

Ustna vprašanja in odgovori - Elektronske komponente in senzorji

Vprašanja:

[Ustna vprašanja](#)

Literatura:

[EK-Prosojnice.pdf](#)

Upori

1. Definicija zanesljivosti (ang. reliability)? Kaj je POGOSTOST ODPOVEDI (Failure Rate, FR)?

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

FR je razmerje med :

- število vseh odpovedi in
- številom prisotnih elementov N
- časom delovanja t .

$$FR = \frac{\text{št. odpovedi}}{Nt}$$

2. Razložite pojme FIT, MTTR, MTTF in MTBF? (Podajte primer za MTBF)

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 10⁹ ur delovanja elementa.
- FIT običajno opisujejo v enotah: – 1000 naprav / 10⁶ ur – ali 10⁶ naprav v 1000 urah.
- FIT se običajno podaja z intervalom zaupanja CL (Confidence Limits).

$$1FIT = 10^{-9} \frac{\text{odpovedi}}{\text{elementh}}$$

The Failures In Time (FIT) rate of a device is the number of failures that can be expected in one billion (10⁹) device-hours of operation.[14] (E.g. 1000 devices for 1 million hours, or 1 million devices for 1000 hours each, or some other combination.) This term is used particularly by the semiconductor industry.

MTBF - Primer

- Enota je delovala 316 ur. Med tem je odpovedala 4x. Določite MTBF enote.
- $MTBF = 79 = 316(h)/(4 \text{ odpovedi})$

Povprečni čas do odpovedi MTTF (Mean Time To Failure)

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

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

$f(t)$ je funkcija verjetnostne gostote, ki nam podaja verjetnost za odpoved (Failure) na časovno enoto

3. Kaj sta Funkcija odpovedi (Failure function F(t)) in Funkcija zanesljivosti (Reliability function, R(t)). Kakšna je relacija med njima.

Funkcija odpovedi (Failure function F(t))

- Failure oz. Unreliability function

- $F(t)$ je verjetnost, da bo element, ki pravilno deluje v času $t = 0$, odpovedal do časa t .

Lastnosti $F(t)$:

- $t < 0 \implies F(t) = 0$ (element deluje do $t = 0$)
- $0 < t < t' \implies 0 < F(t) < F(t')$ (večji časi - večja verjetnost za odpoved)
- $t \rightarrow \infty \implies F(t) \rightarrow 1$ (vsak enkrat crkne)

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 $F(t)$:

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

4. Razložite pojem pogostost odpovedi: $FR(t)$ in narišite krivuljo poteka "življenja elementa" (Reliability bathtub curve) ter opišite tri karakteristična področja krivulje.

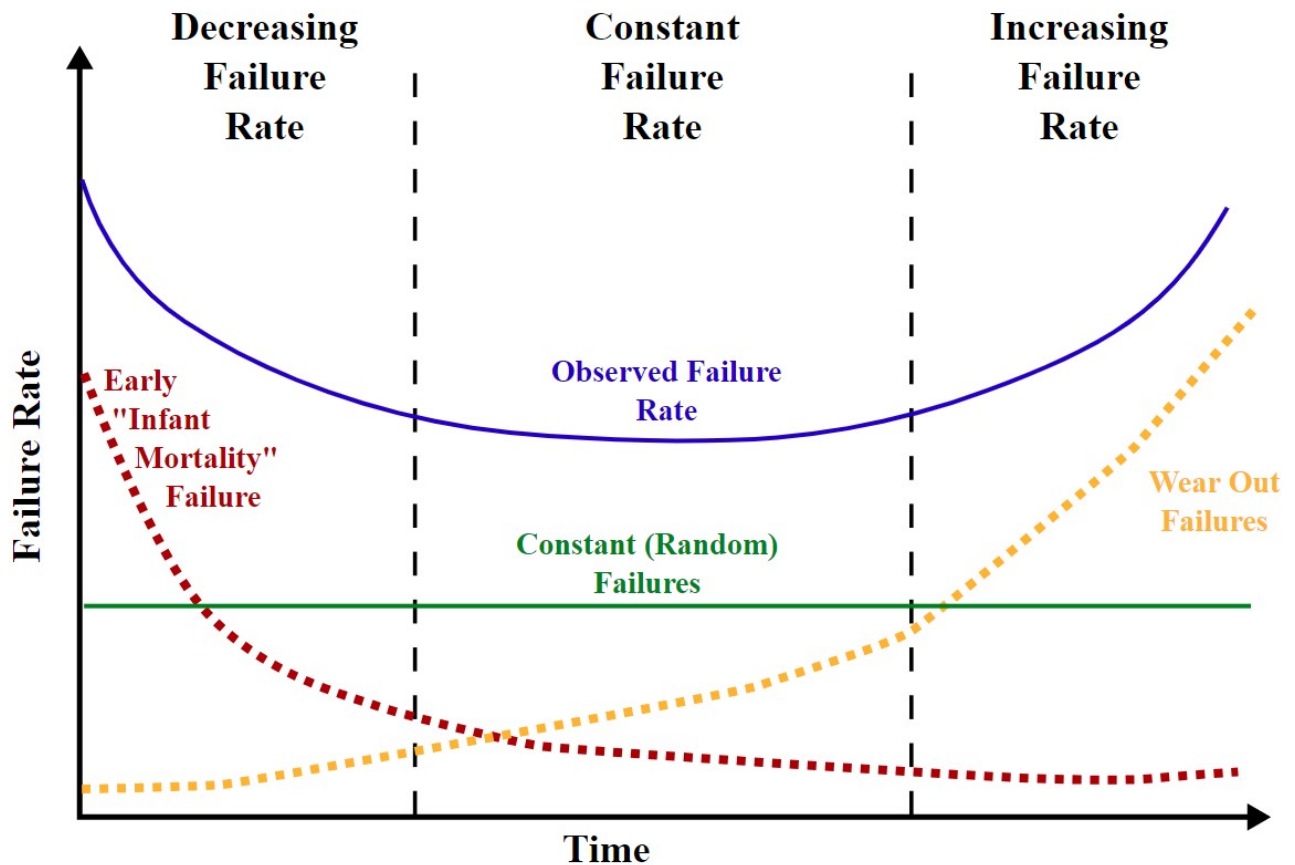
Pogostost odpovedi: $FR(t)$ (Failure Rate)

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

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

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).



5. Kaj podaja funkcija zanesljivosti $R(t)$?

Kateri del krivulje poteka "življenja elementa" opisuje eksponentna porazdelitev zanesljivosti?

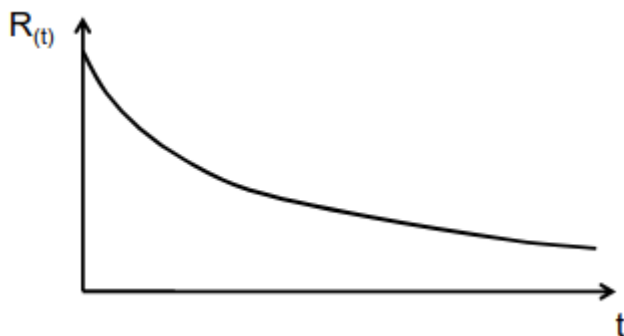
Katere dele krivulje poteka "življenja elementa" opisuje Weibullova porazdelitev zanesljivosti?

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 $F(t)$:

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

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



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).

$$FR(t) = const = FR_0$$

Weibullova porazdelitev zanesljivosti

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

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

$\beta < 1 \implies FR$ upada s časom; (zgodnje odpovedi, področje 1 banje)

$\beta > 1 \implies FR$ raste s časom; (obdobje iztrošenosti, področje 3 banje)

