604
	N67		100	300	2478	4395	1759	3127	1511	2687
	N87		100	500	3459	8010	2456	4370	2110	3754

Uporaba v močnostnih aplikacijah:

- N27 → f < 100KHz
- N67 → f < 100KHz ... 300KHz.

Oblika jedra:

- **ETD**
Economic Transformer Design (ETD49)
- **EFD**
Economic Flat Design

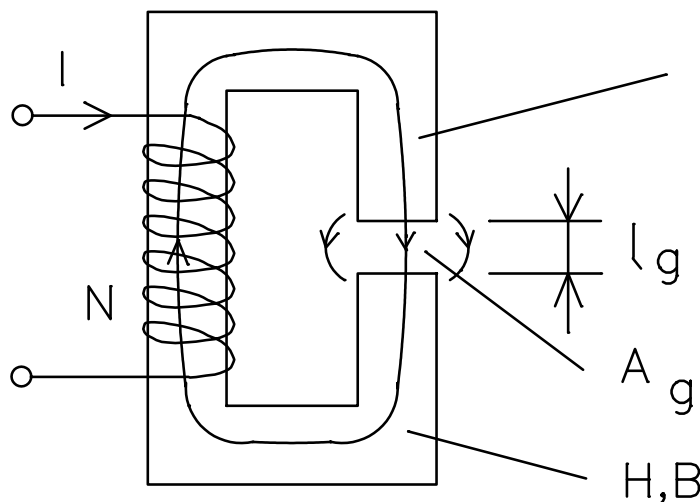
Komponente, sestavi in senzorji

Tuljave z jedrom in režo

Tuljave z jedrom in režo

Mnoga feritna jedra imajo v svoji strukturi zračno režo (ang. gap):

- Reža zmanjša induktivnost, a prinese:
 - Manjši temperaturni koeficient,
 - Nižje izgube tuljave



feritno jedro / μ_i /
 l_e, A_e

reža (gap) / $\mu_i = 1$, zrak! /

Tuljave z jedrom in režo

- Magnetni pretok v jedru z režo lahko določimo s pomočjo analogije Ohmovega zakona za magnetiko:

$$(U = I \sum R_{\Omega} \rightarrow \theta_m = \phi \sum R_m)$$

$$\theta_m = \phi \sum_j R_{mj} = NI$$

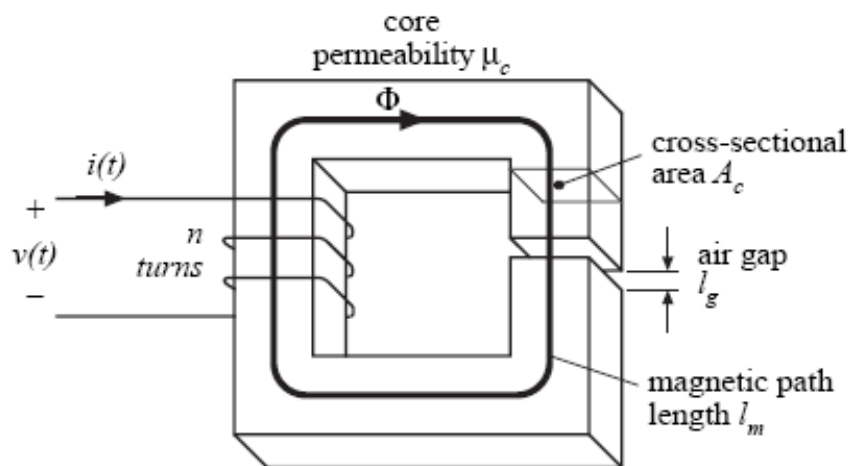
- vsota magnetnih upornosti (reluktanc) R_m gre po zaključeni poti po celotnem jedru
- $NI \rightarrow$ število obkroženih amper-ovojev

Tuljave z jedrom in režo

- Jedro je sestavljeno iz magnetnih področij konstantnega preseka A , konstantne permeabilnosti μ in dolžine l ($R_m = l/\mu A$):

$$\phi = \frac{NI}{\sum_j \frac{l_j}{\mu_j A_j}}$$

Učinek zračne reže

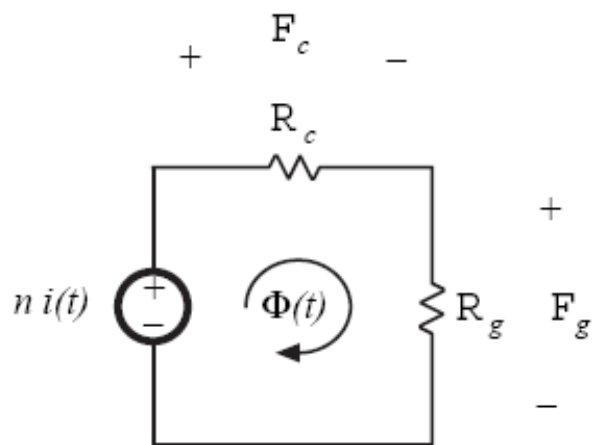


$$F_c + F_g = n i$$

$$n i = \Phi (R_c + R_g)$$

$$R_c = \frac{l_c}{\mu A_c}$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_c}$$



$$R_c = \frac{l_c}{\mu A_c}$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_c}$$

$$v(t) = n \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

$$v(t) = \frac{n^2}{R_c + R_g} \frac{di(t)}{dt}$$

$$L = \frac{n^2}{R_c + R_g}$$

Učinek zračne reže

$$ni = \Phi (R_c + R_g)$$

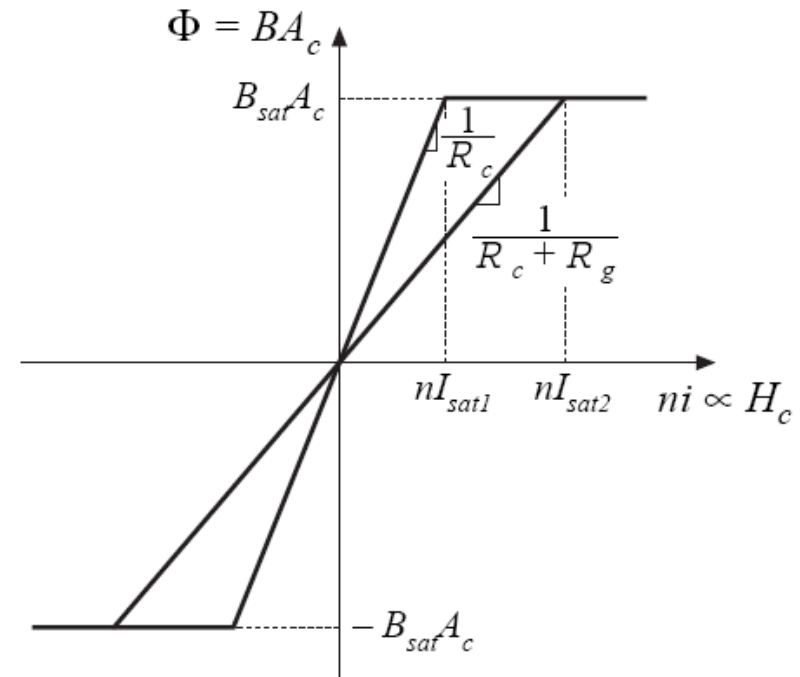
$$L = \frac{n^2}{R_c + R_g}$$

$$\Phi_{sat} = B_{sat} A_c$$

$$I_{sat} = \frac{B_{sat} A_c}{n} (R_c + R_g)$$

Učinki zračne reže:

- zmanjšanje induktivnosti
- povečanje toka nasičenja
- L je manj odvisna od μ_r jedra
→ temperaturna stabilizacija



Faktorja jedra C_1 in C_2

- C_1 in C_2 faktorja jedra, ki omogočata enotno obravnavo jeder različnih oblik.

$$C_1 = \frac{l_e}{A_e} = \sum_j \frac{l_j}{A_j} \qquad C_2 = \frac{l_e}{A_e^2} = \sum_j \frac{l_j}{A_j^2}$$

$$V_e = l_e A_e$$

- $l_e \rightarrow$ efektivna dolžina jedra,
- $A_e \rightarrow$ efektivni presek jedra
- $V_e \rightarrow$ efektivni volumen jedra

Faktorja jedra C_1 in C_2

- Faktorja jedra C_1 in C_2 določata l_e , A_e in V_e :

$$A_e = \frac{C_1}{C_2}$$

$$l_e = C_1 A_e = \frac{C_1^2}{C_2}$$

$$V_e = l_e A_e = \frac{C_1^3}{C_2^2}$$

Induktivnost tuljave z jedrom brez reže

- V primeru brez reže \rightarrow ena permeabilnost $\mu_i = \text{const} \rightarrow$ izpostavimo jo iz vsote reluktanc

$$\begin{aligned} L &= \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2}{\sum_j \frac{l_j}{\mu_j A_j}} = \\ &= \mu_0 \mu_i \frac{N^2}{\sum_j \frac{l_j}{A_j}} = \mu_0 \frac{N^2}{\frac{l_e}{\mu_i A_e}} = \mu_0 \mu_i \frac{N^2}{C_l} \end{aligned}$$

Induktivnost tuljave z jedrom z režo

- Na magnetni poti imamo zračno režo, kjer je $\mu_i = 1$.
- Vsoto reluktanc razdelimo na dva prispevka, po reži in po preostalem jedru

$$\begin{aligned} L &= \frac{N\phi}{I} = \frac{N^2}{\sum_j \frac{l_j}{\mu_j A_j}} = \\ &= \mu_0 \frac{N^2}{\sum_j \frac{l_j}{\mu_{ij} A_j}} = \mu_0 \frac{N^2}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{l_e - l_g}{\mu_i A_e}} \end{aligned}$$

Induktivnost tuljave z jedrom z režo

- Proizvajalci izdelujejo kalibrirana jedra z režo,
- Reže **niso na voljo v vseh velikostih.**
- Npr. ETD49 jedro dobimo z režo:
 - 0.20 ± 0.02 mm,
 - 0.50 ± 0.05 mm,
 - 1.00 ± 0.05 mm,
 - 2.00 ± 0.05 mm.
- Preostale velikosti reže dobimo s sestavljanjem različnih polovic jeder lahko pa vstavimo distančne ploščice (ang. shime, spacer)

Efektivna permeabilnost jedra z režo μ_e

Jedro z režo pogosto opisujemo na enak način kot jedro brez reže, razlike skrijemo v **efektivno permeabilnost jedra z režo μ_e**

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{N^2}{C_1}$$

$$L = \mu_0 \cdot \frac{1}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{l_e - l_g}{\mu_i A_e}} \cdot N^2$$

$$\mu_e = \frac{C_1}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{l_e - l_g}{\mu_i A_e}}$$

Efektivna permeabilnost jedra z režo μ_e

Gapped					
Material	g mm	A_L value approx. nH	μ_e	Ordering code ** = 27 (N27) = 67 (N67)	PU Pcs
N27,	$0,20 \pm 0,02$	1035	444	B66367-G200-X1**	100
N67	$0,50 \pm 0,05$	525	225	B66367-G500-X1**	
	$1,00 \pm 0,05$	314	135	B66367-G1000-X1**	
	$2,00 \pm 0,05$	188	81	B66367-G2000-X1**	

The A_L value in the table applies to a core set comprising one ungapped core (dimension $g = 0$) and one gapped core (dimension $g > 0$).

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{N^2}{C_1}$$

Poenostavljeno računanje z μ_e

- Širina reže je mnogo manjša od ostalih dimenzij jedra ($l_g \ll l_e$),
- Presek reže približno enak preseku jedra ($A_g \approx A_e$)

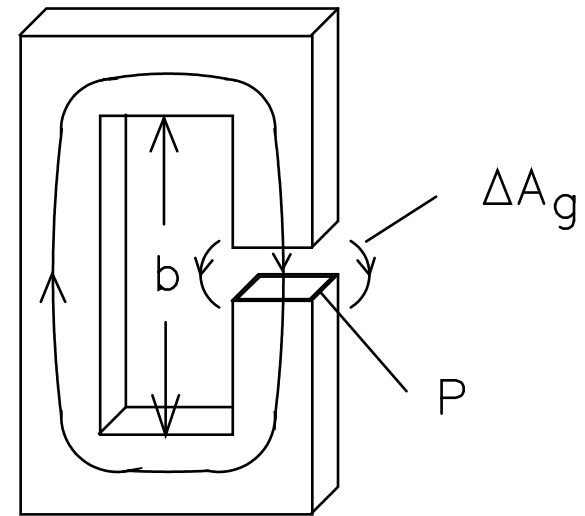
$$\mu_e = \frac{\frac{l_e}{A_e}}{\frac{l_g}{A_g} + \frac{l_e}{\mu_i A_e}} = \frac{l_e}{l_e + \mu_i l_g} \mu_i = \frac{1}{1 + \frac{l_g}{l_e} \mu_i} \mu_i$$

Povečanje preseka reže ΔA_g

- Silnice magnetnega polja v reži so nekoliko razprte (ang. flux fringing) \rightarrow večji efektivni presek reže.
- Povečanje preseka reže ΔA_g moramo prišteti geometrijskemu preseku jedra A_g

$$\Delta A_g = \left[0.241 + \frac{l}{\pi} \ln\left(\frac{b}{l_g}\right) \right] P l_g$$

- $A_g \rightarrow$ geometrijski presek stebra z režo,
- $P \rightarrow$ obseg stebra z režo
- $b \rightarrow$ notranja višina stebra z režo



Faktor induktivnosti A_L / Faktor ovojev α

- Faktor induktivnosti A_L podaja induktivnost na enoto ovoja. Število ovojev je (N).

$$L = A_L N^2 \qquad A_L = \frac{\mu_0 \mu_e}{\sum \frac{l_j}{A_j}} = \frac{\mu_0 \mu_e}{C_1}$$

- Na feritnih lončkih je vrednost A_L [nH]
- Faktor ovojev α predstavlja potrebno število ovojev, da bo tuljava imela induktivnost 1 mH

$$L[mH] = \frac{1}{\alpha^2} N^2$$

Faktor upornosti A_R

- Faktor upornosti **tuljavnika** A_R je ohmska upornost navitja tuljavnika na enoto ovoja.
- Ohmska upornost tuljave na danem tuljavniku s faktorjem upornosti A_R in številom ovojev N :

$$R[\Omega] = A_R N^2 \quad A_R = \rho_{Cu} \frac{\pi D_{sr}}{b l k_{Cu} \cos \varphi}$$

- k_{Cu} → polnilni faktor zaradi neidealne napolnitve tuljavnika z bakreno žico okroglega preseka ($k_{Cu} \approx 0.5$)

Faktor upornosti A_R

- Faktor upornosti je dan za določeno vrsto tuljavnika, ki služi za hiter in enostaven izračun ohmske upornosti tuljave.
- Pri projektiranju tuljave ga uporabljamo tudi za hitro določitev maksimalnega dopustnega števila ovojev, da upornost tuljave ni prevelika oz. njena kvaliteta premajhna ($Q = \omega L/R$)

Desakomodacija induktivnosti

- Permeabilnost feritnih jeder med delovanjem, od nastanka feritnega materiala v tovarni s časom upada.
- Zato časovno upada tudi induktivnost tuljav z jedrom.
- Vzrok časovnemu upadu je v razureditvi (**desakomodaciji**) magnetnih dipolov materiala zaradi raznih mehanskih, temperaturnih in drugih vplivov med dolgotrajnim delovanjem

Desakomodacijski koeficient d

- Po prehodnem obdobju od nastanka feritnega materiala (≈ 1 ura) relativna sprememba permeabilnosti $\Delta\mu/\mu$ linearno upada s časom v log. merilu.
- Vrednosti začetne permeabilnosti ob različnih časih $\mu_{i1} > \mu_{i2}$, ki pripadata časoma $t_1 < t_2$

$$\frac{\mu_{i1} - \mu_{i2}}{\mu_{i1}} = d \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

d desakomodacijski koeficient.

Desakomodacija v jedru brez reže

- L je proporcionalna permeabilnosti jedra
- zato bo induktivnost tuljave podobno upadala s časom.

$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} = d \log \frac{t_2}{t_1}$$

Desakomodacija v jedru z režo

- Zaradi velike stabilnosti materiala v reži (zrak) se vsa spreminjanja lastnosti tuljave **reducirajo** v razmerju μ_e/μ_i

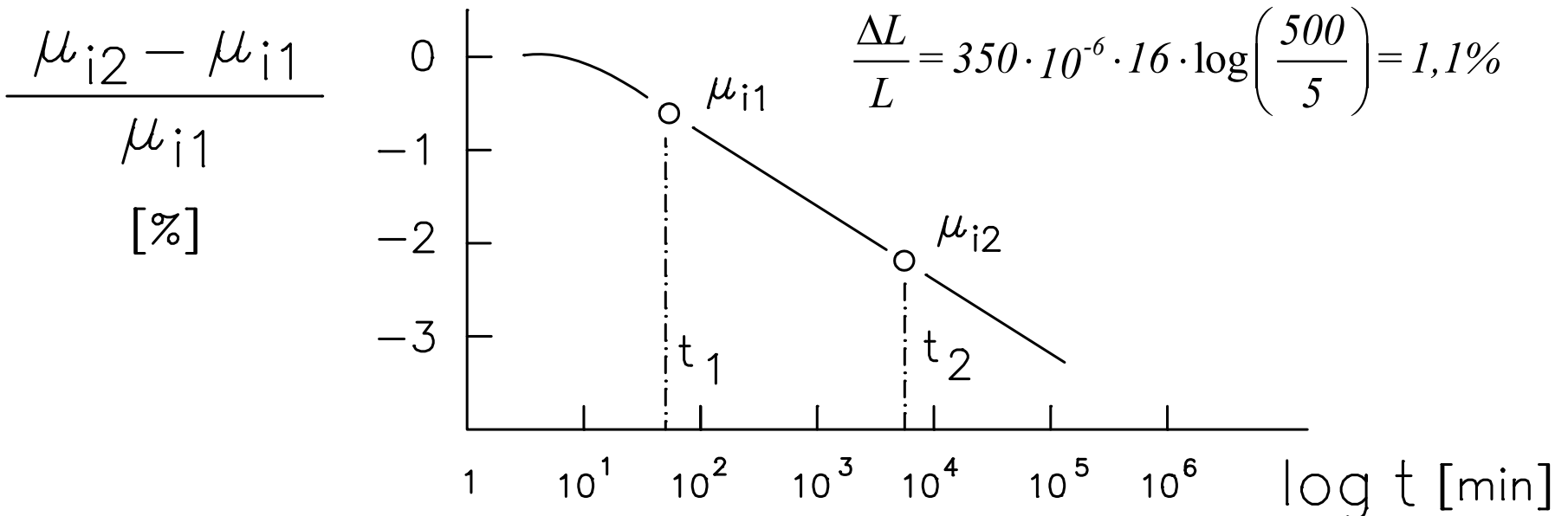
$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} = \frac{\mu_e}{\mu_i} d \log \frac{t_2}{t_1}$$

$$\frac{L_1 - L_2}{L_1} = DF \mu_e \log \frac{t_2}{t_1}$$

- $DF = d/\mu_i \rightarrow$ **desakomodacijski faktor** ferita

Faktor desakomodacije (DF)

- Feritni lonček z režo s podatki $\mu_e = 16$, $DF \approx 350 \cdot 10^{-6}$ je bil dan v obratovanje po času $t_1 = 5$ tednov.
- Za koliko % bo upadla L po času delovanja $t_2 = 10$ let ?



Magnetne izgube pri jedrih z režo ($\text{tg}\delta$)

- Če v feritno jedro vpeljemo zračno režo, se bodo izgube takega jedra **zaradi nizkih izgub zraka** v reži znatno zmanjšale.
- Večja reža \rightarrow večje zmanjšanje.
- Izgube jedra z režo se zmanjšajo v primerjavi z izgubami jedra brez reže v razmerju permeabilnosti:

$$\frac{\mu_e}{\mu_i}$$

Magnetne izgube pri jedrih z režo ($\text{tg}\delta_e$)

$$\frac{\text{tg}\delta_e}{\text{tg}\delta} = \frac{\mu_e}{\mu_i}$$

- μ_i → začetna permeabilnost magnetnega jedra brez reže
- μ_e → efektivna permeabilnost jedra z režo.

Normalizirane izgube $\text{tg}\delta/\mu_i$

$$\frac{\text{tg}\delta_e}{\mu_e} = \frac{\text{tg}\delta}{\mu_i}$$

- Izgube jedra z režo $\text{tg}\delta_e$ pri frekvenci f lahko določimo iz diagrama normaliziranih izgub $\text{tg}\delta/\mu_i(f)$ materiala brez reže

$$\text{tg}\delta_e(f) = \left[\frac{\text{tg}\delta}{\mu_i}(f) \right] \mu_e$$

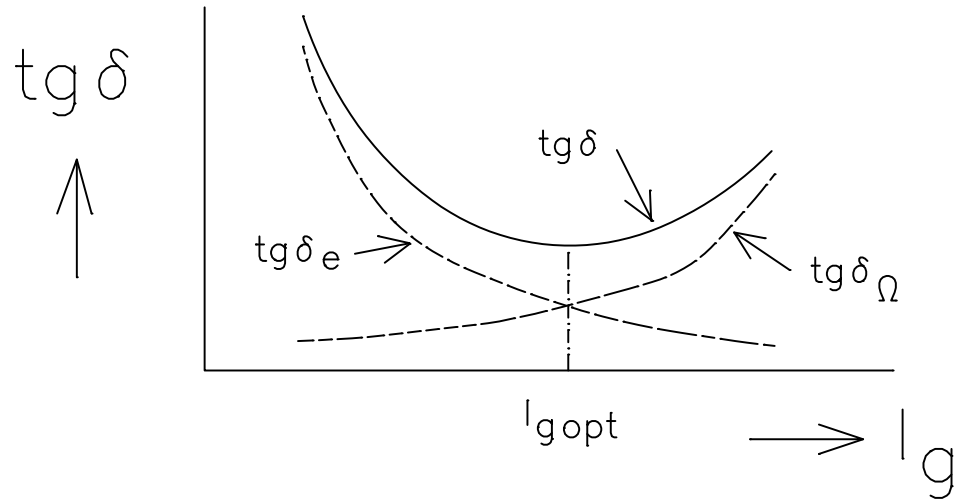
Celotne izgube tuljave z jedrom z režo

- Celotne izgube tuljave $\text{tg}\delta$ (kvaliteta Q) so določeni z vsoto izgub.
Od vseh upoštevamo samo:
 - $\text{tg}\delta_{\Omega}$ ohmske izgube
 - $\text{tg}\delta_e$ efektivne izgube feritnega jedra

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{Q} = \text{tg}\delta_{\Omega} + \text{tg}\delta_e$$

Optimalna širina reže (l_{gopt})

- **Ohmske izgube** s širino reže **rastejo**, ker moramo zaradi naraščajoče reže in zato upadajoče induktivnosti povečevati število ovojev N , da ohranimo zahtevano induktivnost; večje število ovojev pomeni višjo upornost navitja.
- **Efektivne izgube** v feritnem materialu $\text{tg}\delta_e$ s širino reže **upadajo** kot upada μ_e .
- Vsota obeh bo najnižja ko sta oba prispevka enaka. Širina reže je pri tem optimalna l_{gopt} .

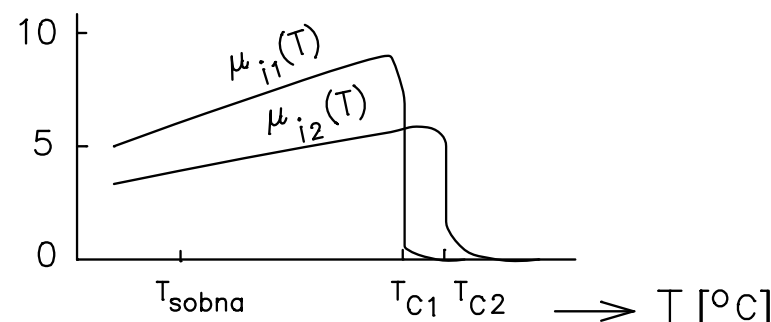


Temperaturni koeficient induktivnosti (TK_L)

- $L(T)$ z jedrom brez reže je določena s temperaturno odvisnostjo μ_i

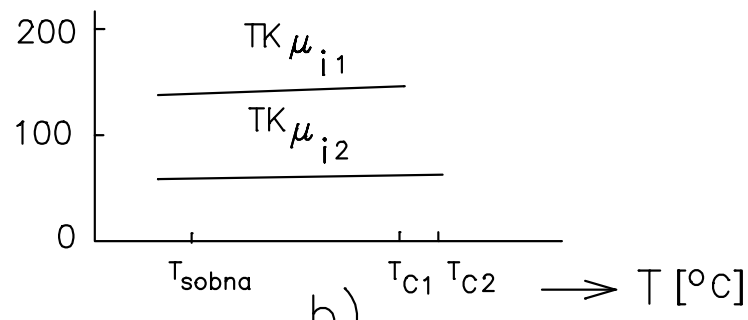
$$L(T) = \mu_0 \mu_i(T) \frac{N^2}{C_l} = \mu_0 \mu_i(T) \frac{N^2}{\sum \frac{l_j}{A_j}}$$

$$\mu_i(T) \quad [10^3]$$



$$TK_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} = \frac{1}{\mu_i} \frac{d\mu_i}{dT} = TK_{\mu_i}$$

$$TK_{\mu_i} \quad [10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$$



TK_L tuljave z jedrom z režo

- Reža ima stabilizacijski vpliv (zrak), zato se tudi temperaturne spremembe zmanjšajo v razmerju μ_e/μ_i :

$$\frac{\alpha_e}{\alpha} = \frac{\mu_e}{\mu_i}$$

- $\alpha_e \rightarrow$ TK_L jedra z režo,
- $\alpha \rightarrow$ TK_L jedra brez reže

TK_L tuljave z jedrom z režo

- Normalizirana oblika (TK je normaliziran z μ)

$$\frac{\alpha_e}{\mu_e} = \frac{\alpha}{\mu_i}$$

$$\alpha_e = \left(\frac{\alpha}{\mu_i} \right) \mu_e$$

- $\alpha/\mu_i \rightarrow$ normalizirani temperaturni koeficient magnetnega materiala
- $\alpha/\mu_i \approx 1 \dots 100$ ppm/K

Komponente, sestavi in senzorji

Načrtovanje tuljave
z jedrom z režo

Načrtovanje tuljave z jedrom z režo

- Izhodiščne zahteve in omejitve načrtovanja:
 - vrednost induktivnosti L
 - minimalna kvaliteta tuljave Q_{\min}
 - maksimalna vrednost TK_L α_{\max}
 - frekvenčni pas delovanja $[f_{\min}, f_{\max}]$
 - temperaturno področje delovanja $[T_{\min}, T_{\max}]$

Načrtovanje tuljave z jedrom z režo

1. Izbira feritnega materiala
2. Izbira feritnega lončka in morebitne reže
3. Izbira žice
4. Določitev števila ovojev in izbira tuljavnika
5. Določitev ohmske upornosti in kvalitete tuljave

1. Izbira feritnega materiala

- Material izberemo iz diagrama normaliziranih izgub $\text{tg}\delta/\mu_i(f)$ za frekvenčni pas delovanja $[f_{\min}, f_{\max}]$
- Izberemo tisti feritni material, ki ima v pasu $[f_{\min}, f_{\max}]$ najnižje normalizirane izgube.
- Če je več enakovrednih materialov izbiramo po:
 - Q_{\min} ,
 - a_{\max}
 - ceni materiala.

2. Izbira feritnega lončka in morebitne reže

- Ali sta predpisana Q , a_e lahko izpolnjena s feritnim lončkom za izbrani ferit brez reže?
 - Če gre → lonček brez reže.
 - Če ne gre → feritni lonček z režo.
Določimo μ_e lončka in s tem potrebno režo.
- Upoštevamo zmanjševanje temperaturnega koeficienta a_e z naraščajočo širino reže:

$$\mu_e = \frac{\alpha_e}{\left(\frac{\alpha}{\mu_i}\right)}$$

- a_e → zahtevani temperaturni koeficient
- (α/μ_i) → normalizirani temperaturni koeficient izbranega ferita (katalog)
- Izberemo lonček, ki ima vrednost μ_e enako ali manjšo od izračunane. TK_L bo enak ali manjši od zahtevanega.
- Za izbrani lonček z režo si zapomnimo faktor induktivnosti A_L .

3. Izbira žice

- Pravilna izbira žice v odvisnosti od predpisanega frekvenčnega pasu delovanja:
- **$f < 20 \text{ kHz}$** : ni sile, uporabimo lahko navadno monofilno žico s tanko izolacijo
- **$20 \text{ kHz} - 200 \text{ kHz}$** : kožni (skin) efekt \rightarrow pletenice, ($f > 50 \text{ kHz}$) \rightarrow žile tanjše od $70 \mu\text{m}$
- **$200 \text{ kHz} - 5 \text{ MHz}$** : pletenice, žile tanjše od $40 \mu\text{m}$
- **$f > 5 \text{ MHz}$** : priporočljiva je zelo tanka monofilna žica in antikapacitivna navijanja
- Za izbrano žico odčitamo še premer žice in upornost na meter $\rightarrow R_{1\text{m}}$

4. Določitev števila ovojev in izbira tuljavnika

- Iz faktorja induktivnosti A_L določimo število ovojev N , potrebnih za induktivnost L

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

- Za izbrani lonček določimo tuljavnik, ki lahko sprejme potrebno število ovojev izbrane žice. Iz kataloških podatkov za izbrani tuljavnik odčitamo še **dolžino povprečnega ovoja** l_N .
- Iz tabel določimo korekturni faktor za vrednost l_N , saj ta podatek velja za poln tuljavnik (max. ovojev)

5. Določitev ohmske upornosti

- Dolžino žice navitja l_{tot} določimo iz števila ovojev in dolžine povprečnega ovoja. Dodamo še ocenjeno dolžino izvodov (≈ 10 cm)

$$l_{tot} = Nl_N + 2l_{izv}$$

- Ohmska upornost navitja R_{tot} je določena z upornostjo žice na enoto dolžine R_{1m} in njeno dolžino l_{tot}

$$R_{tot} = R_{1m} l_{tot}$$

6. Določitev kvalitete tuljave

- Izračunamo približek kvalitete (Q): brez (levo) ali z (desno) upoštevanjem magnetnih izgub jedra

$$Q = \frac{\omega L}{R_{tot}}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\omega L} + \operatorname{tg} \delta_e$$

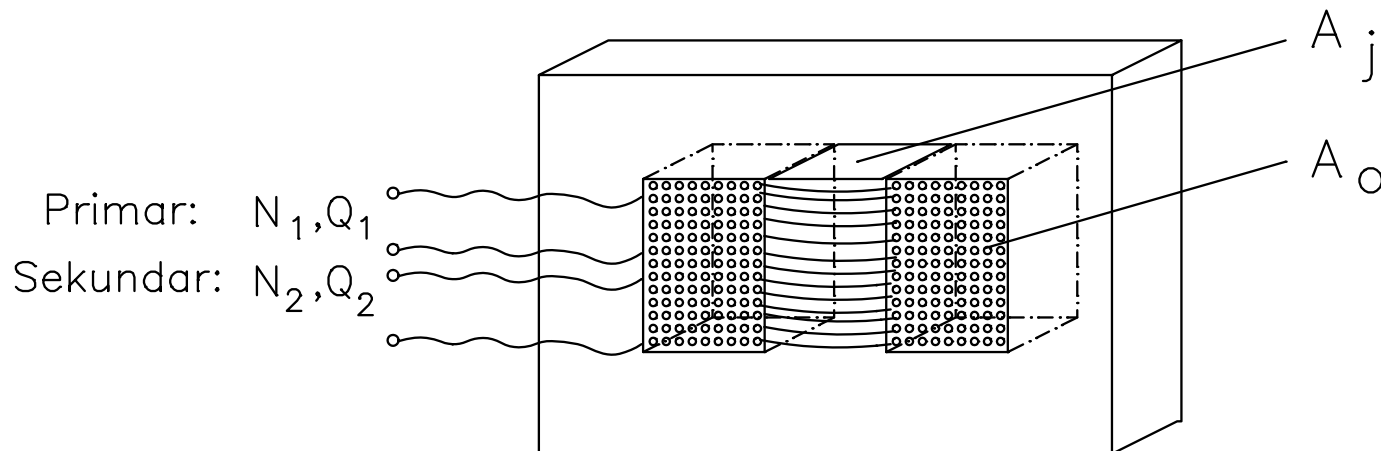
- if ($Q_{\text{izračunan}} \geq Q_{\text{predpisan}}$) \rightarrow zmaga
- else $Q_{\text{izračunan}}++ \rightarrow$ znižamo R_{tot} .
(debelejša žica oz. pletenice z večjim številom žil)
- Če nova žica ne gre v izbrani tuljavnik \rightarrow izberemo večji tuljavnik
- Če novi tuljavnik ne gre v feritni lonček \rightarrow vzamemo večji lonček
- do .. while ($Q \leq Q_{\text{predpisan}}$)

Komponente, sestavi in senzorji

Načrtovanje omrežnega
transformatorja

Načrtovanje omrežnega transformatorja

- Transformator je sestavljen iz dveh navitij, navitih na skupnem jedru, magnetno sklopljenih preko skupnega magnetnega pretoka
- Osnovni parametri transformatorja so:
 - geometrijski presek jedra A_j
 - geometrijski presek okna A_o
 - število obojev in presek žice primarja N_1, Q_1
 - število obojev in presek žice sekundarja N_2, Q_2



Načrtovanje omrežnega transformatorja

- Izhodišče obravnave je enačba za inducirano napetost $v_i(t)$ v nekem navitju z N ovoji, zaradi časovno spremenljivega magnetnega pretoka Φ skozi navitje

$$v_i = - N \frac{d\phi}{dt}$$

- Magnetni pretok je določen z gostoto magnetnega pretoka B in efektivnim presekom jedra A_{jef} .
- Efektivni presek jedra A_{jef} je običajno manjši od geometrijskega preseka jedra A_j , ker so jedra zaradi zmanjšanja vrtničnih tokov lamelirana.
- $p_j \rightarrow$ polnilni faktor jedra ($p_j \approx 0.9$)

$$\phi = B A_{jef}$$

$$p_j = \frac{A_{jef}}{A_j}$$

$$v_i = - N p_j A_j \frac{dB}{dt}$$

Načrtovanje omrežnega transformatorja

- Na primarju je sinusni signal $\rightarrow B(t), H(t)$ so sinusne oblike.
- $B_M \rightarrow$ amplituda gostote magnetnega pretoka,
- $\omega \rightarrow$ krožna frekvenca vhodnih signalov.

$$B = B_M \sin \omega t \quad \text{oz.} \quad \frac{dB}{dt} = \omega B_M \cos \omega t$$

$$v_i = - N p_j A_j \frac{dB}{dt}$$

$$v_i = - N p_j A_j \omega B_M \cos \omega t = - V_M \cos \omega t$$

Efektivnimi vrednosti napetosti

- Delamo z efektivnimi vrednostmi, ki so pri sinusnih signalih v enostavni zvezi z amplitudami ($V_{ef} = 1/\sqrt{2} \cdot V_M$).
- Izrazimo $f = 2 \cdot \pi / \omega$

$$V_{ef1} = 4.44 \cdot N_1 \cdot f \cdot B_M \cdot p_j \cdot A_j$$

$$V_{ef2} = 4.44 \cdot N_2 \cdot f \cdot B_M \cdot p_j \cdot A_j$$

- $N_{1,2}$ → število ovojev primarja, sekundarja
- $V_{ef1,2}$ → efektivna napetost primarja, sekundarja

Polnilni faktor okna (p_o)

- Navitja zaradi nepopolnega zlaganja žice okroglega preseka, včasih in zaradi premajhnega števila ovojev ne zapolnijo površine okna.
- $p_o \rightarrow (p_o \approx 0.3 \dots 0.5)$ polnilni faktor okna razmerje med:
 - A_{oef} (z bakreno žico zasedeni del preseka okna)
($N_1 Q_1 + N_2 Q_2$)
 - A_o (geometrijski presek okna)
- $Q_1, Q_2 \rightarrow$ preseka žic primarja, sekundarja

$$p_o = \frac{A_{oef}}{A_o} = \frac{N_1 Q_1 + N_2 Q_2}{A_o}$$

Optimalna efektivna gostota toka

- V vseh navitjih mora biti **ista**, optimalna efektivna gostota toka j_{ef}
- $Q_1, Q_2 \rightarrow$ preseka žic primarja, sekundarja

$$j_{ef} = \frac{I_{1ef}}{Q_1} = \frac{I_{2ef}}{Q_2}$$

$$A_{oef} = p_o A_o = N_1 Q_1 + N_2 Q_2 = N_1 \cdot \frac{I_{ef1}}{j_{ef}} + N_2 \cdot \frac{I_{ef2}}{j_{ef}}$$

$$j_{ef} p_o A_o = N_1 I_{ef1} + N_2 I_{ef2}$$

Prenos moči pri transformatorju brez izgub

- Moč iz primarja P_1 se prenaša brez izgub v moč sekundarja P_2 (\approx)

$$P_1 = I_{ef1} V_{ef1} \approx P_2 = I_{ef2} V_{ef2}$$

- Celotna moč transformatorja je vsota vseh moči v transformatorju ΣP :

$$\Sigma P = 4.44 f B_M p_j A_j (N_1 I_{ef1} + N_2 I_{ef2})$$

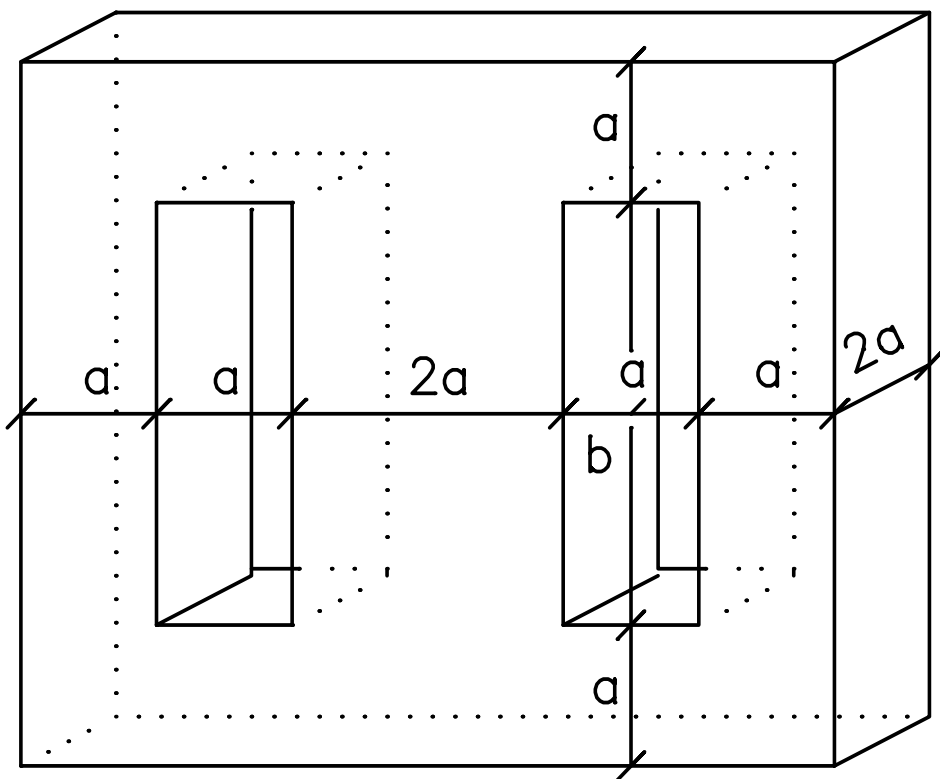
Prenos moči pri transformatorju brez izgub

- Kakšni so potrebni preseki jedra in okna A_j , A_o v odvisnosti od zahtevane moči transformatorja?

$$A_o A_j = \frac{\Sigma P}{4.44 f B_M p_j p_o j_{ef}}$$

Standardna jedra

- Preseki A_j , A_o so med seboj povezani ($b = 3a$)



$$A_j = 2a \times 2a = 4a^2$$

$$A_o = a \times 3a = 3a^2$$

$$A_o = \frac{3}{4} A_j$$

$$A_j = \sqrt{\frac{\Sigma P}{3.33 f B_M p_j p_o j_{ef}}}$$

$$N_{1,2} = \frac{V_{ef1,2}}{4.44 f B_M p_j A_j}$$

Transformator z izgubami

- V resničnem transformatorju z izgubami izpeljane enačbe samo povečati je treba preseke jedra in okna A_j , A_o ter število ovojev sekundarja N_2
- Omrežni transformator z izgubami (ang. Loss, L), npr. $L=10\%=0.10$
- Zaradi izgub moramo dodatno vložiti na primarju $L=10\%$ moči več, ($L \cdot P_1 = 0.10 \cdot P_1$)
- Še vedno velja ($P_1 \approx P_2$):

brez izgub:
$$\Sigma P = P_1 + P_2 \approx 2P_1$$

z izgubami:

$$\Sigma P = P_1 + LP_1 + P_2 = (2 + L)P_1 = 2.10P_1$$

Transformator z izgubami

- Moč se poveča iz $2 P_1 \rightarrow (2+L) P_1$
- Preseki A_j, A_o se povečajo za faktor $L/4$ (v primeru $L = 10\% \rightarrow$ za 2.5%)

$$A_{jL} = \sqrt{\frac{(2+L) \cdot P_1}{3.33 f B_M p_j p_o j_{ef}}}$$

$$A_j = \sqrt{\frac{2 \cdot P_1}{3.33 f B_M p_j p_o j_{ef}}}$$

$$A_{jL} = \sqrt{\frac{2+L}{2}} A_j \approx \left(1 + \frac{L}{4}\right) \cdot A_j = 1.025 \cdot A_j$$

Podobna formula za A_o :

$$A_{oL} = \sqrt{\frac{2+L}{2}} \cdot A_o \approx \left(1 + \frac{L}{4}\right) \cdot A_o = 1.025 \cdot A_o$$

Transformator z izgubami

- Za izračun N_1 uporabimo izraz brez sprememb
- Zaradi izgub v jedru je treba običajno povečati N_2 za +15% .

$$N_1 = \frac{V_{ef1}}{4.44 f B_M p_j A_j} \approx 50 \cdot \frac{V_{ef1}[V]}{A_j[cm^2]} \Bigg|_{B=1T; p_j=0.9; p_o=0.3; j_{ef}=2 A/mm^2}$$

$$N_2 = \frac{1.15 \cdot V_{ef2}}{4.44 \cdot f \cdot B_M \cdot p_j \cdot A_j} \approx 57.5 \cdot \frac{V_{ef2}[V]}{A_j[cm^2]} \Bigg|_{B=1T; p_j=0.9; p_o=0.3; j_{ef}=2 A/mm^2}$$

Optimalni presek žic (Q)

- Optimalni preseki žic Q so določeni s tokovno gostoto j_{ef}
- j_{ef} naj bo enaka v vseh navitjih
- $j_{ef}(\text{Cu}) \approx 1 \dots 4 \text{ A/mm}^2$
v praksi $j_{ef}(\text{Cu}) \approx 2 \dots 2.5 \text{ A/mm}^2$

$$I_{ef1,2} = \frac{P_{1,2}}{V_{ef1,2}}$$

$$Q_{1,2} = \frac{\pi D_{1,2}^2}{4} = \frac{I_{ef1,2}}{j_{ef}}$$

$$D_{1,2} = \sqrt{\frac{4 I_{ef1,2}}{\pi j_{ef}}} = 1.13 \sqrt{\frac{I_{ef1,2}}{j_{ef}}}$$

Največji tokovi žic ($j_{ef} = 2.8 \text{ A/mm}^2$)

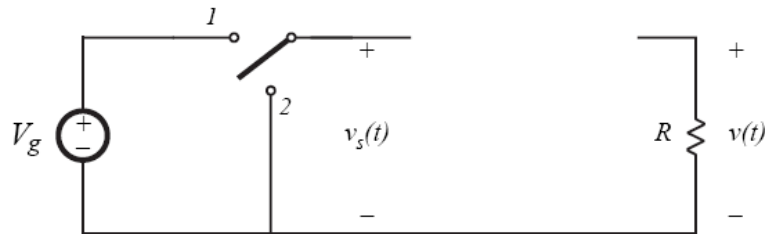
D(mm)	A(mm ²)	j(A/mm ²)	I _{max} (A)	D(mm)	A(mm ²)	j(A/mm ²)	I _{max} (A)
11.68	107.22	2.82	302	2.59	5.26	2.85	15
10.40	85.01	2.81	239	2.30	4.17	2.88	12
9.27	67.43	2.82	190	2.05	3.31	2.81	9.3
8.25	53.49	2.80	150	1.83	2.63	2.82	7.4
7.35	42.41	2.81	119	1.63	2.08	2.83	5.9
6.54	33.62	2.80	94	1.45	1.65	2.84	4.7
5.83	26.67	2.81	75	1.29	1.31	2.83	3.7
5.19	21.15	2.84	60	1.15	1.04	2.79	2.9
4.62	16.77	2.80	47	1.02	0.82	2.79	2.3
4.11	13.30	2.78	37	0.91	0.65	2.76	1.8
3.67	10.55	2.84	30	0.81	0.52	2.89	1.5
3.26	8.37	2.87	24	0.72	0.41	2.92	1.2
2.91	6.63	2.87	19	0.65	0.33	2.81	0.92

Komponente, sestavi in senzorji

Osnove SMPS

Buck pretvornik

SPDT stikalo



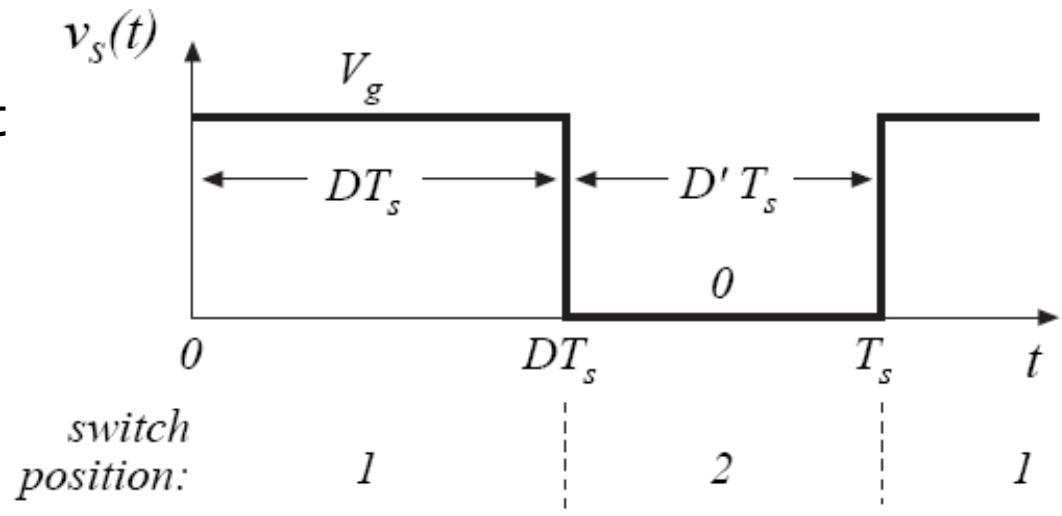
Izhodna stikalna napetost

Duty cycle (D)

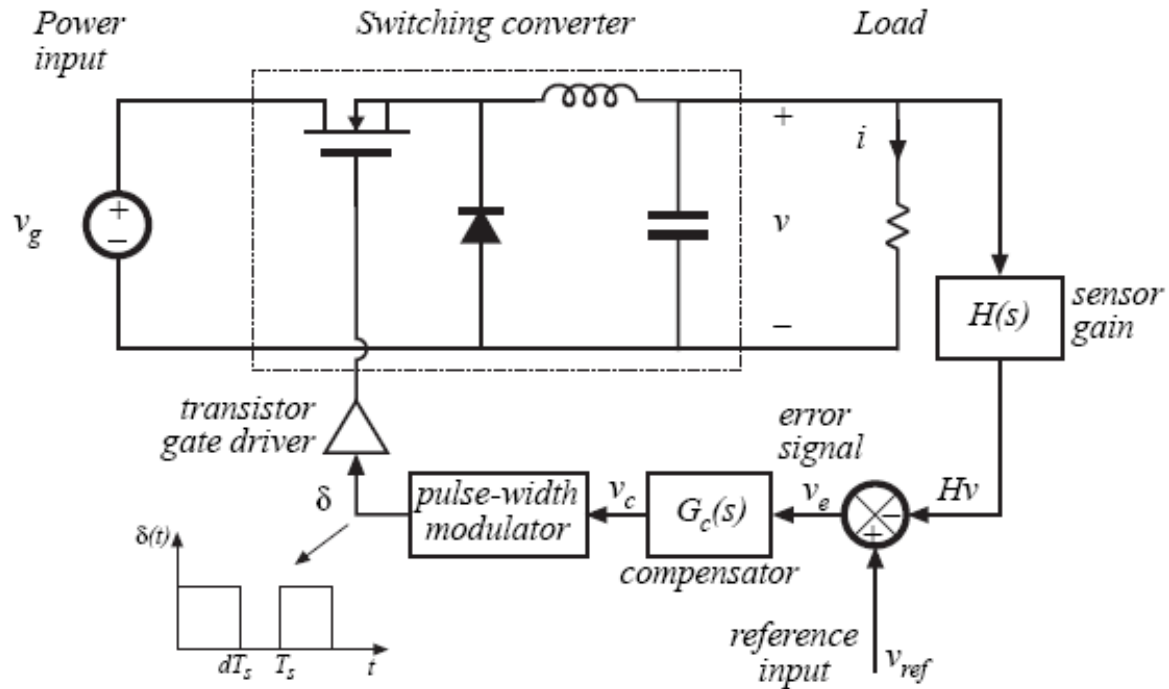
$0 < D \leq 1$

Komplement (D')

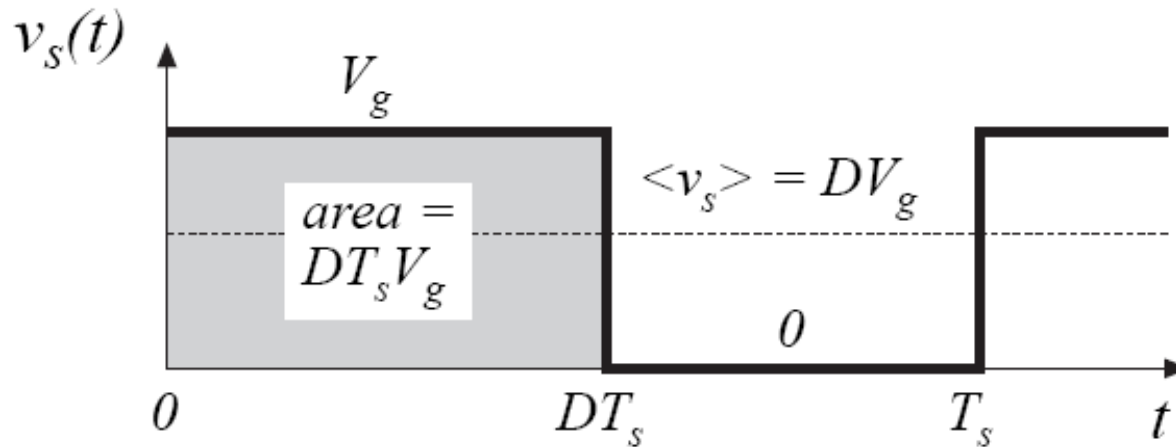
$D' = 1 - D$



Buck pretvornik



Buck pretvornik

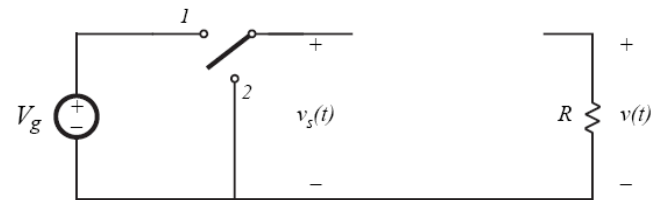


Fourierova analiza:

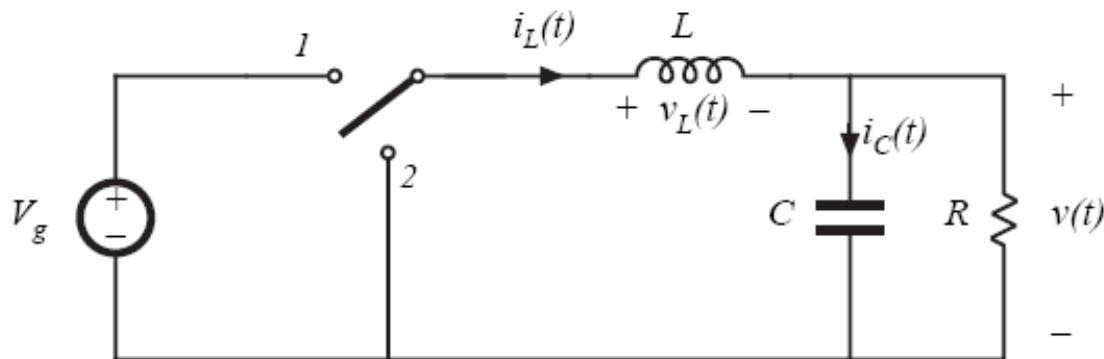
DC komponenta \rightarrow povprečna vrednost

$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_s(t) dt$$

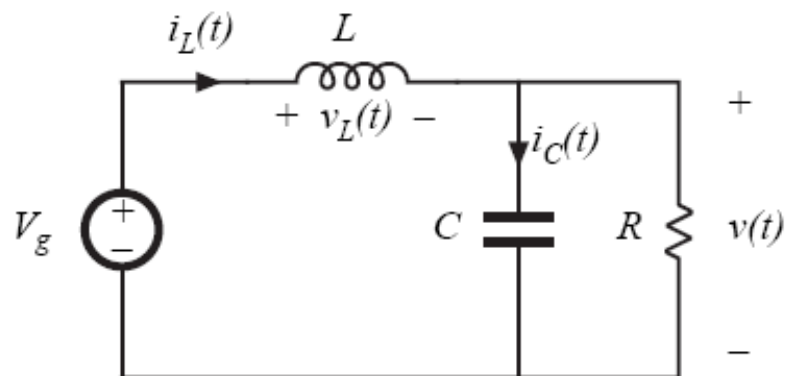
$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{T_s} (DT_s V_g) = DV_g$$



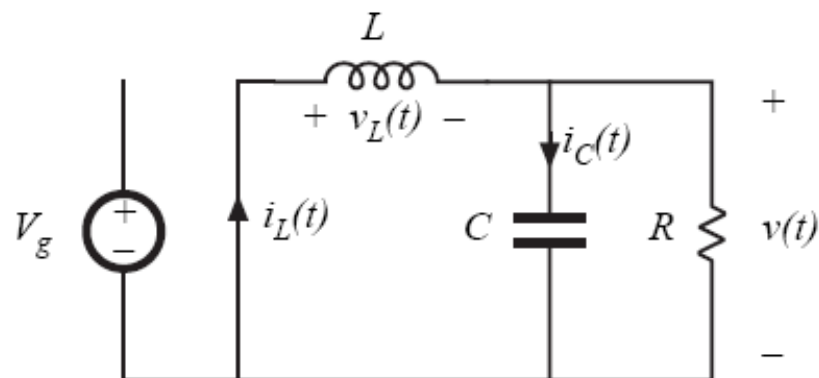
Buck pretvornik – tok preko tuljave



Stikalo v "1"



Stikalo v "2"



Buck – i_L – stikalo "1"

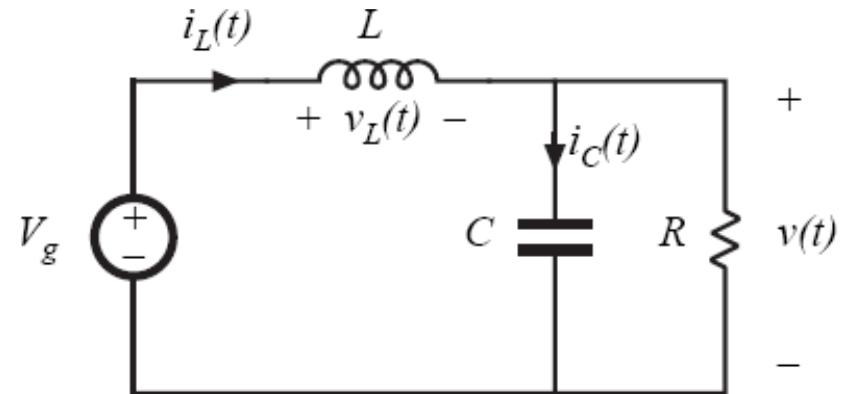
$$v_L = V_g - v(t)$$

Naj bo valovitost izhodne napetosti majhna proti DC vrednosti

$$v_L \approx V_g - V$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L} \approx \frac{V_g - V}{L}$$



i_L se spreminja s konstantnim naklonom ($1/L$)

Buck – i_L – stikalo "2"

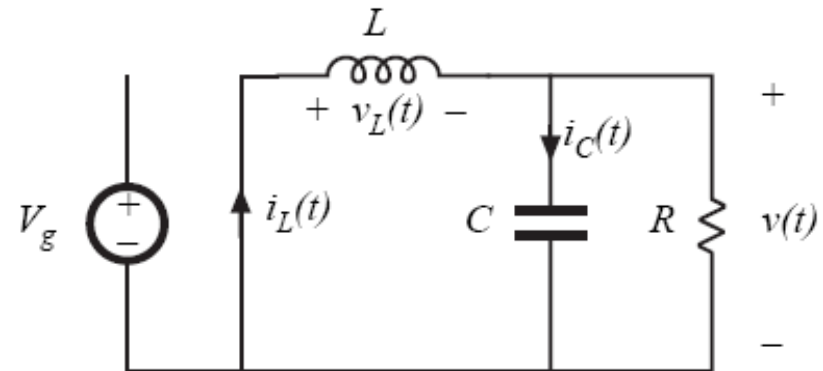
$$v_L(t) = -v(t)$$

Naj bo valovitost izhodne napetosti majhna proti DC vrednosti

$$v_L(t) \approx -V$$

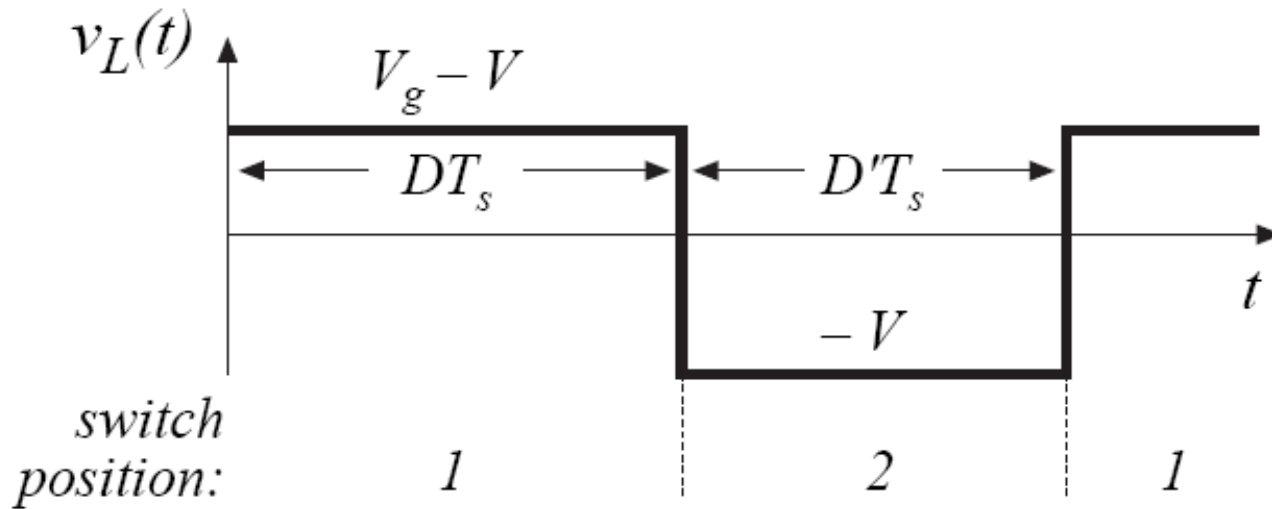
$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} \approx -\frac{V}{L}$$

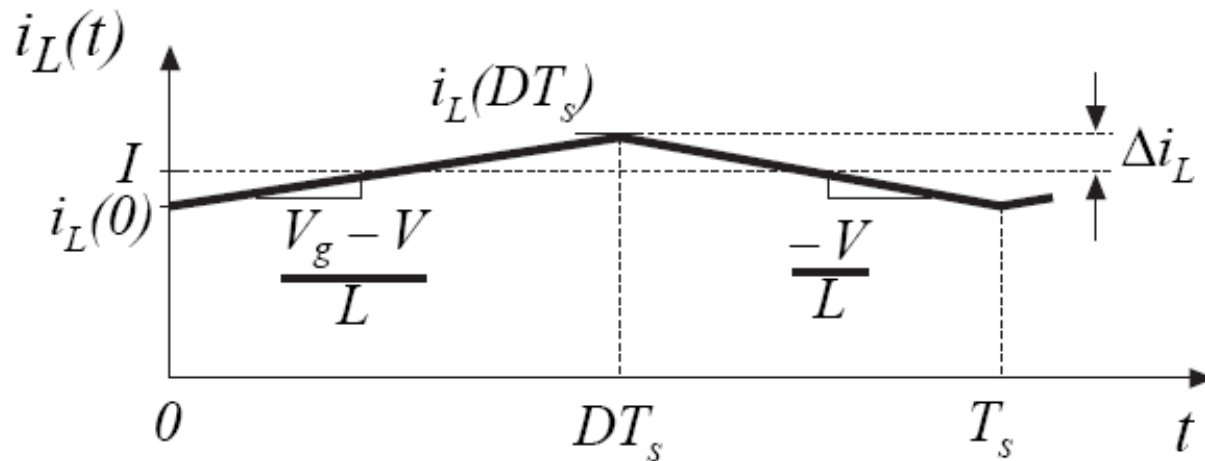


i_L se spreminja s konstantnim naklonom ($-1/L$)

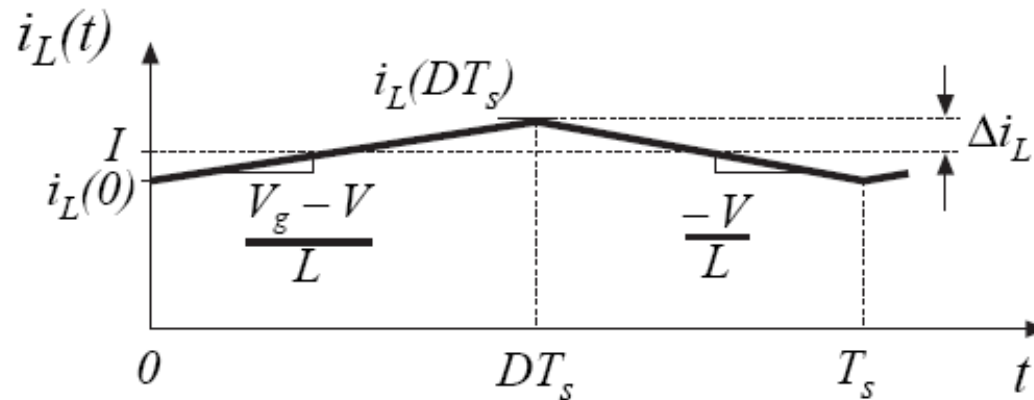
Buck – v_L – i_L



$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$



Buck – Δi_L – valovitost toka

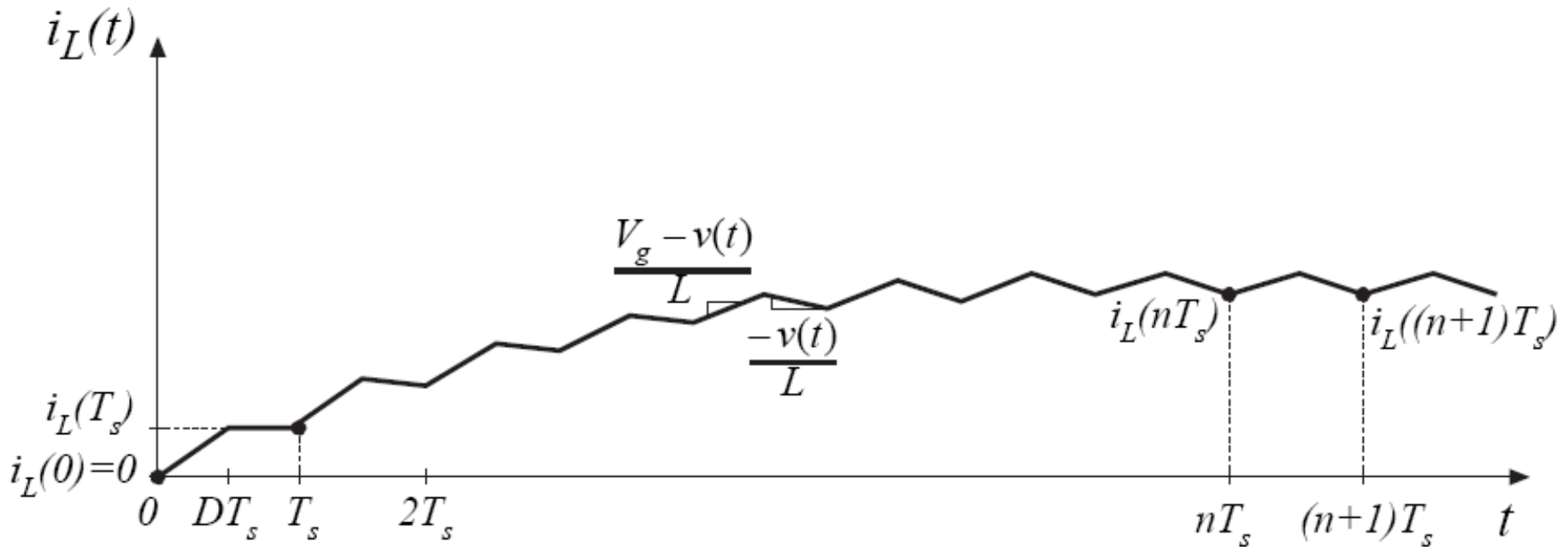


$$(2\Delta i_L) = \left(\frac{V_g - V}{L} \right) (DT_s)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_g - V}{2L} DT_s$$

$$L = \frac{V_g - V}{2\Delta i_L} DT_s$$

Buck – i_L – potek toka ob vklopu



Ko se tok ustali (ang. steady state) velja:

$$i_L((n + 1)T_s) = i_L(nT_s)$$

Buck – i_L – potek toka ob ustaljenem stanju

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

Integriramo preko ene periode

$$i_L(T_s) - i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

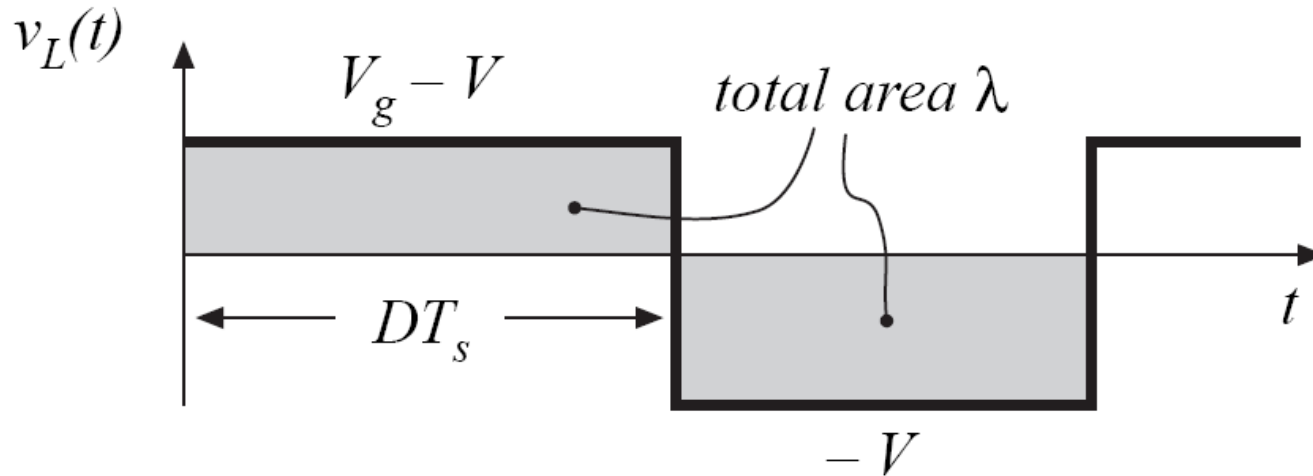
V ustaljenem stanju bo povprečna vrednost napetosti $L = 0$.

$$0 = \int_0^{T_s} v_L(t) dt$$

Površina krivulje (volt-sekunde) poteka napetosti = 0

$$0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt = \langle v_L \rangle$$

Buck – i_L – nap. prenosna karakteristika



$$\lambda = \int_0^{T_s} v_L(t) dt = (V_g - V)(DT_s) + (-V)(D'T_s)$$

$$\langle v_L \rangle = \frac{\lambda}{T_s} = D(V_g - V) + D'(-V)$$

$$0 = DV_g - (D + D')V = DV_g - V \quad \Rightarrow \quad V = DV_g$$

Uravnoteženje naboja na kondenzatorju v ustaljenem stanju

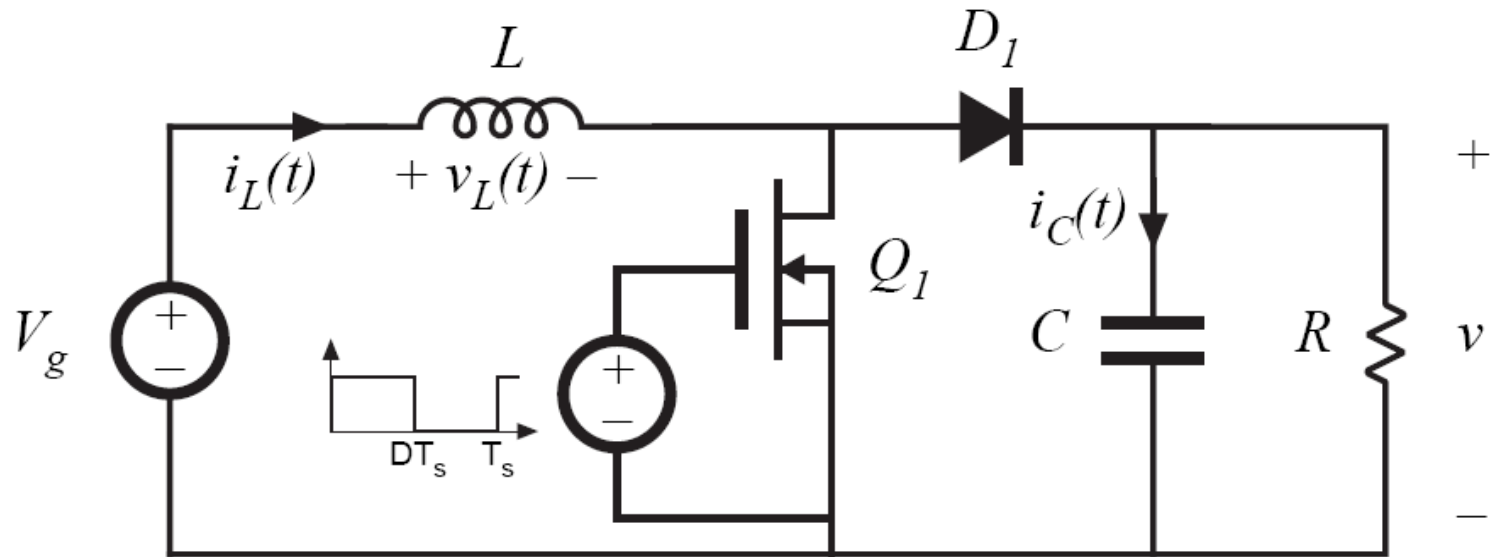
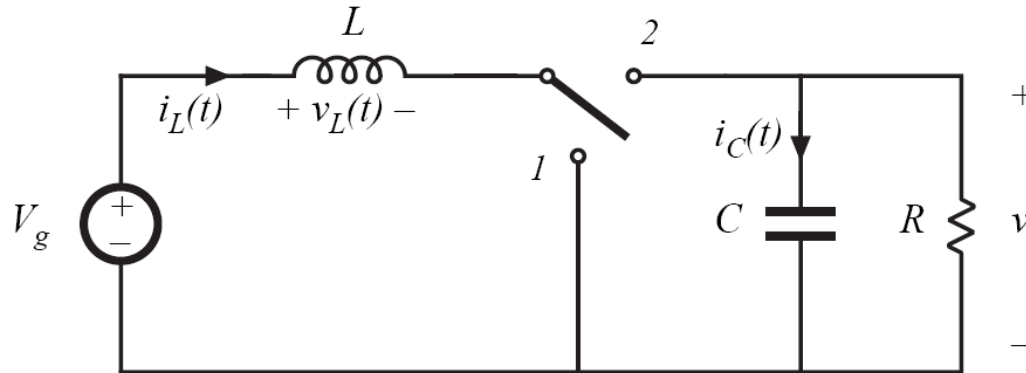
$$i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt}$$

$$v_c(T_s) - v_c(0) = \frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_c(t) dt$$

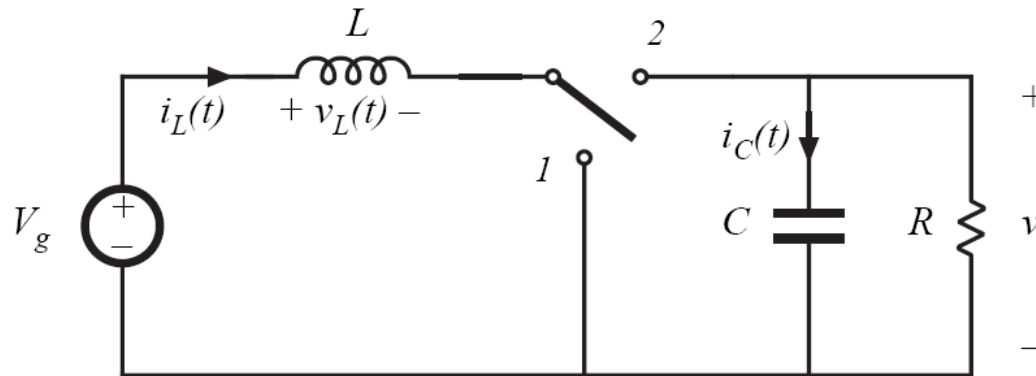
$$0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt = \langle i_c \rangle$$

Površina (naboj) pod tokom kondenzatorja je 0, ko pretvornik deluje v ustaljenem stanju. → Povprečni tok kondenzatorja preko periode je 0.

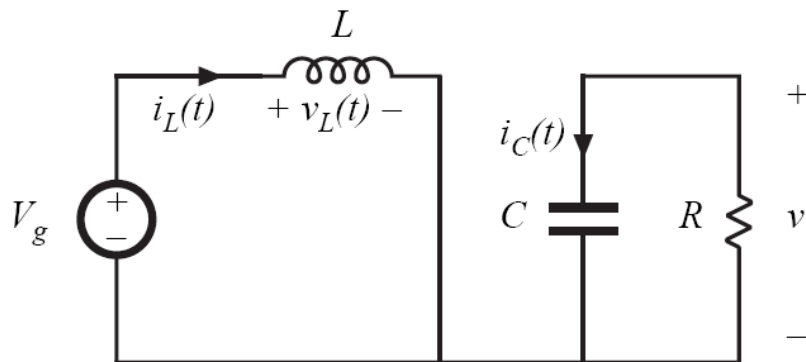
Boost



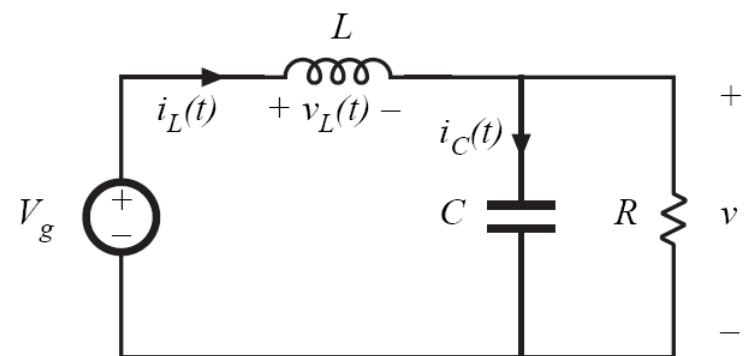
Analiza boost pretvornika



Stikalo v "1"



Stikalo v "2"



Boost – i_L – stikalo "1"

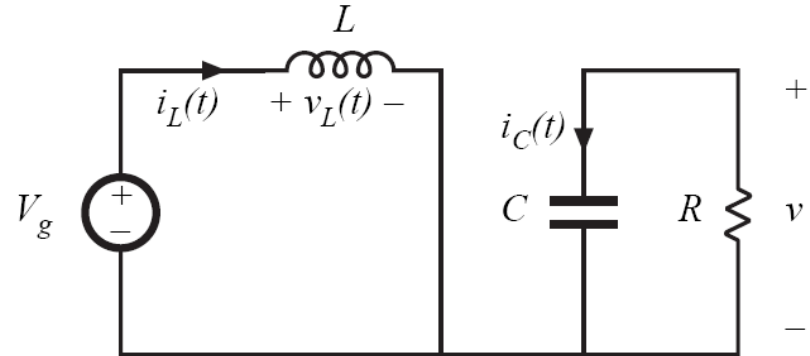
$$v_L = V_g$$

$$i_C = -v / R$$

Naj bo valovitost izhodne napetosti majhna proti DC vrednosti

$$v_L = V_g$$

$$i_C = -V / R$$

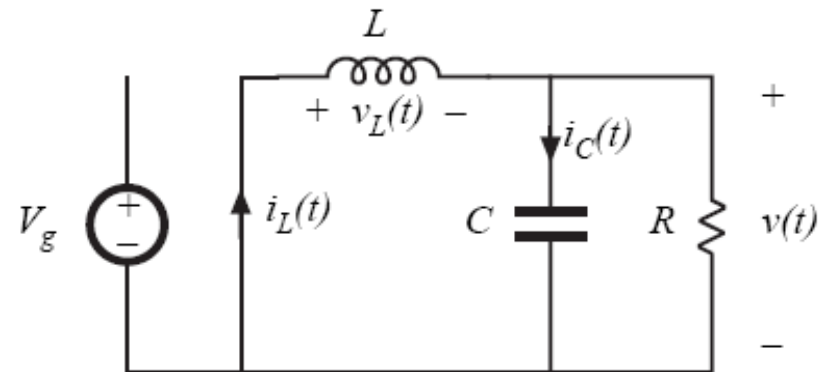


Boost – i_L – stikalo "2"

$$v_L = V_g - v$$

$$i_C = i_L - v / R$$

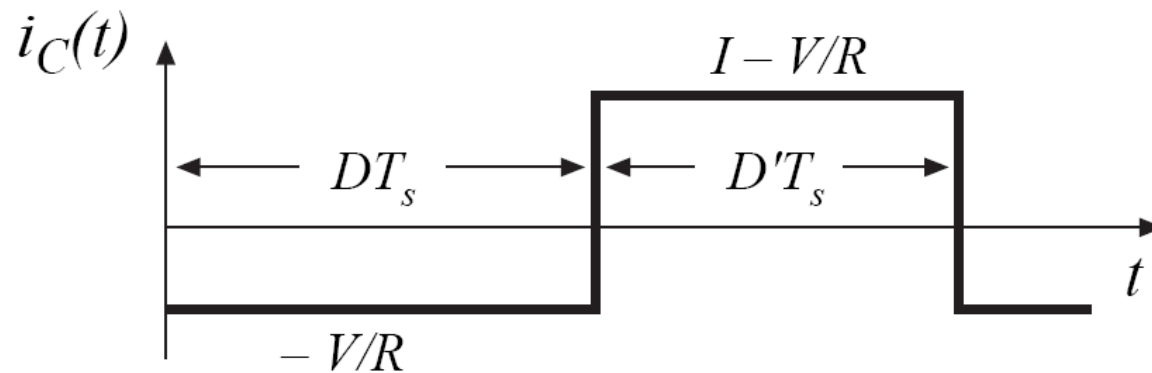
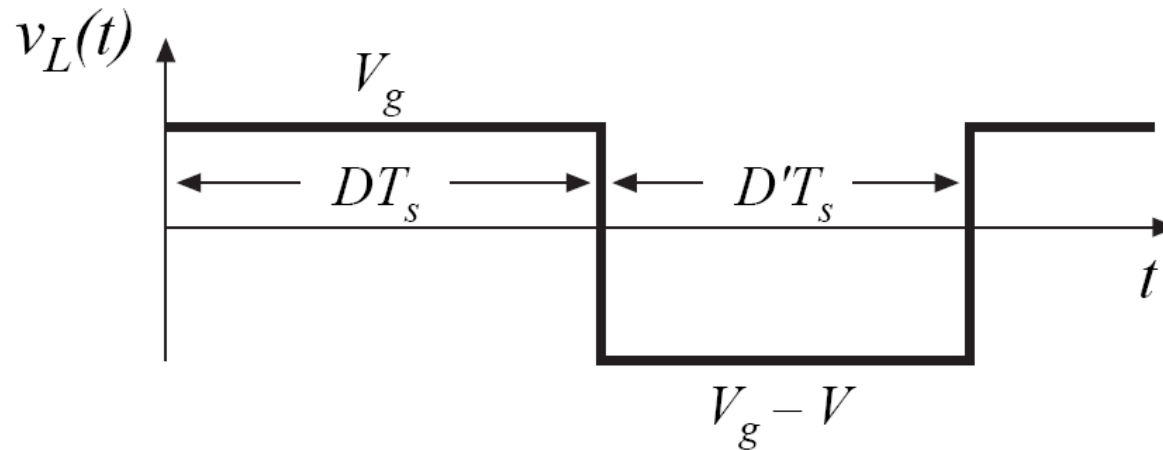
Naj bo valovitost izhodne napetosti majhna proti DC vrednosti



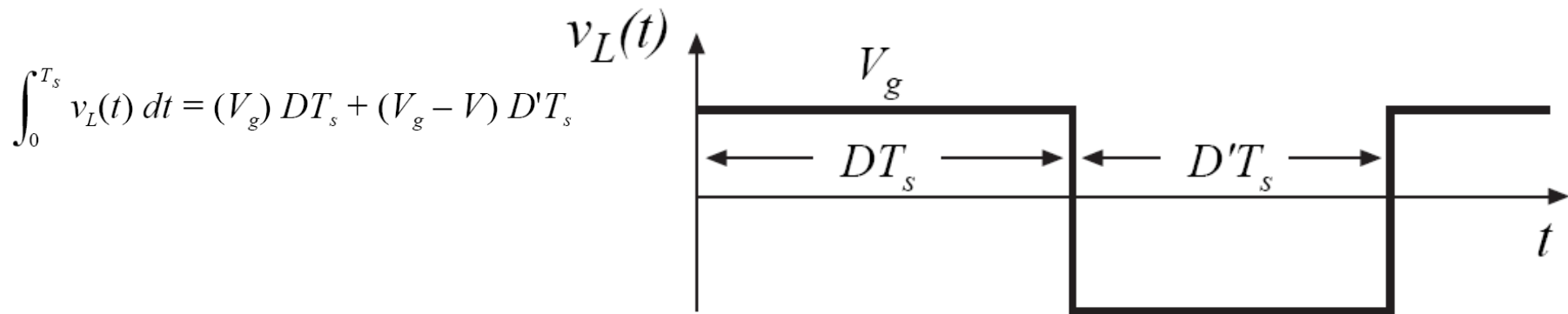
$$v_L = V_g - V$$

$$i_C = I - V / R$$

Boost – i_C – v_L



Prenosna karakteristika boost

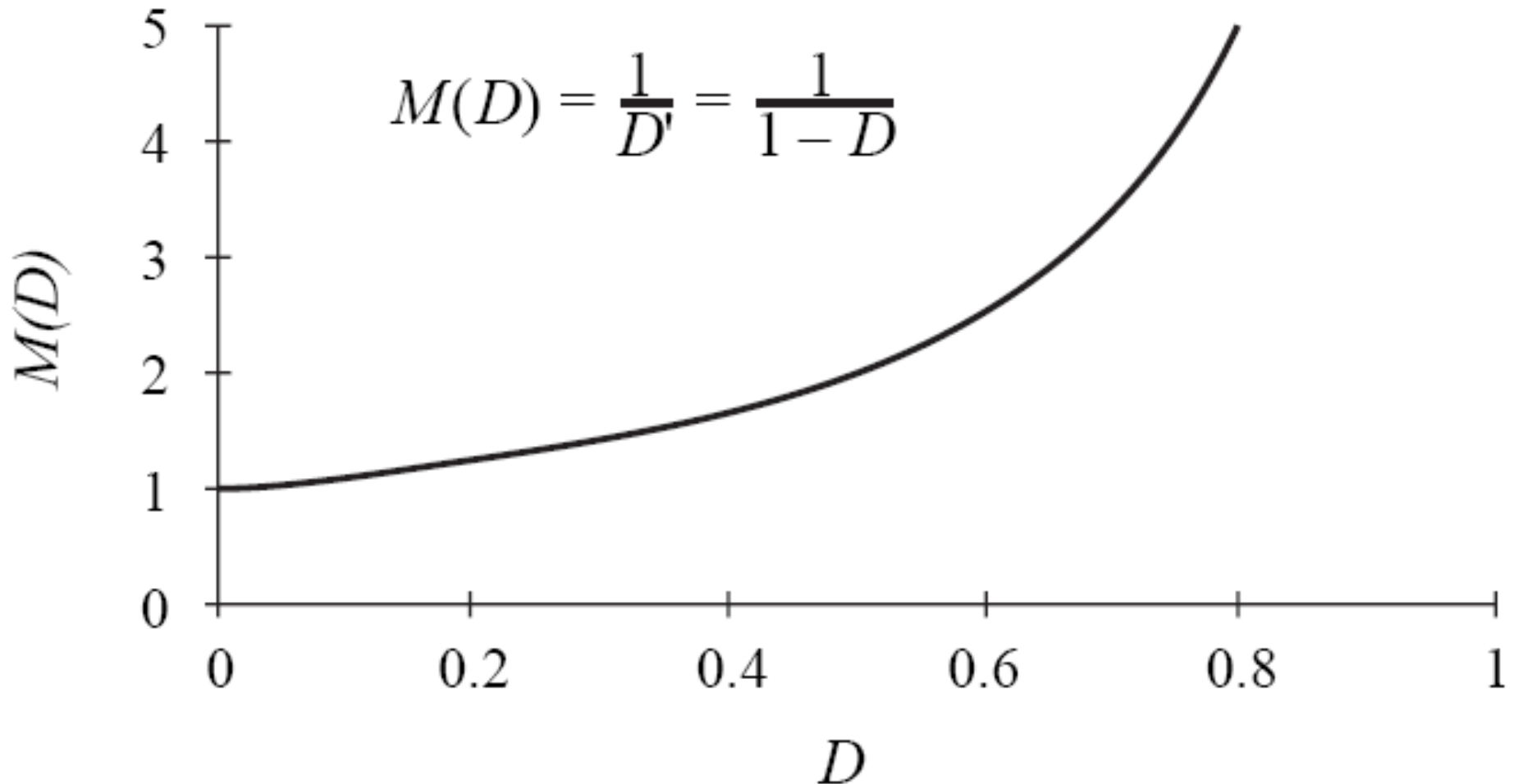


$$V_g (D + D') - V D' = 0$$

$$V = \frac{V_g}{D'}$$

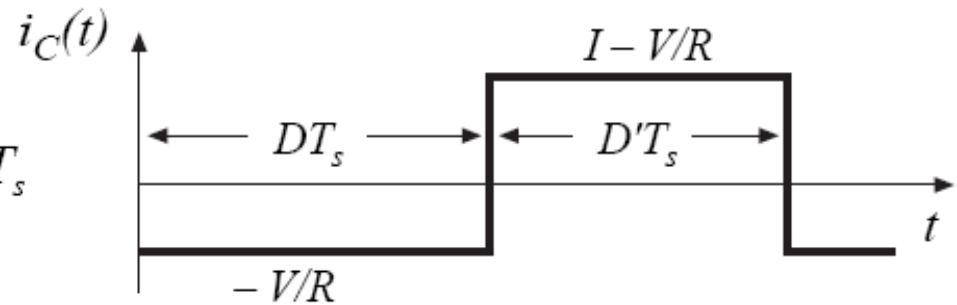
$$M(D) = \frac{V}{V_g} = \frac{1}{D'} = \frac{1}{1 - D}$$

Prenosna karakteristika - boost



Enosmerni tok tuljave – boost

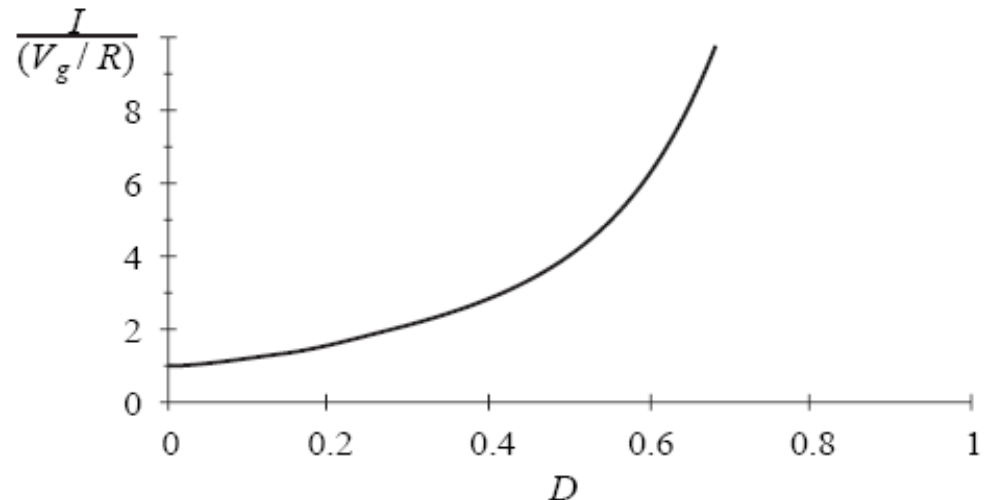
$$\int_0^{T_s} i_C(t) dt = \left(-\frac{V}{R}\right) DT_s + \left(I - \frac{V}{R}\right) D'T_s$$



$$-\frac{V}{R}(D + D') + I D' = 0$$

$$I = \frac{V}{D' R}$$

$$I = \frac{V_g}{D'^2 R}$$



Valovitost toka skozi tuljavo

Interval naraščanja toka

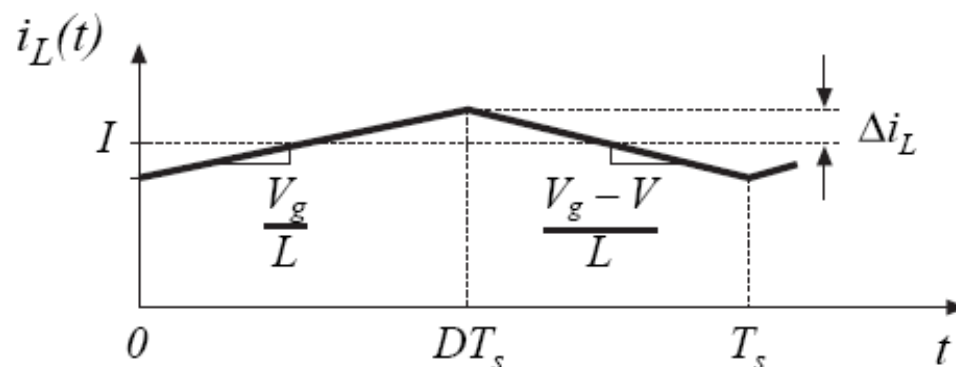
$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L} = \frac{V_g}{L}$$

Interval padanja toka

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L} = \frac{V_g - V}{L}$$

$$2\Delta i_L = \frac{V_g}{L} DT_s$$

$$\Delta i_L = \frac{V_g}{2L} DT_s$$



Tudi induktivnost L določa valovitost toka.

