

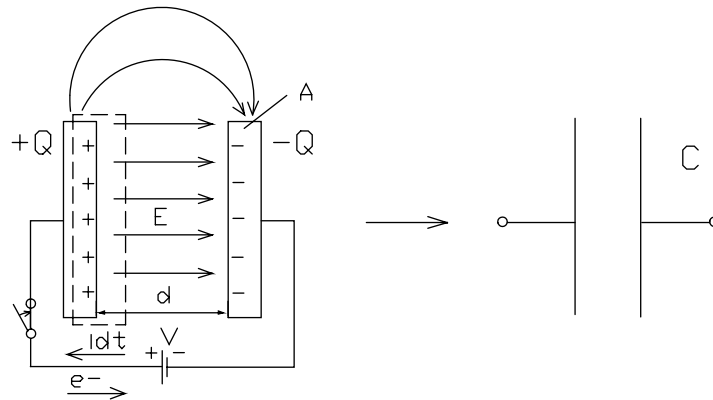
4 KONDENZATORJI

- 4.1 UVOD
- 4.2 OSNOVNE LASTNOSTI
- 4.3 ZNAČILNOSTI KONDENZATORSKIH DRUŽIN

4.1 UVOD

Strukturo in električni simbol enostavnega kondenzatorja prikazuje SI 4.1. Ko tak kondenzator priključimo na napetostni vir, steče kratkotrajen tok, na ploščah se pojavi naboj Q in med ploščama poljska jakost E . Ravnoesje se vzpostavi, ko postane po Kirchoffovem zakonu vsota napetosti v zanki enaka nič. Tedaj je električno polje med ploščama ob zanemaritvi robnih pojavov podano z izrazom

$$E = \frac{V}{d} \quad (4.1)$$



SI 4.1 Struktura in električni simbol enostavnega kondenzatorja

Če stikalo razklenemo in s tem 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).

Kondenzator karakteriziramo z njegovo kapacitivnostjo C , ki si jo lahko predstavljamo kot količino naboja dQ , ki jo kondenzator shrani ali odda pri neki spremembi napetosti dV

$$C(V) = \frac{dQ(V)}{dV} \quad (4.2)$$

Kadar je kapacitivnost neodvisna od napetosti, kot je to največkrat res pri običajnih kondenzatorjih, se gornja enačba poenostavi

$$C = \frac{Q}{V} \quad (4.3)$$

Osnovna enota kapacitivnosti je 1 Farad ($1F=1As/V$), ki pa je za prakso prevelika in srečamo običajno manjše enote ($mF, \mu F, nF, pF$).

Materialu med ploščama pravimo dielektrik kondenzatorja in opravlja v resničnem kondenzatorju več koristnih funkcij :

- poskrbi za mehansko separacijo obeh elektrod in tako preprečuje kratek stik
- poskrbi za višjo prebojno napetost (dobri dielektriki imajo znatno višje prebojne trdnosti kot zrak)
- poskrbi za povečanje kapacitivnosti (za faktor relativne dielektričnosti ϵ_r)

4.2 OSNOVNE LASTNOSTI

4.2.1 POLARIZACIJA DIELEKTRIKA

Pri dielektričnih materialih srečamo dva tipa molekul:

- **polarne molekule:**

V tem primeru centra pozitivnega naboja(+q) in negativnega naboja(-q) ne sovpadata(Sl 4.2a), razdaljo med njima označimo l (smer od +q proti -q). Molekula ima tedaj dipolni moment p

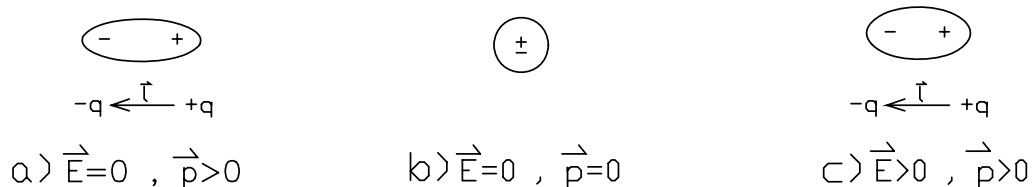
$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (4.4)$$

- **nepolarne molekule:**

- če je električno polje E enako 0, centra pozitivnega in negativnega naboja tu sovpadata ($l = 0$) in dipolni moment p je enak 0 (Sl 4.2b)

$$\vec{p} = 0 \quad (4.5)$$

- če je električno polje E različno od 0, se zaradi nasprotnih električnih sil razmakneta centra pozitivnega in negativnega naboja. Posledica tega je vzbujen oz. inducirani električni dipolni moment p (Sl 4.2c).



SI 4.2 Polarna molekula(a), nepolarna molekula(b) in nepolarna molekula z induciranim dipolnim momentom(c)

Polarizacija dielektrika P opisuje stopnjo urejenosti teh električnih dipolov:

- v primeru, ko v dielektriku ni električnega polja($E=0$), so molekule neurejene, vse smeri so zastopane enakomerno in totalni dipolni moment na enoto volumna oz. polarizacija P je enaka 0 (Sl 4.3).

- v primeru, ko vlada v dielektriku poljska jakost($E \neq 0$), se polarne molekule uredijo v smeri polja(Sl 4.3b). V primeru nepolarnih molekul pride pred tem najprej do inducirane dipolnega momenta (Sl 4.2c), ko se zaradi nasprotnih električnih sil razmakneta centra pozitivnega in negativnega naboja in s tem vzbudi dipolni moment. Nato se tudi ti inducirani dipolni momenti uredijo v smeri polja, kot prikazuje Sl 4.3b.

V prisotnosti električnega polja se torej električni dipolni momenti v dielektričnem materialu uredijo oz. dielektrik se polarizira. Opisana dielektrična polarizacija oz. ureditev dipolov ima važne posledice za lastnosti kondenzatorja, tako pozitivne (npr. povečanje kapacitivnosti) kot negativne (npr. dielektrična absorpcija), vendar o tem več kasneje.



$$a) \vec{E}=0, \vec{P}=0$$

$$b) \vec{E}>0, \vec{P}>0$$

SI 4.3 Urejenost molekul v nepolariziranem (a) in polariziranem (b) dielektriku

4.2.2 KAPACITIVNOST

Najprej bomo določili kapacitivnost enostavnega kondenzatorja brez dielektrika, ki ima torej med ploščama kar vakuum (SI 4.1). Nato bomo vstavili med plošče dielektrik in določili kapacitivnost še v tem primeru.