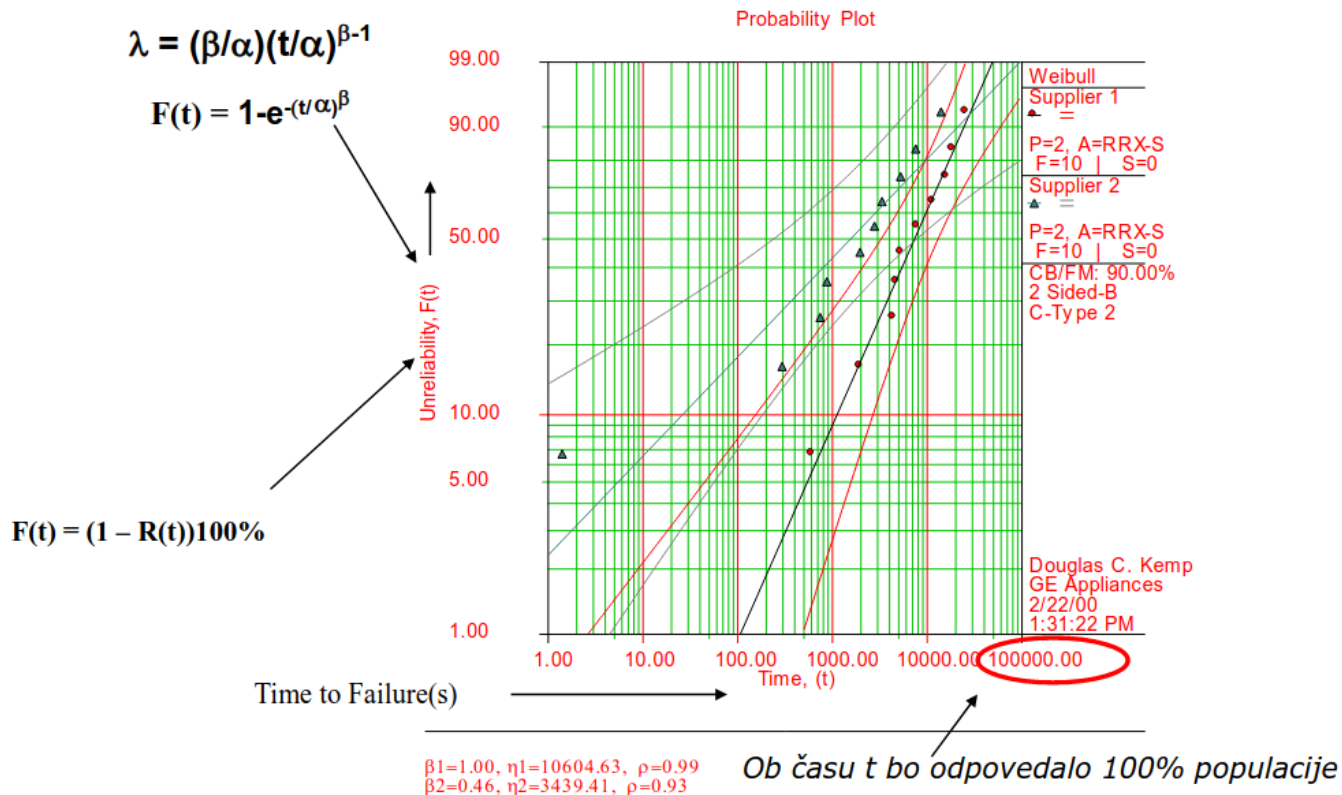
$\beta = 1 \implies FR$ se s časoma ne spreminja (normalne uporabe, področje 2 banje) enako eksponentni porazdelitvi

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

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

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

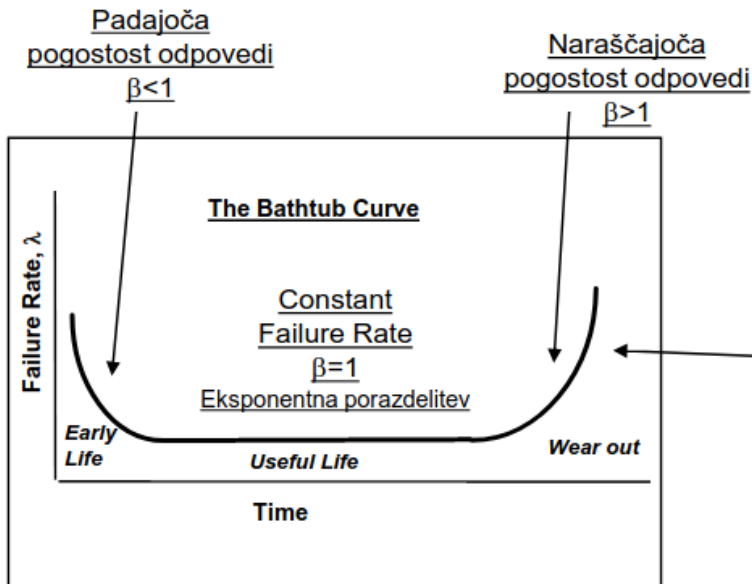
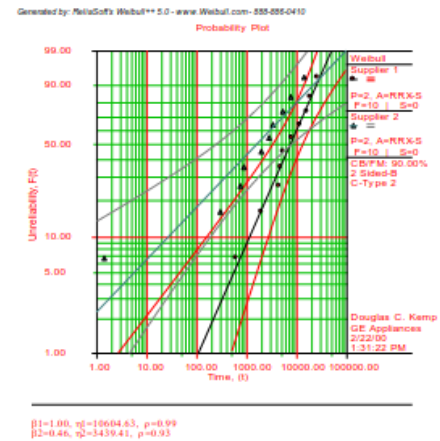
Potek funkcije odpovedi $F(t)$ - Weibull



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

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

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



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

6. Kako različni faktorji obremenitve vplivajo na pogostost odpovedi?

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

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

λ_B = osnovna pogostost odpovedi komponente

7. Katere standarde s področja zanesljivosti poznate?

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
- 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

8. Opišite proces staranja elementov s pomočjo opisa degradacijskih procesov.

Podajte primer procesa staranja – degradacija CF upora - difuzijski proces.

Staranje

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

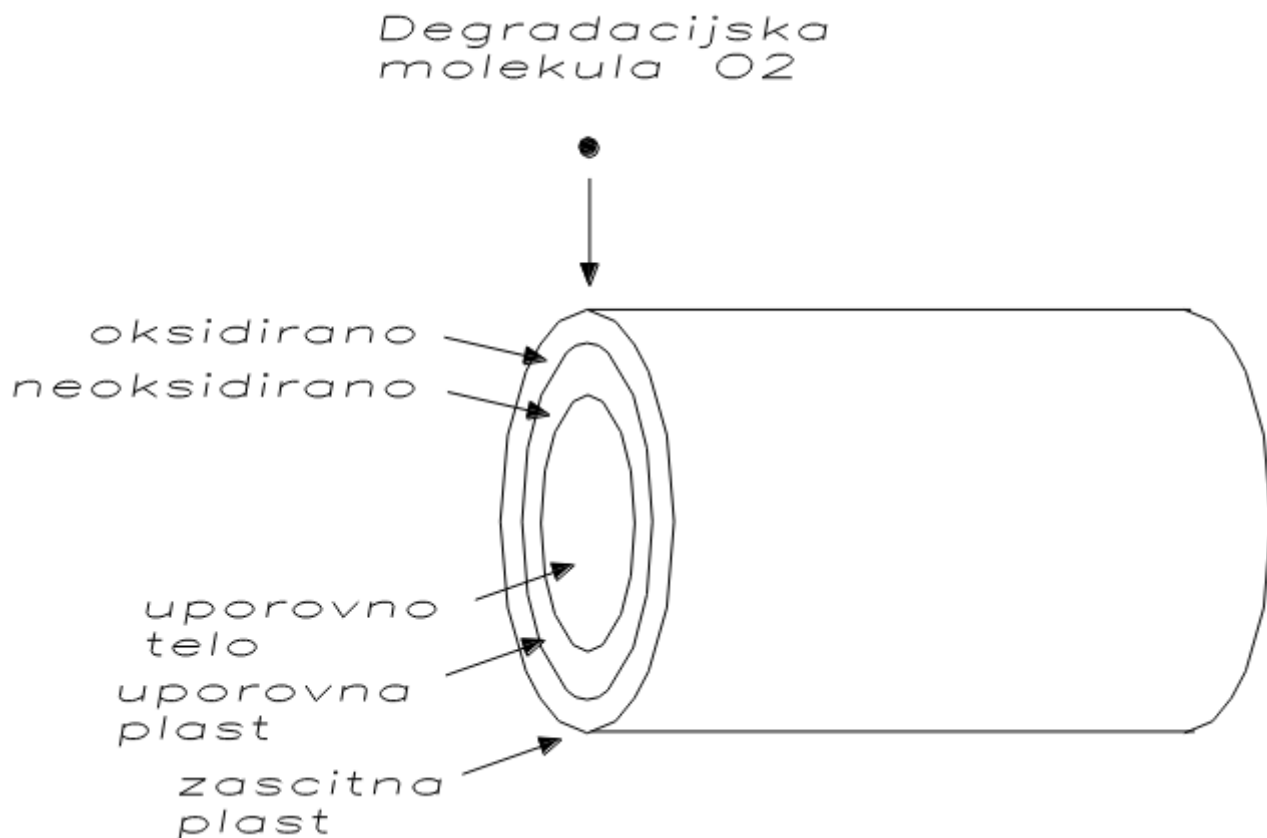
Opis degradacijskih procesov

- 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 (korozijske 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 uporju tekom let počasi difundirajo v globino strukture.
- Molekula O_2 prodre do uporovne plasti,
- Plast oksidira \implies uporovni material se spremeni v izolator.