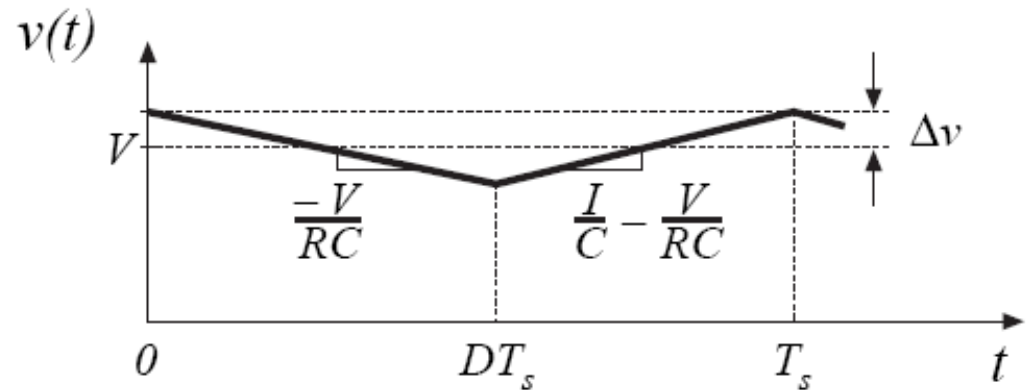
Valovitost napetosti na C

Interval padanja napetosti

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{i_c(t)}{C} = \frac{-V}{RC}$$

Interval naraščanja napetosti

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{i_c(t)}{C} = \frac{I}{C} - \frac{V}{RC}$$



V intervalu padanja na napetosti se napetost spremeni za Δv

$$-2\Delta v = \frac{-V}{RC} DT_s$$

$$\Delta v = \frac{V}{2RC} DT_s$$

Valovitost izhodne napetosti določamo z velikostjo C .

V praksi vpliva v R tudi R_{ESR} kondenzatorja → zato "low ESR" kondenzator!

Komponente, sestavi in senzorji

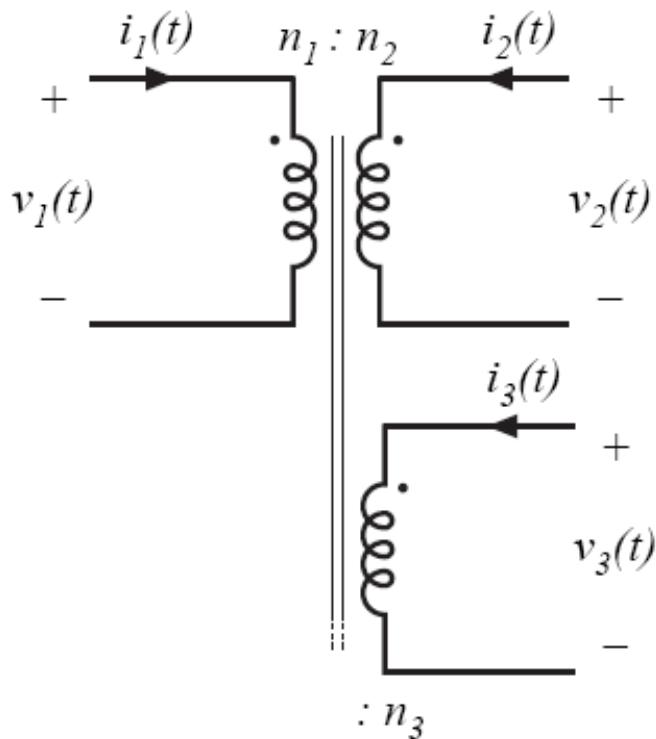
Izolirani SMPS

Izolirani SMPS

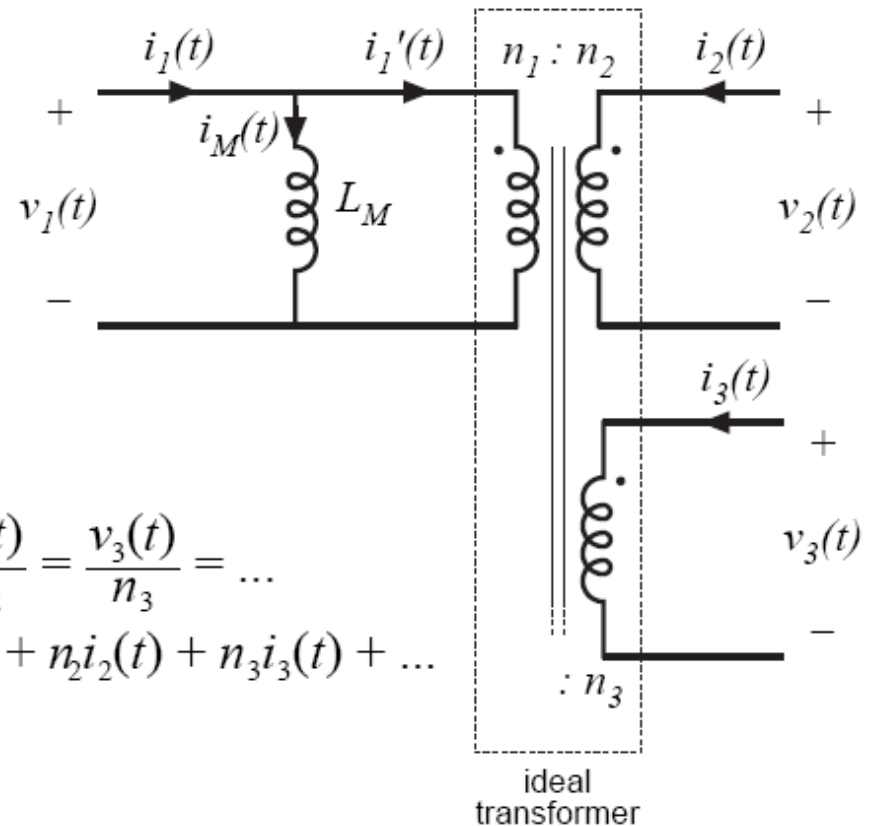
- Izolacija med vhodom in izhodom zaradi varnostnih zahtev
- Zmanjšanje velikosti transformatorja z uporabo visokofrekvenčnega jedra v pretvorniku
- Zmanjšanje velikih tokov in napetostnih padcev na stikalnih elementih ko realiziramo velika prestavna razmerja → kompenziramo s prestavo transformatorja
- Dobimo lahko več izhodnih napetosti z enim transformatorjem z več navitji in več sekundarnimi vezji.

Poenostavljen model transformatorja

Transformator z več izhodi



Ekvivalentno vezje

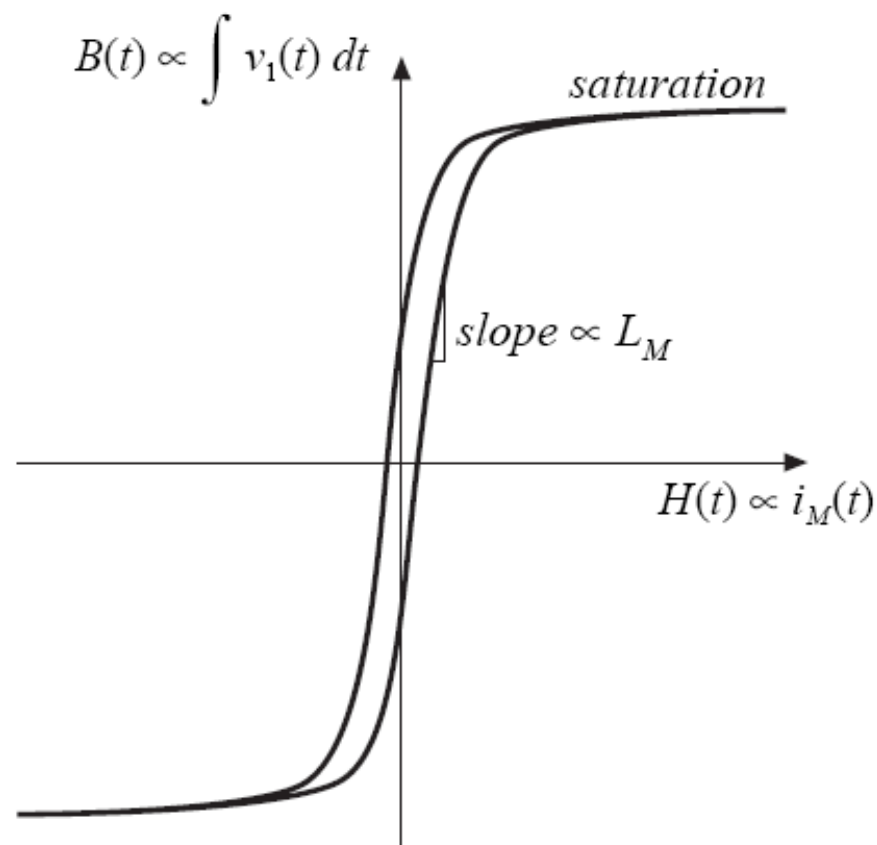


$$\frac{v_1(t)}{n_1} = \frac{v_2(t)}{n_2} = \frac{v_3(t)}{n_3} = \dots$$

$$0 = n_1 i_1'(t) + n_2 i_2(t) + n_3 i_3(t) + \dots$$

Induktivnost magnetenja – L_M

- L_M predstavlja magnetenje jedra transformatorja po magnetilni krivulji
- Preslikana na primarno stran vzporedno z navitjem
- Če so vsa sekundarna navitja izključena, se primarno navitje obnaša kot tuljava z induktivnostjo L_M
- DC razmere \rightarrow L_M predstavlja kratek stik – transformator za DC razmere ne deluje ($dB/dt=0$)
- Transformator preide v nasičenje, ko je magnetilni tok i_M prevelik



Uravnoveženje magnetilnega toka

Za induktivnost magnetenja L_M velja:

$$v_1(t) = L_M \frac{di_M(t)}{dt}$$

$$i_M(t) - i_M(0) = \frac{1}{L_M} \int_0^t v_1(\tau) d\tau$$

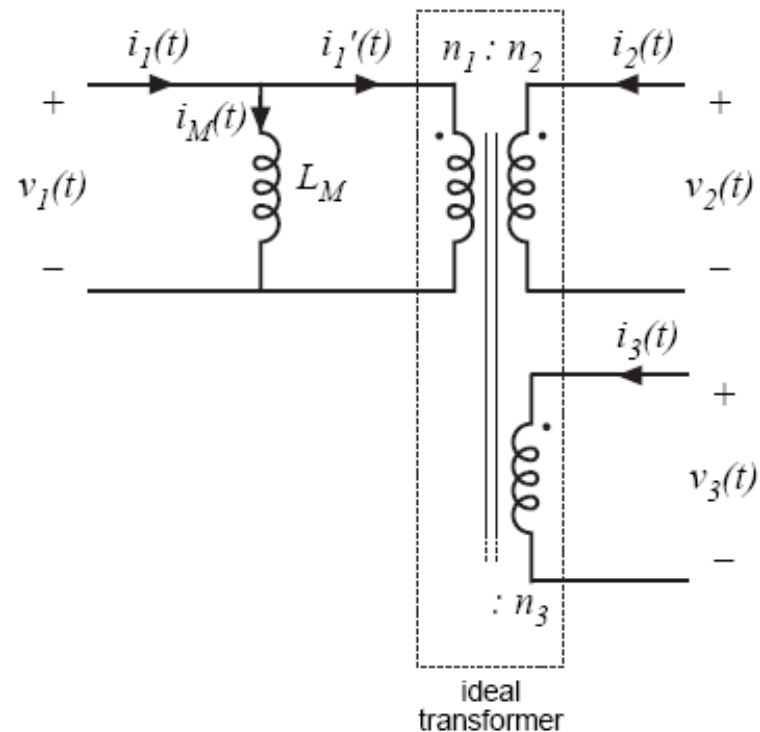
Magnetilni tok $i_m(t)$ dobimo z integracijo napetosti na navitju $v_1(t)$.

Magnetilni tok ni odvisen od toka v navitjih.

Uravnoveženje Vs: v ustaljenem stanju velja

$$i_M(T_s) = i_M(0)$$

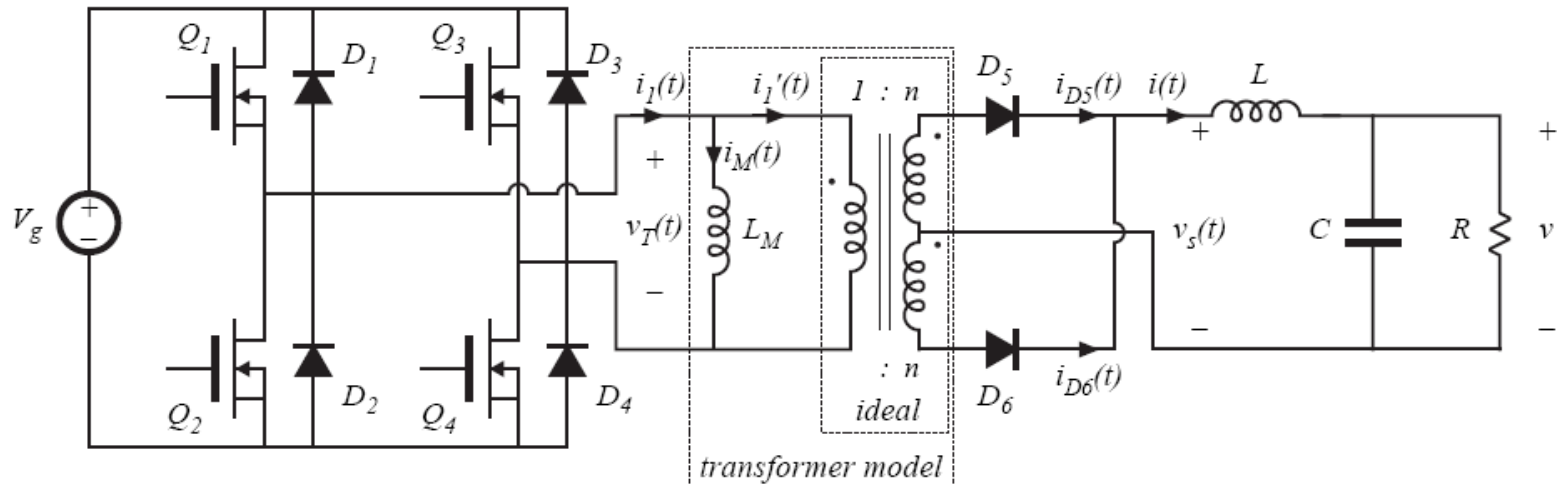
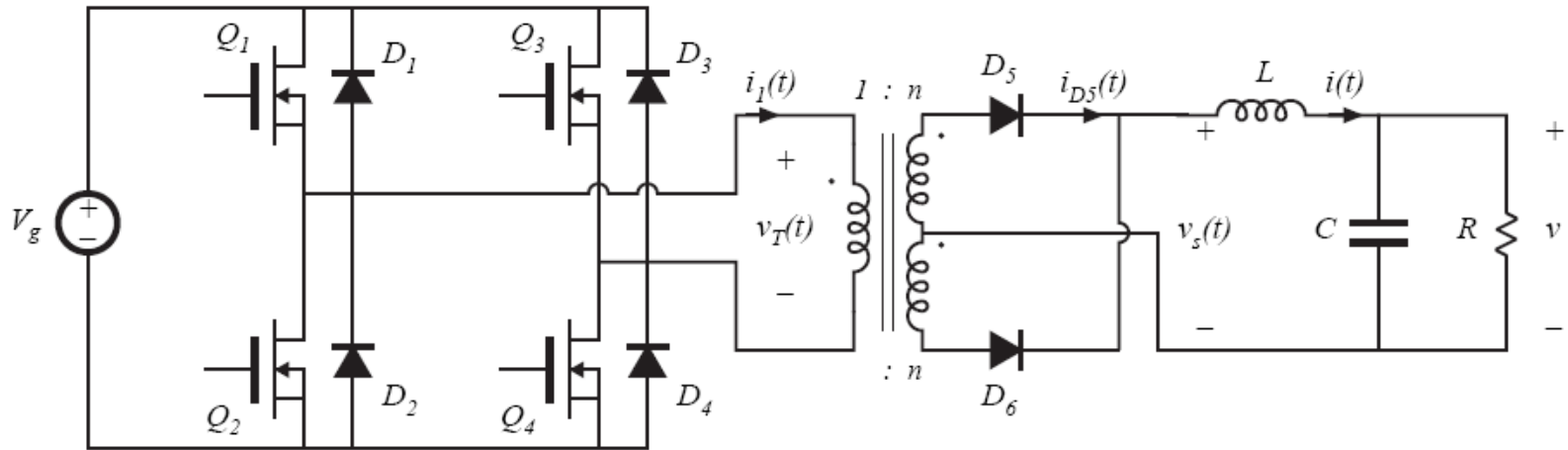
$$0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_1(t) dt$$



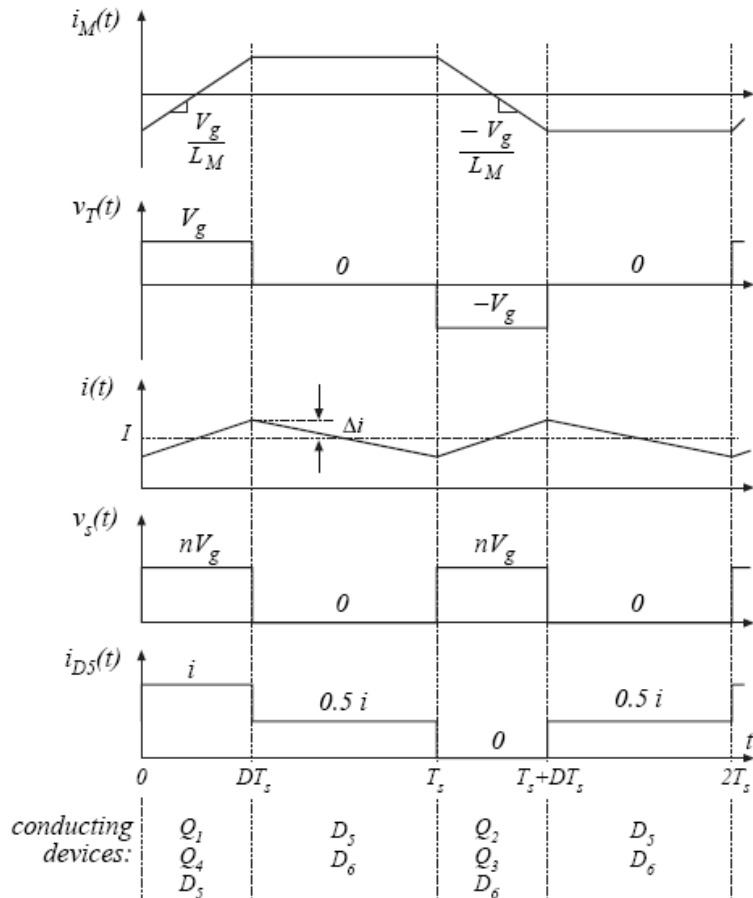
Uravnoveženje magnetilnega toka

- Uravnoveženje magnetilnega toka (ang. Transformer reset) zagotavlja, da se jedro do konca stikalne periode povrne v stanje ob začetku stikalne periode.
- Ta mehanizem poenostavi računanje SMPS, ampak zakomplicira krmilno vezje.

Izolirani full-bridge buck pretvornik



Izolirani full-bridge buck pretvornik



Prva stikalna perioda:

- Q_1, Q_4 prevajata za čas DT_s in magnetita jedro z $V_g DT_s$

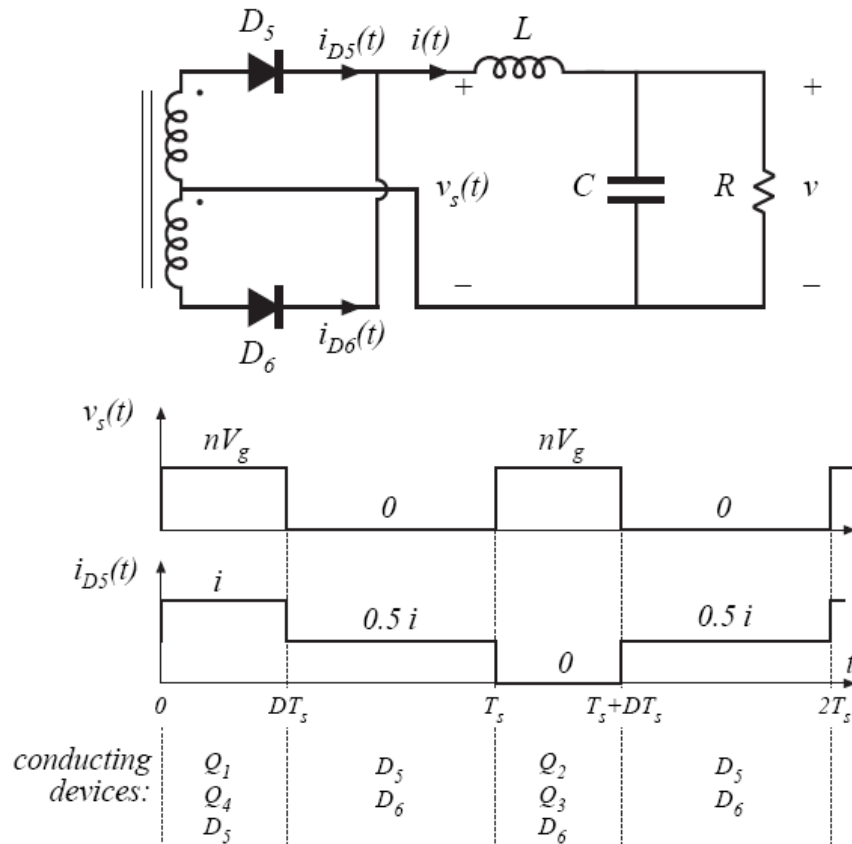
Druga stikalna perioda:

- Q_2, Q_3 prevajata za čas DT_s in magnetita jedro z $-V_g DT_s$
- Uravnoveženje magnetilnega toka je zagotovljeno preko **dveh stikalnih period.**

Izolirani full-bridge buck pretvornik

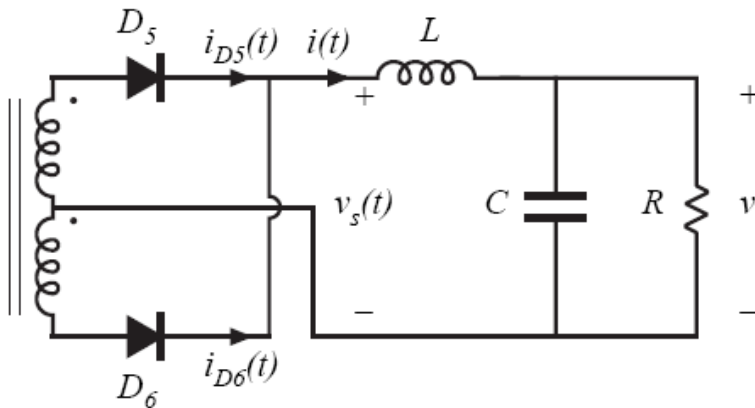
- Magnetilni tok i_m je med prvo stikalno periodo sorazmeren:
 $(Vg - (Q_1, Q_4 \text{ padca napetosti})) * (Q_1, Q_4 \text{ čas odprtja})$
- Magnetilni tok i_m je med naslednjo stikalno periodo sorazmeren:
- $(Vg - (Q_2, Q_3 \text{ padca napetosti})) * (Q_2, Q_3 \text{ čas odprtja})$
- Sorazmerji magnetilnega toka med prvo in drugo stikalno periodo nikdar nista enaki (povprečje nikdar ni enako 0)!
- Torej magnetilni tok primarnega navita počasi narašča in jedro čez čas spravi v nasičenje.
- Nasičenju se izognemo z zaporedno vezanim kondenzatorjem s primarjem

Izhodna stran



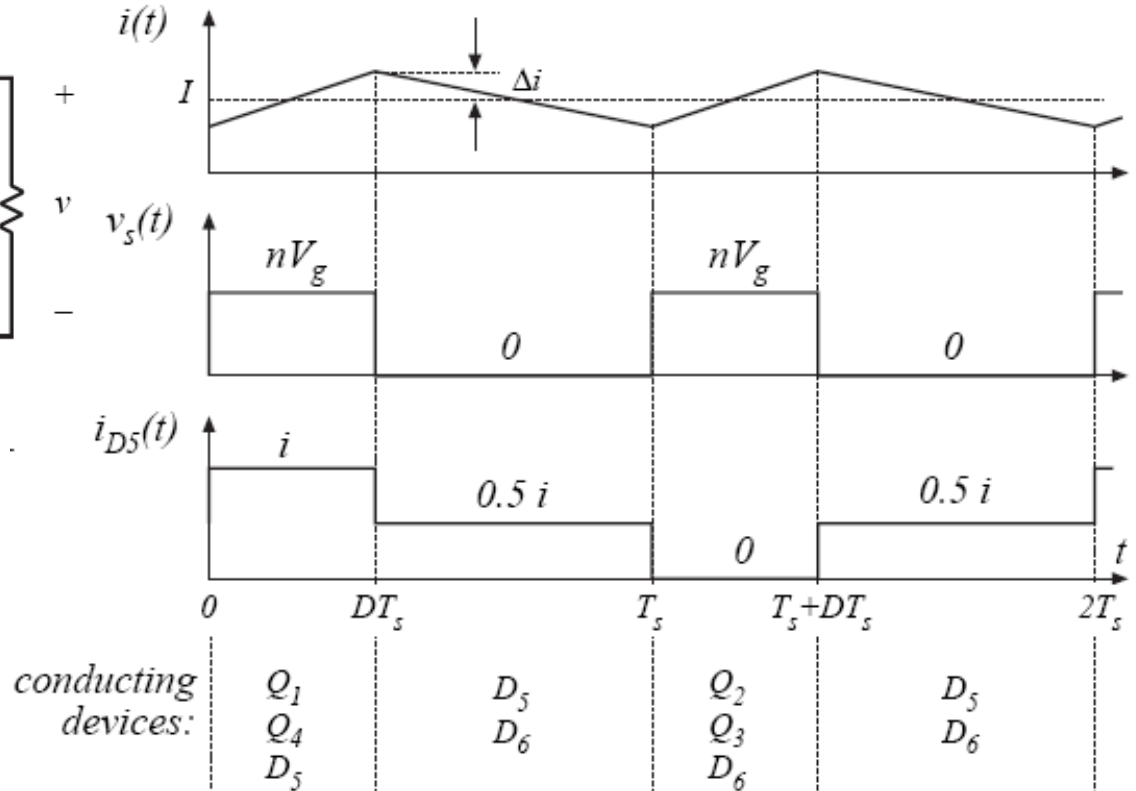
- V podintervalu ($DT_s \dots T_s$) prevajata D_5 in D_6
- Izhodna filtrska dušilka porazdeli tok enakomerno med obe diodi
- Zato je magnetni sklep sekundarja v povprečju enak 0
- S strani sekundarja zato ni magnetenja jedra

Izhodna stran

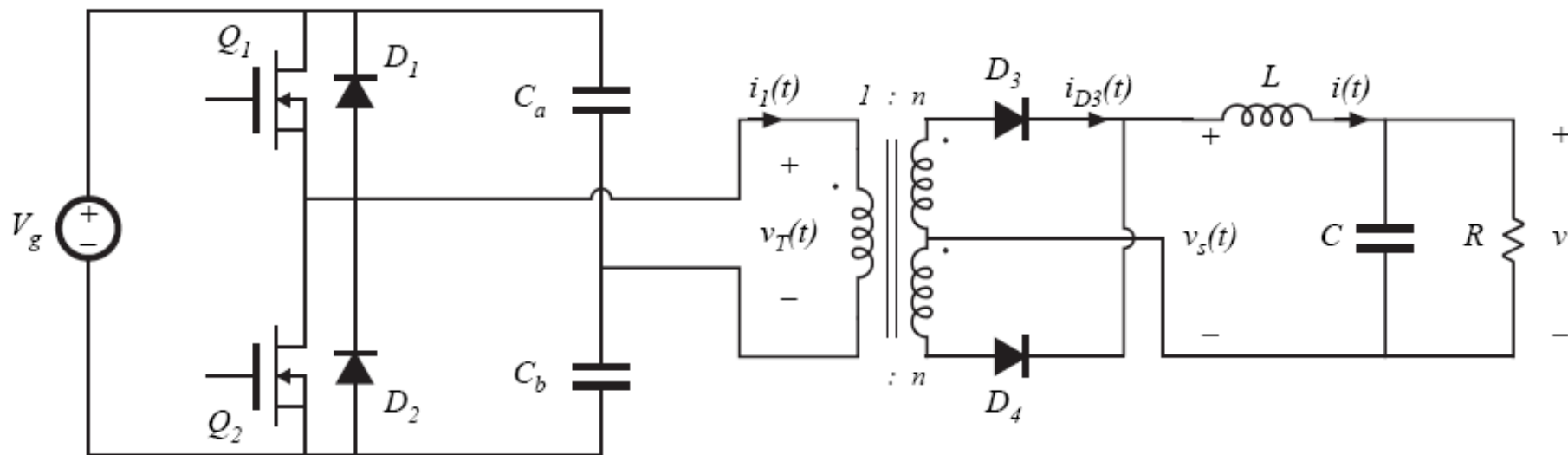


$$V = nDV_g$$

$$M(D) = nD$$

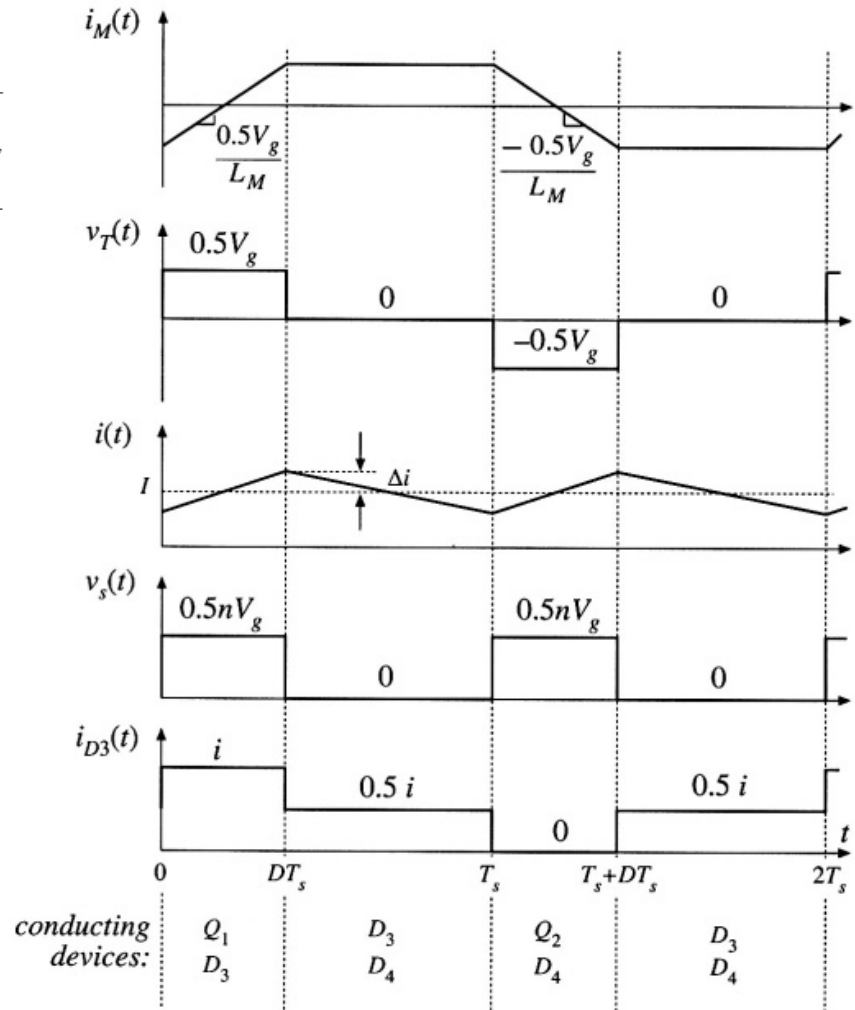
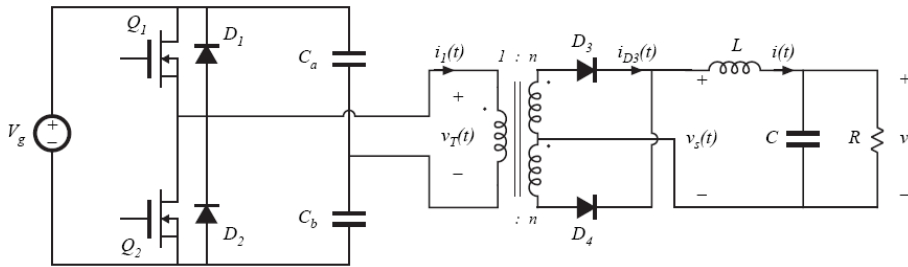


Izolirani half bridge buck pretvornik

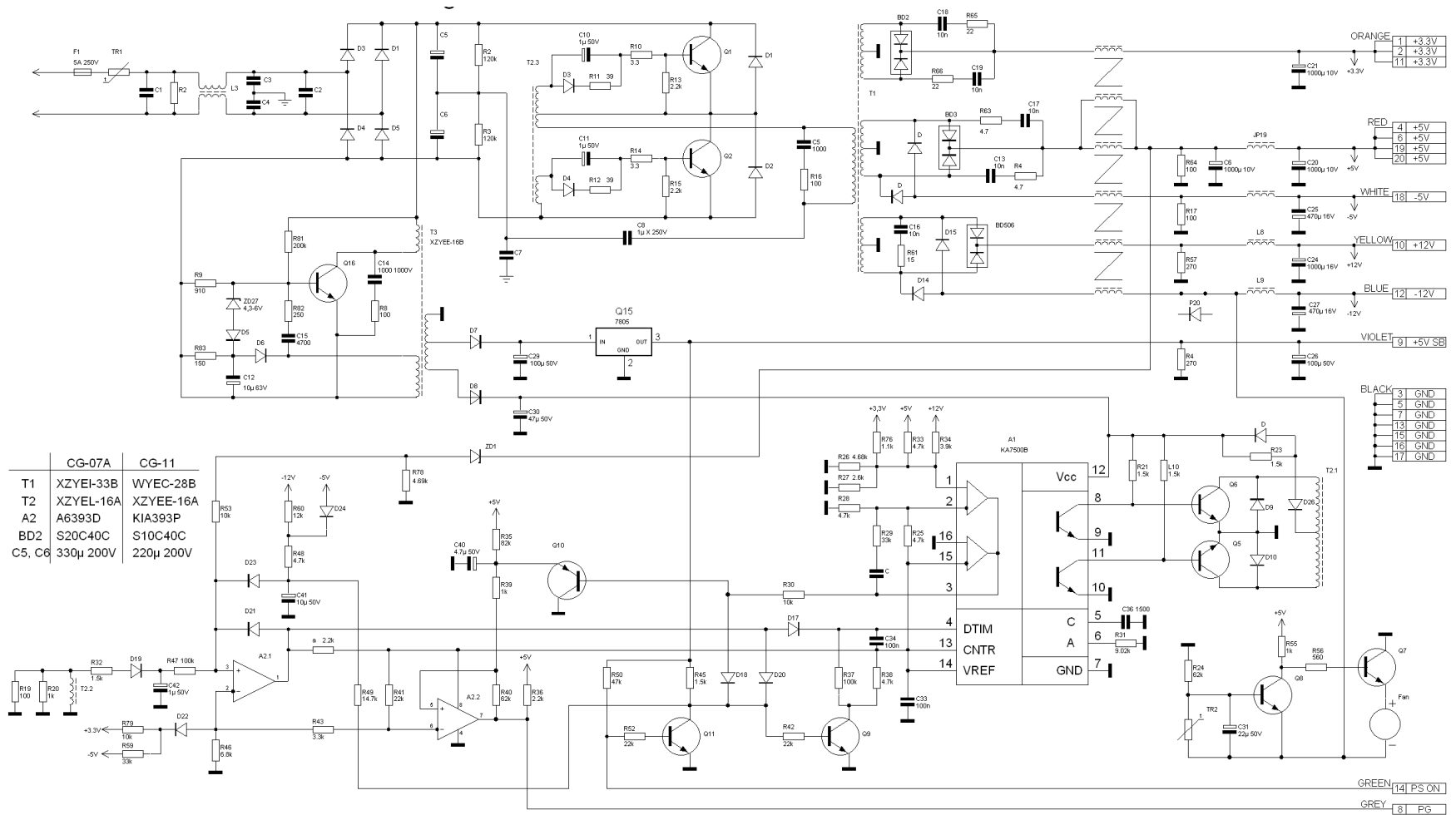


- Q_3, Q_4 zamenjamo s kapacitivnim delilnikom
- Napetost srednje točke kap. delilnika = $0.5V_g$
- Izhodna napetost $v_s(t)$ se razpolovi
- $M = 0.5 * n * D$

Izolirani half bridge buck pretvornik



Izolirani half bridge buck pretvornik



Komponente, sestavi in senzorji

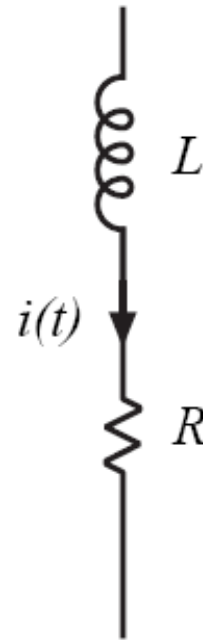
Načrtovanje CCM SMPS
filtrske tuljave

CCM SMPS filtrska dušilka

Cilj:

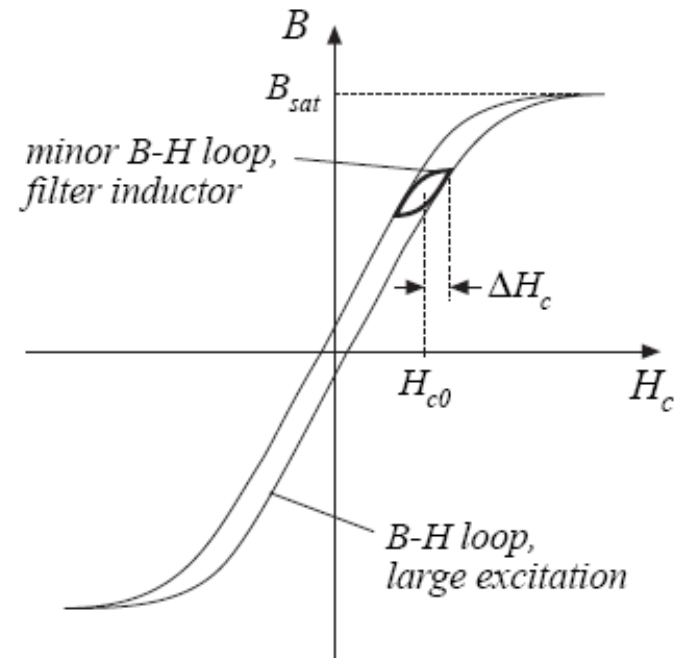
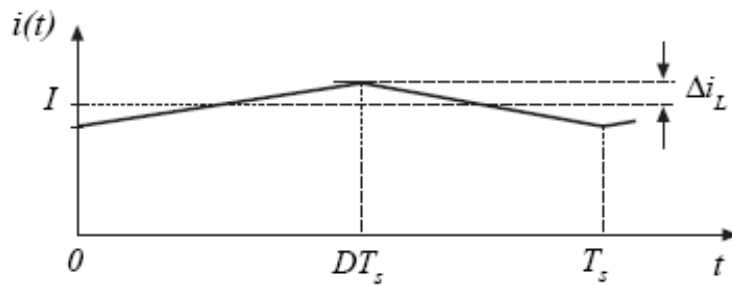
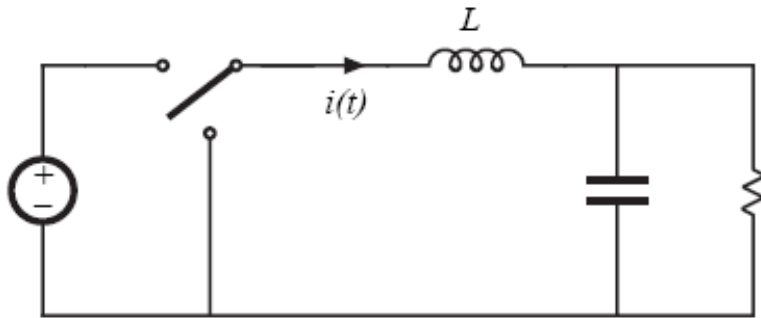
- Načrtovanje tuljave z induktivnostjo L ,
- preko katere teče največji tok I_{max} brez nasičenja jedra,
- ki ima upornost navitja R , oziroma
- ima (enakovredno) izgube v bakru:

$$P_{cu} = I_{rms}^2 R$$

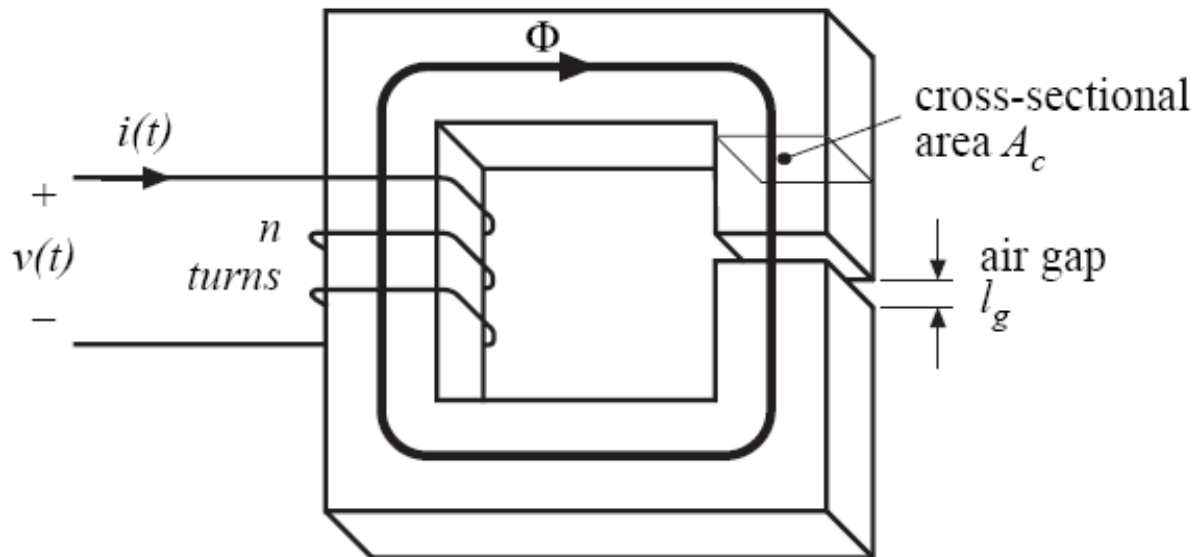


CCM SMPS filtrska dušilka

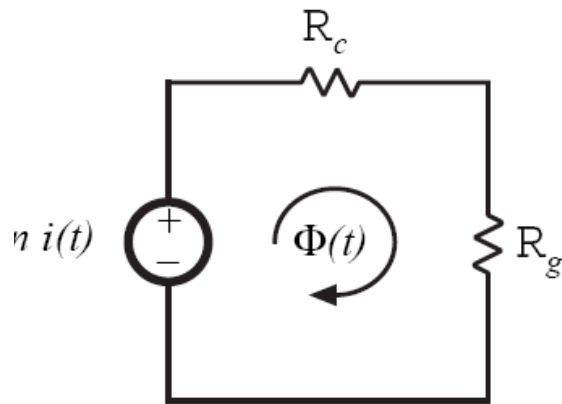
CCM buck example



CCM SMPS filtrska dušilka



$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c}$$
$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_c}$$



$$ni = \Phi (R_c + R_g)$$

$$ni \approx \Phi R_g$$

CCM SMPS filtrska dušilka

- Naj bo največja vrednost toka navitja I_{max}
- Jedro naj deluje pri največji vrednosti B_{max} .
- Vrednost B_{max} določimo tako, da je manjša od B_{SAT} nasičenja materiala
- Iz magnetnega ekvivalentnega vezja sledi:

$$ni = BA_c R_g$$

Če postavimo $I = I_{max}$ in $B = B_{max}$:

$$nI_{max} = B_{max} A_c R_g = B_{max} \frac{l_g}{\mu_0}$$

Dobimo **prvo načrtovalsko omejitev**:

Razmerje ovojev n in širina reže l_g sta neznanki

CCM SMPS filtrska dušilka

- Določimo induktivnost L :

$$L = \frac{n^2}{R_g} = \frac{\mu_0 A_c n^2}{l_g}$$

Dobimo **drugo načrtovalsko omejitev**:

Število ovojev n , površina jedra A_c in širina reže l_g so neznanke

CCM SMPS filtrska dušilka

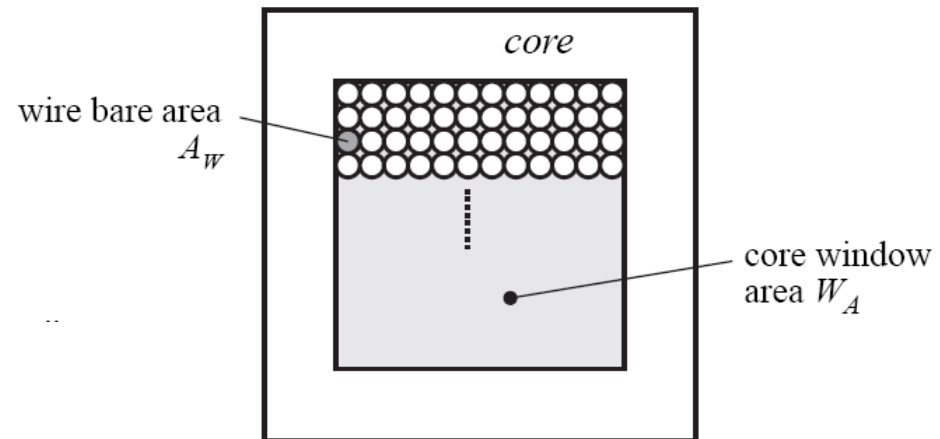
- Žico bomo morali naviti na okno tuljave

Površina bakra v oknu: nA_W

Površina za navijanje: $K_u W_A$

Če se žica da naviti, velja:

$$K_u W_A \geq nA_W$$



Dobimo **tretjo načrtovalsko omejitev**:

Število ovojev n , površina jedra A_c in širina reže l_g so neznanke

CCM SMPS filtrska dušilka

- Faktor polnjenja okna K_u
- K_u je del okna, zapolnjen z bakrom. $K_u < 1$ ker:
 - Okrogla žica se ne navija brez rež:
0.7 do 0.55 odvisno od vrste navijanja.
 - Izolacija zmanjša K_u za faktor 0.95 do 0.65, odvisno od tipa žice in vrste izolacije
 - Tuljavnik uporablja nekaj okna
 - Dodatna izolacija med več navitji
- Orientacijske vrednosti K_u :
 - 0.5 za enostavno nizkonapetostno tuljavo
 - 0.25 do 0.3 za OFF-line transformator
 - 0.05 to 0.2 za visokonapetostni transformator (reda kV)
 - 0.65 za nizkonapetostno folijsko tuljavo

CCM SMPS filtrska dušilka

- Upornost navitja:

$$R = \rho \frac{l_b}{A_w}$$

- ρ je spec. upornost materiala, l_b dolžina žice, A_w presek žice
 $\rho_{Cu}(20^\circ C) = 1.724 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$.
- Dolžina žice, ki sestavlja navitje z n ovoji je (MLT je srednja dolžina ovoja, ki je podatek tuljavnika):

$$l_b = n (MLT)$$

- Vstavimo:

$$R = \rho \frac{n (MLT)}{A_w}$$

CCM SMPS filtrska dušilka

$$nI_{max} = B_{max} \frac{l_g}{\mu_0}$$
$$L = \frac{\mu_0 A_c n^2}{l_g}$$
$$K_u W_A \geq n A_W$$
$$R = \rho \frac{n (MLT)}{A_W}$$

Omejitve vsebujejo

- $A_c, W_A, MLT \rightarrow$ odvisne od geometrije izbranega jedra,
- $I_{max}, B_{max}, \mu_0, L, K_u, R, \rho \rightarrow$ podane v specifikacijah
- n, l_g in $A_W \rightarrow$ neznanke.

Če iz zgornjih enačb izrazimo n, l_g in A_W dobimo neenačbo:

$$\frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u}$$

CCM SMPS filtrska dušilka

- Desna stran: Znane vrednosti (specifikacija/katalog)
- Leva stran: Funkcija geometrije jedra
- Izberemo najmanjše jedro, ki izpolni neenačbo:

$$\frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u}$$

- Geometrijska konstanta jedra (ang. core geometrical constant) K_g je definirana kot:

$$K_g = \frac{A_c^2 W_A}{(MLT)}$$

CCM SMPS filtrska dušilka

K_g je mera kvalitete, ki opisuje efektivno električno velikost magnetnih jeder za uporabo v aplikacijah, kjer so določene:

- Izgube v bakru (P_{Cu})
- B_{max}

Vpliv izhodišč (P_{Cu} , B_{max}) na velikost jedra:

- Manjše jedro lahko uporabimo ob povečanju
 - $B_{max} \rightarrow$ uporabimo material z velikim B_{sat}
 - $R \rightarrow$ povečamo izgube v bakru
- Večji K_g dobimo, če povečamo:
 - $A_c \rightarrow$ večje jedro
 - $W_A \rightarrow$ večje okno za baker

$$K_g = \frac{A_c^2 W_A}{(MLT)}$$

CCM SMPS filtrska dušilka

Nekatere veličine so določene vnaprej iz načrtovalskih pogojev. V nadaljevanju so uporabljene spodnje enote, če ni drugače navedeno:

- Upornost žice ρ (Ω -cm)
- Največji tok navitja I_{max} (A)
- Induktivnost L (H)
- Upornost navitja R (Ω)
- Faktor polnjenja okna K_u
- Največja gostota magnetnega pretoka jedra B_{max} (T)
- Presek jedra A_c (cm²)
- Površina okna jedra W_A (cm²)
- Srednja dolžina ovoja tuljavnika MLT (cm)

$$K_g \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u} 10^8 \quad (\text{cm}^5)$$

Korak 1: Izbira jedra

- Izberemo dovolj veliko jedro in tuljavnik, da zadostimo neenačbi:

$$K_g \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 RK_u} 10^8 \quad (\text{cm}^5)$$

- S tem smo izbrali vrednost preseka jedra (A_c), površine okna (W_A) in srednje dolžine ovoja tuljavnika (MLT)

Korak 2: Določitev reže

$$l_g = \frac{\mu_0 L I_{max}^2}{B_{max}^2 A_c} 10^4 \quad (\text{m})$$

A_c [cm²]

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m.

l_g [m]

Določitev reže ob zanemaritvi širjenja pretoka izven reže.

Korak 3: Izračun induktivnosti in ovojev

Faktor induktivnosti:

A_c cm^2 ,
 L Henries,
 B_{max} Tesla.

$$A_L = \frac{10B_{max}^2 A_c^2}{LI_{max}^2} \quad (\text{mH}/1000 \text{ turns})$$

$$L = A_L n^2 10^{-9} \quad (\text{Henries})$$

$$n = \frac{LI_{max}}{B_{max} A_c} 10^4$$

Korak 4: Velikost žice in upornost

Izberemo žico s presekom A_w , ki je manjša (enaka) od dane vrednosti

$$A_w \leq \frac{K_u W_A}{n} \quad (\text{cm}^2)$$

Preverimo dobljeno upornost navitja:

$$R = \frac{\rho n (MLT)}{A_w} \quad (\Omega)$$

Komponente, sestavi in senzorji

Načrtovanje elementov
z več navitji

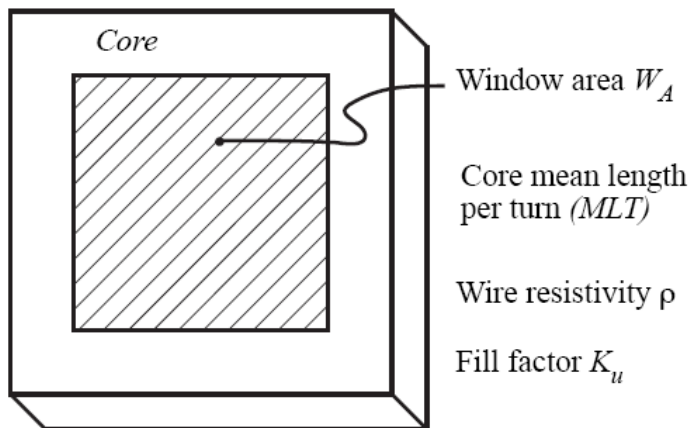
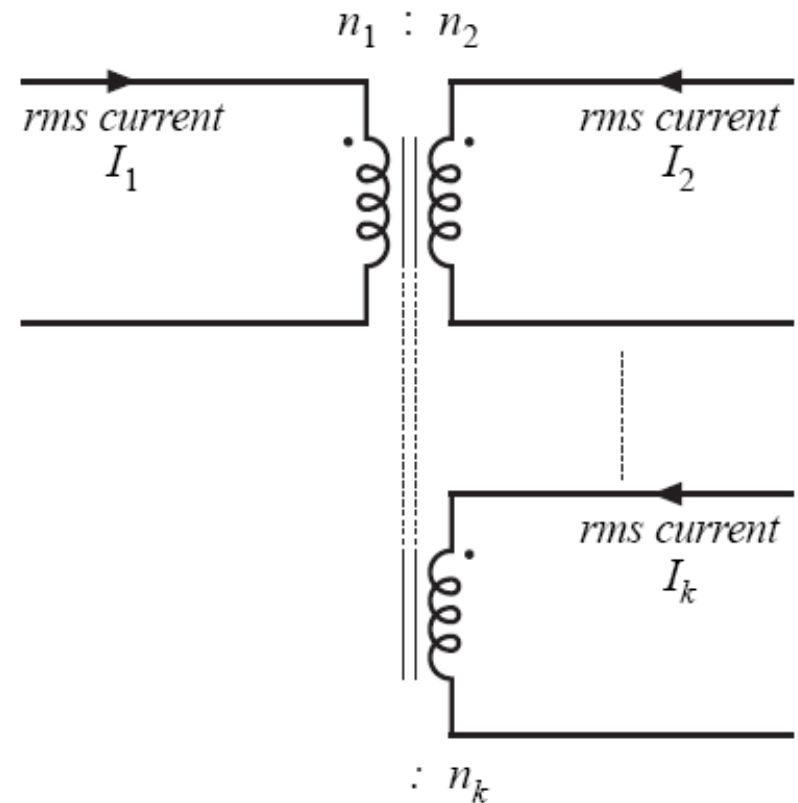
Načrtovanje elementov z več navitji

- Metodo načrtovanja z geometrijsko konstanto K_g lahko uporabimo tudi na transformatorjih in sklopljenih induktivnostih
- Metoda je uporabna pod pogojem:
 - Prevladujoče so izgube v bakru (izgube v jedru so zanemarljive) in/ali
 - Ko je B_{\max} (največja gostota magnetnega pretoka) definirana vnaprej in ni parameter optimizacije
- Metodo moramo posplošiti na več navitij – določiti moramo del okna, ki ga zaseda dano navitje.

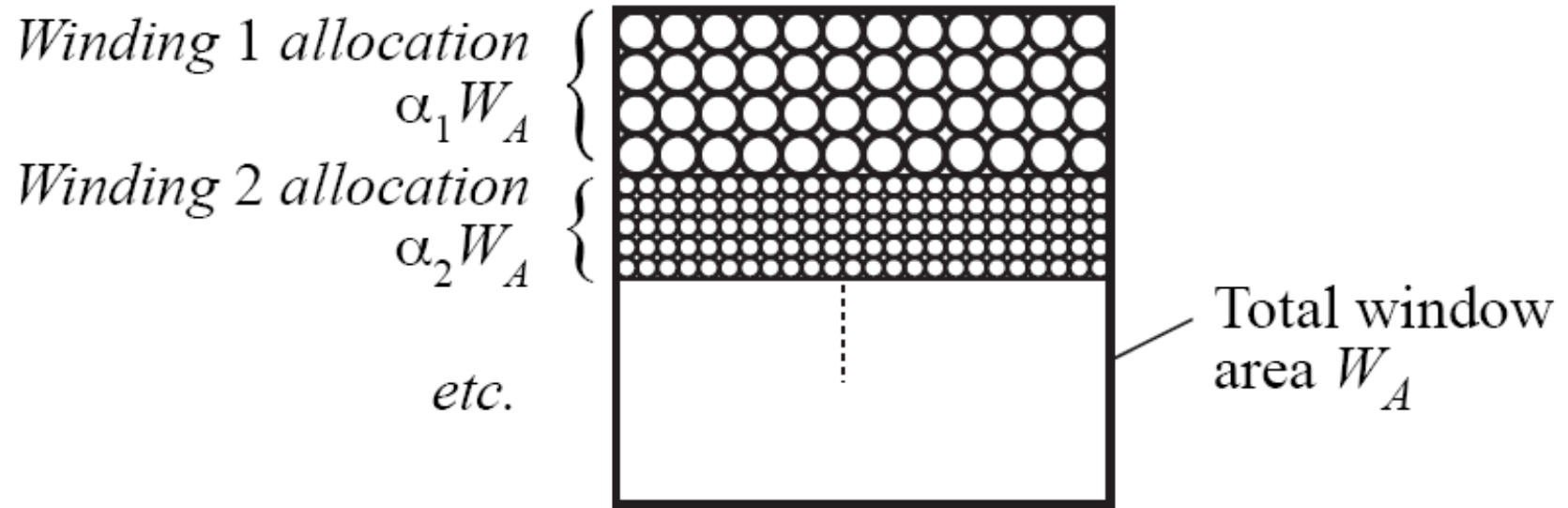
Določanje dela okna, ki ga zaseda navitje

Imamo transformator s k navitji z
znanimi RMS tokovi in razmerji
ovojev

$$\frac{v_1(t)}{n_1} = \frac{v_2(t)}{n_2} = \dots = \frac{v_k(t)}{n_k}$$



Določanje dela okna, ki ga zaseda navitje



$$0 < \alpha_j < 1$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k = 1$$

Izgube v bakru v j-tem navitju

Izgube v bakru (brez efekta bližine)

$$P_{cu,j} = I_j^2 R_j$$

Upornost j-tega navitja:

$$R_j = \rho \frac{\ell_j}{A_{W,j}} \left\{ \begin{array}{l} \ell_j = n_j (MLT) \quad \text{dolžina žice j-tega navitja} \\ A_{W,j} = \frac{W_A K_u \alpha_j}{n_j} \quad \text{površina j-tega navitja v oknu} \end{array} \right.$$

$$R_j = \rho \frac{n_j^2 (MLT)}{W_A K_u \alpha_j}$$

$$P_{cu,j} = \frac{n_j^2 i_j^2 \rho (MLT)}{W_A K_u \alpha_j}$$

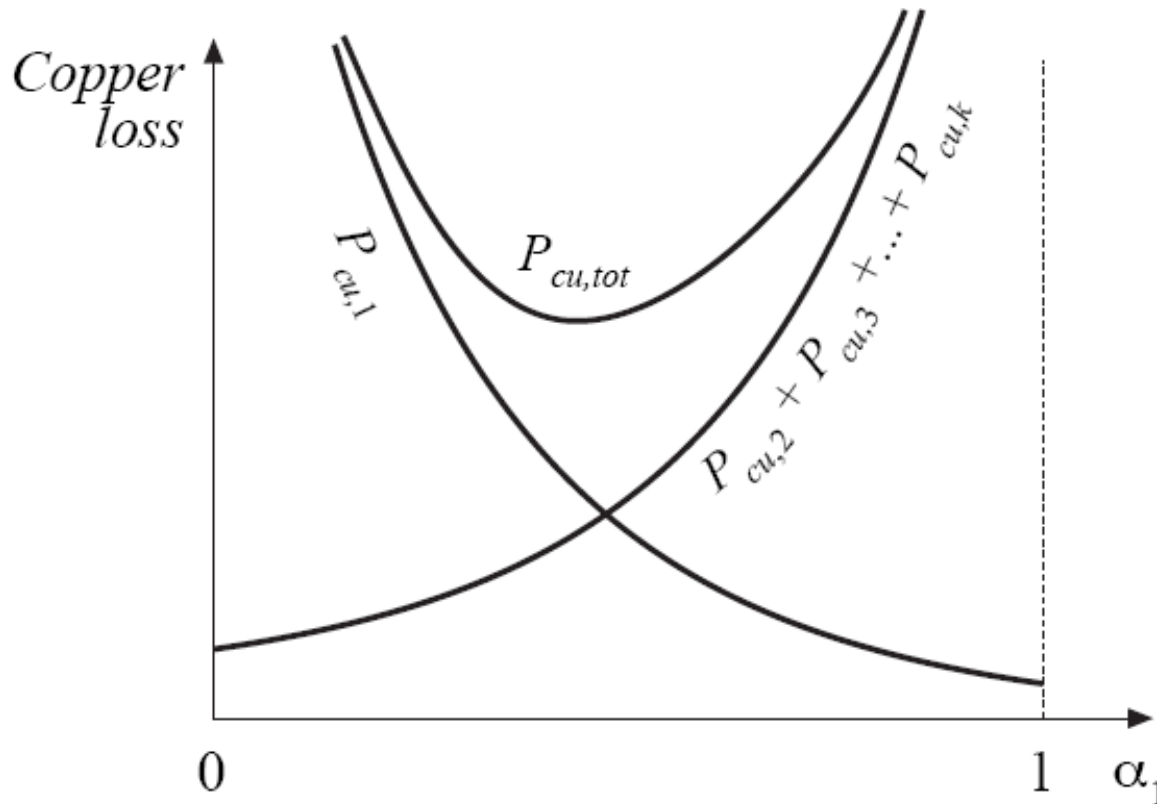
Izgube v bakru transformatorja

Če seštejemo prispevke izgub vseh navitij:

$$P_{cu,tot} = P_{cu,1} + P_{cu,2} + \dots + P_{cu,k} = \frac{\rho (MLT)}{W_A K_u} \sum_{j=1}^k \left(\frac{n_j^2 I_j^2}{\alpha_j} \right)$$

Določiti moramo % zasedanja okna za posamezno navitje $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$, da bodo celotne izgube v bakru minimalne!

Odvisnost $P_{cu}(\alpha_j)$



$$P_{cu,j} = \frac{n_j^2 i_j^2 \rho (MLT)}{W_A K_u \alpha_j}$$

Če je $\alpha_1 = 0$: žica prvega navitja ne zaseda okna $\rightarrow P_{cu1} \rightarrow \infty$

Če je $\alpha_1 = 1$: Žica prvega navitja zaseda vse okno. Ostalih navitij ni, torej gredo prispevki teh navitij $P_{cu2,3,4..k} \rightarrow \infty$

Iz skrajnosti ugotovimo, da obstaja optimalni α_1 pri katerem bodo celotne izgube v bakru minimalne

Določanje deleža zasedenosti okna pri več navitjih

Iščemo minimum funkcije (vezan ekstrem):

$$P_{cu,tot} = P_{cu,1} + P_{cu,2} + \dots + P_{cu,k} = \frac{\rho (MLT)}{W_A K_u} \sum_{j=1}^k \left(\frac{n_j^2 I_j^2}{\alpha_j} \right)$$

Ob pogoju, da velja:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k = 1$$

Definiramo funkcijo:

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi) = P_{cu,tot}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) + \xi g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$$

Lagrangeov množitelj

pri čemer je:

$$g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) = 1 - \sum_{j=1}^k \alpha_j$$

$g \rightarrow$ pogoj, ki mora biti enak 0
 $\xi \rightarrow$ Lagrangeov množitelj (ang. Lagrange multiplier)

Določanje deleža zasedenosti okna pri več navitjih

Optimalna rešitev je rešitev sistema enačb:

$$\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \alpha_1} = 0$$

$$\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \alpha_2} = 0$$

⋮

$$\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \alpha_k} = 0$$

$$\frac{\partial f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \xi)}{\partial \xi} = 0$$

$$\xi = \frac{\rho (MLT)}{W_A K_u} \left(\sum_{j=1}^k n_j I_j \right)^2 = P_{cu,tot}$$

$$\alpha_m = \frac{n_m I_m}{\sum_{n=1}^{\infty} n_j I_j}$$

$$\alpha_m = \frac{V_m I_m}{\sum_{n=1}^{\infty} V_j I_j}$$

Določanje deleža zasedenosti okna pri več navitjih

$$\alpha_m = \frac{V_m I_m}{\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n}$$

Moč v j-tem navitju:

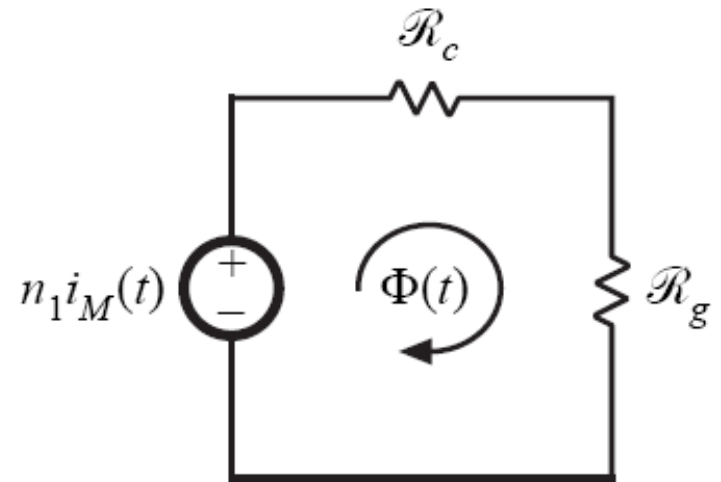
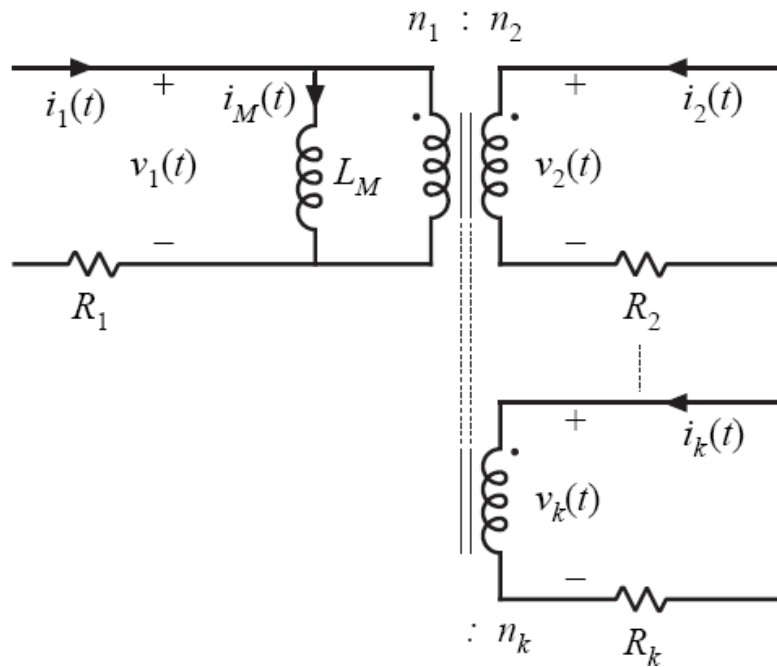
V_j predstavlja RMS napetost

I_j predstavlja RMS tok

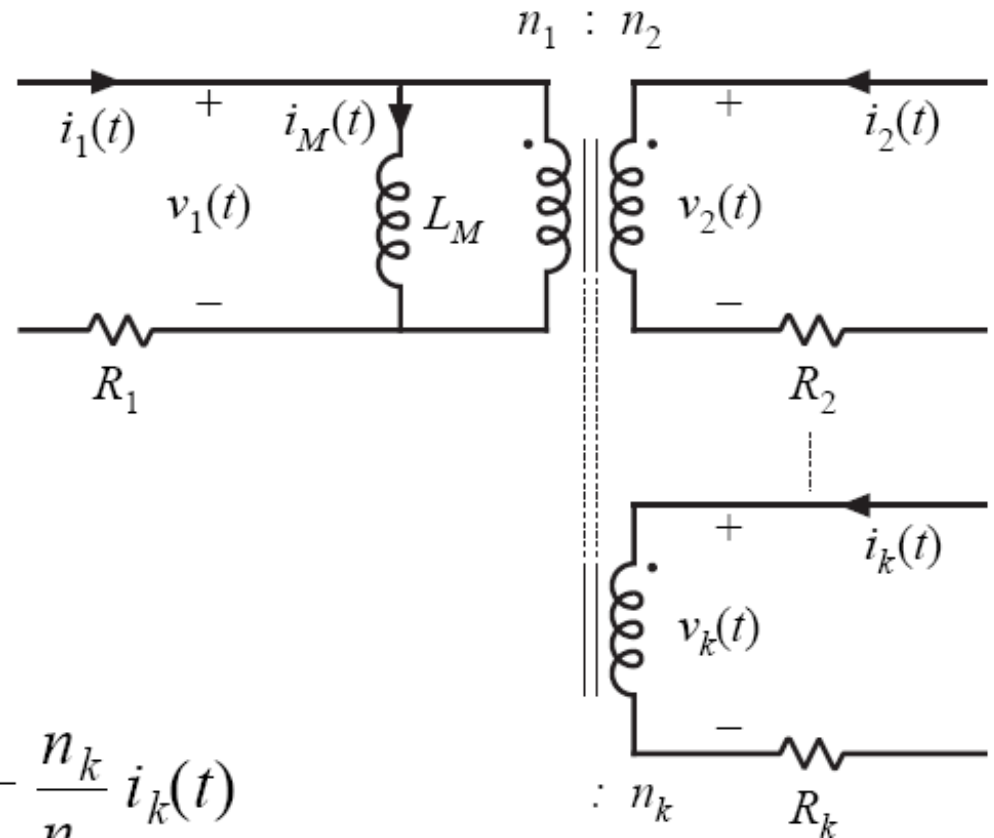
Okno naj bo razdeljeno glede na moči v posameznih navitjih.

Določanje L_M

- Določiti moramo še vrednost L_M , razmerja ovojjev in celotne izgube v bakru

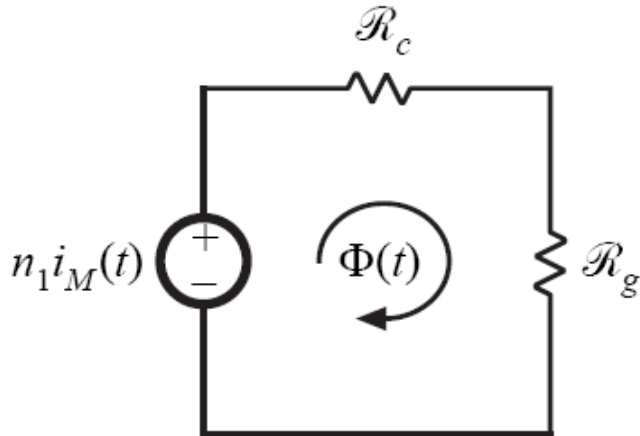


Določanje L_M



$$i_M(t) = i_1(t) + \frac{n_2}{n_1} i_2(t) + \dots + \frac{n_k}{n_1} i_k(t)$$

Določanje L_M



Reluktanca reže je mnogo večja od reluktance jedra:

$$n_1 i_M(t) = B(t) A_c \mathcal{R}_g$$

Načrtujemo tako, da je največja gostota mag. pretoka B_{max} enaka določeni vrednosti (pod B_{sat}).

B_{max} je povezana z največjim magnetilnim tokom:

$$n_1 I_{M,max} = B_{max} A_c \mathcal{R}_g = B_{max} \frac{\ell_g}{\mu_0}$$

$$L_M = \frac{n_1^2}{\mathcal{R}_g} = n_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{\ell_g}$$

Celotne izgube v bakru

- Določimo deleže okna, ki jih zasedajo posamezna navitja.
- Celotne izgube v bakru so:

$$P_{cu} = \frac{\rho(MLT)n_1^2 I_{tot}^2}{W_A K_u} \quad I_{tot} = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{n_1} I_j$$

- Izrazimo neznanki l_g in n_1 :

$$P_{cu} = \frac{\rho(MLT)L_M^2 I_{tot}^2 I_{M,max}^2}{B_{max}^2 A_c^2 W_A K_u}$$

$$\frac{A_c^2 W_A}{(MLT)} = \frac{\rho L_M^2 I_{tot}^2 I_{M,max}^2}{B_{max}^2 K_u P_{cu}}$$

$$K_g \geq \frac{\rho L_M^2 I_{tot}^2 I_{M,max}^2}{B_{max}^2 K_u P_{cu}}$$

Sklopljena induktivnost

Nekatere veličine so določene vnaprej iz načrtovalskih pogojev. V nadaljevanju so uporabljene spodnje enote, če ni drugače navedeno:

- Upornost žice ρ (Ω -cm)
- Največji tok navitja I_{max} (A)
- Induktivnost L (H)
- Upornost navitja R (Ω)
- Faktor polnjenja okna K_u
- Največja gostota magnetnega pretoka jedra B_{max} (T)
- Presek jedra A_c (cm²)
- Površina okna jedra W_A (cm²)
- Srednja dolžina ovoja tuljavnika MLT (cm)

$$K_g \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u} 10^8 \quad (\text{cm}^5)$$

Korak 1: Izbira jedra

- Izberemo dovolj veliko jedro in tuljavnik, da zadostimo neenačbi:

$$K_g \geq \frac{\rho L_M^2 I_{tot}^2 I_{M,max}^2}{B_{max}^2 P_{cu} K_u} 10^8$$

- S tem smo izbrali vrednost preseka jedra (A_c), površine okna (W_A), in srednje dolžine ovoja tuljavnika (MLT)
- $\rho_{Cu} = 1.724 \cdot 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ (25°C)
- $\rho_{Cu} = 2.3 \cdot 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ (100°C)

Korak 2: Določitev reže

$$\ell_g = \frac{\mu_0 L_M I_{M,max}^2}{B_{max}^2 A_c} 10^4 \quad (\text{m})$$

A_c [cm²]

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

ℓ_g [m]

Določitev reže ob zanemaritvi širjenja pretoka izven reže.

Korak 3: Izračun ovojev primarnega navitja

$$n_1 = \frac{L_M I_{M,max}}{B_{max} A_c} 10^4$$

Število ovojev preostalih navitij izračunamo iz prestav:

$$\begin{aligned} n_2 &= \left(\frac{n_2}{n_1} \right) n_1 \\ n_3 &= \left(\frac{n_3}{n_1} \right) n_1 \\ &\vdots \end{aligned}$$

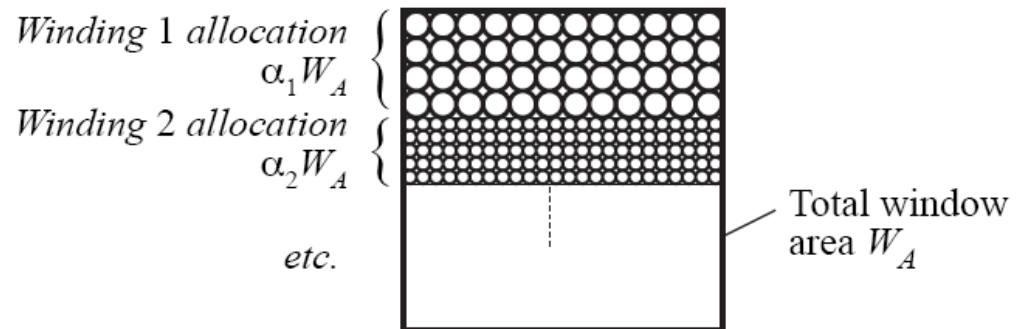
Korak 4: Izračun deleža okna posameznega navitja

$$\alpha_1 = \frac{n_1 I_1}{n_1 I_{tot}}$$

$$\alpha_2 = \frac{n_2 I_2}{n_1 I_{tot}}$$

⋮

$$\alpha_k = \frac{n_k I_k}{n_1 I_{tot}}$$



$$0 < \alpha_j < 1$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k = 1$$

Korak 5: Velikost žice in upornost

Izberemo žico s presekom A_w , ki je manjša (enaka) od dane vrednosti

$$A_{w1} \leq \frac{\alpha_1 K_u W_A}{n_1}$$

$$A_{w2} \leq \frac{\alpha_2 K_u W_A}{n_2}$$

⋮

Preverimo dobljene upornosti navitij:

$$R = \frac{\rho n (MLT)}{A_w} \quad (\Omega)$$

Komentar

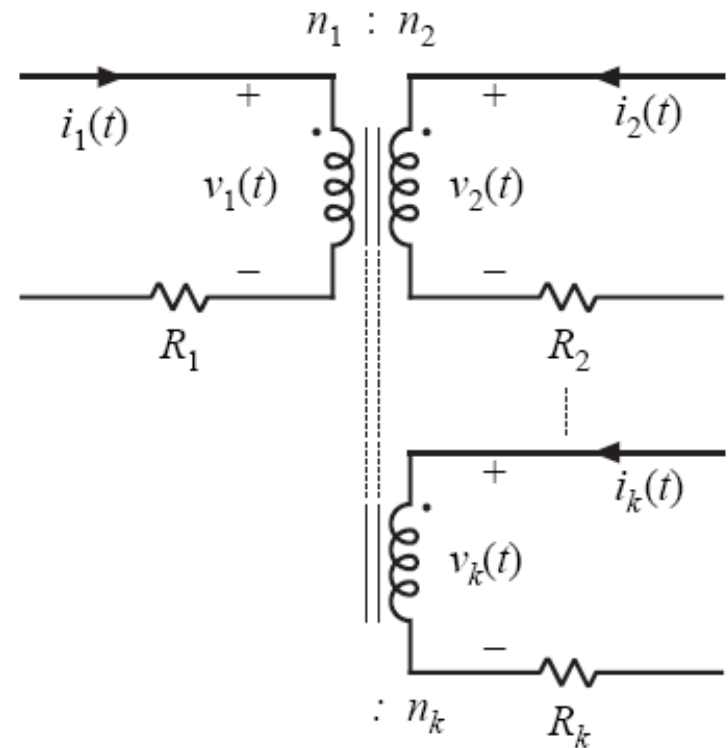
- V predstavljeni metodi je bil pogoj - prevladujoče izgube v bakru.
- Določena je tudi maksimalna gostota pretoka
- Tak pristop je primeren za načrtovanje aplikacij kot je npr. filtrska dušilka.
- V močnostnih aplikacijah delovno gostoto magnetnega polja omejujejo izgube v jedru in ne nasičenje!
- Tipičen primer so standardni visokofrekvenčni transformatorji, kjer moramo izgube v jedru omejiti z znižanjem delovne gostote magnetnega polja.

Komponente, sestavi in senzorji

Načrtovanje močnostnega
stikalnega transformatorja
z več navitji

Izhodišča

- Načrtovanje s stališča izgub **v bakru** in izgub **v železu**.
- Če povečamo delovno gostoto magnetnega polja (manj ovojev) se izgube v bakru zmanjšajo na račun povečanja izgub v železu.
- Določiti moramo delovno gostoto magnetnega polja, pri kateri so izgube v bakru in železu minimalne (minimalne celotne izgube)



Izgube v jedru - Steinmetzova enačba

$$P_{fe} = K_{fe}(\Delta B)^\beta A_c \ell_m$$

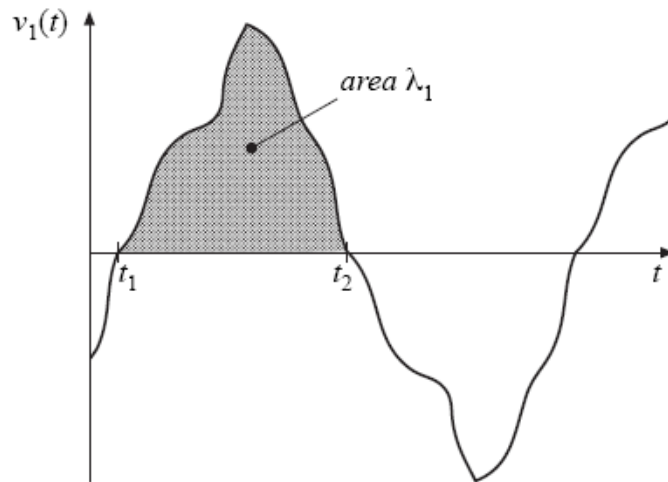
- $A_c \rightarrow$ presek jedra
- $\ell_m \rightarrow$ srednja dolžina silnice v jedru
- $A_c \cdot \ell_m \rightarrow$ volumen jedra.
- K_{FE} je konstanta, ki je odvisna od frekvence
- ΔB je izmenična amplituda gostote magnetnega polja
- Eksponent β je določen iz podatkov proizvajalca. Tipična vrednost za ferite je 2.6 do 2.8, za ostale materiale je v območju 2...3

- Elementa K_{Fe} in β Steinmetzove enačbe lahko določimo iz grafa izgub materiala pri določeni frekvenci.

Določanje optimalne gostote pretoka ΔB

$$\lambda_1 = \int_{t_1}^{t_2} v_1(t) dt$$

$$\Delta B = \frac{\lambda_1}{2n_1 A_c}$$



- Pri danem poteku napetosti lahko ΔB zmanjšamo s povečanjem števila obojev primarja n_1 .
- To sicer pomeni zmanjšanje izgub v jedru:

$$P_{fe} = K_{fe} (\Delta B)^\beta A_c \ell_m$$

Določiti moramo ΔB optimalni:

$$n_1 = \frac{\lambda_1}{2\Delta B A_c}$$

- ampak tudi povečanje izgub v bakru, saj bo imelo novo navitje več obojev tanjše žice (večji R)

Izgube v bakru

$$P_{cu} = \frac{\rho(MLT)n_1^2 I_{tot}^2}{W_A K_u}$$

$$I_{tot} = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{n_1} I_j$$

$$P_{cu} = \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2} \right) \left(\frac{1}{\Delta B} \right)^2$$

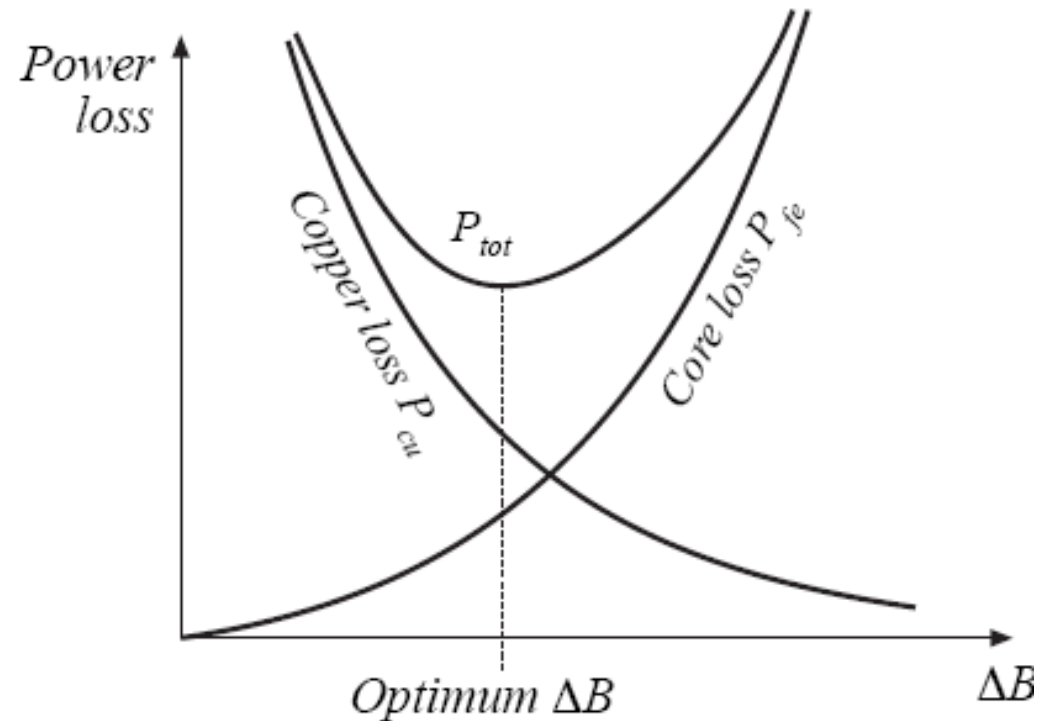
- Člen v prvem oklepaju vsebuje načrtovalska izhodišča (zahteve)
- Člen v drugem oklepaju je vsebuje parametre jedra
- Zadnji člen prikazuje odvisnost izgub v bakru od spremembe gostote magnetnega polja
- V enačbi niso upoštevane izgube v bakru zaradi efekta bližine, ki jih običajno ocenimo *po* prvi iteraciji načrtovanja.