1. Kondenzator brez dielektrika

Kondenzator brez dielektrika prikazuje SI 4.1. S pomočjo Gaussovega teorema

$$\int_V \rho dV = \epsilon_0 \int_A \vec{E} d\vec{A} \quad (4.6)$$

dobimo z integracijo po črtkanem volumnu na SI 4.1 ob zanemaritvi izhajajočih silnic električnega polja izven področja med ploščama naslednjo zvezo

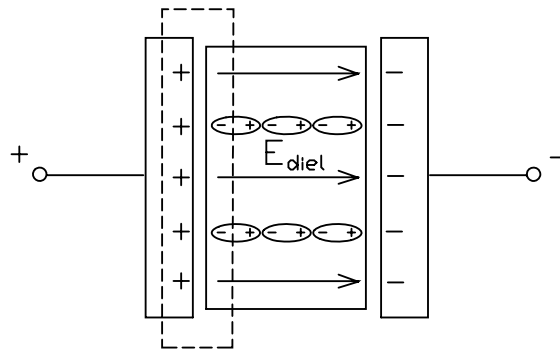
$$Q = \epsilon_0 EA = \epsilon_0 \frac{V}{d} A \quad (4.7)$$

Kapacitivnost je po definiciji razmerje med shranjenim nabojem in pritisnjeno napetostjo neke kondenzatorske strukture, kar vodi do znanega izraza

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.8)$$

2. Kondenzator z dielektrikom

Sedaj vstavimo med plošče kondenzatorja dielektrik (SI 4.4). V primeru kondenzatorja z dielektrikom se dipoli pod vplivom električnega polja uredijo, kot je bilo opisano pri obravnavi polarizacije dielektrika. Zato se del naboja na ploščah neutralizira preko induciranih dipolov v dielektriku, kot je za dve molekuli verigi nakazano na SI 4.4! Zato ima v tem primeru poljska jakost E nižjo vrednost kot v primeru brez dielektrika, pri sicer enakih ostalih pogojih (pritisnjena napetost itd.)! Faktor, za katerega se polje in s tem napetost (en(4.1)) na kondenzatorju zniža po vstavitvi dielektrika med plošče, je eden izmed osnovnih podatkov za dani dielektrik. Po dogovoru oz. definiciji ta faktor imenujemo relativna dielektričnost ali dielektrična konstanta ϵ_r danega dielektrika.



SI 4.4 Kondenzator z dielektrikom

Pri opisani vstavitvi dielektričnega materiala med plošče kondenzatorja se totalni naboj Q na ploščah v resnici seveda ni spremenil, saj plošče ostanejo pri tem slej ko prej električno izolirane od okolice. Ker pa se pri tem zaradi ureditve dipolov zmanjša električno polje E in s tem napetost V , se torej poveča zaradi vstavitve dielektrika razmerje Q/V oz. kapacitivnost kondenzatorja za faktor relativne dielektričnosti! Kapacitivnost kondenzatorja z dielektrikom je torej podana z izrazom

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (4.9)$$

Tabela 1 prinaša vrednosti dielektrične konstante pri sobni temperaturi za nekaj važnejših kondenzatorskih dielektričnih materialov.

Tabela 1 Dielektrična konstanta ϵ_r za nekatere dielektrične materiale ($T = 25^\circ\text{C}$)

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

4.2.3 KAPACITIVNOST RESNIČNIH KONDENZATORJEV

V praksi srečamo tudi bolj komplicirane kondenzatorske strukture od pravkar obravnavane. Za nekaj tipičnih primerov bodo podani izrazi za izračun kapacitivnosti. Numerični faktorji so prirejani tako, da dobimo kapacitivnosti v [pF], če vnašamo vse dimenzije v [cm]!

- Ploščati (blok) kondenzator z N dielektričnimi plastmi (Sl 4.5a)

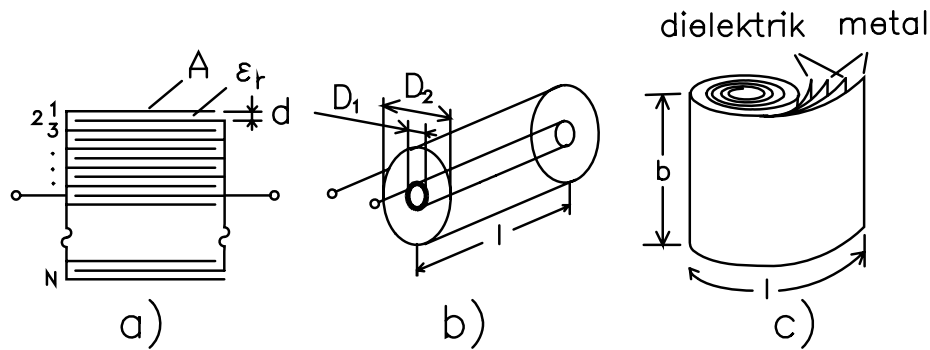
$$C = 0.0885 \epsilon_r (N - 1) \frac{A}{d} \quad C[\text{pF}], \text{dimenzije}[\text{cm}] \quad (4.10)$$

- Cilindrični kondenzator (Sl 4.5b)

$$C = 0.556 \epsilon_r \frac{l}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad C[\text{pF}], \text{dimenzije}[\text{cm}] \quad (4.11)$$

- Naviti cilindrični kondenzator (Sl 4.5c)

$$C = 0.177 \epsilon_r \frac{bl}{d} \quad C[\text{pF}], \text{dimenzije}[\text{cm}] \quad (4.12)$$

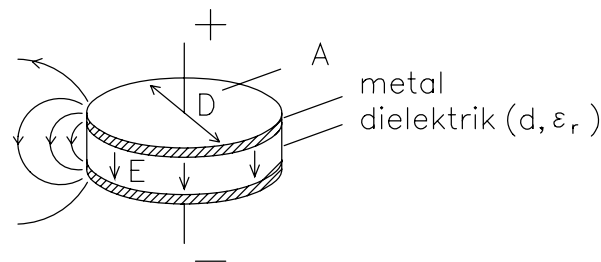


SI 4.5 Blok kondenzator(a), cilindrični kondenzator(b), naviti cilindrični kondenzator(c)

Pri poenostavljeni izpeljavi kapacitivnosti v prejšnjem poglavju je bilo zanemarjeno izhajanje električnega polja na robu kondenzatorja (SI 4.6). To je običajno dopustno zaradi navadno majhne debeline dielektrika proti ostalim dimenzijam kondenzatorja. Kadar to ni izpolnjeno, je treba zaradi večje točnosti pri izračunu kapacitivnosti upoštevati tudi izhajanje (leakage) električnega polja. Taka natančnejša analiza kapacitivnosti vodi do korekturnih členov v izrazih za izračun kapacitivnosti.