- Znan tak primer je degradacija CF upora, kjer pri oksidaciji uporovne plasti nastaja CO_2 :



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

$$L = \sqrt{Dt}$$

$t \implies$ čas degradacijskega procesa (leta)

$D \implies$ 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

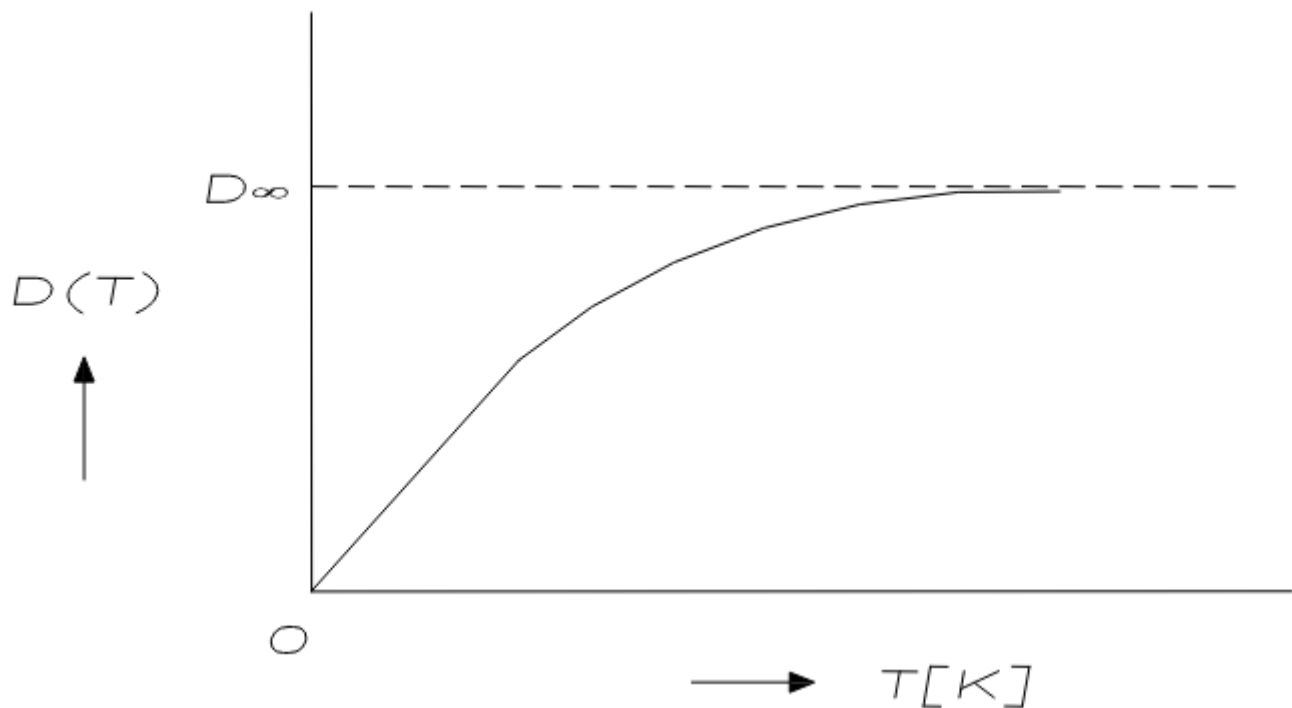
$$D = D_{\infty} e^{-\frac{E_{aD}}{kT}}$$

$D_{\infty} \implies$ limitna vrednost D za visoke temperature

$E_{aD} \implies$ aktivacijska energija difuzijskega procesa $E_{aD} \approx 1..2 eV$

$k \implies$ Boltzmannova konstanta $k = 8.6 * 10^{-5} eV/K$

$T \implies$ absolutna temperatura v K



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

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

Degradacija CF upora

$$L = \sqrt{Dt} = \sqrt{D_{\infty} e^{-\frac{E_a D}{kT}} t}$$

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

9. Pospešeno staranje in testiranje: Kje se uporablja?

Kako poteka pospešeno staranje s povišano temperaturo na primeru CF upora?

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

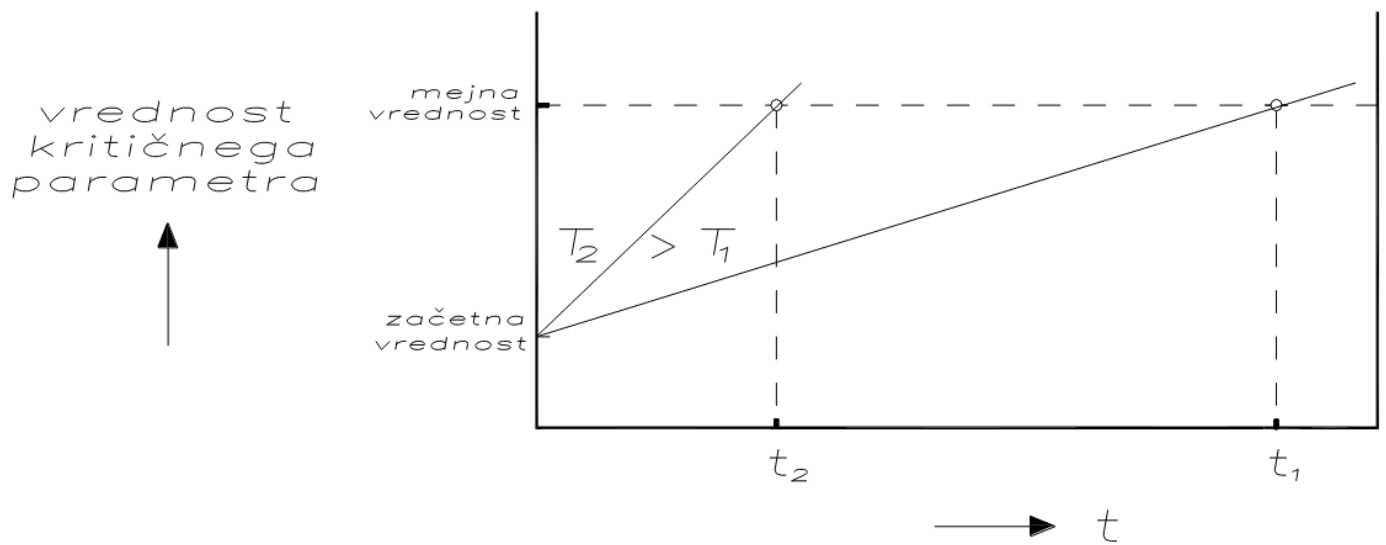
Pospešeno staranje s povišano temperaturo

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

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

Pospešeno staranje CF upora

- Meritev $R(t)$ pri različnih temperaturah:.
- Dobimo rezultat meritve pri temperaturah ($T_2 > T_1$)
- Zaradi degradacije $R(t)$ raste \implies 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 ($t_{odp2} < t_{odp1}$) oz. pospešeno staranje elementa
- Večja, ko je hitrost reakcije RR pri temperaturi T krajši je čas do odpovedi pri tej temperaturi $t_{odp}(T)$



$$RR(T) = RR_{\infty} e^{-\frac{E_a D}{kT}}$$

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

10. Pospešitveni faktor:

Kaj je pospešitveni faktor AF_x , kateri parametri staranja x obstajajo?

Podajte primer pospešenega staranja s temperaturo AF_T ?

Kako opišemo staranje pri kombiniranem spreminjanju več parametrov?

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 $T_2 = 125^\circ\text{C}$!

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

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

11. Na primeru prikažite postopek določanja FIT/MTTF in aktivacijske energije E_a ?

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

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

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

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

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

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

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

12. Kako razdelimo upore?

Razdelitev uporov in njihove značilnosti

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

13. Osnovne značilnosti uporov (R_n , lestvice, TK_R , R_C , UM, $\Delta R/R$)

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

Kakšno izmerjeno upornost R upora lahko pričakujemo?

Kaj je nazivna (ang. nominal) upornost R_n ?

Kaj je dobra tehnologija izdelave uporov glede na izplen?

Osnovne značilnosti uporov

- 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 (lestvice)
 - Toleranca (ΔR) je največje relativno odstopanje izmerjene upornosti R od nazivne upornosti R_n
- Temperaturni koeficient upornosti (TK_R)
- Kritična upornost R_c
- Mejna napetost U_L
- Degradacija po času delovanja ($\Delta R/R$)

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

Kakšno izmerjeno upornost R upora lahko pričakujemo?