Celotne izgube v odvisnosti od ΔB

$$P_{tot} = P_{fe} + P_{cu}$$

$$P_{fe} = K_{fe}(\Delta B)^\beta A_c \ell_m$$

$$P_{cu} = \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2} \right) \left(\frac{1}{\Delta B} \right)^2$$



Določanje optimalnega ΔB

$$\frac{dP_{tot}}{d(\Delta B)} = \frac{dP_{fe}}{d(\Delta B)} + \frac{dP_{cu}}{d(\Delta B)} = 0$$

Optimum ni nujno na polovici ($P_{Fe} = P_{Cu}$)
ampak ga moramo za vsak primer določiti:

$$\frac{dP_{fe}}{d(\Delta B)} = -\frac{dP_{cu}}{d(\Delta B)}$$

$$P_{fe} = K_{fe}(\Delta B)^\beta A_c \ell_m \quad P_{cu} = \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2} \right) \left(\frac{1}{\Delta B} \right)^2$$

$$\frac{dP_{fe}}{d(\Delta B)} = \beta K_{fe}(\Delta B)^{(\beta-1)} A_c \ell_m \quad \frac{dP_{cu}}{d(\Delta B)} = -2 \left(\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \right) \left(\frac{(MLT)}{W_A A_c^2} \right) (\Delta B)^{-3}$$

Določanje optimalnega ΔB

- Če enačbe vstavimo skupaj

$$\Delta B = \left[\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \frac{(MLT)}{W_A A_c^3 \ell_m} \frac{1}{\beta K_{fe}} \right]^{\left(\frac{1}{\beta+2}\right)}$$

$$P_{tot} = \left[A_c \ell_m K_{fe} \right]^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \left[\frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{4K_u} \frac{(MLT)}{W_A A_c^2} \right]^{\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]$$

$$\frac{W_A (A_c)^{(2(\beta-1)/\beta)}}{(MLT) \ell_m^{(2/\beta)}} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]^{-\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)} = \frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2 K_{fe}^{(2/\beta)}}{4K_u (P_{tot})^{((\beta+2)/\beta)}}$$

Določanje optimalnega ΔB

$$K_{gfe} = \frac{W_A (A_c)^{(2(\beta-1)/\beta)}}{(MLT) \ell_m^{(2/\beta)}} \left[\left(\frac{\beta}{2}\right)^{-\left(\frac{\beta}{\beta+2}\right)} + \left(\frac{\beta}{2}\right)^{\left(\frac{2}{\beta+2}\right)} \right]^{-\left(\frac{\beta+2}{\beta}\right)}$$

- Konstanta K_{gFE} predstavlja geometrijske parametre jedra v primeru upoštevanja izgub v jedru. Podobno vlogo je igrala konstanta K_g pri analizi ob zanemaritvi izgub v jedru.
- Žal je odvisna od parametra β , ki je običajno dan v intervalu 2.6 ... 2.8 za večino feritnih materialov ($\pm 5\%$ spremembe)

Izbira jedra

$$K_{gfe} \geq \frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2 K_{fe}^{(2/\beta)}}{4K_u (P_{tot})^{((\beta+2)/\beta)}}$$

Preračun ovojev glede na jedro

- Ko jedro in tuljavnik izberemo, smo določili: A_c - presek jedra, MLT - srednjo dolžino ovoja in l_m - srednjo dolžino silnice. Od tod lahko izračunamo ΔB :

$$\Delta B = \left[10^8 \frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \frac{(MLT)}{W_A A_c^3 l_m} \frac{1}{\beta K_{fe}} \right]^{\left(\frac{1}{\beta+2}\right)}$$

- In število ovojev primarja n_1 :

$$n_1 = \frac{\lambda_1}{2\Delta B A_c} 10^4$$

Izračun ovojev in prestav

- Iz števila ovojev primarja in prestav določimo potrebno število ovojev sekundarnih navitij (n_j)

$$n_2 = n_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

$$n_3 = n_1 \left(\frac{n_3}{n_1} \right)$$

⋮

Preseki žic

- Odtod lahko določimo preseke žic na vseh navitjih po enačbi:

$$\alpha_1 = \frac{n_1 I_1}{n_1 I_{tot}}$$

$$\alpha_2 = \frac{n_2 I_2}{n_1 I_{tot}}$$

⋮

$$\alpha_k = \frac{n_k I_k}{n_1 I_{tot}}$$

$$A_{w1} \leq \frac{\alpha_1 K_u W_A}{n_1}$$

$$A_{w2} \leq \frac{\alpha_2 K_u W_A}{n_2}$$

⋮

Preračun modela transformatorja

Izračunana induktivnost magnetenja, preračunana na primarno stran

$$L_M = \frac{\mu n_1^2 A_c}{\ell_m}$$

Magnetilni tok:

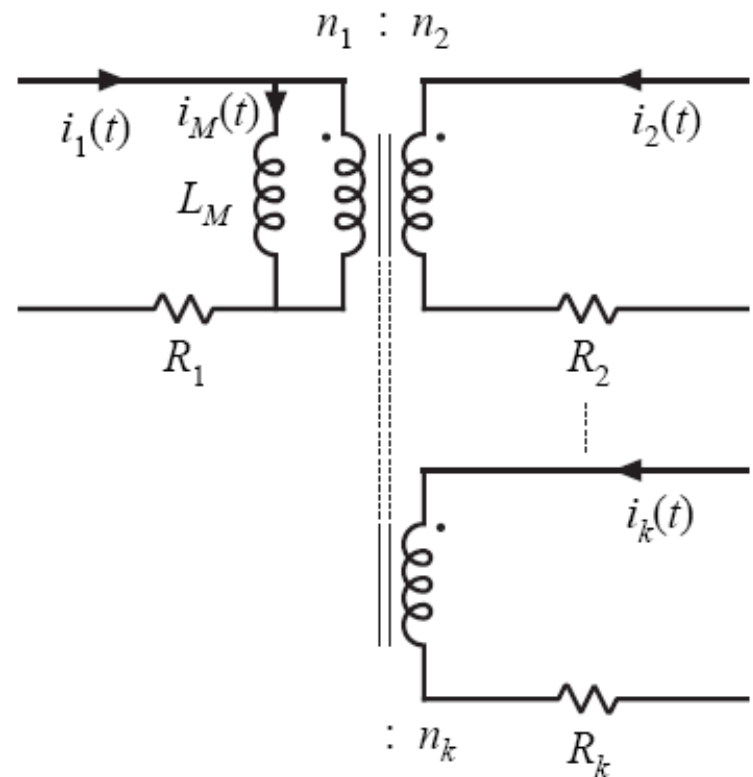
$$i_{M, pk} = \frac{\lambda_1}{2L_M}$$

Upornosti navitij:

$$R_1 = \frac{\rho n_1 (MLT)}{A_{w1}}$$

$$R_2 = \frac{\rho n_2 (MLT)}{A_{w2}}$$

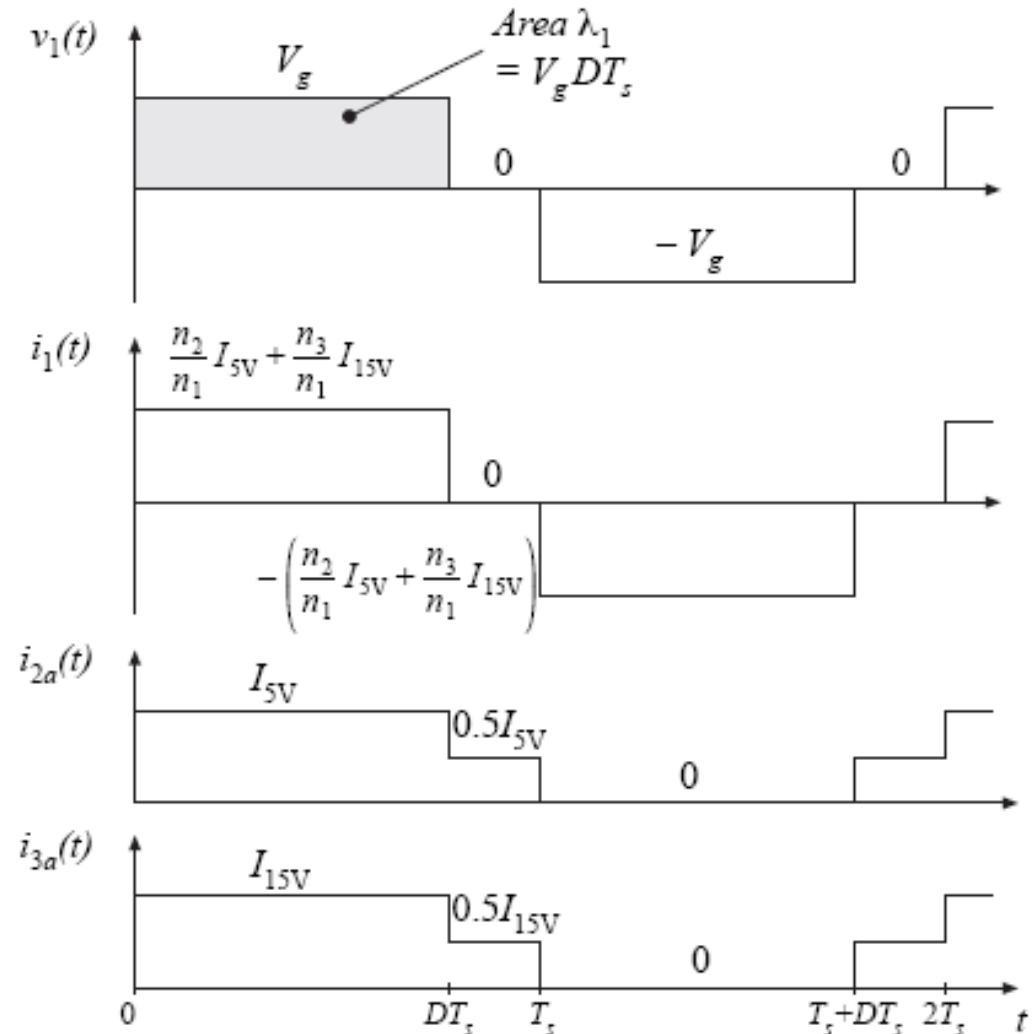
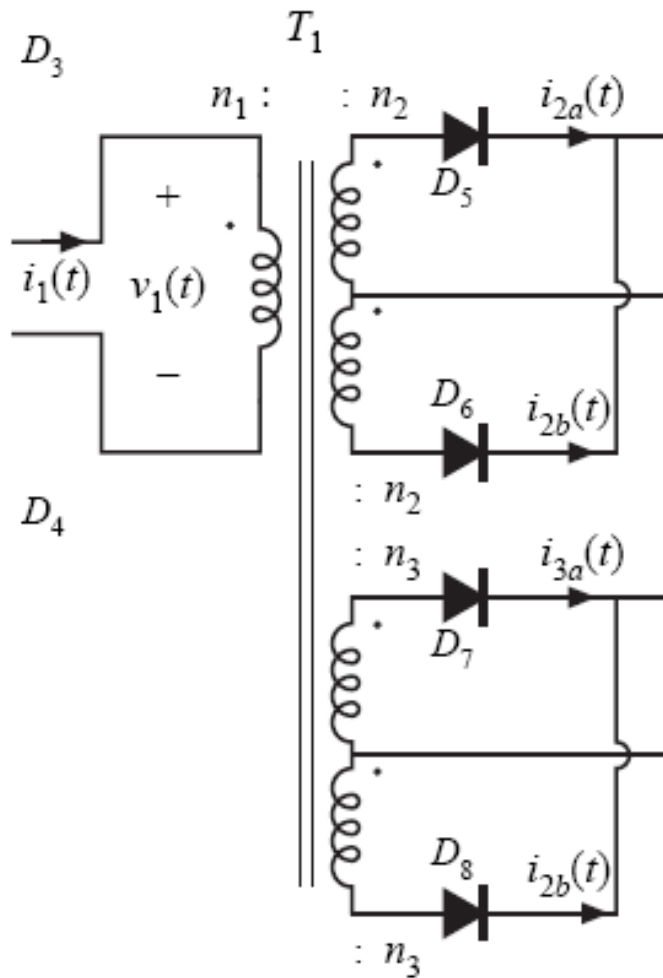
⋮



Primer izračuna – full bridge buck

- Full bridge buck pretvornik, napajan s 160V, z dvema izhodoma:
 - 5 V @ 100 A
 - 15 V @ 15 A
- Transformator načrtujemo tako, da bo imel pri polni obremenitvi $D=0.75$.
- Stikalna frekvenca pretvornika je 150 kHz, kar pomeni, da se spremembe v jedru odvijajo s 75 kHz.
- Priporočena prestava je 110:5:15

Primer izračuna – full bridge buck

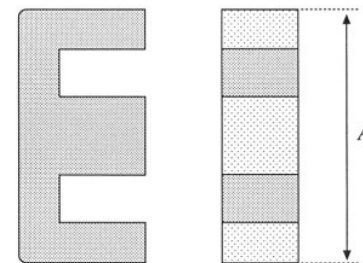


Primerna jedra – EE tip

Core type	Geometrical constant	Geometrical constant	Cross-sectional area	Bobbin winding area	Mean length per turn	Magnetic path length	Core weight
(A)	K_g	K_{gfe}	A_c	W_A	MLT	ℓ_m	
(mm)	(cm^5)	(cm^x)	(cm^2)	(cm^2)	(cm)	(cm)	(g)
EE12	$0.731 \cdot 10^{-3}$	$0.458 \cdot 10^{-3}$	0.14	0.085	2.28	2.7	2.34
EE16	$2.02 \cdot 10^{-3}$	$0.842 \cdot 10^{-3}$	0.19	0.190	3.40	3.45	3.29
EE19	$4.07 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	0.23	0.284	3.69	3.94	4.83
EE22	$8.26 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	0.41	0.196	3.99	3.96	8.81
EE30	$85.7 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	1.09	0.476	6.60	5.77	32.4
EE40	0.209	$11.8 \cdot 10^{-3}$	1.27	1.10	8.50	7.70	50.3
EE50	0.909	$28.4 \cdot 10^{-3}$	2.26	1.78	10.0	9.58	116
EE60	1.38	$36.4 \cdot 10^{-3}$	2.47	2.89	12.8	11.0	135
EE70/68/19	5.06	$75.9 \cdot 10^{-3}$	3.24	6.75	14.0	18.0	280

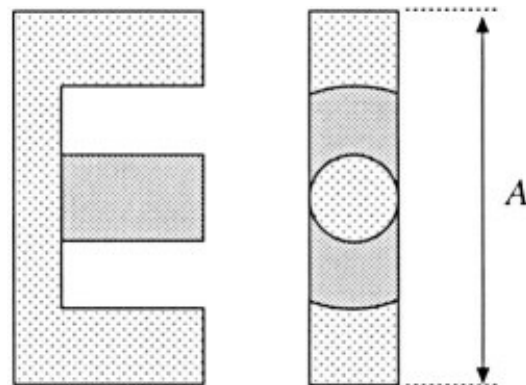
$$K_{fe} = 7.6 \text{ W/T}^\beta \text{cm}^3$$

$$\beta = 2.6$$



Primerna jedra – ETD tip

Core type	Geometrical constant	Geometrical constant	Cross-sectional area	Bobbin winding area	Mean length per turn	Magnetic path length	Thermal resistance	Core weight
(A) (mm)	K_g (cm ⁵)	K_{gfe} (cm ⁴)	A_c (cm ²)	W_A (cm ²)	MLT (cm)	ℓ_m (cm)	R_{th} (°C/W)	(g)
ETD29	0.0978	$8.5 \cdot 10^{-3}$	0.76	0.903	5.33	7.20		30
ETD34	0.193	$13.1 \cdot 10^{-3}$	0.97	1.23	6.00	7.86	19	40
ETD39	0.397	$19.8 \cdot 10^{-3}$	1.25	1.74	6.86	9.21	15	60
ETD44	0.846	$30.4 \cdot 10^{-3}$	1.74	2.13	7.62	10.3	12	94
ETD49	1.42	$41.0 \cdot 10^{-3}$	2.11	2.71	8.51	11.4	11	124



Ostale načrtovalske zahteve

- Faktor polnjenja (dvojna izolacija, več navitij, off-line aplikacija):

$$K_u = 0.25$$

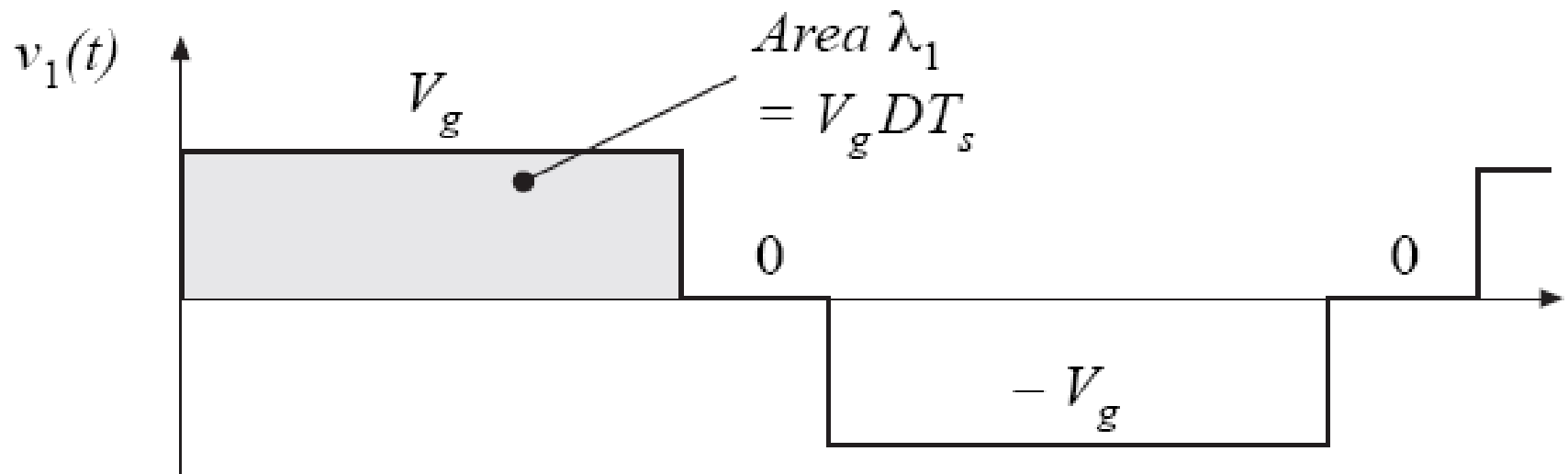
- Celotne izgube pretvornika so največ 0.5% izhodne moči pretvornika:

$$P_{tot} = 4 \text{ W}$$

- Bakrena žica

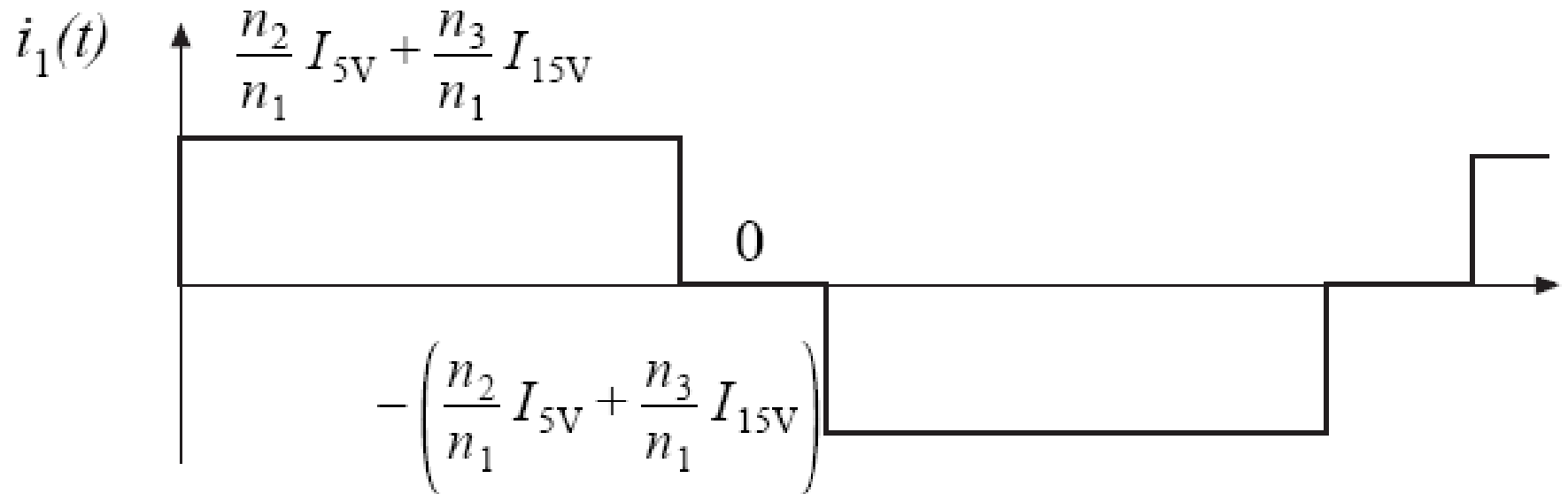
$$\rho = 1.724 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega\text{-cm}$$

Analiza primarja



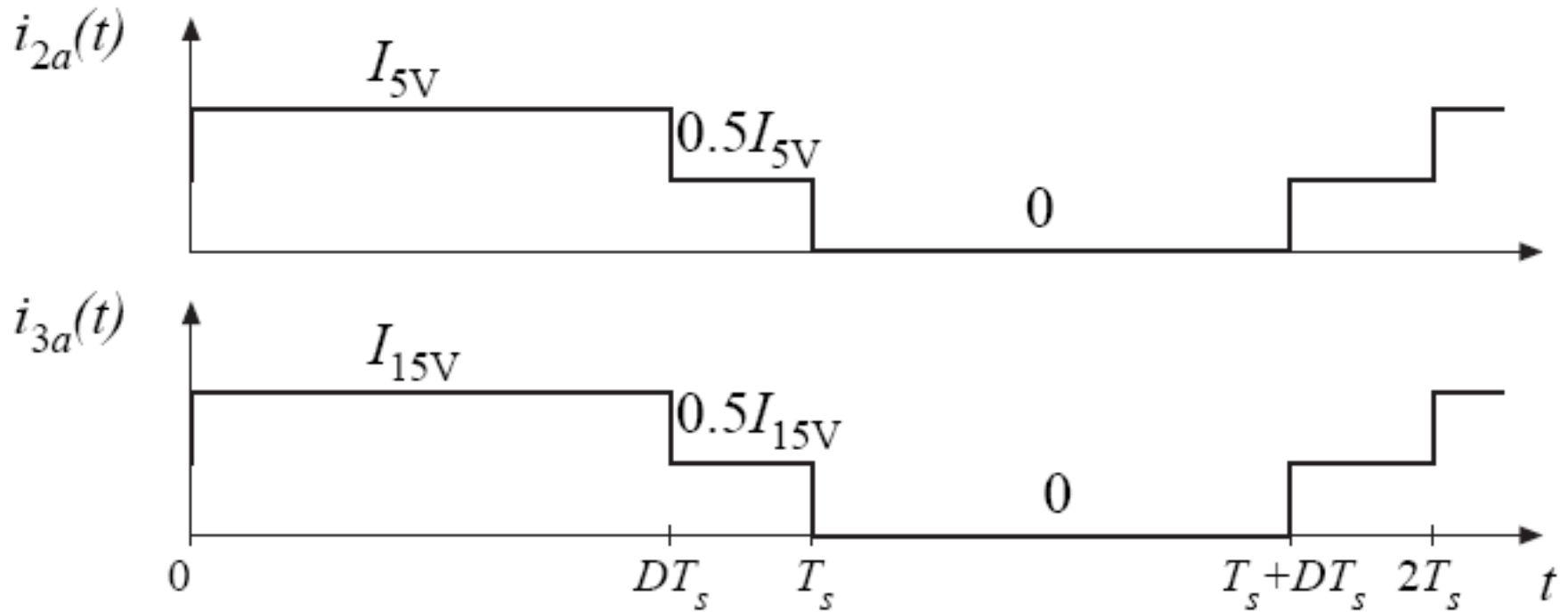
$$\lambda_1 = DT_s V_g = (0.75) (6.67 \mu\text{sec}) (160 \text{ V}) = 800 \text{ V}\text{-}\mu\text{sec}$$

Tok primarja



$$I_1 = \left(\frac{n_2}{n_1} I_{5V} + \frac{n_3}{n_1} I_{15V} \right) \sqrt{D} = 5.7 \text{ A}$$

RMS tok sekundarnih navitij



$$I_2 = \frac{1}{2} I_{5V} \sqrt{1 + D} = 66.1 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{1}{2} I_{15V} \sqrt{1 + D} = 9.9 \text{ A}$$

Skupni tok

- Skupni tok pretvornika (primar + sekundar) preslikan na primarno stran

$$\begin{aligned} I_{tot} &= \sum_{\substack{\text{all 5} \\ \text{windings}}} \frac{n_j}{n_1} I_j = I_1 + 2 \frac{n_2}{n_1} I_2 + 2 \frac{n_3}{n_1} I_3 \\ &= (5.7 \text{ A}) + \frac{5}{110} (66.1 \text{ A}) + \frac{15}{110} (9.9 \text{ A}) \\ &= 14.4 \text{ A} \end{aligned}$$

Izbira jedra

$$K_{gfe} \geq \frac{(1.724 \cdot 10^{-6})(800 \cdot 10^{-6})^2(14.4)^2(7.6)^{(2/2.6)}}{4(0.25)(4)^{(4.6/2.6)}} 10^8$$

$$= 0.00937$$

Core type	Geometrical constant	Geometrical constant	Cross-sectional area	Bobbin winding area	Mean length per turn	Magnetic path length	Core weight
(A)	K_g	K_{gfe}	A_c	W_A	MLT	ℓ_m	(g)
(mm)	(cm ⁵)	(cm ⁵)	(cm ²)	(cm ²)	(cm)	(cm)	
EE12	$0.731 \cdot 10^{-3}$	$0.458 \cdot 10^{-3}$	0.14	0.085	2.28	2.7	2.34
EE16	$2.02 \cdot 10^{-3}$	$0.842 \cdot 10^{-3}$	0.19	0.190	3.40	3.45	3.29
EE19	$4.07 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	0.23	0.284	3.69	3.94	4.83
EE22	$8.26 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	0.41	0.196	3.99	3.96	8.81
EE30	$85.7 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	1.09	0.476	6.60	5.77	32.4
EE40	0.209	$11.8 \cdot 10^{-3}$	1.27	1.10	8.50	7.70	50.3
EE50	0.909	$28.4 \cdot 10^{-3}$	2.26	1.78	10.0	9.58	116
EE60	1.38	$36.4 \cdot 10^{-3}$	2.47	2.89	12.8	11.0	135
EE70/68/19	5.06	$75.9 \cdot 10^{-3}$	3.24	6.75	14.0	18.0	280

Izračun ΔB

$$B_{max} = \left[10^8 \frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2}{2K_u} \frac{(MLT)}{W_A A_c^3 l_m} \frac{1}{\beta K_{fe}} \right]^{\left(\frac{1}{\beta+2}\right)}$$

$$\Delta B = \left[10^8 \frac{(1.724 \cdot 10^{-6})(800 \cdot 10^{-6})^2 (14.4)^2}{2(0.25)} \frac{(8.5)}{(1.1)(1.27)^3 (7.7)} \frac{1}{(2.6)(7.6)} \right]^{(1/4.6)} = 0.23 \text{ Tesla}$$

Preverimo, ali ob tem spravimo jedro v nasičenje:

$$\Delta B < B_{sat} = 0.35 \text{ T}$$

Število ovojev navitij

$$n_1 = \frac{\lambda_1}{2\Delta B A_c} 10^4$$

$$n_1 = 10^4 \frac{(800 \cdot 10^{-6})}{2(0.23)(1.27)}$$
$$= 13.7 \text{ turns}$$

$$n_2 = \frac{5}{110} n_1 = 0.62 \text{ turns}$$

$$n_3 = \frac{15}{110} n_1 = 1.87 \text{ turns}$$

- Zaokrožimo število ovojev iz priporočene prestave 110:5:15 na 22:1:3
- Če povečamo n_1 se bodo povečale izgube v bakru, zato izberemo najmanjši n_1 pri katerem dobimo na sekundarju $n_2=1$ ovoj.

Izračun celotnih izgub

- Če postavimo $n_1 = 22$, se ΔB zmanjša na:

$$\Delta B = \frac{(800 \cdot 10^{-6})}{2(22)(1.27)} 10^4 = 0.143 \text{ Tesla}$$

- Iz novega ΔB dobimo nove celotne izgube:

$$P_{fe} = (7.6)(0.143)^{2.6}(1.27)(7.7) = 0.47 \text{ W}$$

$$P_{cu} = \frac{(1.724 \cdot 10^{-6})(800 \cdot 10^{-6})^2(14.4)^2}{4(0.25)} \frac{(8.5)}{(1.1)(1.27)^2} \frac{1}{(0.143)^2} 10^8$$
$$= 5.4 \text{ W}$$

$$P_{tot} = P_{fe} + P_{cu} = 5.9 \text{ W}$$

- Celotne izgube so narasle prek dovoljene 4W.

Večje jedro → EE50

$$\Delta B = 0.14 \text{ T}, n_1 = 12, P_{tot} = 2.3 \text{ W}$$

- Postavimo $n_1 = 22 \rightarrow \Delta B$:

$$\Delta B = 0.08 \text{ T}, P_{cu} = 3.89 \text{ W}, P_{fe} = 0.23 \text{ W}, P_{tot} = 4.12 \text{ W}$$

Izračun presekov žic in % polnenja okna

$$\alpha_1 = \frac{I_1}{I_{tot}} = \frac{5.7}{14.4} = 0.396$$

$$A_{w1} = \frac{\alpha_1 K_u W_A}{n_1} = \frac{(0.396)(0.25)(1.78)}{(22)} = 8.0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$\alpha_2 = \frac{n_2 I_2}{n_1 I_{tot}} = \frac{5}{110} \frac{66.1}{14.4} = 0.209$$

$$A_{w2} = \frac{\alpha_2 K_u W_A}{n_2} = \frac{(0.209)(0.25)(1.78)}{(1)} = 93.0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$\alpha_3 = \frac{n_3 I_3}{n_1 I_{tot}} = \frac{15}{110} \frac{9.9}{14.4} = 0.094$$

$$A_{w3} = \frac{\alpha_3 K_u W_A}{n_3} = \frac{(0.094)(0.25)(1.78)}{(3)} = 13.9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

Iteracije

- Postopek načrtovanja je iterativen, saj gre za zaokroževanje pri številu ovojev in ostalih prispevkov (efekt bližine)
- Če upoštevamo efekt bližine je potrebno določiti število plasti navitij in za vsako ovrednotiti izgube zaradi efekta bližine
- Popravimo efektivno upornost žice za kompenzacijo efekta bližine:

$$\rho_{eff} = \rho * P_{cu} / P_{dc}$$

P_{Cu} skupne izgube v bakru (z upoštevanjem efekta bližine) in
 P_{DC} izgube v bakru ob predvideni enosmerni upornosti

- Ponovimo postopek načrtovanja transformatorja z upoštevanjem spremembe upornosti

Elektronske komponente in senzorji

Senzorji

Senzor, vzbujevalnik, pretvornik

- Element, ki proizvede na izhodu signal, ki **enolično** odgovarja vrednosti opazovane veličine na vhodu

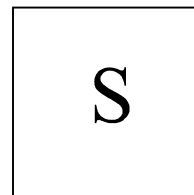
vhodni/primarni signal
input/primary signal

izhodni/sekundarni signal
output/secondary signal

vh/in

izh/out

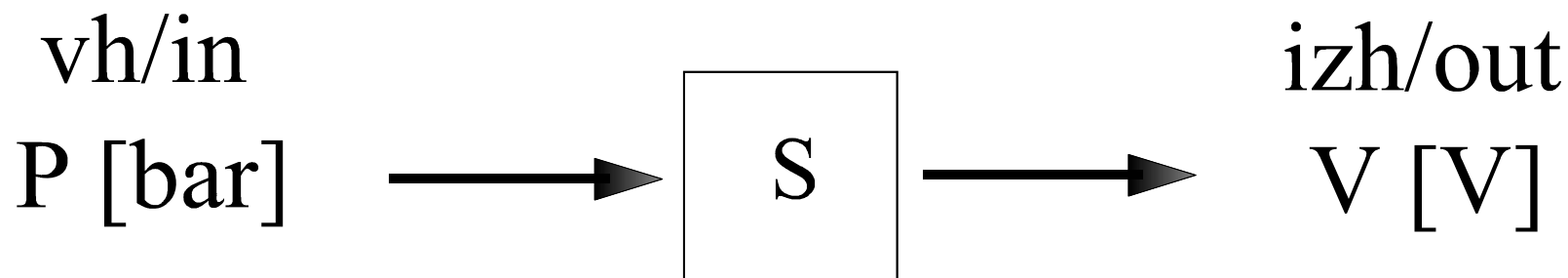
x



y

Senzor tlaka

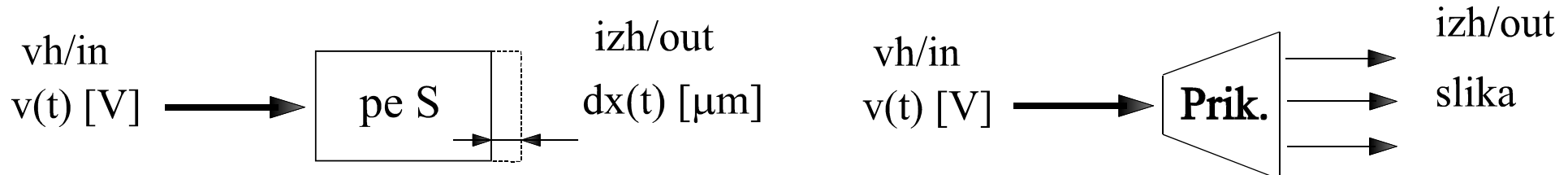
- Tu je na izhodu senzorja signal (električna napetost V), ki je enolično odvisna od vrednosti tlaka P na vhodu
- Senzor tlaka opravlja enolično pretvorbo vhodnega signala, tlaka P v izhodni signal, napetost V .



- Druga imena kot npr. detektor (x-ray detector), meter (flowmeter), element (termoelement), celica (fotocelica)

Vzbujevalnik (Aktuator)

- Element, ki vhodni signal pretvarja v mehanski ali informacijski izhodni signal:
 - piezoaktuator: vhodni signal - električno napetost preko piezoefekta pretvarja v izhodni signal - mehansko deformacijo
 - prikazalnik: vhodni signal - primeren električni informacijski signal pretvarja v izhodni signal - slikovno informacijo



Pretvornik (Transducer)

- Nekateri avtorji pretvornik definirajo enako kot senzor, drugi avtorji pa vključijo v ta pojem tudi aktuatorje!

Senzorski sistem

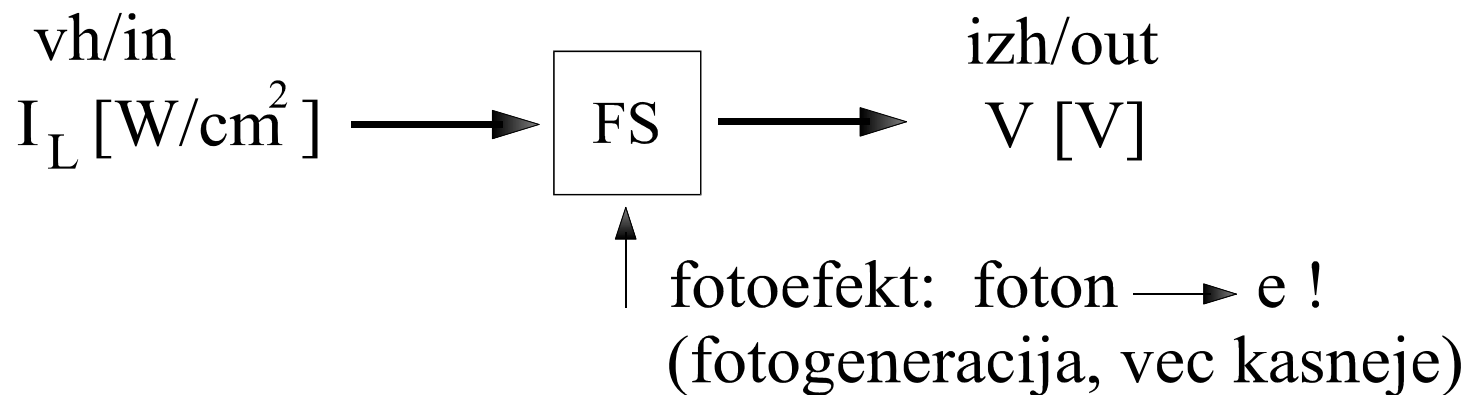
- Je senzorski element s pripadajočo elektroniko za obdelavo signalov senzorja (ang. signal conditioning)

Principi pretvorbe

- Vedno gre za neko pretvorbo energije vhodnega signala v energijo izhodnega signala, ki naj bo v obliki, primerni za nadaljnjo obdelavo
- Take pretvorbe energije iz ene oblike v drugo imenujemo "efekt" ali "zakon" (effect, law).
- Znanih 400 različnih efektov/pretvorb in število še raste. → število možnosti za realizacijo senzorjev.
- Različne vrste energij oz. signalov lahko razvrstimo v nekaj osnovnih skupin, kar pogosto služi tudi kot ena izmed osnovnih razdelitev senzorjev:
 - mehanski
 - termični
 - električni
 - magnetni
 - radiacijski (svetloba, delci)
 - kemijski
 - biološki

Principi pretvorbe - primer

- FOTOSENZOR - energija vpadlega elektromagnetnega valovanja (svetloba) se v senzorju pretvarja na osnovi fotoefekta v energijo prostih električnih nosilcev naboja in nato dalje v tok oz. napetost, odvisno od električne vezave na izhodu



Razvrstitev senzorjev

- Možnosti za razvrstitev so glede na skupne lastnosti, ki družijo senzorje:
 - osnovni princip pretvorbe (fotoefekt - fotosenzorji, piezouporovni efekt - piezouporovni senzorji itd.)
 - vhodna spremenljivka (tlak, temperatura, itd.)
 - tehnologija in osnovni material (polprevodniški Si senzorji, tankoplastni senzorji)
 - področje uporabe (avtomobil, medicina)
 - točnost (visoke točnosti, nizke točnosti)
 - cena ((ne)profesionalni senzorji, ceneni/dragi)
 - napajanje (aktivni, pasivni)

Najpogostejša razvrstitev senzorjev

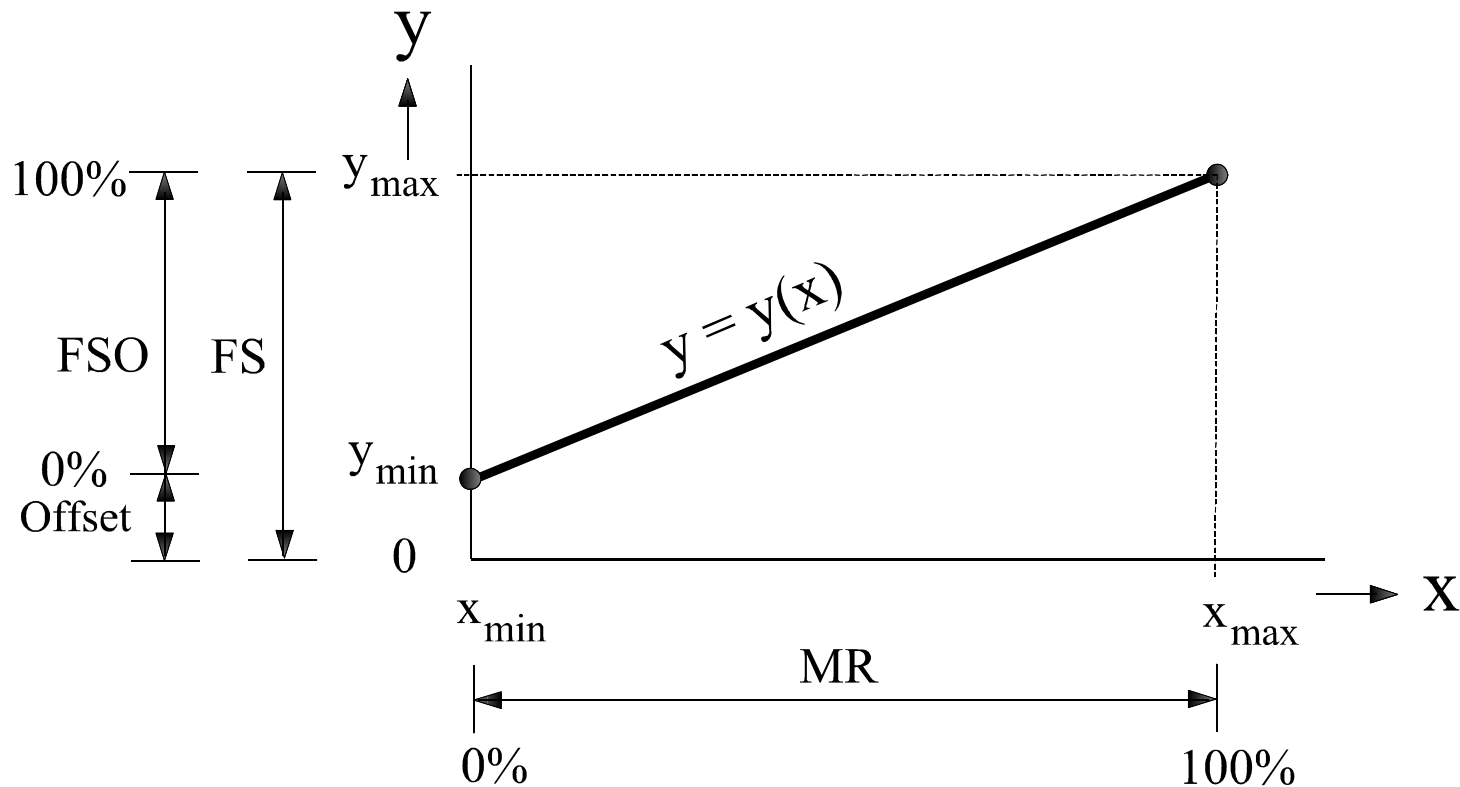
- **mehanski:**
dolžina, linearna/kotna pozicija, hitrost, pospešek, masni pretok, sila, navor, pritisk, površina, volumen, parametri zvočnega valovanja (hitrost, valovna dolžina, intenziteta..)
- **temperaturni:**
temperatura T , (specifična) toplota c , entropija, toplotni tok, (agregatno) stanje snovi idr.
- **električni:**
napetost, tok, naboj, upornost, kapacitivnost, induktivnost, dielektričnost, polje, frekvenca
- **magnetni:**
gostota magnetnega pretoka B , magnetne poljske jakosti H , magnetnih dipolnih momentov m , magnetne permeabilnosti m
- **optični:** valovna dolžina, frekvenca, intenziteta, faza, polarizacija, odbojnost, prepustnost, lomni indeks
- **kemijski in biološki:**
kemijska sestava spojin, koncentracije, reakcijske hitrosti, faktor pH, oksidacijsko/redukcijski potenciali idr.

Osnovni podatki senzorjev

- Karakteristika
- Občutljivost
- Točnost
- Ločljivost
- Selektivnost
- Šum
- Minimalni detektirani signal
- Prag
- Nelinearnost
- Histereza
- Ponovljivost
- Temperaturni ničelni odziv
- Preobremenitvene lastnosti
- Dolgoročna stabilnost
- Pogoji okolja
- Odzivni čas

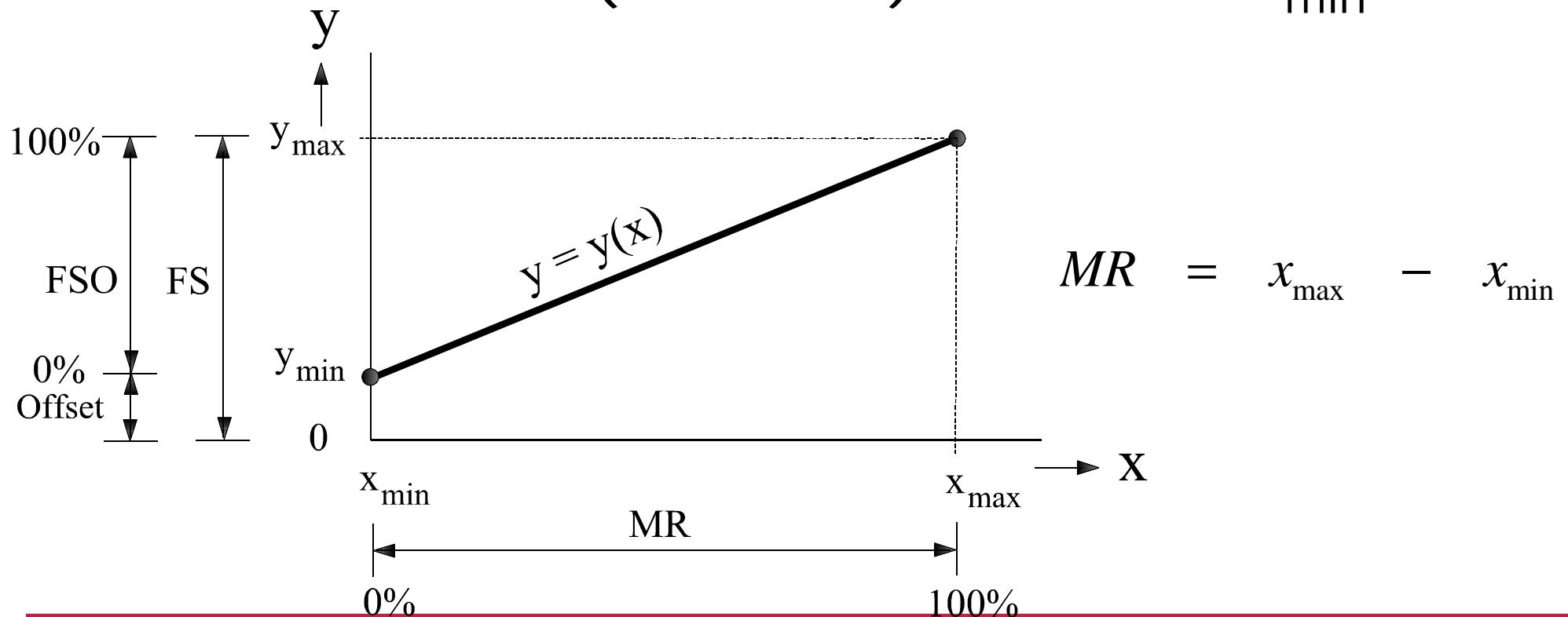
Karakteristika

- Zveza med vhodno spremenljivko (x) in izhodno spremenljivko (y). Podana je lahko grafično, tabelarično ali analitično (enačba).



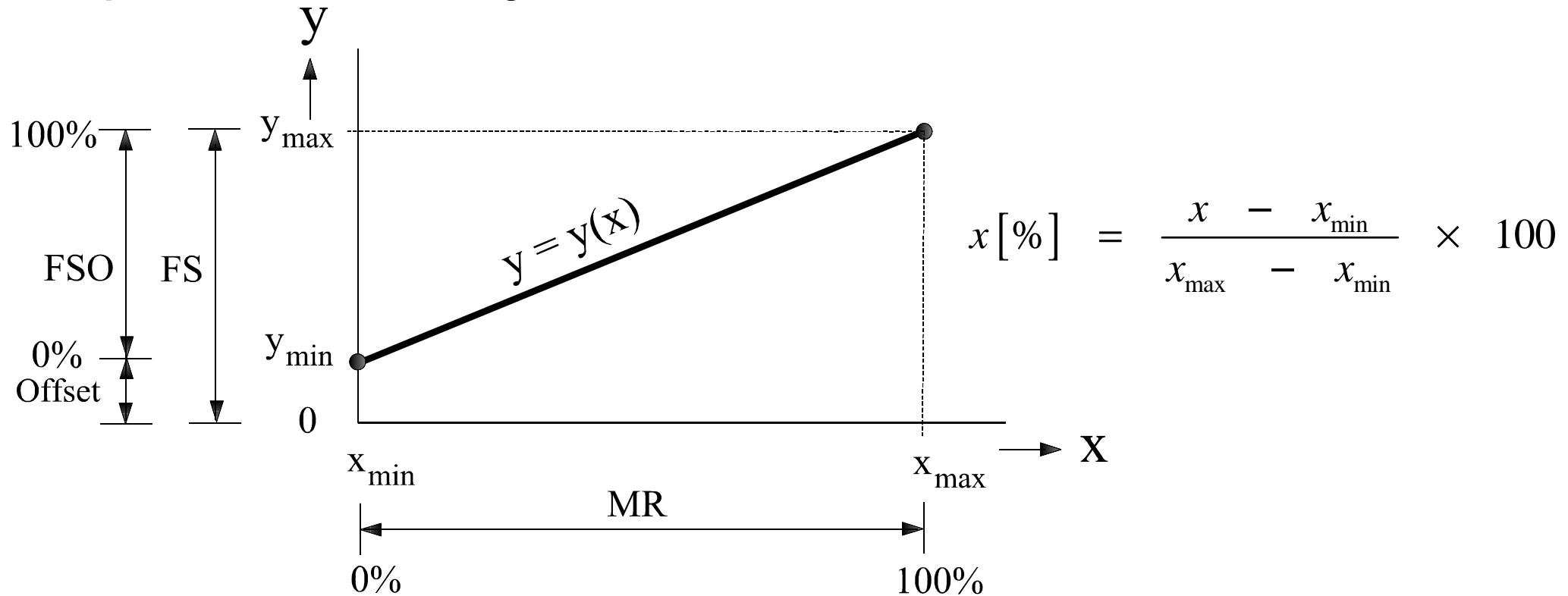
Karakteristika- Measured Range

- **MR** (Measured Range, Span) - merilno območje oz. obseg meritve.
MR je razlika med maksimalnim vhodom x_{\max} in minimalnim (ničelnim) vhodom x_{\min}



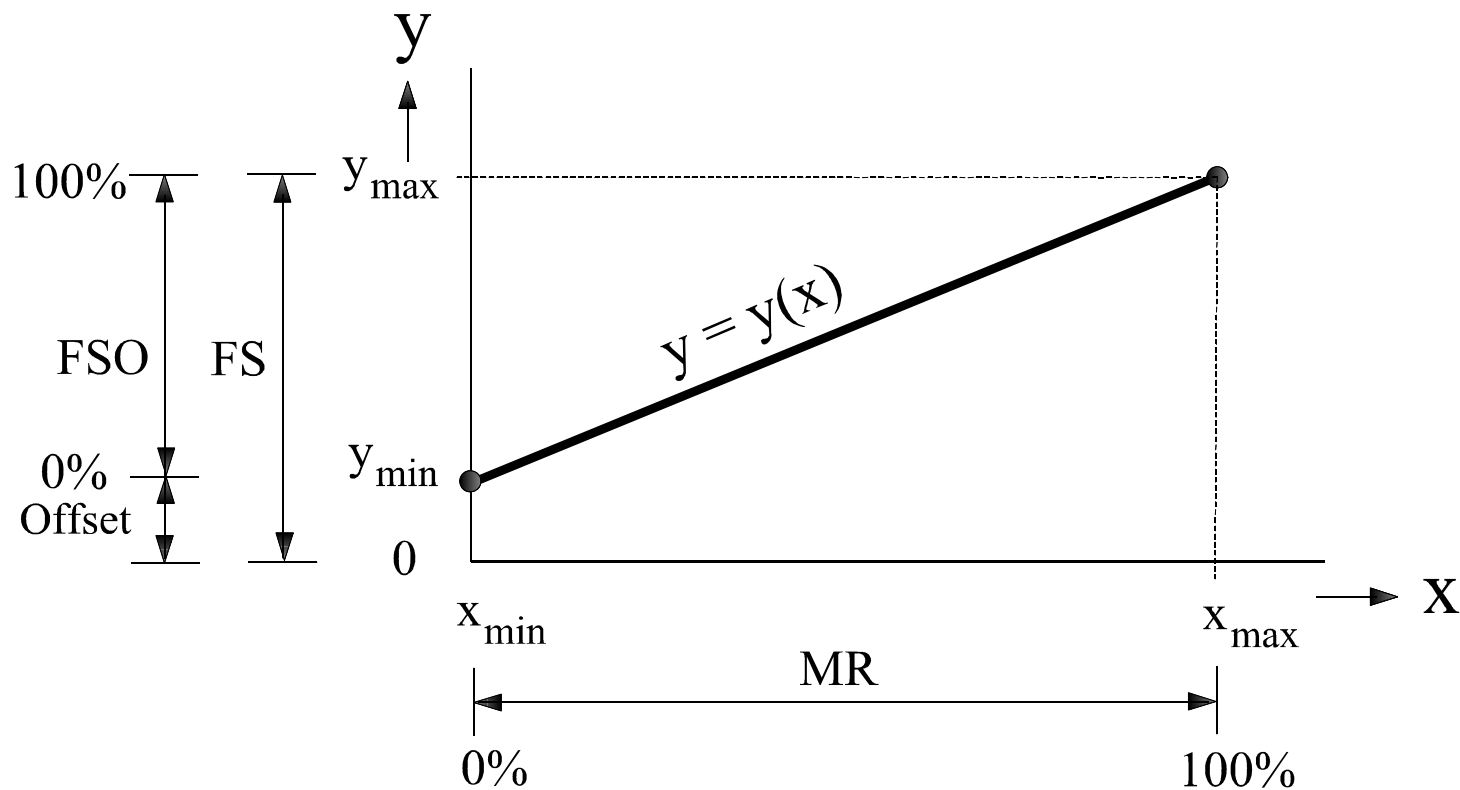
Karakteristika- Measured Range

- Vhodna spremenljivka x lahko zavzema le vrednosti iz intervala $x_{\max} \dots x_{\min}$. Če je x podan v %, je normalizirana z MR



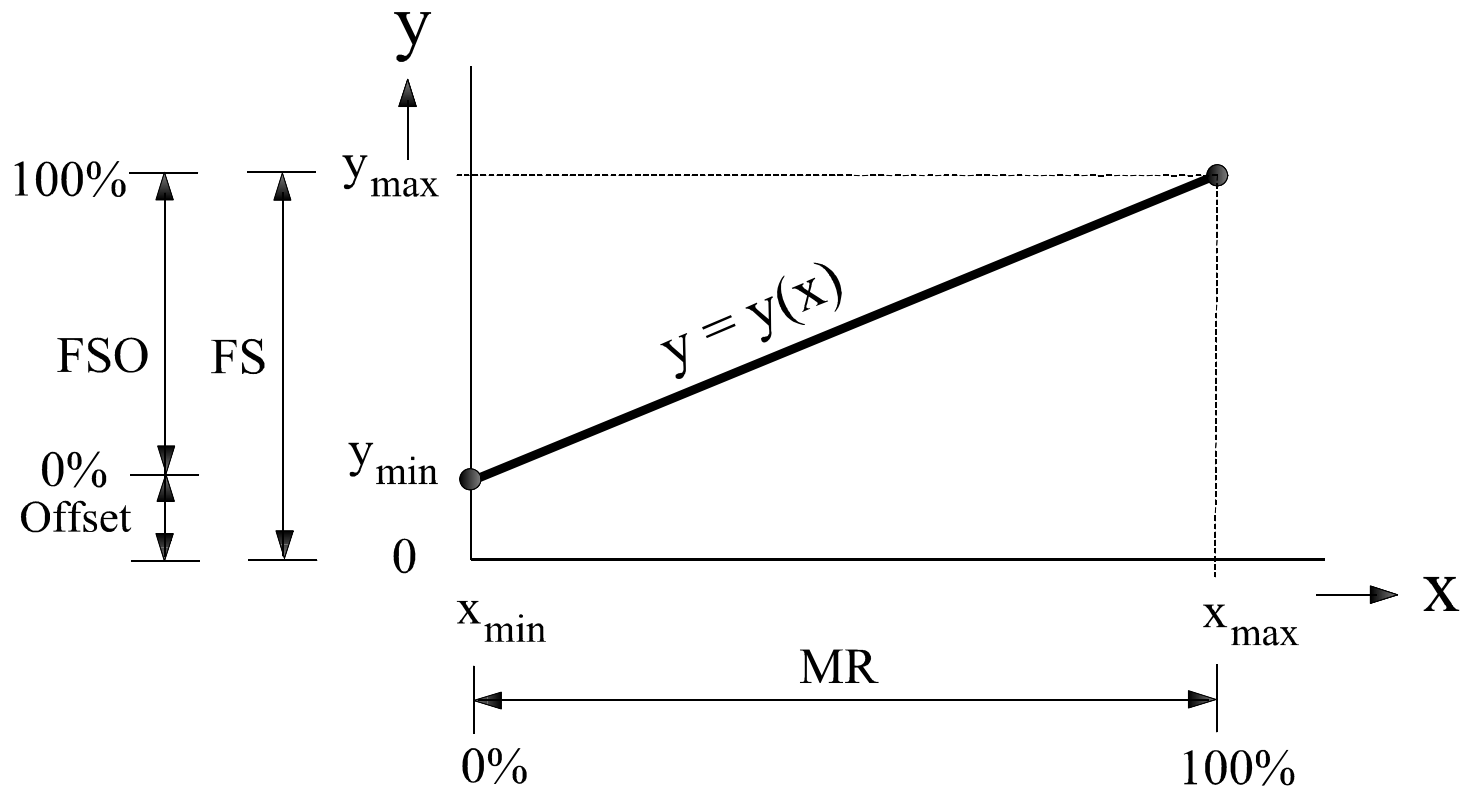
Karakteristika- (Full Scale)

- **FS** (Full Scale) - polni obseg, enak maksimalni vrednosti izhoda y_{\max}



Karakteristika- (Offset)

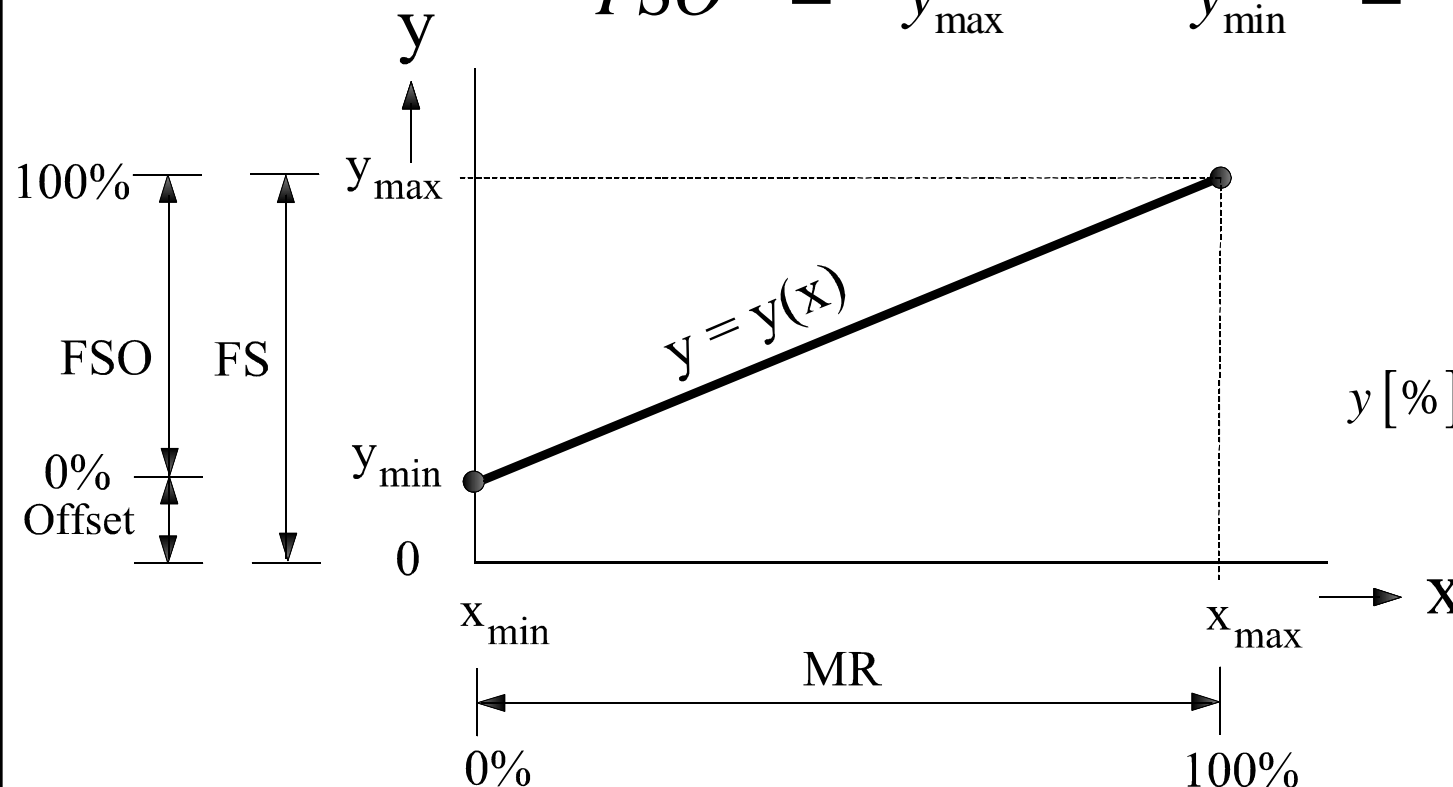
- **Offset** - je minimalni izhod y_{\min} oz. vrednost izhoda pri ničelnem vhodu x_{\min}



Karakteristika- Full Scale Output

- **F**SO (Full Scale Output) - polni obseg izhoda, je razlika med maksimalnim in minimalnim izhodom.
- Če je y dan v %, je normaliziran z FSO

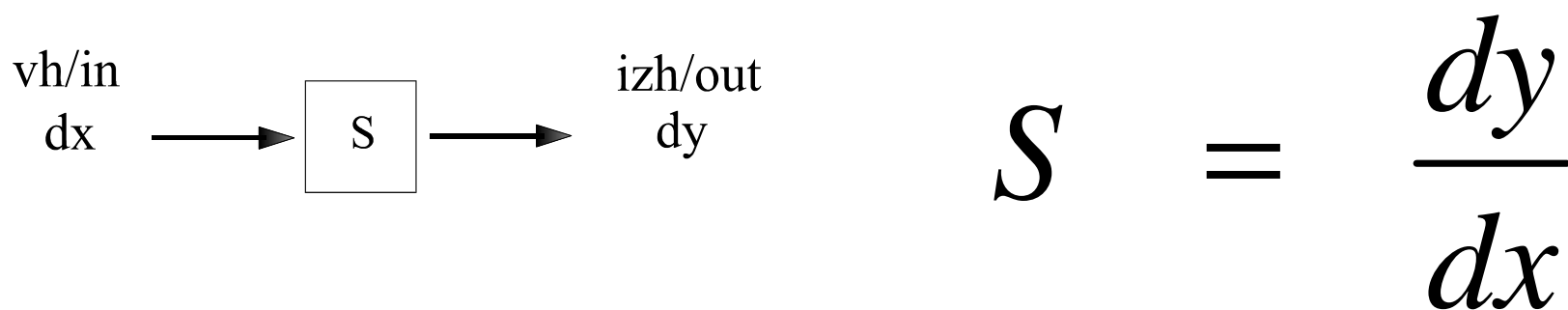
$$FSO = y_{\max} - y_{\min} = FS - Offset$$



$$y[\%] = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100$$

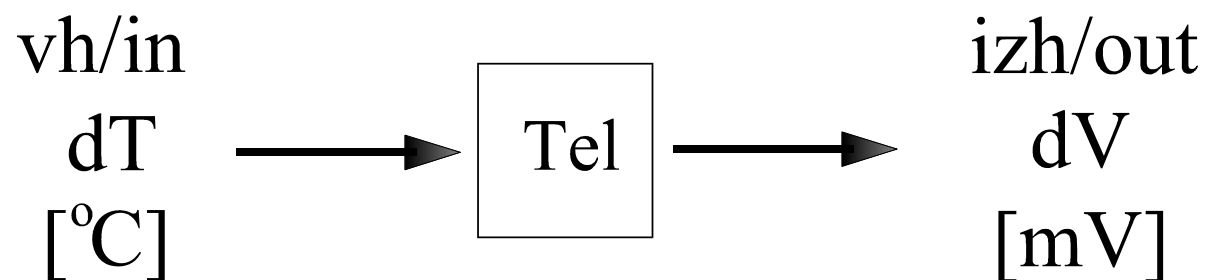
Občutljivost

- Občutljivost sensorja (Sensitivity) S je razmerje med majhno spremembo izhoda dy in pripadajočo majhno spremembo vhoda dx



- Matematično gledano je občutljivost odvod (strmina ali naklon) karakteristike $y(x)$.

Občutljivost - primer

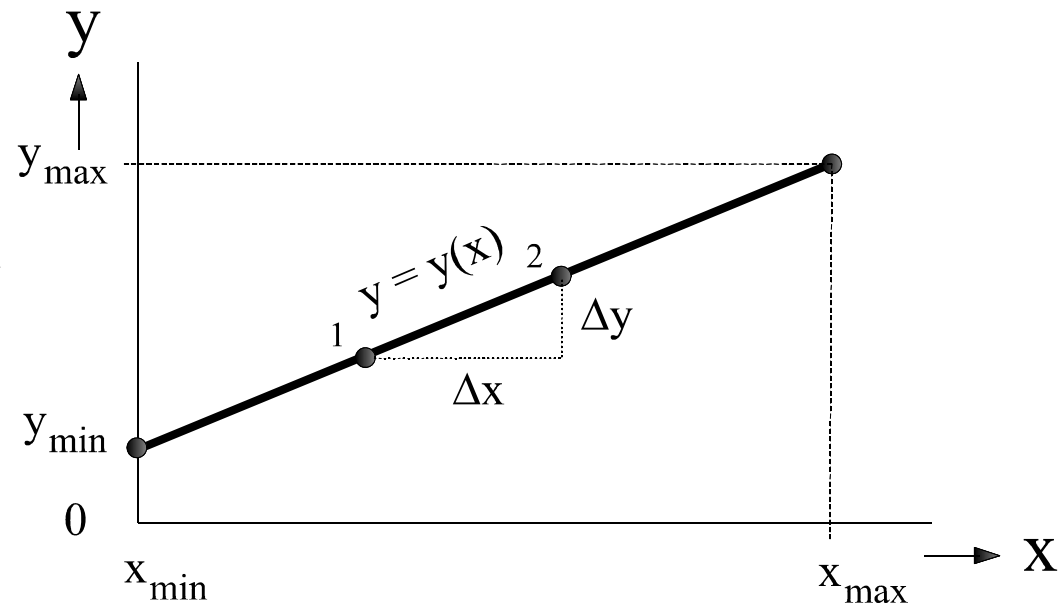


$$S_{Tel} = \frac{dy}{dx} = \frac{dV}{dT} \left[\frac{mV}{^{\circ}C} \right]$$

Določanje občutljivosti

- **Analitično:** Če je senzor opisan z analitično karakteristiko $y = y(x)$ je občutljivost **odvod** karakteristike
- **Grafično:** Če je senzor opisan z grafično karakteristiko $y(x)$, je občutljivost razmerje ustreznih diferenc med dvema točkama na karakteristiki:
 - pri linearnem senzorju
 - pri nelinearnem senzorju med dvema točkama na tangenti na karakteristiko
- **Tabelarično:** Če je karakteristika senzorja opisana s tabelo y_i/x_i , je občutljivost razmerje ustreznih diferenc

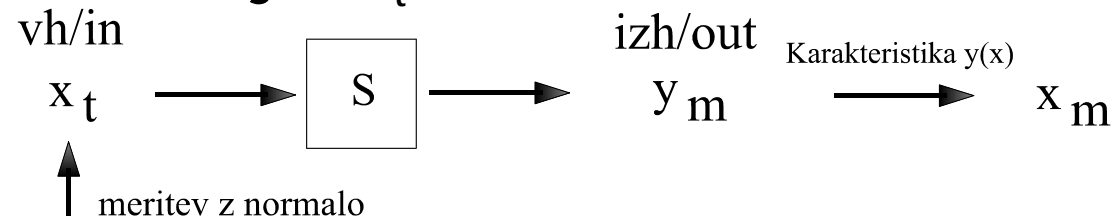
$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$



$$S = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

Točnost (Accuracy) ϵ_a

- Izmerimo odziv izhoda pri danem vhodu $y_m(x_m)$.
- Točnost (ϵ_a) pove, kako dobro se merjeni (masured) odziv sensorja (x_m) ujema s točno (tru) vhodno vrednostjo x_t



$$\epsilon_a \text{ [%]} = \frac{x_m - x_t}{x_t} \times 100$$

- ϵ_a je v % Normalizirana je z vrednostjo x_t
- Za meritev x_t potrebujemo točen senzor (normalo)

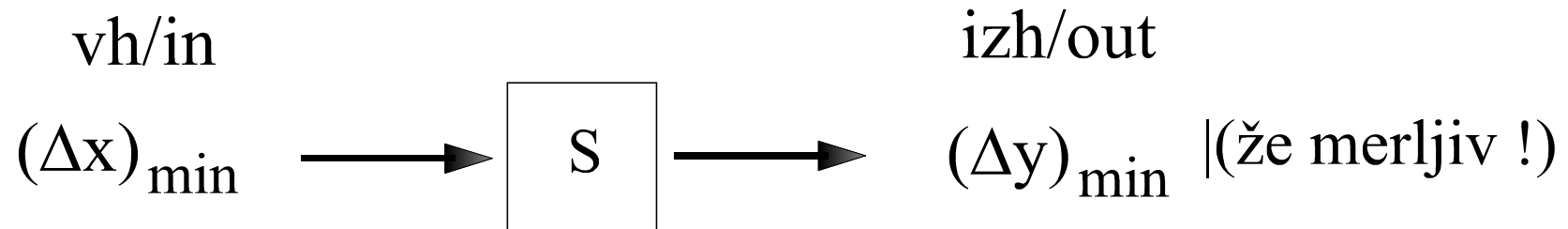
Povprečna točnost (Accuracy) ε_a

- Povprečna točnost $\langle \varepsilon_a \rangle$:
- Zaradi večje zanesljivosti, N-krat ponovimo meritve pri konstantnem x_t .
- Zaradi različnih pojavov (spremembe v senzorju, pogojev meritve, dobivamo vedno različne vrednosti x_{mi}
- Določimo povprečno merjeno vrednost $\langle x_m \rangle$

$$\langle x_m \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{mi}$$

Ločljivost (Resolution) R

- Ločljivost (Resolution) R je najmanjša sprememba vhodne veličine $(\Delta x)_{\min}$, ki se odrazi v merljivi spremembi izhoda $(\Delta y)_{\min}$



$$R \text{ [%]} = \frac{(\Delta x)_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100$$

- R je v % . Normalizirana je FS
- Za meritev x_t potrebujemo točen senzor (normalo)

Povprečna ločljivost (Resolution) R

- Včasih je podana povprečna ločljivost. Pogosto je namreč $(\Delta x)_{\min}$ različen za različne vrednosti x po intervalu $(x_{\min} \dots x_{\max})$.
- V tem primeru določimo povprečno vrednost $\langle (\Delta x)_{\min} \rangle$ s povprečenjem preko celotnega področja

$$\langle (\Delta x)_{\min} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta x)_{\min i}$$

$$R [\%] = \frac{\langle (\Delta x)_{\min} \rangle}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100$$

Ločljivost (Resolution) R - primer

- Termoelement ima obseg meritve 0°C - 100°C.
- Minimalna sprememba temperature na vhodu, ki se pri danem senzorskem sistemu odrazi v že opazni (merljivi) spremembi napetosti na izhodu, je 0.1°C.
- Določi ločljivost senzorskega sistema

$$R = \frac{(\Delta T)_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \times 100 \% = \frac{0.1^{\circ}C}{100^{\circ}C - 0^{\circ}C} \times 100 \% = \underline{0.1 \%}$$

Selektivnost (Selectivity) S_{α}

- Selektivnost (ang. Selectivity) S_{α} je občutljivost senzorja na motilne vhod x_{α} (na vse, **razen** na merjeno veličino!)

$x_{\alpha} = T, \eta, I_L, P \dots$

$$S_{\alpha} = \frac{dy}{dx_{\alpha}}$$

- Idealen senzor $\rightarrow S_{\alpha} = 0$
(ni nobenega vpliva motilnih parametrov)
- Resničen senzor $\rightarrow S_{\alpha} \neq 0$,
(obstoja vpliv motilnih parametrov).
- Druga imena: nestabilnost, navzkrižna občutljivost (cross-sensitivity), lezenje (drift)

Temperaturna stabilizacija/kompenzacija

- Pri spremembi tlaka na vhodu za ΔP se izhod pri dani občutljivosti senzorja S , spremeni za ΔV

$$\Delta V = S \cdot \Delta P$$

- Če se spremeni temperatura senzorja za npr. ΔT , se bo izhod senzorja, zaradi različnih temperaturnih odvisnosti v strukturi senzorja, spremenil za vrednost ΔV_T

$$\Delta V_T = S_T \cdot \Delta T$$

- Pri istočasni spremembi tlaka in temperature na senzorju bo sprememba izhodne napetosti sestavljena iz obeh efektov in je zato rezultat meritve netočen.
- Pri aplikacijah, ki zahtevajo visoko točnost, lahko uporabimo razne pristope za odpravo netočnosti (**stabilizacija, kompenzacija**)

Temperaturna stabilizacija

- V tem primeru merilno okolje senzorja temperaturno stabiliziramo (termostatiramo). S tem preprečimo spreminjanje temperature med meritvijo in v skladu z en izničimo netočnost ($\Delta T = 0 \rightarrow \Delta V_T = 0$).

Temperaturna kompenzacija

- Merilnemu sistemu dodamo senzor temperature, s katerim stalno merimo še temperaturne spremembe ΔT .
- Na podlagi izmerjene (ali podane) selektivnosti senzorja na temperaturo ST določimo spremembo izhoda ΔV_T , ki jo nato odštejemo od izmerjenega izhodnega signala.
- Tako dobimo točno izhodno informacijo o vhodnem signalu - tlaku na vходу.
- V novejših senzorskih sistemih naštete operacije izvaja mikroračunalnik.

Šum

- Šum (Noise, Noise Signal) N je efektivna vrednost šumnega signala na izhodu senzorja pri ničelnem vходу x_{\min} .
- Tipične RMS vrednosti šuma so pri senzorjih običajno majhne napetosti v razredu [mV].
- Glavni izvori šuma v senzorjih so
 - Zrnati šum (Shot Noise):
 - Termični šum (Thermal Noise, Johnson Noise):
 - $1/f$ šum:
 - Generacijsko-rekombinacijski (GR) šum:
Zaradi naključne (statistične) narave GR procesov v polprevodniških materialih število nosilcev naboja fluktuirata. Zato pride tudi do fluktuacij ostalih električnih lastnosti v strukturi, kot je npr. električna napetost, kar rodi nov prispevek k šumu

Minimalni detektirani signal senzorja-MDS

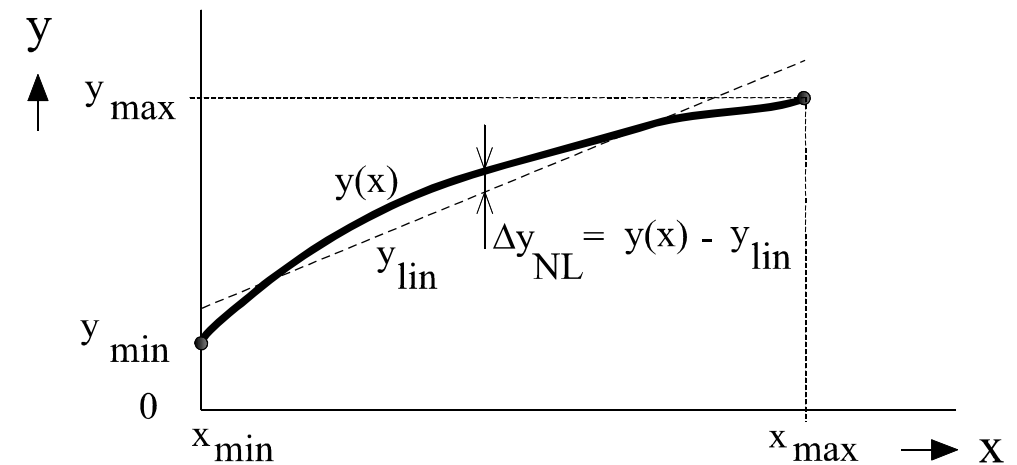
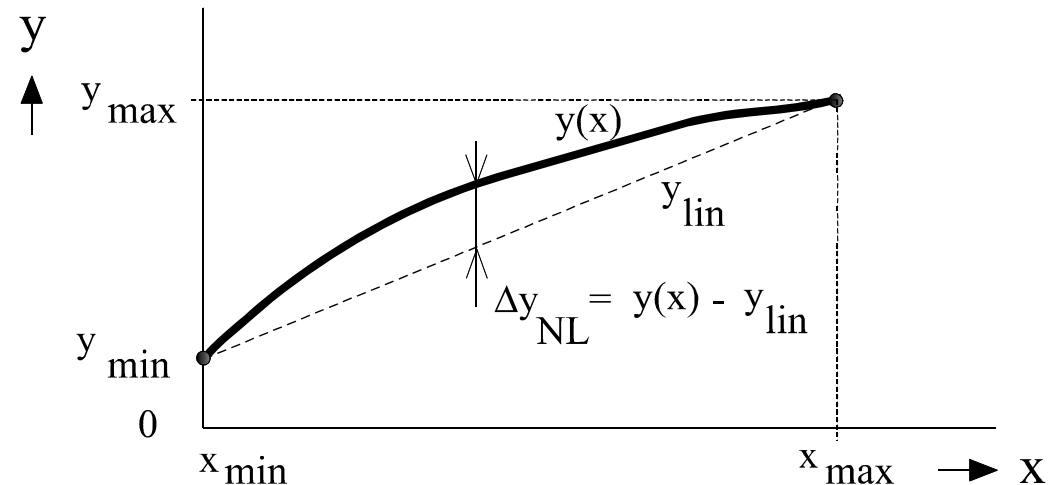
- Minimalni detektirani signal senzorja (Minimal Detectable Signal) MDS je tista najmanjša vrednost vhodnega signala x_{\min} , ki v senzorju že vzbudi enako velik izhodni signal y_{\min} , kot je vrednost šumnega signala N na izhodu senzorja!
- MDS je določen s šumnimi lastnostmi danega senzorja.
- Vhodnih signalov pod MDS ne moremo zaznavati, ker jih na izhodu ne moremo izločiti iz šuma N .

Prag (Threshold) Δx_{Thr}

- Prag (Threshold) Δx_{Thr} je tista najmanjša sprememba vhodnega signala Δx_{Thr} , če začnemo opazovati pri začetni vrednosti na vhodu x_{min} (ničelni vhod), ki povzroči že merljivo spremembo izhoda.
- Prag je enak ločljivosti pri ničelnem vhodu x_{min} .

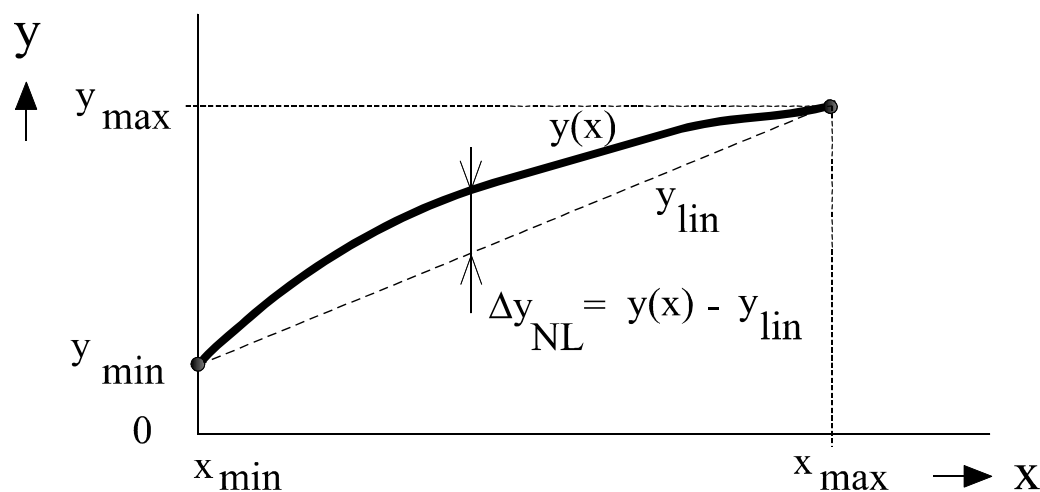
Nelinearnost

- Nelinearnost (Nonlinearity) Δy_{NL} je odstopanje odziva sensorja od idealnega linearnega odziva
- Definicija nelinearnosti izhaja iz določitve odziva idealnega linearnega sensorja:
 - Začetna-končna točka
 - Metoda povprečenja



Metoda začetna-končna točka

- V tem primeru dobimo linearno karakteristiko enostavno s tem, da potegnemo premico skozi začetno in končno točko v karakteristiki obravnavanega senzorja



Metoda povprečenja

- V tem primeru dobimo linearno karakteristiko z eno izmed metod povprečenja (averageing) oz. dobrega prileganja (ang. best fit) premice na dano krivuljo
- Določimo enačbo premice, ki zadošča določenim zahtevam glede prileganja premice dani krivulji.
- Metoda najmanjših kvadratov (ang. least squares fit), pri kateri določimo enačbo premice z zahtevo po minimiziranju vsote kvadratov razlik med krivuljo in premico v izbranih točkah merilnega območja

$$MR = x_{\max} - x_{\min}$$

- Če je nelinearnost podana v %, je normirana s $FSO = y_{\max} - y_{\min}$

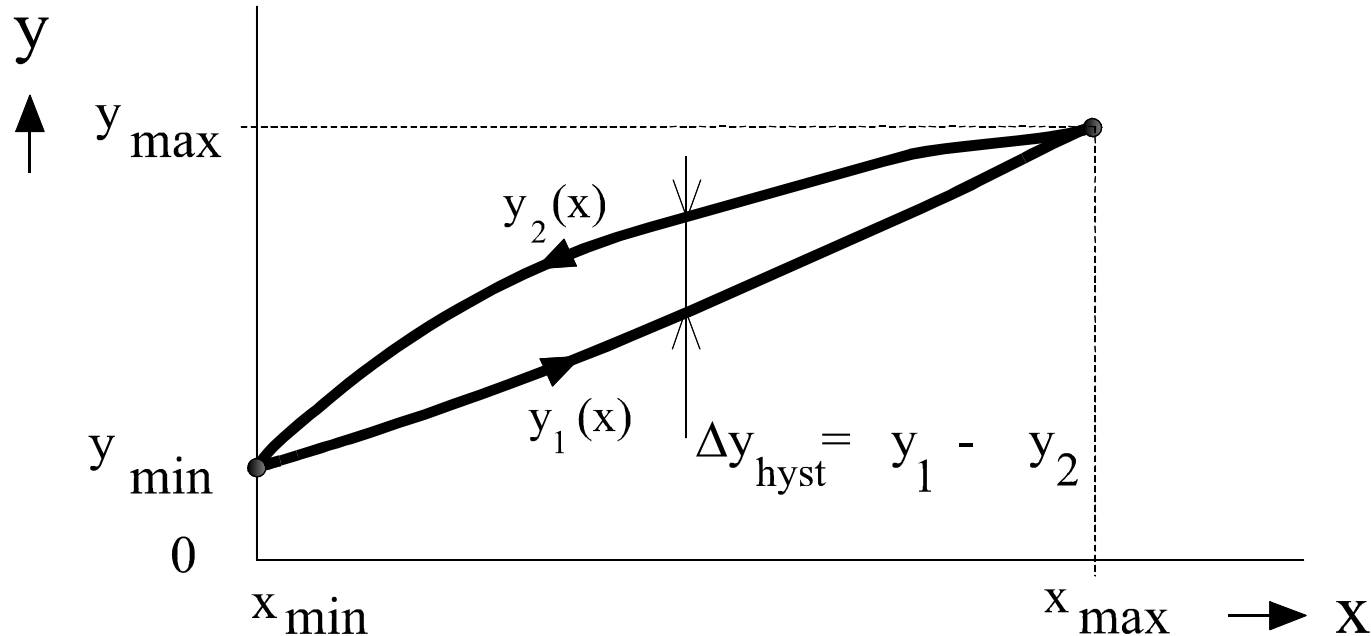
$$\Delta y_{NL}(x) \quad [\%] = \frac{y(x) - y_{lin}}{y_{\max} - y_{\min}}$$

Načini podajanja nelinearnosti

- Nelinearnost Δy_{NL} resničnega senzorja se spreminja z vrednostjo vhodne spremenljivke x , po merilnem območju MR.
- Nelinearnost zato podajajo na tri načine.
- Točna vrednost $\Delta y_{NL}(x)$ po celotnem merilnem območju MR, v obliki analitične funkcije, grafa ali tabele. V tem primeru imamo torej podane točne vrednosti nelinearnosti senzorja po celotnem merilnem obsegu.
- Povprečna vrednost Δy_{NL} na MR. imamo samo tipično vrednost oz. oceno nelinearnosti, ki jo lahko pričakujemo pri delu z danim senzorjem
- Maksimalna vrednost (worst case) nelinearnost Δy_{NL} na MR.

HISTEREZA (hysteresis) Δy_{hyst}

- Histereza y_{hyst} je razlika v odzivu senzorja, ki se pojavi pri obhodu merilnega obsega MR v **nasprotnih** smereh



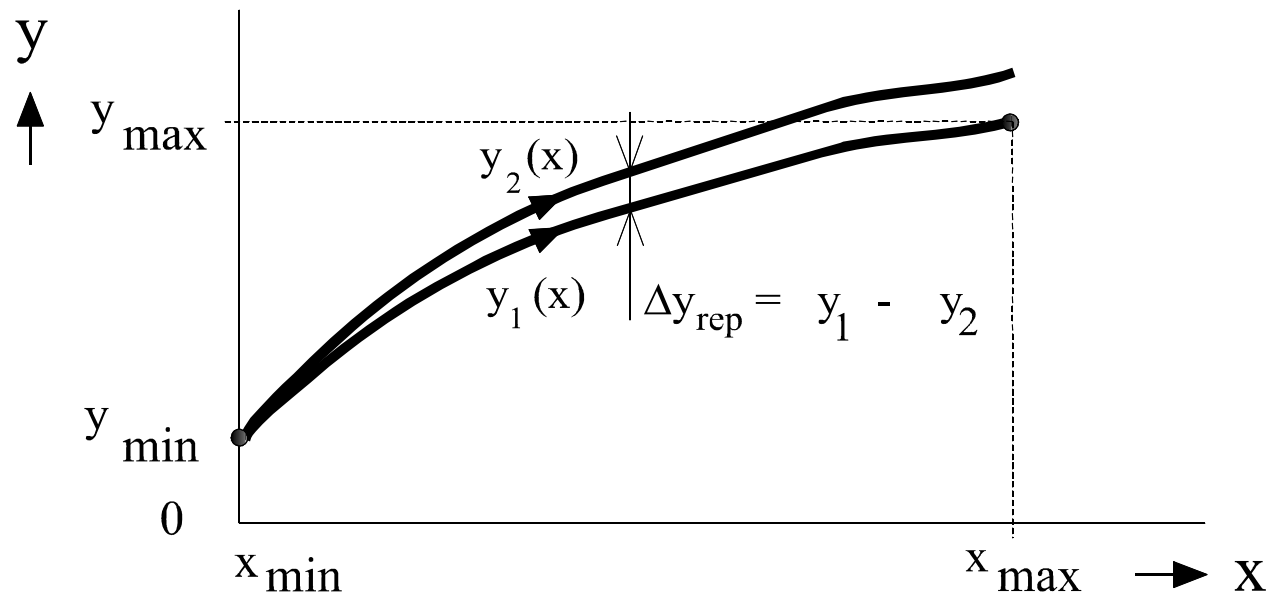
- Če je podana v %, je normalizirana na FSO.

Vzroki za histerezo

- Spremembe okolja med meritvijo (temperatura, pritisk, osvetlitev, vlaga, električna in magnetna polja)
- Spremembe v senzorju samem (utrujanje materiala, deformacije, usmerniški kontakti,).
- Vrednosti histereze proizvajalci podajajo na različne načine:
 - maksimalna vrednost - worst case,
 - povprečna vrednost ali
 - potek histereze po celotnem merilnem obsegu

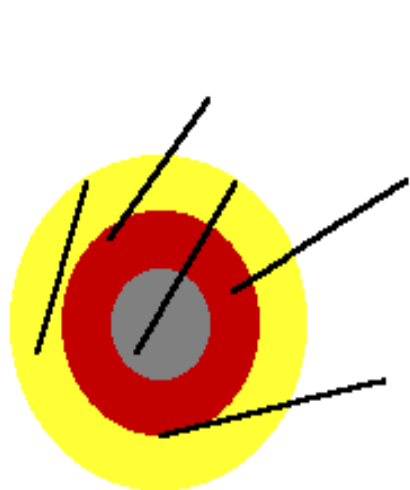
Ponovljivost (repeatability) Δy_{rep}

- Ponovljivost (repeatability) Δy_{rep} je razlika v odzivu senzorja, ki se pojavi pri ponovljenem obhodu merilnega obsega MR v **isti smeri**

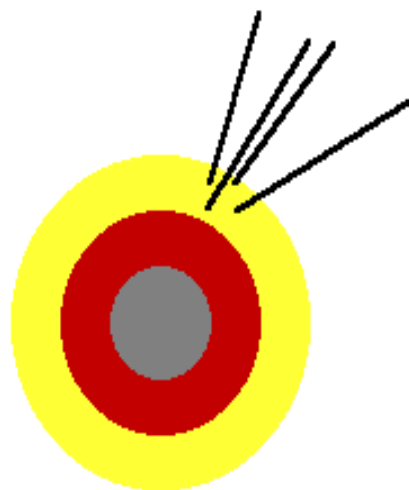


Drugo ime: **Natančnost** (ang. **precision**)
Če je podana v %, je normirana z FSO.

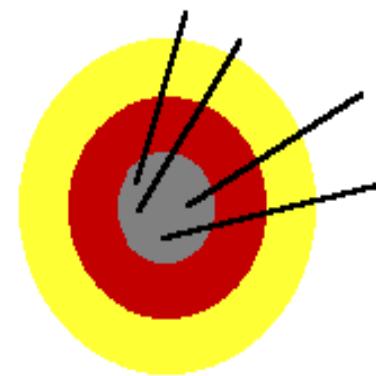
Točnost : natančnost



good accuracy
poor precision



poor accuracy
good precision



good accuracy
good precision

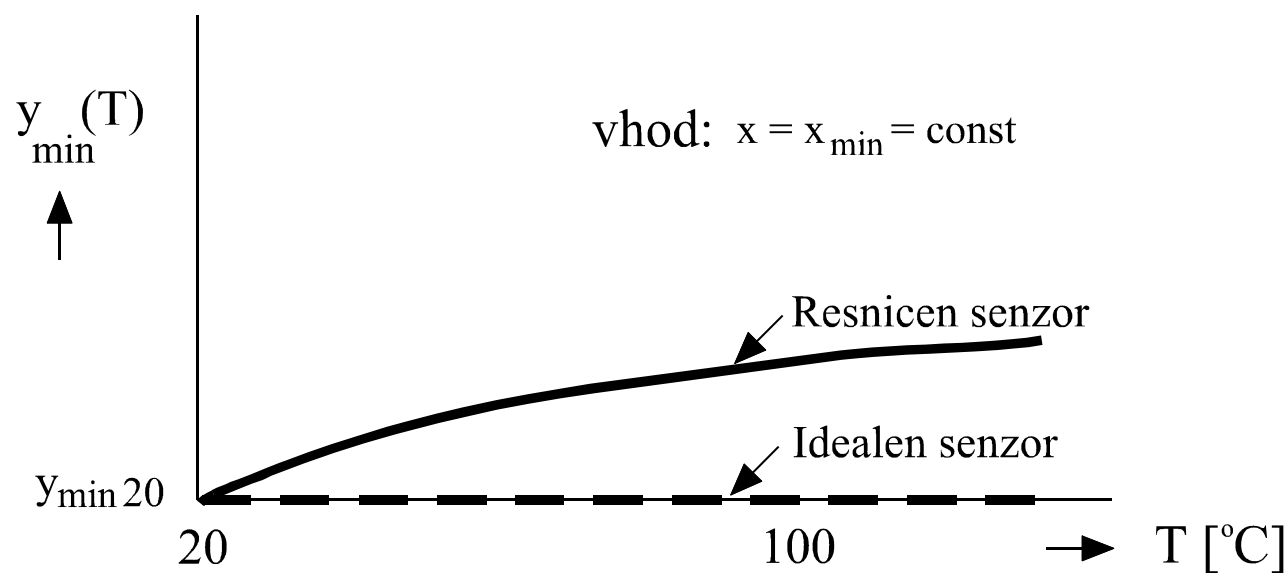
- Accuracy → točnost
- Precision → natančnost

Vzroki za slabo ponovljivost

- Spremembe okolja med meritvijo (temperatura, pritisk, osvetlitev, vlaga, električna in magnetna polja itd.)
- Spremembe v senzorju oz. senzorskem sistemu samem (utrujanje materiala, deformacije, kontakti, itd.).
- Se spreminja po MR, podana v obliki:
 - maksimalna vrednost (worst case),
 - povprečna vrednost ali
 - točen potek ponovljivosti po MR

Temperaturni ničelni odziv

- Temperaturni ničelni odziv (Offset Temperature Drift) je spreminjanje izhoda y_{\min} pri konstantnem ničelnem vhodu x_{\min} (Offset), zaradi spreminjanja temperature



- Druga imena: (Temperature Zero Drift, Temperature Zero Error).