Natančnejši izraz za izračun kapacitivnosti okroglega blok kondenzatorja (SI 4.6) ob upoštevanju robnih efektov se tako glasi

$$C \cong 0.0885 \varepsilon_r \frac{A}{d} + 1.5 \frac{d}{D} \left[\ln\left(25 \frac{D}{d}\right) - 1.305 \right] \quad C[\text{pF}], \text{dimenzije}[\text{cm}] \quad (4.13)$$



SI 4.6 Razmere pri okroglem disk kondenzatorju ob upoštevanju robnih efektov

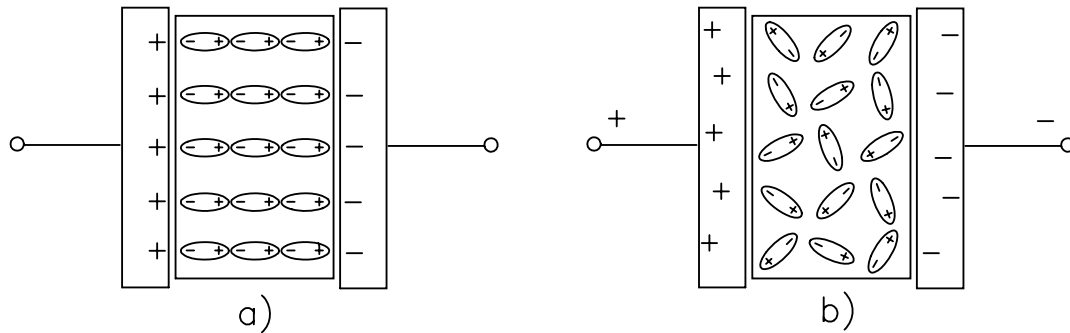
Natančnejši izraz za izračun kapacitivnosti cilindričnega kondenzatorja (SI 4.5b) lahko zapišemo v obliki

$$C \cong 0.556 \varepsilon_r \frac{l + 0.5d}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad C[\text{pF}], \text{dimenzije}[\text{cm}] \quad (4.14)$$

kjer je d debelina dielektrika.

4.2.4 DIELEKTRIČNA ABSORPCIJA

Če nabit kondenzator na hitro izpraznimo, postane napetost na kondenzatorju seveda enaka nič. Vendar, če čez nekaj časa pomerimo napetost na odprtih sponkah, ugotovimo, da se je na kondenzatorju ponovno pojavila, navidezno sama od sebe, neka napetost! Vzrok za to se skriva v pojavu, ki ga imenujemo dielektrična absorpcija (SI 4.7).



SI 4.7 Dielektrična absorpcija : dipoli so urejeni, naboj ujet(a) in obratno(b)

Na SI 4.7a so prikazane razmere v nabitem kondenzatorju: dielektrik je polariziran, dipoli urejeni in zato del naboja na ploščah vezan oz. absorbiran na dielektrik. V trenutku razelektritve lahko odteče torej le nevezani naboj! Absorbirani naboj se osvobajata počasneje, v skladu s hitrostjo prehajanja dielektrika iz urejenega polariziranega stanja (SI 4.7a) v neurejeno nepolarizirano stanje (SI 4.7b). To prehajanje traja, odvisno od vrste dielektrika, tipično od nekaj milisekund do nekaj ur.

Zato se po izpraznitvi, zaradi postopnega osvobajanja absorbiranega naboja, pojavi na ploščah kondenzatorja po preteku nekega karakterističnega časa, navidezno sam od sebe, ponovno nek prosti naboj in s tem električna napetost na kondenzatorju!

Obraten pojav srečamo pri polnjenju kondenzatorja: ko se napetost na kondenzatorju že stabilizira, lahko z meritvijo ugotovimo, da pa teče še vedno v kondenzator nek tok - zaradi dodatne absorpcije naboja v dielektriku, ki se relativno počasi polarizira proti končnemu stanju!

Omenjene pojave imenujemo s skupnim imenom dielektrična absorpcija. Proizvajalci običajno karakterizirajo dielektrično absorpcijo z vrednostjo novonastale napetosti (Reappearing Voltage) V_R , ki se ponovno pojavi po nekem dogovorjenem času od trenutka izpraznitve kondenzatorja. Včasih novonastalo napetost V_R še delijo z začetno napetostjo nabijanja kondenzatorja V_0 in je tedaj ta podatek izražen v procentih.

Dielektrična absorpcija ima nekatere neugodne posledice za delovanje kondenzatorja, npr. upadanje kapacitivnosti pri visokih frekvencah (pri hitrih spremembah je zaradi absorbiranega oz. vezanega naboja na razpolago manjši prosti naboj od celotnega, posledica je nižja kapacitivnost) ali nastanek časovnih zakasnitev pri popolnem polnjenju in praznjenju kondenzatorja, kar je kritično zlasti v pulznih vezjih.

4.2.5 LASTNOSTI RESNIČNEGA KONDENZATORJA

Idealni kondenzator je čista kapacitivnost brez parazitnih elementov, ki pri izpraznitvi vrne vso vloženo energijo. Vsak resnični kondenzator pa vsebuje poleg svoje osnovne lastnosti, kapacitivnosti, še po strukturi porazdeljene parazitne upornosti in induktivnosti. Pri izpraznitvi resnični kondenzator zato ne povrne vse vložene energije, ker se del vložene energije zaradi izgub v resničnem kondenzatorju izgubi oz. pretvori v toploto, ki segreva kondenzator.

Omenjene porazdeljene parazitne elemente zaradi preglednosti in enostavnosti obravnave običajno združujemo v koncentrirane parazitne elemente. Za opis resničnega kondenzatorja pri nižjih frekvencah običajno zadošča nadomestno vezje z dvema parazitnima upornostima, paralelno R_p in serijsko R_s , kot prikazuje Sl 4.8a.

Paralelna upornost R_p kondenzatorja podaja izgube oz. segrevanje kondenzatorja zaradi izgubnih procesov v dielektriku:

- ohmske izgube oz. segrevanje zaradi izolacijskih tokov skozi dielektrik
- polarizacijske izgube oz. segrevanje zaradi rotacije dipolov pri izmeničnih signalih

Paralelna upornost je običajno neka zelo velika upornost, v razredu $[G\Omega]$ pri dobrih kondenzatorjih in v splošnem upada s frekvenco.