Rešitev:

$$\text{Toleranca } \frac{\Delta R}{R_n} = \frac{(R - R_n)}{R_n} = 10\% = 0.10$$

Največje odstopanje izmerjene upornosti je: $\Delta R = \pm 0.10 * R_n = \pm 1k\Omega$

$$R = [9...11k\Omega]$$

Kaj je dobra tehnologija izdelave?

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

14. Kaj je Renardova lestvica in kaj so tolerančni razredi?

Kakšna je porazdelitev uporov znotraj tolerančnega razreda pri dobri tehnologiji izdelave?

Zakaj nimamo vrednosti dekade uporov porazdeljene linearno ... $1 k\Omega$, $2 k\Omega$, $3 k\Omega$...?

Podajte formulo za izračun člena zaporedja v dekadi Renardove lestvice.

Izračunajte vrednosti dekade E12 lestvice.

Katere so preostale Renardove lestvice in kolikšne so njihove tolerance?

Kje vse se še uporabljajo Renardove lestvice?

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:

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

$n \Rightarrow$ indeks geometričnega zaporedja (1, 2, 3...)

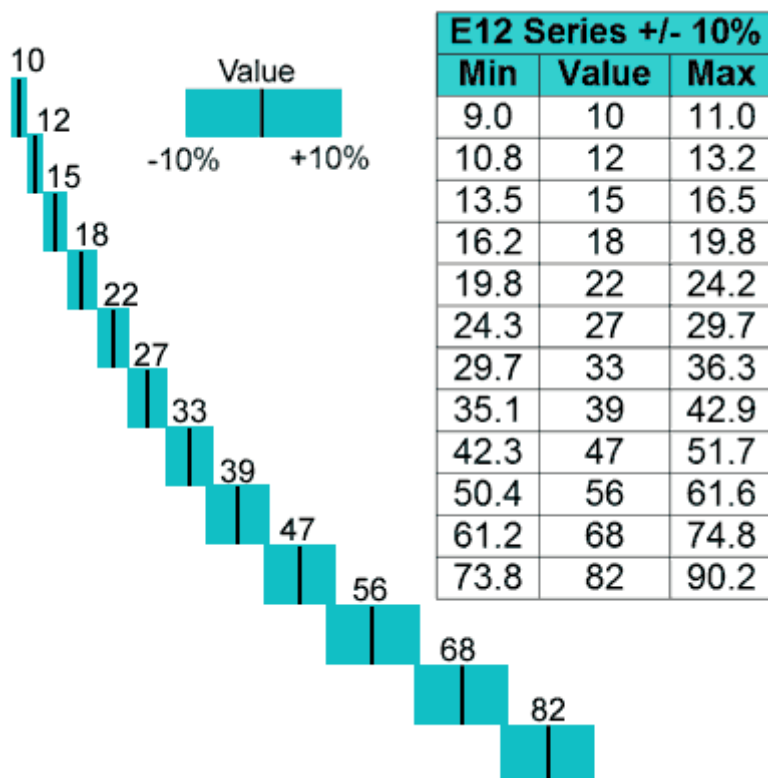
$a \Rightarrow$ prvi člen zaporedja ($n = 1$)

$r \Rightarrow$ razmerje geometričnega zaporedja ($r = \frac{N_{n+1}}{N_n}$)

- Če bi proizvajalec določil vrednosti linearno: ... , 1k Ω , 2k Ω , 3k Ω ... 99k Ω , 100k Ω , 101k Ω , ...
 - 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

Renardova lestvica E12

- Maksimalna odstopanja oz. tolerančni razredi so konstantni ($\pm 10\%$) po vsej lestvici!
 $E12 \Rightarrow$ Renardova lestvica s toleranco 10%



Ostale Renardove lestivce

| Renardova lestvica | čenov / dekad | toleranca |
|--------------------|---------------|-----------|
| E12 | 12 | 10% |
| E24 | 24 | 5% |
| E48 | 48 | 2% |
| E96 | 96 | 1% |
| E192 | 192 | 0.5% |

Renardove lestvice se uporabljajo pri izboru nazivnih vrednosti: R , C , U_{ZENER}

Renardove lestvice se uporabljajo tudi pri drugih izdelkih, dolžina žebnja, velikost vinskih sodov...

Oznaka uporov z barvno kodo IEC – iz podane tabele barv razberite vrednost upora?

Katero vrednost ima upor z enim samim črnim kolobarjem?

Zakaj ga uporabljamo?

Kako označujemo močnejše upore s številčno kodo IEC?

Kaj je R oz. E v številčni oznaki upora?

Kaj pomenijo pripone K, M – zapišite vrednost 1.7 k upora 5 W kot bi jo razbrali na ohišju upora).

15. Oznaka uporov z barvno kodo IEC – iz podane tabele barv razberite vrednost upora?

Katero vrednost ima upor z enim samim črnim kolobarjem?

Zakaj ga uporabljamo?

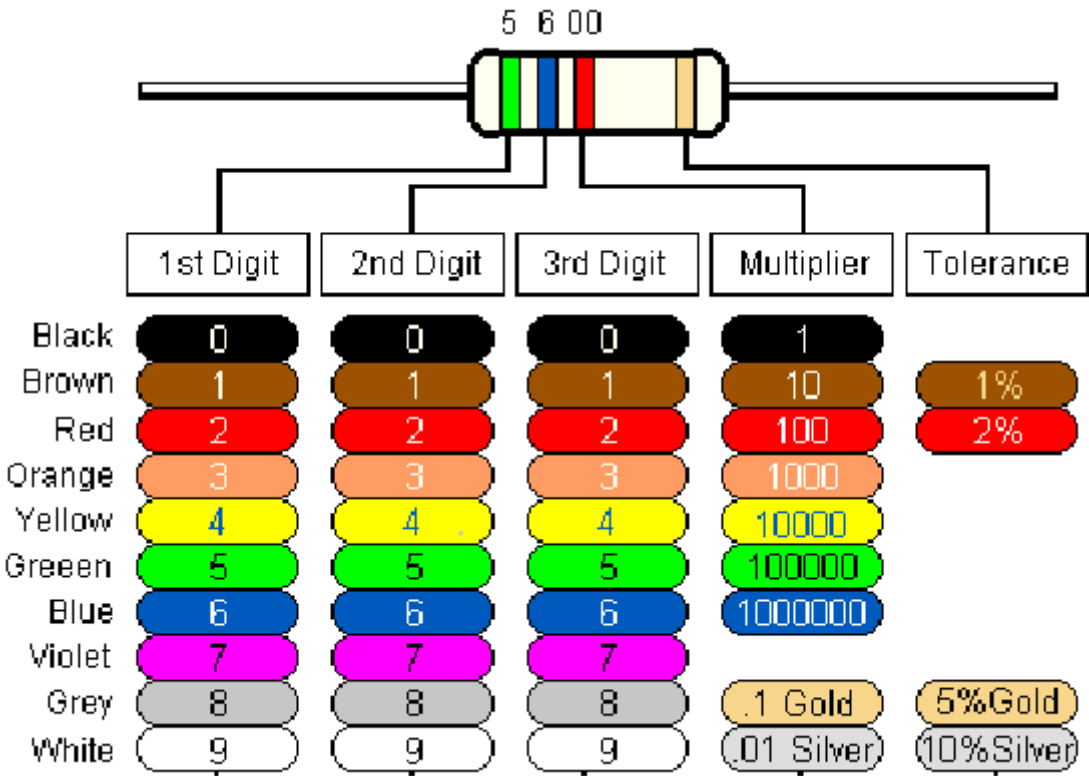
Kako označujemo močnejše upore s številčno kodo IEC?

Kaj je R oz. E v številčni oznaki upora?