Temperaturni ničelni odziv

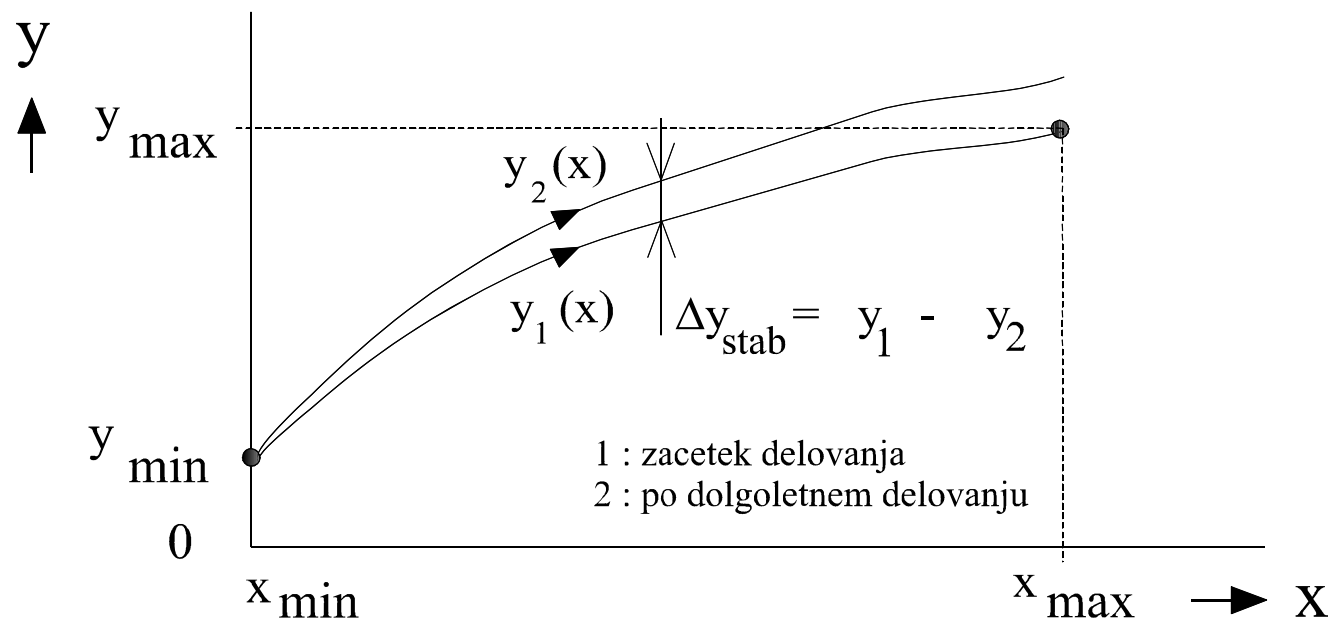
- Glavni vir težav pri aplikaciji senzorja.
- Podajajo jo kot spremembo ničelnega odziva y_{\min} (Offset) s temperaturo
 - maksimalno vrednostjo (worst case),
 - s povprečno vrednostjo
 - obliki grafa
- Včasih podajo tudi podatke za temperaturni odziv **maksimalnega izhoda** y_{\max} pri konstantnem maksimalnem vhodu x_{\max} .

Preobremenitvene lastnosti

- Ko pride med delovanjem senzorja do prekoračitve maksimalnih dopustnih vrednosti na vhodu: $x > x_{\max}$!
- Pri tem proizvajalci podajajo naslednji dve lastnosti senzorja:
 - **Dopustna preobremenitev:** maksimalna kratkotrajna vrednost vhodne (merjene) veličine $x_M > x_{\max}$, ki je lahko aplicirana na senzor v predpisanem trajanju. Pri tem se senzorske lastnosti ne smejo spremeniti za več kot je podano s predpisom proizvajalca.
 - **Čas vzpostavitve (Recovery Time):** potreben čas, da senzor po preobremenitvi spet dobi predpisane lastnosti

Dolgoročna stabilnost Δy_{stab}

- **Dolgoročna stabilnost** (Longterm Stability) Δy_{stab} : je sprememba senzorjevega odziva po dolgotrajnem, dolgoletnem delovanju
- Določena je kot **razlika** v izmerjenih karakteristikah **ob izdelavi** in **po dolgotrajnem delovanju**, pri predpisanih pogojih delovanja



Meritev dolgoročne stabilnosti

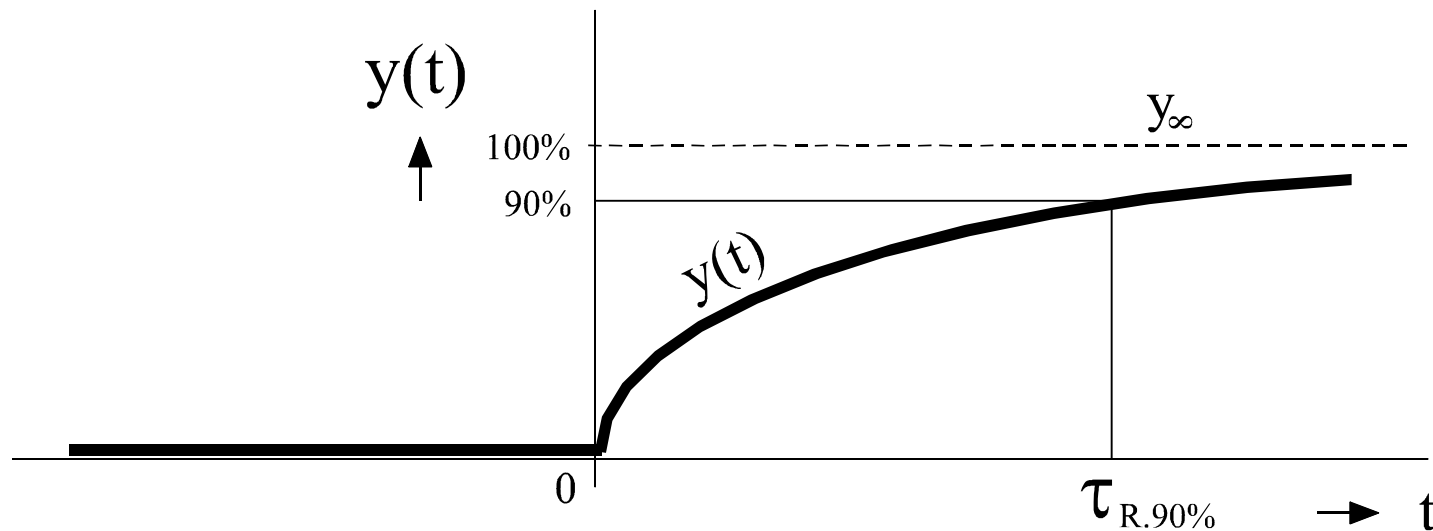
- Problematična, saj bi morali dolgo čakati z meritvijo za določitev sprememb senzorja po dolgoletnem delovanju.
- Rešitev → pospešno staranje/testiranje npr. s povišano temperaturo
- Staranje pospešimo za akceleratorijski faktor (Acceleration Factor) AF_T
- Podana je
 - maksimalna vrednost (worst case),
 - informacija v obliki grafa
- Če je Δy_{stab} podana v %, je normirana z FSO.

Pogoji okolja (Ambient Conditions):

- Dovoljene vrednosti vplivnih parametrov iz senzorjevega okolja:
(temperatura, pritisk, vlaga, koncentracije raznih agresivnih spojin, pospešek, rotacija, vibracija, šoki, elektromagnetna polja).

Odzivni čas (Response Time) t_R

- Odzivni čas $t_{R90\%}$ je čas, ki je potreben, da po nenadni spremembi vhoda izhodni signal $y(t)$ doseže 90% končne vrednosti.



- Druga imena:
 - zakasnilni čas (Delay Time) t_D
 - čas vzpona (Rise Time) t_R
 - čas upada (Fall Time) t_F

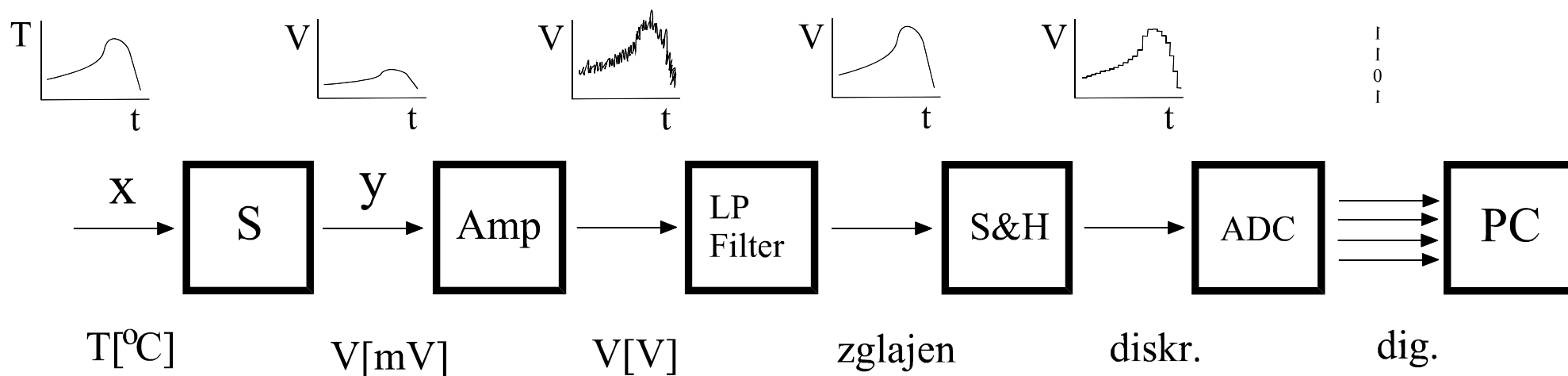
Odzivni čas (Response Time) t_R

- Drugi odzivni časi:
 - $t_{R98\%}$ → potreben čas, da izhod doseže 98% končne vrednosti.
 - $t_{R63\%}$ → čas, v katerem se izhod spremeni za 63% oz. $1/e$
 - $t_{R5/95\%}$ → čas, potreben za spremembo odziva od 5% na 95%
- V primeru AC vhodnih signalov senzorja, bo izhod senzorja sledil brez opaznih zakasnitev do frekvenc

$$f \leq 1/T$$

Tipičen senzorski sistem

- Vhodni senzorski element in
- Elektronska vezja za obdelavo signala (Signal Conditioning).

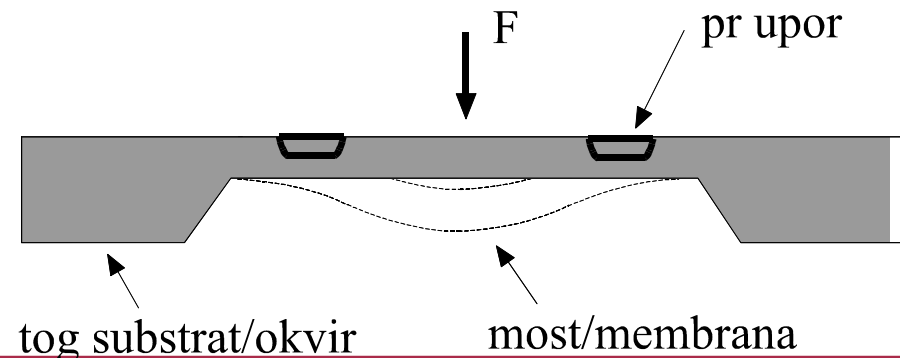
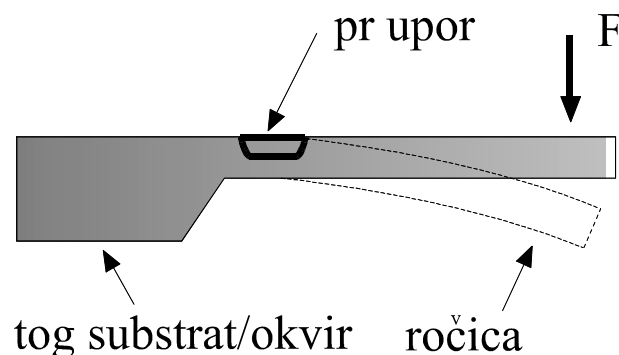


Elektronske komponente in senzorji

Piezorezistivni Senzorji

Piezorezistivni (PR) senzorji

- Pri svojem delovanju izkoriščajo piezorezistivni (PR) efekt.
- PR efekt podaja odvisnost specifične upornosti materiala od mehanske napetosti v materialu.
- Bistveni del strukture PR senzorja je mehansko gibljivi del senzorja z vdelanim piezorezistivnim uporom za generiranje signala. Oblike mehansko gibljivega dela senzorja:
 - ročica (ang. cantilever)
 - most (ang. bridge)
 - membrana (ang. membrane, diaphragm)



Piezorezistivni efekt

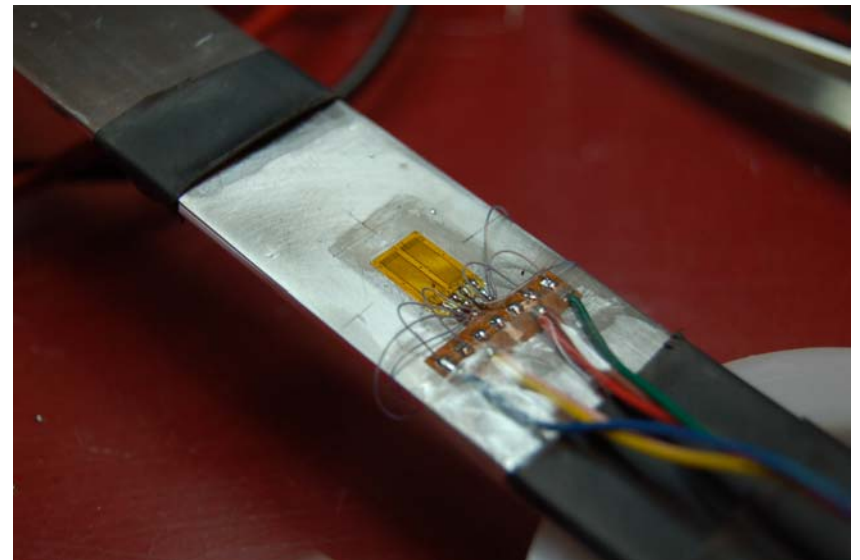
- Delovanje PR senzorja je osnovano na PR efektu:
- Vhodna veličina senzorja je v tem primeru mehanska obremenitev, ki povzroči mehansko napetost v PR materialu.
- Zaradi PR efekta je posledica obremenitve sprememba upornosti, ki jo merimo.
- Pri znani karakteristiki PR senzorja lahko tako določimo velikost vhodne mehanske obremenitve.
- PR efekt je odvisen od materiala, kristalografske orientacije, temperature in drugih parametrov.
- V nadaljevanju si bomo ogledali najprej nekaj osnovnih lastnosti v obremenjenih piezoresistivnih materialih, nato pa bo sledila obravnava piezoresistivnega efekta

Komponente, sestavi in senzorji

Piezorezistivni merilnik deformacije

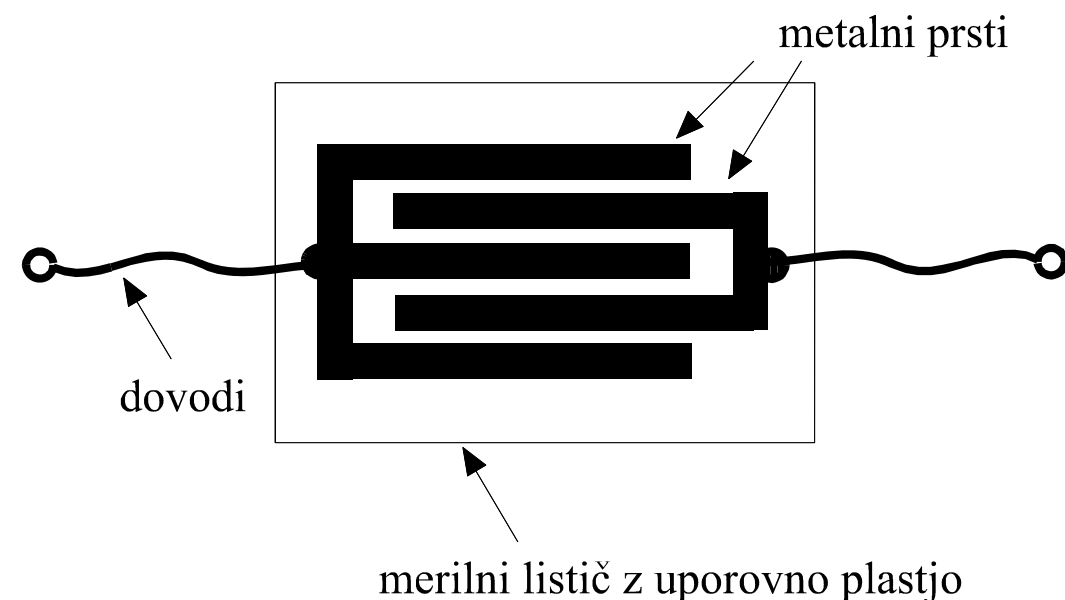
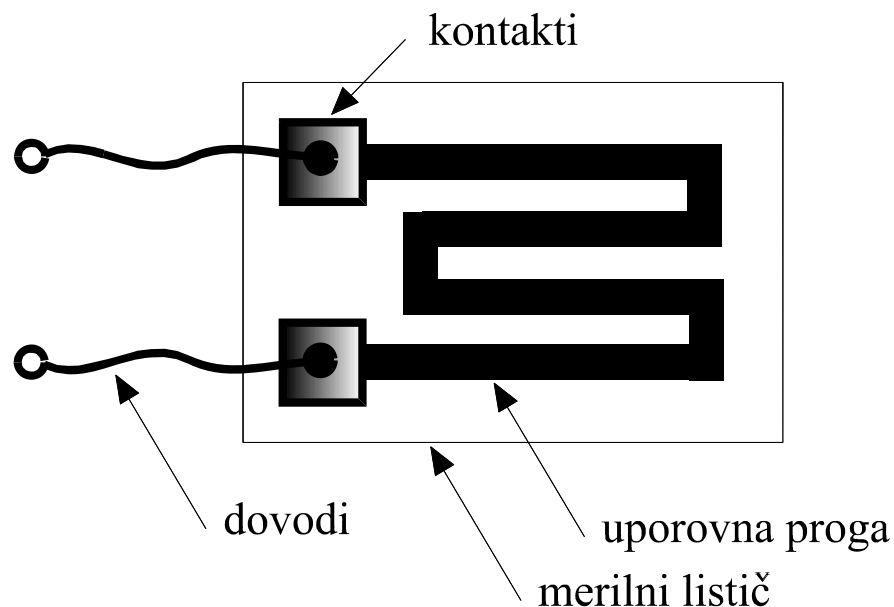
Merilniki deformacije (Strain Gauge)

- Senzor, s katerim merimo mehanske deformacije (ang. Strain)
- Mehanska deformacija ε je definirana kot relativna sprememba dimenzije obremenjenega telesa
$$\varepsilon = \Delta l / l$$
zaradi mehanske obremenitve (ang. Stress)
$$\sigma = F / A.$$
- Uporaba: mehanika, gradbeništvo, strojegradnja, letalstvo, avto. industrija
- meritev deformacije med obratovanjem (lopatične turbine, krila med letom, stebra mostu, gredi motorja)



Merilniki deformacije (Strain Gauge)

- Merilnik deformacije je izveden kot merilni listič z vdelanim uporom
- Zaradi mehanske deformacije se spremeni upornost upora. Kot bomo videli, lahko iz izmerjene spremembe upornosti, ob znani karakteristiki senzorja, določimo deformacijo.
- Iz deformacije lahko posredno, določimo še:
- silo, navor, vrtilni navor, strižno obremenitev, pospešek ...

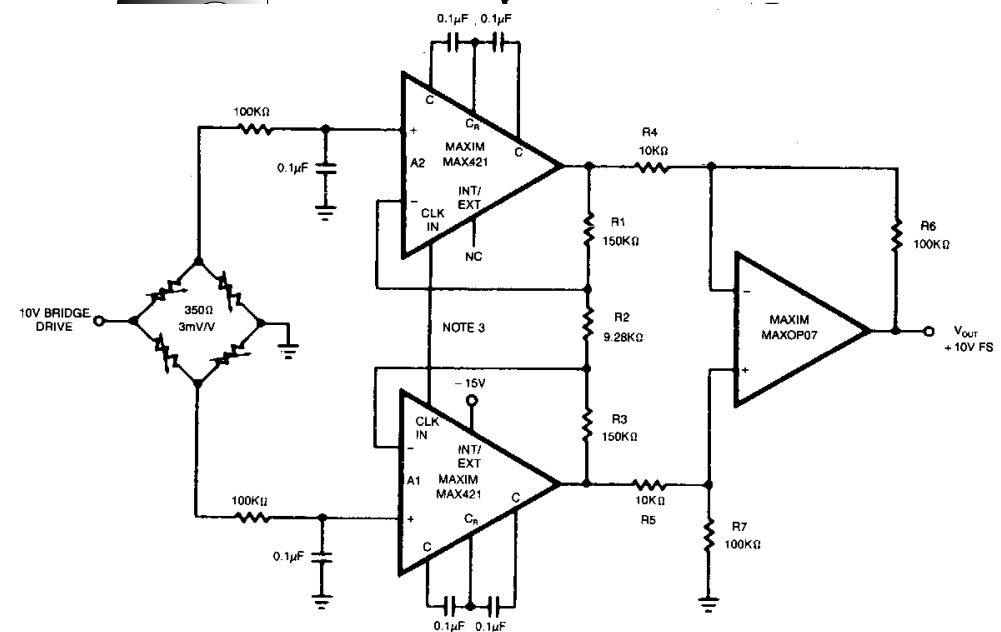
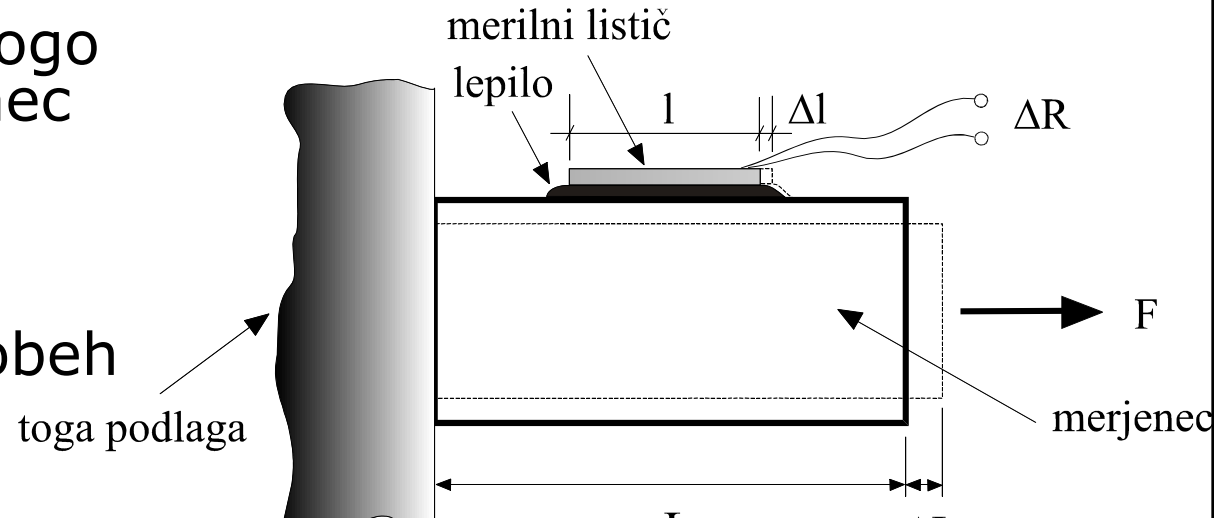


Merilniki deformacije (Strain Gauge)

- Merilni listič dolžine l se toga (fiksno) prilepi na merjenec dolžine L .
- Merilni listič se deformira hkrati z merjencem.
- Deformacija ϵ je torej v obeh primerih enaka:

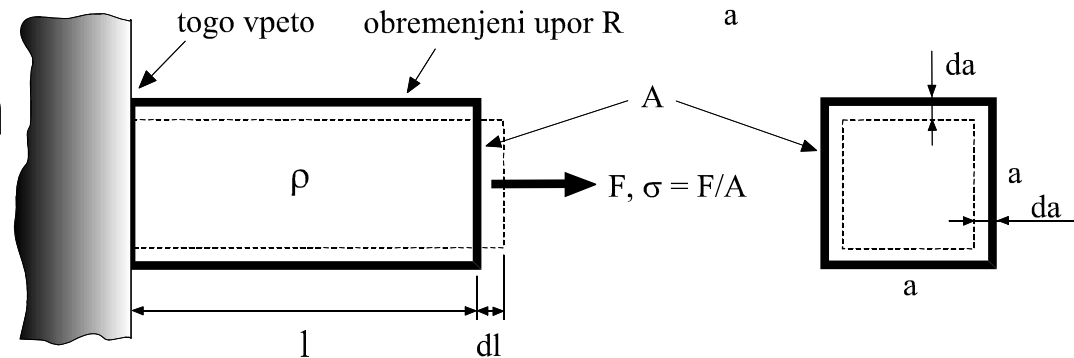
$$\epsilon = \Delta L / L = \Delta l / l .$$

- Posledica deformacije ϵ je sprememba upornosti upora ΔR na merilnem lističu.
- Izmerimo spremembo upora ΔR in
- Iz znane karakteristike danega merilnega lističa določimo deformacijo lističa in merjenca



Faktor merilnika (Gauge Factor) G_f

- Podaja zvezo med spremembo upornosti v obremenjenem uporu in deformacijo.



$$\frac{dR}{R} = G_f \cdot \frac{dl}{l}$$

Faktor merilnika (Gauge Factor) G_f

- Opazujmo en sam obremenjen upor R
- Upor R naj bo volumski upor:
 - s specifično upornostjo ρ in
 - kvadratnega preseka $A = a^2$.
- Upor se zaradi obremenitve v splošnem podaljša, presek upora pa se zmanjša.
- Deformacija $\varepsilon = \Delta l/l$ (relativna sprememba dolžine upora)
- Zaradi raztezka obremenjenega upora za Δl se zmanjša presek upora Δa

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$dR = d\rho \cdot \frac{l}{A} + \rho \cdot \frac{dl}{A} - \rho \cdot \frac{l}{A^2} \cdot dA$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

$$\frac{dR}{R} = G_f \cdot \frac{dl}{l}$$

Faktor merilnika (Gauge Factor) G_f

- dR obremenjenega deformiranega upora je sestavljena iz treh prispevkov:
- zaradi spremembe $d\rho$, dl in dA .
- dA/A in $d\rho/\rho$ izrazili v odvisnosti od deformacije $\varepsilon = dl/l$.

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

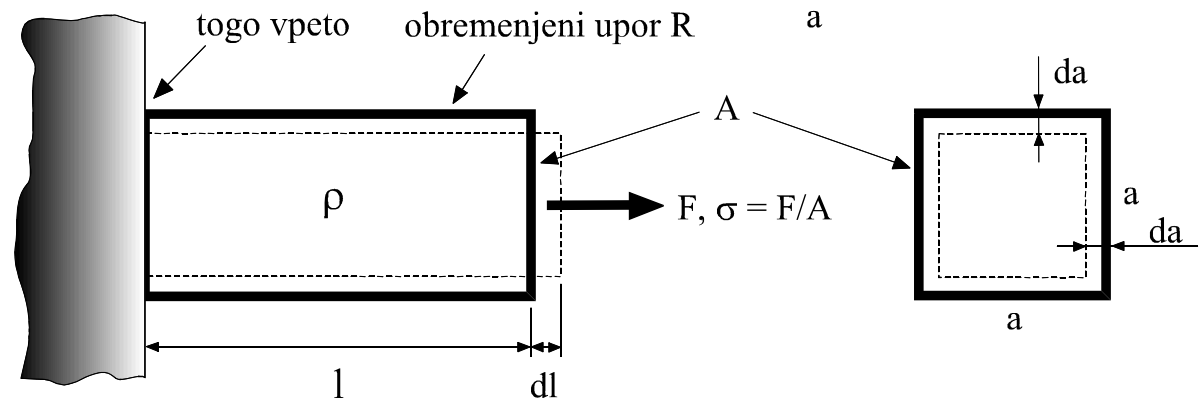
Poissonovo razmerje

- Pri deformaciji se nestisljivo telo raztegne za dl , obenem se skrči v preseku za da .
- Zveza med dl in da je Poissonovo razmerje (ν)

$$V = A \cdot l = \text{const}$$

$$dV = dA \cdot l + A \cdot dl = 0$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dl}{l}$$



Poissonovo razmerje

$$\frac{dl}{l} = -\frac{dA}{A} = -\frac{d(a^2)}{a^2} = -2\frac{da}{a}$$

- Negativni predznak → spremembi dl in da zaradi ohranitve celotnega volumna vedno nasprotnega predznaka
- Resnični materiali so vsi v določeni meri stisljivi zato gornja trditev drži približno.
- Za boljši opis vpeljemo Poissonovo razmerje (Poisson ratio) ν : Razmerje med prečno (da/a) in vzdolžno (dl/l) deformacijo materiala zaradi obremenitve

$$\nu = -\frac{\left(\frac{da}{a}\right)}{\left(\frac{dl}{l}\right)}$$

kvadraten presek



Poissonovo razmerje


- Negativen predznak je dodan zato, da je Poissonovo razmerje pozitivno število.
- Tipična velikost Poissonovega razmerja [0.5 ... 2] .
- $\nu = 0.5 \rightarrow$ idealna nestisljiva tekočina,
- $\nu \approx 2 \rightarrow$ elastični material, ki se jim volumen pri obremenitvi zaradi elastičnosti močno zmanjša.

$$\nu = -\frac{\left(\frac{da}{a}\right)}{\left(\frac{dl}{l}\right)}$$

$$\frac{dA}{A} = +2\frac{da}{a} = -2\nu\frac{dl}{l}$$

Prispevek piezoresistivnosti

- Enostaven primer longitudinalne obremenitve z mehansko napetostjo v longitudinalni smeri σ_l .
- π_l longitudinalni piezoresistivni koeficient.
- V elastičnih materialih pri ne prevelikih obremenitvah je zveza med obremenitvijo σ in deformacijo $\varepsilon = dl/l$ linearna (Hooke-ov zakon).


$$\sigma_l = E_y \varepsilon \qquad \frac{d\rho}{\rho} = \pi_l \sigma_l = \pi_l E_y \frac{dl}{l}$$

Faktor merilnika (Gauge Factor) G_f

- Faktor merilnika G_f podaja osnovno zvezo med relativno spremembo upornosti merilnika dR/R in deformacijo $\varepsilon = dl/l$:

$$\begin{aligned}\frac{dR}{R} &= \pi_l E_y \frac{dl}{l} + \frac{dl}{l} + 2\nu \frac{dl}{l} \\ &= (\pi_l E_y + 1 + 2\nu) \frac{dl}{l} \\ &= G_f \frac{dl}{l}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{dR}{R} &= G_f \frac{dl}{l} = G_f \varepsilon \\ \varepsilon &= \frac{1}{G_f} \frac{dR}{R}\end{aligned}$$

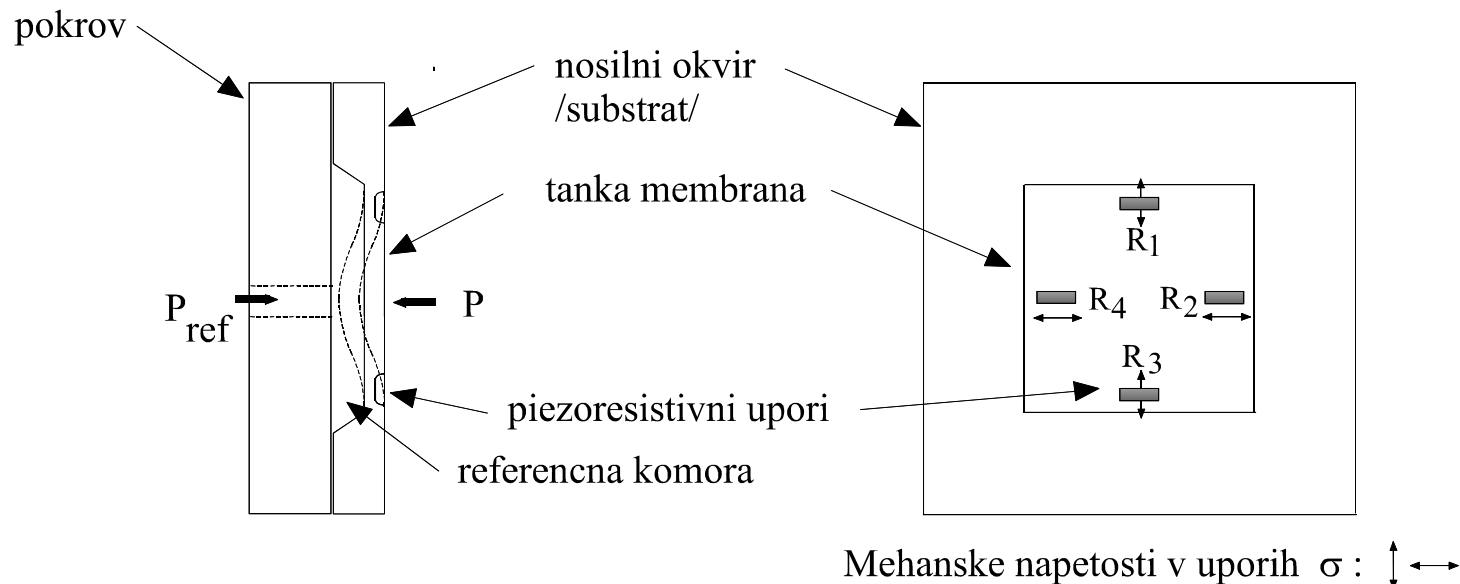
Faktor merilnika (Gauge Factor) G_f

- G_f predstavlja občutljivost senzorja!
- Druga imena: K-faktor, $S \rightarrow$ občutljivost (Sensitivity)
- Velikost G_f je odvisna od materiala upora:
 - nepiezorezistivni materiali $\rightarrow G_f \approx 2 \dots 5$ (kovine)
 - piezorezistivni materiali $\rightarrow G_f \approx 50 \dots 200$ (polprevodniki)

$$\frac{dR}{R} = G_f \cdot \frac{dl}{l}$$

Piezoresistivni senzor tlaka

- Piezoresistivni senzor tlaka je sestavljen iz tanke silicijeve membrane na debelejšem nosilnem okvirju, v katero so vdeleni štiri piezoresistivni upori, vezani v Wheatstoneov mostič zaradi temperaturne kompenzacije
- Debelina nosilnega okvirja je okrog 400 μm , debelina tanke membrane pa okrog 20 μm .
- Polprevodniški piezoresistivni upori so izvedeni z difuzijo ali implantacijo primesi.



PR senzor tlaka

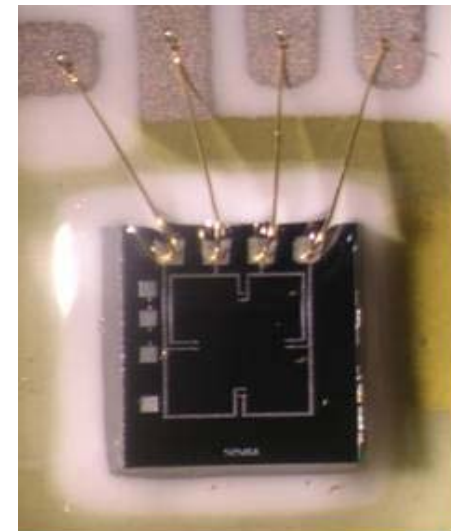
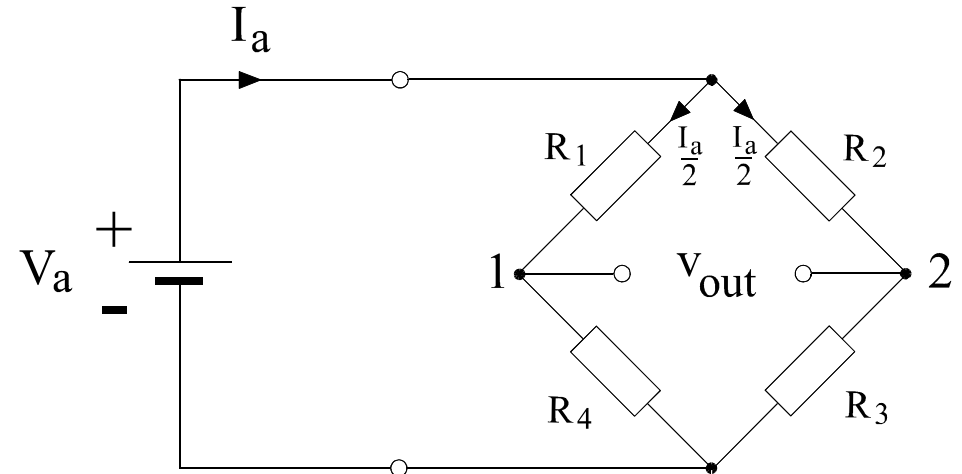
- Ko dovedemo vhodni oz. merjeni(aplicirani) tlak P_a nad membrano, se membrana deformira.
- Zato se pojavijo mehanske napetosti s v piezorezistivnih uporih $R1 - R4$, ki so vedno usmerjene od roba membrane proti sredini
- Zaradi tega pride do spremembe upornosti teh uporov.
- Z meritvijo upornosti uporov, pri znani karakteristiki sensorja, lahko določimo merjeni tlak P_a .
- **Absolutni** senzor tlaka:
 - Membrana je običajno z druge strani hermetično zaprta s pokrovom. Volumnu med pokrovom in membrano pravimo **referenčna komora**
- **Relativni** senzor tlaka.
 - Če imamo dovod referenčnega tlaka P_{ref} v referenčno komoro, deformacijo membrane ustvarja le razlika obeh tlakov
$$P = P_a - P_{ref}$$
relativno proti referenčnemu tlaku P_{ref} .
 - Če je membrana z druge strani nepokrita oz. dostopna atmosferskemu zraku, meri senzor tlak relativno proti tlaku normalne zračne atmosfere

Mostična vezava PR senzorja tlaka

- Mostič s 4 upori:
 - Linearni odziv na spremembe upornosti $\pm\Delta R$
 - temperaturna kompenzacija v
 - nizek ničelni izhod (Offset), ki je v idealnem mostiču kar enak 0, v resničnem pa majhen.
- Pri uporovnem delilniku:
 - izhod bolj nelinearen
 - ničelni izhod (Offset) velik.

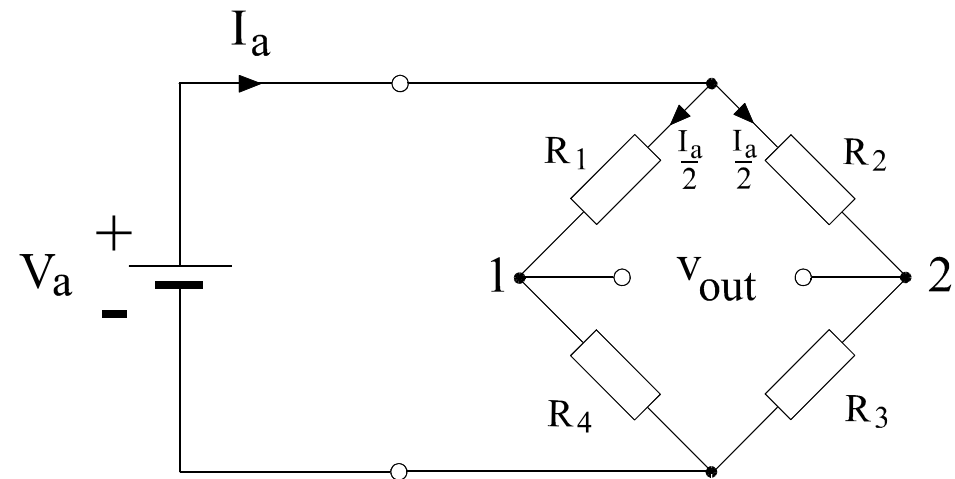
Mostična vezava PR senzorja tlaka

- PR senzor tlaka iz štirih piezoresistivnih uporov na tanki silicijevi membrani, ki so zaradi temperaturne kompenzacije vezani v Wheatstoneov mostič.
- Upori so po vrednostih enaki, ločijo se **postavitvi** na membrani oz. glede na smer mehanske napetosti.



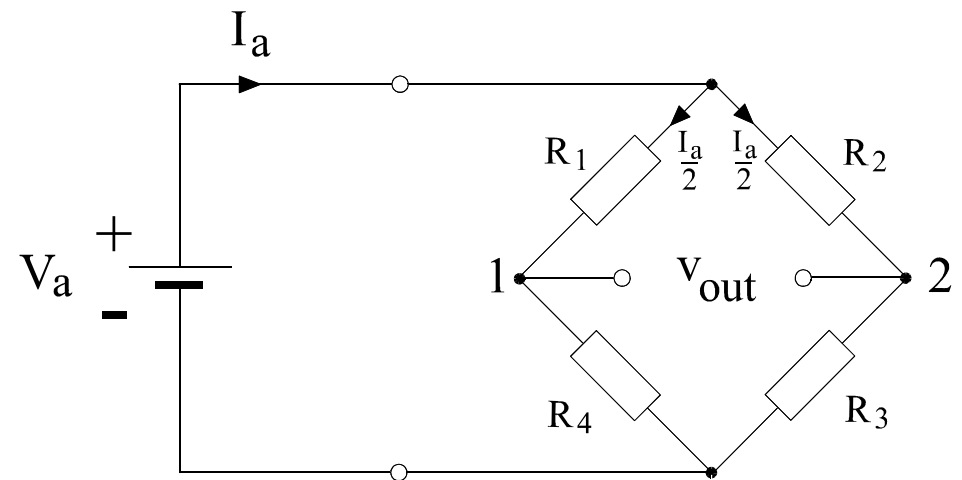
Neobremenjen senzor ($P = P_a - P_{ref} = 0$)

- Ni deformacije membrane → ni mehanskih napetosti v piezoresistivnih uporih, → ni PR efekta → ni sprememb upornosti.
- Vsi upori imajo tedaj izhodiščno upornost R :
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$
- Mostič je uravnovešen →
$$V_{out} = V_1 - V_2 = 0.$$
- Ker so vsi štirje upori enaki, je nadomestna upornost celotnega mostiča enaka R → tok mostiča $I_a = V_a/R$.
- Zaradi simetrije → tok posamezne veje enak $I_a/2$



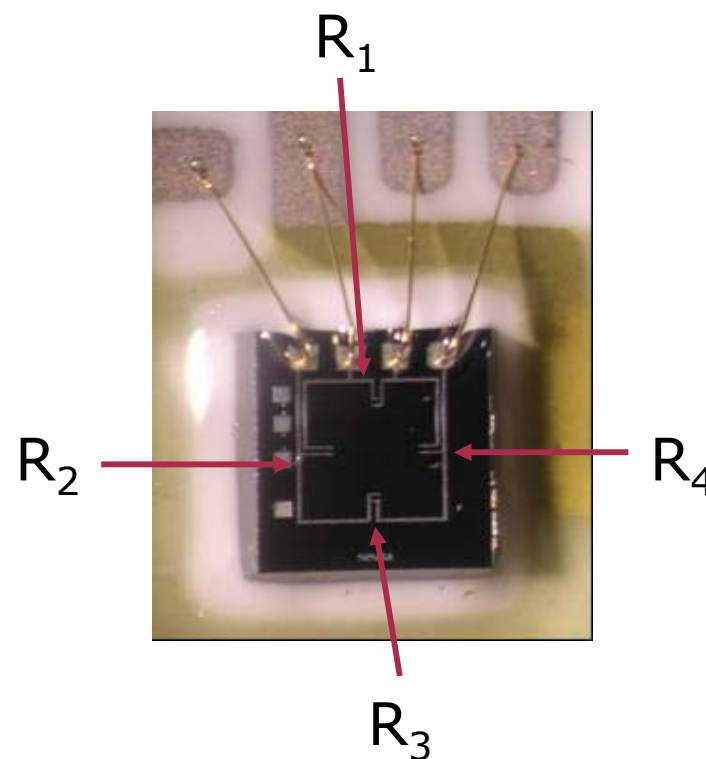
Temperaturna kompenzacija

- Če se spremeni temperatura, se vsi upori spremenijo enako, simetrija vej mostiča se ohrani → izhod je še vedno enak 0.
- Pri spremembi temperature se torej izhod mostiča ne spremeni in je torej **vezje neodvisno od temperature** (temperaturno kompenzirano)



Obremenjen senzor ($P = P_a - P_{ref} > 0$)

- Membrana se deformira
- Pojavijo se mehanske napetosti v uporih \rightarrow PR efekt $\rightarrow \Delta R$
- Upora (R_1, R_3) sta obremenjena transverzhalno - mehanska napetost σ je pravokotna na smer toka I .
- Druga dva upora (R_2, R_4) sta obremenjena longitudinalno - mehanska napetost σ je vzporedna na smer toka I .
- Želimo, da so razlike ΔR na istoležnih uporih enakega, na nasprotnoležnih pa nasprotnega predznaka:
 - R_1, R_3 : transverzhalna (σ pravokotna na I) \rightarrow
 $R_1 = R_3 = R - \Delta R$
 - R_2, R_4 : longitudinalna ($\sigma \parallel I$) \rightarrow
 $R_2 = R_4 = R + \Delta R$



Obremenjen senzor ($P = P_a - P_{ref} > 0$)

- Simetrije vej ni
- Mostič ni uravnovešen
- Izhod mostiča $\rightarrow v_{out} \neq 0$.
- Naj bo izhod senzorja neobremenjen, torej da izhod senzorja v_{out} z dobrim voltmetrom, z visoko vhodno upornostjo.
- Upornost posameznih vej ($2R$) in zato celotnega mostiča (R) se ne spremeni.
- Zato so pri obremenitvi nespremenjeni tudi toki mostiča ($I_a = V_a/R$) in obeh vej ($I_a/2$)

Obremenjen senzor ($P = P_a - P_{ref} > 0$)

$$V_1 = \frac{I_a}{2} (R + dR) \quad , \quad V_2 = \frac{I_a}{2} (R - dR)$$

$$V_{out} = V_1 - V_2 = I_a dR = V_a \frac{dR}{R}$$

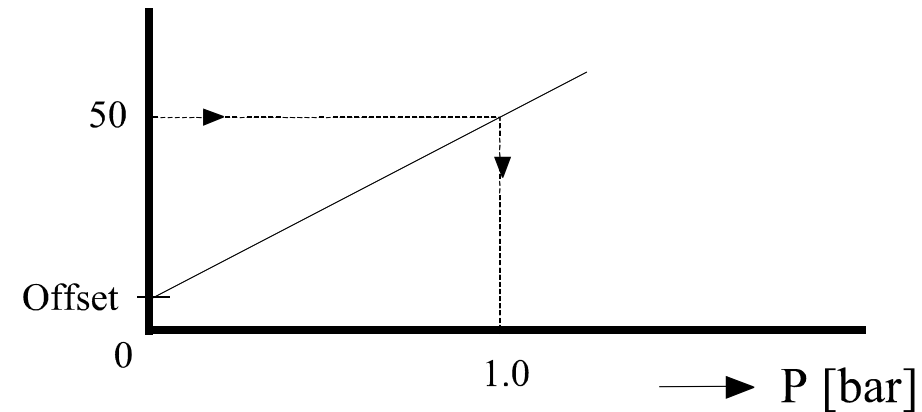
- Kot smo videli pri obravnavi PR, je obremenjen silicij PR material in je relativna sprememba upornosti obremenjenega upora dR/R določena z mehansko obremenitvijo s in PR koeficientom p

$$V_{out} = V_a \pi K P$$

Karakteristika PR senzorja tlaka

- Zaradi privzetih predpostavk in poenostavitev pri izpeljavi smo dobili idealen linearni odziv oz. linearen senzor.
- Resnični senzorji kažejo bolj ali manj nelinearen odziv in imajo pogosto že pri ničelnem vhodu ($P = 0$) neko od 0 različno vrednost izhoda, ki jo imenujemo ničelni izhod (Offset). Vzroki za nastanek Offseta bodo obravnavani kasneje.

v_{out} [mV]



Tlačna občutljivost S_p (ang. Pressure Sensitivity)

- Podana glede na način napajanja senzorja: napetostno in tokovno

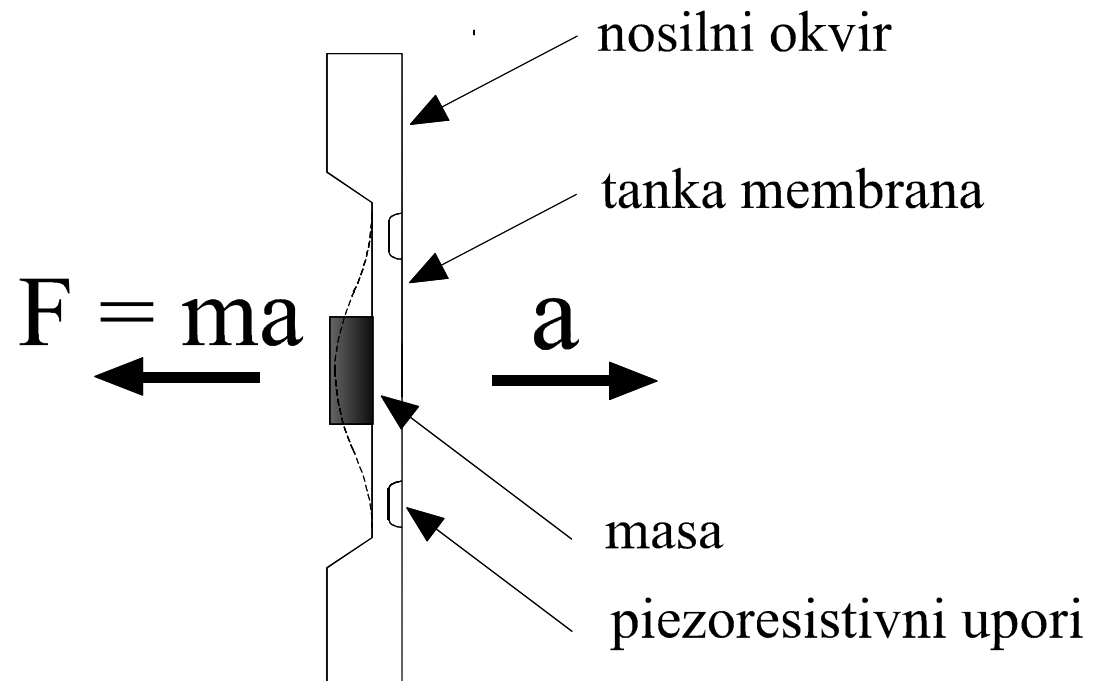
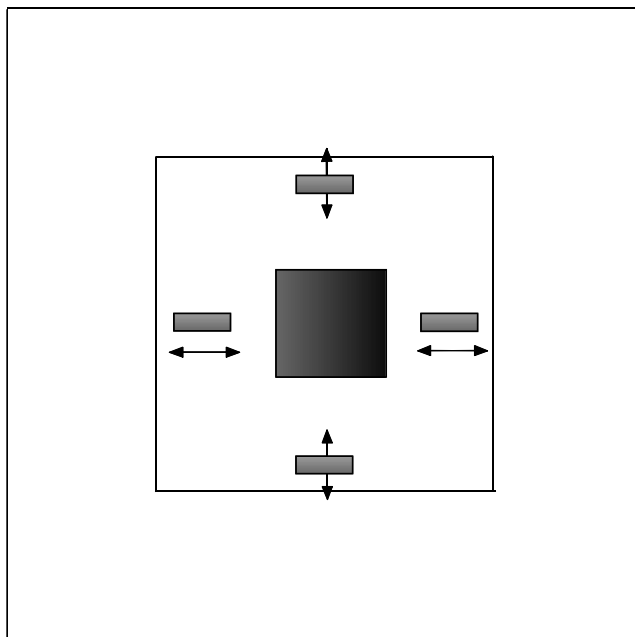
S_P - napetostno napajanje senzorja tlaka

- Občutljivost je dana kot relativna sprememba izhodne napetosti v_{out} zaradi spremembe vhodnega tlaka P , pri konstantni napetosti V_a .

$$S_P \Big|_{V_a} = \frac{1}{V_a} \frac{dv_{out}}{dP} = \pi K$$

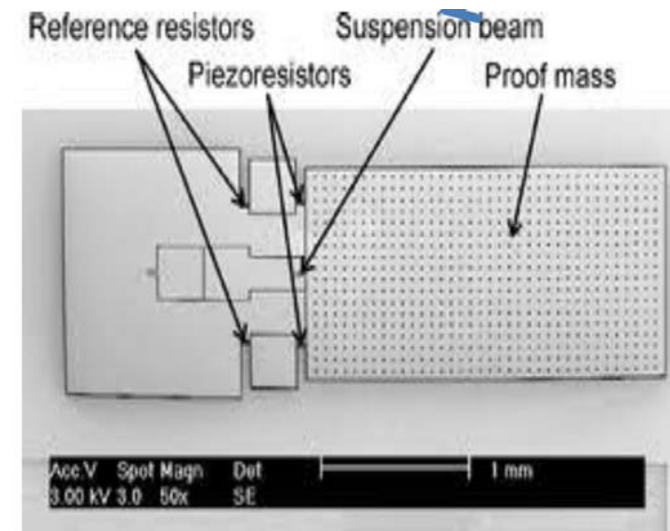
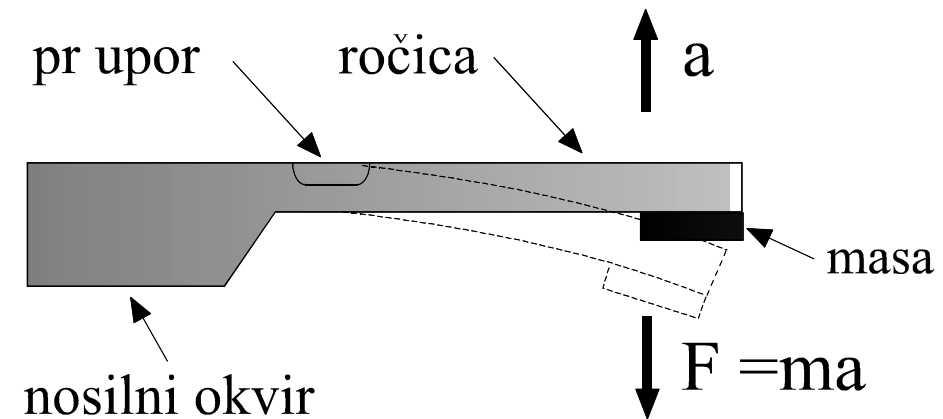
PR akcelrometer (senzor pospeška)

- Enaka strukturo kot senzor tlaka → membrana s štirimi piezoresistivni upori, vezanimi v mostič.
- Na sredini membrane je dodana masa (m)



PR akcelerator (senzor pospeška)

- Klasična izvedba:
- PR upori so nadomeščeni z lepljenimi senzorji deformacije (Strain Gauge).
- Problem relativno velikih odstopanj v lastnostih posameznih senzorjev deformacije, ki so tudi večji in težji od integriranih, tako da so v splošnem boljše mikrosenzorske izvedbe na osnovi mikroobdelave



PR akcelerometer (senzor pospeška)

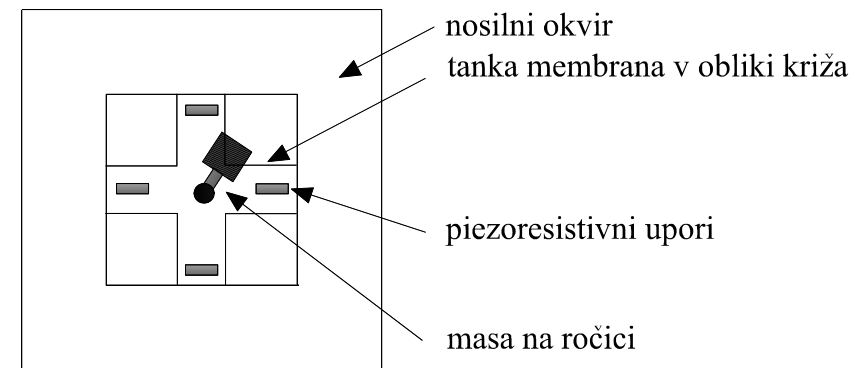
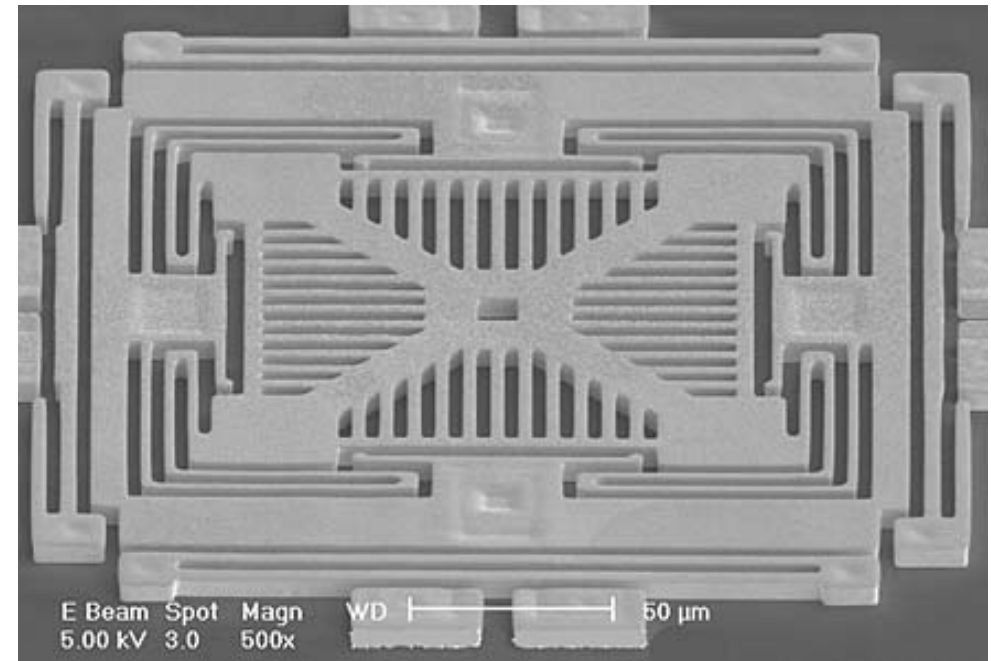
- Če senzor pospeška izpostavimo delovanju nekega pospeška a , bo zaradi vztrajnosti, kot podaja zakon o akciji in reakciji, na membrano delovala sila v nasprotni smeri $F = ma$.
- Membrana se zato deformira, pojavi se mehanska napetost v membrani in upornosti PR uporov se spremenijo, kot je bilo obravnavano že pri PR senzorjih tlaka.
- Pojavi se napetost na izhodu mostiča v_{out} , ki je v širokem področju pospeškov linearno odvisna od pospeška

$$v_{out} = K * a$$

- **Uporaba:** airbag

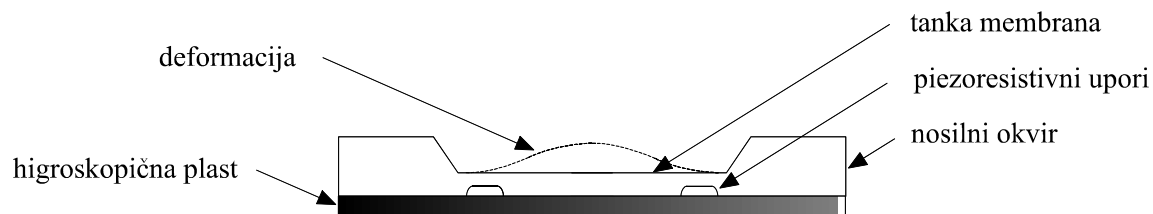
3 osni PR akcelerator (3 axis accelerometer)

- Določa hkrati vse tri komponente vektorja pospeška, v smeri glavnih koordinatnih osi izbranega koordinatnega sistema.
- Sestavljen iz Si membrane v obliki križa s štirimi PR upori, v sredini je dodana masa na ročici.
- Vsak upor deluje samostojno (ne mostič)



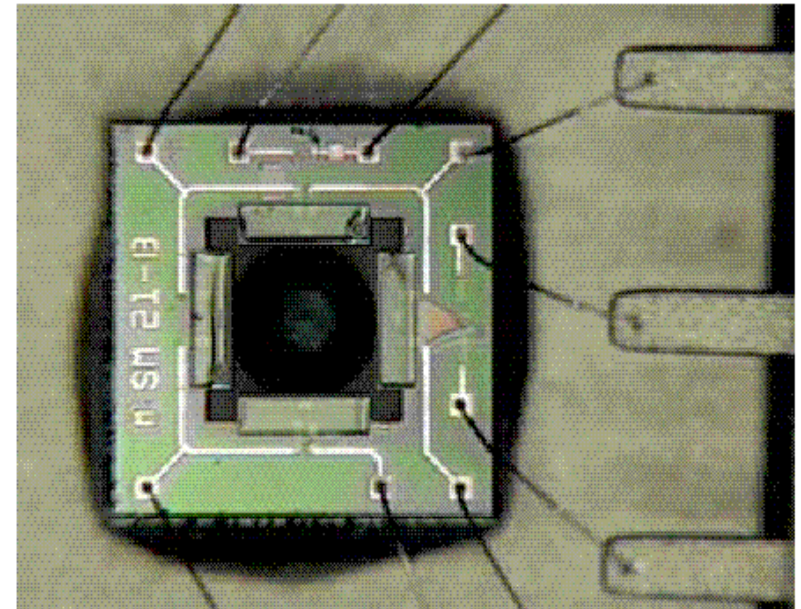
PR senzor vlage (RH sensor)

- Struktura senzorja vlage (ang. relative humidity) je enaka kot pri PR senzorju tlaka
- Na membrano dodana higroskopična plast, ki absorbira molekule vode.



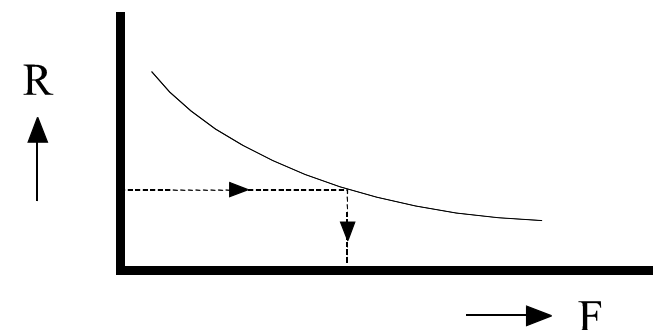
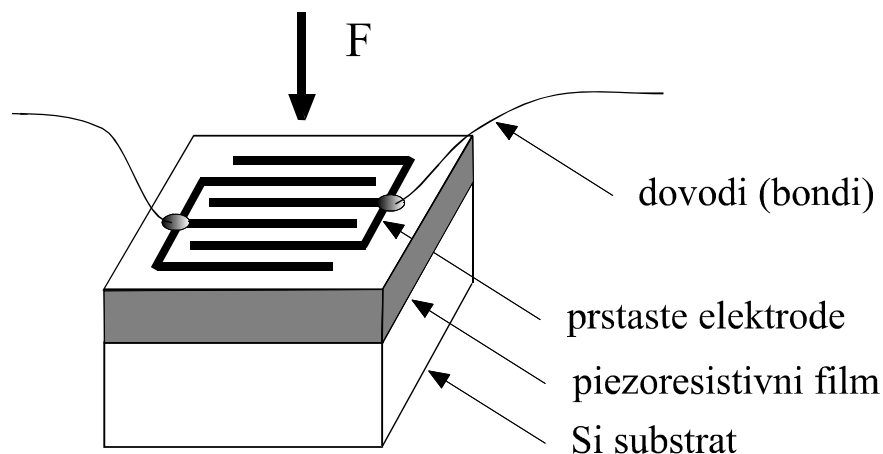
Higroskopična plast vsrka vlago, →
volumen plasti se poveča → pojavi se
mehanska napetost v plasti → plast
se raztegne → deformacija
membrane → sprememba upornosti

[HMX-2000](#)



PR senzor dotika (touch, tactile sensor)

- Na substratu (ploščica Si) je nanesena PR tanka plast in na njej izdelane prstaste elektrode.
- Izdelan z MEMS, debeline $\approx 300 \mu\text{m}$
- Uporaba v robotiki (umetne roke, koža)
- Delovanje: če narašča sila dotika $F \rightarrow$ bolj se zaradi PR efekta zmanjša upornost PR plasti \rightarrow zmanjša se upornost senzorja R .
- Obstaja v 2D mrežni izvedbi \rightarrow ploskovna porazdelitve sil

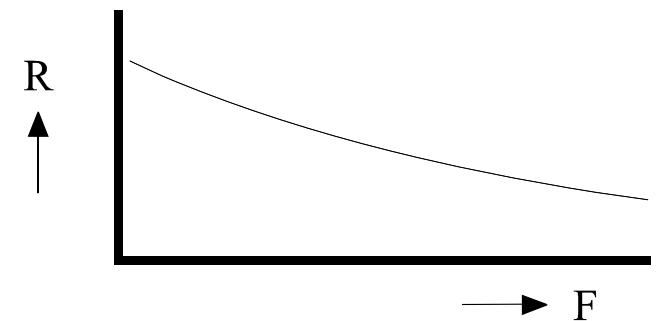
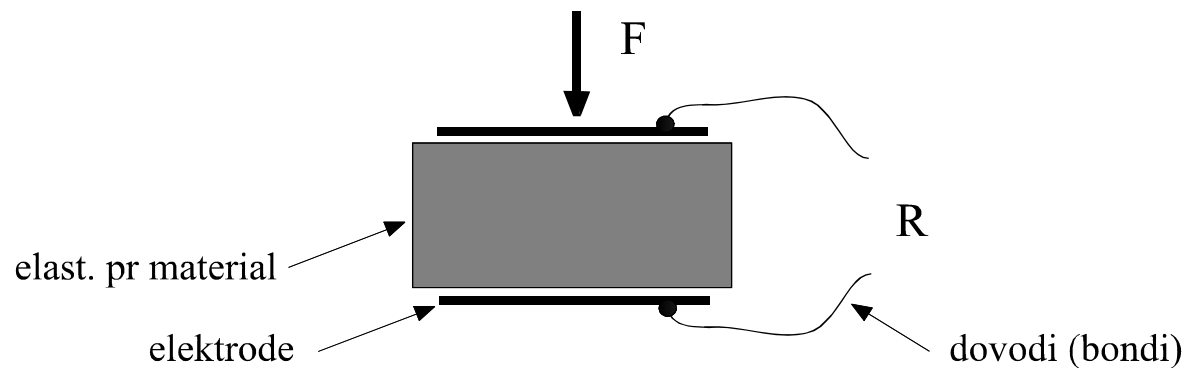


Elastični uporovni materiali

- Elastični uporovni (elastic resistive) materiali
Tu ni prisoten osnovni piezoresistivni efekt
- Upornost materiala spremeni zaradi obremenitve
- **Uporovni elastomeri**: V elastičen, električno neprevoden material (silikonski kit/guma) dodamo drobna prevodna zrnca ali vlakna (zrna ogljika).

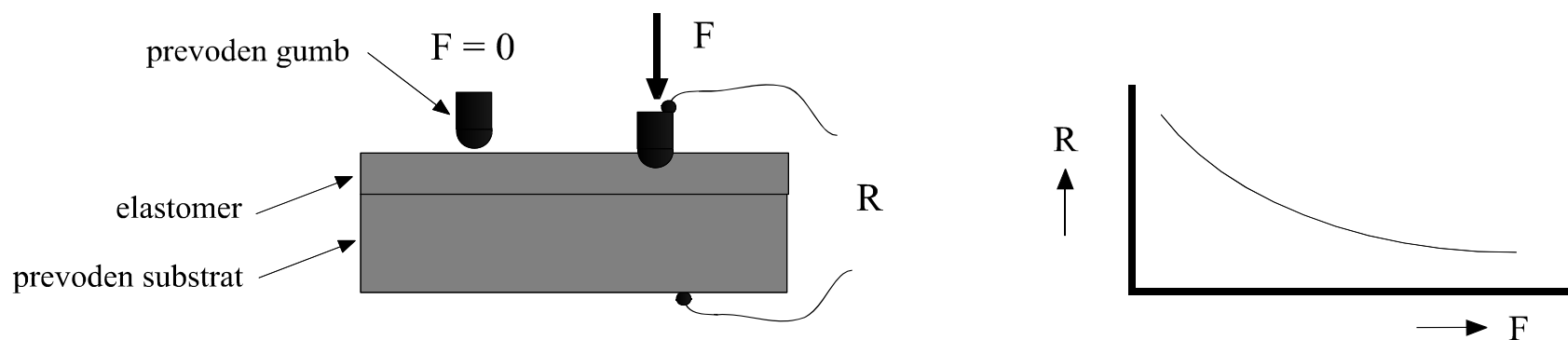
Elastični uporovni senzor dotika

- Senzor obremenimo s silo dotika F ,
- Elastični uporovni material senzorja se stisne,
- Prevodna zrnca se bolj staknejo → kontaktne upornosti med zrnca zmanjšajo.
- Upornost senzorja R med dovodi se torej zaradi sile dotika F zmanjša,
- Dotik določimo z meritvijo upornosti senzorja.



Elastomerni senzor dotika

- Na prevodno podlago/substrat je nanešana tanka plast elastomera, na zgornji strani pa je dodan pomičen prevoden gumb, na katerega pripeljemo silo dotika.
- Osnovno delovanje → zmanjšanje R senzorja zaradi sile dotika F .



Elektronske komponente in senzorji

Piezoelektrični elementi

Piezoelektrični efekt

- Direktni piezoelektrični efekt: Pod vplivom mehanske obremenitve poleg mehanske deformacije se pojavijo tudi električni dipolni momenti oz. dielektrična polarizacija materiala.
- Inverzni piezoelektrični efekt : Pod vplivom pritisnjene napetosti se pojavi mehanska deformacija kristala.
- Piezoelektrični elementi izkoriščajo piezoelektrične efekte.

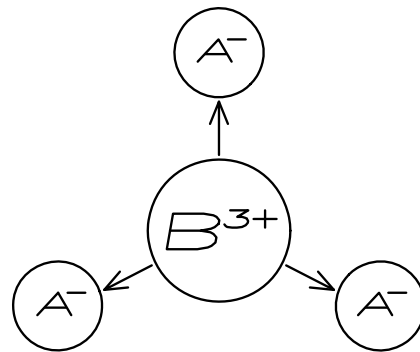
Piezoelektrični efekt

- **Mehanska obremenitev** (T) pritisk (- Sila F na površino A) (ang. Tension)
 - Enota $[N/m^2]$,
 - Pri nategu $T > 0$, stisku $T < 0$
- **Mehanska deformacija** (S) je relativna sprememba dimenzije telesa zaradi mehanske obremenitve (ang. Strain)
 - pri nategu (relativni raztezek Δl) deformacija pozitivna ($S > 0$)
 - pri stisku (relativni raztezek Δl) deformacija negativna ($S < 0$)
- **Hookeov zakon**: Dokler obremenitve niso prevelike je zveza med deformacijo S in obremenitvijo T linearna preko koeficienta elastičnosti danega materiala s $[m^2/N]$.

$$T = \frac{F}{A} [N/m^2] \quad S = \frac{\Delta l}{l} \quad S = s T$$

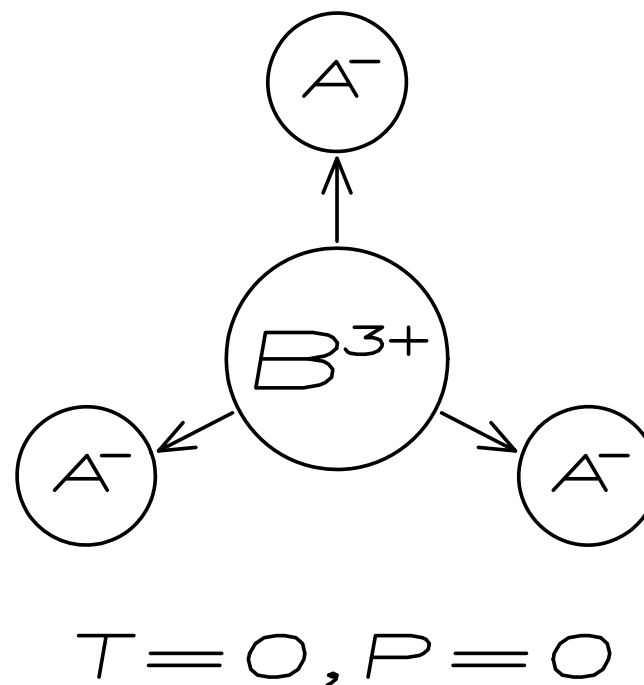
Piezoelektrični efekt

- Opazujemo molekulo materiala pri mehanski obremenitvi:
- Molekula piezoelektričnega materiala je sestavljena iz dveh vrst atomov, A in B, zgradbe $B^{3+}A^{3-}$



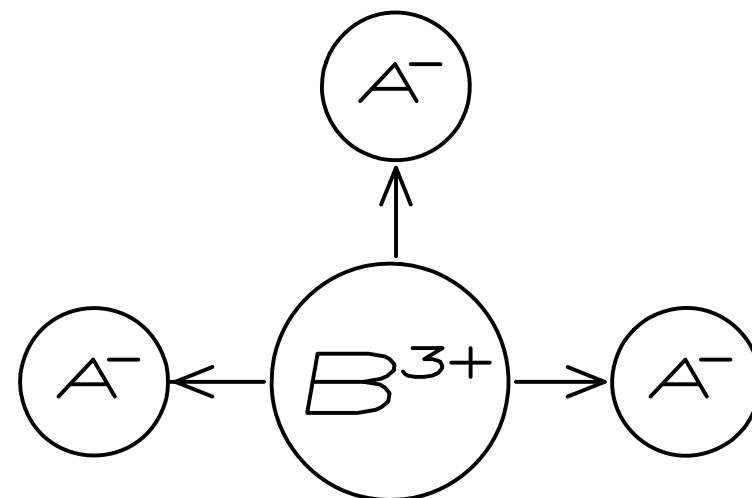
PE molekula brez mehanske obremenitve

- Simetrična porazdelitev nabojev:
centra pozitivnih in negativnih nabojev sovpadata
- Dipolni moment molekule in s tem dielektrična polarizacija materiala P v celoti so enaki 0 !



PE molekula pri mehanski obremenitve

- Zaradi obremenitve se molekule materiala deformirajo
- Premik nabojev: centra pozitivnih in negativnih nabojev se razmakneta.
- Posledica razmika naboja je induciran električni dipolni moment p molekule:



$$T \neq 0, P \neq 0$$

$$p = q l$$

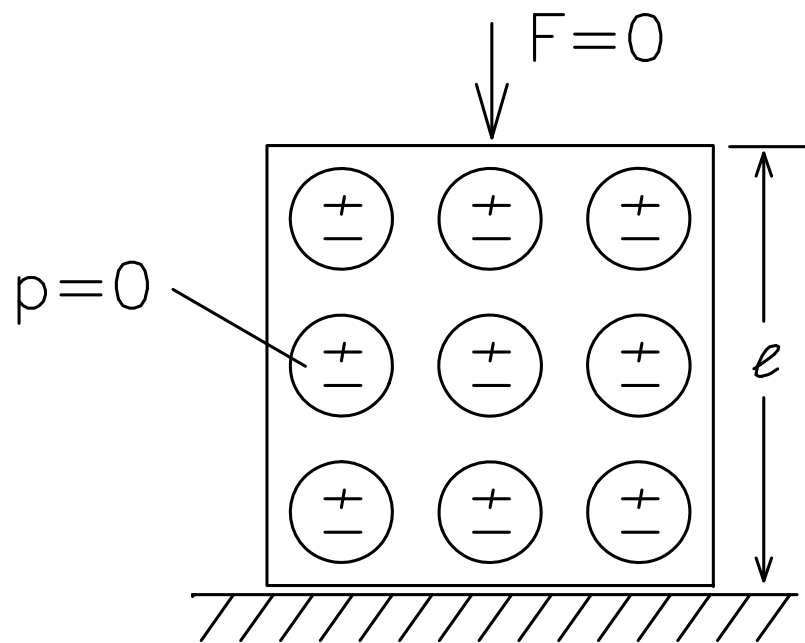
Dielektrična polarizacija

- Dielektrična polarizacija (P) je posledica nastanka dipolnih momentov v dielektričnem materialu.
- Določena je s prispevkom vseh dipolov po obravnavanem volumnu V

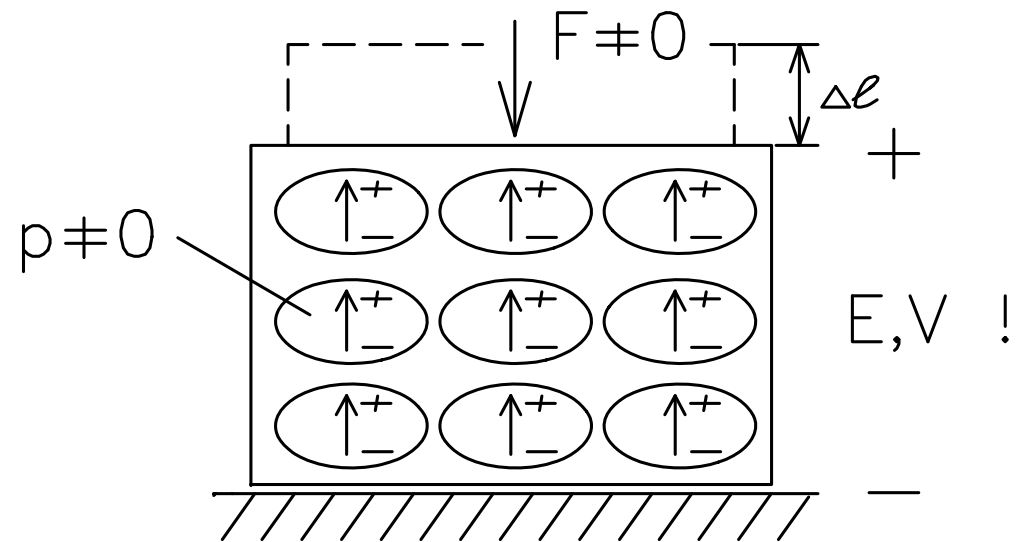
$$P = \frac{1}{V} \sum_V p_i$$

Dielektrična polarizacija

- Posledica dielektrične polarizacije v obremenjenem piezoelektričnem materialu je električno polje (E) \rightarrow električna napetost V med zgornjo in spodnjo površino.



$$T=0, P=0$$



$$T \neq 0, P \neq 0$$

El. polje v PE materialu

- Pri dovolj majhnih obremenitvah:

$$P = d T$$

d [$\mu\text{m}/\text{V}$] piezoelektrična napetostna konstanta, \rightarrow kakšna napetost V [V] se pojavi pri deformaciji za $1\mu\text{m}$.

E v piezoelektričnem materialu v primeru prisotne električne (ϵE) in mehanske (P) dielektrične polarizacije določimo iz izraza za gostoto električnega polja D ob upoštevanju obeh prispevkov

$$D = \epsilon E + d T$$

El. polje v PE materialu

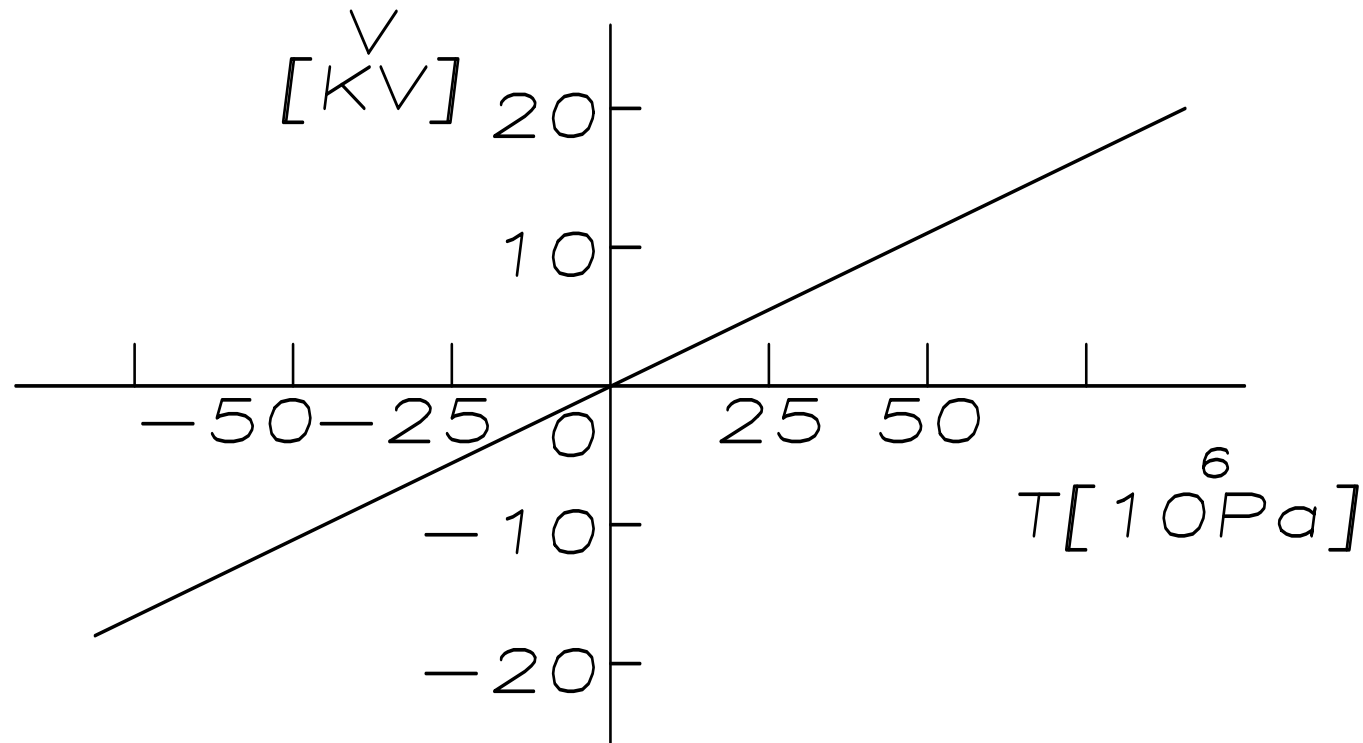
- $g = d/\epsilon$ piezoelektrična konstanta naboja [$\mu\text{m}^2/\text{As}$]. Ploskovni naboj, ki nastane zaradi obremenitve.

$$E = -\frac{d}{\epsilon} T + \frac{1}{\epsilon} D = -g T + \frac{1}{\epsilon} D$$

$$V = E l$$

Piezoelektrični efekt

- Napetosti imajo lahko zelo visoke vrednosti (kV).
- Pri prehodu od natezne obremenitve ($T > 0$) na tlačno stisk ($T < 0$) do spremembe predznaka inducirane napetosti.



Inverzni PE efekt

- Če pritisnemo na piezoelektrični kristal električno polje, se ta zaradi električnih sil na naboje v materialu ($F = q E$) deformira
- Pri majhnih deformacijah:

$$S_E = d \cdot E$$

- Deformacija zaradi električnega polja (S_E); polje (E)
- $d[\mu\text{m}/\text{V}]$ piezoelektrična napetostna konstanta, \rightarrow kakšna napetost $V[\text{V}]$ se pojavi pri deformaciji za $1\mu\text{m}$.

Inverzni PE efekt

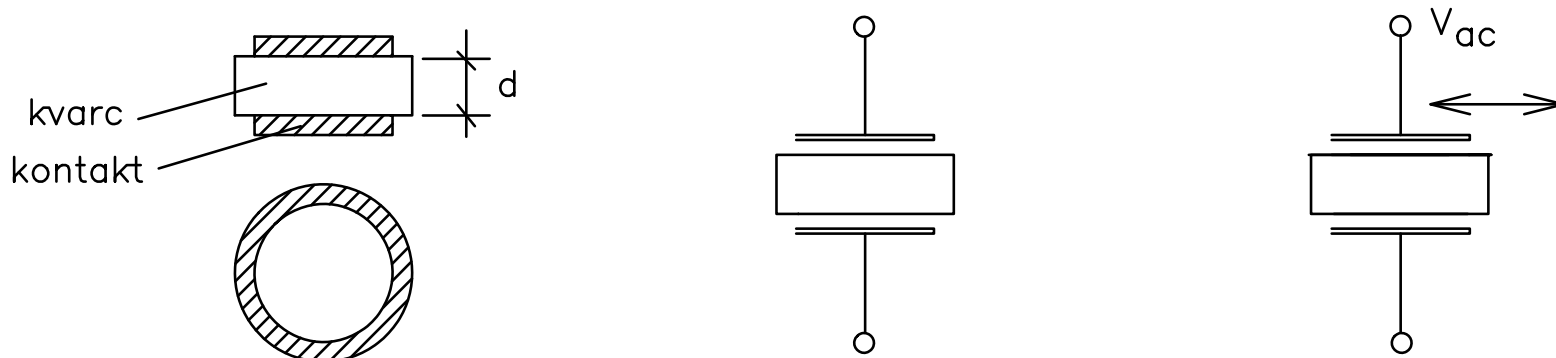
- Deformacijo piezoelektričnega kristala S je vsota prispevka PE deformacije in deformacije zaradi mehanske napetosti (Hookeov zakon)

$$S = d E + s T$$

- $S_E = \Delta l/l = 0.1\%$ pri DC električnih poljih ($E \approx 500 \text{ V/mm}$)
- Pri AC razmerah v resonanci dobimo še višje vrednosti deformacije kristala.

Kvarčni kristali

- Izdelani iz materiala kvarca (SiO_2): stabilen material glede na čas, temperatura, električno polje
- Pri vzbujanju z AC napetostjo v bližini resonančne frekvence mehansko nihajo z izredno stabilno frekvenco
- Po strukturi so ploščice z vakuumsko nanesenimi tankoplastnimi elektrodami
- Pri nihanju kvarca gre običajno za **strižne** deformacije

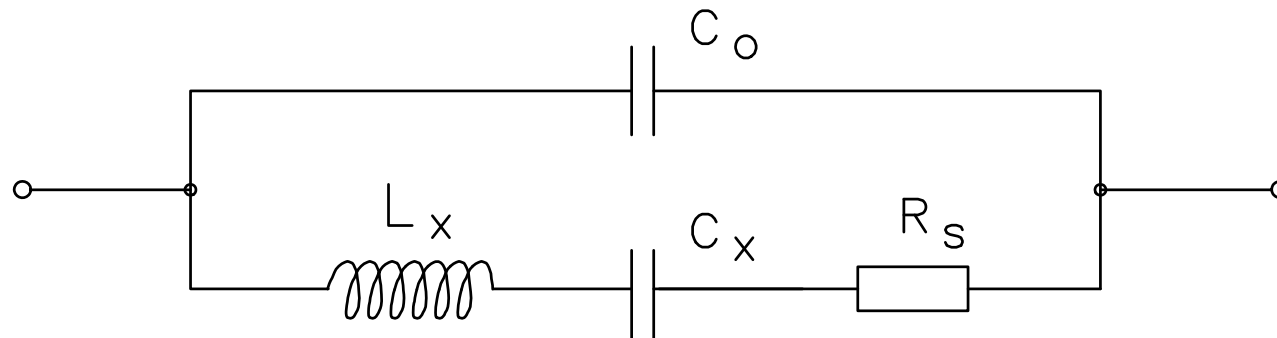


Kvarčni kristali

- Če vzbujamo kristal z neko AC napetostjo, bo kristal najintenzivneje nihal z **lastno** oz. **resonančno** frekvenco kristala f_{res} .
- Resonančna frekvenca je določena pri z njegovimi snovno-geometrijskimi lastnostmi, $d \rightarrow$ debelina ploščice
- Drugi pomembni faktor kristala je njegova **kristalografska orientacija** oz. **kristalografski rez** (ang. cut), s katerim je bila ploščica izrezana iz osnovnega materiala.
- Pri oscilatorjih je v uporabi AT rez, za katerega je značilno, da so temperaturne spremembe resonančne frekvence zanemarljive oz. minimalne.
- $f_{res} \approx 1\text{kHz} \dots 20\text{MHz}$. Za višje frekvenčno področje v skladu z omenjeno odvisnostjo frekvence od debeline ploščice že pretanki in bi bili mehansko neobstojni.
- Pri višjih frekvencah od 20MHz se uporabljajo debelejši kristali pri višjih harmonskih frekvencah, ki so mnogokratniki osnovne frekvence (3., 5., 7. ali 9.)

Nadomestno vezje kvarčnega kristala

- Elementi nadomestnega vezja v bližini resonančne frekvence
 - Paralelna kapacitivnost C_0 je določena z elektrodama in debelino ploščice ($C_0 = \epsilon A/d$) in kristalografskega reza ploščice. $C_0 \approx 3 \dots 15$ pF.
- Gibalni (motional) elementi kristala L_x , C_x , R_s služijo za dober opis frekvenčnih lastnosti. L_x , C_x sta funkciji frekvence
- $R_s = 200 \text{ k}\Omega @ 1\text{kHz}$, $R_s = 1 \text{ k}\Omega @ 100\text{kHz}$
 $R_s = 10 \text{ }\Omega @ 20\text{MHz}$ (pada s frekvenco)



Resonančni frekvenci kvarca

- Kvarc ima dve resonančni frekvenci, pri katerih ima absolutna impedanca ekstrem:
 - resonančno frekvenco f_r
 - antiresonančno frekvenco f_a
- Resonančna frekvenca f_r (**serijska resonančna frekvenca**) je tista frekvenca, pri kateri ima kristal minimum absolutne impedance → za oscilatorje.