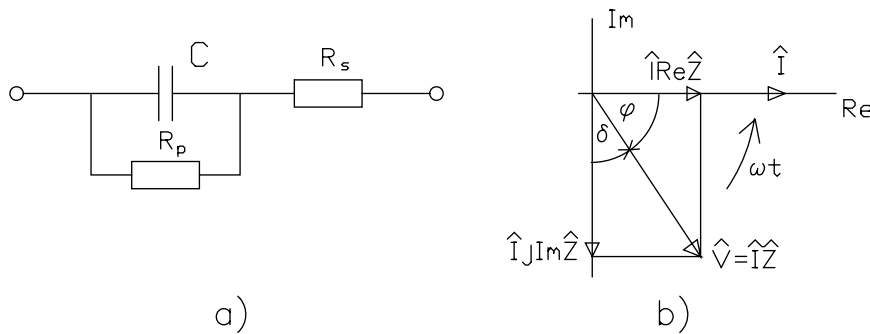
Serijska upornost R_s kondenzatorja podaja izgube oz. segrevanje kondenzatorja zaradi ohmskih upornosti v resničnem kondenzatorju (upornost dovodnih žic, kontaktne upornosti, upornosti običajno tankih metalnih folij ali plasti). Serijska upornost je običajno neka majhna upornost v razredu nekaj $100m\Omega$.

Impedanca resničnega kondenzatorja je tedaj podana z izrazom

$$\begin{aligned}\hat{Z} &= R_s + \frac{I}{\frac{I}{R_p} + j\omega C} \\ &= \text{Re } \hat{Z} + j \text{Im } \hat{Z}\end{aligned}\quad (4.15)$$

kjer je

$$\begin{aligned}\text{Re } \hat{Z} &= \frac{R_s + R_p + R_s (R_p \omega C)^2}{1 + (R_p \omega C)^2} \\ \text{Im } \hat{Z} &= - \frac{R_p^2 \omega C}{1 + (R_p \omega C)^2}\end{aligned}\quad (4.16)$$



SI 4.8 Običajno nf nadomestno vezje resničnega kondenzatorja(a) in slika kompleksorjev v kompleksni ravnini(b)

4.2.5.1 IZGUBE V RESNIČNEM KONDENZATORJU

Slika kompleksorjev v kompleksni ravnini prikazuje SI 4.8b. Pri resničnem kondenzatorju je fazni kot φ manjši od $\pi/2$ za izgubni kot δ

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (4.17)$$

Izgubni kot δ oz. izgubni faktor $\text{tg}\delta$ določa izgube oz. segrevanje kondenzatorja. O tem se lahko prepričamo z enostavno grafično metodo ali pa z izračunom za primer krmiljenja s harmoničnimi signali.

1. Grafična določitev izgub

Na SI 4.9a so grafično podani trenutni poteki toka, napetosti in moči na idealnem kondenzatorju ($R_p = \infty$, $R_s = 0$). Fazni kot $\varphi = \pi/2$, napetost zaostaja za tokom točno za $\pi/2$, izgubni kot $\delta = 0$. Ker je trenutna moč kondenzatorja p podana z izrazom

$$p = i v \quad (4.18)$$

je vsaka ničla toka ali napetosti hkrati tudi ničla trenutne moči. Zato je v tem primeru tudi trenutna moč simetrična harmonična funkcija, z dvojno frekvenco. Zaradi popolne simetrije problema je torej v tem primeru prejeta moč v pozitivni polperiodi P^+ enaka oddani moči v negativni polperiodi P^- (SI 4.9a)

$$P^+ = P^- \quad (4.19)$$

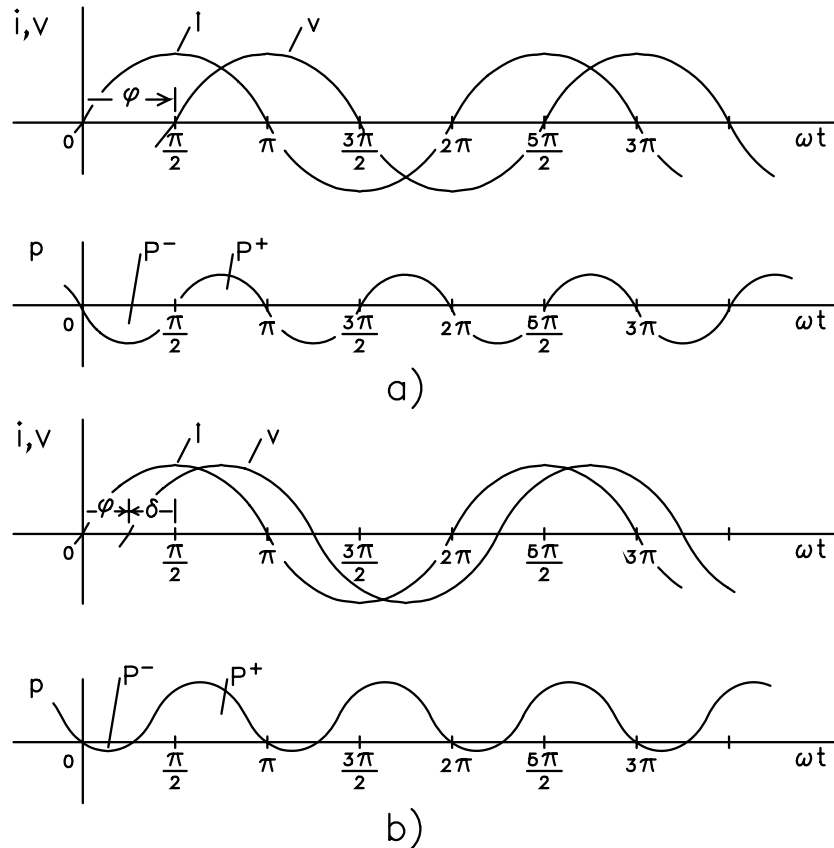
Zato je razlika moči, ki ostaja na idealnem kondenzatorju in se troši za njegovo segrevanje, v tem primeru enaka 0! Idealni kondenzator torej v eni polperiodi vrne enako moč kot jo v drugi polperiodi prejme. Zato tak kondenzator nima izgub oz. segrevanja.

Na SI 4.9b so prikazane razmere v primeru resničnega kondenzatorja. Zaradi parazitnih upornosti R_p, R_s se pojavi izgubni kot δ , ničle napetosti se premaknejo za to vrednost proti ničlam toka in posledica je nesimetrični potek trenutne moči. Prejeta moč je v tem primeru večja

od oddane(SI 4.9b)

$$P^+ > P^- \quad (4.20)$$

Resnični kondenzator se zato segreva oz. ima izgube, ki so seveda tem večje, čim večji je izgubni kot δ oz. izgubni faktor $\operatorname{tg}\delta$, kot prikazuje SI 4.9b.