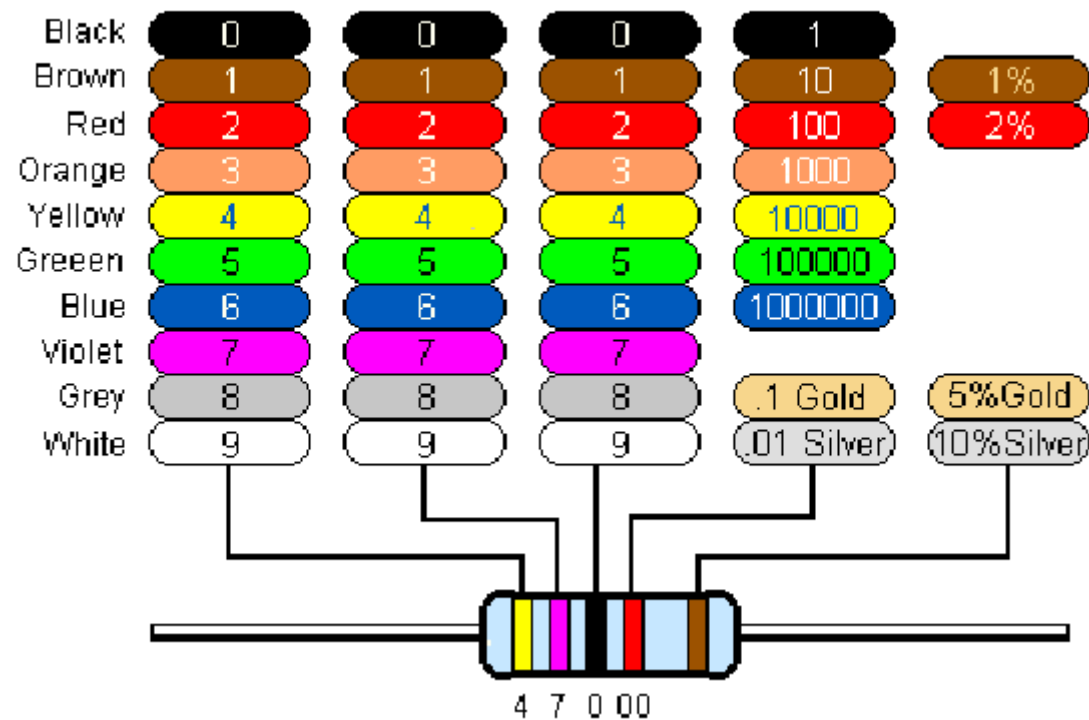
Kaj pomenijo pripone K, M – zapišite vrednost 1.7 k upora 5 W kot bi jo razbrali na ohišju upora).

En sam črn kolobar (kratkestičnik, zero-ohm resistor): Uporablja se za premostitev (žica). Zaradi strojev za polaganje komponent – žico je stroju težje položiti kot standardni upor.

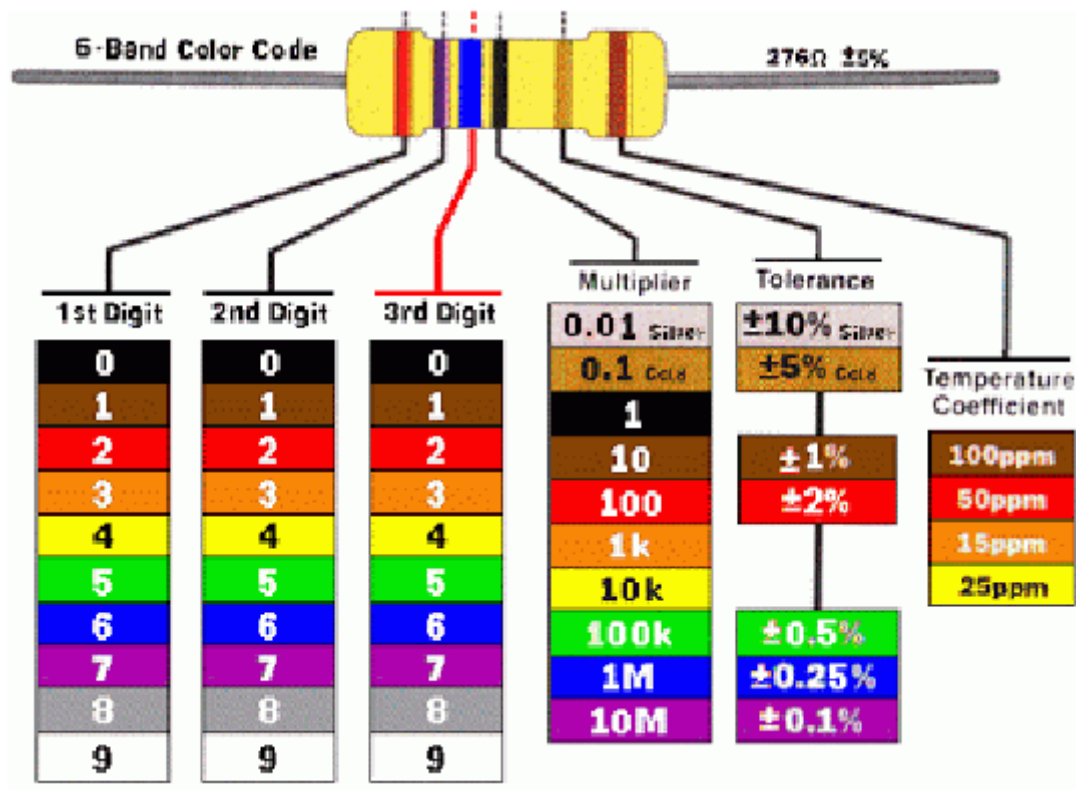
IEC iz 4 kolobarjev



IEC iz 5 kolobarjev



IEC iz 6 kolobarjev



16. Katere vrste IEC označevanja SMD uporov poznate?

Iz podane vrednosti upora razberite vrednost SMD upora.

Razložite troštevilično oznako po IEC sistemu označevanja SMD uporov.

Razložite primer, če oznako sestavljata številki in črka (tabela vrednosti števil in črk je podana spodaj)

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 \Rightarrow števki vrednosti,

3. \Rightarrow multiplikator

E96 lestvica za označevanje SMD uporov

Številki/črka:

- Številki \Rightarrow prve tri števke vrednosti
- Črka \Rightarrow multiplikator

| Črka | multiplikator | Črka | multiplikator | Črka | multiplikator |
|------|---------------|------|---------------|------|---------------|
| Z | 1m | A | 1 | D | 1K |

| Črka | multiplikator | Črka | multiplikator | Črka | multiplikator |
|------|---------------|------|---------------|------|---------------|
| Y/R | 10m | B/H | 10 | E | 10K |
| X/S | 100m | C | 100 | F | 100K |

| 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 |

17. Podajte definicijo P_n in T_{MAX} elementa?

Kaj predstavlja termična upornost R_{thSA} ?

Kolikšne so tipične vrednosti R_{thSA} ?

Ali se z dodatkom hladilnega telesa upor R_{thSA} zmanjša ali poveča?

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!
- $P > P_n \implies$ Telementa $> T_{max} \implies$ degradacija oz. uničenje elementa.
- Maksimalna temperatura T_{max} je najvišja temperatura, ki jo materiali v elementu še prenesejo brez degradacije.
- T_{max} (navadni upori) $\approx 150^\circ C$
- T_{max} (močnostni upori) $\geq 250^\circ C$

Termična upornost R_{thSA}

- $R_{thSA} \implies$ termična upornost (ang. thermal resistance) med tema točkama površina, okolica (surface, ambient)

- $R_{th} \Rightarrow$ mera za učinkovitost odvajanja toplote v okolico.
- Enota $R_{th} \Rightarrow [^{\circ}C/W]$
- Koliko W element oddaja v okolico pri razliki temperatur ($T_S - T_A = 1^{\circ}C$).
- T_A ni enaka sobni ($T_{sobna} \approx 25^{\circ}C$), saj so elementi v ohišju
- Tipične vrednosti $T_A \approx [50...90^{\circ}C]$

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

V termičnem ravnovesju velja

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

18. Opišite analogijo med elektrotehničnimi in termičnimi problemi?

Kaj je termično ravnovesje?

Ali moč na elementu lahko povečamo preko vrednosti P_n ?

Kaj je "Power derating curve" $P_n(T_A)$?

Narišite jo in razložite mejne točke (T_{MAX} , P_{n70}).

Kakšne so vrednosti T_{MAX} za tipičen 1W CF upor in kakšne za 7 W MF upor?

Kako iz velikosti SMD upora (0402, 0603, in 0805 ocenimo njegovo P_n)?

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)

Termično ravnovesje

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

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

oddana moč = prejeti moči segrevanja

- T_S se stabilizira:
($T_S = const$) \Rightarrow termično ravnovesje
- V termičnem ravnovesju velja:

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

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

$$T_S = T_a + R_{thsa} P_{segr} = 70^\circ C + 10^\circ C = 120^\circ C$$

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 \implies večje odvajanje moči)
- znižamo T_A (večja temperaturna razlika \implies 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 !
 $T_A \approx 70^\circ C$

$P_n(T_A) \implies$ 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 (črtna črta).
- Meja: Zaradi varnosti P_n ne dopustijo povečevati $T_{Amin} = 70^\circ C$ (polna črta)

Moč na SMD uporih ocenimo iz njihove velikosti:

0402, 0603 \implies 1/16W ... 1/10W

0805 \implies 1/10W ... 1/8W

19. Kaj je kritična upornost R_c oz. z njo povezana mejna napetost U_m ?

Narišite tipičen potek $U(R)$ in označite točki R_c ter U_m .