Serijska resonančna frekvenca

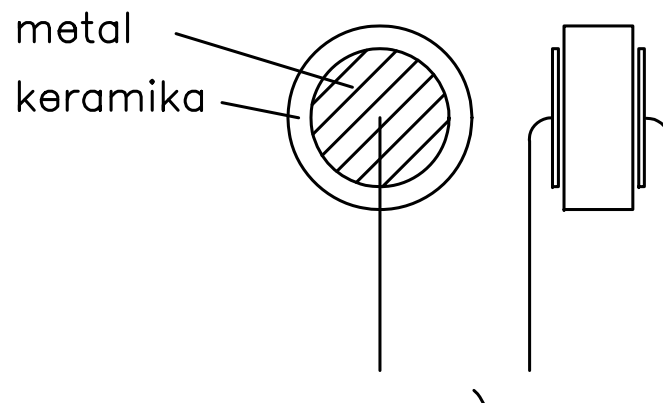
Pri predpostavki $R_S \ll 1/(\omega^* C_0)$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_x C_x}} \quad f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_x \frac{C_x C_0}{C_x + C_0}}}$$

$C_0 \gg C_x \rightarrow$ obe resonančni frekvenci sta blizu
Resonančna frekvenca f_r je nižja od obeh
($f_r < f_a$)

Piezokeramični aktuatorji

- Aktuatorji = vzbujevalniki
- Elementi, pri katerih s pomočjo PE efekta dosežemo pretvorbo električne energije v mehansko, ali obratno.
- Struktura elementa je okrogla ali pravokotna ploščica PE materiala, z nanesenimi Ni ali Ag kontakti



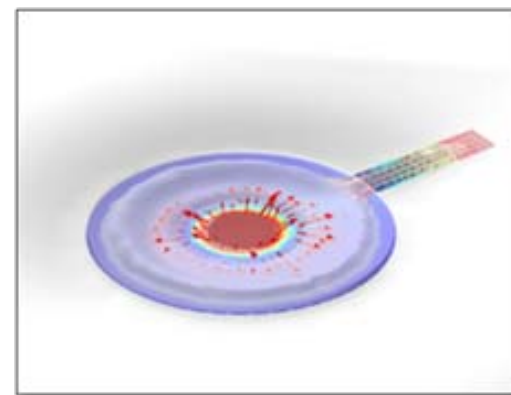
Piezoelektrične mikročrpalke



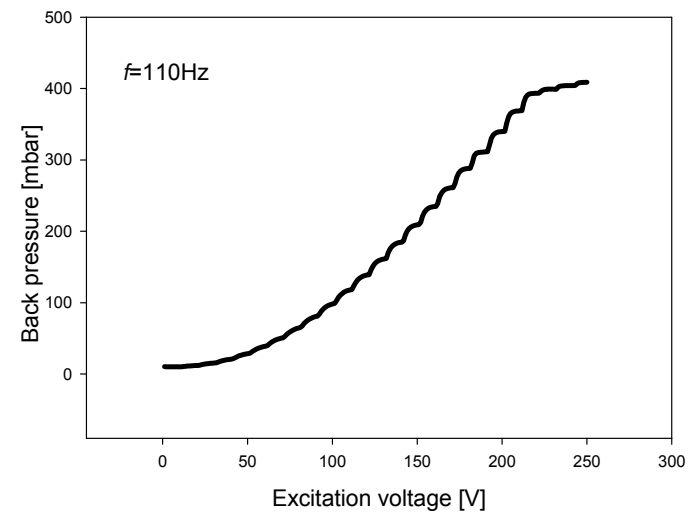
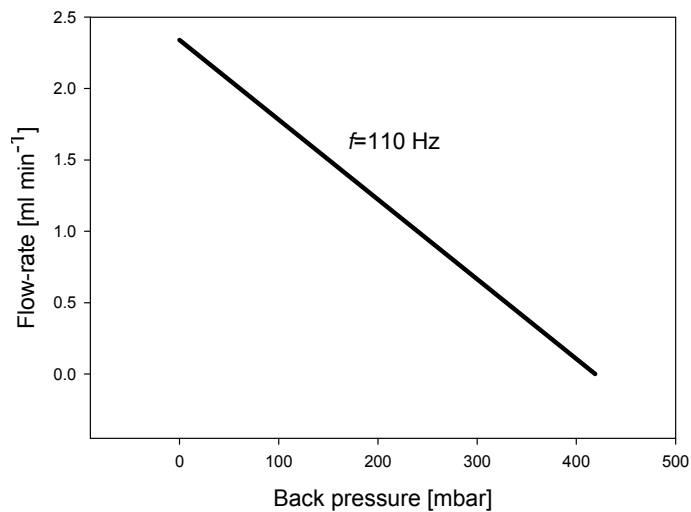
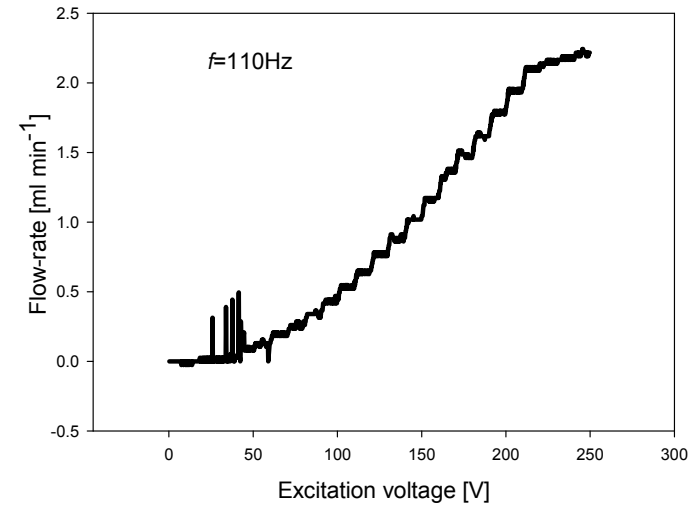
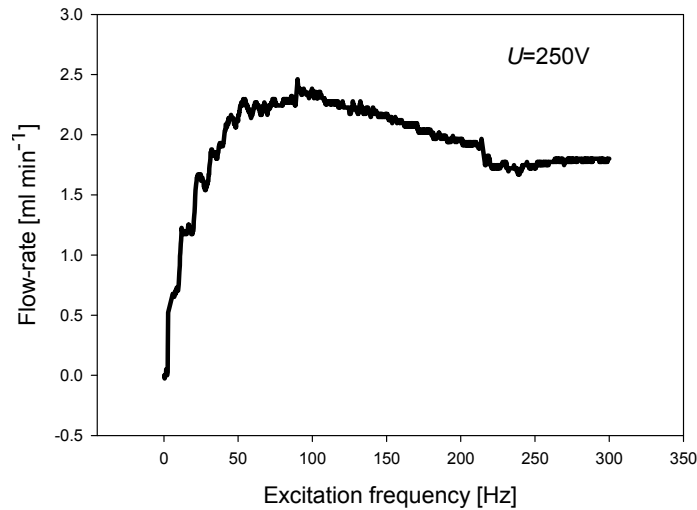
- Mikrocilindrska izvedba
- Visok delovni tlak, statični vhodni in izhodni tlak ter pretok.
- Možnost samostojnega polnjenja
- Neobčutljivost na mehurčke v fluidu
- Možnost dvosmernega črpanja
- Primerna za črpanje bioloških medijev, kjer ne poškodujejo celic med črpanjem.
- Možnost uporabe kot ventila, krmiljenega z DC napetostjo

Medij	plin, tekočina, dvofazni medij
Max. pretok [ml min ⁻¹]	2.4
Max. statični tlak izhoda ¹ [mbar]	400
Sesalni tlak [mbar]	-30
Napetost aktivacije [Vpp]	100 - 200
f [Hz]	50 - 400
Delovna temperatura [°C]	5 - 50
Fluidni priključki [ID / mm]	1.0
Velikost [mm ³]	23 x 23 x 10
Teža [g]	2.4

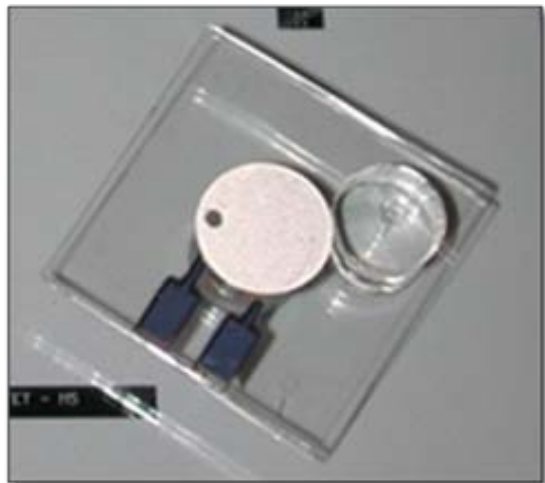
1) vrednosti za DI vodo pri 200 Vpp / 110 Hz vzbujanju.



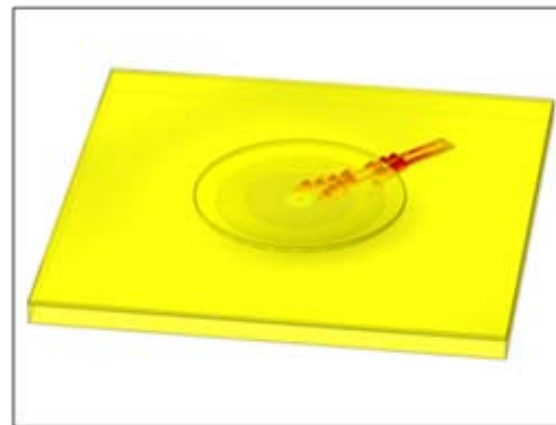
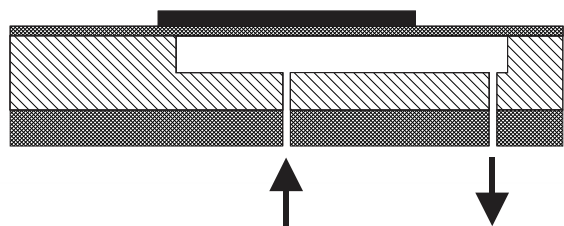
Piezoelektrične mikročrpalke



Piezoelektrične mikročrpalke

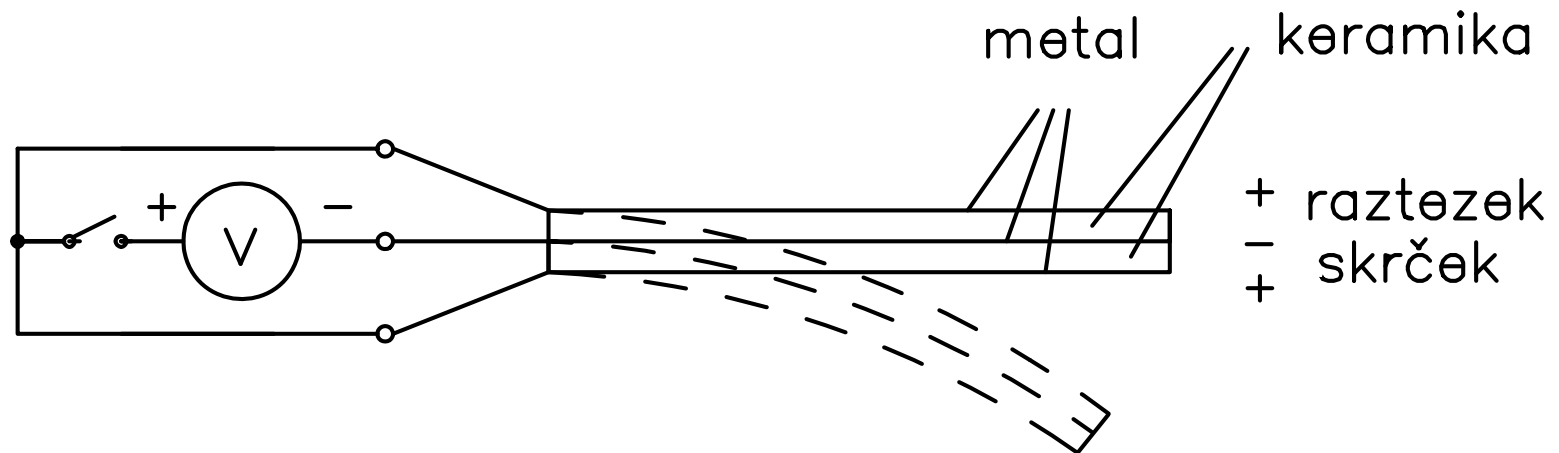


- Peristaltna izvedba
- Enostavnost izvedbe, cena izvedbe, zanesljivosti in čistost saj nima ventilov
- Uporaba v biomedicinski farmaceutski, kemijski industriji.
- Osnovna slabost: Večfazno krmiljenje, kar smo v LMSE odpravili, saj naša črpalka uporablja en PE aktuator



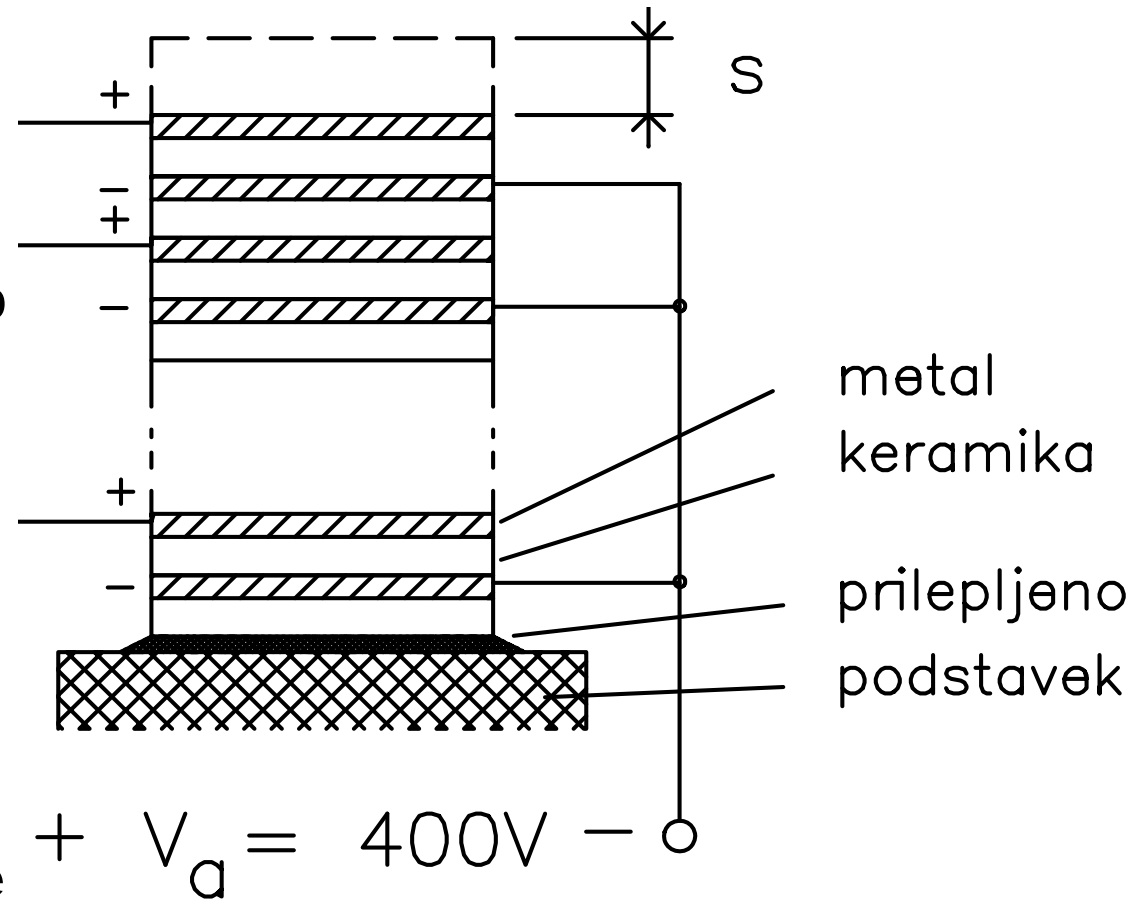
Bimorf (uklonski element)

- bimorf (bimorph, flexure element).
- S pomočjo pritisnjene napetosti povzročimo uklon elementa.
- Izvedba za večje pomike z dvema ploščama , ki sta vezani vzporedno. Pri obratu polaritete pride do uklona na nasprotno stran.
- Za majhne moči se uporabljajo palice, za večje moči pa širše plošče piezokeramičnega materiala.



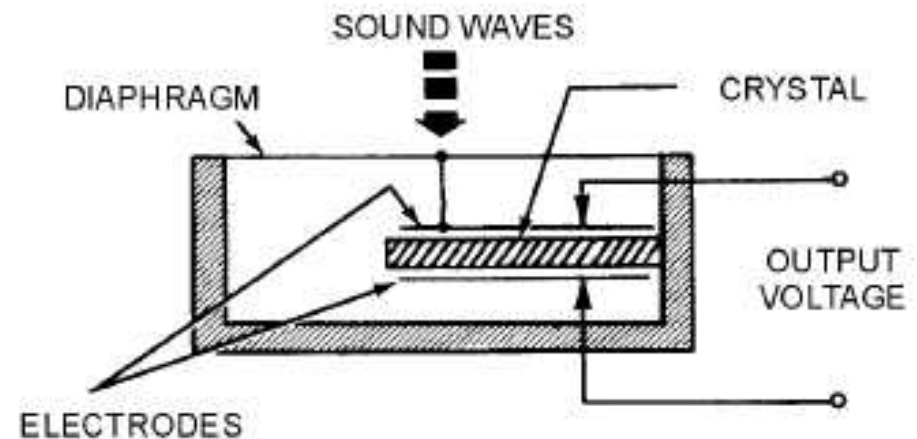
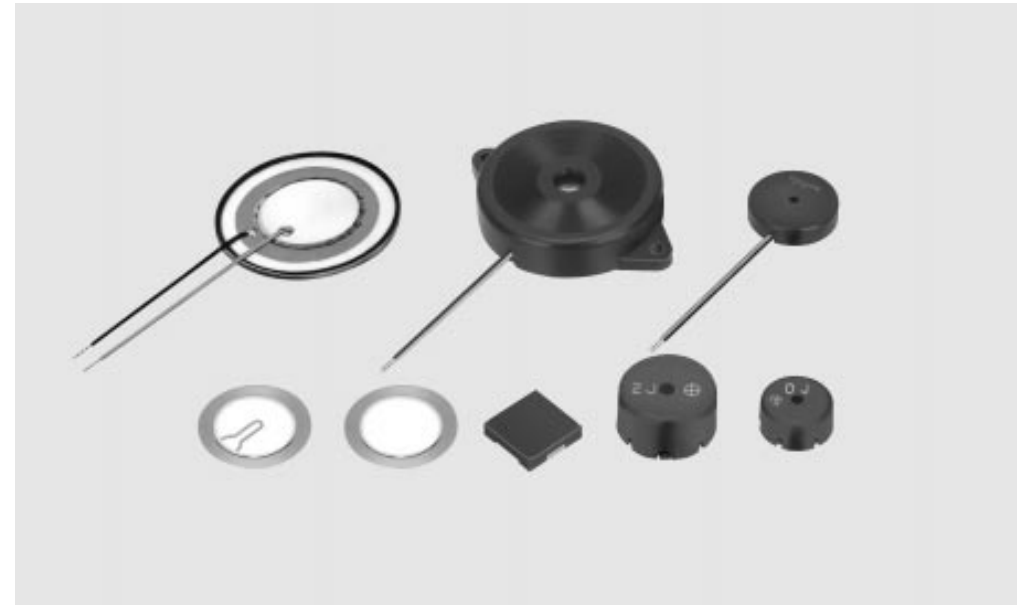
Močnostni vzbujevalniki

- Pretvarjajo priključeno električno napetost oz. energijo v mehansko silo.
- Izmenjujoče se naložene piezokeramične ploščice in bakrene folije, medsebojno zlegirane ali zlepljene ter kontaktirane.
- Pri taki strukturi pride aplicirana napetost V_a na vsako ploščico, s tem je električno polje in zato piezoefekt N -krat močnejši kot v primeru nelamelirane strukture.



Pretvorniki (ultra)zvočnega nihanja

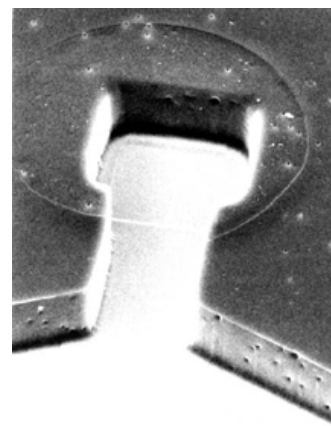
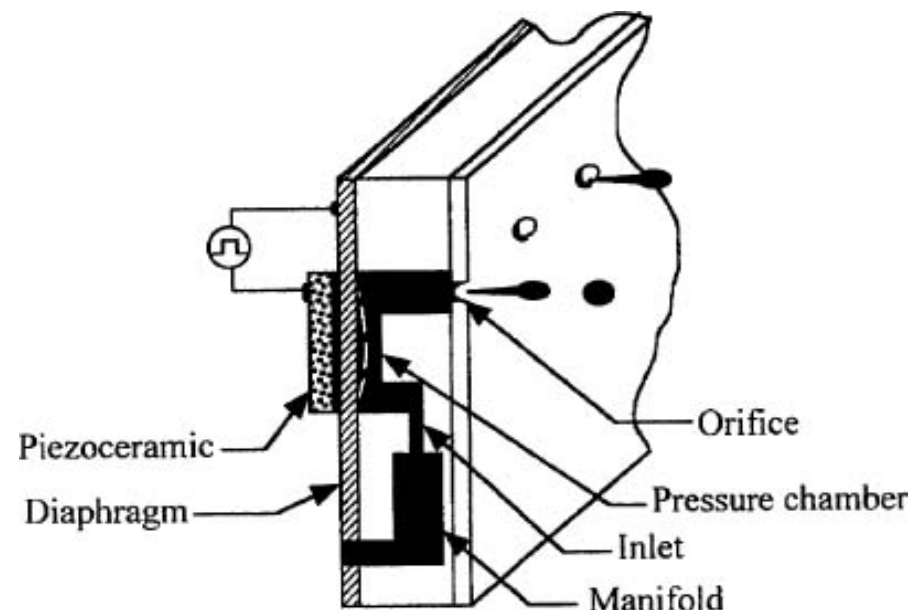
- Na osnovi PE efekta delujejo tudi pretvorniki zvočnega in ultrazvočnega (UZ) nihanja.
- Izvori (zvočniki, UZ generatorji)
- Detektorji (mikrofoni, merilniki sil, pospeškov itd.) zvočnega in ultrazvočnega nihanja.



DIAPHRAGM TYPE

VN generatorji

- Mehanski pritisk → visoka napetost.
- Uporabljajo se zlasti kot dajalci iskre za vžig pri plinskih štedilnikih in vžigalnikih itd.
- Stikala pri ink jet printerjih,
- senzorjih majhnih pomikov,
- merilnikih pretoka



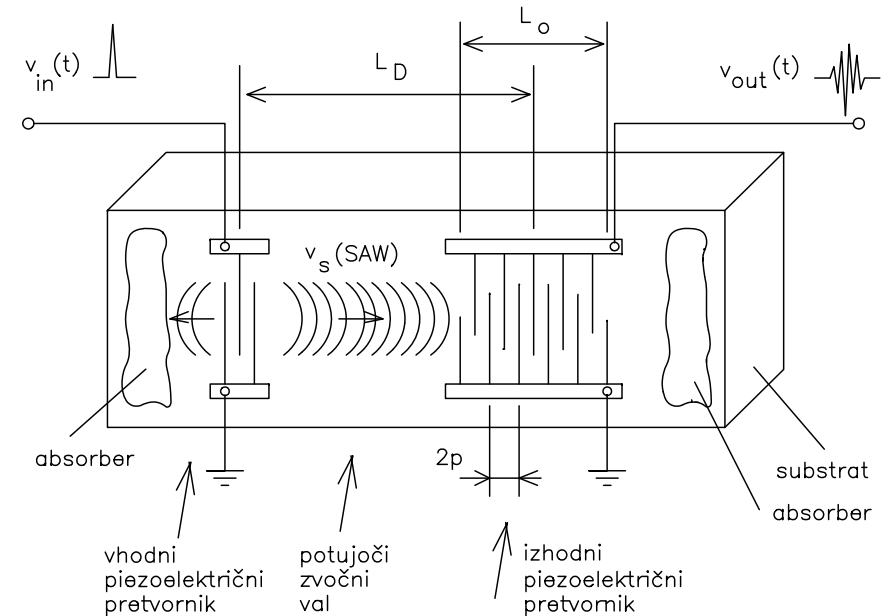
Šoba HP DeskJet 850

SAW (Surface Acoustic Wave) elementi

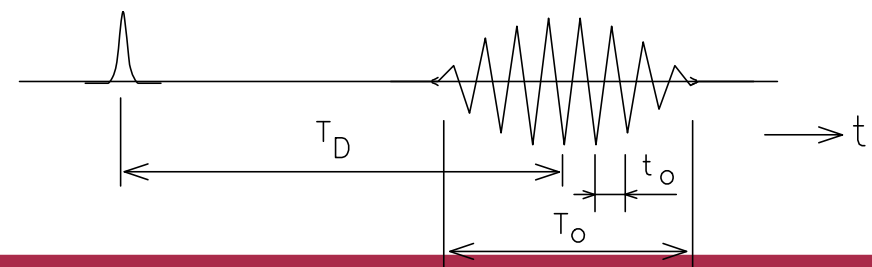
- SAW elementi → Elementi na površinske zvočne valove.
- Izdelava VF zakasnilnih linij, filtrov, oscilatorjev $f > 5 \text{ MHz} \dots \text{GHz}$
- Substrat je ploščica PE kristala, npr. litijev niobat LiNbO_3
- Na površini substrata se nahajajo vakuumsko nanešene tankoplastne metalne elektode, običajno aluminij Al.
- Topologija elektrod (število prstov, razdalje med njimi) določa električne lastnosti danega SAW vezja.

SAW zakasnilna linija

- Izkorišča piezoelektričnih efektov pri generaciji, razširjanju in detekciji površinskih zvočnih valov v materialu.
- Električni vhodni signal, pritisnjen na vhodni piezoelektrični pretvornik (transducer), povzroči ustrezna mehanska nihanja kristala in s tem emisijo površinskih zvočnih valov.
- Ti potujejo skozi kristal, pridejo primerno preoblikovani do izhodnega pretvornika, ki jih z obratnim piezoelektričnim efektom ponovno pretvori v električne, izhodne signale.
- Vzbujeno zvočno valovanje se razširja v materialu z zvočno hitrostjo (sound velocity, v_s) materiala
 $v_s \sim 3000\text{m/s}$.
- Zato je zakasnitev izhodnega signala T_D , v skladu z oznakami na podana z enostavnim izrazom



$$T_D = \frac{L_D}{v_s} \quad T_0 = \frac{L_0}{v_s} \quad t_0 = \frac{2p}{v_s}$$



SAW senzorji

- Spadajo med (MEMS) senzorje, ki temeljijo na principu **modulacije** površinskih valov za zaznavanje veličine
- Senzor pretvori vhodni el. signal v fizično (mehansko) valovanje, na katerega lahko neka veličina vpliva. Naprava nato pretvori mehansko valovanje nazaj v el. signal. Sprememba sprejetega signala v amplitudi, frekvenci ali zakasnitvi med vhomom in izhodom je proporcionalna spremembi merjene fizikalne veličine
- Osnovna struktura pretvorbe el. → akustičen val je IDT ([interdigitated transducer](#))
- Vhodni sinusni el. signal vzpostavi spreminajočo se napetost. Med dvema nizoma prstov je polariteta izmenjujoča (+ - + -)
- Smer el. polja med nizoma prstov se spreminja. To polje ustvari področja natezne in stisljive obremenitve med prsti. Razdalja med prsti (ang. pitch) določa valovno dolžino akustičnega vala. Frekvenca valovanja je določena s fazno hitrostjo v_p in razdaljo med prsti (p).
- Samo polovica mehanskega nihanja se širi proti sprejemniku, zato imajo nekateri IDT absorberje (preprečujejo interferenco valov) ali reflektorje valovanja (zmanjšujejo izgube)

SAW senzorji

- Tlak, Sila, Navor, Temperatura
- Masa
- Kemične pare
- Biološka snov
- Vlaga
- UV sevanje
- Magnetno polje
- Viskoznost

Elektronske komponente in senzorji

Kapacitivni senzorji

Kapacitivni senzorji

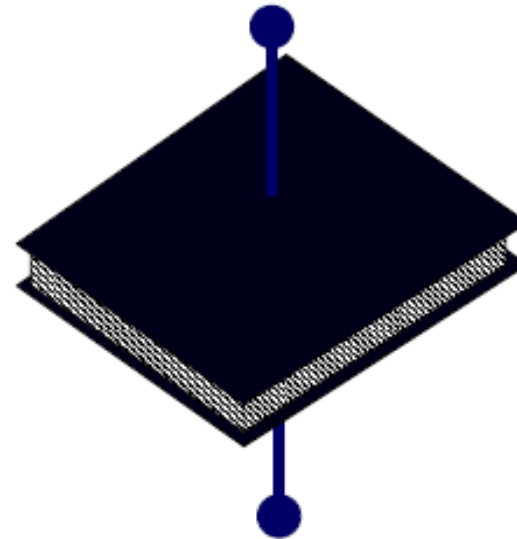
- Senzor pomika
- Senzor pospeška
- Senzor vlage

Kapacitivni senzorji pomika

- Za meritev pomika lahko izkoristimo spremembo kapacitivnosti zaradi spremembe geometrije in dielektričnosti kondenzatorja

Prednosti meritve:

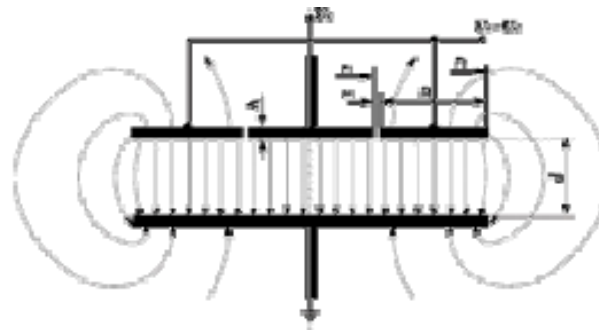
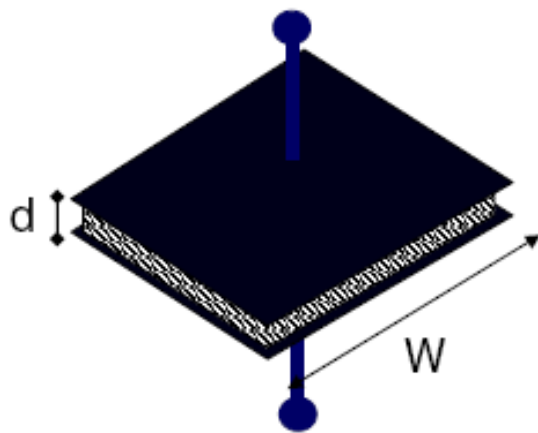
- Dolga življenjska doba (brezkontaktna meritve)
- Zanemarljiva obremenitev merjenca
- Odpornost na spremembe temperature
- Široko področje delovanja
- Visoka ločljivost (10pm);



$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

Kapacitivni senzorji pomika

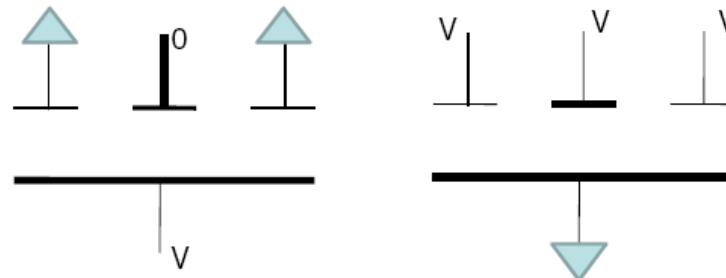
- Robni efekti (ukrivljanje polja)



$$C = \epsilon \frac{A}{d} + \frac{2W}{\pi} \ln \frac{\pi W}{d}$$

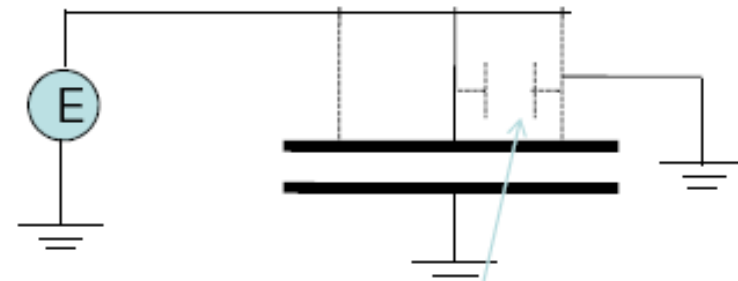
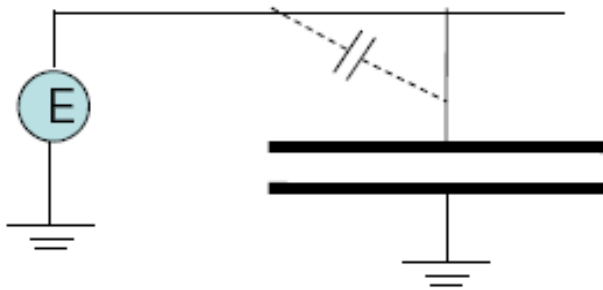
lahko zanemarimo, če je $W \ll d$

Razmere se izboljšajo, če uporabljamo zaščitne linije na potencialu ene elektrode.



Kapacitivni senzorji pomika

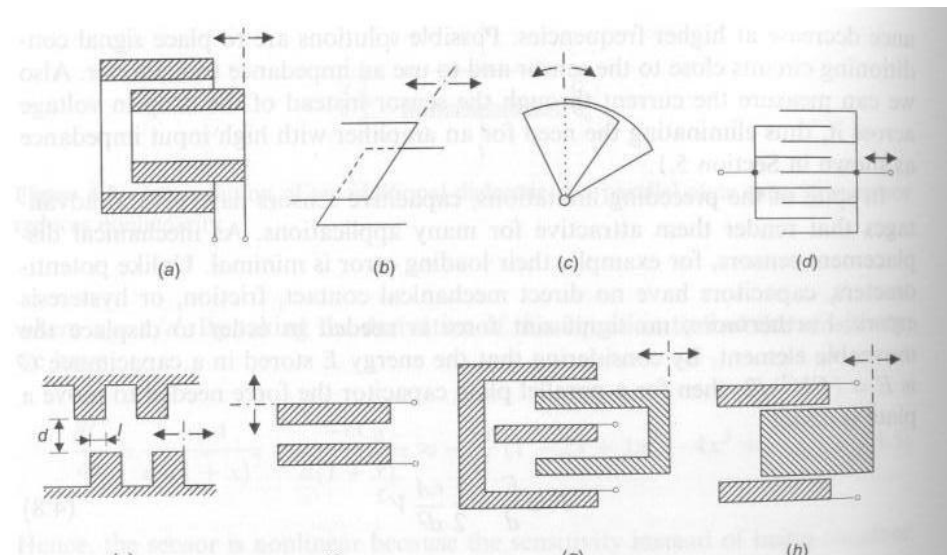
- Med ploščama kondenzatorja se lahko pojavi upornost (vlaga)



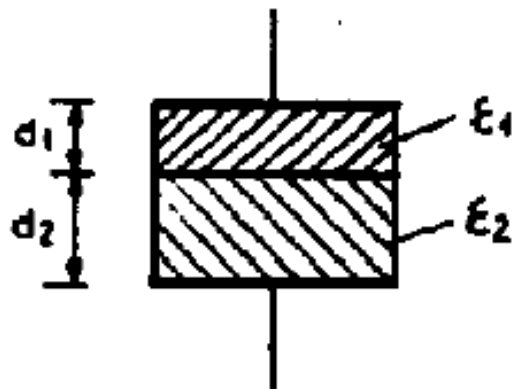
Pojavijo se parazitne kapacitivnosti.

Kapacitivni senzorji pomika

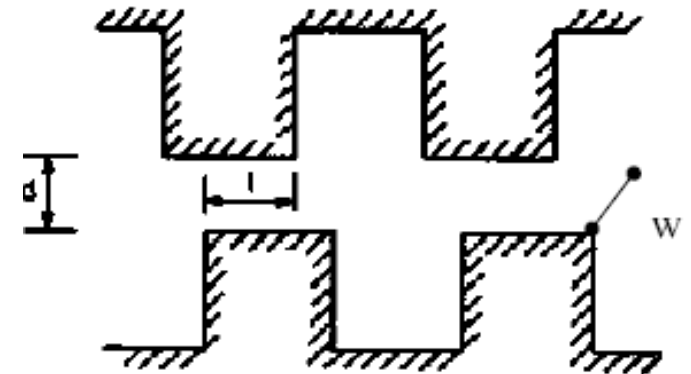
- Sprememba dielektričnosti (srečamo redko pri meritvi pomika)
- Sprememba površine elektrod (ozko delovno področje 1 ... 10 cm). Slabost → slaba občutljivost pri majhnih pomikih in poraba prostora pri velikih pomikih.
- Sprememba razdalje med elektrodama



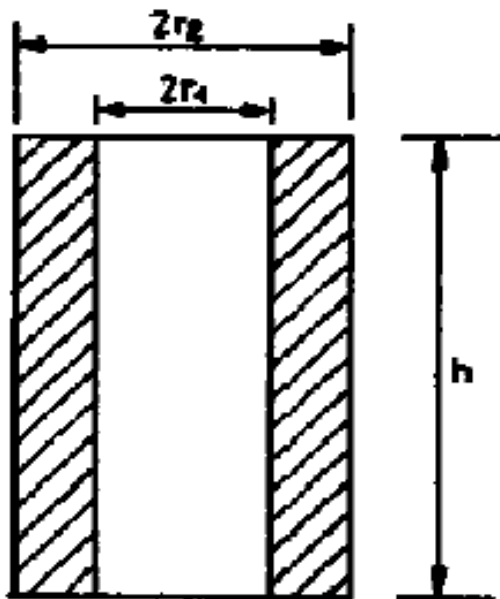
Kapacitivni senzorji pomika



$$C = \frac{A}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}$$

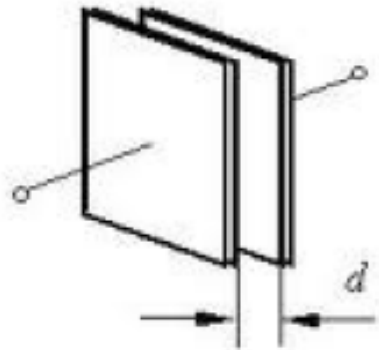


$$C = n\epsilon \frac{lw}{d}$$



$$C = \epsilon \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Kapacitivni senzorji pomika



$$C = \varepsilon \frac{A}{(d + Dd)}$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{d \left(1 + \frac{Dd}{d} \right)} = \varepsilon \frac{A}{d(1+x)}$$

C ni linearno odvisen od x

$$\frac{dC}{dx} = -\varepsilon \frac{A}{d(1+x)^2}$$

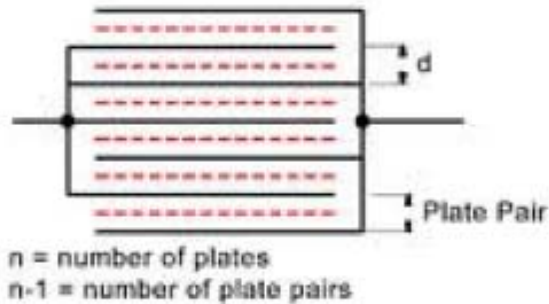
$$\frac{dC}{C} = -\frac{dx}{(1+x)}$$

$$C_0 = \varepsilon \frac{A}{d}; \quad Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0}$$

$$C = \varepsilon \frac{A}{d(1+x)}$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega} \frac{d(1+x)}{\varepsilon A} = Z_0(1+x)$$

Kapacitivni senzorji pomika



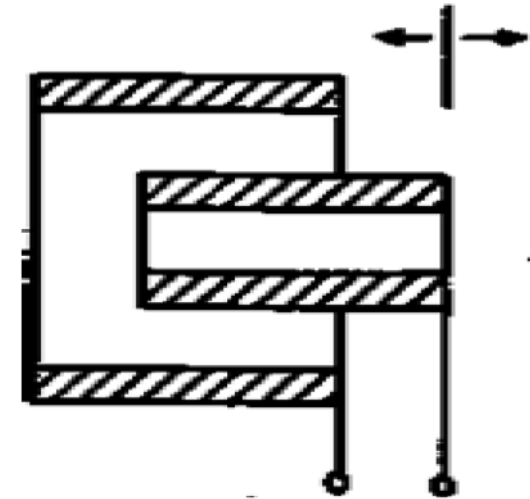
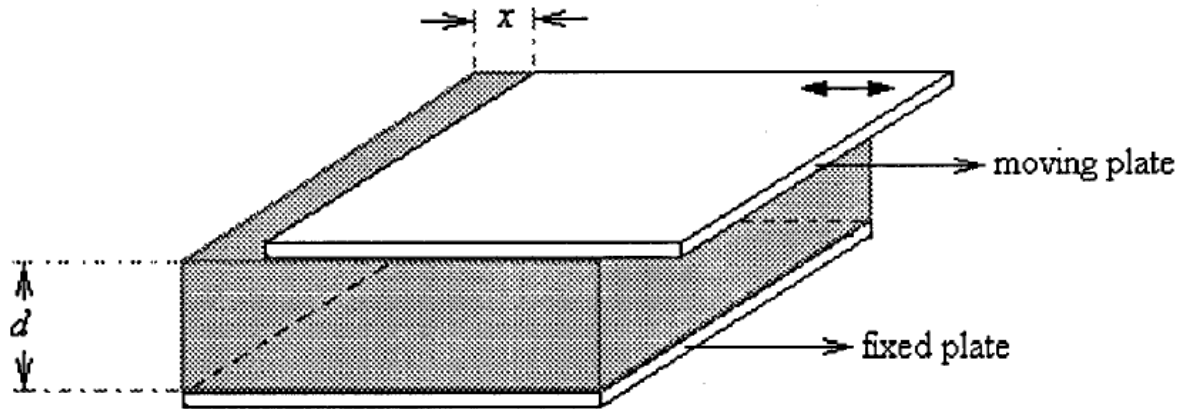
$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{A}{(1+x)d} (n-1)$$

$$\frac{dC}{dx} = -\varepsilon \frac{A}{(1+x)^2 d} (n-1) \quad \frac{dC}{C} = -\frac{dx}{1+x}$$

Vrednost C je običajno med 1pF in 500pF

Kapacitivni senzorji pomika

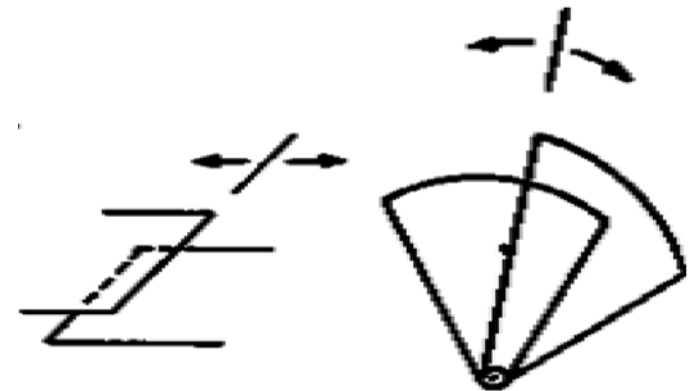
Sprememba površine



$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A - wy}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A \left(1 - \frac{wy}{A}\right)}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A(1 - x)}{d}$$

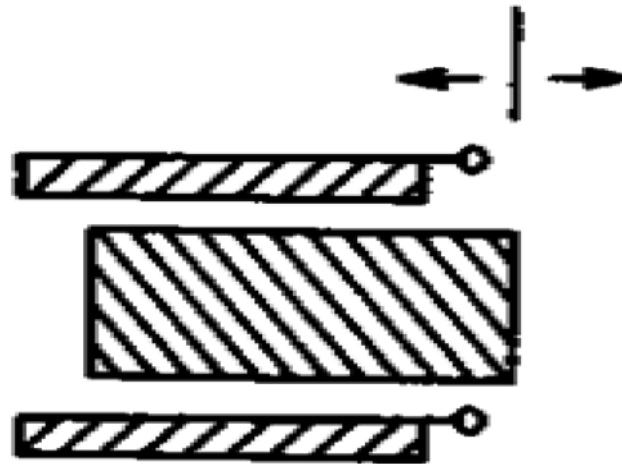
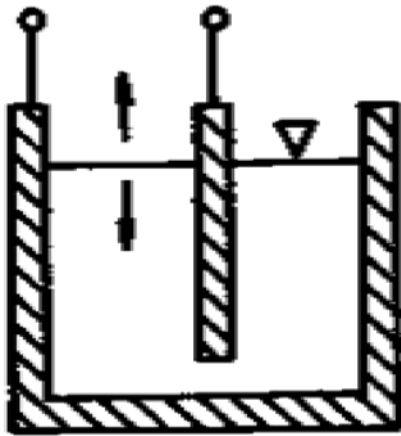
$$\frac{dC}{dx} = \epsilon \frac{A}{d}$$

$$\frac{dC}{C} = \frac{dx}{1+x}$$



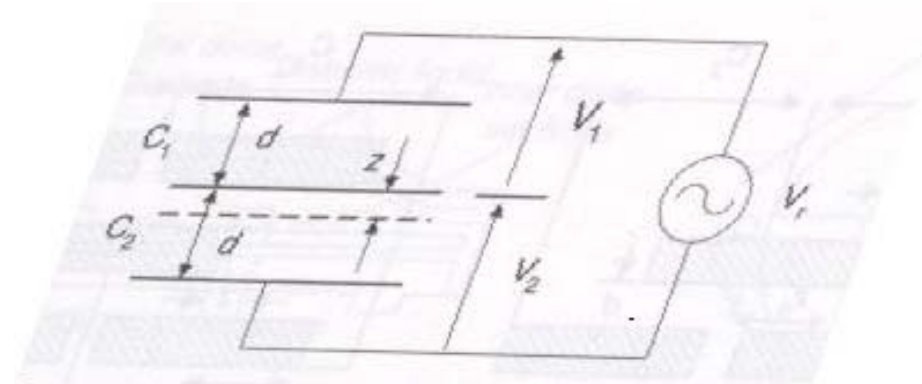
Kapacitivni senzorji pomika

Sprememba dielektrika



$$C = \epsilon_0 \epsilon_r (1 + x) \frac{A}{d}$$

Diferencialno zaznavanje



$$C_1 = \varepsilon \frac{A}{d+z}; C_2 = \varepsilon \frac{A}{d-z}$$

$$C_1 = \varepsilon \frac{A}{d(1+x)}; C_2 = \varepsilon \frac{A}{d(1-x)}$$

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{1}{j\omega} \frac{d(1+x)}{\varepsilon A}$$

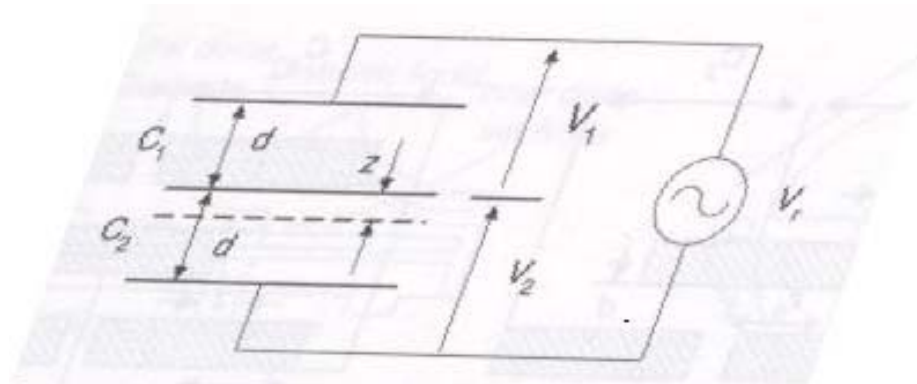
$$Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0} = \frac{1}{j\omega} \frac{d}{\varepsilon A}$$

$$Z_1 = Z_0(1+x)$$

$$Z_2 = Z_0(1-x)$$

$$x = z/d$$

Diferencialno zaznavanje



$$C_1 = \varepsilon \frac{A}{d+z}; C_2 = \varepsilon \frac{A}{d-z}$$

$$V_1 = \frac{V_r}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} \frac{1}{j\omega C_1} = V_r \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

$$V_2 = \frac{V_r}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} \frac{1}{j\omega C_2} = V_r \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

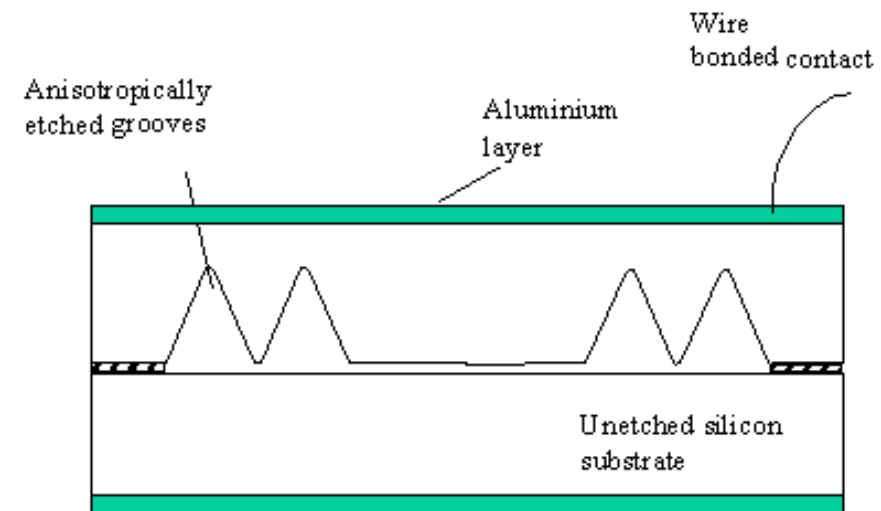
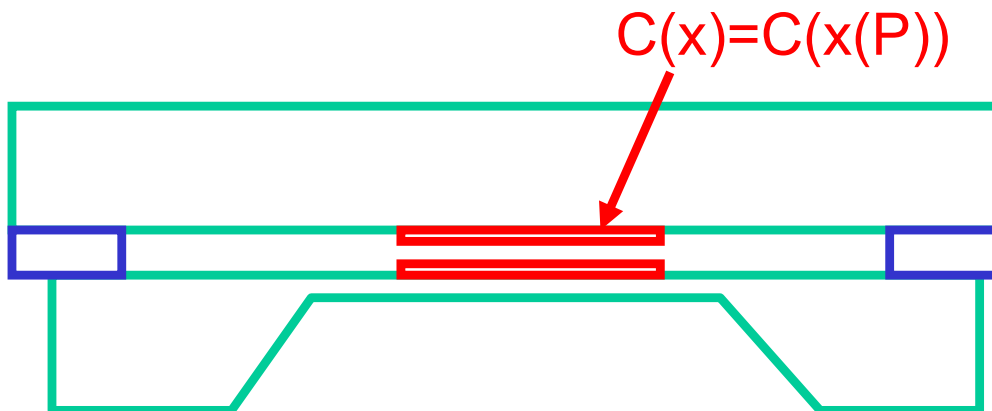
$$V_1 = V_r \frac{1/(d-z)}{1/(d+z) + 1/(d-z)} = V_r \frac{d+z}{2d}$$

$$V_2 = V_r \frac{1/(d+z)}{1/(d+z) + 1/(d-z)} = V_r \frac{d-z}{2d}$$

$$DV = V_1 - V_2 = V_r \left(\frac{d+z}{2d} - \frac{d-z}{2d} \right) = V_r \frac{z}{d}$$

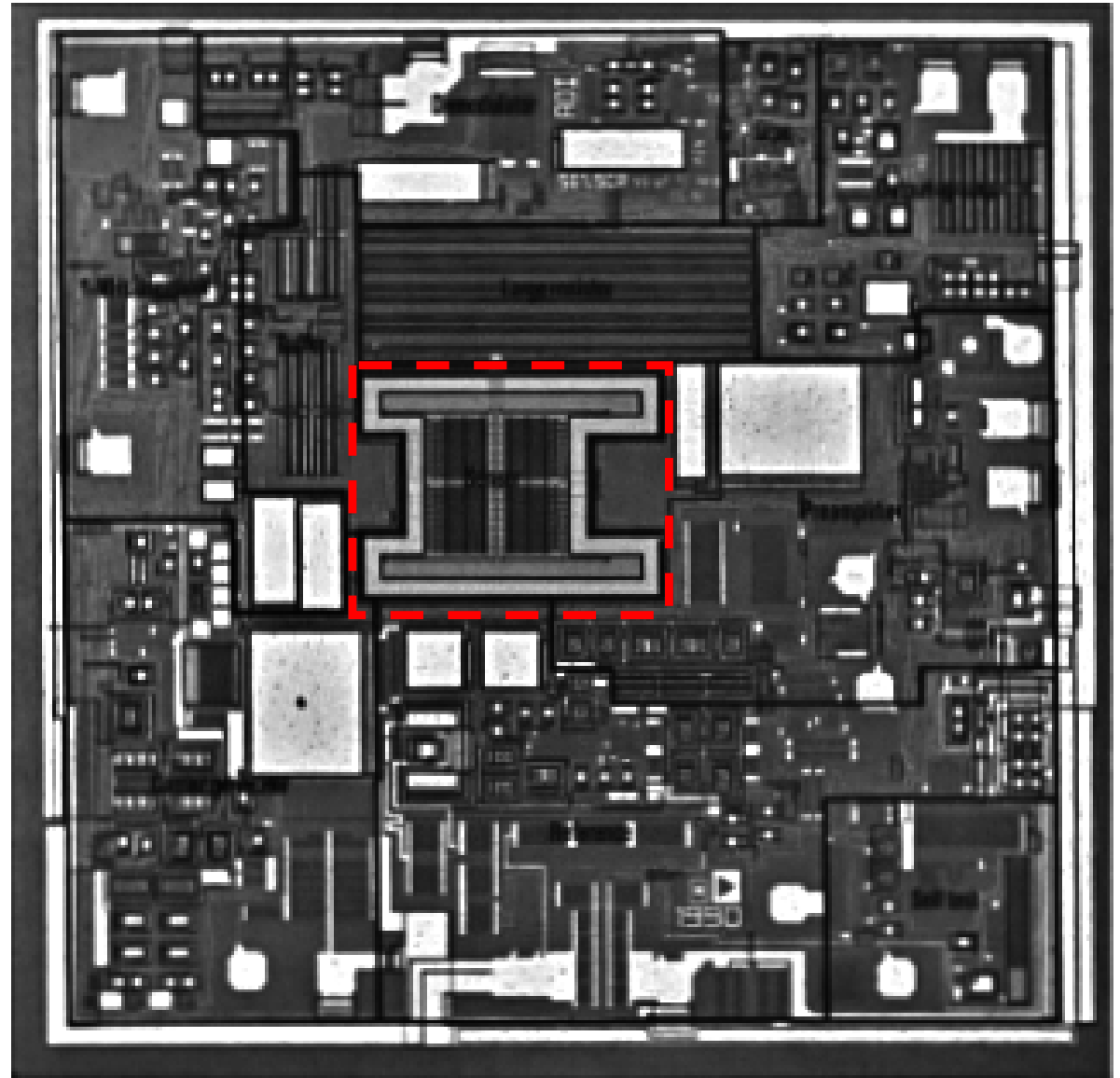
Kapacitivni senzor tlaka

- Struktura: Jedkan Si substrat (membrana), metalizacija
- Tehnologija izdelave mikroobdelava - micromachining
- Prednosti:
 - Visoka občutljivost
 - Temperaturna stabilnost
 - Nizka poraba moči
- Slabosti:
 - Nelinearnost
 - Ozko področje delovanja
 - Parazitne kapacitivnosti



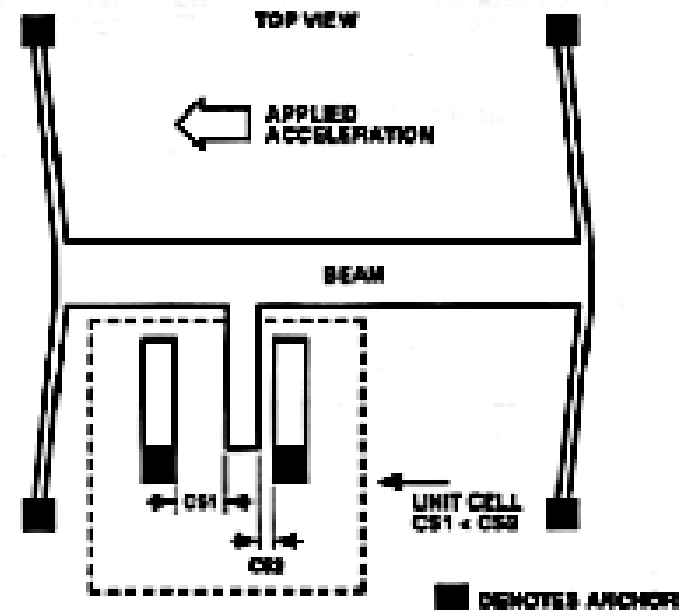
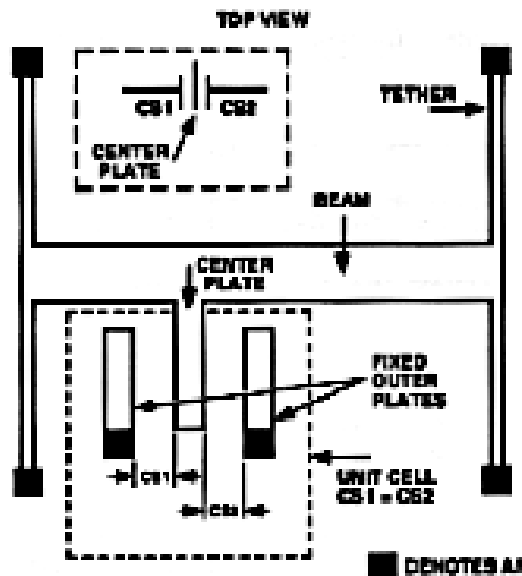
ADXL50 merilnik pospeška

- $\pm 50g$
- Polisilicij MEMS & BiCMOS
- 3x3mm čip



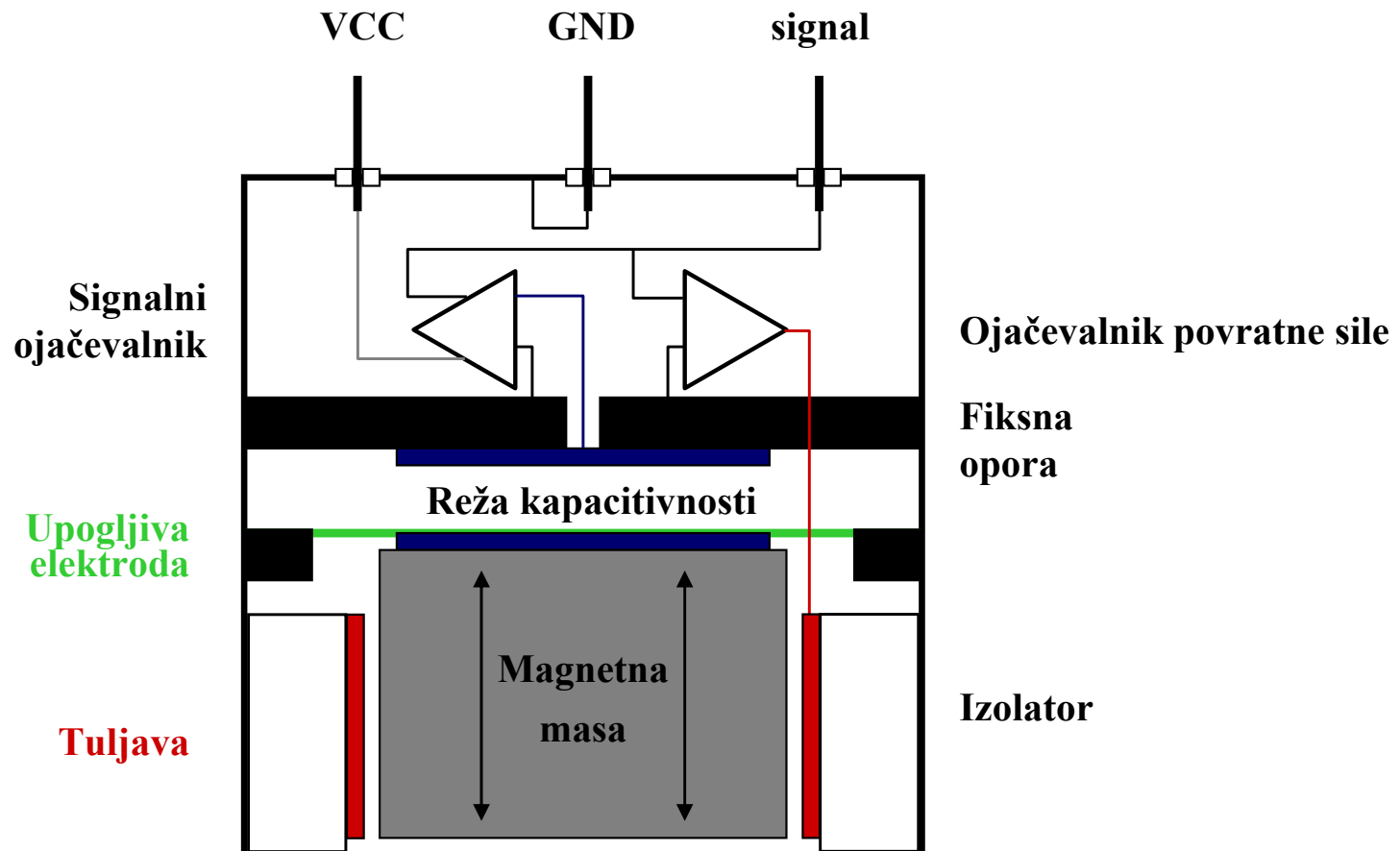
ADXL50 – princip zaznavanja

- Uravnotežen diferencialni kondenzator
- Ob pospešku se plošče kondenzatorja premaknejo → sprememba $C \rightarrow$ sprememba izhodne napetosti

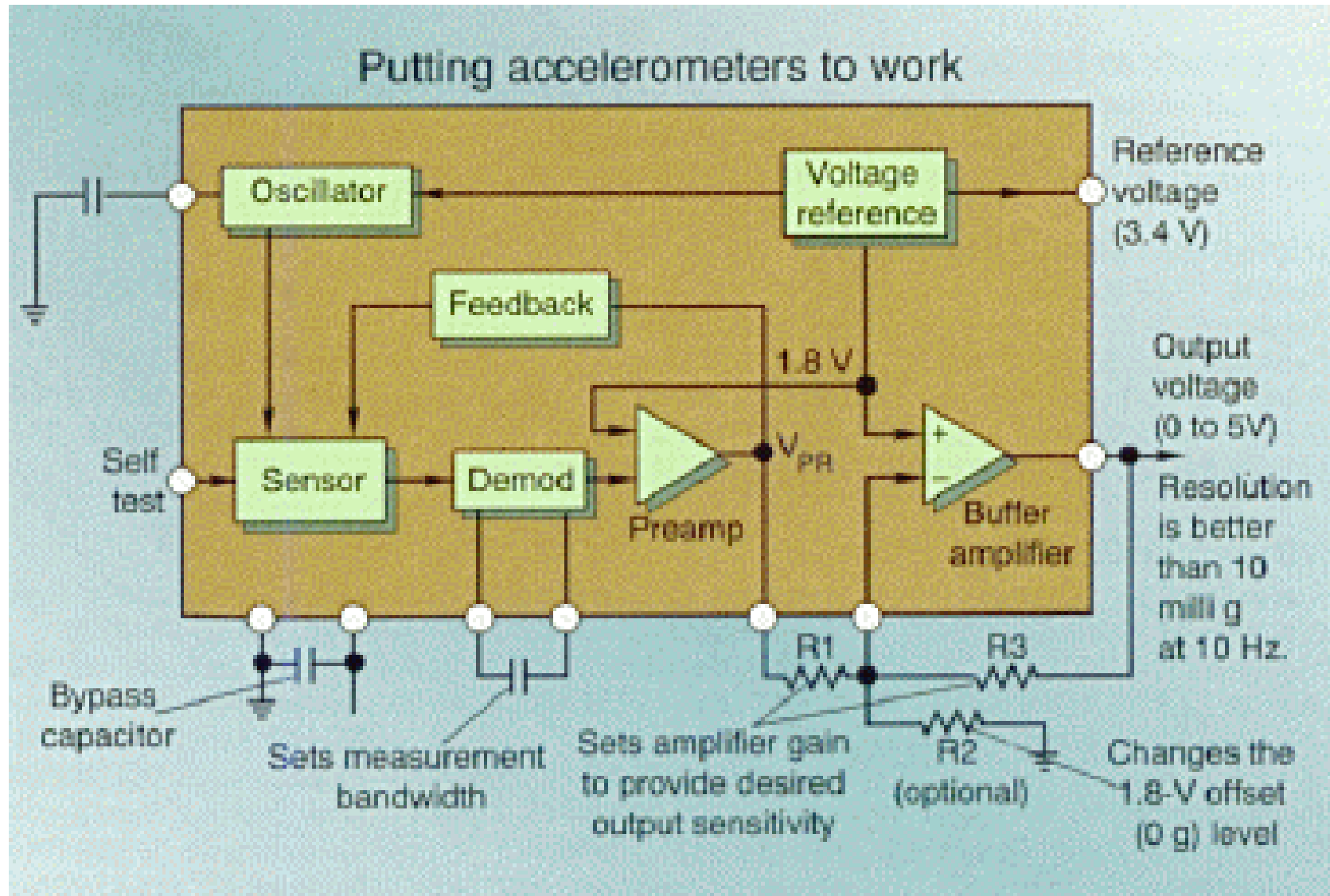


Servo kapacitivni akcelerometer

- Uravnoteženje sile (ang. force balance)
- Magnetna sila je potrebna zato, da ostane kapacitivnost proporcionalna pospešku

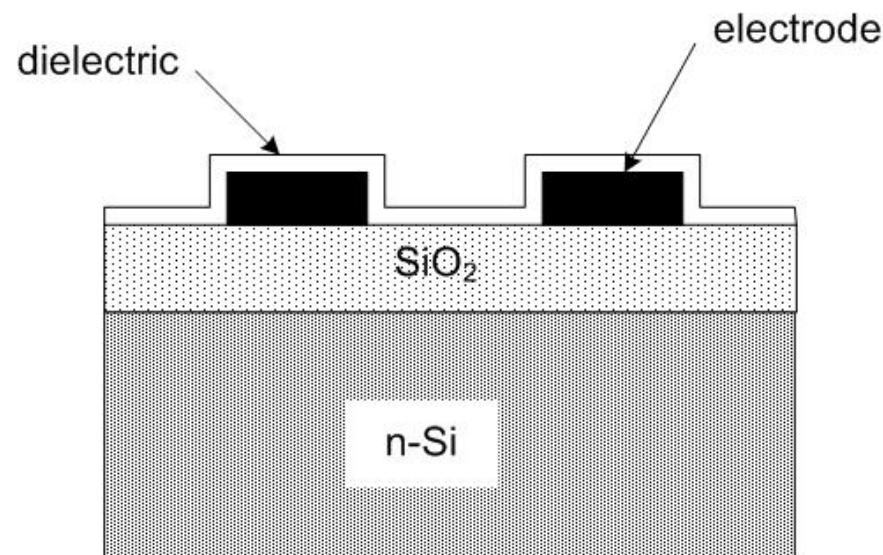


ADXL50 – blok diagram

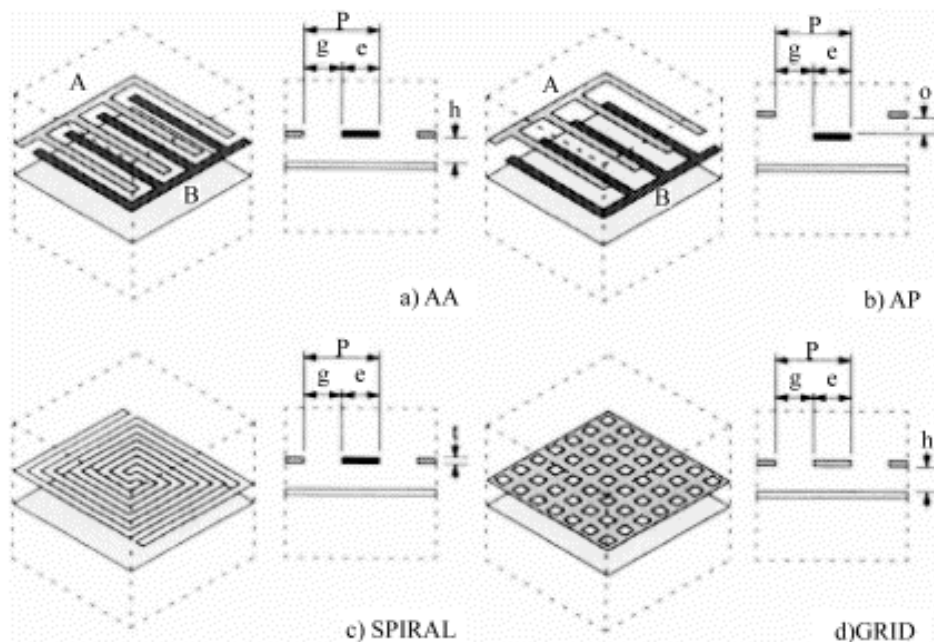


Tankoplastni kapacitivni senzor vlage

- Elektrode so prstasta struktura (ang. interdigitated)
- Dielektrična plast je SiO_2 ali PSG (fosfor-silikatno steklo)
- Ko se vlaga poveča, porazdeljena upornost pade, ekvivalentna kapacitivnost naraste



Tankoplastni kapacitivni senzor vlage



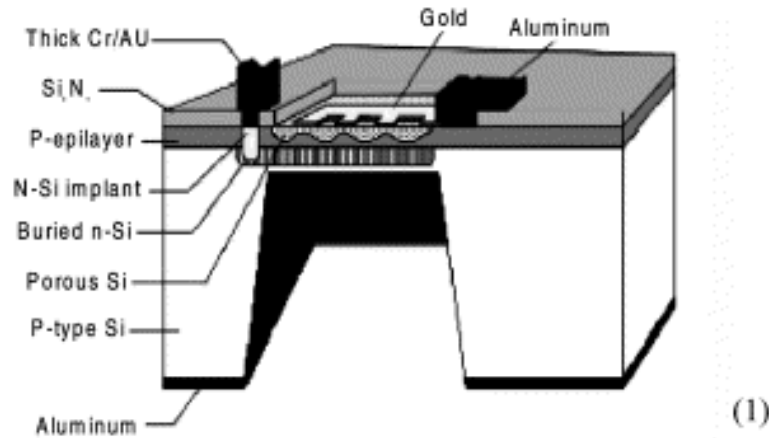
- Kapacitivni senzorji vlage z več konfiguracijami:
 - prstaste
 - spiralne
 - mrežaste

$$\frac{C_s}{C_0} = \left(\frac{\epsilon_w}{\epsilon_d} \right)^n$$

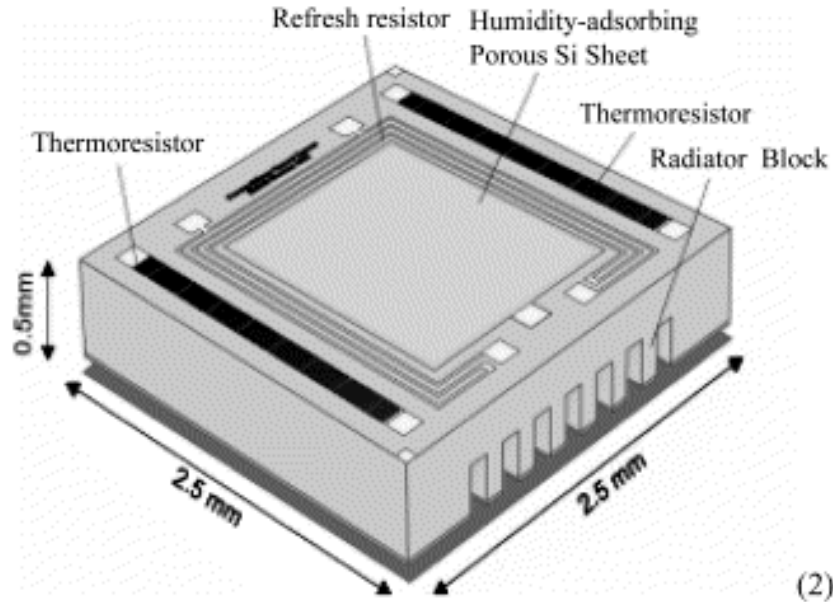
Nelinearna odvisnost kapacitivnosti kot funkcija RH

J.G. Korvink i in., Sens. Mater. 4 (6) (1993)323-335

Kapacitivni senzor vlage s poroznim Silicijem



- Membrana z n-Si grelcem za regeneracijo, površina zlate elektrode in plast poroznega silicija za absorbcijo vlage



G.M. O'Halloran et al., Delft Univ. Press (1999)

J.G. Korvink i in., Sens. Mater. 4 (6) (1993)323-335

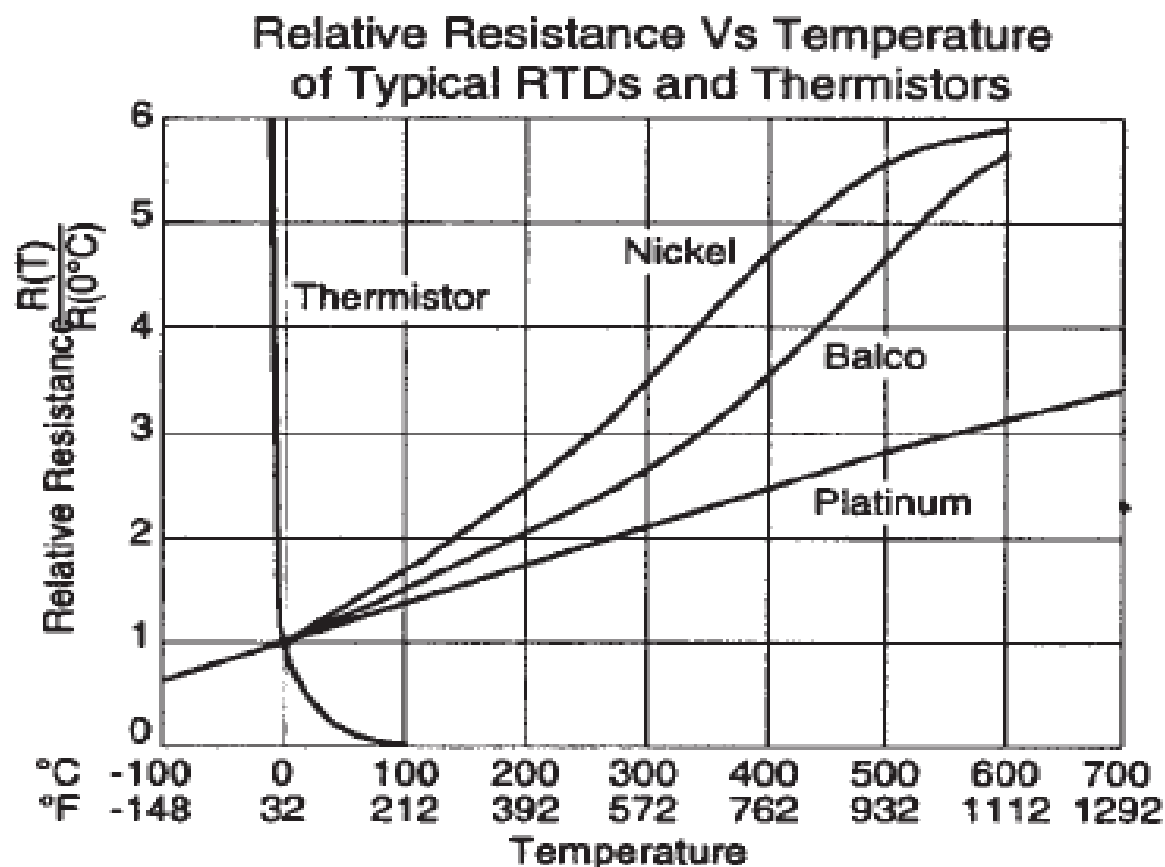
Elektronske komponente in senzorji

Senzorji temperature

Senzorji temperature

Termočleni:

- Prednosti
 - Ne potrebujejo vzbujanja
 - Enostavni
 - Poceni
 - Robustni
 - Široko temperaturno področje
- Slabosti:
 - nelinearni
 - nizkonapetostni
 - potrebujejo referenco (ledno)
 - najmanj stabilni
 - najmanj občutljivi



Primerjava senzorjev temperature

Element type	Temperature range	Benefits	Base resistance	TCR ($\Omega/^\circ\text{C}$)	Sensitivity (Avg. $\Omega/^\circ\text{C}$, 0 to 100°C)
Platinum	-259 to 1235°C -259 to 630°C	Greater range Best stability	100Ω at 0°C 100Ω at 0°C	0.003926 0.00391 0.00385 0.00385	0.392 0.391 0.385 3.85
Copper	-200 to 850°C	Good linearity	100Ω at 0°C	0.00427	0.039
Nickel	-200 to 850°C -100 to 260°C	Best linearity	1000Ω at 0°C 10Ω at 25°C	0.00627 0.00518	0.806 3.133
Nickel Iron	-100 to 260°C -100 to 204°C	Low cost High sensitivity Low cost High sensitivity	120Ω at 0°C 604Ω at 0°C 1000Ω at 23°C 2000Ω at 23°C	0.00518 0.00527	4.788 9.578

Platinasti upori

- Platina je postala standardna kovina za realizacijo uporovnih termometrov zaradi širokega temperaturnega področja uporabe in velike stabilnosti.
- Platinasti upori so na voljo v različnih nazivnih vrednostih
($R_n @ 0^\circ\text{C}$) 10Ω , 25Ω , 100Ω , 1000Ω
- Prevladujoč tip platinastega merilnega upora je PT100 ($R_n @ 0^\circ\text{C} = 100\Omega$).
- Uporabo definira IEC 751.
- Prednosti tega elementa so kemijska stabilnost, enostavnost proizvodnje in odlična ponovljivost

Callendar – Van Dusen enačba

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + (T - 100) \cdot C \cdot T^3)$$

$$R = R_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(T - \delta[0.01 \cdot T - 1] \cdot 0.01 \cdot T - \beta[0.01 \cdot T - 1] \cdot (0.01 \cdot T)^3\right)\right)$$

- α , β in δ so kalibracijski koeficienti, odvisni od čistosti Platine. Ti koeficienti so tudi odvisni od države proizvajalke
- Najvplivnejša konstanta je α , ki ima vrednost $0.003921/^\circ\text{C}$ for za ameriško krivuljo umerjanja (U.S. calibration curve) oziroma $0.003851/^\circ\text{C}$ za evropsko krivuljo umerjanja (EU calibration curve)
- Uporovni elementi se razlikujejo glede na krivuljo umerjanja!
- Za ameriško krivuljo umerjanja $\delta = 1.49$, $\beta = 0$ za $T < 0$ in $\beta = 0.11$ for $T > 0$.

Callendar – Van Dusen enačba

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 - 100 \cdot C \times T^3 + C \cdot T^4)$$

$$R = R_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(T - \delta[0.01 \cdot T - 1] \cdot 0.01 \cdot T - \beta[0.01 \cdot T - 1] \cdot (0.01 \cdot T)^3\right)\right)$$

CALENDAR-VAN DUSEN CONSTANTS†

Alpha, α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	.003750 \pm .000003	.003850 \pm .00001
Delta, δ ($^{\circ}\text{C}$)	1.605 \pm 0.009	1.4999 \pm 0.007
Beta, β^* ($^{\circ}\text{C}$)	0.16	0.10863
A ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3.81×10^{-3}	3.908×10^{-3}
B ($^{\circ}\text{C}^{-2}$)	-6.02×10^{-7}	-5.775×10^{-7}
C ($^{\circ}\text{C}^{-4}$)*	-6.0×10^{-12}	-4.183×10^{-12}

*Both $\beta = 0$ and $C = 0$ for $T > 0^{\circ}\text{C}$

Lastnosti PT100 elementa

INTERNATIONAL STANDARDS

Standard	Comment	
IEC 751	Defines Class A and B performance for 100Ω 0.00385 alpha Pt RTDs.	
DIN 43760	Matches IEC 751.	
BS-1904	Matches IEC 751.	
JIS C1604	Matches IEC 751. Adds 0.003916 alpha.	
ITS-90	Defines temperature scale and transfer standard.	
Parameter	IEC 751 Class A	IEC 751 Class B
R_0	$100\Omega \pm 0.06\%$	$100\Omega \pm 0.12\%$
Alpha, α	$.00385 \pm .000063$	$.00385 \pm .000063$
Range	-200°C to 650°C	-200°C to 850°C
Res., R_T^*	$\pm(.06 + .0008 T - 2E-7T^2)$	$\pm(.12 + .0019 T - 6E-7T^2)$
Temp, T^{**}	$\pm(0.3 + 0.002 T)^\circ\text{C}$	$\pm(0.3 + 0.005 T)^\circ\text{C}$

*Units are Ωs. Values apply to 100Ω Pt RTDs only. Scale by ratio of the R_0 s to apply to other ice point resistances.

**Applies to all 0.00385 alpha Pt RTDs independent of ice point, R_0 .

Lastnosti PT100 elementa

IEC751 določa spremembo upornosti s temperaturo, nazivno vrednost upornosti pri referenčni temperaturi in dovoljene tolerance.

Območje merjenja temperature ($-200^{\circ}\text{C} \dots 961.78^{\circ}\text{C}$) obsega dve podpodročji: $-200^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$ and $0^{\circ}\text{C} \dots 961.78^{\circ}\text{C}$

- Področje negativnih temperatur opišemo s polinomom tretje stopnje

$$R(T) = R_0 (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot [T - 100^{\circ}\text{C}] \cdot T^3)$$

- Za področje uporabe od $0^{\circ}\text{C} \dots 850^{\circ}\text{C}$ lahko poenostavimo opis s polinomom druge stopnje

$$R(T) = R_0 (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$$

- Pri čemer so koeficienti:

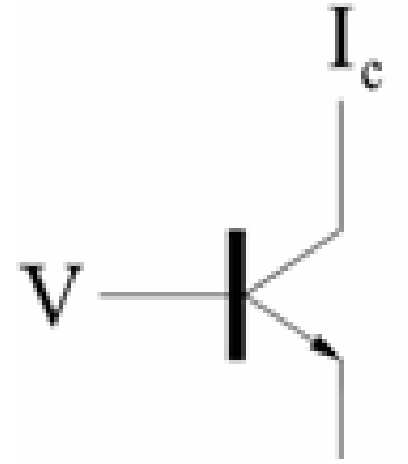
$$A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \cdot 10^{-12} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}$$

Polprevodniški senzorji temperature

- Običajno izkoriščajo napetostno-tokovno temperaturno odvisnost
- Diodo tvorimo z uporabo BE spoja BJT.
- VBE napetost BJT je odvisna od kolektorskega toka I_C .
- $k \rightarrow$ Boltzmannova konstanta ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T absolutna temperatura,
- q osnovni naboj elektrona ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C),
- $I_s \rightarrow$ zaporni tok BE diode (odvisen od geometrije in temperature)
- Pri enačbi smo predpostavili napetost kolektorja nekaj 100 mV in zanemarili Earlyev efekt

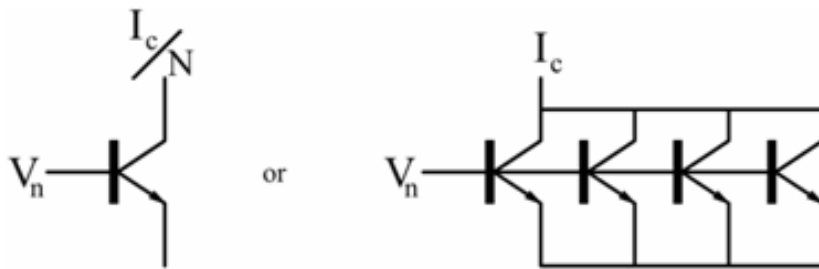


$$V = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_c}{I_s} \right)$$

I_s je močno odvisen od temperature, zato tako vezje ni uporabno za meritev.

PTAT senzor temperature

- Če tok tranzistorja zmanjšamo za faktor N (lahko vzamemo N identičnih tranzistorjev) se tok I_C razdeli enakomerno mednje.
- Izraz za razliko med dvema BE napetostima je proporcionalen absolutni temperaturi (ang. proportional to absolute temperature) in neodvisen od I_S .



$$V_N = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_c}{NI_S} \right)$$

VIR: [Analog devices, RAQ](#)

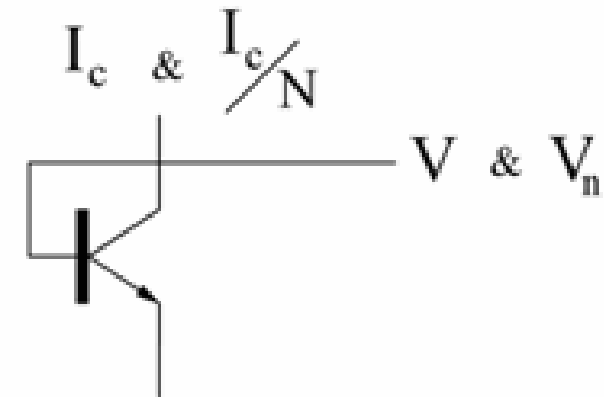
PTAT sensor temperature

$$V - V_N = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_c}{I_s} \right) - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_c}{NI_s} \right)$$

$$V - V_N = \frac{kT}{q} \left(\ln \left(\frac{I_c}{I_s} \right) - \ln \left(\frac{I_c}{NI_s} \right) \right)$$

$$V - V_N = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\left(\frac{I_c}{I_s} \right)}{\left(\frac{I_c}{NI_s} \right)} \right)$$

$$V - V_N = \frac{kT}{q} \ln (N)$$

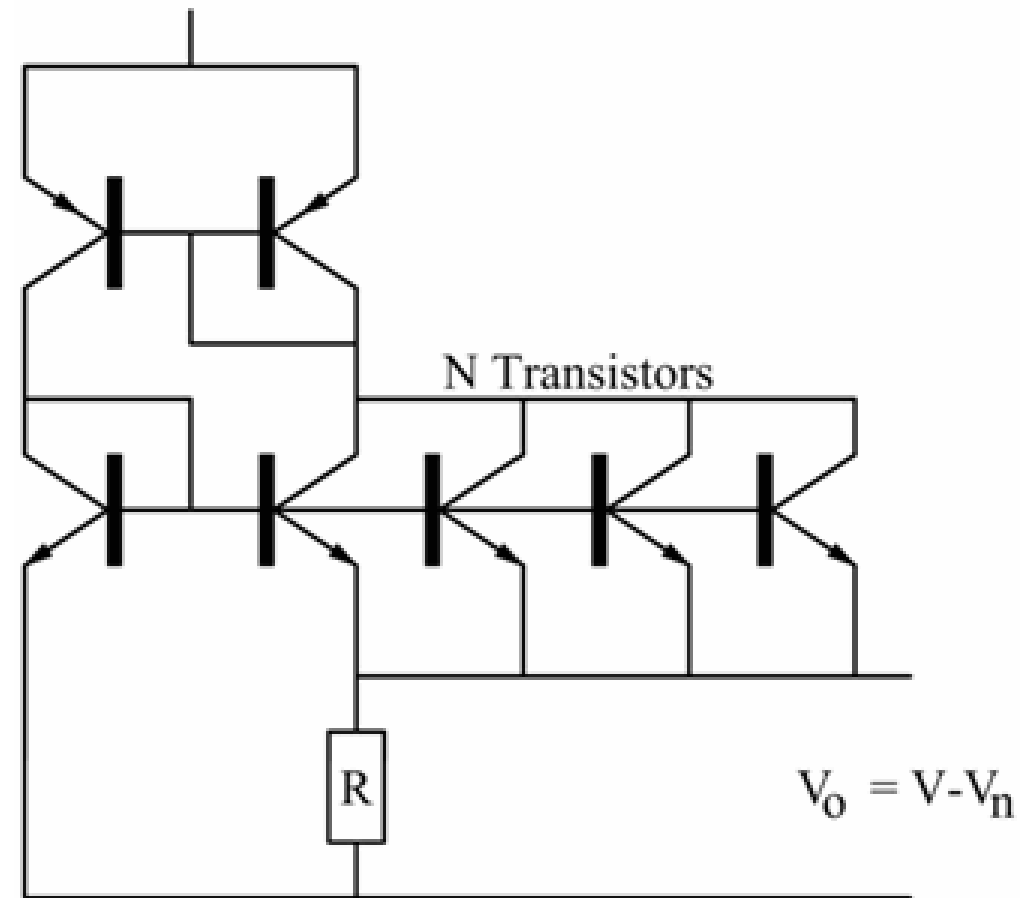


VIR: [Analog devices, RAQ](#)

PTAT senzor temperature

Sestavljen iz:

- $N+1$ NPN BJT,
- temperaturno stabilen upor in
- tokovno zrcalo iz dveh PNP BJT .
- Celoten tok vezja je proporcionalen absolutni temperaturi \rightarrow upor R ta tok preslika v izhodno napetost $V-V_N$.



VIR: [Analog devices, RAQ](#)

PTAT senzor temperature

Predstavljeno vezje uporablja osnovni "band-gap" temperaturni senzor.