SI 4.9 Potek trenutnih tokov, napetosti in moči na idealnem (a) in resničnem (b) kondenzatorju

2. Analitična določitev izgub

Izgube oz. segrevanje kondenzatorja lahko določimo tudi natančneje z izračunom. Trenutna moč na kondenzatorju je pri krmiljenju s harmoničnimi signali podana z izrazom

$$\begin{aligned} p(t) &= i(t) v(t) \\ &= I_M \sin \omega t V_M \sin(\omega t - \varphi) \\ &= \frac{I_M V_M}{2} \cos \varphi - \frac{I_M V_M}{2} \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (4.21)$$

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

Povprečno moč segrevanja P oz. izgube kondenzatorja lahko izračunamo s časovnim

povprečenjem trenutne moči preko ene periode T

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\ &= \frac{I_M V_M}{2} \cos \varphi \\ &= I_{ef} V_{ef} \cos \varphi \end{aligned} \quad (4.22)$$

Običajno je izgubni kot δ majhen in tedaj velja

$$\cos \varphi = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) = \sin \delta \cong \operatorname{tg} \delta \quad (4.23)$$

Segrevanje oz. izgube kondenzatorja lahko tako zapišemo z znanimi izrazi

$$\begin{aligned} P &= I_{ef} V_{ef} \operatorname{tg} \delta \\ &= \omega C V_{ef}^2 \operatorname{tg} \delta \\ &= 2\pi f C V_{ef}^2 \operatorname{tg} \delta \end{aligned} \quad (4.24)$$

Izgube oz. segrevanje kondenzatorja so torej proporcionalne izgubnemu faktorju (loss factor, dissipation factor; verlust faktor) $\operatorname{tg} \delta$. Pri dobrem kondenzatorju naj bo zato izgubni faktor čim manjši. Tipična vrednost izgubnega faktorja pri dobrem kondenzatorju znaša $\operatorname{tg} \delta < 10^{-4}$ oz. kvaliteta $Q = 1/\operatorname{tg} \delta > 10^4$.

Frekvenčni potek izgubnega faktorja dobimo (Sl 4.8b) najhitreje z uporabo en (XX). Ob upoštevanju, da je v resničnih kondenzatorjih vedno dobro izpolnjen pogoj $R_p \gg R_s$, lahko na koncu izraze še brez škode poenostavimo

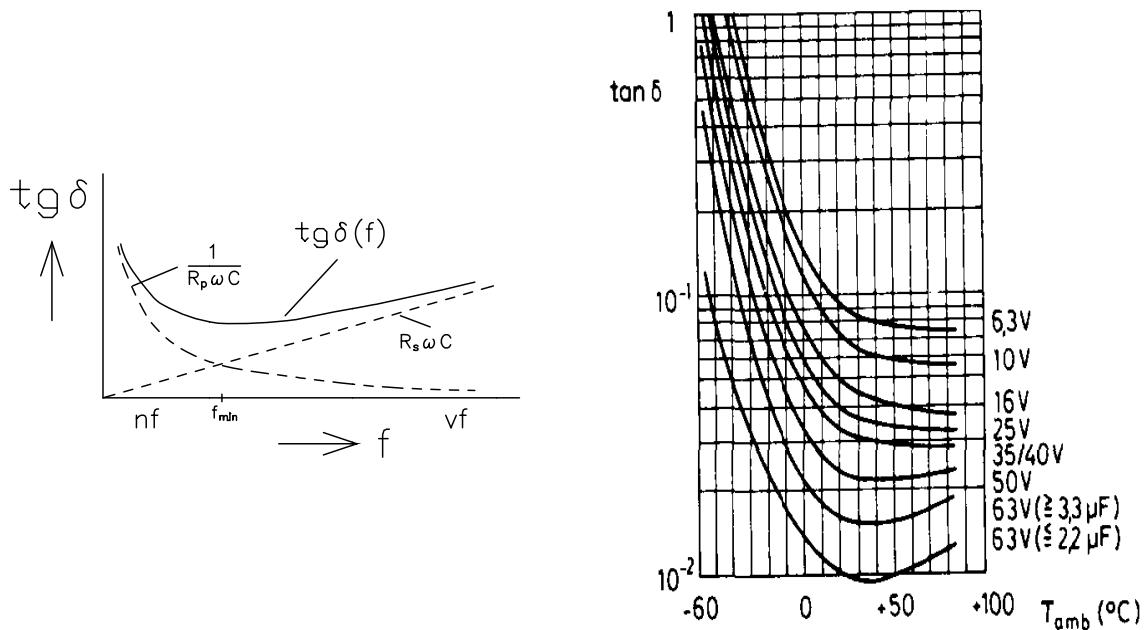
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{|\operatorname{Re} \hat{Z}|}{|\operatorname{Im} \hat{Z}|} = \frac{R_s + R_p + R_s (R_p \omega C)^2}{R_p^2 \omega C} \\ &= R_s \omega C + \frac{1}{R_p \omega C} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) \\ &\cong R_s \omega C + \frac{1}{R_p \omega C} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Frekvenčni potek izgubnega faktorja po gornji enačbi prikazuje Sl 4.10. Pri nižjih frekvencah prevladujejo izgube v dielektriku

$$\operatorname{tg} \delta \cong \frac{1}{R_p \omega C} \quad (4.26)$$

Pri višjih frekvencah pridejo do izraza ohmske izgube v dovodnih kontaktih

$$\operatorname{tg} \delta \cong R_s \omega C \quad (4.27)$$



SI 4.10 Frekvenčna(a) in temperaturna(b) odvisnost izgubnega faktorja kondenzatorja

Važen podatek za uporabnika je tudi temperaturna odvisnost izgubnega faktorja. Pri tem gre v splošnem za neke nepravilne odvisnosti, ker se s temperaturo spreminjajo prav vsi elementi nadomestnega vezja R_s, R_p in C ! Proizvajalci podajajo zato običajno kar izmerjene diagrame $\operatorname{tg} \delta(T) |_{f}$, kot prikazuje SI 4.10b. Včasih srečamo tudi ekvivalentne obratne diagrame $\operatorname{tg} \delta(f) |_{T}$.

4.2.5.2 IMPEDANCA KONDENZATORJA PRI VISOKIH FREKVENCAH

Frekvenčni potek impedance kondenzatorja v kompleksni ravnini prikazuje SI 4.11. Za analizo frekvenčne odvisnosti impedanco zapišemo v obliki

$$\begin{aligned} \hat{Z} &= R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C} \\ &= R_s + \frac{R_p}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Pri tem smo vpeljali karakteristično kotno frekvenco ω_p

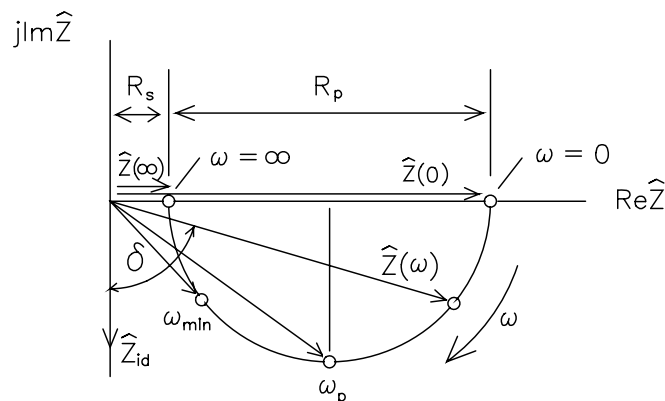
$$\omega_p = \frac{1}{R_p C} = \frac{2\pi}{\tau_p} \quad (4.29)$$

kjer je τ_p časovna konstanta oz. čas izpraznitve kondenzatorja skozi lastno paralelno upornost.