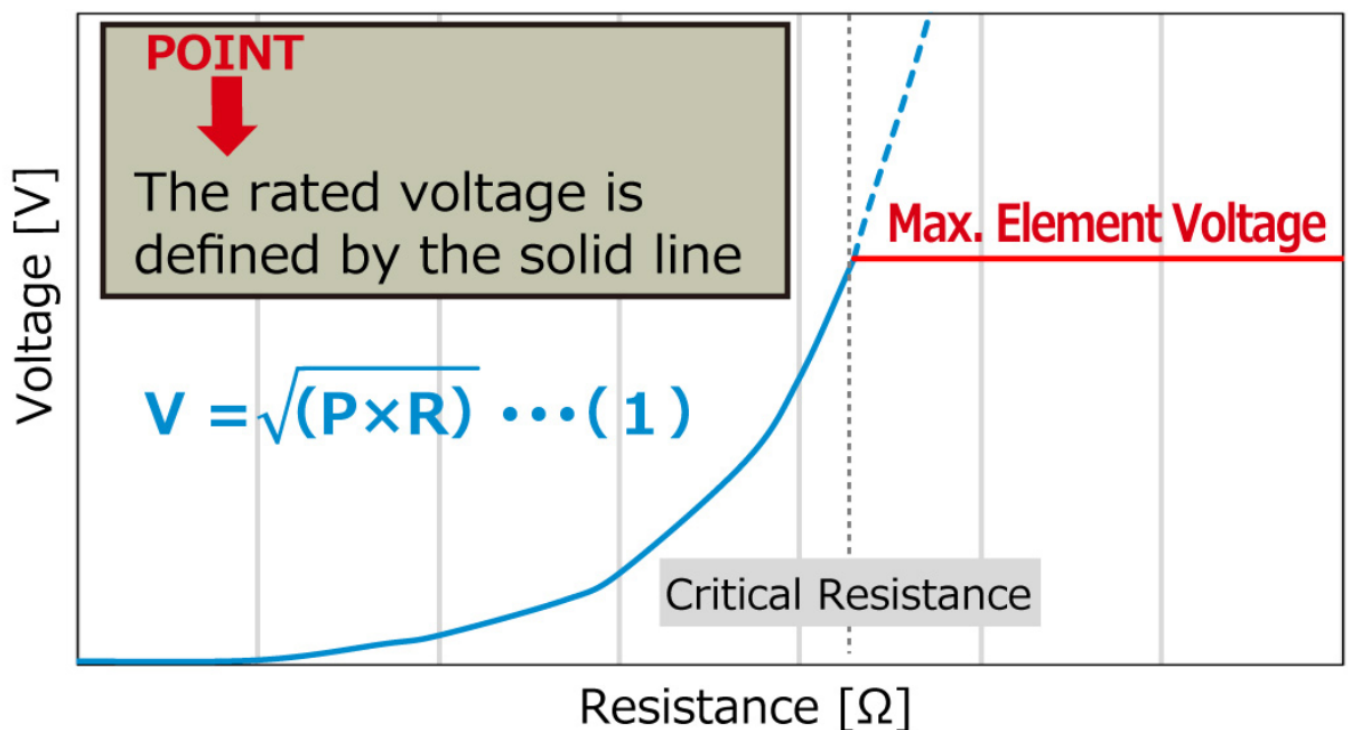
Razložite mejo med dvema deloma karakteristike in vpliv, ki prevladuje v posameznem delu karakteristike.

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

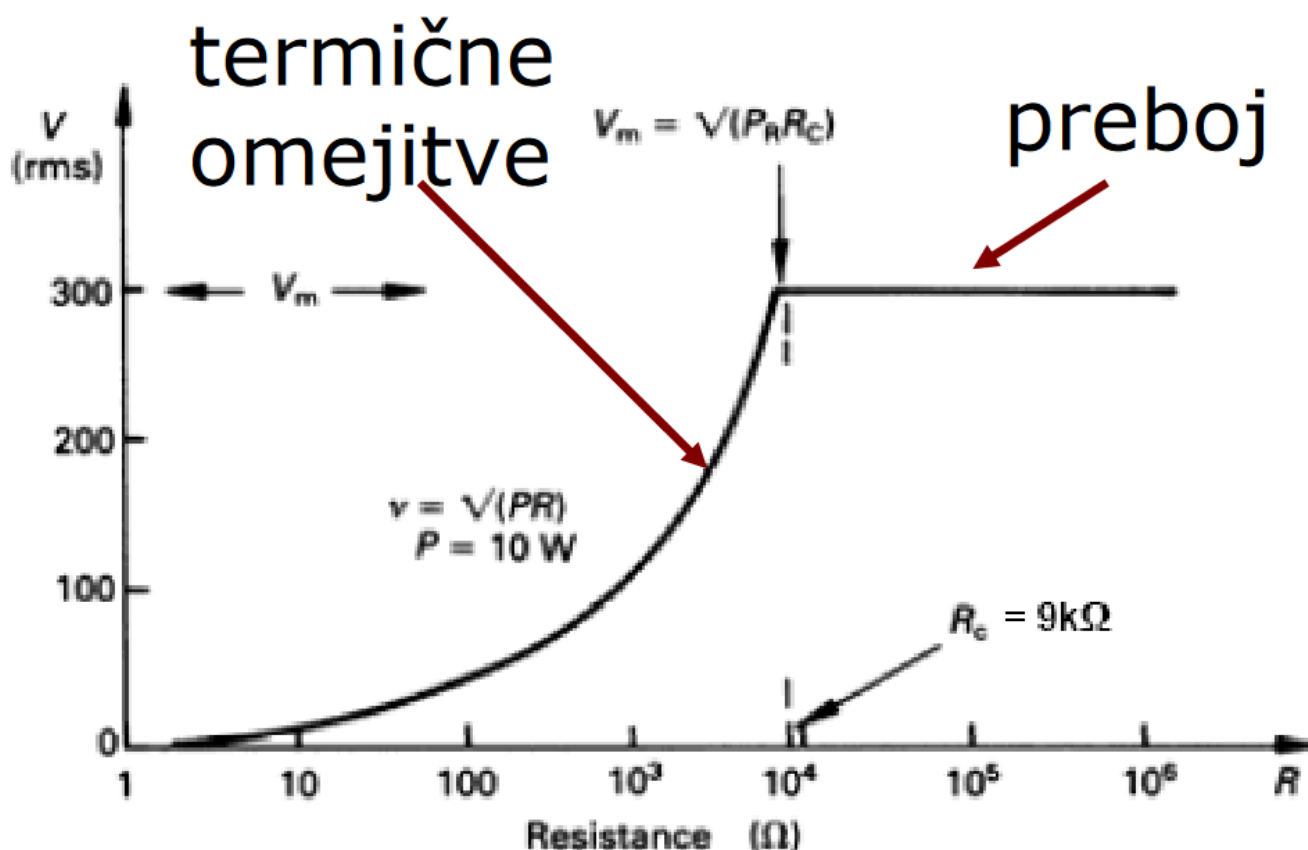
- Pri visokih upornostih ($R \approx 1M\Omega$) nad R_c je maksimalna dopustna napetost določena s prebojnimi omejitvami
- $U_L \implies$ maksimalna napetost, ki jo upor še prenese brez preboja; mejna (ang. limit) napetost.
- Namesto U_L se včasih poda R_c , pri kateri se zgodi za dano družino uporov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

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

Preboj!