- Vezje ni popolno, saj se obnaša stabilno, če so vsi tranzistorji izključeni in izhoda ni.
- Običajno dodamo vezje, ki zagotavlja vklop teh tranzistorjev ob vklopu napajanja.
- Temperaturni senzori AD590, AD592, AC2626 uporabljajo točno tako vezje (s štartnim vezjem). Njihova prenosna karakteristika je tokovna ($1 \mu\text{A/K}$), če je napetost senzora [4 ... 30] V.
- Temperaturni senzori z napetostnim izhodom (TMP-01),
- Temperaturni senzori z napetostnim izhodom in ničelno napetostjo (TMP-35/36/37),
- Temperaturni senzori s PWM izhodom (TMP-03/04/06),
- Temperaturni senzori z digitalnim izhodom
- Več informacij:
Timko: A two-terminal IC temperature transducer

Elektronske komponente in senzorji

Termoelektrični elementi

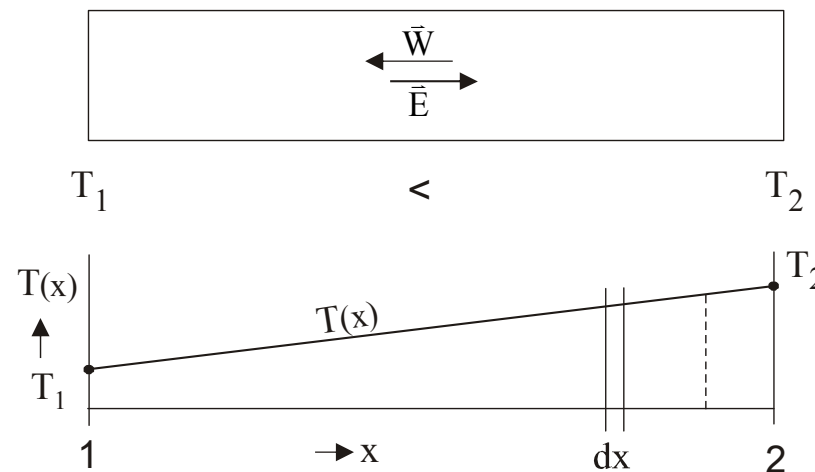
SPLOŠNA ENAČBA ZA ELEKTRIČNO POLJE

$$\vec{E} = \frac{1}{q^2 K_{11}} \vec{j} + \frac{1}{q} \vec{\nabla} F + \frac{K_{21} - FK_{11}}{q K_{11} T} \vec{\nabla} T$$

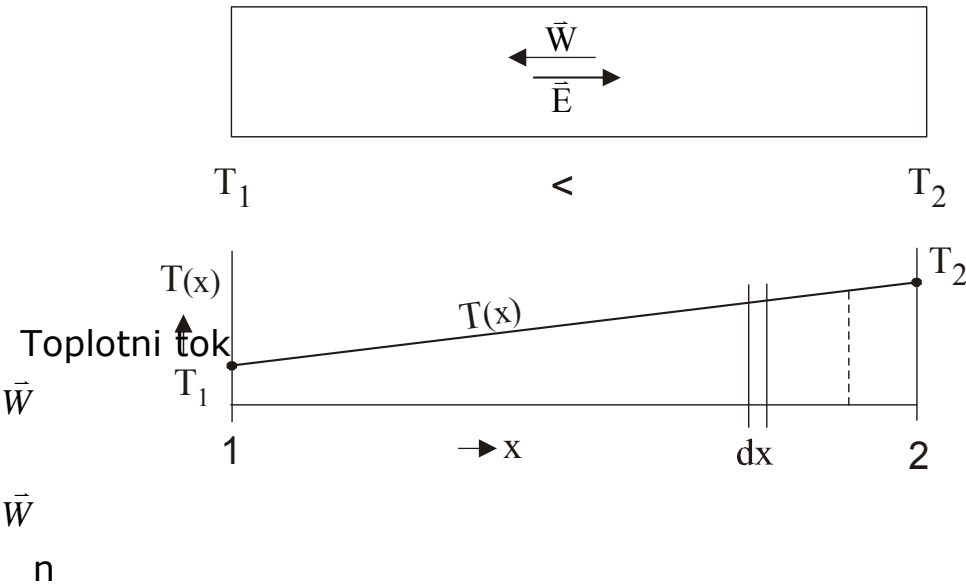
- Prvi člen: Ohmov zakon v obratni smeri. V praksi običajno ta prispevek namesto s poljem označimo z ustreznim napetostnim padcem (voltage drop), pri dani geometriji kar kot $V = RI$.
- Drugi člen: $E \approx \text{grad}F$ nastopi zaradi nehomogenosti materiala, kar podaja $\text{grad}F$. Znan primer takega prispevka je vgrajeno polje (built-in field) v nehomogeno dopiranem polprevodniku, npr. v bazi bipolarnega transistorja.
- Tretji člen: $E \approx \text{grad}T$ nastopi zaradi nehomogene temperature, kar podaja $\text{grad}T$.

Seebeckov pojav

- V termičnem ravnovesju mora za vodnik veljati: $F = \text{const}$.
- Vodnik je električno izoliran od okolice, zato tu ni premika električnih nabojev oz. električnega toka: .
- Po vodniku obstaja spremenljiva temperatura $T(x)$, zato obstaja $\text{grad}T$ po vodniku
- Na vodniku se zaradi temperaturne razlike med dvema točkama pojavi električna napetost V_{Seeb}



Seebeckov pojav



$$\vec{W} = -\lambda \vec{\nabla} T$$

$$\vec{E} = \alpha \vec{\nabla} T$$

Seebeckov koeficient materiala

Poenostavitev za 1D spremembo T:

$$E = \alpha \frac{dT}{dx}$$

Toplotni tok W teče z mesta višje temperature (x_2 @ T_2) proti mestu nižje temperature (x_1 @ T_1)

Seebeckov pojav

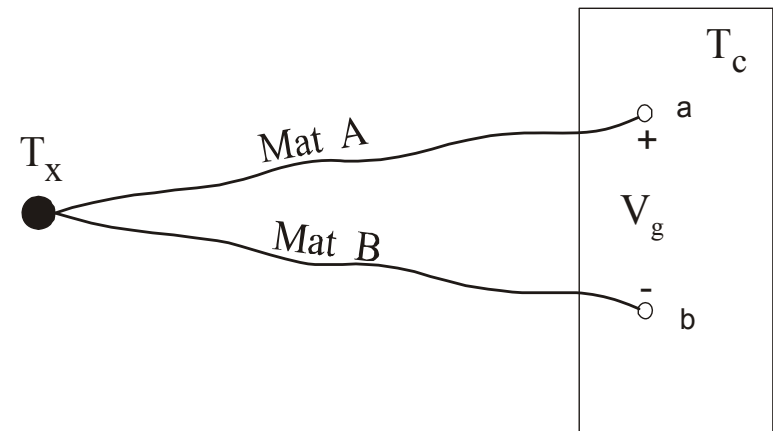
- Električno polje povzroči nastanek električne napetosti po vodniku ($E = -dV/dx$)
- Na neki majhni dolžini dx vodnika se torej pojavi napetost dV :

$$dV = -E dx = -\alpha \frac{dT}{dx} dx = -\alpha dT$$

$$V_{Seeb} = -\int_{x_1}^{x_2} dV = \int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT$$

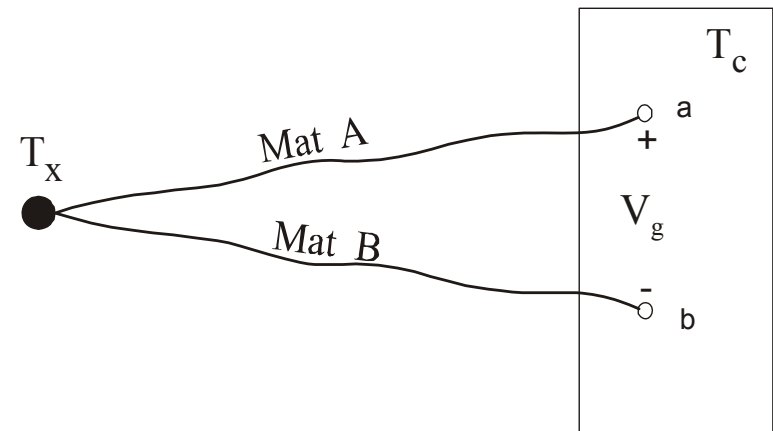
Termočlen

- Termočlen (Thermocouple)
- Najpogostejša industrijska meritev temperature
- Osnovna struktura: različna prevodna materiala, A in B spojena skupaj



Meritve s termočlenom

- Rezultat meritve ni odvisen od izvedbe spoja, materiali spoja so na isti temperaturi → ni nevarnosti napake meritve zaradi Seebeckove napetosti
- Referenčna temperatura T_{ref} poskrbi, da sta spoja a, b termoelementa s podaljški ali merilnimi kabli na isti temperaturi in ne pride do napake zaradi Seebeckove napetosti.
- Referenčna temperatura T_{ref} je neka poznana, konstantna temperatura.
- Običajno jo realiziramo z ledno referenco (termovka, v kateri se nahaja mešanica vode in ledu → $T_{ref} = 0^{\circ}\text{C}$).
- Možna je izvedba pri $T_{ref} \approx$ sobna.

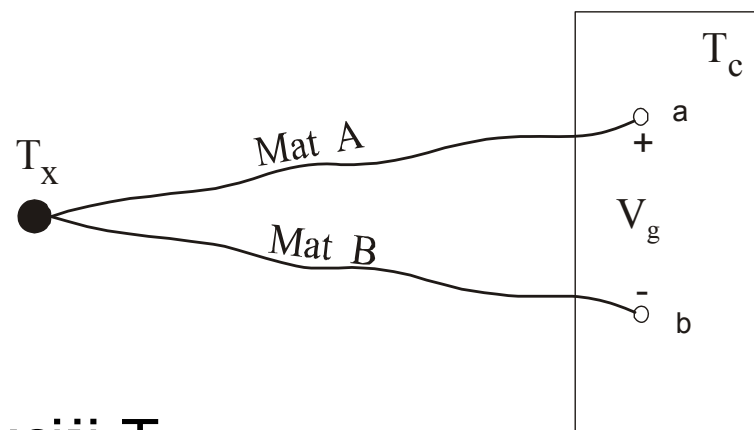


Termoelektrična napetost V_g

- Seebeckovo napetost (termoelektrična napetost) dobimo po KNZ s seštevanjem (integracijo) prispevkov dV : (za integracijo po vodniku B obrnemo meje integracije)

$$V_g = \int_a^b \alpha(T) dT = \int_{T_0}^{T_x} \alpha_A(T) dT + \int_{T_x}^{T_0} \alpha_B(T) dT$$

$$V_g = \int_{T_0}^{T_x} [\alpha_A(T) - \alpha_B(T)] dT$$



Poenostavitev: α_A , α_B sta počasni funkciji T .

Za majhne spremembe $T_x - T_0 \rightarrow \alpha_A, \alpha_B \approx \text{const}$

$$V_g = (\alpha_A - \alpha_B) (T_x - T_0)$$

Standardni termočleni

- Standardne kombinacije materialov A, B z dobrimi lastnostmi (T, t stabilnost) opišemo s črko (tipom).
- Pri uporabi je treba paziti na omejitvev ambienta (vlaga, oksidacija, redukcija itd.).

Tip	Mat. A/B	T [°C]	S [mV/°K]
T	Cu/Konstantan	-200 ...+600	40,9
J	Fe/Konstantan	-200 ...+ 100	51,7
K	Cr/Alumel	-200 ...+ 1300	40,6
E	Cr/Konstantan	-100 ...+ 1000	60,9
S	Pt:Rh(10%)/Pt	0 ...+ 1550	6,0
R	Pt:Rh(13%)/Pt	0 ...+ 1600	6,0

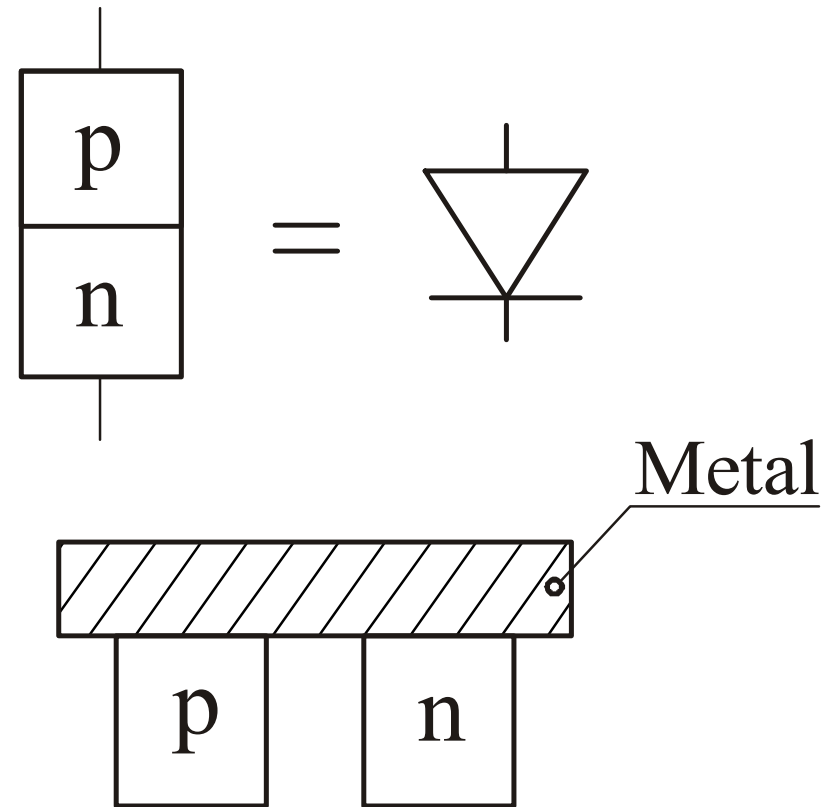
$$S_T = \frac{dV_g}{dT_x} = \alpha_A - \alpha_B$$

Polprevodniški termoelementi

- Omenjena lastnost se izkorišča pri polprevodniških Si temperaturnih senzorjih.
- Izkaže se, da imata P- in N-tip polprevodnika absolutni Seebeckov koeficient materiala α nasprotnega predznaka.
- Zato je PN spoj dober termoelement z visoko občutljivostjo, $S_T \approx -2\text{mV}/^\circ\text{C}$ (v področju sobnih temperatur)
(Klasični termočleni $\rightarrow S_T \approx 50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$)

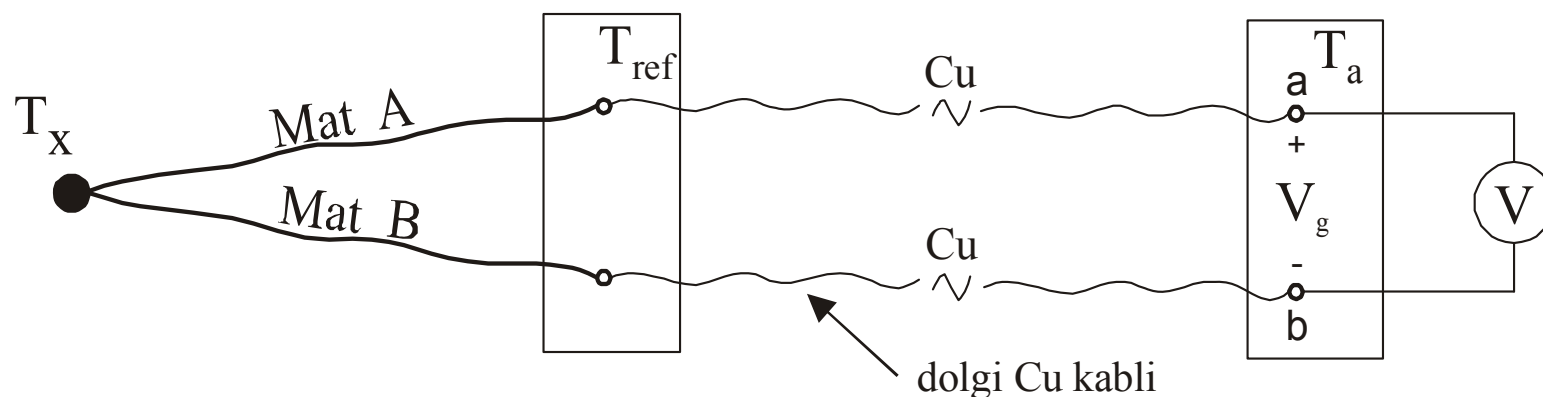
Polprevodniški termoelementi

- PN spoj oz. dioda
- P/metal/N struktura: blok P-tipa, kovine in N-tipa. S stališča termoelektričnih efektov gre za ekvivalentno strukturo kot PN spoj. Izdelava je enostavnejša, robustnejša in cenejša (ne zahteva čiste mikroelektronske tehnologije kot pri izdelavi PN spoja).



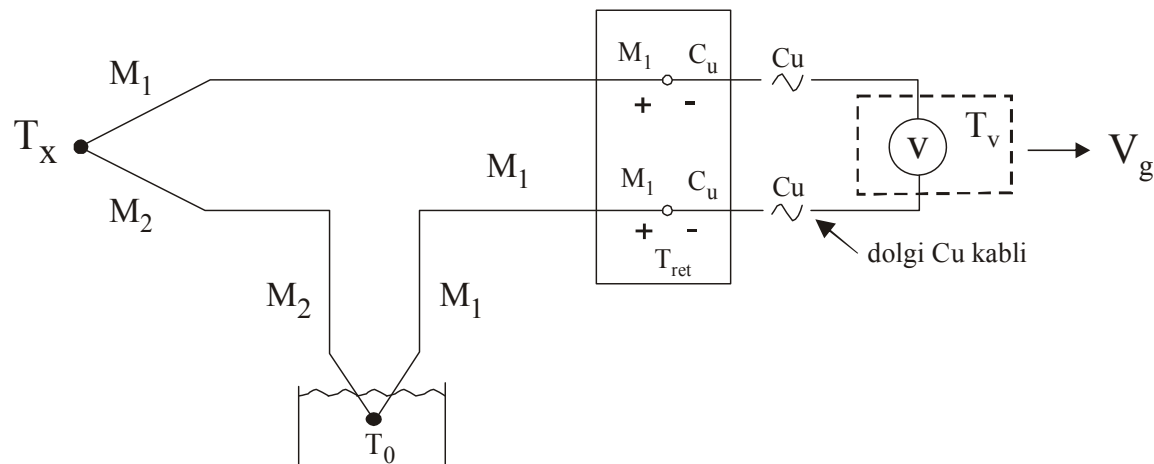
Temperaturne meritve s termočlenom

- Meritev temperature s konstantno referenčno temperaturo
- Materiali za termočlene so dragi, zato čim pridemo iz visokotemperaturnega področja meritve, uporabimo cenene Cu podaljške
- Termoelektrične napetosti na spojih med termoelementom in Cu kabli ne smejo vplivati na meritev (se morajo izničiti).
- To drži, če so vsi spoji s kabli na isti temperaturi T_{ref}



$$V_g = (\alpha_A - \alpha_B)(T_x - T_{ref})$$

Temperaturne meritve s termočlenom



$$\begin{aligned}
 V_g &= \int \alpha(T) dT = \\
 &= \int_{T_v}^{T_{ref}} \alpha_{Cu} dT + \int_{T_{ref}}^{T_x} \alpha_1 dT + \int_{T_x}^{T_0} \alpha_2 dT + \int_{T_0}^{T_{ref}} \alpha_1 dT + \int_{T_{ref}}^{T_v} \alpha_{Cu} dT \\
 &= \int_{T_a}^{T_{ref}} (\alpha_{Cu} - \alpha_{Cu}) dT + \int_{T_{ref}}^{T_x} (\alpha_A - \alpha_B) dT
 \end{aligned}$$

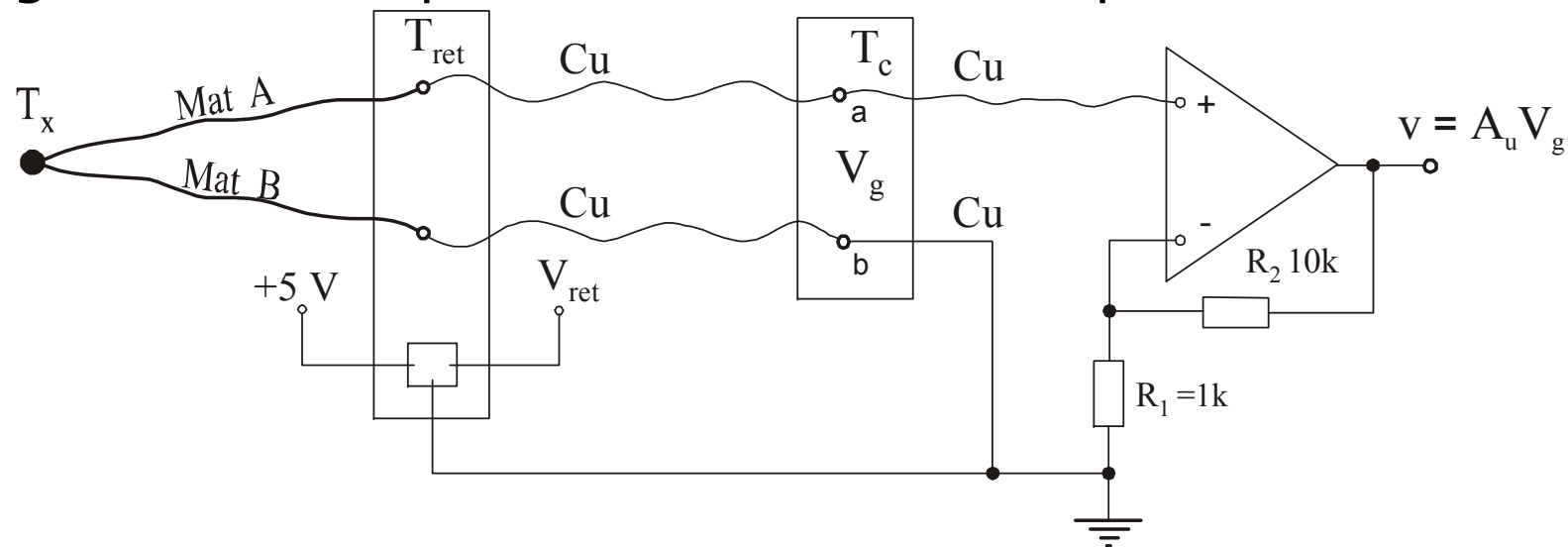
$$V_g = \alpha_1 (T_x - T_{ref}') + \alpha_2 (T_0 - T_x) + \alpha_1 (T_{ref}' - T_0)$$

$$V_g = \alpha_1 (T_x - T_0) - \alpha_2 (T_x - T_0)$$

$$V_g = (\alpha_1 - \alpha_2) (T_x - T_0)$$

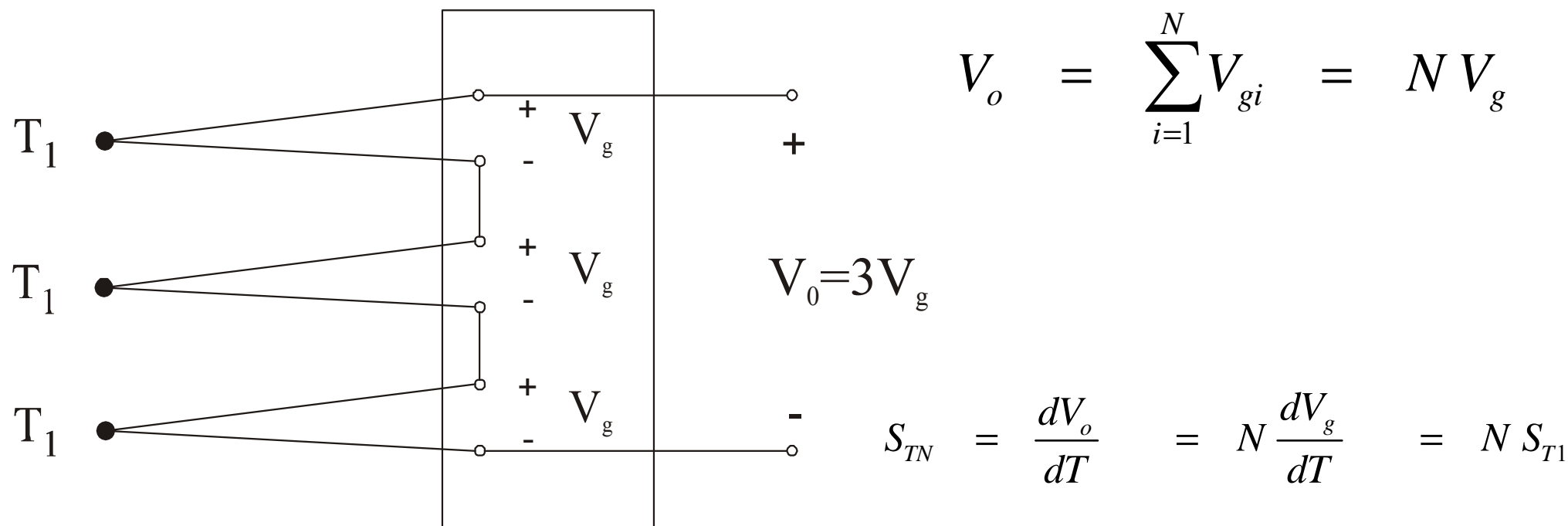
Meritev temperature s spremenljivo T_{ref}

- Referenčna temperatura T_{ref} ni stabilizirana oz. se lahko spreminja, v področju okrog sobnih (nizkih) temperatur.
- Zato referenčno temperaturo T_{ref} tu stalno merimo z dodatnim natančnim referenčnim nizkotemperaturnim temperaturnim senzorjem – **kompensacija mrzlega spoja** (ang. cold junction compensation). Meritev ni zahtevna oz. draga, ker gre za področje okrog sobnih temperatur.
- Rezultat te meritve, T_{ref} oz. pripadajočo V_{ref} stalno odštevamo od generirane napetosti in tako dobimo pravilen merilni rezultat



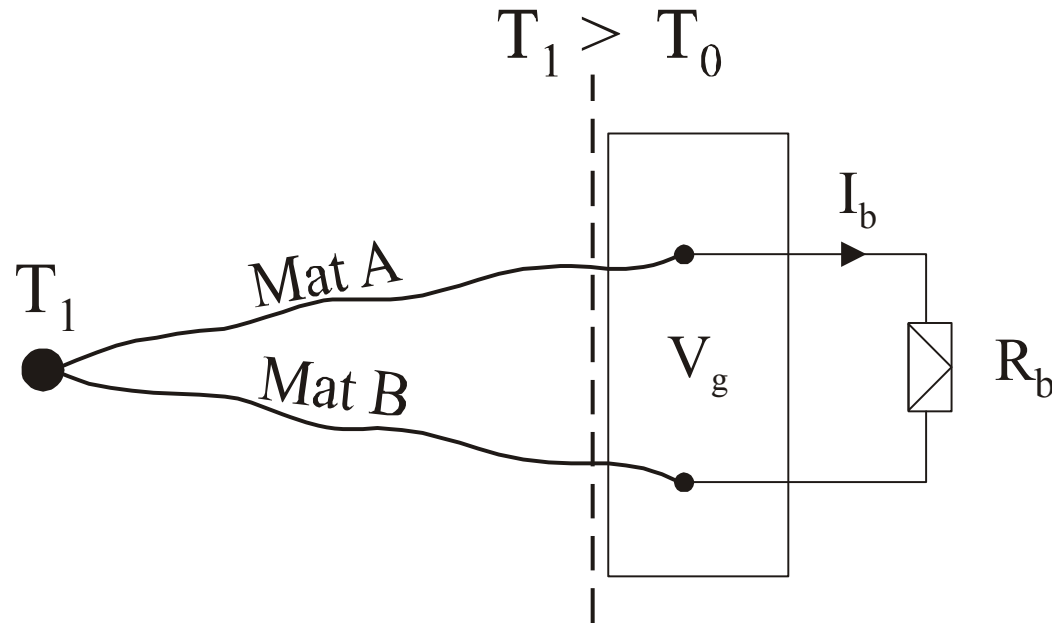
Termobaterija (thermopile)

- Termobaterija je temperaturni senzor s povečano občutljivostjo, kar dosežemo z zaporedno vezavo več (N) termoelementov.



Termoelektrični generatorji

- Isti princip kot pri termobateriji se lahko uporabi tudi za pridobivanje električne energije.
- Pretvornik toplotne energije v električno
- Električna energija se tvori zaradi toplotne razlike $\Delta T = T_1 - T_0$. Če ni toplotne razlike ($\Delta T = 0$), ni generacije električne moči.
- Enostavni in zanesljivi elementi, saj ni gibajočih se delov, z relativno majhno težo.
- Tipičen izkoristek vložene energije je v razredu 10%
- V vesoljskih plovilih

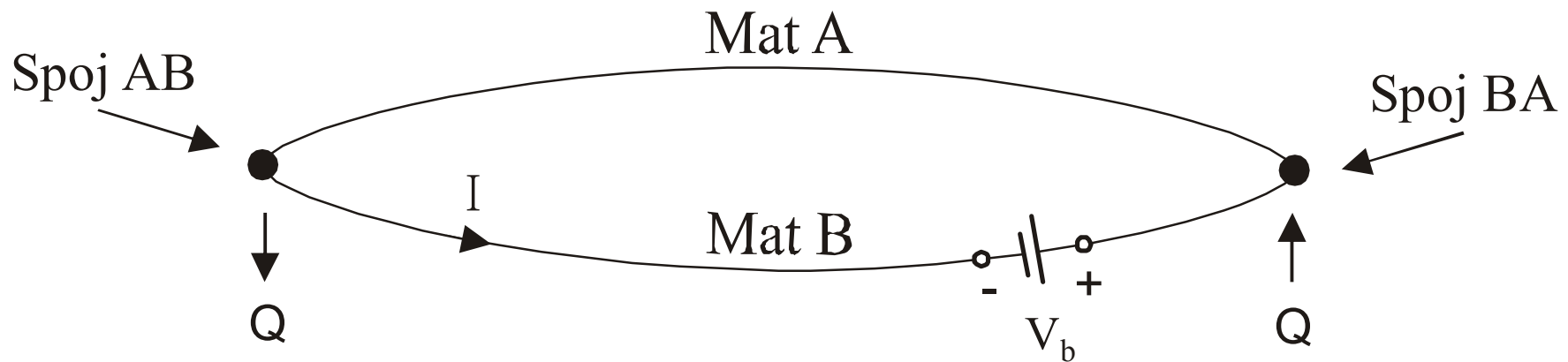


$$P_b = I_b V_b = V_g^2 R_b$$

$$P_b = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2 (T_1 - T_0)^2}{R_b}$$

Peltierjev pojav

- Če teče električni tok skozi spoj dveh prevodnih materialov A in B, se na spoju toplotna energija oz. toplota Q sprošča ali absorbira, odvisno od smeri toka glede na električno polje oz. napetost v spoju.



Peltierjev pojav

- Izhodišče je osnovna zveza med gostoto toplotnega toka \vec{W} in gostoto električnega toka \vec{j}

$$\vec{W} = \pi \vec{j} - \lambda \vec{\nabla} T$$

- Poenostavimo: konstantna temperatura ($T = \text{const}$) v celotnem področju vodnikov ($\text{grad}T=0$):

$$\vec{W} = \pi \vec{j}$$

Peltierjev pojav

- Običajno nas bolj zanima zveza med oddano ali prejeto toploto $Q[\text{cal}, \text{Ws}]$ in tokom vodnika $i[\text{A}]$.
- Dodatno poenostavimo na 1D primer → opis s skalarji.
- Gostoto toplotnega toka iz spoja AB lahko tedaj zapišemo v obliki

$$W = \frac{1}{A_{\text{topl}}} \frac{dQ}{dt} = \pi_{AB} j = \pi_{AB} \frac{i}{A_{\text{el}}}$$

Peltierjev pojav

- π_{AB} → Peltierjev koeficient spoja AB , določen z razliko Peltierjevih koeficientov obeh materialov A in B .
- V primeru idealnih kontaktov (Fermijev nivo konstanten) velja enostavna zveza med Peltierjevimi koeficienti in Seebeckovimi koeficienti:

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B = (\alpha_A - \alpha_B) T$$

$$W = \frac{1}{A_{topl}} \frac{dQ}{dt} = \pi_{AB} j = \pi_{AB} \frac{i}{A_{el}}$$

Dodatna poenostavitev: $A_{topl} \approx A_{el}$

$$dQ = \pi_{AB} i dt$$

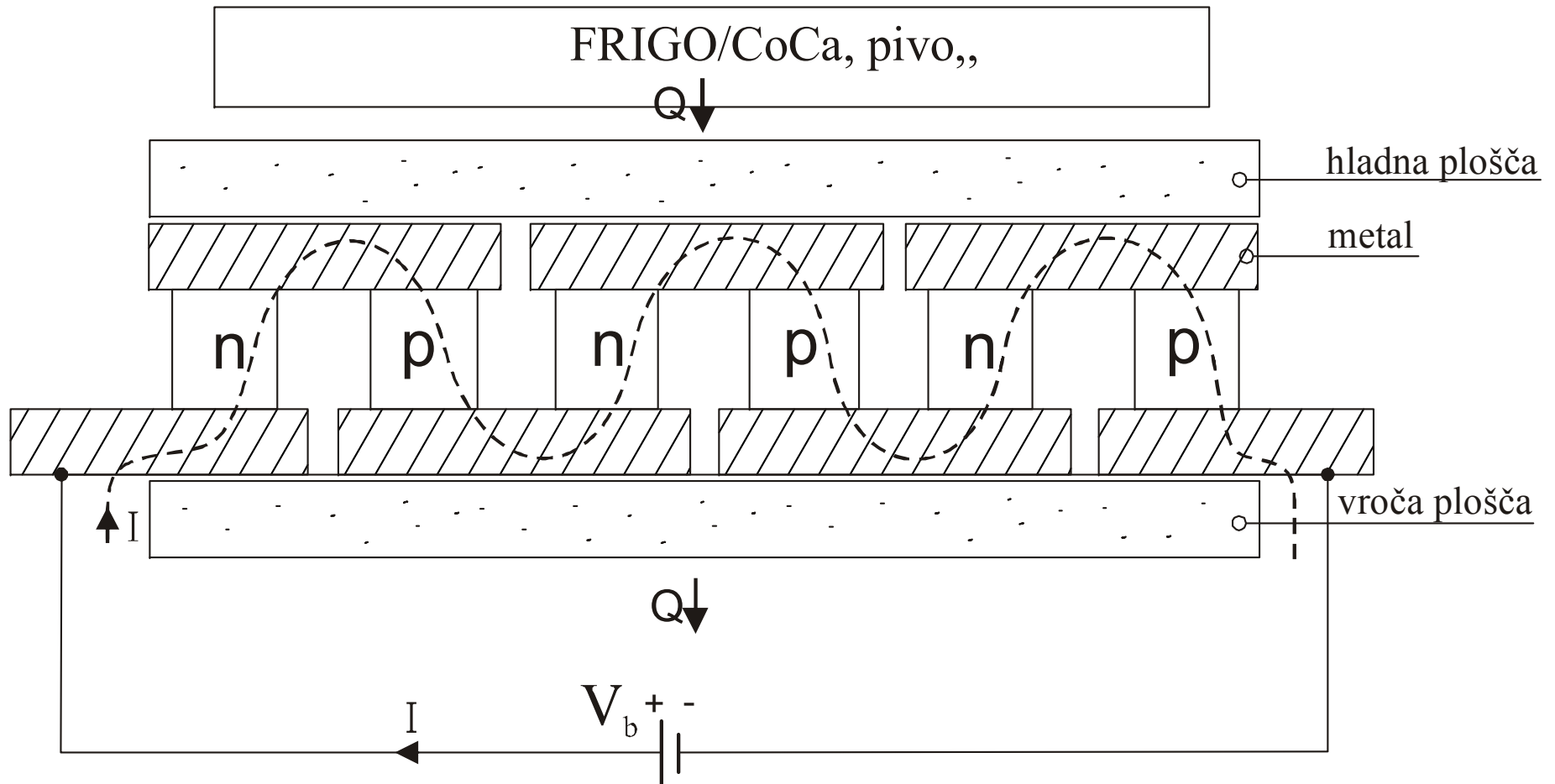
I = const.

$$Q = \pi_{AB} I t$$

Peltierjev pojav

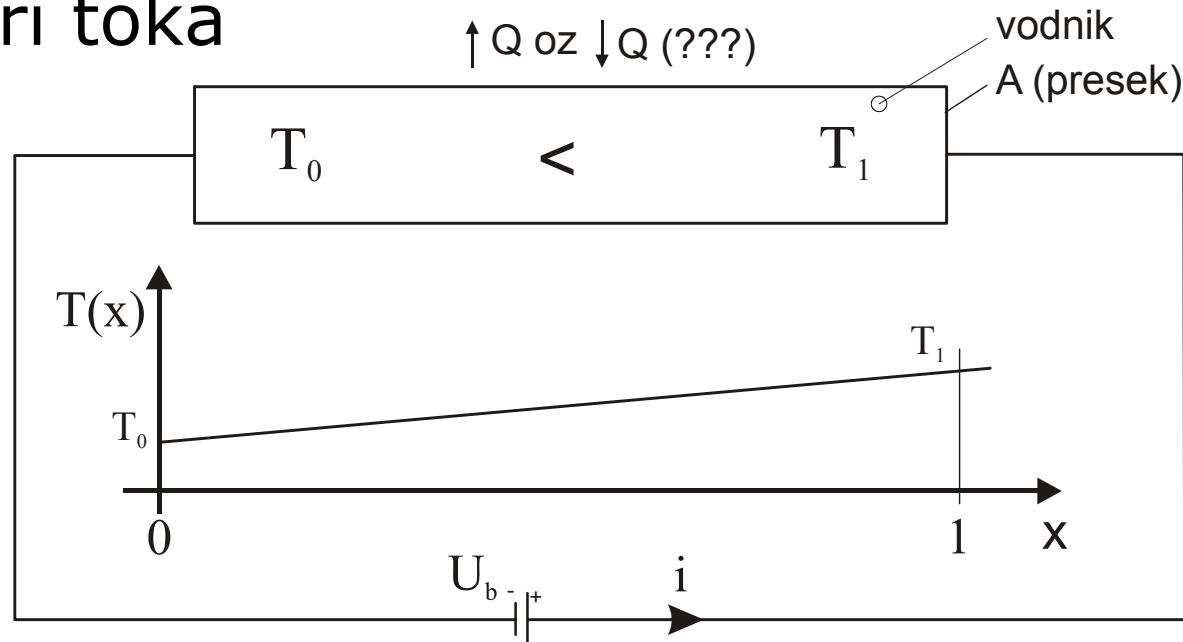
- Toplota Q je na spoju prejeta ali oddana toplota v Peltierjevi zanki pri toku I , v času t
- Za drugi spoj BA velja: $\pi_{BA} = \pi_B - \pi_A = -\pi_{AB}$
- Toplotni tok se obrne, teče v spoj in imamo obraten pojav – segrevanje
- Peltierovo segrevanje spoja nima zveze z Jouleovim segrevanjem materiala (ohmske izgube).
 - Jouleova toplota je kvadratno odvisna od toka ($P_{\text{sgr}} = I^2R$)
 - Peltierjeva odvisnost je od toka linearna

Peltierjev pojav



Thomsonov pojav

- Soroden Peltierjevemu pojavu: Osnovna razlika s Peltierjevim pojavom je, da se temperatura v tem primeru spreminja s krajem: $T = T(x)$ ($\text{grad}T \neq 0$)
- Če teče električni tok I skozi vodnik, ki ima spremenljivo temperaturo $T(x)$, pride v vodniku do odvajanja ali do absorpcije toplote Q , odvisno od smeri toka



$$dQ = -\tau_{Th} (\vec{\nabla}T \cdot \vec{j}) dt dV$$

Thomsonov pojav

- Izraz za prejeto oz. oddano toploto dQ , v majhnem volumnu dV in majhnem času dt
- τ_{Th} → Thomsonov koeficient.

$$\tau_{Th} = T \frac{d\alpha}{dT}$$

Elektronske komponente in senzorji

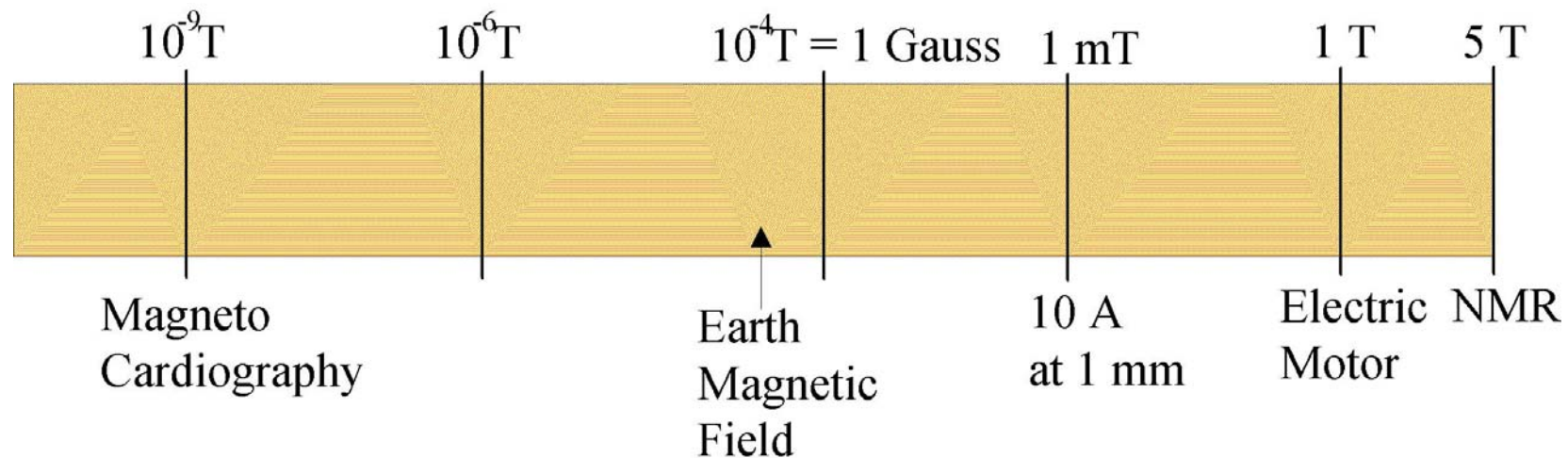
Senzorji magnetnega polja

Vrste magnetnih senzorjev

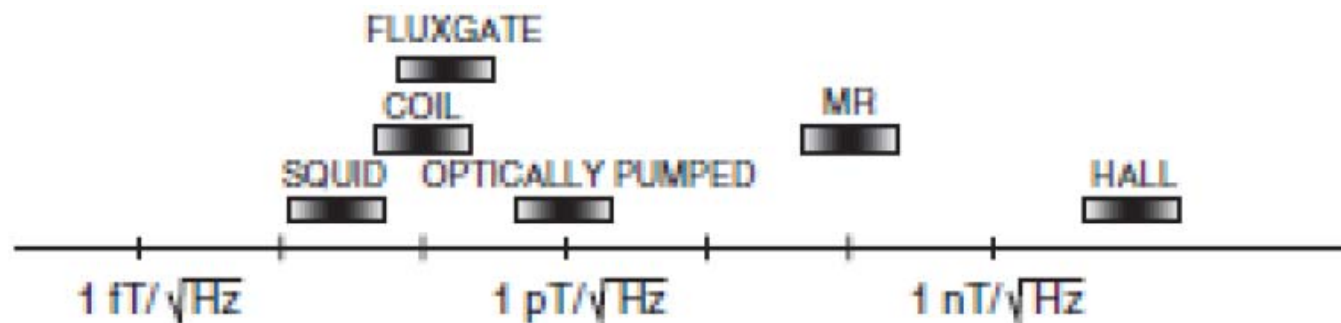
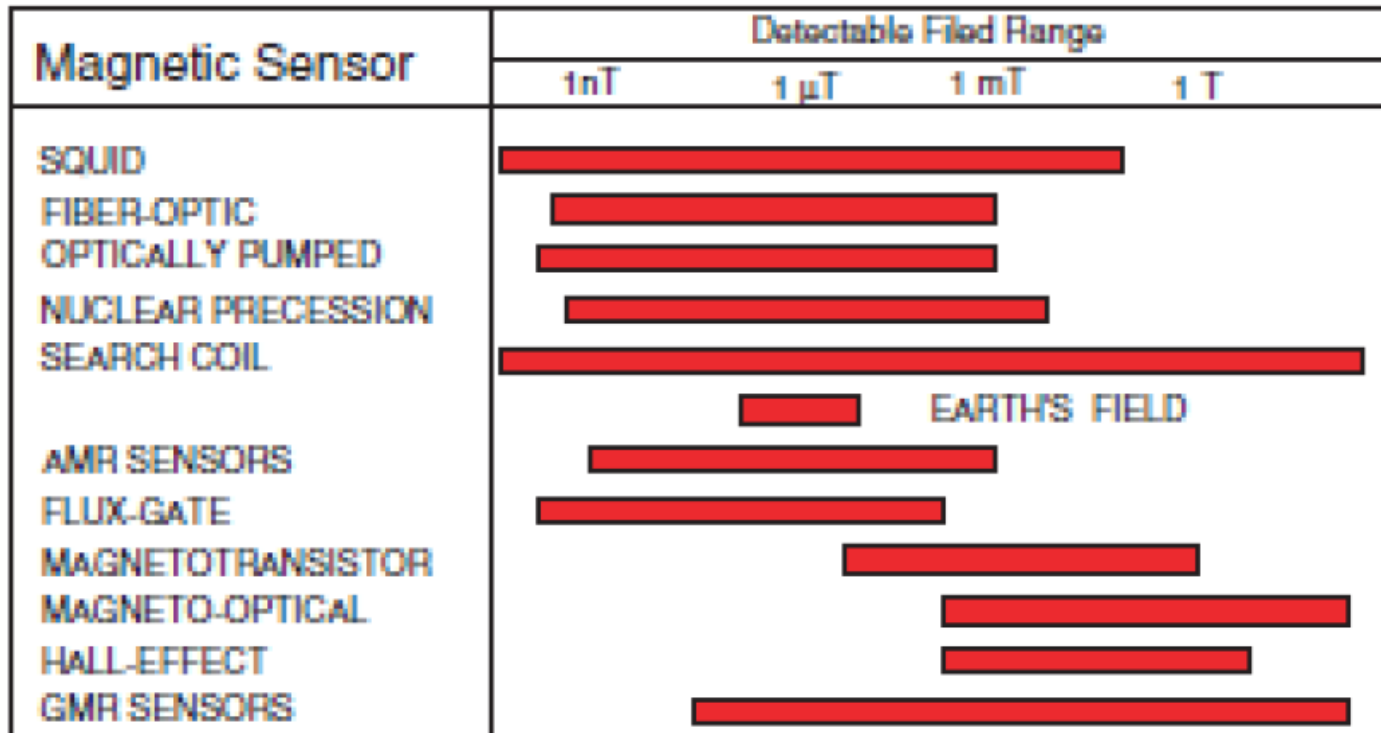
- Hallov senzor
- Magnetoupori (ang. Magnetoresistance - MR)
 - Anizotropni magnetoupor (ang. Anisotropic Magnetoresistance AMR)
 - Gigantski magnetoupor (ang. Giant Magnetoresistance -GMR)
 - Kolosalni magnetoupor (CMR) (ang. Collosal Magnetoresistance -CMR)
 - Tunelski magnetoupor (TMR)
- Induktivni senzor
- Fluxgate

Enote

- Gostota magnetnega polja
 - Tesla: T
 - Gauss = 10^{-4} T
- Jakost magnetnega polja:
 - A/m
 - Oersted: $1 \text{ A/m} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$
- Magnetni pretok: $1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ Wb}$
- Permeabilnost: $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

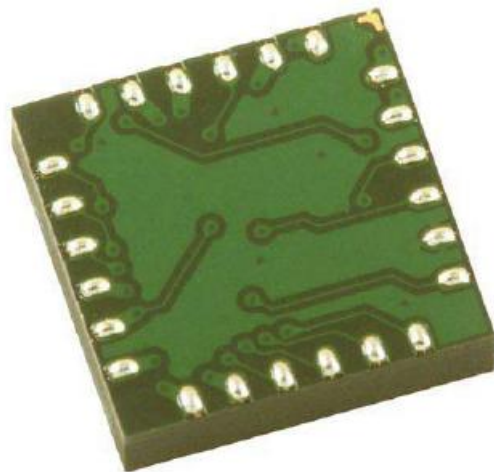


Senzorji magnetnega polja

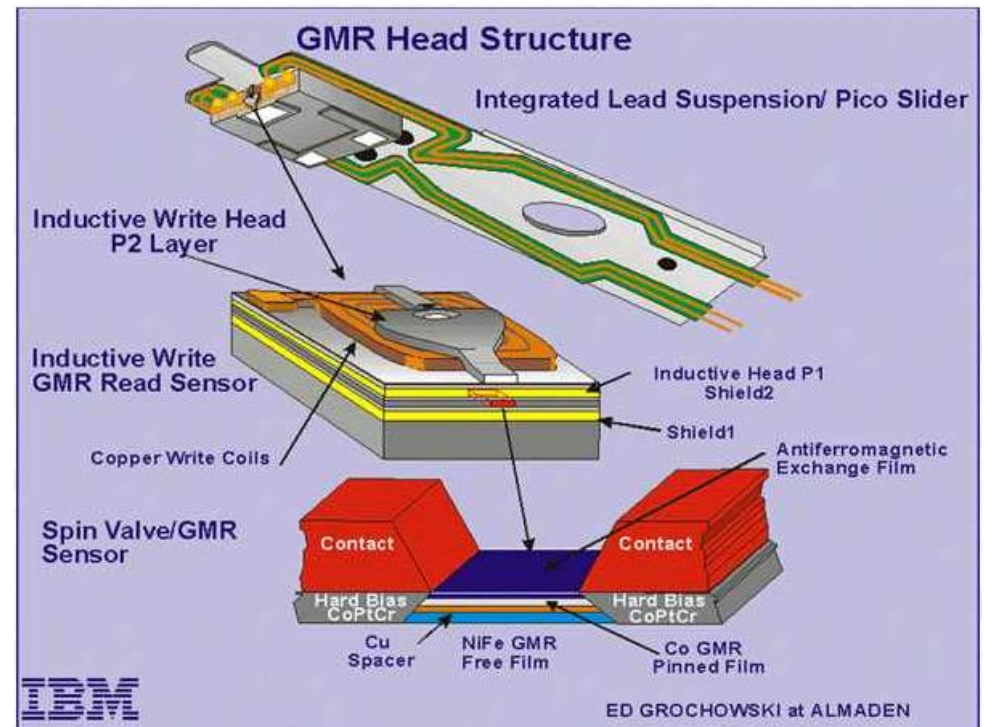


Uporaba magnetnih senzorjev

Digitalni kompas
Uporablja dvoosni MR magnetni senzor
za detekcijo magnetnega polja
(mobitel, vozila, položaj anten)



Struktura bralne glave diska z GMR



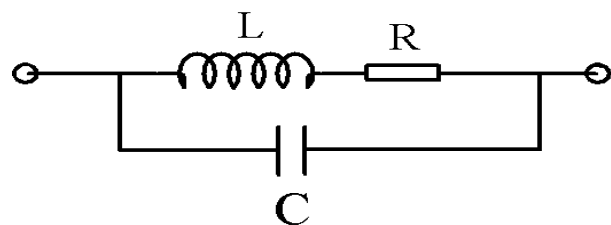
Lastnosti magnetni senzorjev

Meritev	Območje B (mT)	Občutljivost (nT)	Frekvenčno področje (Hz)	Uporaba
Induktivnost	$10^{-10} \dots 10^6$	Odvisno od aplikacije	$0.1 \dots 10^7$	Zaznavanje spreminjajočega se magnetnega polja
Hall efekt	$0.1 \dots 3 \cdot 10^4$	100	$0 \dots 100 \text{ M}$	Raciometrični linearni senzor (meritev toka)
MR/GMR	$10^{-3} \dots 5$	10	$0 \dots 10 \text{ M}$	Bolj občutljiv kot Hall, bolj nelinearen (Kompasi)
"Fluxgate"	$10^{-4} \dots 0.5$	0.1	$0 \dots 10 \text{ k}$	Vektorski Magnetometer (kompasi)

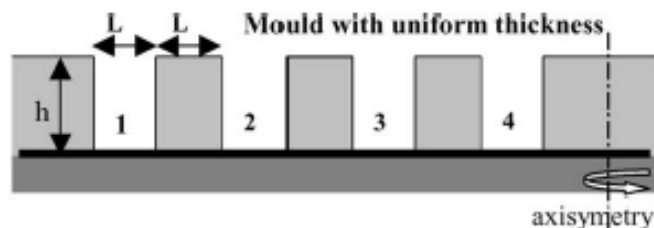
Induktivni senzorji

Induktivnost za meritev ali tvorbo magnetnega polja

Model of the inductor



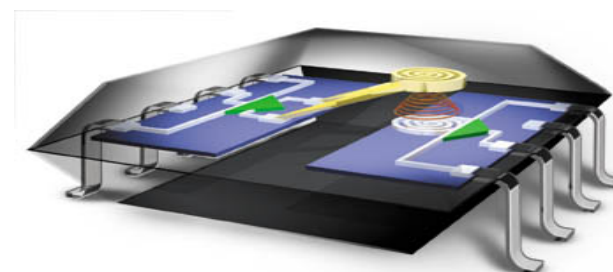
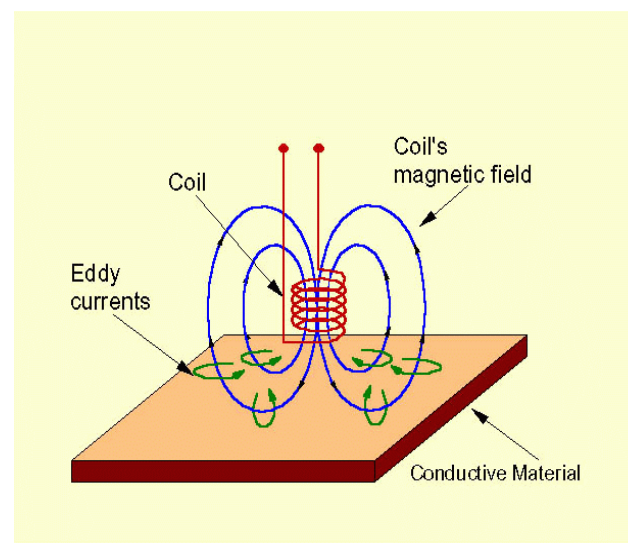
Electroplating



Uporaba:

- NMR (Nuclear Magnetic Resonance)
- NDE, Isolator

NDE (Non Destructive Evaluation)



ADuM1100

Komponente, sestavi in senzorji

Hallovi senzorji

Zgodovina

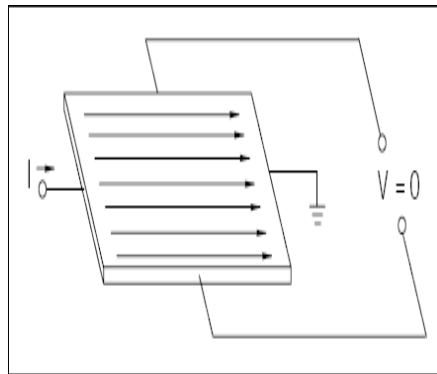
- Hallov efekt je odkril Edwin Hall v letu 1879
- Razvoj polprevodniških struktur v 1950 je vodil k do prvega uporabnega inštrumenta za meritve magnetnega polja
- V 1960 so se pojavile prve kombinacije Hallovih elementov z integriranimi ojačevalniki
 - Klasično Hallovo stikalo z digitalnim izhodom
 - V 1965 so razvili prvi nizkocenovni integrirani Hallov senzor



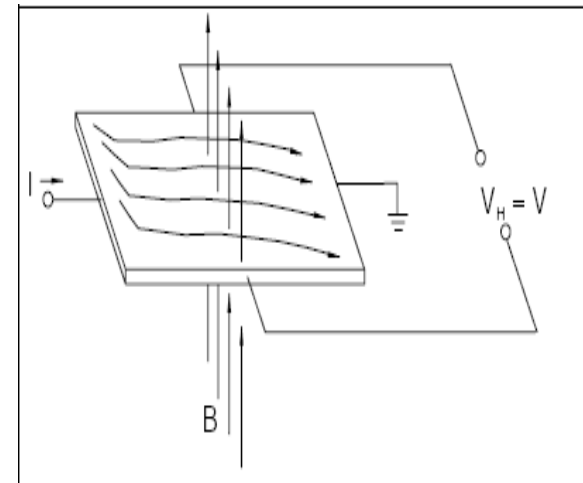
Hallov efekt

- Tanka plošča prevodnega materiala s 4 kontakti na robu
- Na tokovne kontakte (current contact) priključimo vir (bias current)
- Napetostna kontakta (voltage, sense contact) sta na ekvipotencialnih točkah na robu plošče

Brez magnetnega polja



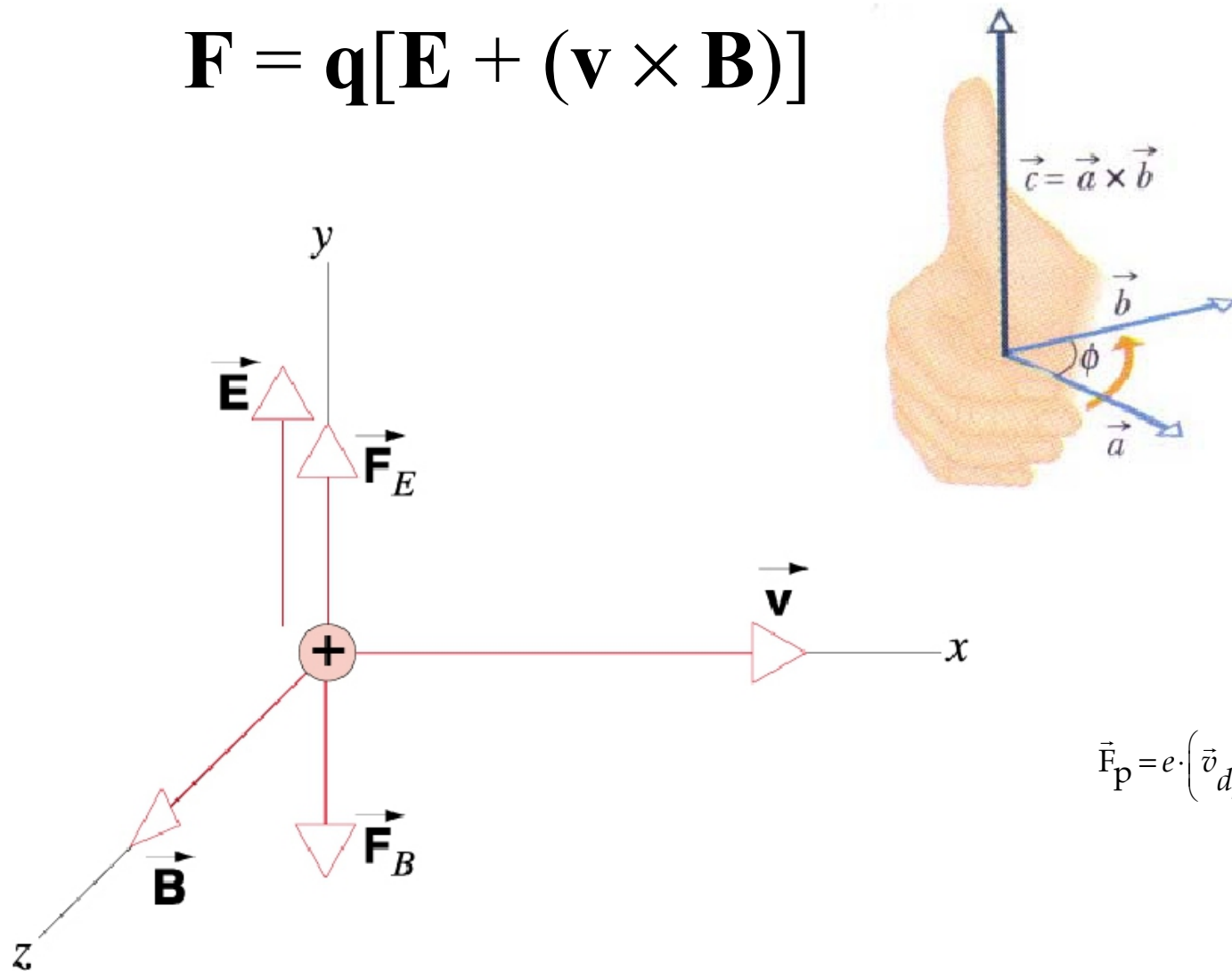
Z magnetnim poljem



Izhodna napetost:

$$V = I * B$$

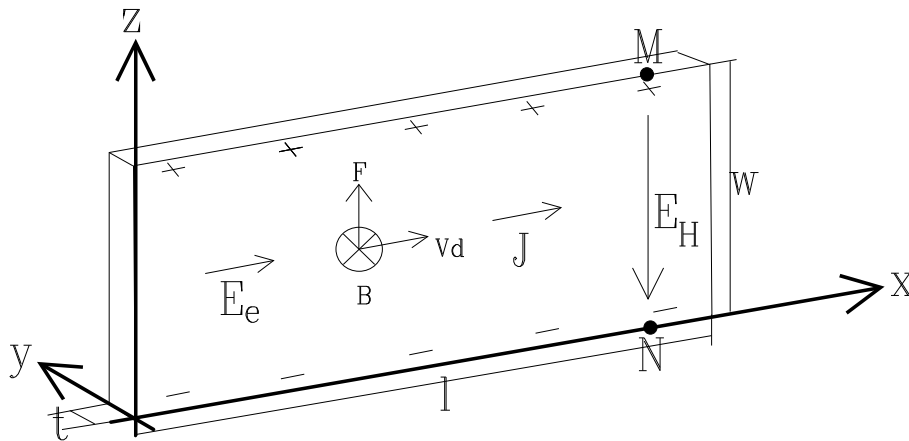
$$\mathbf{F} = q[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})]$$



$$\vec{F}_P = e \cdot (\vec{v}_{dp} \times \vec{B})$$

Hall efekt

Vpliv magnetnega polja v dolgem vzorcu $l \gg w$



Hitrost

μ_p gibljivost

$$\vec{v}_{dp} = \mu_p \cdot \vec{E}_e$$

p gostota nosilcev

Gostota toka

$$\vec{J}_p = \sigma \cdot \vec{E}_e = qp\mu_p \vec{E}_e$$

Lorentzova sila

$$\vec{F}_p = e \cdot \left(\vec{v}_{dp} \times \vec{B} \right)$$

Lorentzova sila zanaša nosilce proti zgornjemu robu strukture.

Hall efekt

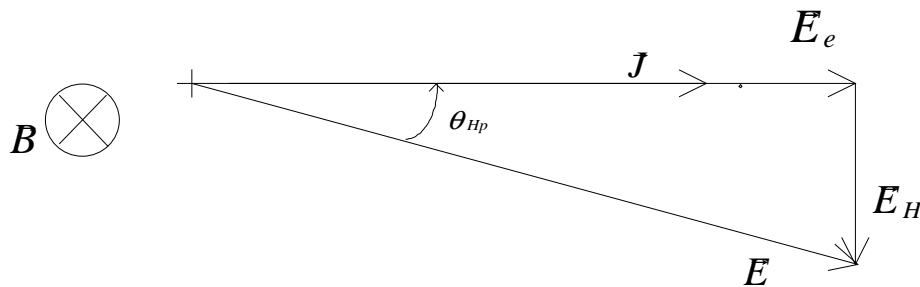
Električno polje:

$$e \cdot (\vec{v}_d \times \vec{B}) + e \cdot \vec{E}_H = 0 \Rightarrow \vec{E}_H = -(\vec{v}_d \times \vec{B})$$

Hallova napetost:

$$V_H = \int_w E_H \cdot dz = \mu_p \cdot E_e \cdot B \cdot w$$

Hallov kot:



$$\operatorname{tg}(\theta_{HP}) = \frac{E_H}{E_e} = \mu_p \cdot B_y$$

Hallov koeficient:

$$R_{Hp} = \frac{1}{qp}$$

Hallova napetost je odvisna od:

$$V_H = \frac{1}{q \cdot p \cdot t} I \cdot B$$

Halovi senzorji: Optimizacija

$$V_H = \mu_p \cdot E_e \cdot B \cdot w = \frac{1}{q \cdot p \cdot t} \cdot I \cdot B$$

Za povečanje občutljivosti senzorja uporabimo materiale:

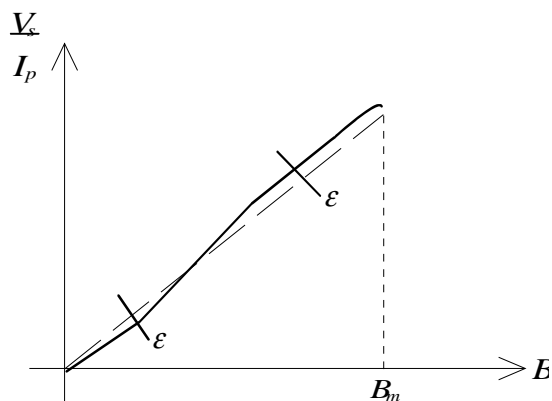
	InAs	InSb	GaAs
μ_n (cm ² /Vs)	33000	78000	8500
μ_p (cm ² /Vs)	460	750	400

Slabosti Hallovih senzorjev

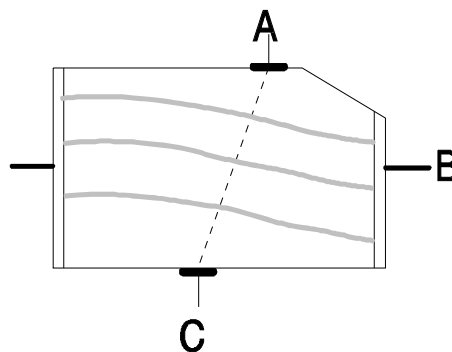
- Raztros občutljivosti Hallovega senzorja
- Odvisnost Hallove napetosti od temperature
- Učinek induktivnosti
- Ničelna napetost, linearnost

Hallovi senzorji: Optimizacija

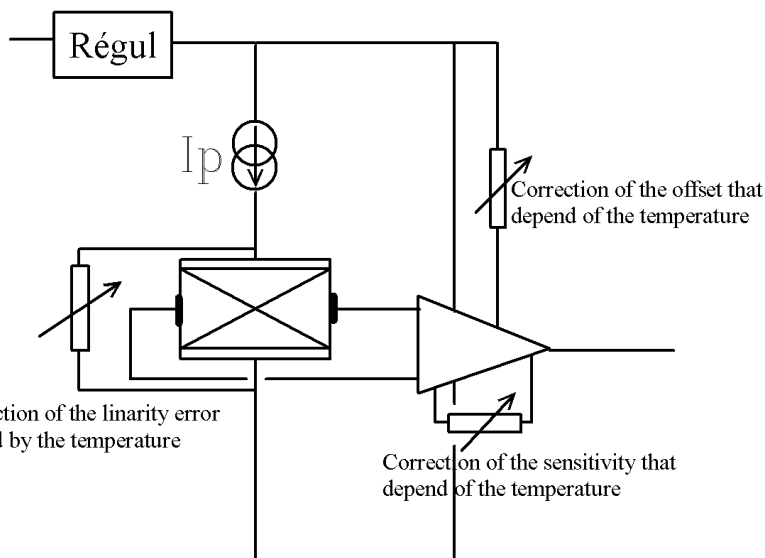
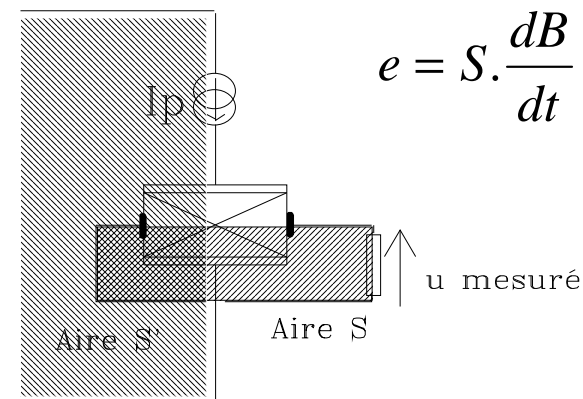
Linearnost



Niželna napetost



Učinek induktivnosti



Običajno imajo integrirano elektronsko vezje za odpravo slabosti (niželna napetost, temperaturna kompenzacija)

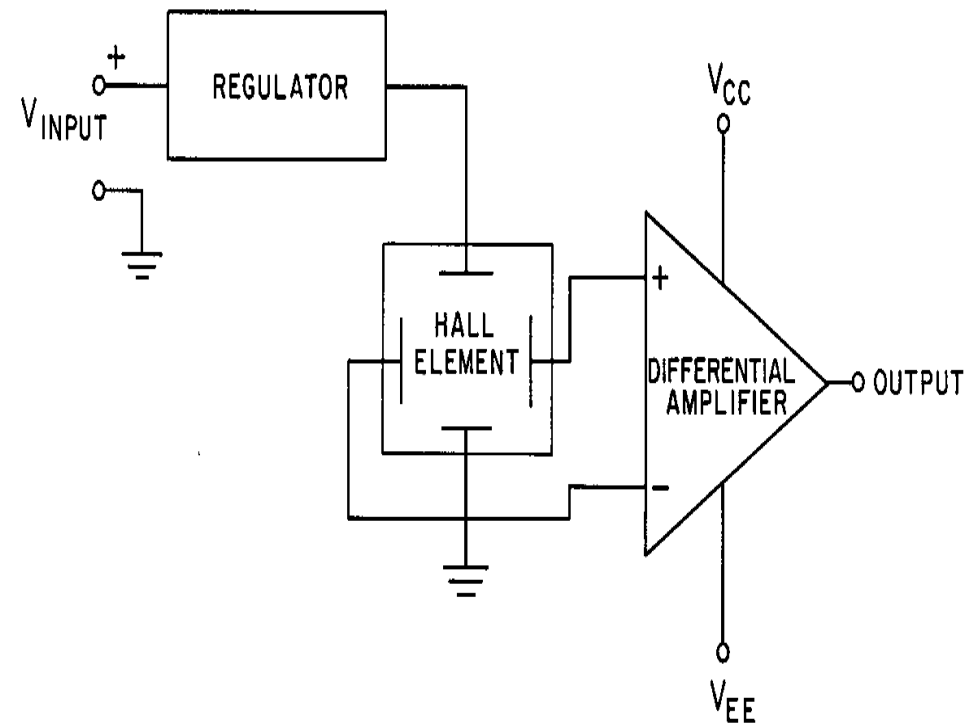


Hallovi senzorji: Uporaba

Vezje	B (T)	offset V_{off}	S mV/mT	For 1 degree	For 1 degree $\frac{\partial V_{\text{off}}}{\partial \theta}$	$\frac{dS}{dB}$	Frekvenč no področje	Cena/€
KSY14 Siemens	non defined	15 mV	1.05 ... 1.6	0.03%	0.3%	0.7%	> 1 MHz	6
UGN3503 Allegro	non defined	2.5 V	7.5 ... 17.2	0.05% @ 0.05 mT	stable	2%	23 KHz	7
SS495A1 Honeywell	-0.06 to 0.06	2.5V	$31.25 \pm 3\%$	$\pm 0.03\%$	$\pm 0.04\%$	1%	50 KHz	7
SS94A2 Honeywell	-0.05 to 0.05	4V	$5 \pm 2\%$	$\pm 0.02\%$	$\pm 0.02\%$	0.8%	100 KHz	30

Senzorska struktura s Hallovim elementom

- Hallov element
- Diferencialni ojačevalnik ojačuje napetostno razliko (Hallovo napetost)
- Regulator drži konstanto vrednost toka preko Hallovega elementa, da je izhodna napetost funkcija magnetnega polja



Vrste Hallovih senzorjev

Vrste:

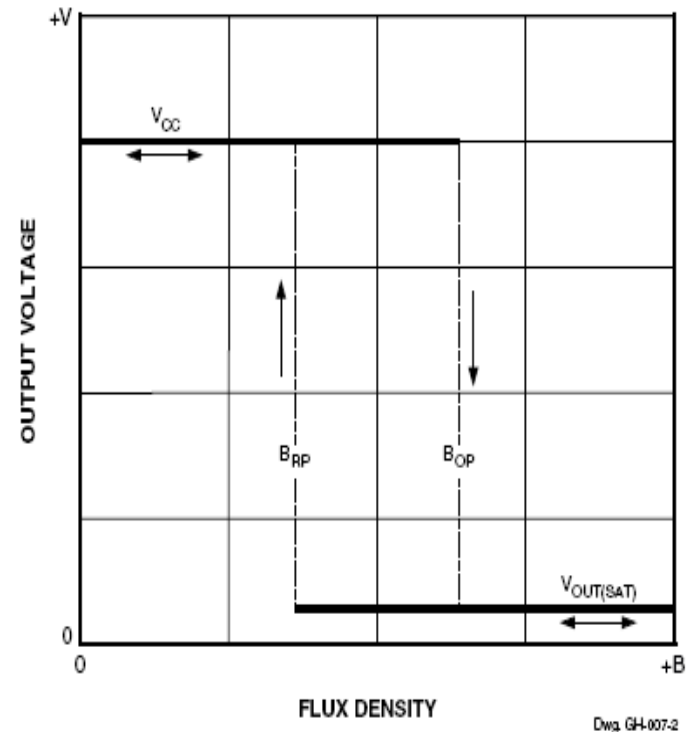
- Unipolarni
- Zadrževalni
- Bipolarni

Magnetni parametri:

- BOP – B (Operate point)
Magnetno polje $B > BOP$
postavi izhod senzorja
(nizko stanje)
- BRP – B (Release point)
– Magnetno polje $B < BRP$
ponastavi izhod senzorja
(visoko stanje)
- Bhys – B (Histereza)

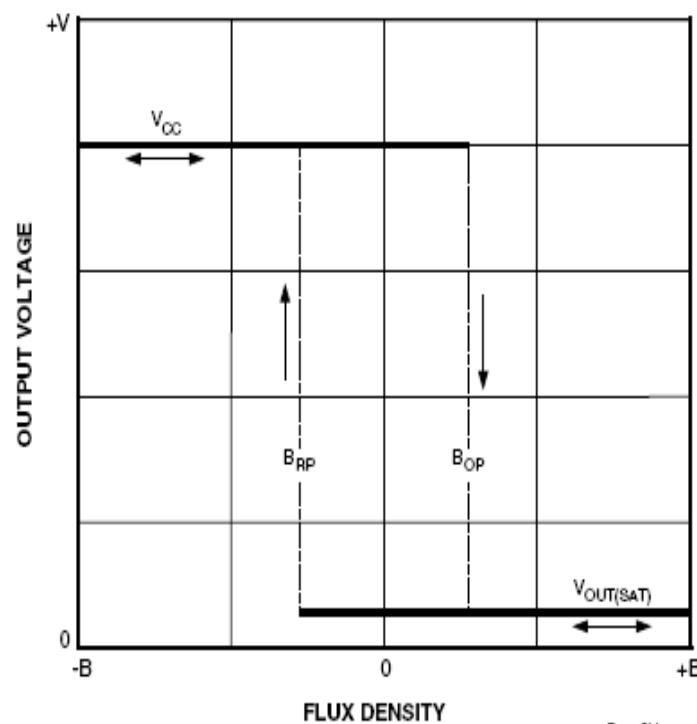
Unipolarni (unipolar) Hallovi senzorji

- Za delovanje rabi magnetno polje ene polaritete
- Pozitivno magnetno polje (S pol)
- Preklop pri:
<BOP oziroma >BRP



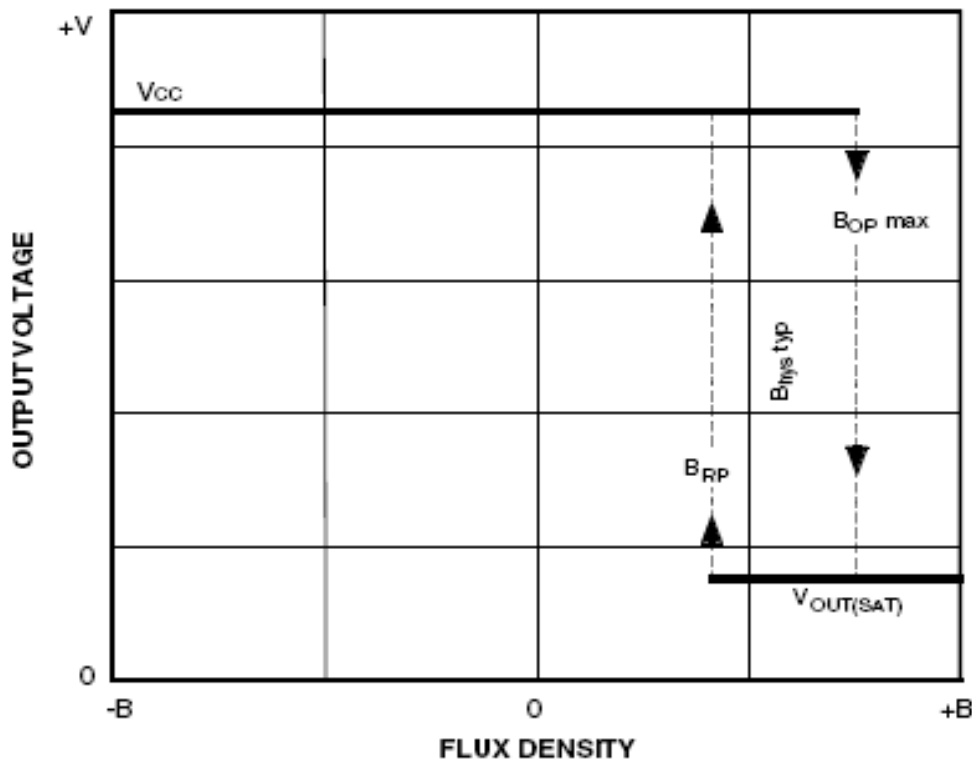
Zadrževalni (latching) Hallovi senzorji

- Za delovanje rabi magnetno polje obeh polaritet
- Simetrično delovanje
- Preklop pri:
<BOP oziroma >BRP

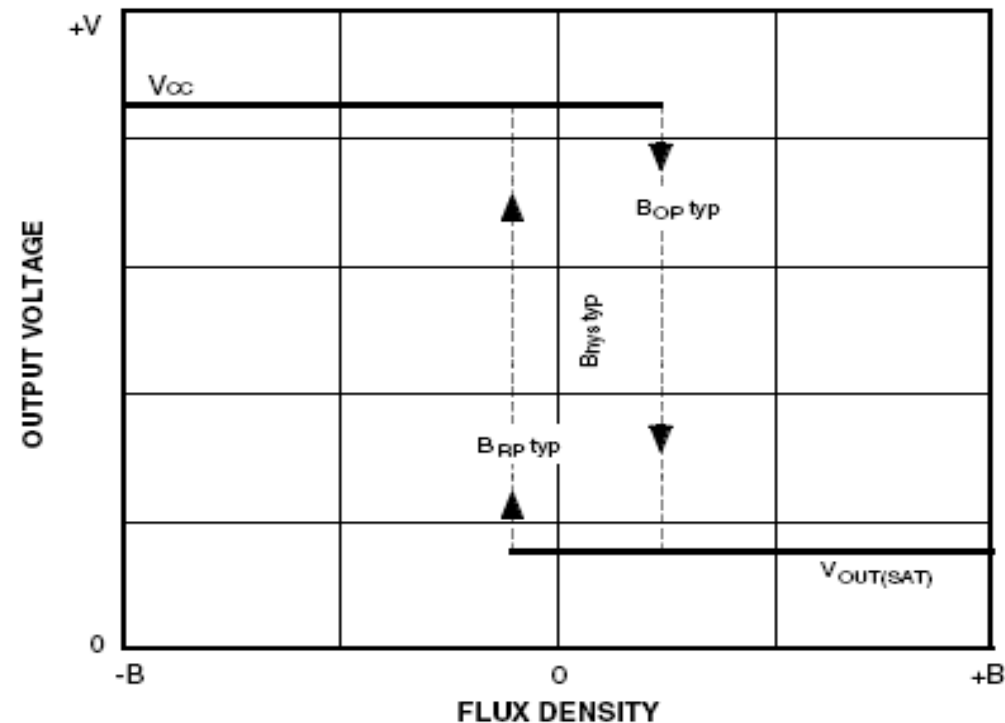


Bipolarni (bipolar) Hallovi senzorji

- Unipolarni način



- Združuje unipolarne in zadrževalne lastnosti senzorja
- Zadrževalni način



Tipičen Hallovo senzor



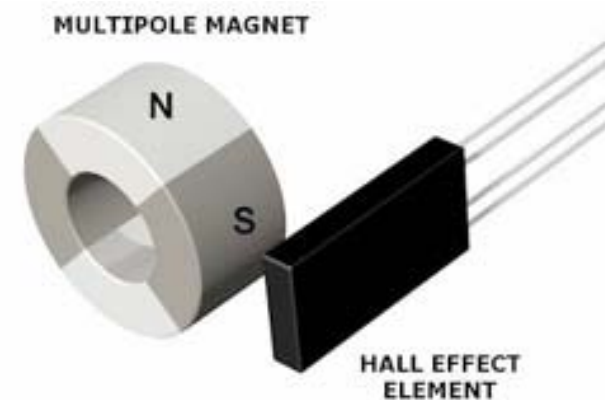
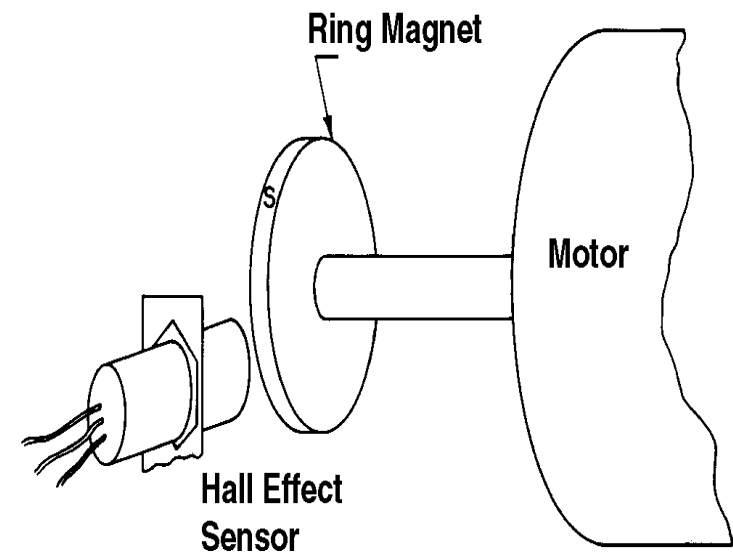
SPECIFICATIONS

Digital Switch c

Hall Type			3 Wire (Voltage output)
Supply Voltage (Note 1)	Absolute Ratings	Vdc	-15 to +28
	Operate	Vdc	+3.8 to +24
	Overvoltage Protection	Vdc-max	32
Output High Voltage		Vdc	sinking output
Output Low Voltage		Vdc-max	0.4 @ 10mA
Output Current (continuously on)		mA-max	10
Current Consumption over Temperature Range	Low	mA	1.6 - 5.2
	High	mA	1.6 - 5.2
Switching Speed		kHz-max	10
Temperature	Operating	°C	-40 to +100
	Storage	°C	-65 to +105

Uporaba: Odziv na polariteto

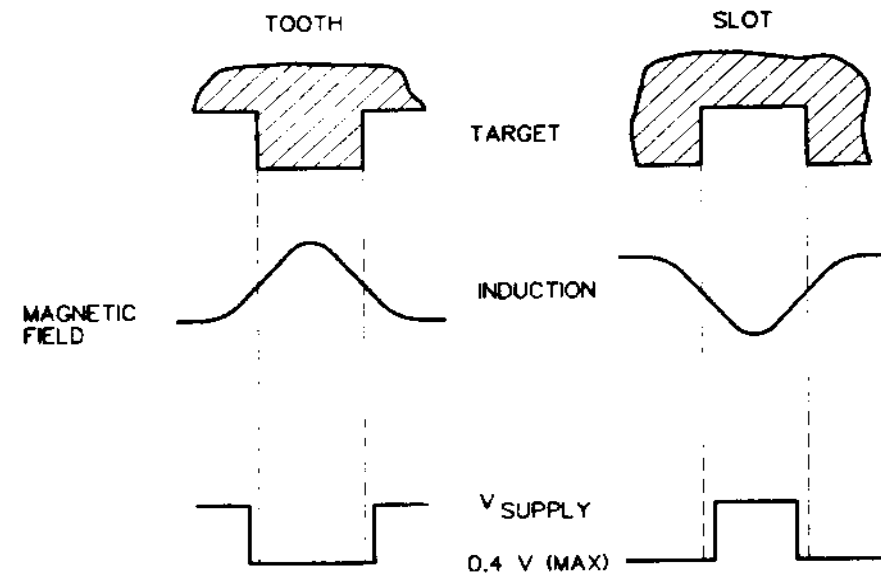
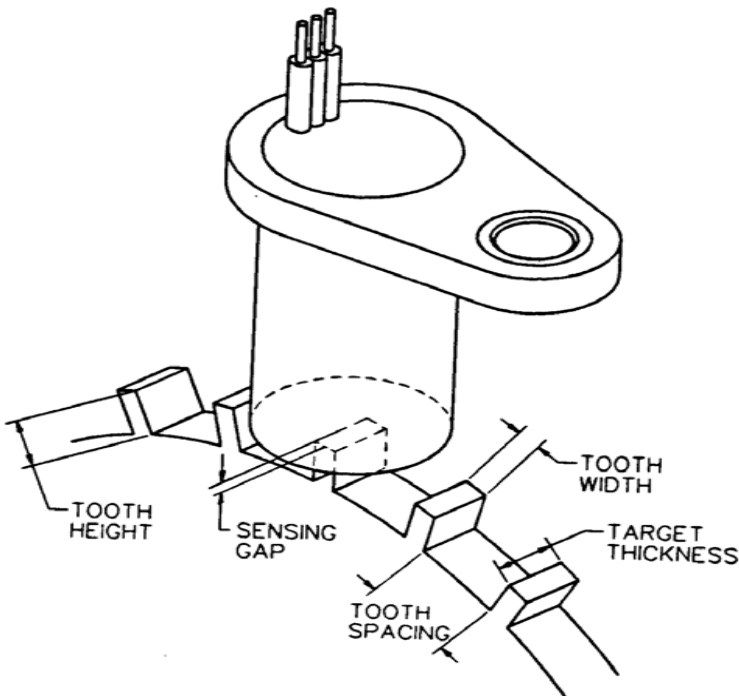
- Tahometer – zaznavanje rotacije osi motorja
- Motor se vrti – enkrat na obrat S pol preide površino Hallovega elementa.
- Senzor
 - Postavi izhod, ko se S pol približa senzorju
 - Ponastavi izhod, ko se S pol oddaljuje od senzorja
- Izhod: Digitalni pulz na obrat.



Copyright © 2002 Dexter Magnetic Technologies Inc.