Pri analizi frekvenčnega poteka lahko hitro določimo potek impedance v treh enostavnih primerih (SI 4.11):

$$\begin{aligned} \omega \rightarrow 0 \text{ (nf primer): } \quad Z(0) &= R_s + R_p \\ \omega \rightarrow \omega_p: \quad Z(\omega_p) &= R_s + \frac{R_p}{2} - j \frac{R_p}{2} \\ \omega \rightarrow \infty \text{ (vf primer): } \quad Z(\infty) &= R_s \end{aligned} \quad (4.30)$$

Med temi točkami poteka impedanca zvezno po krožnici. Kot že poznamo iz analize frekvenčnega poteka izgubnega faktorja, ima pri neki frekvenci ω_{opt} kondenzator najmanjše izgube oz. izgubni kot, ki nato s frekvenco spet narašča. Ponovno ugotovimo, da je za dober kondenzator oz. majhen izgubni kot potrebna čim višja paralelna upornost R_p in čim nižja serijska upornost R_s .

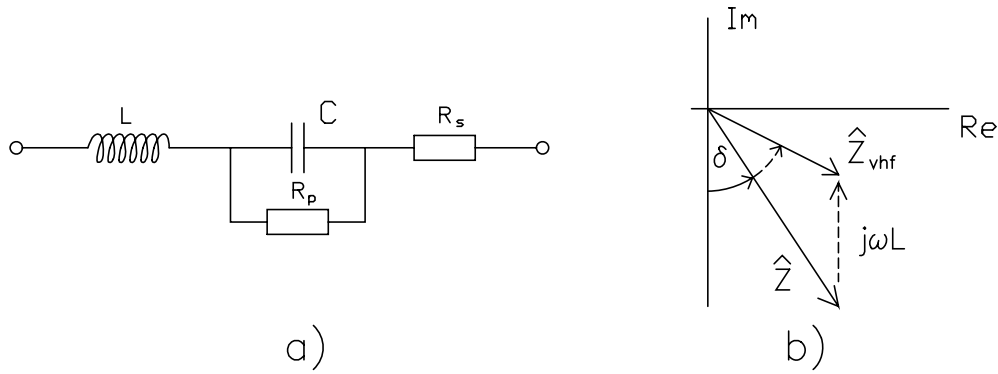


SI 4.11 Frekvenčni potek impedance v kompleksni ravnini

Pri zelo visokih frekvencah (very high frequency, vhf) je potrebno upoštevati tudi parazitne induktivnosti L . Ustrezno vhf nadomestno vezje prikazuje SI 4.12a. Analizo frekvenčnega poteka impedance najenostavneje izvedemo z naslonitvijo na prejšnji primer, saj smo v tem primeru dodali le parazitno serijsko induktivnost L in velja zveza

$$\hat{Z}_{vhf} = \hat{Z} + j\omega L \quad (4.31)$$

kjer je Z_{vhf} impedanca kondenzatorja ob upoštevanju induktivnosti, Z pa impedanca iz prejšnjega primera. Frekvenčni potek impedance je torej enak kot v prejšnjem primeru, le v vsaki točki moramo prišteti pozitivni imaginarni prispevek $+j\omega L$ (SI 4.12b). Induktivnost torej vedno le povečuje izgubni kot in izgubni faktor. Pri dovolj visokih frekvencah se zato lahko celo spremeni imaginarni del impedance v pozitivno količino, kondenzator izgubi kapacitivnostni značaj in seveda pri teh frekvencah ni več uporaben.



SI 4.12 Nadomestno vezje za zelo visoke frekvence (a) in potek impendace ob upoštevanju parazitne induktivnosti (b)

4.2.6 TEMPERATURNA ODVISNOST KAPACITIVNOSTI

Kapacitivnosti resničnih kondenzatorjev se s temperaturo spreminjajo. Vzrok za to so različne temperaturne odvisnosti posameznih količin, ki določajo kapacitivnost kondenzatorja in s tem njegov temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C

$$C(T) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(T) \frac{A}{d(T)} \quad (4.32)$$

$$TK_C = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r(T)}{\partial T} - \frac{1}{d} \frac{\partial d(T)}{\partial T}$$

Kot je nakazano v gornji enačbi, sta za temperaturno odvisnost kapacitivnosti največkrat odgovorna predvsem temperaturna odvisnost dielektrične konstante $\varepsilon_r(T)$ in debeline dielektrika $d(T)$. Pri temperaturni odvisnosti dielektrične konstante gre običajno za različne nepravilne, od vrste dielektričnega materiala odvisne spremembe dielektričnosti s temperaturo. V primeru spreminjanja debeline dielektrika z naraščajočo temperaturo gre običajno za raztezke in s tem za upadanje kapacitivnosti, odvisno od temperaturnih razteznostnih koeficientov.

V vsakem primeru je posledica običajno okrog sobnih temperatur počasno a nepravilno spreminjanje kapacitivnosti kondenzatorja s temperaturo. To najprimerneje opišemo s temperaturnim koeficientom kapacitivnosti TK_C , ki ga proizvajalci običajno definirajo kot relativno spremembo kapacitivnosti pri neki spremembi temperature, od izbranih referenčnih vrednosti

$$TK_C = \frac{1}{C} \frac{\Delta C}{\Delta T} = \frac{1}{C_{ref}} \frac{C(T) - C_{ref}}{T - T_{ref}} \quad (4.33)$$

S podanim temperaturnim koeficientom kapacitivnosti, ob znani izhodiščni referenčni temperaturi T_{ref} (običajno 20°C) ter pripadajoči referenčni kapacitivnosti C_{ref} lahko hitro določimo kapacitivnost pri neki temperaturi T s pomočjo gornje enačbe

$$C(T) = C_{ref} [1 + TK_C (T - T_{ref})] \quad (4.34)$$

Včasih podajajo proizvajalci za opis temperaturne odvisnosti kapacitivnosti nekoliko drugačen podatek - izmerjene diagrame $\Delta C/C_{20}(T)$, kot prikazuje SI 4.13. S pomočjo odčitka $\Delta C/C_{20}$ za dano temperaturo T iz tega diagrama lahko določimo kapacitivnost pri tej temperaturi po enačbi