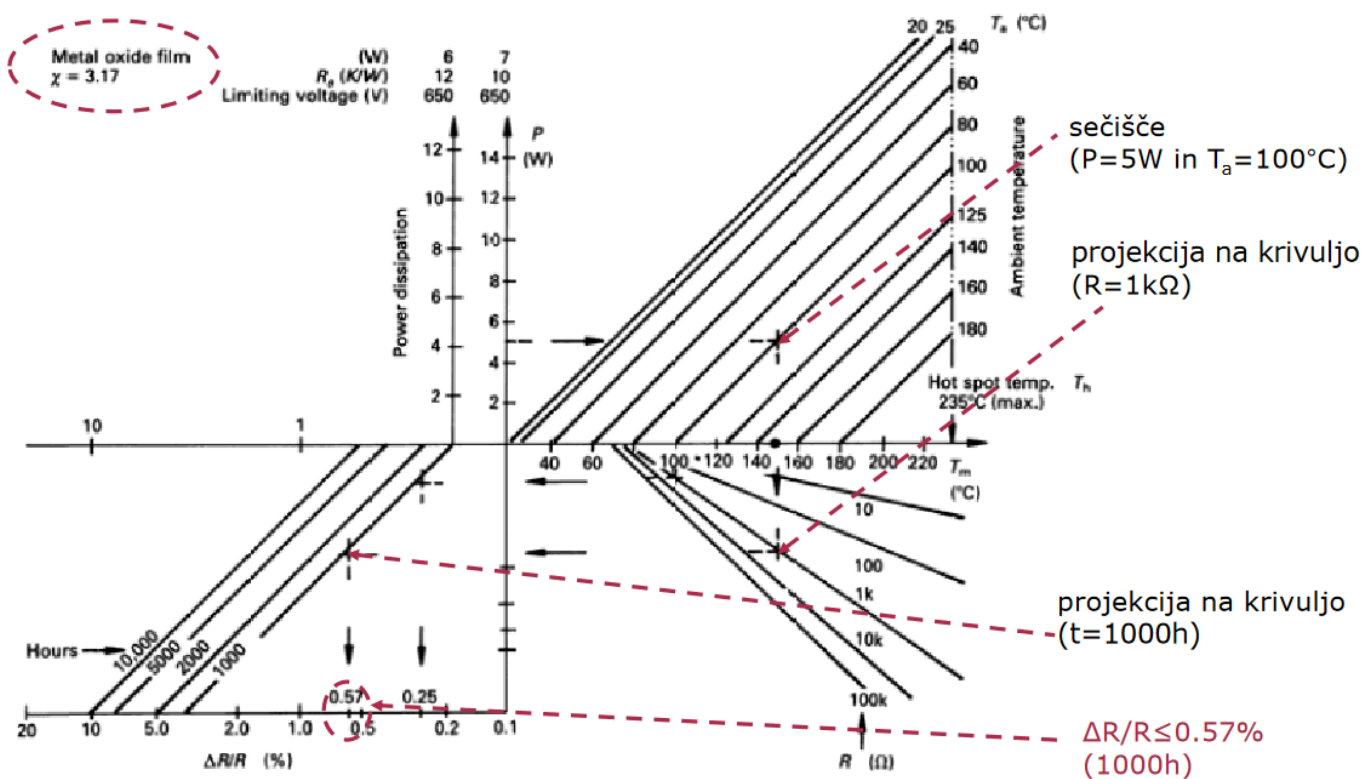
$$U_n = \sqrt{P_n R_n} \quad R_n < R_c \quad \text{segrevanje}$$

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



20. Kako je definirana nestabilnost uporov $\Delta R/R$ po poljubnem času delovanja?

Na podanem nomogramu upornosti prikažite postopek določanja $\Delta R/R$ za ($T_A = 100^\circ \text{C}$, $P = 5 \text{ W}$) po 1000 urah?



Nestabilnost uporov

- Nestabilnost elementa (degradacija ali staranje elementa) podaja spremembo lastnosti elementa po dolgoletnem delovanju R_0 :

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

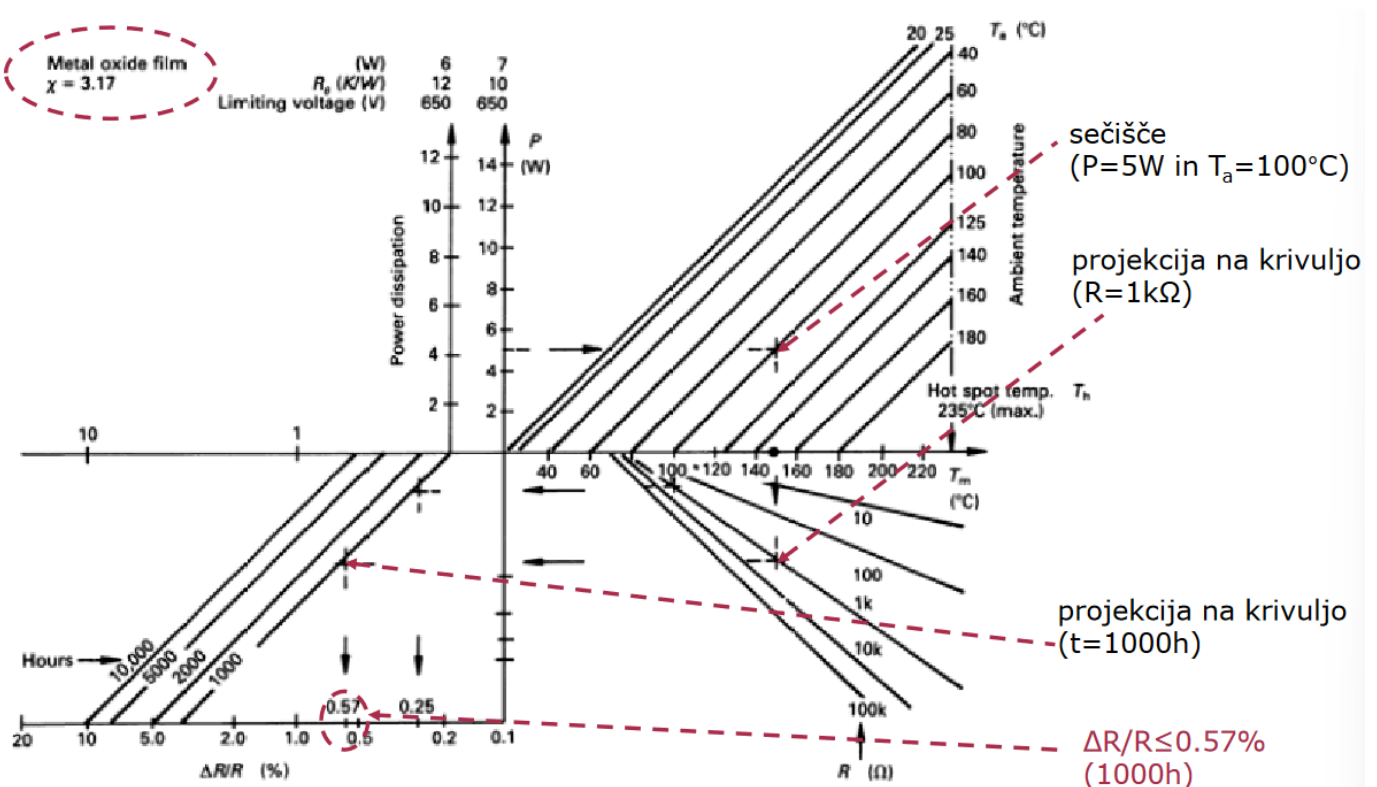
- $R_t \implies$ spremenjena upornost po dolgoletnem delovanju t ,
- $R_0 \implies$ začetna upornost upora ob izdelavi.

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)

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

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



21. Impulzno krmiljenje upora: Kdaj lahko trenutne vrednosti moči trenutno presežejo P_n ?

Kakšen kriterij za P_M velja pri krmiljenju s periodičnimi pulzi?

Narišite odvisnost impulzne moči od širine pulza na uporu – označite limitni primer?

Katerih vrednosti pri P_M nikakor ne smemo preseči pri hitrih pulzih?

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 $P_n \implies$ prekoračitev $T_{max} \implies$ uničenje upora

- Trenutne vrednosti moči lahko kratkotrajno presežejo P_n in upor "preživi" brez degradacije če povprečna moč impulzov ne presega P_n .

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

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

22. Kaj je temperaturni koeficient upornosti - TK_R (kaj podaja, definicija)?

Če je druga oznaka za $TK_R = \alpha_R$, kaj je potem β_R ?

Navedite primer materiala za upore, ki ima pozitiven TK_R .

Temperaturni koeficient upornosti - TK_R

- Uporovne lastnosti resničnih materialov se spreminjajo s temperaturo $\implies R = R(T)$
- Temperaturne lastnosti elementov in materialov podajamo s temperaturnimi koeficienti (TK , TC ali α).
- Temperaturni koeficient ima ponavadi dodan še indeks, ki podaja veličino, katere temperaturno odvisnost koeficient opisuje: Temperaturni koeficient upornosti TK_R .
- TK so definirani kot razmerje relativne spremembe opazovane veličine in spremembe temperature.