Uporaba: Vrtenje zobnika

Zaznavanje gibanja magnetnih (ali namagnetnih) materialov



Zaznava spremembe gostote magnetnega polja

Lastnosti Hallovihi senzorjev

- Majhni, robustni, brezkontaktni senzorji
- Široko področje uporabe (tok, položaj (aksialni, radialni, kot),
- Nizka cena
- Neobčutljivi na umazanijo, vlago, prah
- Visoka magnetna občutljivost
- Slabosti
 - Ničelna napetost
 - Šum
 - Velika poraba
 - Miniaturizacija poslabša lastnosti –kompenziramo z elektronskim vezjem

Komponente, sestavi in senzorji

Magnetoupori

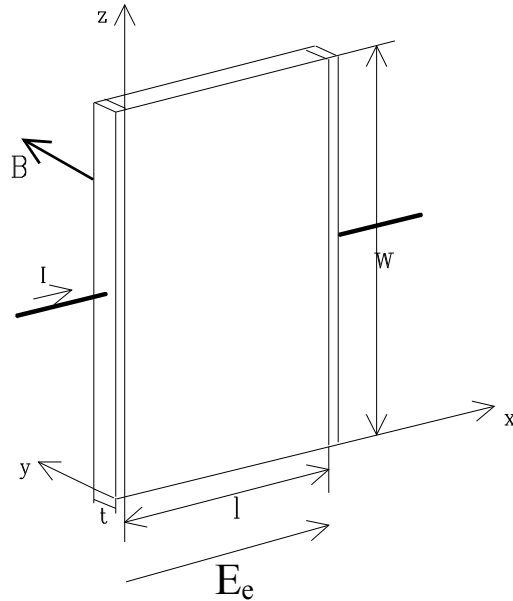
Magnetoupornost

- Takoj za Hall elementi najbolj razširjeni senzorji magnetnega polja
- Enostaven princip: Upornost se spreminja ob prisotnosti magnetnega polja
- Razmerje magnetoupornosti (MR%) je merilo kvalitete senzorja - za koliko se spremeni upornost senzorja pri danem magnetnem polju:

$$MR(\%) = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}} \times 100$$

Magnetoupornost

Kratek vzorec $l \ll w$:



Lorentzova sila

$$\vec{F}_n = -q \cdot \vec{E}_e - q \cdot (\vec{v}_n \times \vec{B})$$

$$-q \cdot \vec{E}_n = -q \cdot \vec{E}_e - q \cdot (\vec{v}_n \times \vec{B})$$

Tokovna gostota

$$J_p(B) = J_p(0) + \mu_p \cdot (J_p(B) \times B)$$

$$J_p(B) = \frac{J_p(0) + [J_p(0) \times (B \cdot \mu_p)] + (B \cdot \mu_p) [J_p(0) \cdot (B \cdot \mu_p)]}{1 + (B \cdot \mu_p)^2}$$

$J_p(0)$ in B sta pravokotna

$$J_p(B) = \frac{\sigma}{1 + (B \cdot \mu_p)^2} (E_e + \mu_p \cdot (E_e \times B))$$

Tok v vzorcu je odvisen od zunanjega magnetnega polja \rightarrow tudi upornost je odvisna od magnetnega polja

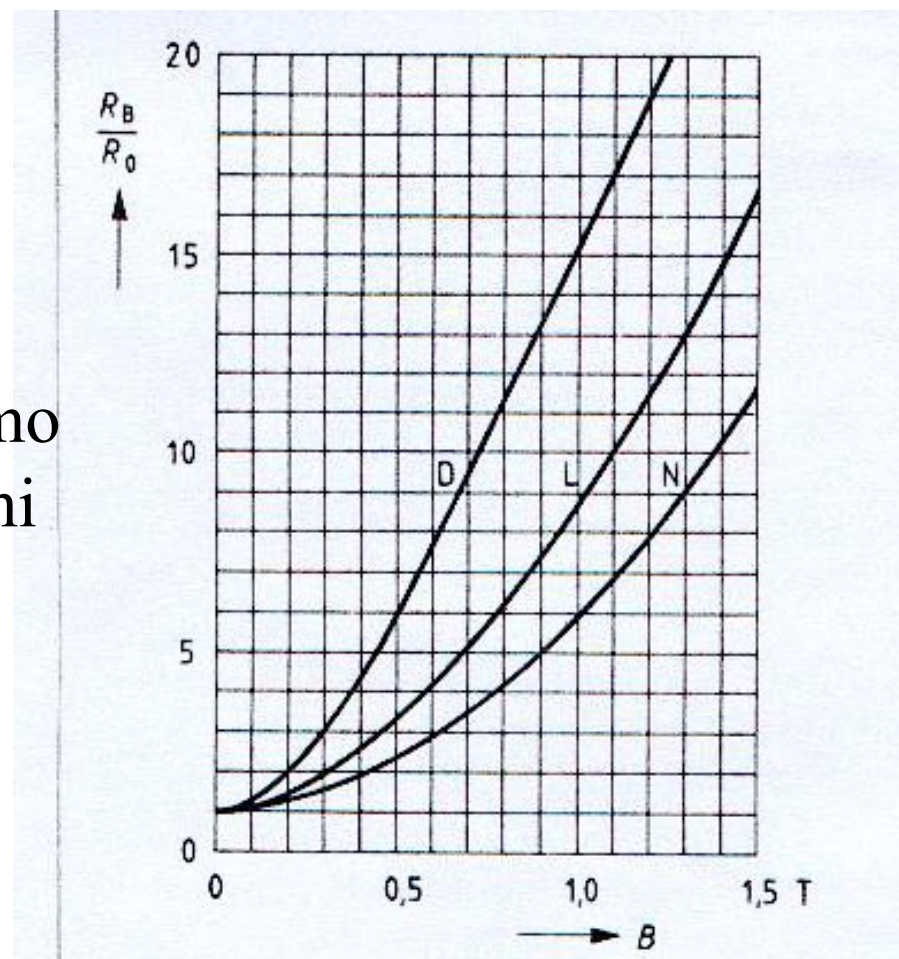
Magnetoupornost

Člen $\frac{\sigma}{1+(B\mu_p)^2}$ nakazuje odvisnost upornosti od B

Odvisnost upornosti R/R_0
kot funkcija B

Tak tip sensorja ni v uporabi, ker imamo
anizotropni senzor z boljšimi lastnostmi

InSb, NiSb



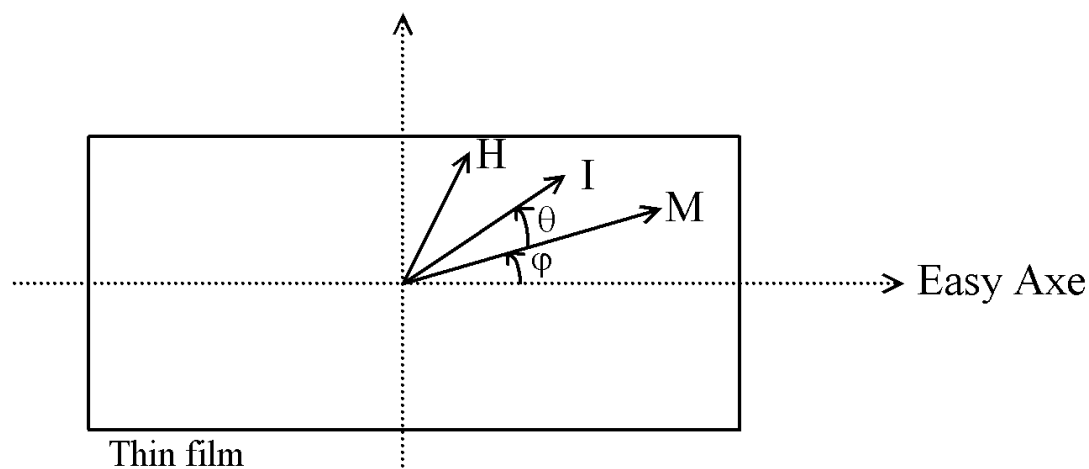
Anizotropna magnetoupornost (AMR)

- Feromagnetni materiali ali zlitine, ki izkazujejo anizotropno upornost v magnetnem polju
- Anizotropna magnetoupornost je razlika med:
 - upornostjo $\rho_{||}$ (merjena ko je tok I vzporeden vektorju magnetnega momenta M) in
 - upornostjo ρ_{\perp} (merjena ko je tok I pravokoten na vektor magnetnega momenta M)
- Magnetna upornost je odvisna od kota (ϕ) med tokom in vektorjem magnetnega momenta M

$$\rho(\phi) = \rho_{\perp} + (\rho_{||} - \rho_{\perp}) \cos^2 \phi$$

Anizotropna magnetoupornost (AMR)

- Anizotropijo dobimo med naprševanjem magnetnega materiala (FeNi 20% 80%) tako da ga postavimo v magnetno polje določene usmeritve



M: magnetizacija

I: tok

H: Zunanje magnetno polje

Odvisnost upornosti od kotov φ in θ .

$$\sin \varphi = \frac{H_y}{H_0}$$

Anizotropna magnetoupornost (AMR)

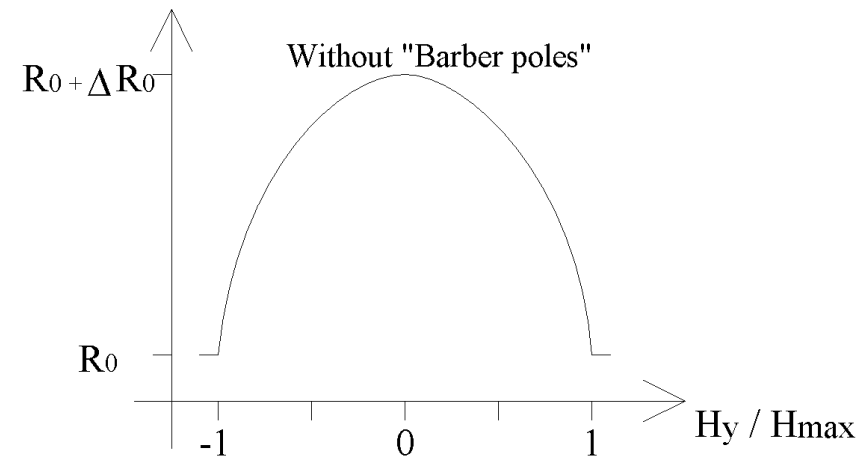
Naj bo zunanje magnetno polje H usmerjeno samo v H_y .

$$\sin \varphi = \frac{H_y}{H_0} \qquad R(H) = R_{\perp} + \Delta R_{\max} \cdot \cos^2(\theta)$$

Če je tok I poravnan s smerjo anizotropije velja $\theta = -\varphi$:

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0}\right)^2} \qquad H_y < H_0$$

$$\Delta R(H) = \Delta R_{\max} \cdot \left(1 - \left(\frac{H_y}{H_0}\right)^2\right)$$



- Upornost pada z rastočim magnetnim poljem
- Magnetoupor ni linearen, ampak paraboličen
- Predznaka magnetnega polja ni mogoče določiti

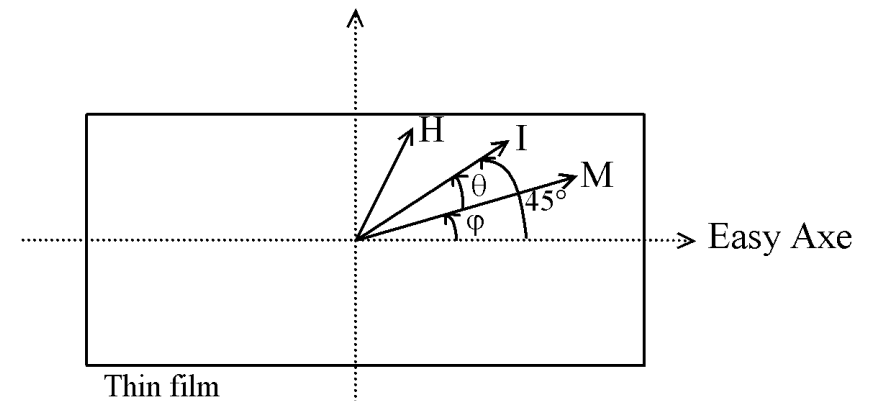
Anizotropna magnetoupornost (AMR)

Če je tok I usmerjen pod 45° : $45 = \theta + \varphi$

$$\cos(45 - \varphi) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\sin \varphi + \cos \varphi)$$

$$\sin \varphi = \frac{H_y}{H_0}$$

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi}$$



$$\cos \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\frac{H_y}{H_0} + \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right)$$

Anizotropna magnetoupornost (AMR)

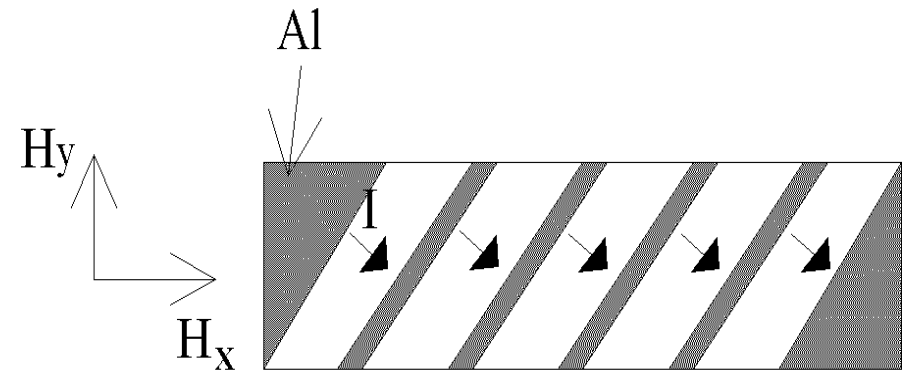
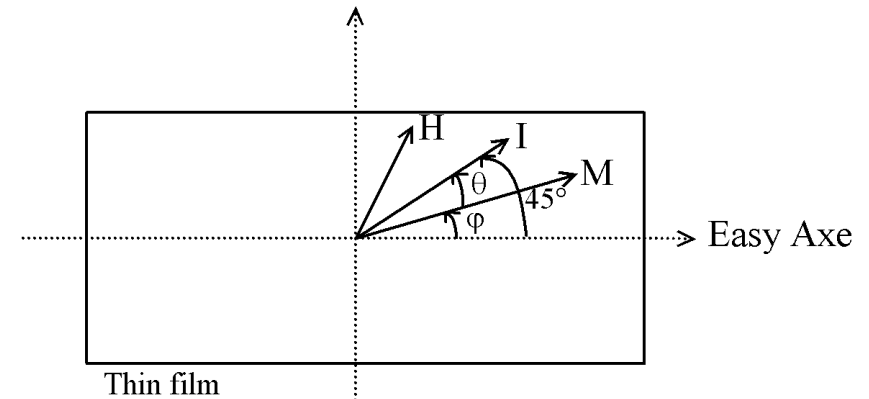
Če je tok I usmerjen pod 45° : $45 = \theta + \varphi$

$$R(H) = R_{\perp} + \Delta R_{\max} \cdot \cos^2(\theta)$$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\frac{H_y}{H_0} + \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right)$$

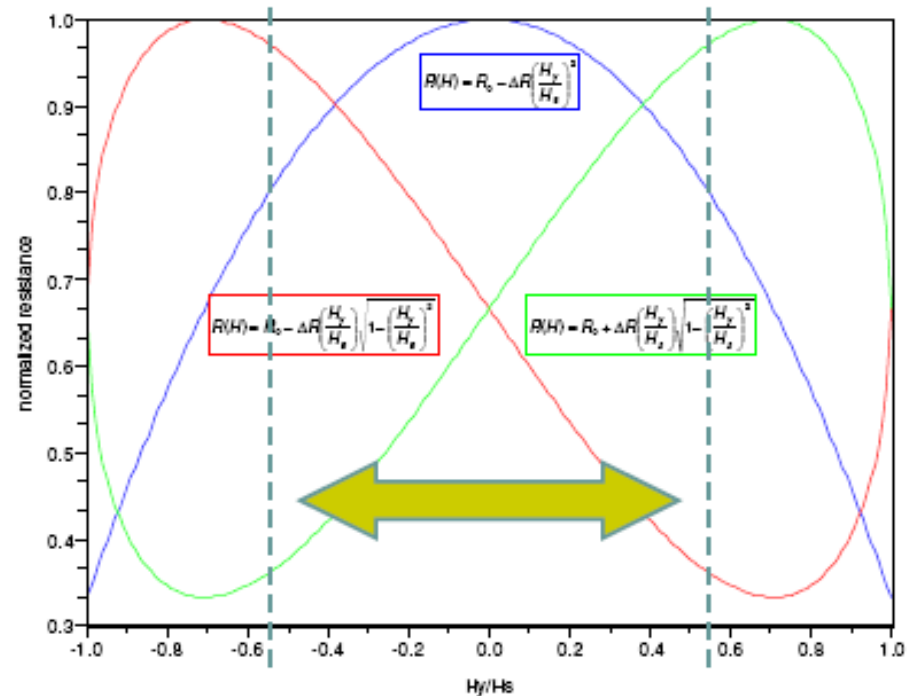
$$R(H) = R_{\perp} + \frac{\Delta R_{\max}}{2} \left(1 + 2 \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right)$$

$$\Delta R(H) = \Delta R_{\max} \left(\frac{1}{2} \pm \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right)$$

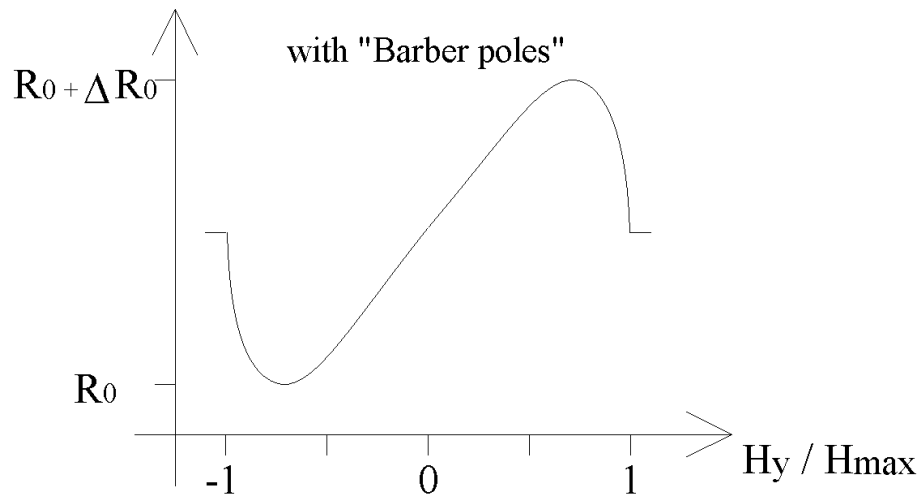


Anizotropna magnetoupornost (AMR)

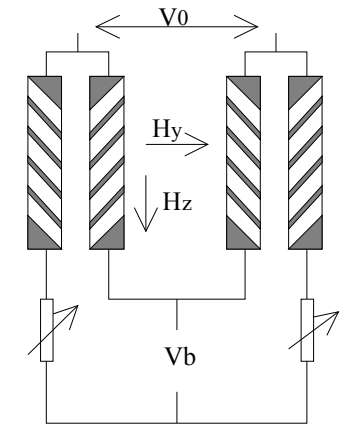
$$\Delta R(H) = \Delta R_{\max} \left(\frac{1}{2} \pm \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \right)$$



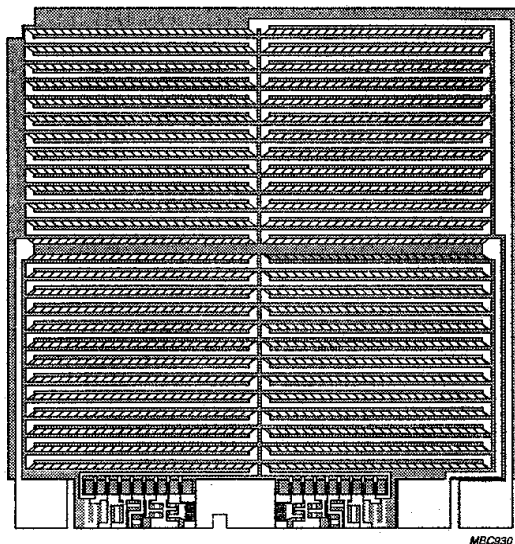
AMR – realizacija



$$V_b = V_0 \frac{\Delta R}{R_0} \frac{H_y}{H_0} \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0}\right)^2}$$



KMZ10A



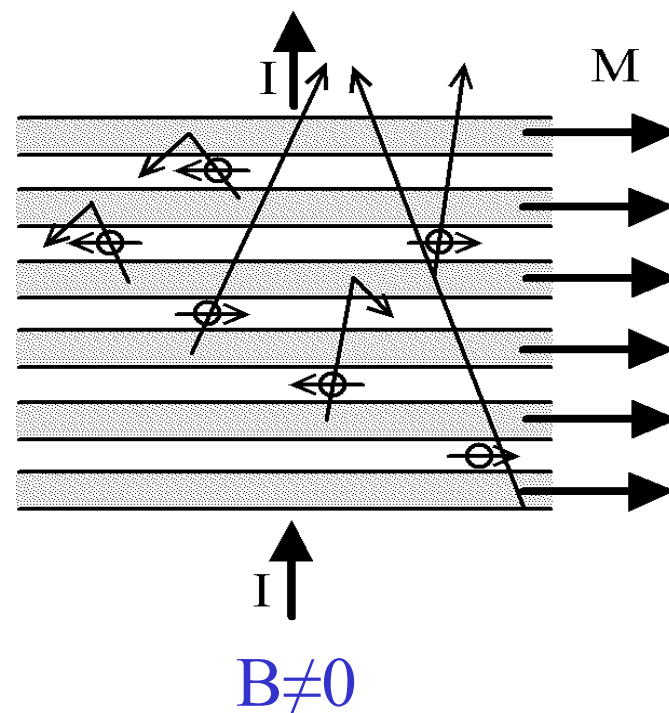
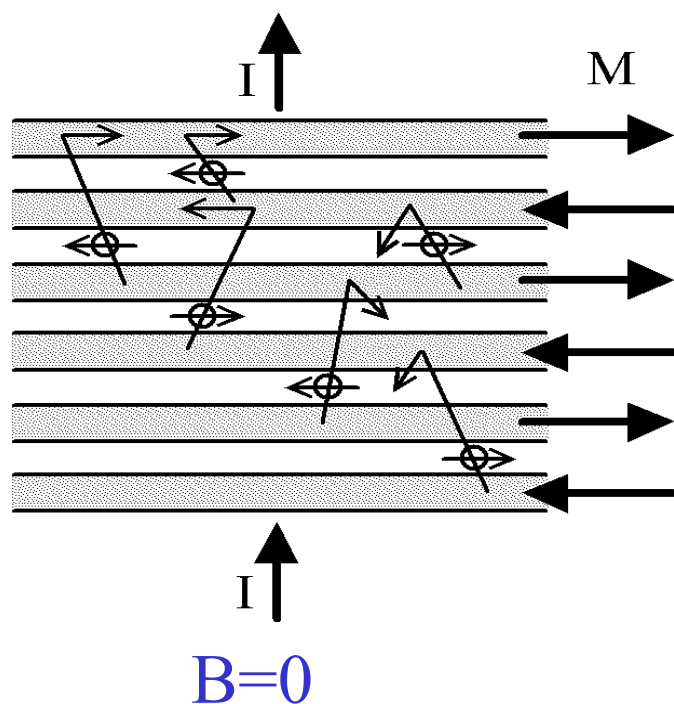
MBC390

Reference	Območje B (T)	Sensitivity S: mV.mT ⁻¹ Supplied with 5 V	za 1 stopinjo kota $\frac{\partial S}{\partial \theta}$	Bridge Resistance
KMZ10A Philips	-0.625 mT ... +0.625 mT	64	-0.15 %/°C	1.3 KΩ
KMZ10C Philips	-3.75 mT ... +3.75 mT	6	-0.15 %/°C	1.7 KΩ

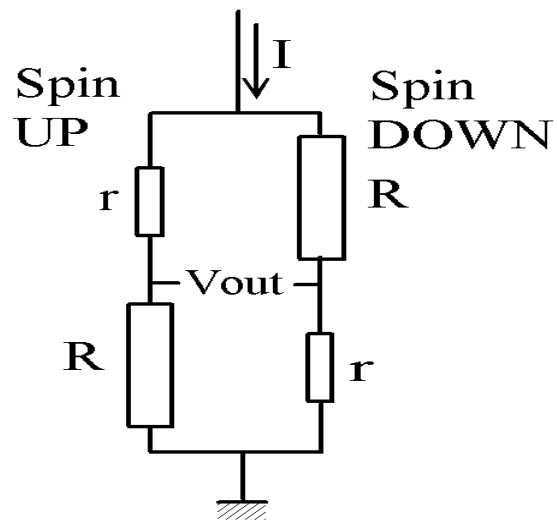
Gigantska magnetoupornost (GMR)

Sendvič struktura feromagnetne plasti in nemagnetne plasti

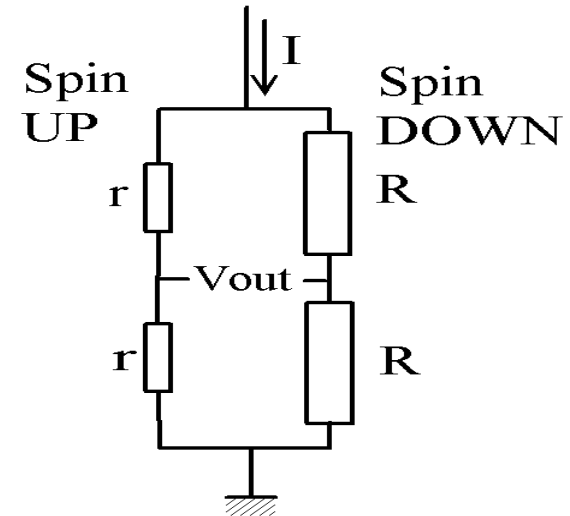
FeCr, FeNiAg, FeNiCu debelin Fe = 30 Å; Cr = 9 Å



Gigantska magnetoupornost (GMR)



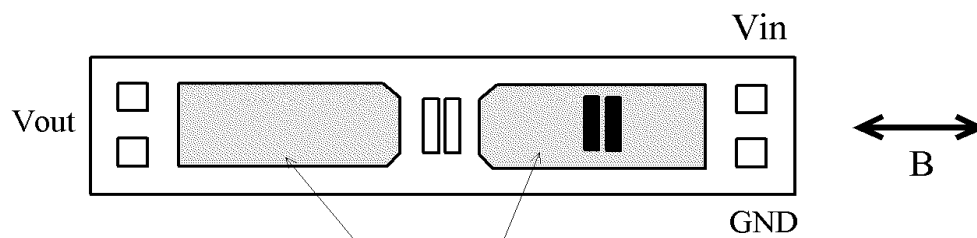
$B=0$



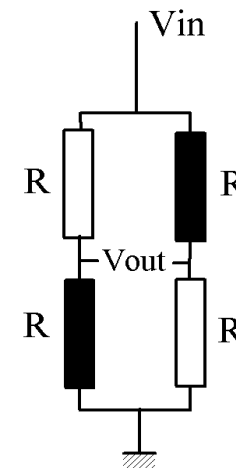
$B \neq 0$

Gigantska magnetoupornost (GMR)

Vezje	Območje B (T)	Ničelna napetost V_{off}	Občutljivost mV/mT (@1V napajanja)	Linearnost	Upornost k Ω
NVS5B15	$\pm 1,5m$	$0 \pm 4mV$	30 à 44	2%	$5 \pm 20\%$
NVS5B50	$\pm 5m$	$0 \pm 4mV$	9 à 13	2%	$5 \pm 20\%$
NVS5B100	$\pm 10m$	$0 \pm 4mV$	4,5 à 6,5	2%	$5 \pm 20\%$

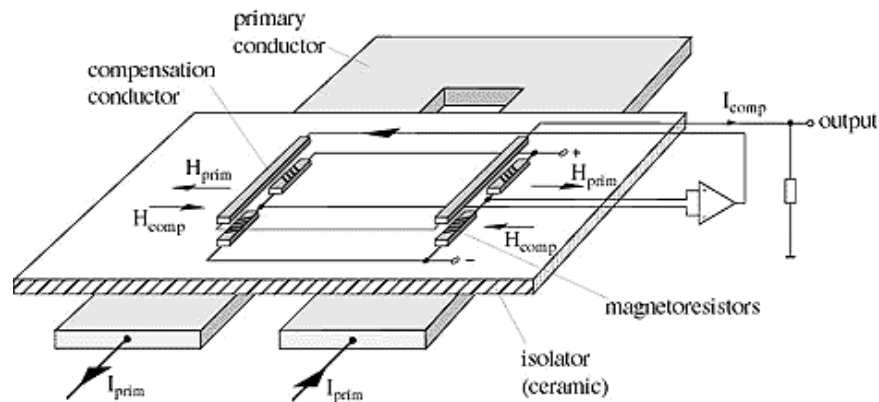


Realizacija (NVE)

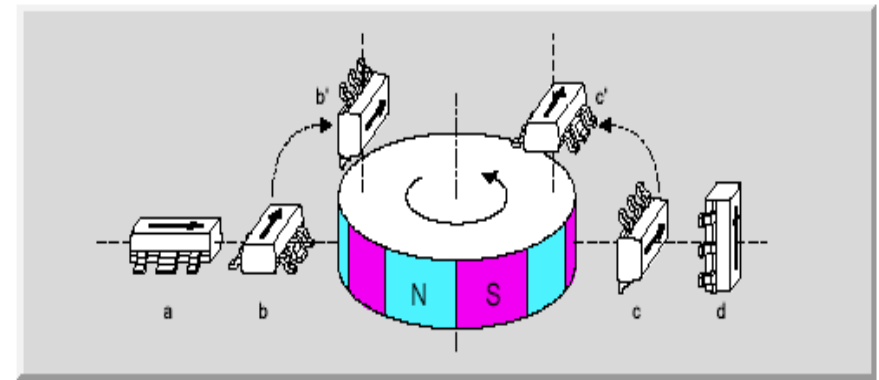


Uporaba AMR in GMR

Meritev toka

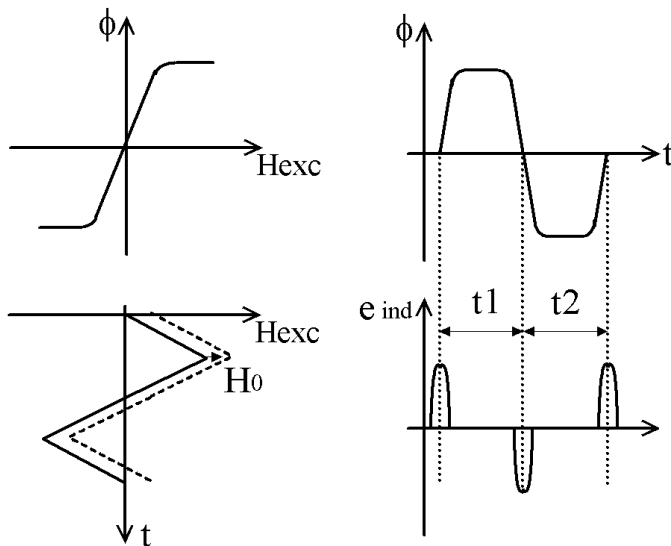
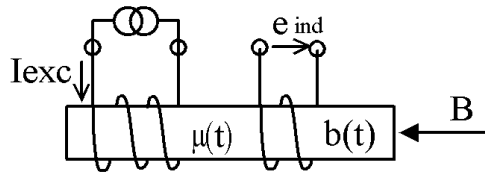


Določanje hitrosti vrtenja

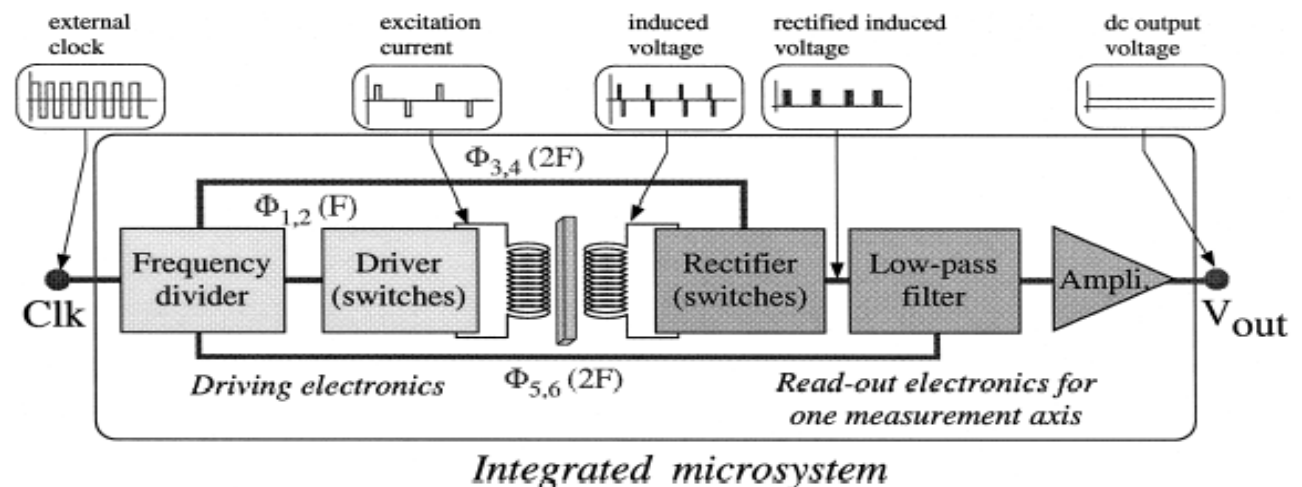


	<u>Občutljivost</u>	<u>Velikost</u>	<u>Ločljivost</u>
(AMR)	0.5%/Oe	1-100 μm	0.1 Oe
(GMR)	1%/Oe	1-100 μm	0.01 Oe
Wire FeCoNi electroplated (GMI)	500%/Oe	1-2 mm	0.000001 Oe

Fluxgate – princip delovanja



- Prvo navitje spravi magnetni material v nasičenje. V nasičenju ni napetosti na drugem navitju.
- Meritev zakasnitve na drugem navitju določa velikost magnetnega polja.
- $B=0 \rightarrow$ zakasnitev med pulzoma je konstantna.
- $B \neq 0 \rightarrow$ sprememba zakasnitve med pulzoma



Fluxgate - realizacija

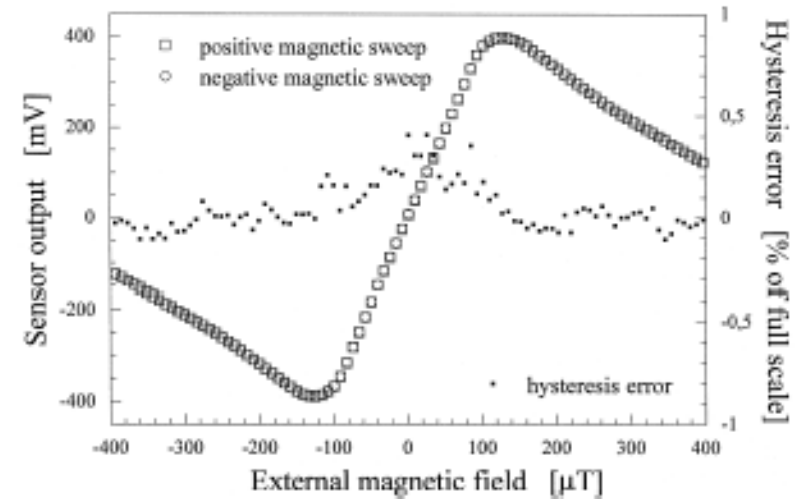
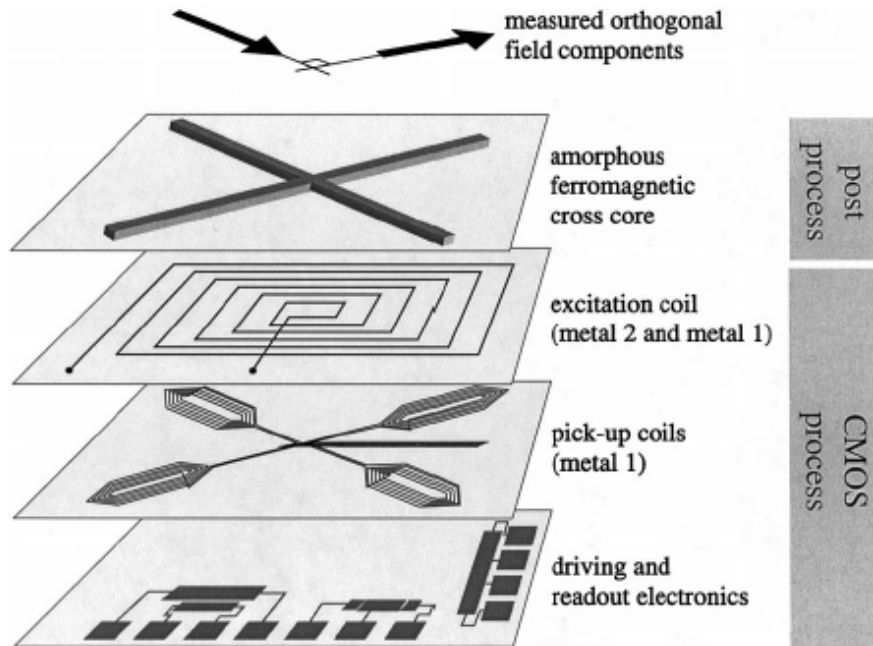
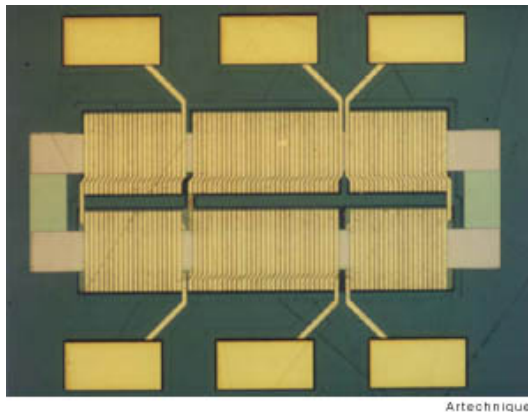


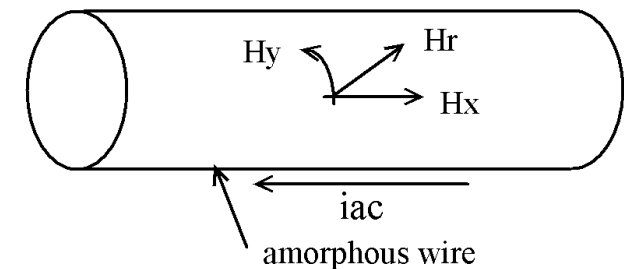
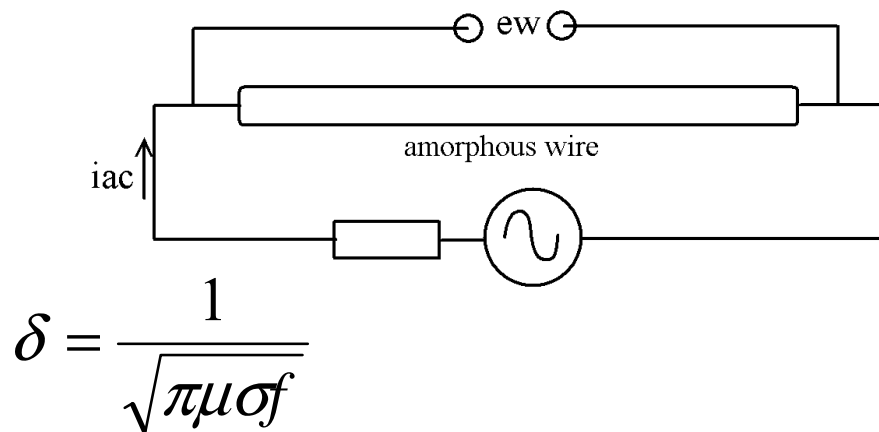
Fig. 10. Magnetic response of the micro-fluxgate and hysteresis error for magnetic field range higher than the Earth's magnetic field. The hysteresis error is smaller than 0.5% of full scale.



- Zelo občutljivi ($\approx \mu\text{T}$).
- Kompleksna realizacija.

Magnetoimpedančni senzor (MI)

- Osnova za delovanje je kožni pojav (izriv toka: povečanje tokove gostote ob robu žice → impedanca naraste)
- Zunanje magnetno polje tudi povzroči povečanje impedance.
- Žico izmenično vzbujamo in merimo spremembo impedance v odvisnosti od zunanjega magnetnega polja.



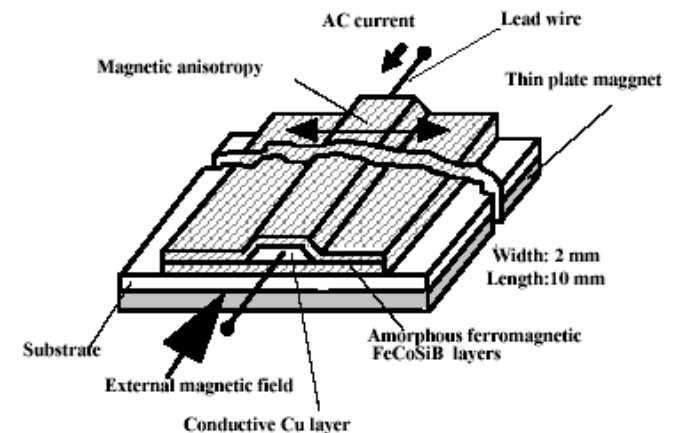
Karakteristike

$f(i_{AC}) \approx 10$ MHz.

Merilno območje B nT ... μ T.

Sendvič struktura: FeCoSiB: 40 μ m.

Žica: CoFe: 30 μ m premera.



Elektronske komponente in senzorji

Senzorji pretoka

Senzorji pretoka

- Glede na velikost tržišča in področja uporabe merilnikov pretoka imajo le-ti slabo merilno natančnost v primerjavi z merilniki tlaka ali temperature.
- Primer: Merilnik pretoka z zaslonko (ang. orifice) ima tipično natančnost $\pm 2\%$ odčitka. Tak merilnik je razširjen kot merilnik pretoka LPG.
- Kljub novejšim principom merjenja pretoka ostajajo trdno zasidrani klasični merilni principi
- Preko 40% vseh merilnikov tekočine, plina in pare v industriji še vedno temelji na principu diferencialnega merjenja tlaka (izvedba z zaslonko, Venturijevo cevjo ali šobo).

Merilniki pretoka z zožitvijo

- Osnovno delovanje je razložil Bernoulli
- Če na nekem odseku zožimo cev, se hitrost fluida (tekočina, plin) poveča pri poti skozi zožitev.
- Povečanje hitrosti fluida povzroči zmanjšanje statičnega tlaka za (oz. znotraj) zožanja glede na statični tlak pred oviro.
- Ustvari se tlačna razlika preko zožitve, ki je odvisna od hitrosti fluida preko Bernoullijeve enačbe.
- Merilnik pretoka z zožitvijo sestoji iz:
 - Zožitve, ki povzročata padec tlaka
 - Zaslونka,
 - Venturijeva cev ali
 - šoba
 - Merilnika tlačne razlike (Diferencialni senzor tlaka)

Merilniki pretoka z zožitvijo

Prednosti:

- merilna negotovost merilnika je določena brez potrebe po umerjanju, če je merilnik izdelan in montiran po navodilih veljavnih standardov.
- Ta tip merilnika pretoka nima gibljivih delov → zanesljiv.

Slabosti:

- Omejeno področje delovanja (premer zožitve glede na premer cevi je 1:3)
- Ustvarja padec tlaka po cevi (kar zahteva močnejše črpalke)
- Posebnosti montaže (pred in za zožitvijo mora biti daljši raven del cevi)
- Področja uporabe:
 - Zlata klasika (povsod), razen če želimo visoko natančnost oz. če je pogoj meritve, da ne ustvarja tlačnih sprememb (neinvazivna meritev)

Vplivni dejavniki na meritev pretoka

- Vrsta pretoka
 - laminarni (pretok v vzporednih tokovnicah, ki se ne mešajo ob gibanju v smeri pretoka)
 - turbulentni (pretok nima vzporednih tokovnic, povprečno gibanje fluida je vzporedno osi cevi)
 - mešani (pretok v cevi prehaja iz laminarnega v turbulentnega in obratno)
- Reynoldsovo število (1883, Osborne Reynolds)
- Profil hitrosti pretoka

Reynoldsovo število

- Reynoldsovo število (Re) *predvideva obnašanje vrste pretoka* fluida. To brezdimenzijsko število (Re) je razmerje sil vztrajnosti ($\rho \cdot v_{avg} \cdot D$) in viskoznosti pretoka (η).
($\eta \rightarrow$ dinamična viskoznost, $\rho \rightarrow$ gostota fluida, $D \rightarrow$ premer cevi, $v_{avg} \rightarrow$ povprečna hitrost fluida)

Velikost

- $Re < 2000$, prevladuje viskoznost \rightarrow laminarni pretok
- $Re > 4000$, prevladuje vztrajnost \rightarrow turbulentni pretok
- Vmes [2000...4000] \rightarrow mešani
- Re izračunavajo glede na lastnosti fluida, ne upoštevajo pa lastnosti cevi (hrapavost, zavoji, ventili), zato predstavlja samo oceno za vrsto pretoka

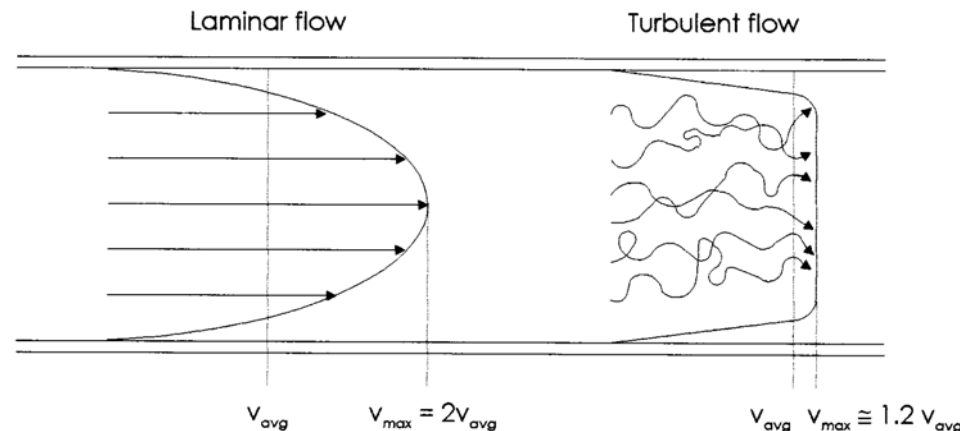
$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\eta}$$

Profil hitrosti pretoka

Hitrost fluida skozi presek cevi ni konstanten, ampak je odvisen od tipa pretoka v cevi:

- Laminarni pretok:
 - profil hitrosti paraboličen, saj prevladujejo sile viskoznosti fluida → zato je tam počasnejše gibanje).
 - hitrost v središču cevi je dvojna povprečna vrednost preko preseka cevi.
 - Če je pretok laminaren, ni odvisen od hrapavosti cevi.
- Turbulentni pretok:
 - Prevladujejo sile vztrajnosti, zato je profil hitrosti bolj raven (topa parabola).
 - Hitrost v središču cevi je ca. 1.2 povprečne vrednosti preko preseka cevi.
 - Dejanski profil hitrosti je odvisen od hrapavosti cevi in Re .

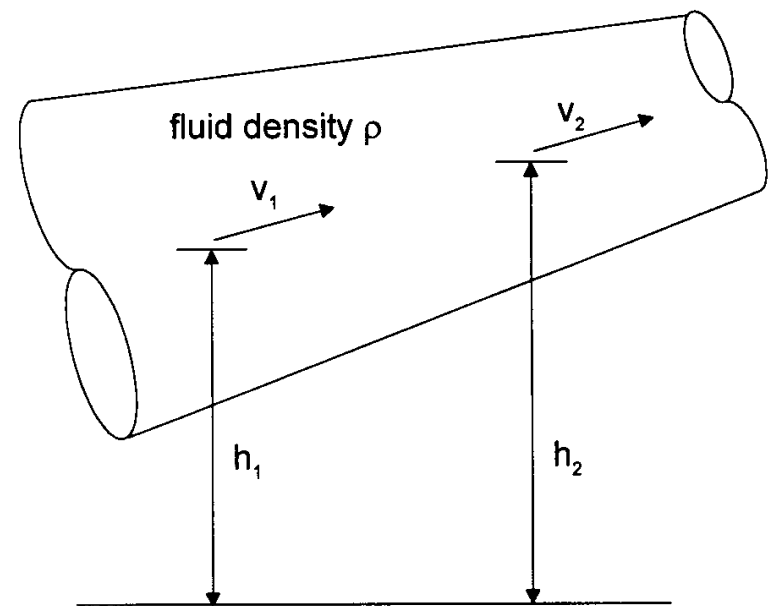
Za pravilno delovanje merilnika pretoka z zaslonko morata biti znana (in stabilna) vrsta pretoka in profil hitrosti.



Bernoullijeva enačba

- Povezuje hitrost (v), tlak (p) in višinsko razliko (h) fluida.
- Za nagnjeno, razvito cev velja

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$



Bernoullijeva enačba

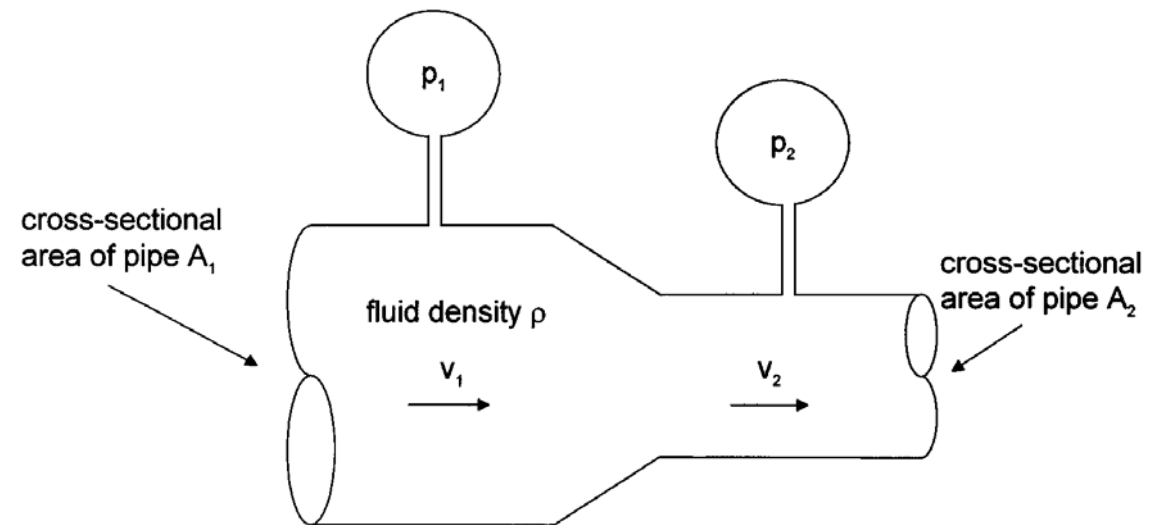
- Če nagnjeno cev poravnamo ($h_1 = h_2$) se enačba poenostavi v:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

Če imamo opravka z nestisljivim fluidom velja ohranitev masnega pretoka:

$$v_1 A_1 \rho = v_2 A_2 \rho$$

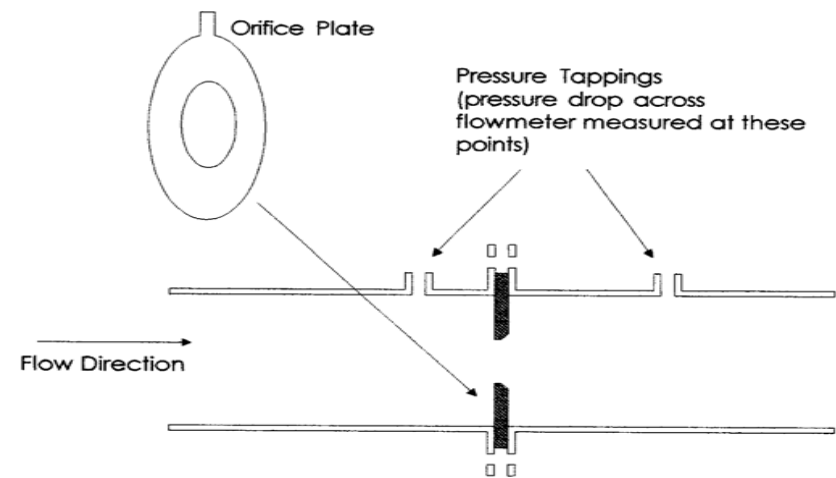
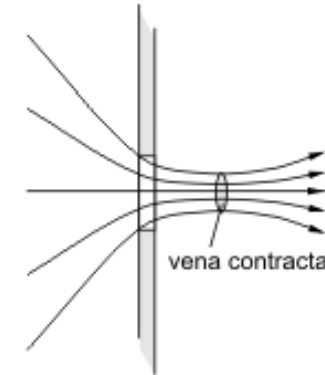
$$Q = v_1 A_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$



Merilnik pretoka z zaslonko

Najcenejši, najenostavnejši:

- Plošča z luknjo (premer, položaj definirana) je vstavljena med prirobnici v cevi.
- Ko fluid preide preko zaslonke se *še zožuje* na minimalni premer (vena contracta, Torricelli)
- Če bi uporabili neposredno Bernoullijevo enačbo, bi dobili napačno meritev, saj površina luknje v zaslonki ni dejanski presek pretoka, ampak je ta presek vena contracta, ki ni znan!
- Poleg tega se med veno contracto in steno cevi tvorijo turbulence → povzročajo izgube energije, ki jih Bernoulli ne zajema!



Merilnik pretoka z zaslonko

Efekt vene contracte in turbulenc zajema empirična enačba

- $\rho \rightarrow$ gostota medija pred zaslonko
- $d \rightarrow$ premer luknje zaslonke
- $\beta \rightarrow$ razmerje premerov luknje in cevi (d/D)
- $D \rightarrow$ notranji premer cevi pred zaslonko
- $C \rightarrow$ (discharge coefficient)
- $\varepsilon \rightarrow$ (f

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Merilnik pretoka z zaslonko

- Korekcijska faktorja:

- $C \rightarrow$ (ang. discharge coefficient) odvisen od razmerja premerov, Reynoldsovega števila, hrapavosti cevi, ostrine roba luknje zaslonke in položaja merjenja tlaka
Za standardizirano geometrijo je C odvisen samo od Reynoldsovega števila, zato ga za določeno aplikacijo lahko določimo.
- $\epsilon \rightarrow$ zajema stisljivost fluida (ang. expansibility factor)

Konstanti (C , ϵ) določajo standardi (EU \rightarrow ISO 5167-1, US \rightarrow API 2530) v katerih sta določena geometrija in pogoji montaže. To velja za izvedbe z zaslonko, Venturijevo cevjo in šobo.

Merilnik pretoka z zaslonko

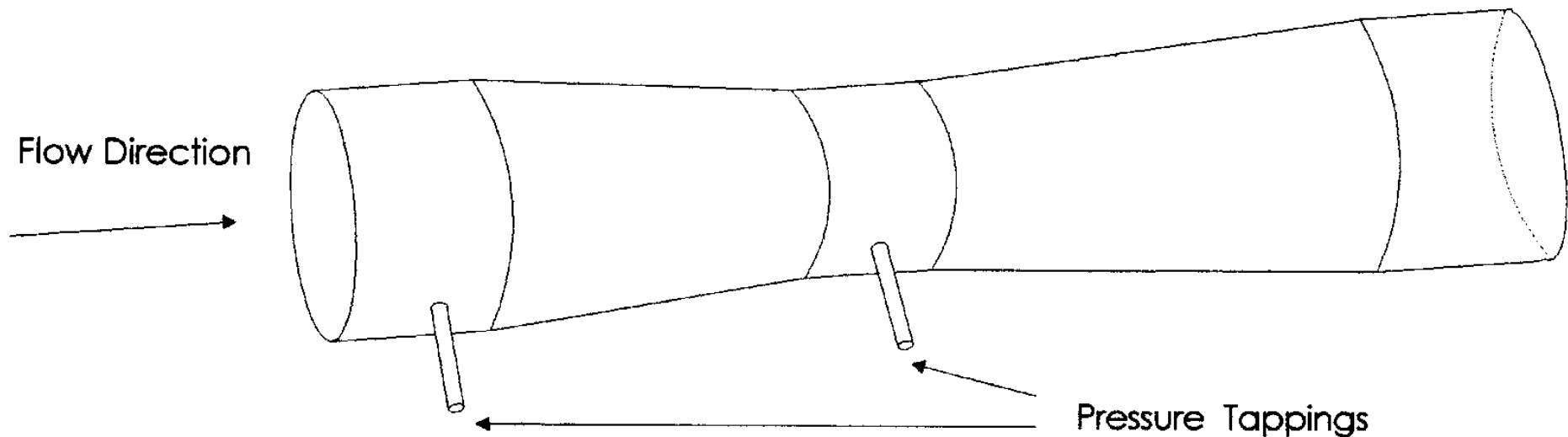
- Če je zaslonka izdelana (geometrija) in montirana po standardu, lahko njeno delovanje predvidimo brez umerjanja!
- Izdelava zaslonke je poceni, nima gibljivih delov in je zato zanesljiva.
- Uporablja se za meritve čistih plinov, tekočin in pare.

Merilnik pretoka z zaslonko

- Največja slabosti merilnika z zaslonko sta omejeno področje meritve in občutljivost na spremembe pretoka.
- Pretok fluida je proporcionalen korenu razlike tlakov. V realnem senzorju pretoka z eno zaslonko in enim diferencialnim senzorjem tlaka je padec tlaka pred in po zožitvi omejen na 3:1.
- Zahtevano razmerje premerov cevi in luknje zaslonke (β) je odvisno od največjega pretoka in od merilnega območja diferencialnega senzorja tlaka.

Merilnik pretoka z Venturijevo cevjo

- Klasična (Herschel-Venturi) cev je najstarejša vrsta merilnika pretoka z zožitvijo (1887)
- Zožitev je postopna, zato je konstanta C precej blizu 1 (tipično 0.95)
- Tlačne izgube v cevi so zaradi postopne zožitve manjše, vendar za isti β zahteva diferencialni senzor tlaka z nižjim merilnim območjem.
- Ni občutljiv na obrabo roba kot zaslonka, zato je bolj primerna črpanje umazanih fluidov
- Je manj občutljiva na spremembe pretoka in zato zahteva krajši ravni del cevi pred merilnikom v primerjavi z izvedbo z zaslonko
- Slabosti: Cena, velikost (tipična dolžina Venturijeve cevi je 6 premerov cevi/zožanja)



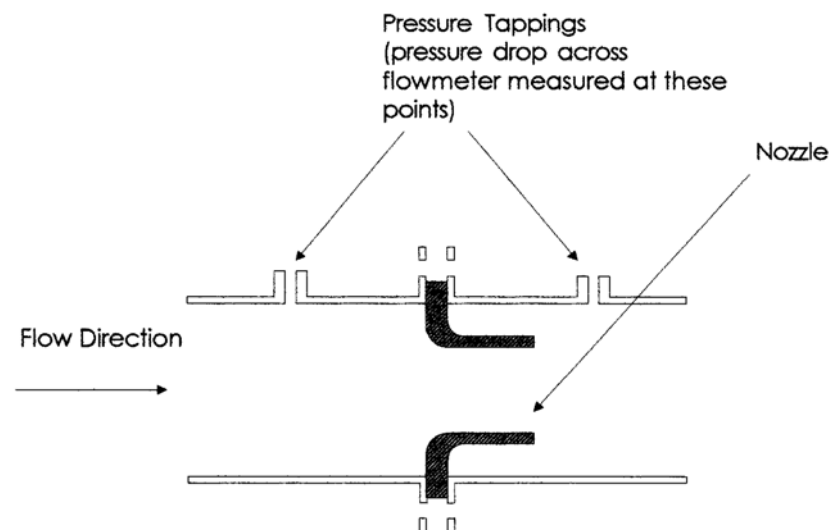
Merilnik pretoka s šobo (nozzle)

Šoba združuje prednosti zaslonke in Venturijeve cevi

- Kompaktna
- Zaradi ukrivljenega vtoka je $C \approx 1$.
- Geometrijo določa standard ISA-1932

Ukrivljeni vtok je težje izdelati kot zaslonko, saj se radij ukrivljenosti vtoka spreminja glede na razmerje β . Se vedno je cenejša kot Venturijeva cev.

- Nima ostrih robov → primerna za črpanje umazanih in abrazivnih medijev. Zelo primerna za meritev velikih pretokov (npr. pare).



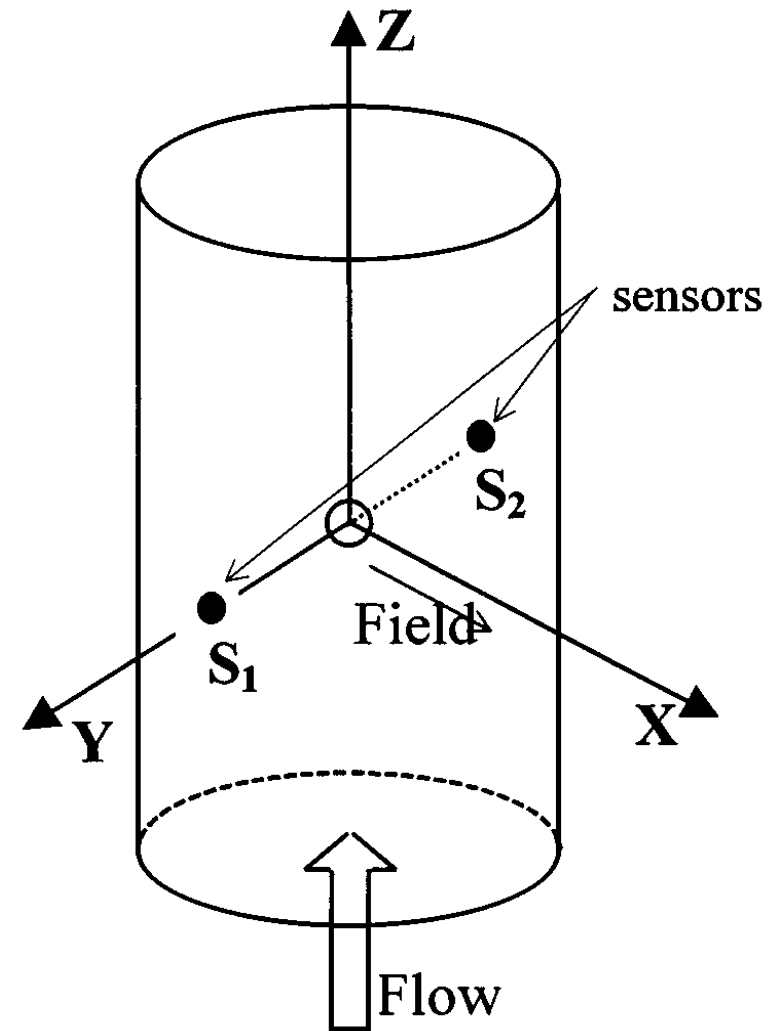
Elektromagnetni merilniki pretoka

- Zelo razširjeni, ker so neinvazivni
- Enostavni za uporabo, ker se lahko montirajo na obstoječe cevi, tako da dodamo magnetne in senzorje na cev.
- Lahko merijo obrat pretoka
- So neobčutljivi na viskoznost, gostoto in nihanja pretoka
- Zelo dobra odzivnost in široko linearno merilno področje
- Osnova za delovanje je Faradayev zakon indukcije.
- Inducirana napetost je linearno proporcionalna povprečni hitrosti tekočine oz. volumskemu pretoku.
- Natančnost je tipično $\pm 1\%$ (lahko tudi do $\pm 0.25\%$)

Faradayev zakon indukcije

- Če se prevodnik dolžine l (m) premika s hitrostjo v (m/s) pravokotno na gostoto magnetnega polja B (T), potem je inducirana napetost na koncih vodnika enaka

$$e = Blv$$

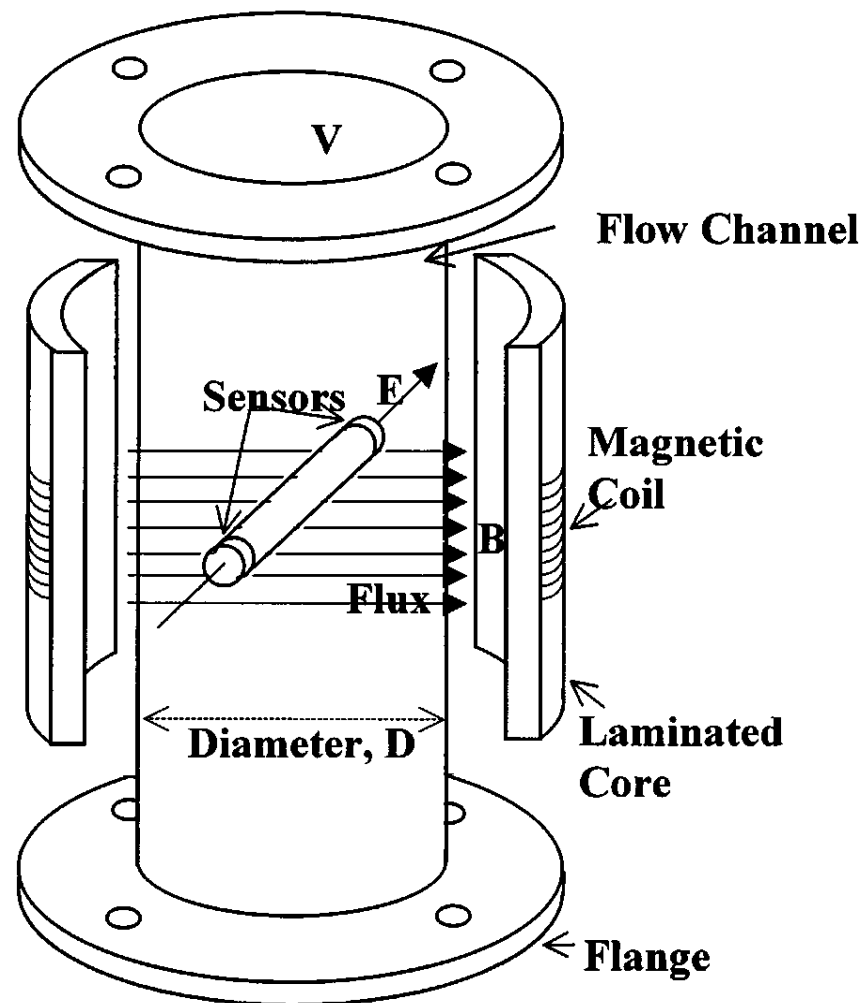


Elektromagnetni merilniki pretoka

- Elektromagneta ustvarjata homogeno magnetno polje, ki se razširja preko cevi s tekočino
- Če prevodna tekočina seka silnice magnetnega polja (B), se na pravokotnih koncih ustvari inducirana napetost (e).
- Vlogo žice prevzame tekočina v cevi, dolžina te žice pa je običajno enaka premeru cevi (D).
- Hitrost "žice" (v) je sorazmerna povprečni hitrosti pretoka.

$$e = B D v \quad Q = A v \quad A = \pi D^2 / 4$$

$$e = \frac{4BQ}{\pi D}$$

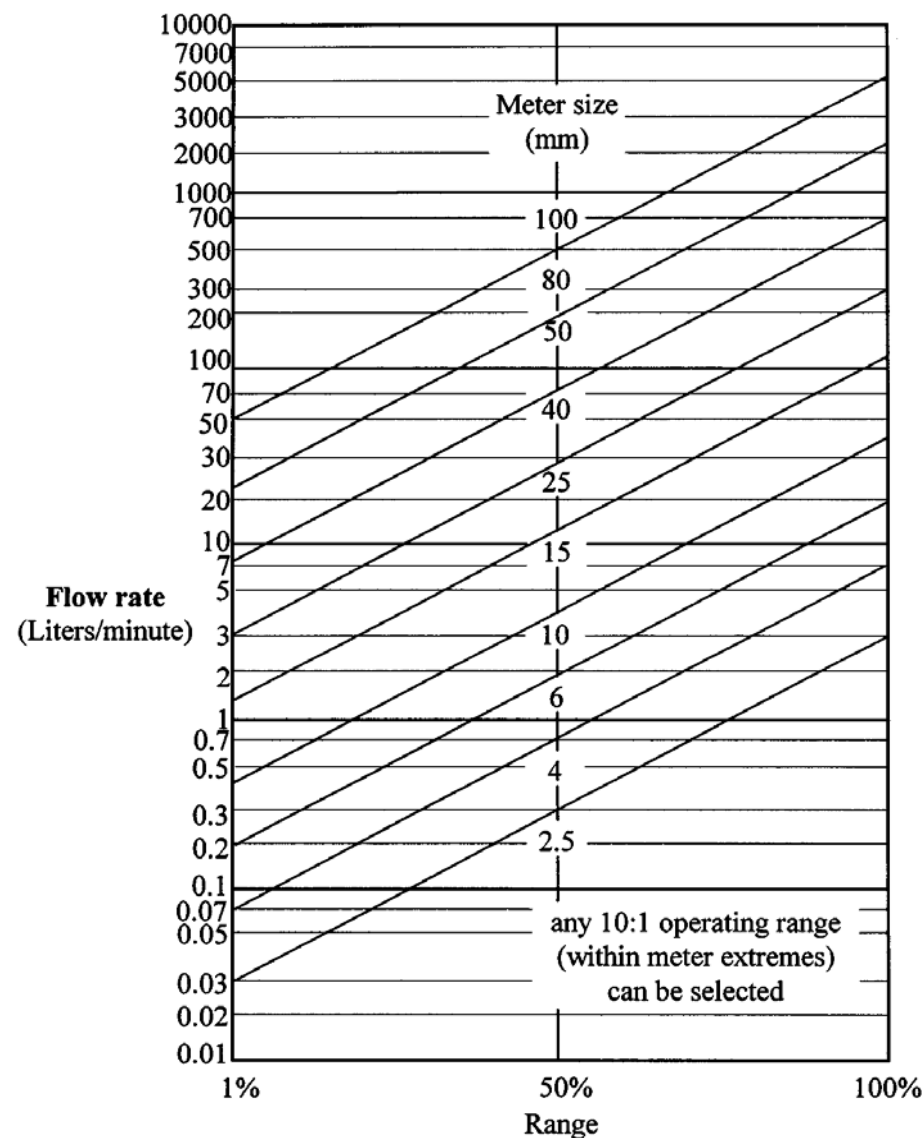


Elektromagnetni merilniki pretoka

- Glede na vrsto izvedbe (elektro)magnetnega ločimo več tipov (enosmerni, izmenični, stalni)
- Najbolj razširjeni sta izvedbi z elektromagneti
- Največja težava elektromagnetnih merilnikov pretoka so nizke inducirane napetosti, ki jih moramo meriti v prisotnosti visokih vzbujačnih napetosti in motenj:
 - Električne napetosti v sami tekočini
 - Kapacitivni sklop (cev) med signalnim in napajalnim vezjem
 - Kapacitivni sklop v povezovalnih kabljih
 - Napetost se ustvarja na elektrodah kot tudi v tekočini
 - Induktivni sklop magnetov merilnika pretoka

Elektromagnetni merilniki pretoka

- Odjemni elektrodi postavimo na mesto največje spremembe (pravokotno)
- Elektrodi sta izolirani od cevi z distančniki (guma, teflon, poliuretan, PE)
- Izvedbe so v rangu od 2 mm do 1.2 m
- Pri izvedbah moramo poznati približno področje hitrosti tekočin za linearno delovanje merilnika.

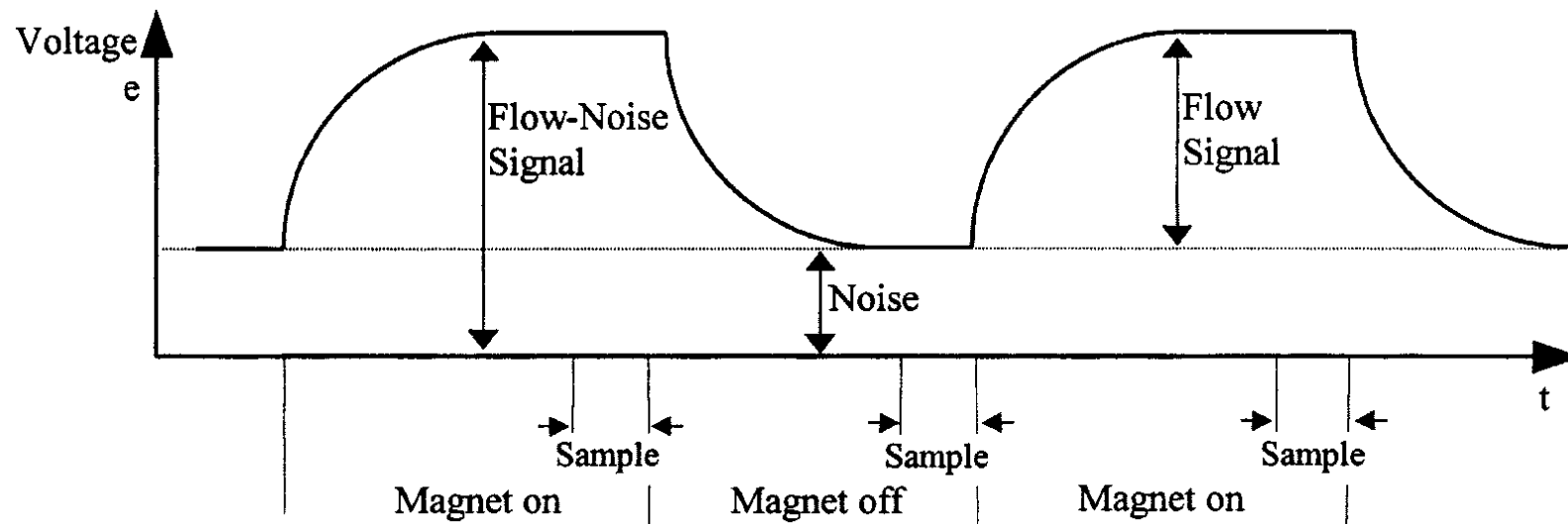


AC izvedba elektromagnetnega merilnika pretoka

- Izmenično vzbujanje s frekvenco (50,60,400 do 5kHz).
- Inducirana napetost za AC merilnik pretoka, ki je postavljen na 50 mm cev notranjega premera s pretokom 500 l/min je reda 2.5 mV.
- Historično so bili bolj razširjeni, ker so izničili polarizacijo merilnih elektrod
- Splošno so manj občutljivi na obliko profila hitrosti v cevi.
- Meritev inducirane napetosti mora biti diferencialna.
- Miniaturne izvedenke omogočajo meritve pretoka v žilah premera ≈ 2 mm. V teh primerih so frekvence vzbujanja od 200 Hz do 1 kHz.
- Glavna slabost tega merilnika je močno izmenično magnetno polje, ki inducira napetost tudi v bližnjih vezjih. Zato je potrebno tak merilnik večkrat umeriti pri ničelnem pretoku.
- V industrijskem okolju se vrednost vzbujalne napetosti spreminja – zato se spremeni tudi občutljivost merilnika.

DC izvedba elektromagnetnega merilnika pretoka

- DC oz. pulzni magnetni merilniki pretoka imajo ca. 3 Hz do 8 Hz frekvenco vzbujanja elektromagneta.
- Ko magnetimo se enosmerna napetost inducira. Ta napetost vsebuje šum in inducirano napetost
- Ko magneta izključimo, bo signal predstavljal samo šum.
- Če meritvi opravljamo dvostopenjsko, lahko odštejemo šum od koristnega signala
- Tok ne sme biti povsem enosmeren, ker se takrat okrog elektrod tvori polarizacijska plast plina



Ultrazvočni merilniki pretoka

- Tudi ta tip merilnika pretoka ni invaziven (ne ustvarja tlačnih sprememb)
- Za razliko od elektromagnetnih jih lahko uporabljamo tudi za meritev pretoka tekočin, ki niso električno prevodne
- Delovanje je skoraj neodvisno od premera cevi, medtem ko cena elektromagnetnih drastično naraste s premerom cevi

Vrste ultrazvočnih merilnikov pretoka

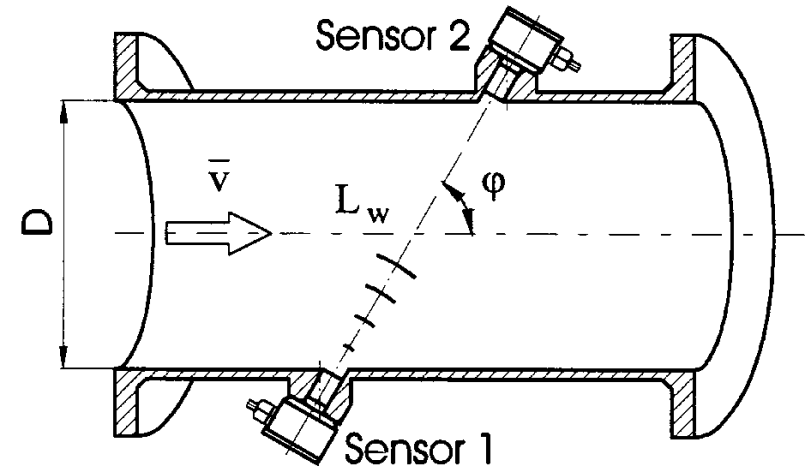
- *Čas prehoda*: Meri časovno razliko, ki jo ultrazvočni pulz porabi za pot znane dolžine. Časovno razliko meri enkrat proti toku, drugič v smeri toka fluida. Tak princip je občutljiv na trdne delce v snovi in zračne mehurčke v tekočini.
- *Dopplerjev*: Bolj razširjen, ker je cenejši. Ni tako natančen kot merilnik na čas prehoda. Izkorišča Dopplerjev premik frekvence ob odboju ali razpršitvi signala v tekočini.
- *Križna korelacija*: Merilna odseka sta montirana na dani razdalji. Oba merita absorpcijo ultrazvočnega signala – hitrost tekočine se meri s križno korelacijo merjenih signalov.
- *Fazni zamik*: Meri fazni zamik oddanega in sprejetega signala v in proti smeri toka. Fazni zamik je proporcionalen hitrosti pretoka.
- *Slabitev signala*: Meri slabljenje signala, ki ga bolj zanaša (drift) ob naraščajočem pretoku

Ulrazvočni merilniki pretoka na čas prehoda

- Hitrost širjenja akustičnega vala in hitrost pretoka se seštevata vektorsko.
- Meri razliko časov prehoda med pulzom poslanim v smeri toka (t_{12}) in proti (t_{21}) smeri toka.
- Če ni transverzalnih komponent pretoka, velja:

$$t_{12} = \frac{L_w}{c + v_a \cos \varphi}$$

$$t_{21} = \frac{L_w}{c - v_a \cos \varphi}$$

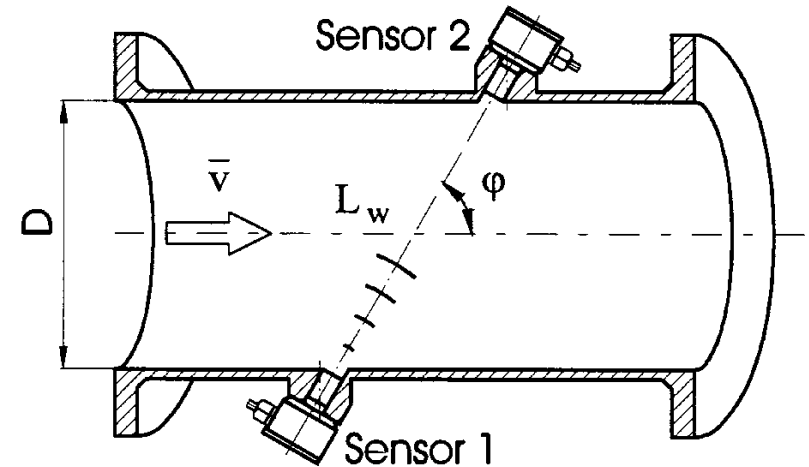


L_w = razdalja med pretvornikoma
 c = hitrost zvoka v dani tekočini
 φ = kot med smerjo toka in akustično potjo
 v_a = povprečna hitrost pretoka na razdalji L_w .

Ulrazvočni merilniki pretoka na čas prehoda

- Ista pretvornika opravljata funkcijo sprejemnika in oddajnika zato časa prehoda odštejemo:

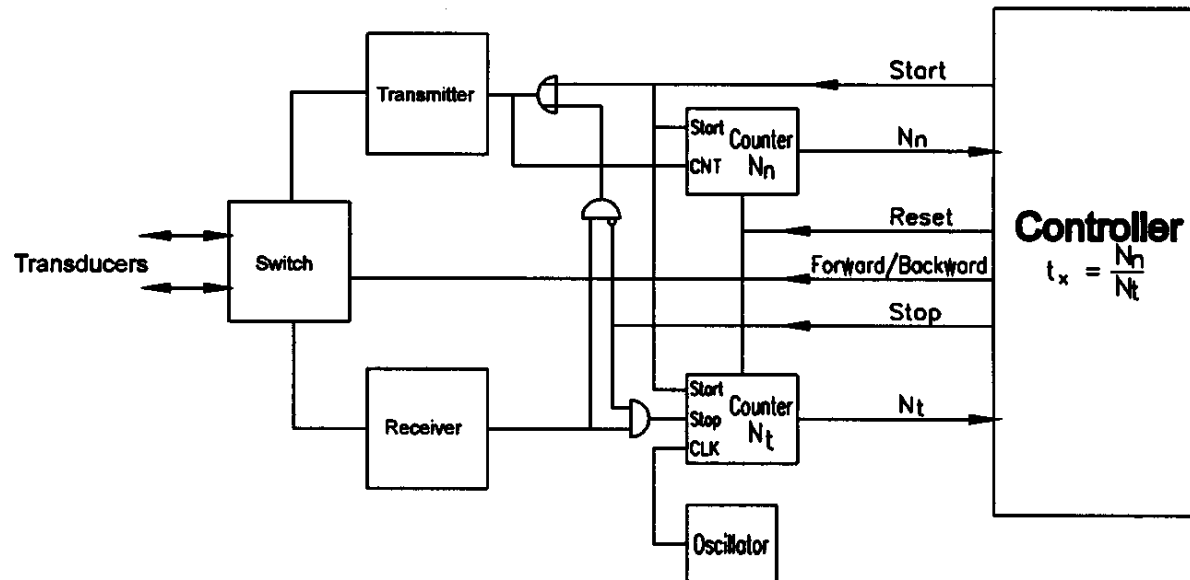
$$\bar{v}_a = \frac{L_w}{2 \cos \varphi} \left(\frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right) = \frac{D}{2 \cos \varphi \sin \varphi} \left(\frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right)$$



L_w = razdalja med pretvornikoma
 c = hitrost zvoka v dani tekočini
 φ = kot med smerjo toka in akustično potjo
 v_a = povprečna hitrost pretoka na razdalji L_w .

Ulrazvočni merilniki pretoka na čas prehoda

- Primer izračuna: Cev premera $D=150$ mm, kot postavitve $\varphi=60^\circ$, hitrost pretoka je reda $v_a=1$ m/s, temperatura vode $T=20^\circ\text{C}$ ($c\approx 1497$ m/s).
- Časa prehoda t_{12} in t_{21} sta reda mikrosekund, časovna razlika med prehodoma pa je ca. 78 ns!
- Če želimo merilnik z natančnostjo 1% FS moramo časovno razliko meriti na najmanj 100 ps (10^{-10} s)



Ultrazvočni merilniki pretoka na čas prehoda

- Klasične merilne tehnike časa (frekvenca, zakasnitev) odpadejo.
- Uporabimo meritev časovne razlike z oversamplingom.
- Problem te tehnike je tresenje (jitter) vhodov logičnih vrat
- Če signal vzorčimo večkrat (N_n), se ločljivost meritve signala povečuje s številom zajetih vzorcev ("oversampling"). Ista logika velja za meritev časovnih razlik signalov
- Časa prehoda (t_{12} , t_{21}) merimo večkrat:

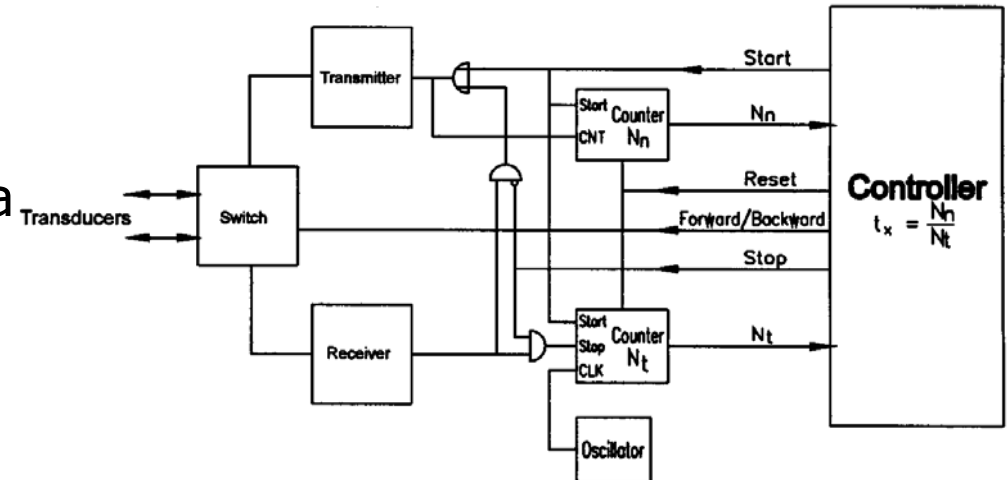
$$t = \frac{1}{N_n} \int_0^{\tau} \frac{1}{f} dt$$

$\tau \rightarrow$ čas integracije, $f \rightarrow$ frekvenca

Ultrazvočni merilniki pretoka na čas prehoda

- Uporabimo dva števca: Prvi dobiva signal ure stabilnega oscilatorja med merilno periodo (N_t), drugi šteje število zajetih vzorcev (N_n).
- Meritev se ustavi po določenem času (reda ms), ko dosežemo določeno število vzorcev N_n .
- Razmerje (N_t / N_n) da povprečna časa prehoda t_{12} oz. t_{21}
- Ločljivost (resolution) r je:

$$r = \frac{1}{N_n \cdot f}$$



Vrtinčni merilniki pretoka

- Pojavili so se ca. leta 1970
- Nimajo gibljivih delov.
- Ustvarjajo frekvenčni izhod, ki je direktno proporcionalen pretoku za velik razpon Reynoldsovih števil.
- Enostavna izvedba. Merilna natančnost (1% ali bolje)
- Deluje enako dobro za pline in tekočine
- Industrijski vrtinčni merilniki so v območju cevi premera od 15 mm do 300 mm (1/2 in. to 12 in.), redko do 400 mm.
- Merilno območje je odvisno od lastnosti fluida in načrtovanja merilnika

Merilna območja vrtilčnega merilnika pretoka

Za 15 mm merilnik velja:

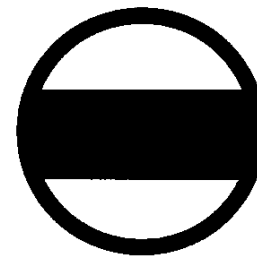
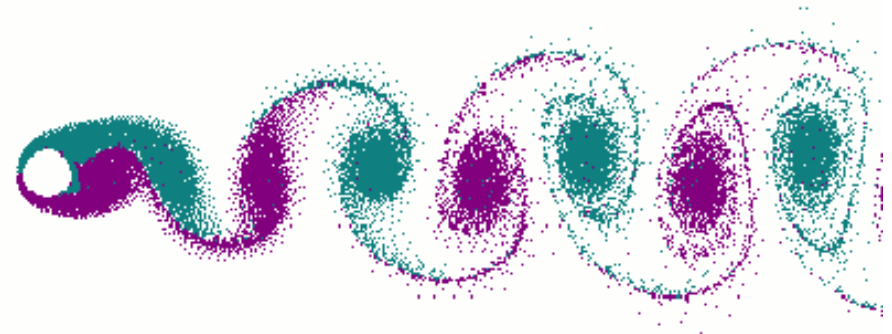
- Voda @ 21°C; 0.06 ... 2.2 l/s
- Zrak @ 16°C; 101 kPa → 1.1 ... 15.7 l/s
- Suha nasičena para @ 689 kPa → 4.5 ... 225 kg/h

Za 300 mm merilnik velja:

- Voda @ 21°C; 5.4 ... 5400 l/s
- Zrak @ 16°C; 101 kPa → 157 ... 12500 l/s
- Suha nasičena para @ 689 kPa → 1240 ... 124000 kg/h
- Temperaturno področje delovanja od kriogenских temperatur (2-3K) do 427°C
- Tlačno področje delovanja do 20.7 MPa (207 bar).

Princip delovanja

- Če v cev vstavimo topo oviro se ob njej in za njo ustvariijo vrtinci
- Theodore von Karman je 1911 določil kriterij stabilnosti za polje vrtincev.
- Za različne ovire se z naraščajočo hitrostjo fluida frekvenca vrtincev poveča linearno.
- Brezdimenzijsko Strouhalovo število (St) povezuje pogostost pojavljanja vrtincev (f) in hitrost pretoka (U) preko širine ovire v cevi (d). Število St se nanaša na odprte pretoke.
- Poznejše analize so pokazale, da drugačno število (St') opiše razmere v cevi (zaprt pretok), kjer dobimo povprečno hitrost fluida (U)

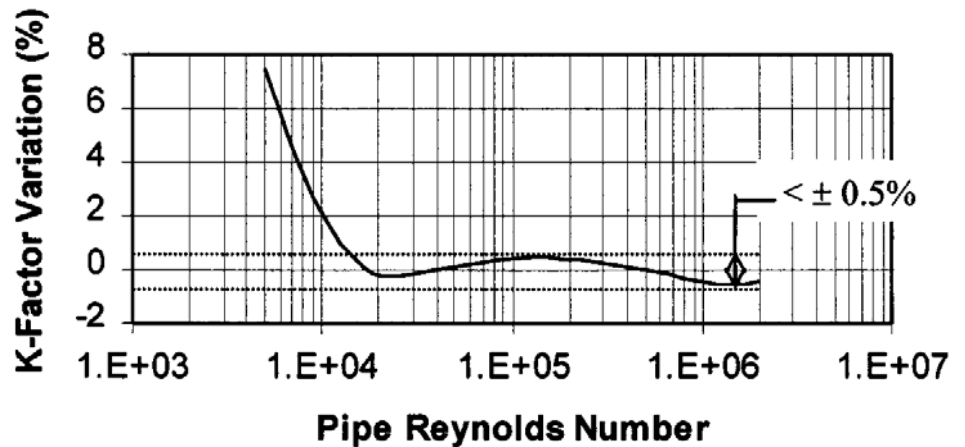


$$St = \frac{f \times d}{U}$$

$$\bar{U} = \frac{f \times d}{St'}$$

Potek meritve

- Frekvence pojavljanja vrtincev so v rangu < 1 Hz (veliki merilniki, majhne hitrosti) do več kot 3000 Hz (majhni merilniki, visoke hitrosti)
- Za merilnik pretoka izberemo obliko ovire, ki da konstantni faktor K za široko področje Reynoldsevih števil cevi.
- Meritev je osnovana na štetju števila vrtincev v danem času \rightarrow frekvence (f) s senzorjem tlaka ali piezoelektričnim pretvornikom.
- Če to število delimo s faktorjem K , dobimo volumski pretok fluida.
- Faktor K podaja število St' na cevi preseka (A).
- Spremembo faktorja K preko območja Reynoldsovih števil imenujemo tudi linearnost merilnika.



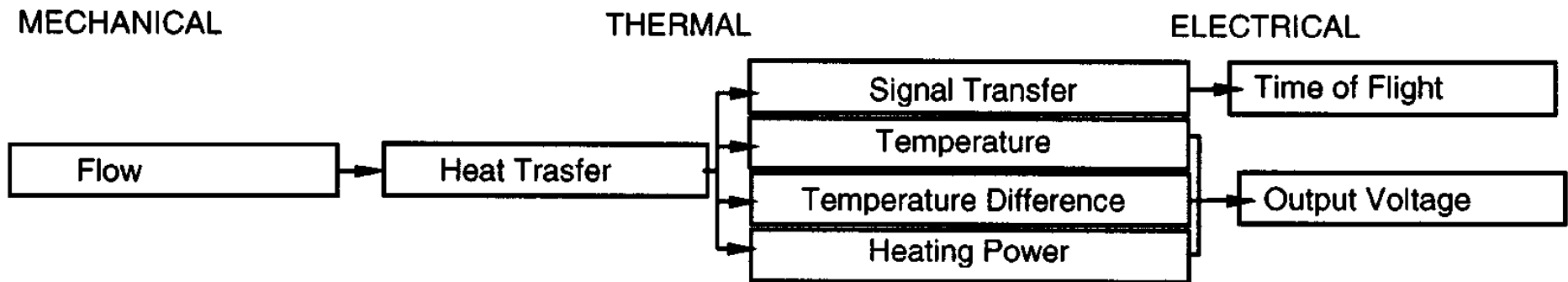
$$Q = \left(\frac{(A \times d)}{St'} \right) \times f$$

$$Q = \frac{f}{K} \quad K = \frac{St'}{(A \times d)}$$

Merilniki pretoka s prenosom toplote

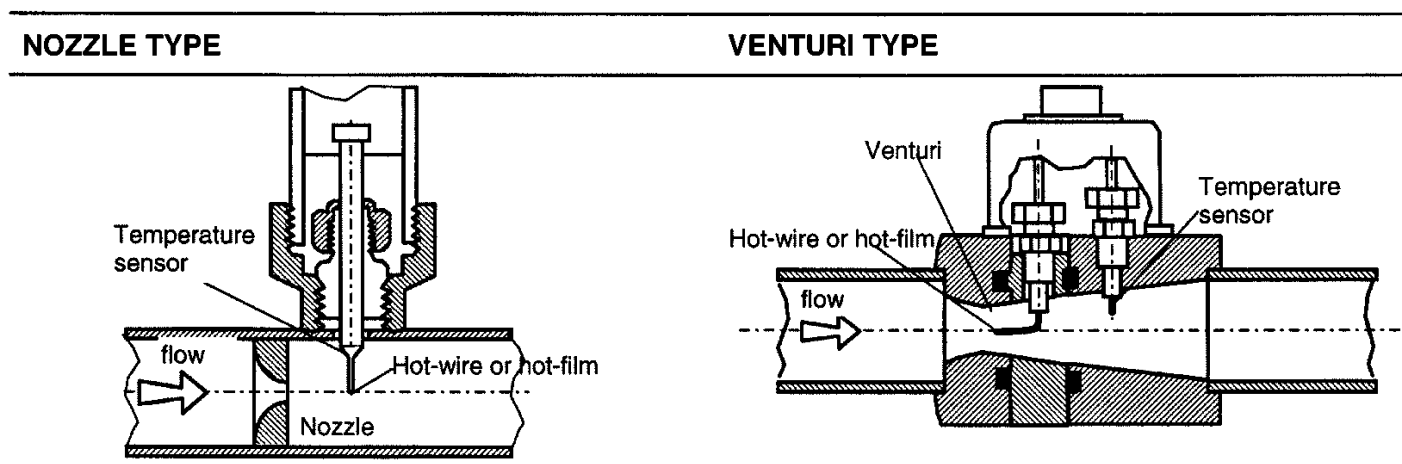
Delitev merilnikov pretoka glede na učinek:

- Vročo žico:
Merijo učinek fluida na vroče telo (sprememba grelne moči s konstantno temperaturo grelca (ang. "hot-wire, hot-film oz. hot-element senzori pretoka))
- Kalorimetrični:
Merijo spremembo temperaturnega profila v okolici grelnega telesa. Temperaturni profil je odvisen od pretoka.
- Merijo čas prehoda/preleta (ang. TOF – time-of-flight) toplotnega pulza na grelnem telesu preko znane razdalje



Merilniki pretoka na grelno telo

- Najbolj tradicionalna metoda merjenja pretoka (ohlajanje grelnega telesa pri spreminjajočem se pretoku)
- Senzorski element je običajno Pt žica (Pt-W, Pt-Ir zlitina). Žica je običajno tanka (1-15 μm), zato se brez zaščite uporabljajo za meritev pretoka plinov (npr. zrak).
- Žica je lahko zaščitena s kvarčnim steklom (za meritev pretoka tekočin) ali z Al_2O_3 (za meritev pretoka plinov). Obloga iz Al_2O_3 je odporna proti abraziji in ima visoko temperaturno prevodnost.