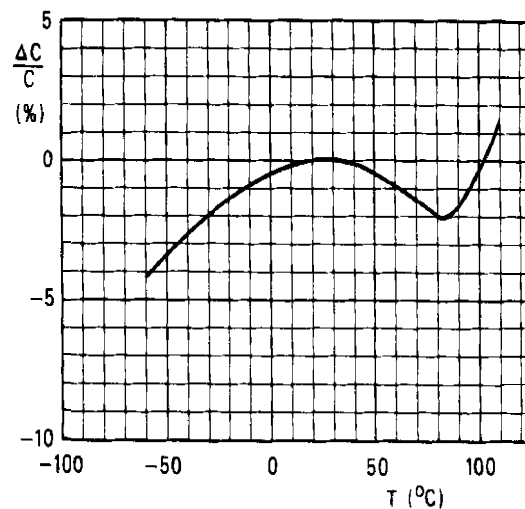
$$C(T) = C_{20} \left(1 + \frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_T \right) \quad (4.35)$$

Enostavna je tudi izpeljava povprečnega temperaturnega koeficienta na temperaturnem intervalu $T_2 - T_1$ (SI 4.13)

$$TK_C = \frac{\frac{\Delta C}{C}}{\Delta T} = \frac{\frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_{T_2} - \frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_{T_1}}{\left(1 + \frac{\Delta C}{C_{20}} \Big|_{T_1} \right) (T_2 - T_1)} \quad (4.36)$$

Včasih proizvajalci podajajo izmerjene diagrame $C/C_{20}(T)$. Temperaturni koeficient je v tem primeru določen z izrazom

$$TK_C = \frac{\frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_2} - \frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_1}}{\frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_1} (T_2 - T_1)} \quad (4.37)$$



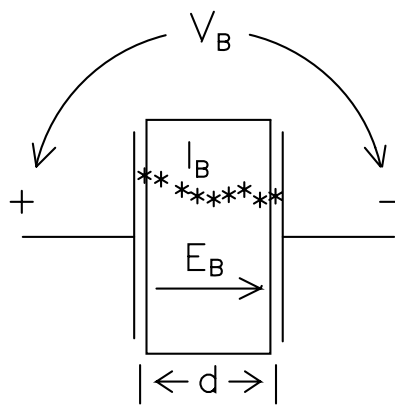
SI 4.13 Temperaturna odvisnost kapacitivnosti – graf $\Delta C/C_{20}(T)$

4.2.7 PREBOJ KONDENZATORJA

Pri dovolj visoki napetosti pride v kondenzatorju do preboja: tok med elektrodama začne naglo naraščati ! Ustrezni napetosti pravimo prebojna napetost (Breakdown Voltage) in jo označimo običajno kot V_B ali včasih tudi kot BV .

Prebojna napetost je odvisna od lastnosti dielektrika v kondenzatorju (SI 4.14) : dielektrične trdnosti E_B [V/mm], ki predstavlja maksimalno električno poljsko jakost, ki jo dielektrik še prenese brez degradacije oz. preboja, ter od debeline dielektrika d . Prebojna napetost V_B je tedaj določena z izrazom

$$V_B = E_B d \quad (4.38)$$



SI 4.14 Preboj kondenzatorja

Dielektrične trdnosti za nekatere pogostejše dielektrike prinaša Tabela 2. Pri tem je potrebno omeniti, da so izmerjene dielektrične trdnosti odvisne tudi od časa trajanja električne obremenitve : čim daljši je čas napetostne obremenitve , tem nižjo dielektrično trdnost izmerimo! Zato je potrebno vedno navesti poleg izmerjenih vrednosti dielektrične trdnosti tudi čase, za katere to velja. V Tabela 2 podane vrednosti veljajo za kratkotrajnejše obremenitve materiala v razredu nekaj minut. Ustrezne vrednosti dielektrične trdnosti pri dolgotrajnejših napetostnih obremenitvah so lahko znatno nižje !

Tabela 2 Dielektrične trdnosti nekaterih dielektrikov (čas napetostne obremenitve: [min])

Dielektrik	Dielektrična trdnost E_B [kV/mm]
zrak	3
transformatorsko olje	10
stekla,keramike	20
plastični dielektriki	250

1. Preboj v dielektriku

Resničen dielektrik ni niti idealen izolator niti idealno homogen material, zato pri višjih napetostih vedno tečejo neki majhni toki po določenih poteh (defekti, nečistoče itd.) skozi dielektrični material.

Pri visokih napetostih zaradi sprva relativno visokih upornosti tudi ti nizki toki lahko povzročijo na teh poteh prevajanja močna lokalna segrevanja in s tem močno povišane lokalne temperature. To lahko vodi do lokalne ionizacije materiala in s tem do nastanka novih nosilcev naboja. Toki se v teh poteh prevajanja zato še povečajo, s tem se spet povišajo lokalno segrevanje in temperature, pride do generacije novih nosilcev naboja itd. Ta samoregenerativni proces ima za končno posledico termični pobeg oz. preboj v dielektriku -toki neomejeno naraščajo, rezultirajoče segrevanje povzroči običajno uničenje elementa.

Opisana prevajanja in s tem preboj se stimulirajo tudi z različnimi zunanji vplivi. Prebojna napetost se zato v splošnem zmanjša :

- pri povišanju temperature ambienta (zaradi znižanja specifične upornosti)
- pri povišanju vlage ambienta (zaradi višje prevodnosti površinskega sloja kot posledica absorpcije 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)

2. Korona

Soroden pojav preboju kondenzatorja je korona: pri vf signalih visokih napetostnih amplitud pride zaradi visokih električnih poljskih jakosti E do ionizacije zračnih mehurčkov v kondenzatorju ali v okolnem zraku. Pojav imenujemo korona in se javlja v obliki sevanja, svetlenja in cvrčanja. Korona nastopa zlasti ob ostrih metalnih robovih ("špicah") v kondenzatorju, kjer so zaradi majhnih krivinskih radijev električna polja še zlasti visoka. Korona ima lahko za posledico sežig dielektrika, taljenje metalnih plasti in s tem uničenje kondenzatorja. Korono preprečujemo predvsem s kvalitetnejšimi dielektriki brez zračnih mehurčkov ter z odpravo omenjenih ostrih robov v strukturi.