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

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

R_1 = upornost pri referenčni temperaturi ($25^\circ C$) v Ω

R_2 = upornost na temperaturi testiranja ($-55...155^\circ C$) v Ω

$T_1 = +25^\circ C$ sobna temperatura

$T_2 = -55^\circ C... + 155^\circ C$ temperatura testiranja

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

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

23. Kaj je R_{sh} ?

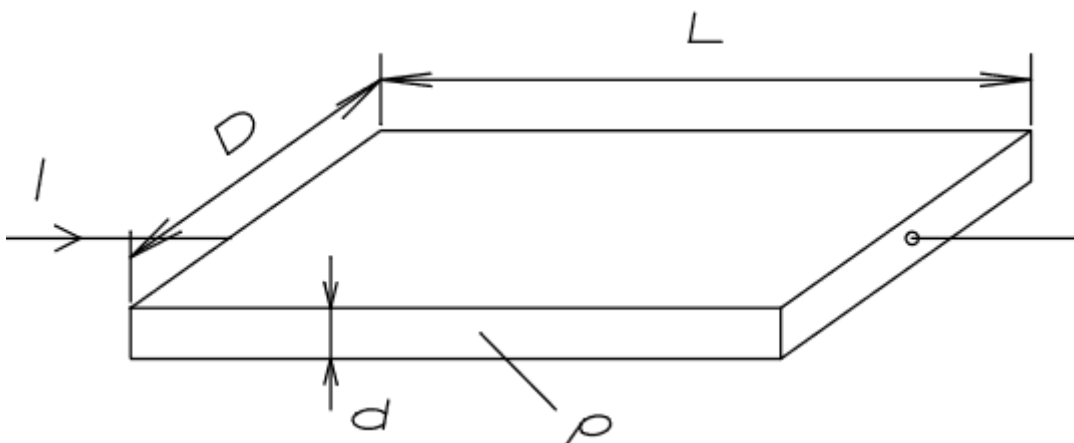
Kako z R_{sh} izračunamo upornost homogene uporovne plasti?

Kakšna je razlika med R_{sh} in R_{\square} ?

Plastna upornost R_{sh}

- Plastni upori: Tanka uporovna plast na substratu (podlagi).
- Upornost plasti \implies 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: $\rho = konst.$



- Uporovna proga:
 - $L \implies$ dolžina,
 - $D \implies$ širina,
 - $d \implies$ debelina,

- $\rho \implies$ specifična upornost,
- $I \implies$ tok upora

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

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

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

Upornost kvadrata - R_{\square}

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

$$R_{\square} = \rho \cdot \frac{L}{A} = \frac{\rho \cdot D}{D \cdot d} = \frac{\rho}{D} = R_{sh}$$

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

24. Kako izračunamo upornost nehomogenega materiala (opišite korake postopka)?

Zakaj R_{sh} ne računamo, ampak jo merimo?

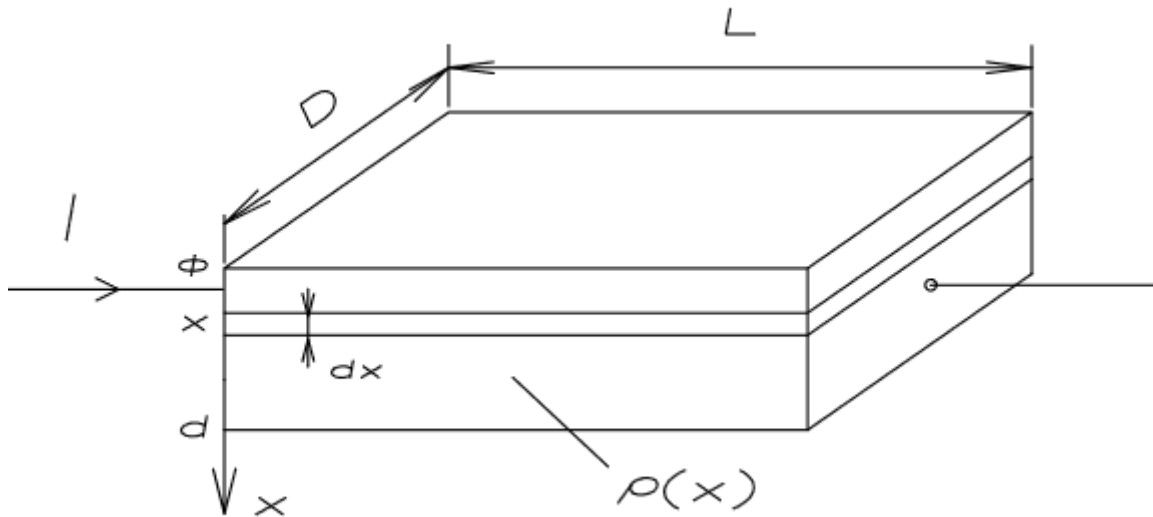
Opišite osnovno Van der Pauw merilno metodo,

Podajte slabosti osnovne meritve in opišite natančnejšo izvedenko te meritve.

Narišite eno izmed tipičnih postavitv merilnih kontaktov.

Nehomogena uporovna plast: $\rho \neq konst$

- 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.



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

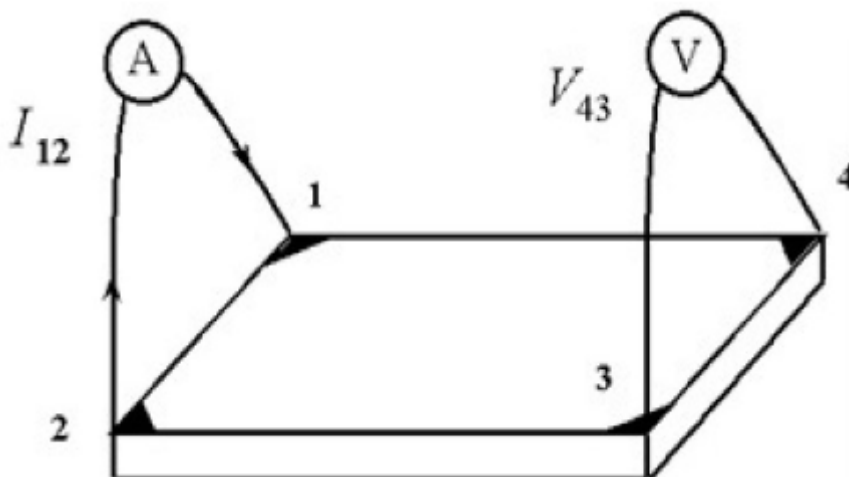
- Celotno prevodnost upora G dobimo s seštevanjem prevodnosti tankih plasti dG
- dG so vezane vzporedno glede na priključka upora.

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

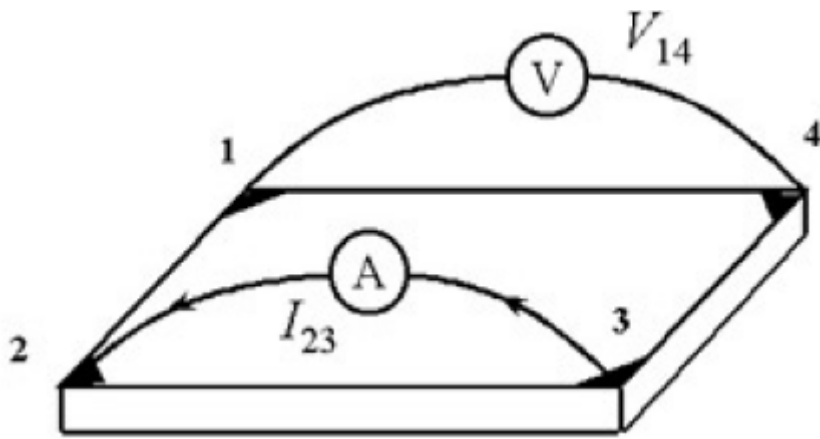
- V praksi R_{sh} ne izračunamo ampak jo merimo.
- Meritev poteka enako v primeru homogene ali nehomogene plasti

Van der Pauw merilna metoda

R_{SH} lahko izračunamo, če prej izmerimo R_A in R_B



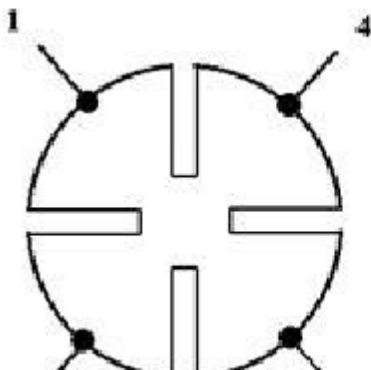
$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}}$$



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

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

Cloverleaf



**Square or
rectangle:
contacts at
the corners**