Merilniki pretoka na grelna telo

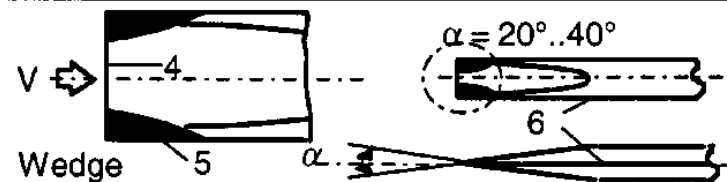
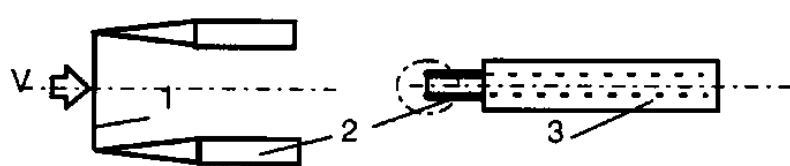
Najbolj pogoste oblike grelnega telesa so cilindrične:

- Tanka žica (hot-wire) (1 - 15 μm) ali
- Tanka plast (hot-film) (premer 25 - 150 μm).
- Senzorji so Pt žica, navita okoli keramičnega substrata (premera 0.02 mm - 2 mm).

HOT-WIRE SENSORS

HOT-FILM SENSORS

BASIC SHAPE OF THE SENSOR ELEMENT



Merilniki pretoka na grelnno telo

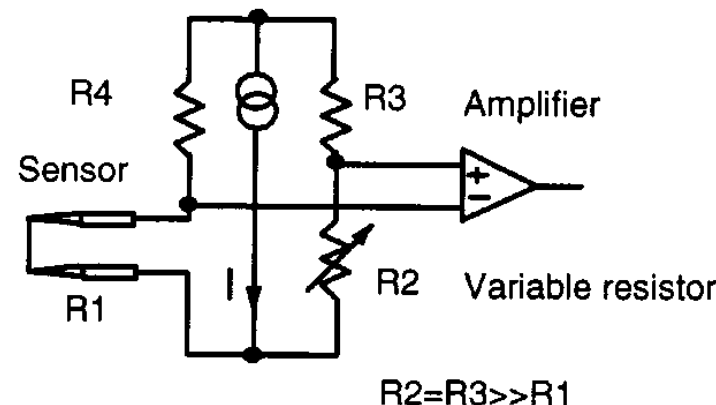
	Hot-wire	Hot-film
Senzorski element	Pt tanka žica (premer 70 μ m)	Pt tanka plast (prevlečena z Al ₂ O ₃)
Način delovanja	Stalna temperatura grelnca v zraku	
Temperaturno področje delovanja	-30 ... 200°C	
Karakteristika	Nelinearna	
Natančnost (%)	±4	±2
Časovni odziv v ms	<5	12
Občutljivost mV/kg/h	1	5

Mostična meritev merilnikov pretoka na grelno telo – tokovno napajanje

Mostič napajamo s stalnim tokom

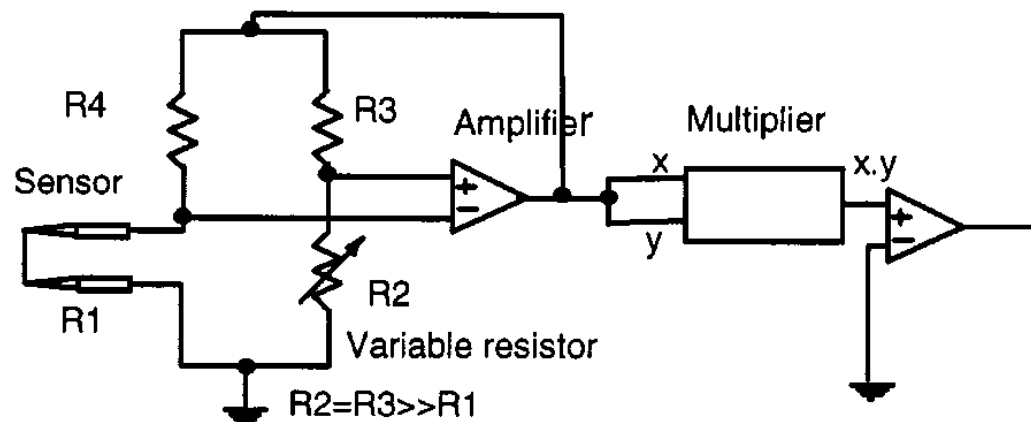
($R_3, R_4 \gg R_1 \rightarrow$ tok preko R_1 je neodvisen od sprememb upornosti senzorja R_1).

- Pretok hladi grelno telo \rightarrow spremeni $R_1 \rightarrow$ neuravnoteži mostič. Izhodna napetost mostiča V_0 je v povezavi z masnim pretokom.
- Paziti moramo, da sta $TCR(R_1)$ in $TCR(R_2)$ enaka, da kompenziramo spremembe $T_{AMBIENTA}$. Podobno morata biti enaka $TCR(R_3)$ in $TCR(R_4)$.

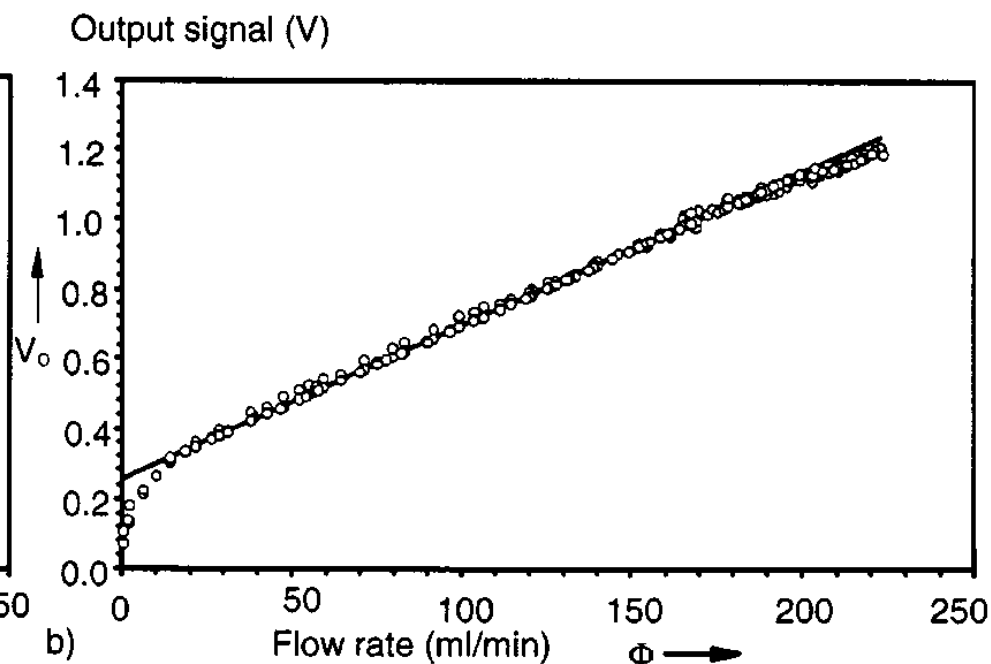
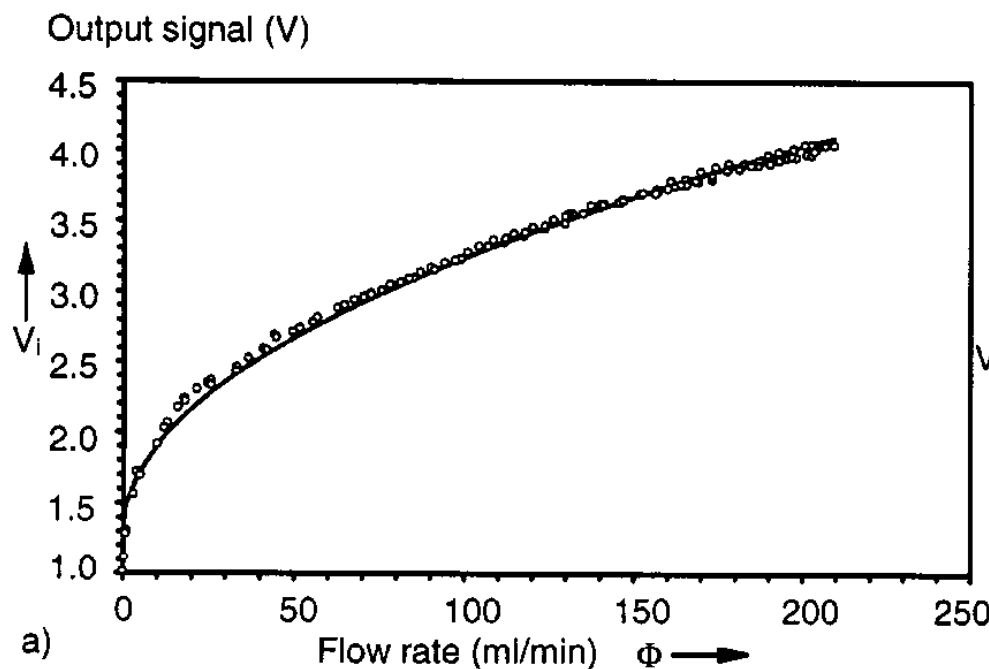
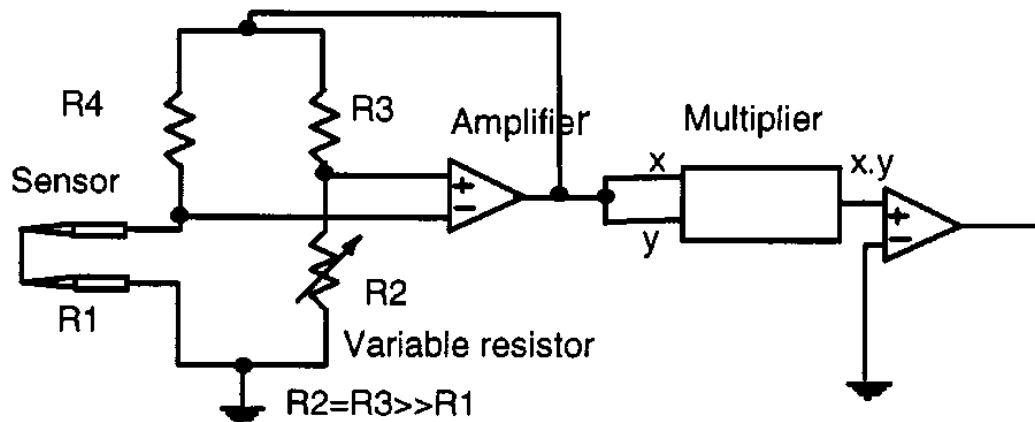


Mostična meritev merilnikov pretoka na grelni telo – regulacija temperature

- *Mostič regulira stalno temperaturo grelnega telesa*
- Mostič je uravnotežen, ko ni pretoka z R_2 .
- Pretok hladi žico \rightarrow upornost R_1 pade \rightarrow neuravnoteži mostič.
- Diferenčni ojačevalnik dvigne napajalno napetost mostiča $\rightarrow R_1$ se bolj segreje \rightarrow regulacija temperature.
- Izhodni signal V_0 ima obliko funkcije kvadratnega korena, zato ga lahko enostavno lineariziramo z množilnikom signala (npr. AD534)

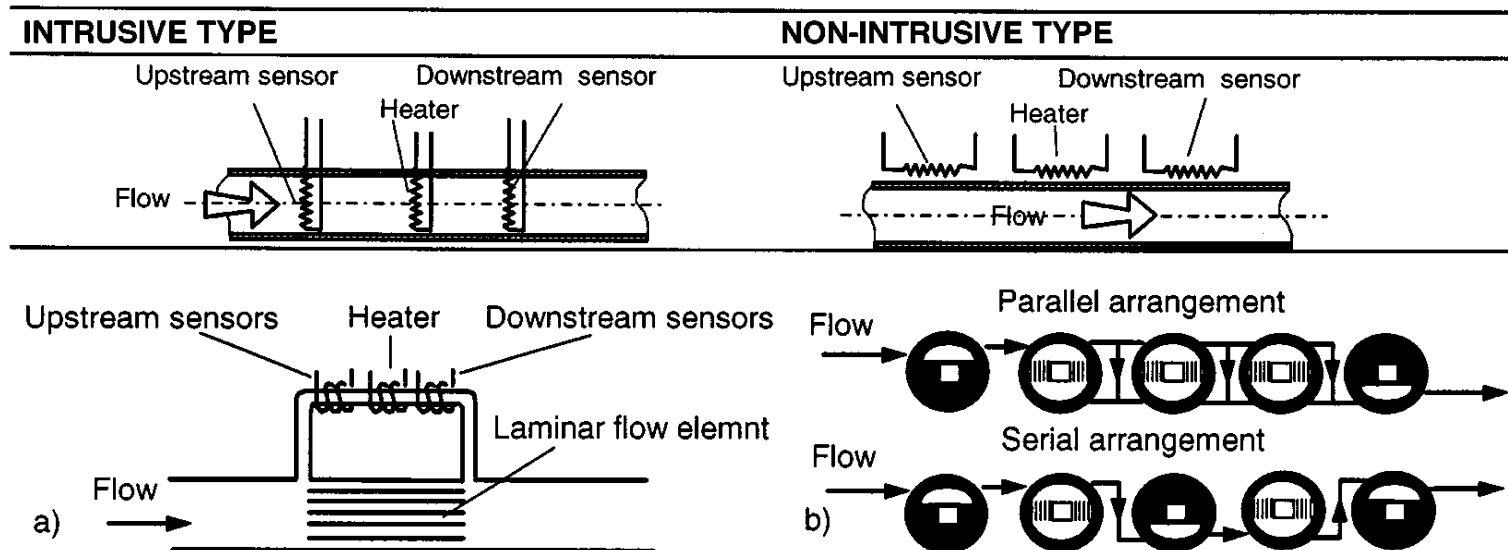


Mostična meritev merilnikov pretoka na grelnu telo - linearizacija



Kalorimetrični senzorji pretoka

- Spremembo temperaturnega profila okoli grelnega telesa lahko izkoristimo za meritve majhnih pretokov.
- Glede na položaj senzorjev in grelnega elementa obstajata dve izvedbi: v cevi pretoka (intrusive, invasive) ali izven cevi pretoka (non-intrusive, non-invasive)
- Slabosti invazivne izvedba pretoka:
 - Korozija in erozija elementa
 - Cev je oslABLjena na mestu montaže senzorja
- Pretoki v rangu 1ml/min do 500l/min
- Večje pretoke lahko merimo z obvodom (bypass)



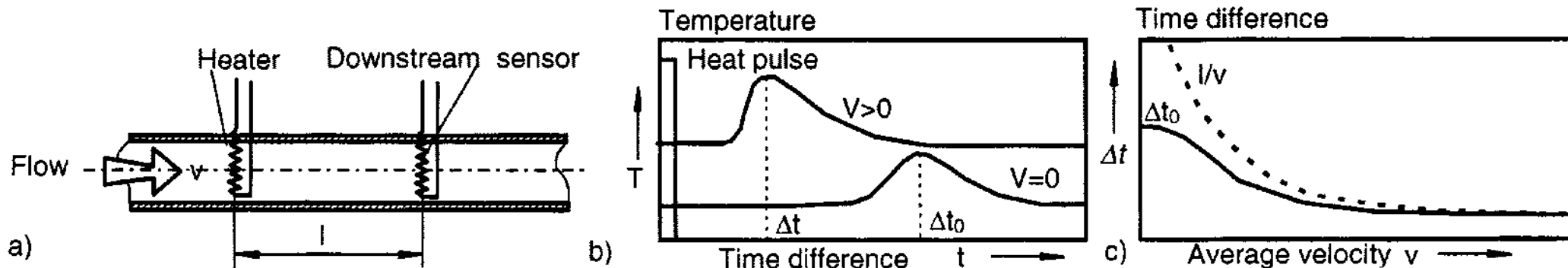
Kalorimetrični senzorji pretoka

- Kalorimetrični senzorji so občutljivi na področju nizkih pretokov, zato so jim področje delovanja razširili z obvodom (kapilara je premera ca. 3 mm).
- V primerjavi s senzorji na grelna telo imajo boljšo linearnost. Linearno področje delovanja senzorjev z obvodom je tipično v razmerju 100:1 (ekstremno do 10000:1)

	Plini	Tekočine
Temperaturno področje delovanja	0°C ... 70°C	0°C ... 70°C
Natančnost	±1%	±1%
Linearnost	±0.2%	±0.2%
Razmerje pretokov z obvodom 1:50	min. 5 ml/min max. 100 l/min	min. 5 g/h max. 1000 g/h

TOF senzorji pretoka

- Sestavljeni iz grelnega telesa in enega ali več temperaturnih senzorjev vzdolž pretoka.
- Grelno telo krmilimo pulzno.
- Prenos toplotnega pulza je difuzijski in s prisilno konvekcijo.
- Spremembo temperature zaznamo s temperaturnim senzorjem.
- Izhod merilnika je časovna razlika (TOF \rightarrow time-of-flight), ki jo je toplotni impulz potreboval za razdaljo med grelnim telesom in senzorjem
- Slabosti podobno kot pri invazivnem tipu merilnika (korozija, erozija, puščanje cevi)
- Ni primeren za dinamične pretoke zaradi počasnega odziva
- Prednost tega merilnika \rightarrow ni odvisen od lastnosti tekočine (temperatura).



Elektronske komponente in senzorji

Elektrokemijski senzorji

Elektrokemijski senzorji

- Najbolj uporabni in razširjeni od vseh vrst kemijskih senzorjev
- Delimo jih glede na merjeno veličino:
 - Napetostni (ang. Potentiometric)
 - Tokovni (ang. Amperometric)
 - Prevodnostni (ang. Conductometric)
- Vsi elektrokemijski senzorji uporabljajo posebne elektrode

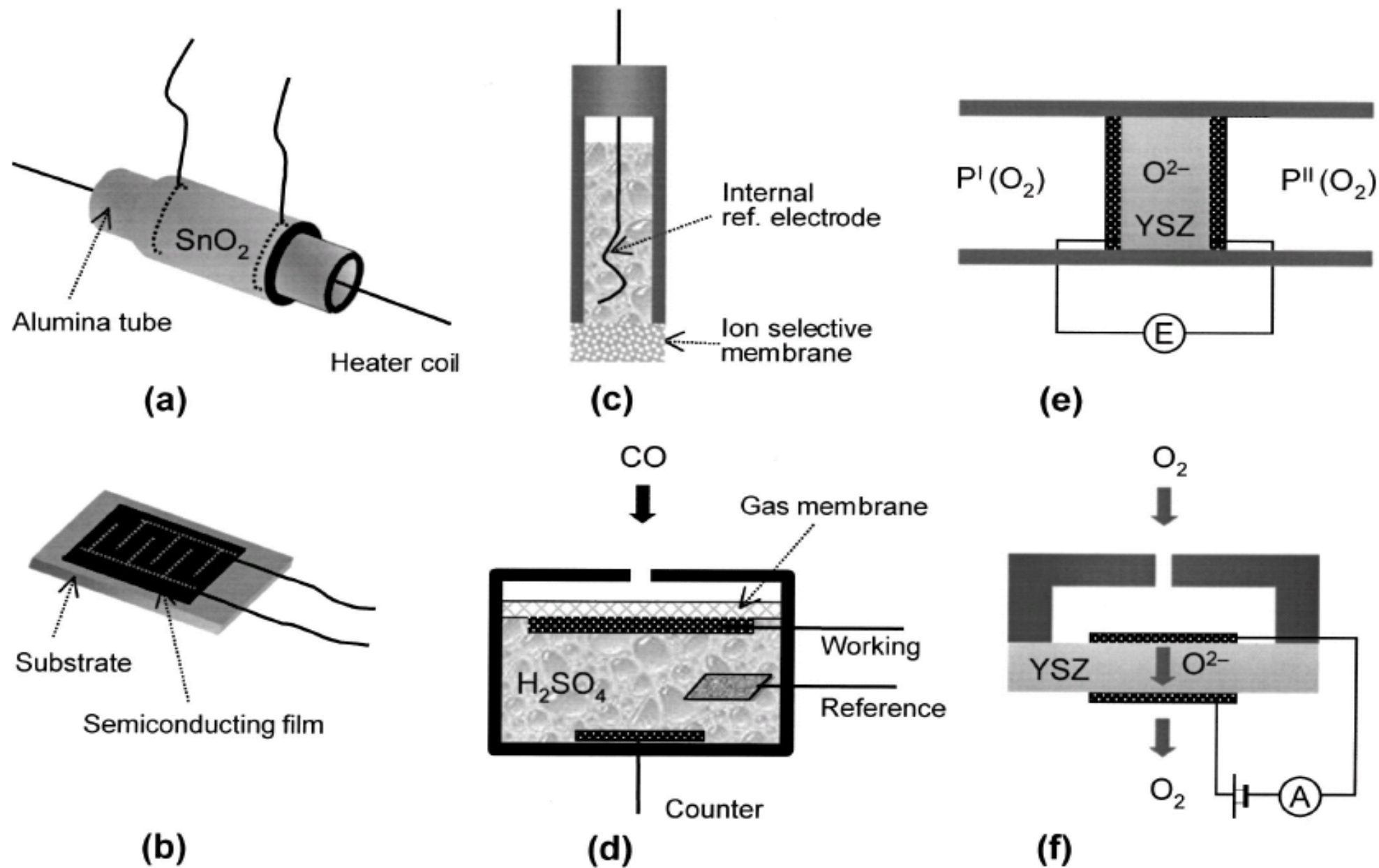


Figure 2. Typical chemical sensors: (a) tubular type SnO_2 gas sensor; (b) planar semiconductor sensor; (c) ion selective electrode (potentiometric); (d) amperometric gas sensor with liquid electrolyte; (e) potentiometric solid electrolyte O_2 sensor (concentration cell); (f) amperometric solid electrolyte O_2 sensor (current-limit type).

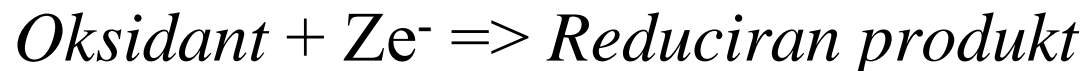
Napetostni elektrokemijski senzorji

- V elektrokemijskem senzorju poteka kemijska reakcija → transport naboja se spreminja z reakcijo.
- Elektrokemijski senzorji vedno delujejo kot zaprta zanka (tok vedno teče)
- Drugo ime → elektrokemijska celica

Napetostni elektrokemijski senzorji



Redox reakcija se izvaja na površini elektrode:

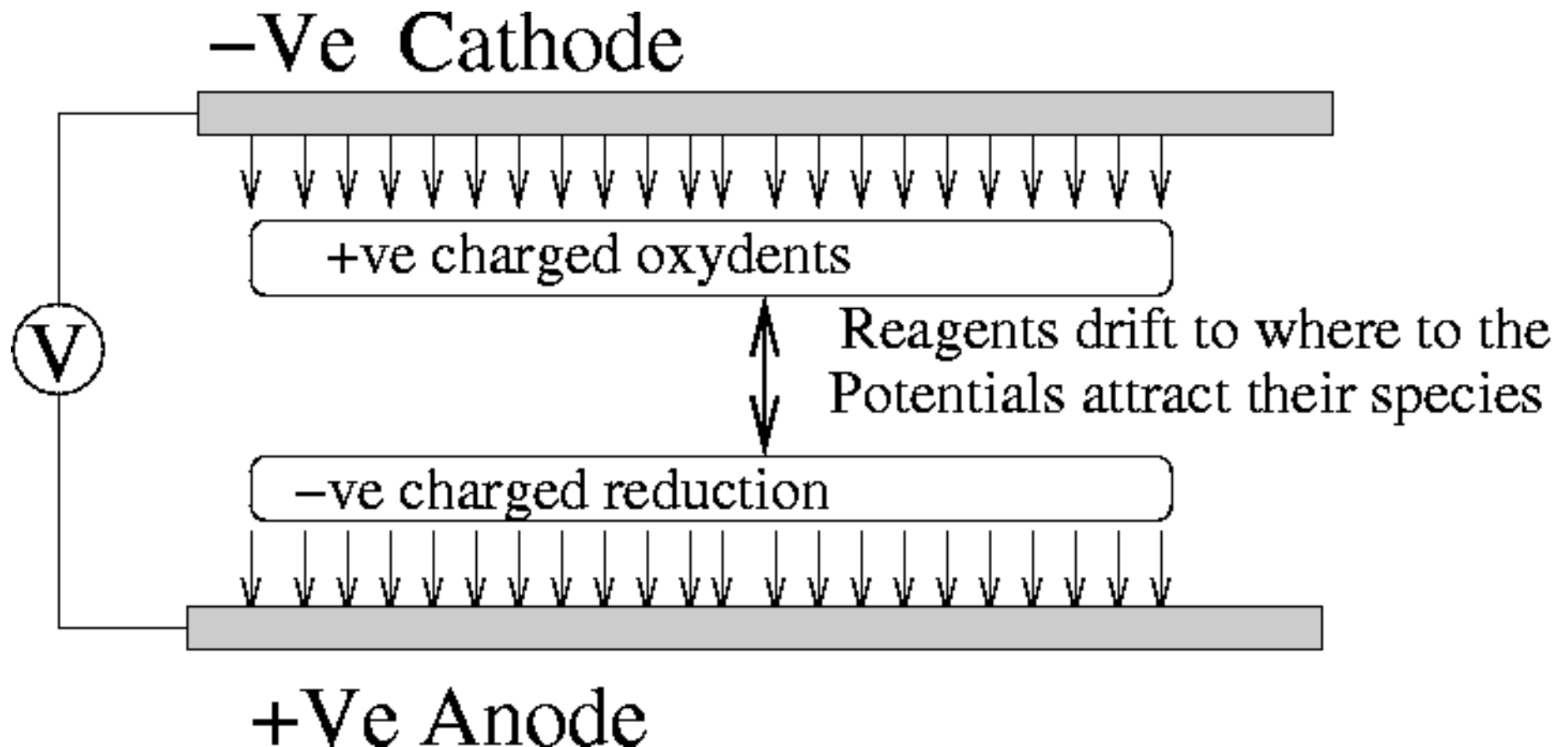


Z je število elektronov v redox reakciji

- Uporabljajo se lahko za določanje koncentracije sestavin analitskega plina ali raztopine
- Izhod je električni potencial elektrode, ko tok ne teče
- Izhod je napetostna razlika med delovno in referenčno elektrodo
- Potencial delovne elektrode je odvisen od koncentracije

Elektrokemijska celica

Reakcija se odvija pri katodi,
kjer elektrone "potegne" iz elektrode



Nernstova enačba

Podaja potencial polovice elektrokemijske celice

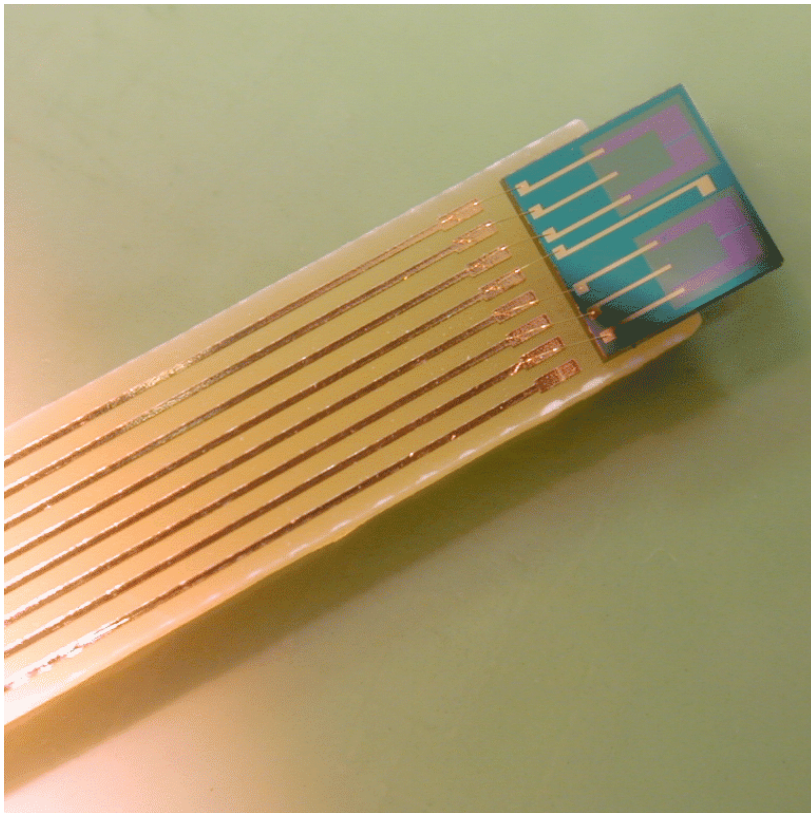
$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \left(\frac{C_0}{C_R} \right)$$

V napetostnem elektrokemijskem senzorju potekata reakciji ob anodi in katodi. Samo ena je pomembna za zaznavanje, druga je reverzibilna in ni vplivna.

- C_0 koncentracija oksidanta
- $C_R \rightarrow$ Koncentracija reduciranega produkta
- n število elektronov prenesenih ob redox reakciji
- F Faradayeva konstanta (95484.56 C/mol)
- T temperatura
- R Plinska konstanta (8.314 J/mol-K)
- E_0 Potencial elektrode

CHEMFET senzorji

Zelo razširjeni zaradi majhnosti in nizke porabe (Biološki in medicinski monitoring).



Primerni za masovno proizvodnjo.

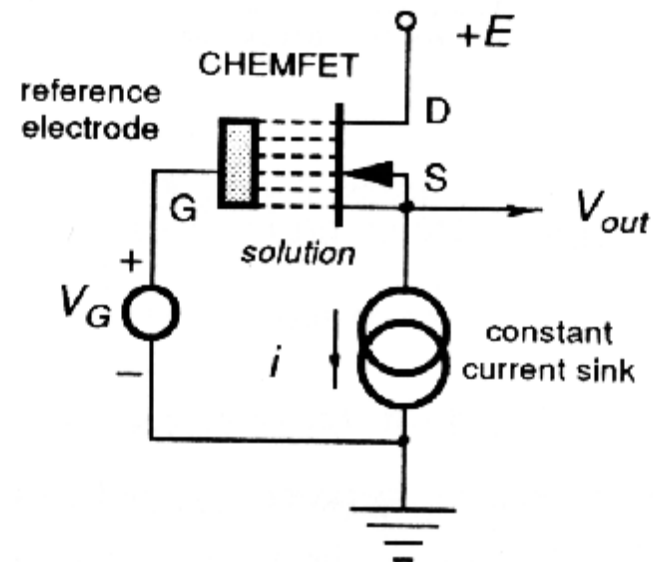
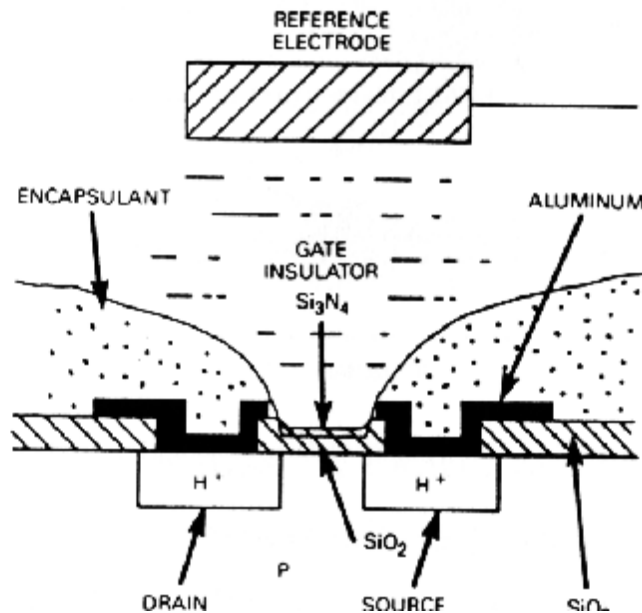
Površinski učinek polja zagotavlja visoko selektivnost in občutljivost.

Elektroda vrat je prekrita s polprepustno membrano, ki selektivno prepušča le določene atome – tu reagirajo – spremeni se št. elektronov na vratih.

Vrste CHEMFET senzorjev

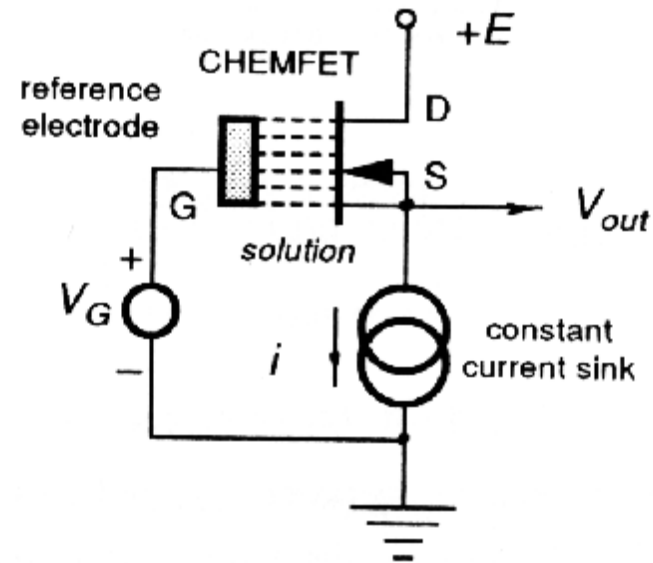
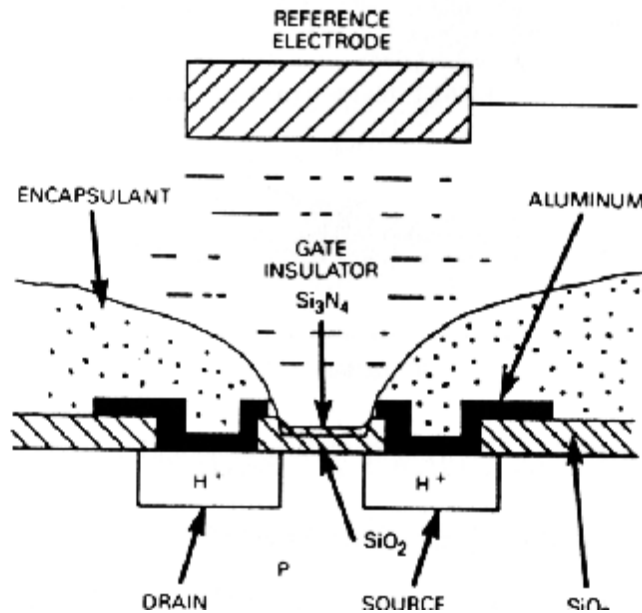
- Ionsko selektivni → Ion Selective (IS FET)
 - Plinsko selektivni → gas selective,
 - Encimsko selektivni → enzyme-selective
 - Imunsko selektivni → immuno-selective sensors
-
- Najbolj razširjeni so IS-FET

IS-FET merilnik Ph



IS-FET z elektrodo vrat iz silicijevega nitrida (Si_3N_4) za meritev pH (koncentracijo H^+ ionov)

IS-FET merilnik Ph

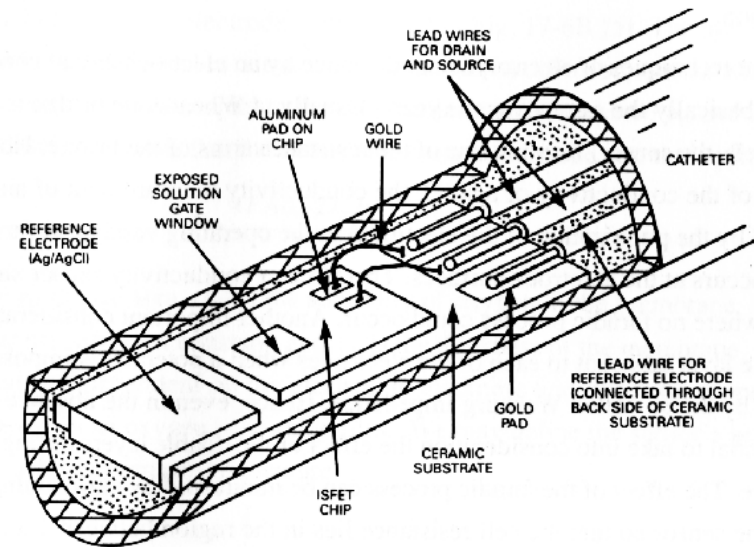


Ko se spreminja koncentracija ionov, se s tem spreminja koncentracija naboja na površini elektrode vrat.

Občutljivost in selektivnost senzorja določa sestava polprepustne membrane

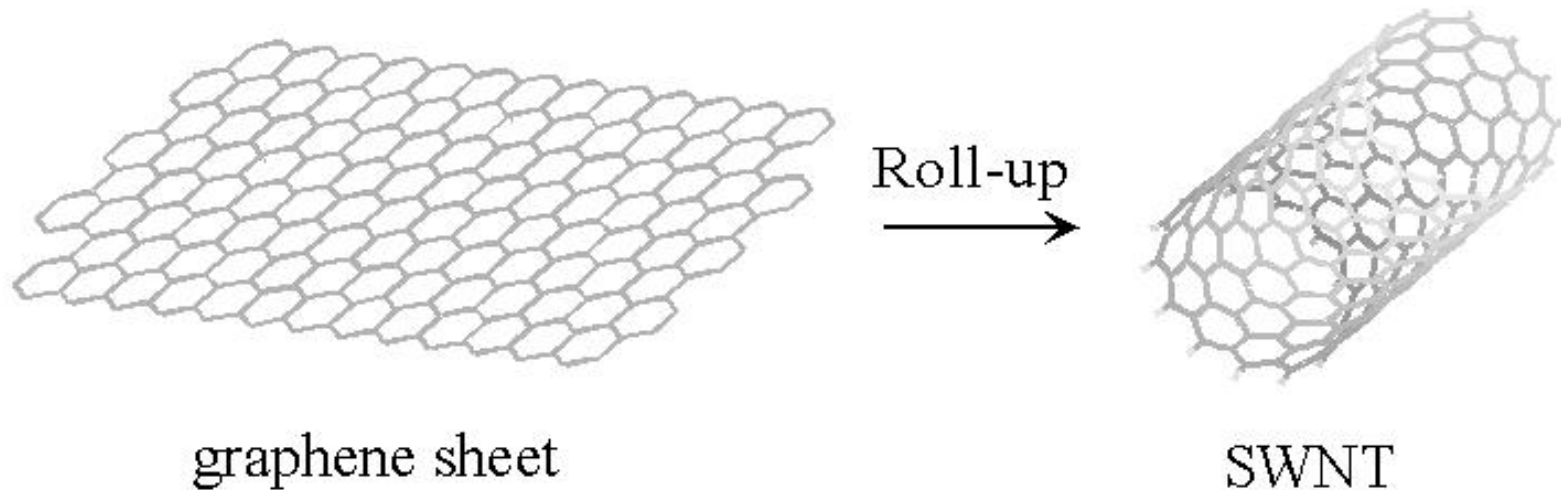
IS-FET merilniki

- Nad elektrodo vrat lahko postavimo polprepustno membrano (ionska selektivnost) s čimer dobimo široko področje uporabe teh senzorjev
- Sprememba gostote naboja spreminja prevodnost kanala CHEMFET strukture, kar merimo kot spremembo toka ponora. Tok ponora je dejansko krmiljen z elektrokemijskim potencialom
- Če elektrodo prekrijemo s primernimi protitelesi nastane biosenzor, občutljiv na protein ali virus

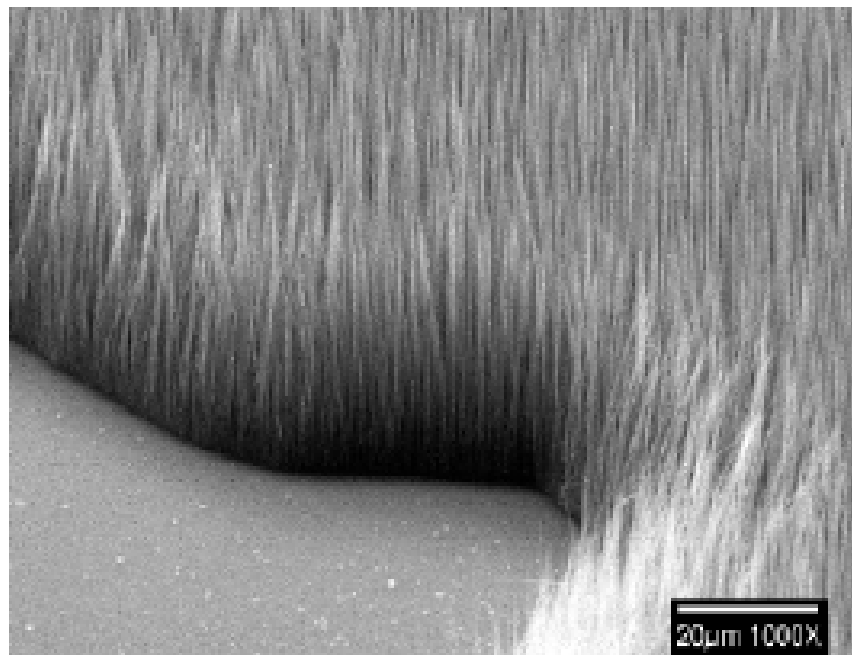


Ogljikove nanocevkke

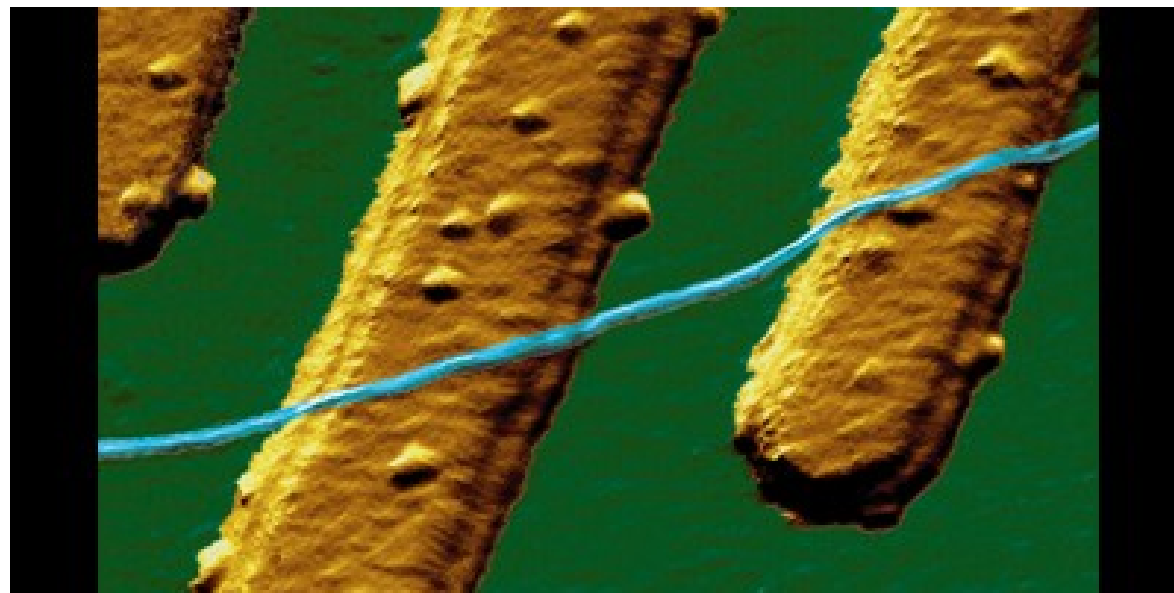
- Plasti ogljikovih atomov lahko "zvijemo" v cevke nanometerskih dimenzij
- Plasti nanocevk imajo ogromno razmerje površine:volumnu



Ogljikove nanocjevke



Gozd nancevk



Nanocjevka (modro)
leži preko elektrod

Senzorji iz ogljikovih nanocev

Mostič iz ene nanocevke preko dveh elektrod, ki povezuje elektrodi iz Au in Ti
Senzor preprihavamo s spodnje strani s plinom N_2

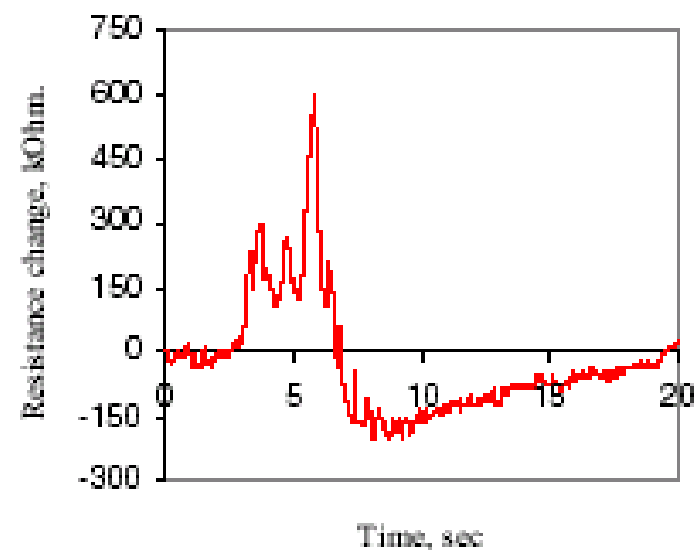
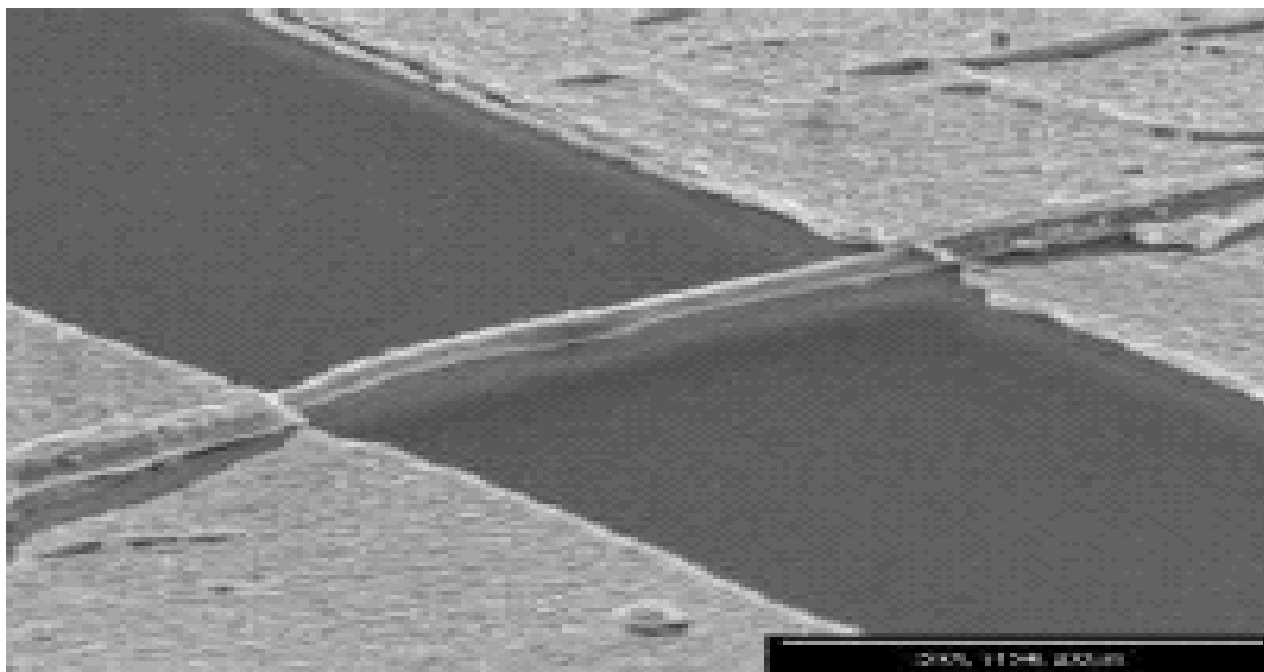
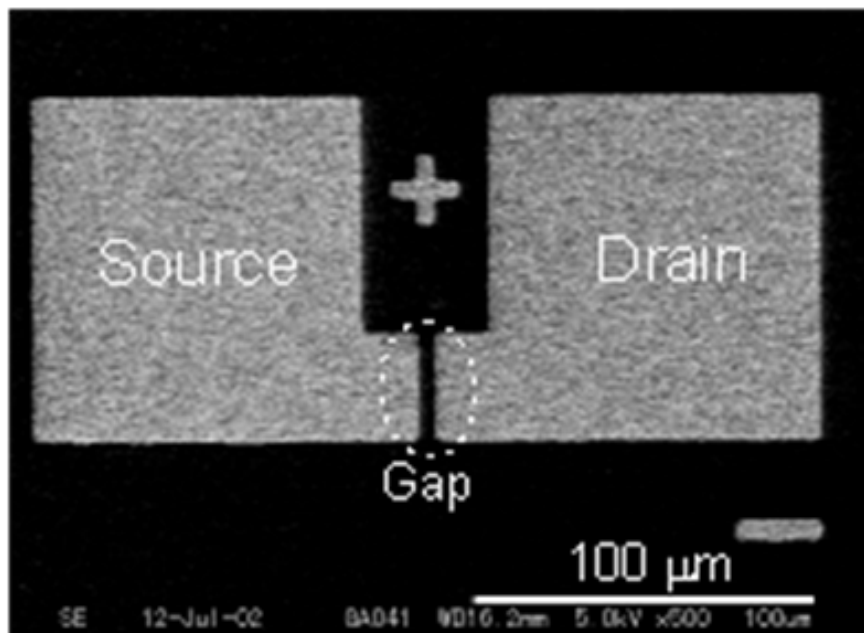
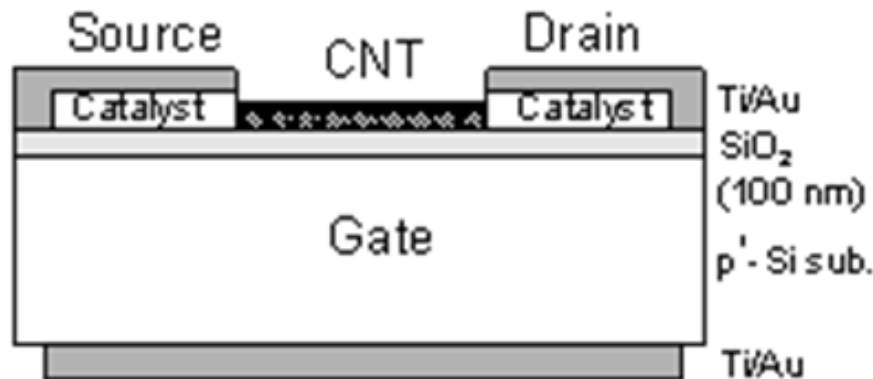


Fig.9 Resistance change(ΔR) due to N_2 flow

Upornost senzorja se poveča ob preprihavanju s plinom N_2 .

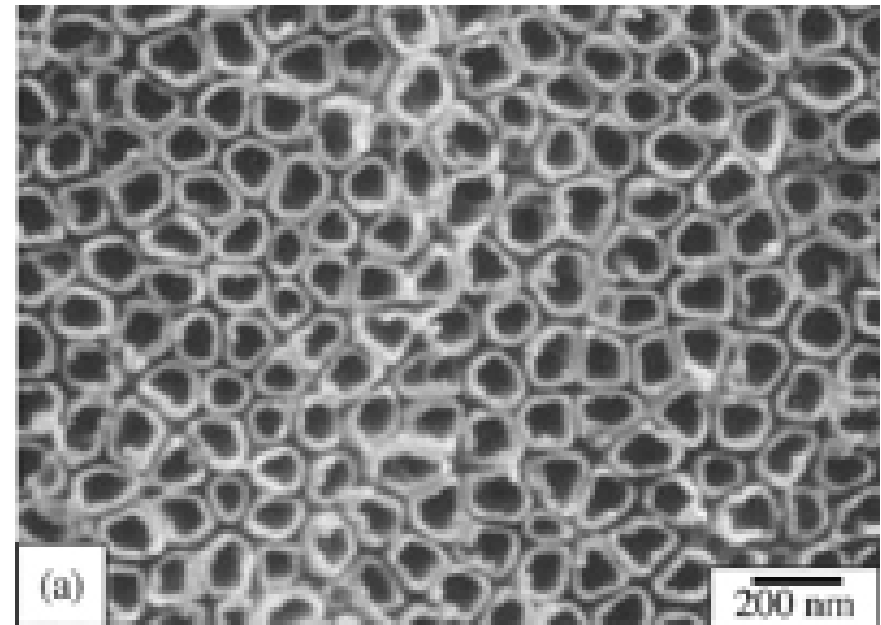
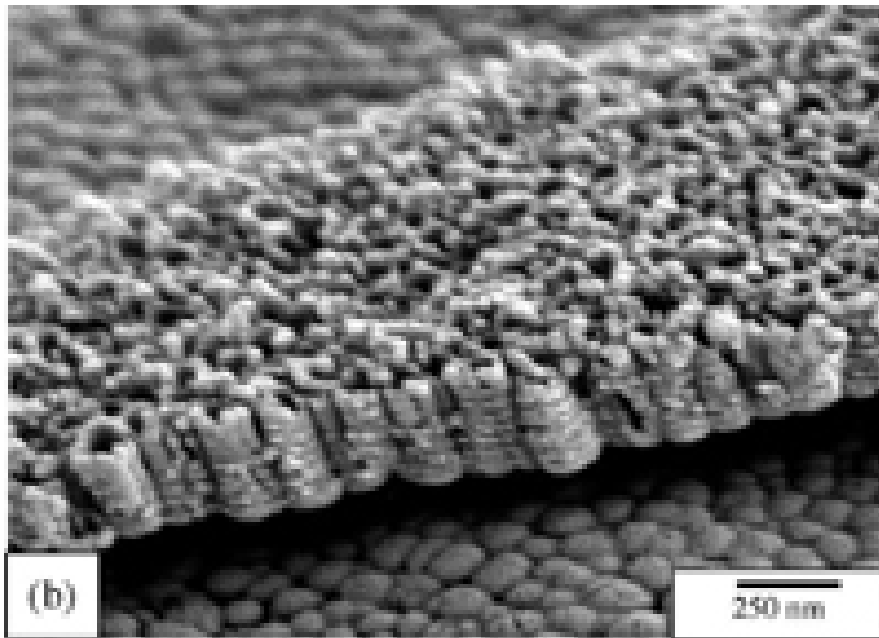
FET z ogljikovimi nanocevkami (CNT-FET)



- Senzor lahko izdelamo s FET in ogljikovimi nanocevkami
- Majhen tok v nanocevkah povzroči veliko večji tok ponora FET.
- Nastala struktura je občutljiva na svetlobo.

Senzorji iz titanovih nanocevk

- Vodik (H_2) ionizira, ko zadene stene titanovih nanocevk.
- Rezultirajoči tok elektronov je merilo za količino vodika.

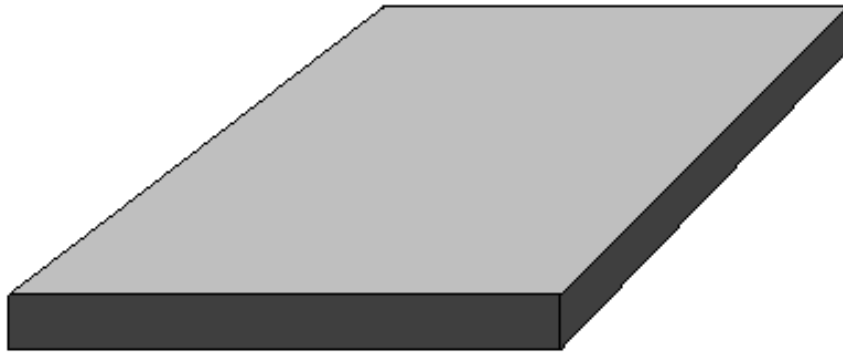


Senzorji koncentracije

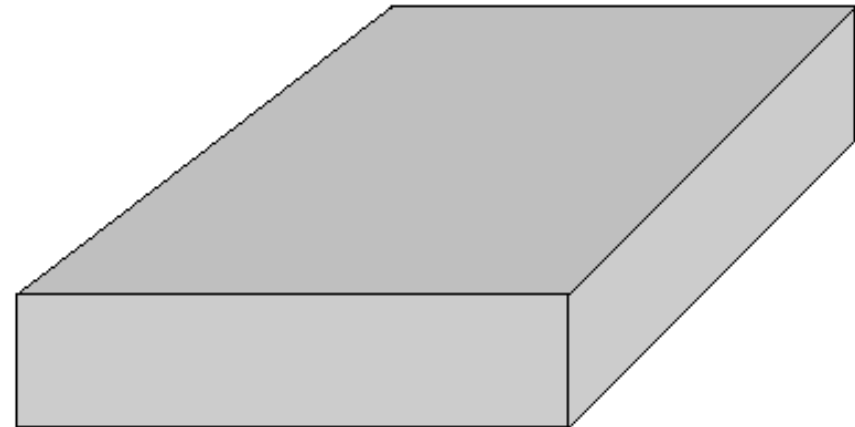
- Koncentracija snovi spreminja upornost ali kapacitivnost senzorske strukture
- V splošnem ni kemijske reakcije v senzorju

Uporovni senzorji koncentracije

Senzor brez prisotnosti ogljikovodikov



Senzor s prisotnostjo ogljikovodikov

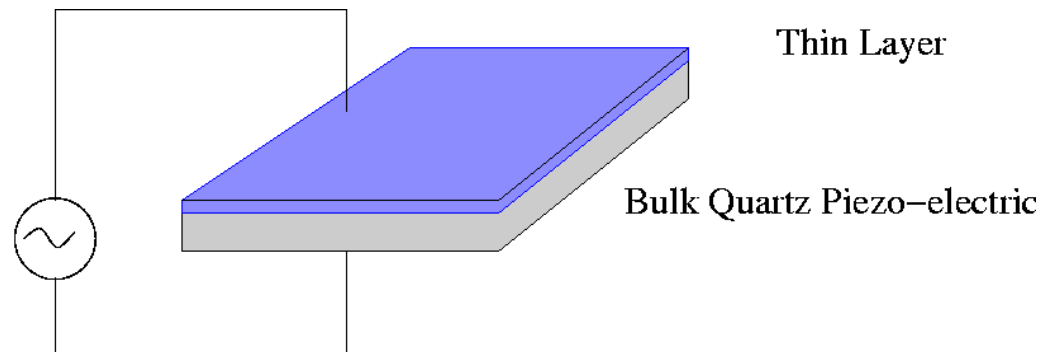


- Detektor tekočih ogljikovodikov (Bell)
- Ni občutljiv na polarna topila (npr. voda)
- Ogljikovodiki se adsorbirajo v polimerni matriki (tanka, velika površina)
- Matrika se napihne → upornost se poveča iz $10 \Omega/\text{cm}$ na $10^9 \Omega/\text{cm}$
- Odzivni čas sensorja je $< 1 \text{ s}$.
- Senzor se povrne v prvotno stanje ko ogljikovodik odstranimo
- Robustna zasnova (delovanje pod zemljo) → uporaba v naftni industriji

Gravimetrični senzor - mikrotehnica

- Meritve majhnih mas ne moremo izvesti s konvencionalnimi tehnikami.
- Merimo spremembe frekvence (akustični gravimetrični senzor) piezoelektričnega kvarčnega oscilatorja.
- Resonančna frekvenca oscilatorja je funkcija mase in oblike kristala.
- Oscilirajoča plošča, katere naravna frekvenca je odvisna od njene mase
- Najpogostejša metoda za meritev debeline tankih plasti.

Gravimetrični senzor - mikrotehnika



Dodajanje materiala masi tanke plasti povzroči premik frekvence, ki jo natančno lahko izmerimo.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = S_m \Delta m$$

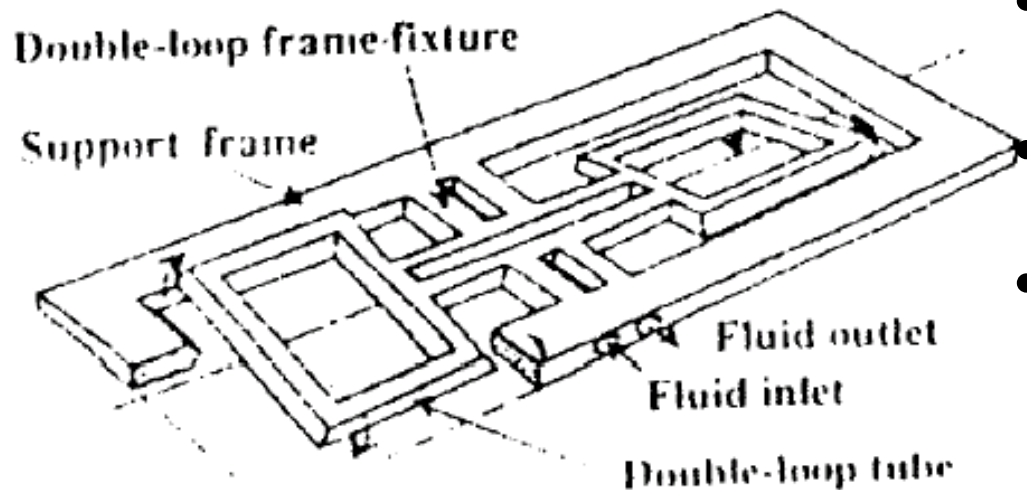
- f_0 = naravna frekvenca neobteženega materiala
- Δf je premik frekvence
- Δm je dodana masa na enoto površine
- S_m občutljivost

Merilniki gostote fluidov

Nekaj osnovnih metod za določanje gostote fluidov:

- Meritev sile na telo
(Inertial Mass; $F = m \cdot a$)
- Meritev gravitacijske sile
(Gravitational Mass; $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r_{12}^2$)
- Plovnost
- Hidrostatski tlak
- Slabljenje γ -žarkov

Merilniki gostote fluidov



- Tekočina teče preko sensorja z votlo cevjo
- Senzor je silicijev in cev je oblikovana v dvojno zanko
- Vtok in iztok cevi sta ob strani zanke. Zanka torzijsko vibrira.
- Masa cevke je majhna, tako da je celotno maso vibrirajoče zanke predstavlja praktično masa tekočine
- Resonančna frekvenca vibracij je proporcionalna celotni masi cevi in tekočine.
- Volumen cevi je konstanten, torej bo frekvenca proporcionalna gostoti tekočine v zanki.

Komponente, sestavi in senzorji

Senzorji plina

Senzorji plina

Uporaba:

- Kontrolirano zgorevanje (avto, industrijske peči)
- Zaznavanje strupenih in vnetljivih plinov (puščanje)
- Elektronski nos za nadzor kvalitete zraka, kvalitete hrane in medicinske diagnoze

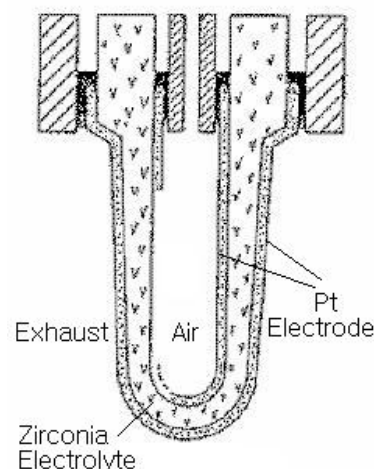
Principi zaznavanja:

- Elektrokemijski (trdni elektrolit ali tokovni)
- Katalitsko zgorevanje (vroča žica)
- Polprevodniški (prevodnostni)

Tristranski katalizator (TWC)

- Avtomobilski katalizator (three-way catalytic converter - TWC) dodatno zmanjšuje vsebnost CO, ogljikovodikov in dušikovih oksidov, tako da jih pretvarja v CO₂, vodo in N₂ z uporabo katalizatorjev (platina, rodij, paladij).
- Za zmanjšanje emisij sodobni avtomobili nadzirajo količino porabljenega goriva.
- Cilj je držanje razmerja zrak-gorivo blizu stohiometrični točki z uporabo lambda senzorja
- **Teoretično bo v stohiometrični točki zgorelo vse gorivo in ob tem porabilo ves zrak.** Za bencinske motorje je to razmerje 14.7:1, dizelske 14.5:1.
- To optimalno razmerje se spreminja glede na obremenitev motorja

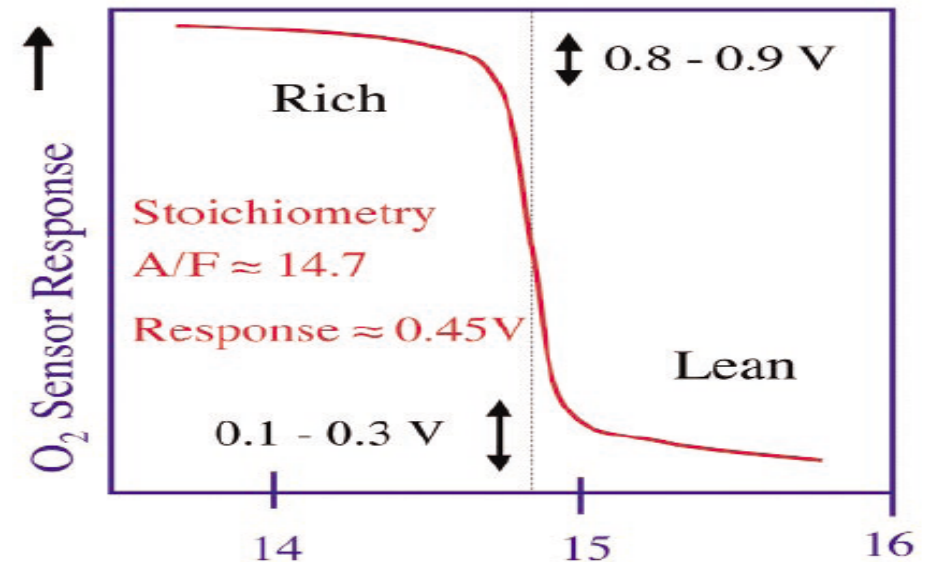
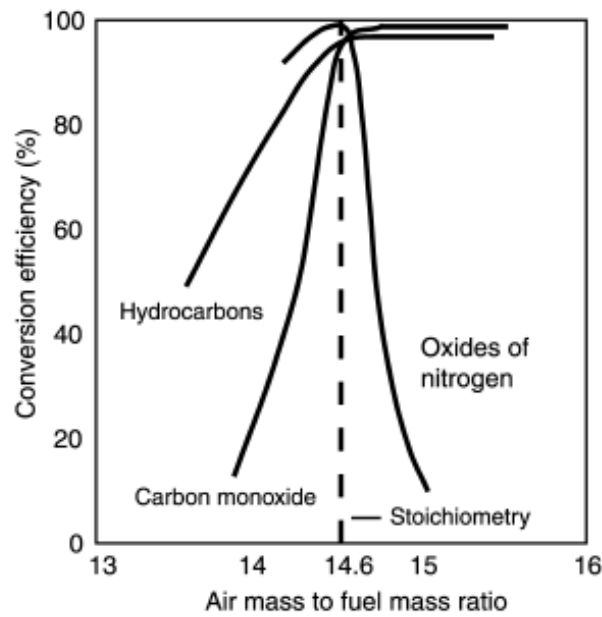
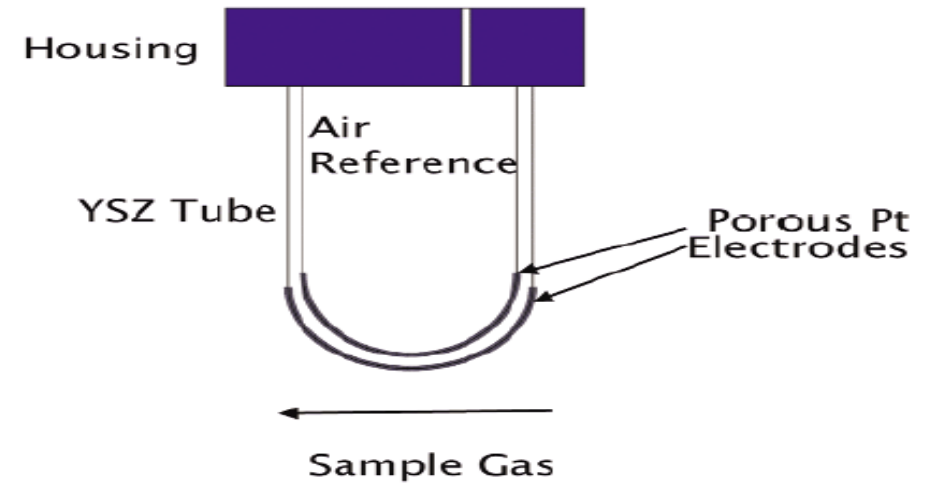
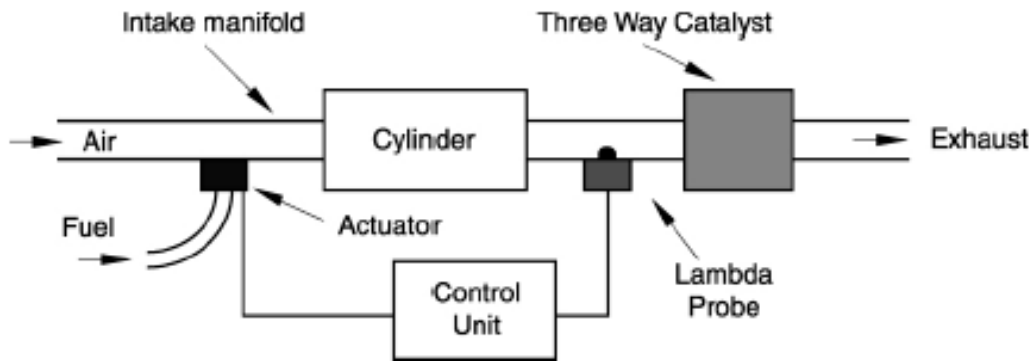
Senzorji plina s trdnim elektrolitom



Bosch (Nemčija) in NTK (Japonska) sta največja proizvajalca λ sond (ZrO₂ senzor kisika)

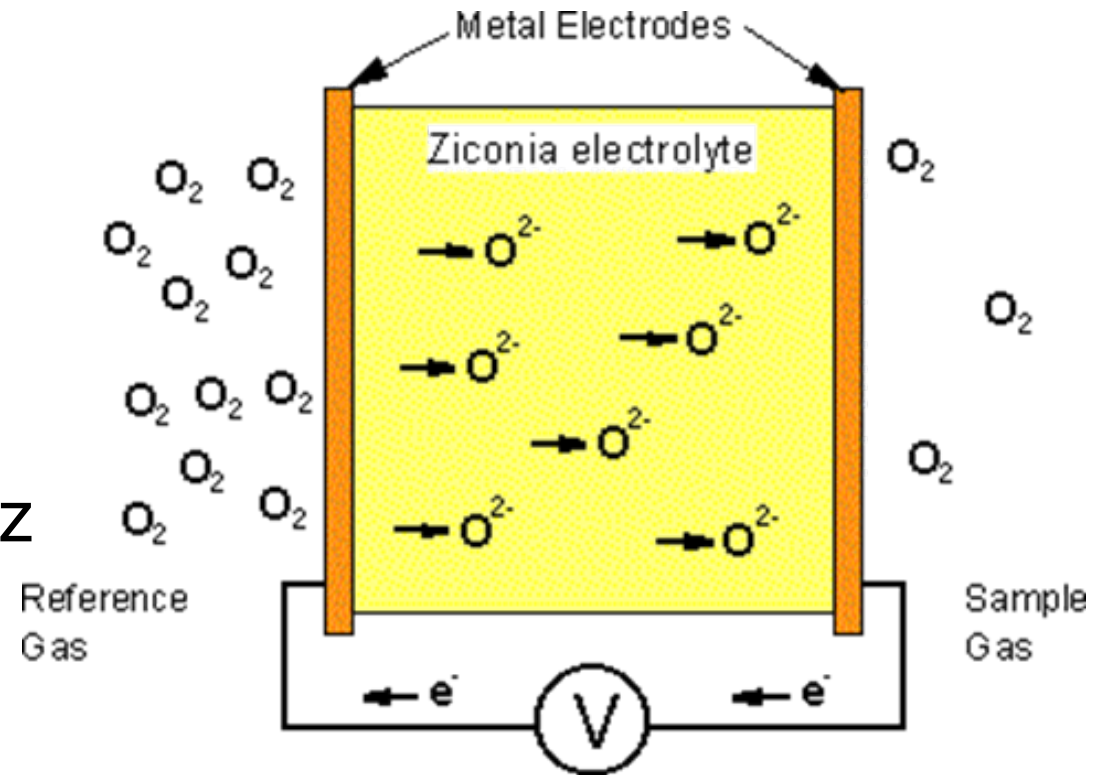
- Učinkovitost zgorevanja motorjev merimo z lambda sondo.
- Potencial med elektrodama sonde je odvisen samo od razmerja delnih tlakov kisika pri dani elektrodi
- Elektrodi sta ločeni s trdnim elektrolitom (ZrO₂).

Nadzor avtomobilskega zgorevanja



Nernstova celica

- Izhodna napetost je proporcionalna razliki koncentracij kisika na referenčni in vzorčni strani celice.
- ZrO_2 običajno dopirajo z itrijevim oksidom in segrejejo nad 450°C .
- S tem dosežejo večjo stabilnost senzorja in mobilnost kisika.



Drugi senzorji s trdnim elektrolitom

- Podobne strukture srečamo za detekcijo vodika in/ali vlage (SrCeO_3).
- V svetu potekajo raziskave za določanje drugih oksidov za detekcijo ogljikovodikov, CO_2 , CO , NO_x and SO_x

Tokovni elektrokemijski senzor

(ang. Amperometric Oxygen Sensors)
Zgradba podobna senzorjem s trdnim elektrolitom: ohišje v katerem je PTFE (teflon) trak, na katerega je nanešen aktivni katalizator (Pt), katoda in anoda. Struktura je zaprta, razen na vrhu je dostop za kisik do delovne elektrode.

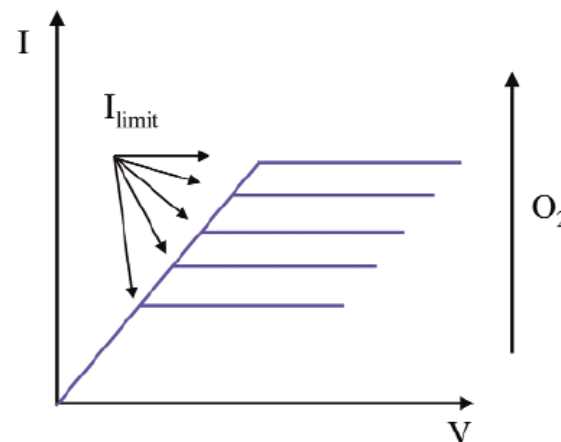
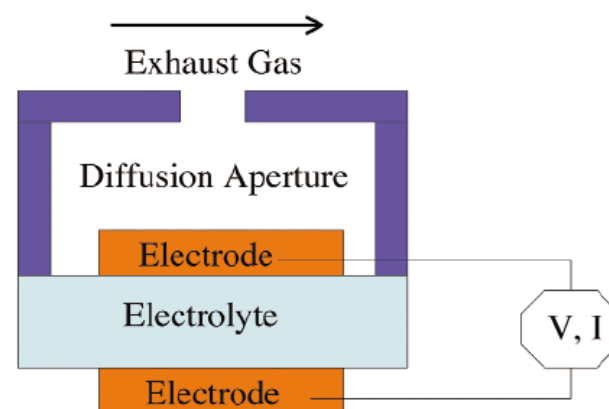


Tokovni elektrokemijski senzor

- Hitrost vdiranja kisika določa velikost luknje na vrhu senzorja

$$I_{\text{limiting}} = \frac{nFD_{\text{gas}}P_{\text{O}_2}^{\text{unknown}} A}{L}$$

- Tokovni odziv senzorja je direktno proporcionalen koncentraciji kisika.



Komponente, sestavi in senzorji

Katalitični zgorevalni senzor

Katalitični zgorevalni senzor - Pellistor

- Beseda "pellistor" je kombinacija besed [pellet](#) in [resistor](#).
- Oksidacija organskih plinov je možna samo od neke minimalne zmesi kisika in plina navzgor, kar se imenuje spodnja eksplozijska meja (LEL – ang. lower explosion limit). To je res, kadar niso prisotni katalizatorji.
- V kolikor je prisoten katalizator, pride do oksidacije organskih plinov pri poljubno majhni koncentraciji plina.
- Katalizatorji so segrete kovine iz družine platine; to so platina, paladij, rutenij, iridij.

Katalitični zgorevalni senzor - Pellistor

- Senzor za merjenje koncentracije plina sestoji iz segrete katalizatorske žice in elementa, ki meri temperaturo v bližini te žice (NTC upor).
- V čistem zraku je temperatura senzorja odvisna zgolj od intenzivnosti gretja katalizatorja in zunanje temperature.
- V kolikor je prisoten plin (metan, propan), ta ob katalizatorju zgoreva in povišana temperatura je sorazmerna koncentraciji plina.
- Različni katalizatorji in različna temperatura senzorja imajo vpliv na občutljivost za različne pline (metan, propan)

Vrste Pellistorjev

- **Katalitični**

Katalitični zgorevalni senzor deluje z zgorevanjem plina. Ob zgorevanju se spremeni upornost detektorja – ta sprememba upornosti je proporcionalna spremembi koncentracije plina.

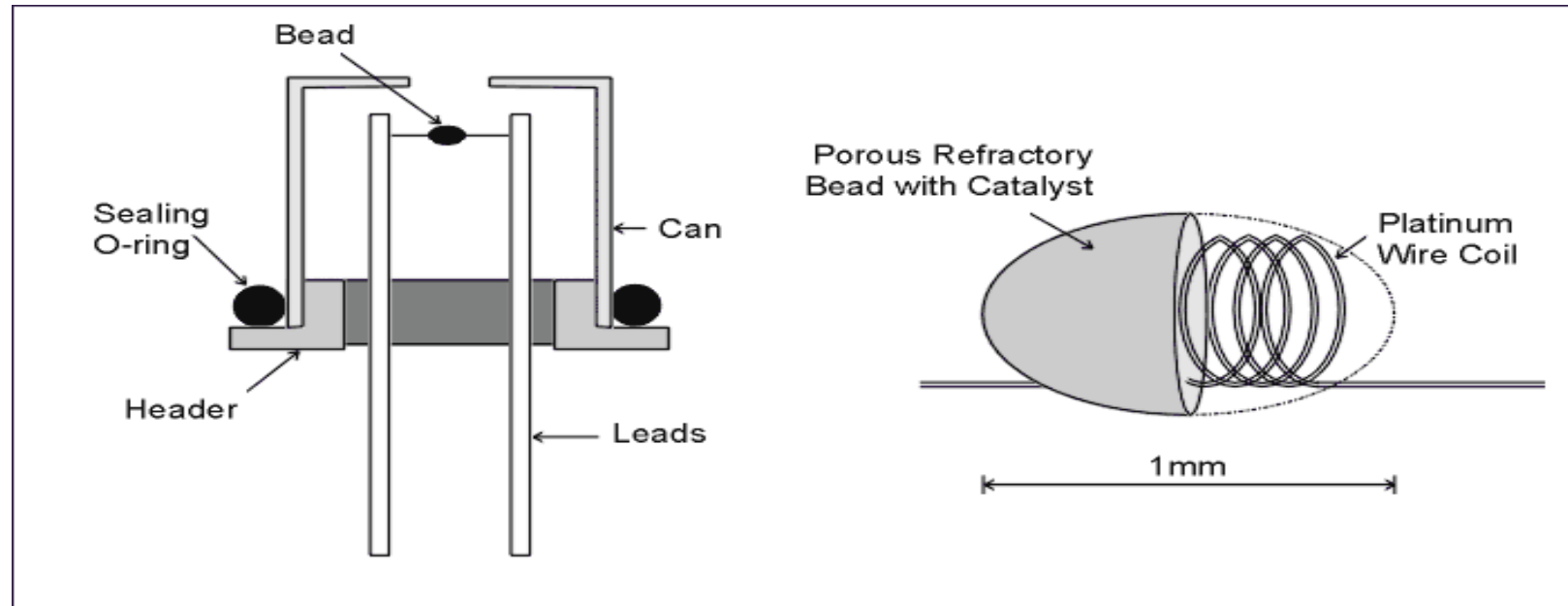
- **Termična prevodnost**

Meri spremembo izgube toplote detektorja ob prisotnosti detektiranega plina. Spremembo zaznavamo z eksternim senzorjem npr. NTC

Katalitični zgorevalni senzor - Pellistor

- Senzor za merjenje metana je občutljiv na vse vrste organskih plinov in par: Izrazito je občutljiv na metan, reagira pa tudi na propan/ butan, bencinske in alkoholne pare in razna organska topila.
- Dobra stran → javljalnik metana preverimo s propanom.
- Slaba stran → lažni alarmi (bencin, barve, laki)
- Povišana temperatura okolja vpliva na senzor enako kot povišana prisotnost plina - oba vpliva spremenita upornost merilnega upora, zato mora biti zraven senzorja vedno kompenzacijski element.
- Področje delovanja teh senzorjev je tipično od -10 do $+50$ °C (kompenzacija do 60 °C. Nad 60 °C katalizator sežge).
- Katalizatorju v senzorju moramo zagotoviti gretje.
- Poraba grelca približno $0,4W$ ($U \approx 2.5V$; $I \approx 170mA$).
- Gretje senzorja mora biti stabilizirano in neodvisno od napajalne napetosti.

Katalitični zgorevalni senzor - Pellistor

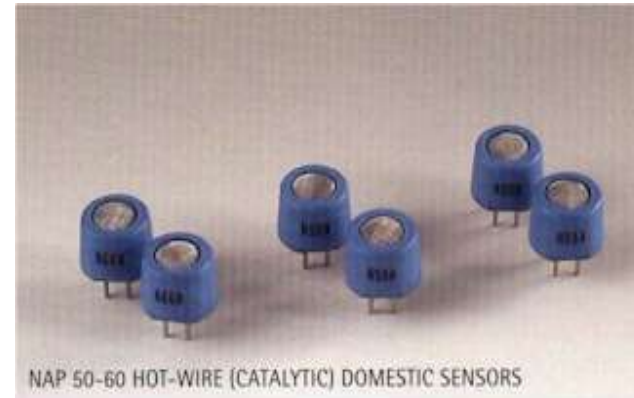


Katalitski zgorevalni senzor (ang. Catalytic combustion sensor) - Pellistor navitje platinaste žice, prekrita s katalitsko plastjo inertnega materiala in kovinskega katalizatorja, ki pospešuje oksidacijo.

Pellistor sistem

Senzorski sistem je sestavljen iz uparjenih elementov: detektorja in kompenzatorja (referenčnega elementa)

- **Detektor** predstavlja navitje iz platinaste žice, obdano s katalitskim materialom
- **Kompenzator** je enake strukture, le da ne vsebuje katalitskega materiala, ampak inerten plin
- Elementa sta običajno povezana v mostič



<http://www.nemoto.eu/nap55a.pdf>

Princip delovanja Pellistor elementa

- Mostič napajamo s konstantno enosmerno napetostjo, ki segreje elemente na 500-550°C.
- Ko gorljivi plin doseže senzor, se sproži kemijska reakcija (oksidacija), kar poveča temperaturo elementa.
- Porast temperature povzroči spremembo upornosti navitja v grelnem elementu.
- Izhodna napetost mostiča je odvisna od tipa zaznavanega plina in je proporcionalna koncentraciji plina.

Karakteristika Pellistor elementa

Teoretično (mostič):
kjer je:

$$dV = (dR \times V) / 4R$$

$$dR = k \times a \times m \times Q / C$$

- dV Izhodna napetost
- R Upornost senzorja v čistem zraku
- V Napajalna napetost mostiča
- dR Sprememba upornosti grelca
- k konstanta
- m Koncentracija plina
- a Temperaturni koeficient grelca
- C Termična kapaciteta senzorja
- Q Molecular heat of combustion of gas

Uporaba Pellistor elementov

- So industrijski standard za detekcijo vnetljivih plinov (LPG)
- Oksidirajo večino vnetljivih plinov zato z njimi izdelujemo "eksplozimetre".
- Njihova občutljivost je definirana relativno glede na občutljivost na metan, zato je pomembno katere snovi so prisotne v okolju.

Slabosti Pellistor elementov

- Občutljivost na dejavnike okolja
 - Sladkorni prah v zraku se useda na katalizator in ga prevleče s plastjo katrana.
 - WD40 ga začasno blokira.
- Uničenje katalizatorja
Platina ne oksidira, zato grelec iz platinaste žice prenese nekajkratno preobremenitev z grelnim tokom, katalizator pa ne, kar je glavni razlog za odpovedi teh senzorjev.

Komponente, sestavi in senzorji

MMOS senzorji

MMOS senzorji - Polprevodniški senzorji plina

- Večina jih temelji na polprevodniških oksidih.
- Leta 1953 so odkrili, da adsorpcija plina na površino MOS strukture povzroči veliko spremembo električne upornosti, kar je omogočilo razvoj **MMOS tehnologije** (Mixed Metal Oxide Semiconductor).
- Ta efekt je komercialno uporaben le za nekaj oksidov, saj le ti združujejo zahteve upornosti, velikosti spremembe upornosti v plinu (občutljivosti) in vlage
- Nekateri oksidi, ki se uporabljajo v MMOS senzorjih so: ZnO_2 , TiO_2 , Cr_2TiO_3 , WO_3 in SnO_2 .

MMOS senzorji

- Spremembo upornosti povzroči izguba ali dodatek elektronov na površini kot posledico adsorbiranega kisika, ki reagira z detektiranim plinom.
- Če gre za n-tip oksida lahko dobimo dodajanje (kemijska redukcija) ali odvzemanje (oksidacija) elektronov iz prevodnega pasu.
- n-tipu oksida se poveča upornost ko poteka kemijska oksidacija (NO_2 , O_3), medtem ko pri kemijski redukciji upornost zmanjša (npr. CO , CH_4 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- Obratno drži za p-tip oksida (npr. Cr_2TiO_3)

Uporaba

- TiO_2 MMOS senzor se uporablja kot senzor kisika v nekaterih avtomobilih (Ford, Nissan).
- SnO_2 MMOS senzorji se uporabljajo za ostale pline
- Vodilni proizvajalci:
 - Figaro Engineering (US)
 - NEMOTO (Japonska)

MMOS senzorji

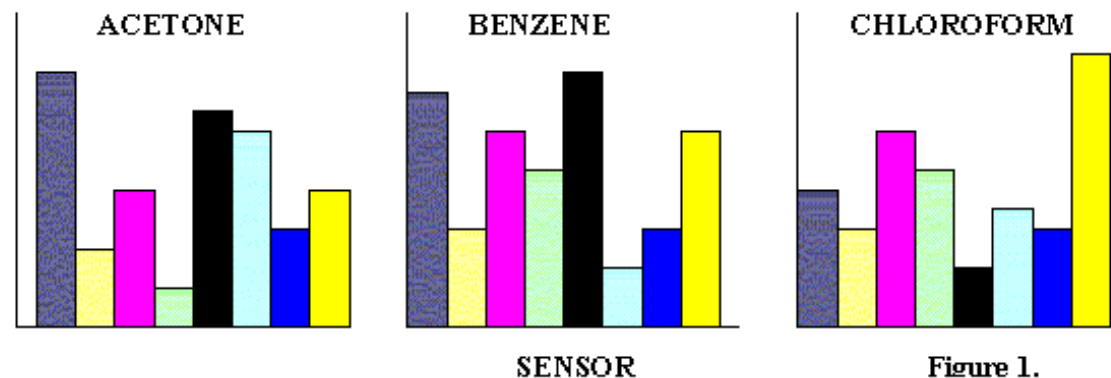
- Spremembo upornosti v oksidu zaradi prisotnosti plina povzroči reakcija na površini oksida.
- Komercialni senzorji zato uporabljajo visoko porozne oksidne plasti, ki jih natisnejo ali deponirajo na Al_2O_3 tabletki. S tem dobijo največjo površino → povečana občutljivost.
- Na zadnji strani čipa je običajno trakast grelec.
- Grelec lahko hitro posuši oksid:
 - omogoča delovanje v povišani vlagi.
 - izboljša odzivni čas senzorja

Selektivnost MMOS senzorjev

- MMOS senzorji praviloma ne ločijo med različnimi plini, zato moramo pri načrtovanju paziti, da je debelina oksida in delovna temperatura oksida prilagojena plinu, ki ga zaznavamo.
- Selektivnost teh senzorjev izboljšujemo z dodajanjem katalizatorjev oksidu, zaščitnimi prevlekami in filtri z aktivnim ogljem.

Polja kemijskih senzorjev – elektronski nos

- Starejši sistemi delujejo na principu več neselektivnih senzorjev, ki omogočajo razločevanje vonjev.
- E-nos je sestavljen iz polja več kemijskih senzorjev (običajno plina) in algoritma za razpoznavanje vzorcev (kemometrija).
- Polje senzorjev zajame pare iz vzorca in določi niz meritev. Razpoznavalnik vzorcev primerja zajete meritve s shranjenimi referenčnimi materiali. Prednost pri tem je slaba selektivnost senzorjev plina (reagirajo na več plinov), vendar ne enako – tako dobimo drugačen vzorec odziva različnih senzorjev na drugo snov.



Umetni nos - projekti

- NASA
 - http://science.nasa.gov/headlines/y2004/images/enose/how_enoseworks.ppt
- IIT project
 - <http://www.iit.edu/~jrsteach/enose.html>
- SWIG
 - http://www.swig.org.uk/fdetail_21.htm
- Warwick
 - http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/eed/research/srl/contents/current_research/electronic_nose/
- FE-UL
 - http://www.conamaste.si/slo/aktualno/2011-01-27_PK_RRP3.pdf