4.3 ZNAČILNOSTI KONDENZATORSKIH DRUŽIN

Različne kondenzatorske družine nosijo ime običajno po vrsti dielektrika, ki nastopa v danem kondenzatorju, z izjemo elektrolitskih kondenzatorjev, ki se imenujejo po materialu anode. Kondenzatorje lahko tako razvrstimo v naslednje osnovne kondenzatorske družine:

1. Papirni kondenzatorji
2. Plastični kondenzatorji
3. Keramični kondenzatorji
4. Sljudni kondenzatorji
5. Stekljeni kondenzatorji
6. Zračni kondenzatorji
7. Elektrolitski kondenzatorji
8. Specialni kondenzatorji

V nadaljevanju bo podan pregled osnovnih lastnosti in aplikacij glavnih kondenzatorskih družin. Podani številčni podatki imajo le informativni značaj in predstavljajo tipične vrednosti, ki jih najdemo v modernejših priročnikih.

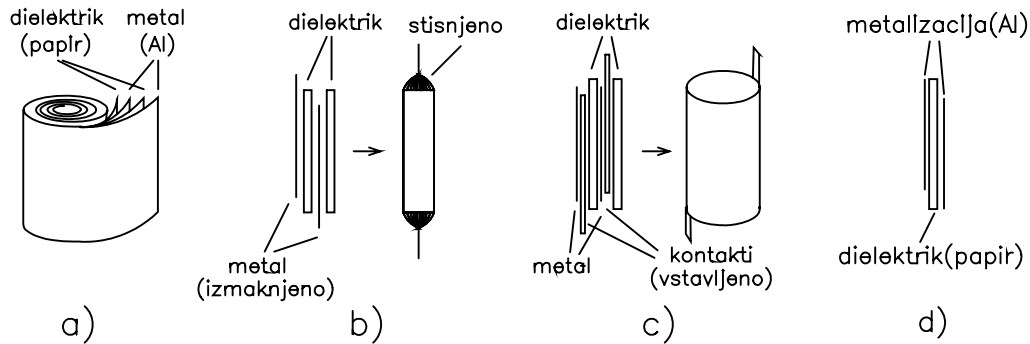
4.3.1 PAPIRNI KONDENZATORJI

Papirni kondenzatorji so najstarejša, klasična kondenzatorska družina. Vseeno jih zaradi določenih lastnosti srečujemo tudi še danes v nekaterih elektronskih vezjih. Njihova obravnava pa bo poučna tudi zato, ker srečamo če tu vse osnovne principe, ki se izkoriščajo tudi v modernejših kondenzatorskih družinah.

Strukture papirnih kondenzatorjev so prikazane na Sl 4.15. Dielektrik je v tem primeru poseben kondenzatorski papir ($d = 5 \div 25 \mu\text{m}$), ki je običajno zaradi zmanjšanja higroskopičnosti dodatno impregniran z mineralnimi olji ali voski. To prinese višje prebojne napetosti, vendar tudi nekoliko višje izgube $\text{tg}\delta$.

Pri nemetalizirani izvedbi so elektrode izvedene v obliki tankih metalnih folij, običajno iz aluminija Al, tipične debeline $d = 5 \mu\text{m}$. Strukturo navitega nemetaliziranega papirnega kondenzatorja dobimo z navijanjem lahko večjega števila izmenjujočih se metalnih in dielektričnih folij (Sl 4.15a). Kontakte srečamo v dveh izvedbah, podobno kot velja tudi pri vseh ostalih vrstah navitih kondenzatorjev:

- **izmaknjene folije** (Sl 4.15b): v tem primeru je 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** (Sl 4.15c): 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.



SI 4.15 Struktura papirnih kondenzatorjev(a), izmaknjeni(b) in vstavljene(c) kontakti ter metalpapirni kondenzator(d)

Lastnosti papirnih kondenzatorjev so odvisne zlasti od gostote papirja in njegove impregnacije. Dielektričnost je tipično $\epsilon_r = 3 \div 6$, upada s frekvenco in ima majhen pozitiven temperaturni koeficient TK_ϵ . Izgube znašajo tipično $\text{tg} \delta (50\text{Hz}, 25 \div 60^\circ\text{C}) = 30 \div 60 \cdot 10^{-4}$ (srednje dobro), rastejo s temperaturo in frekvenco. Frekvenčni obseg je nizek (do 1kHz). Izolacijska upornost je odvisna od vlage in temperature, pri sobni temperaturi znaša tipično $10^{+4} \text{ M}\Omega/\text{mF}$ (srednje dobro). Temperaturni koeficient kapacitivnosti znaša tipično $TK_C (20 \div 60^\circ\text{C}) = 50 \div 200 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Prebojna napetost V_B upada s temperaturo (večje izgube in s tem segrevanje). Enosmerna V_B je $2 \div 3$ krat višja od izmenične, ker pride pri izmeničnem delovanju do ionizacije mehurčkov zraka, ki so vedno prisotni v papirju in med folijami, ioni zažigajo papir in metal, pride do uničenja.

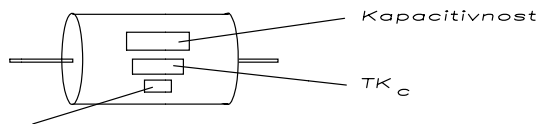
Označevanje je izvedeno podobno kot pri uporabi z barvnimi kolobarji po enaki barvni kodi (SI 4.16). Odčitavanje se začne pri kolobarju, ki leži najbližje robu ali vrhu kondenzatorja. Prvi dve barvi oz. številki podajata kapacitivnost v [pF], tretja multiplikator, četrta tolerance in peta, z dvojnimi razmahom, nazivno napetost.

Uporaba papirnih kondenzatorjev se v elektroniki vse bolj zmanjšuje, ker jih nadomeščajo kvalitetnejši plastični kondenzatorji. Vseeno jih še srečamo, kadar so zahteve nizke tako glede lastnosti kot cene, npr. v telefoniji, energetski elektroniki, v raznih električnih strojih, za korekcijo faktorja moči, v industrijski elektroniki itd.

Metalpapirni kondenzatorji so posebna vrsta papirnih kondenzatorjev, pri katerih je ločena metalna folija nadomeščena s tanko metalizirano plastjo na papirju (SI 4.15d), ki se jo običajno nanese z naprejanjem kovin Al ali Zn v vakuumu. Debelina metalizacije znaša tipično $2 \div 6 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, plastna upornost pa okrog 1Ω . Ta izvedba ima izboljšane lastnosti:

- zaradi odprave zračnih mehurčkov ne more priti do ionizacije in s tem do zažiga papirja, posledica je višja dopustna napetost oz. manjše dimenzije kondenzatorja, zaradi tanjših plasti
- avtoregeneracija: na mestu, kjer zaradi nekega defekta pride do lokalnega preboja, tanka metalizacija zaradi lokalnega segrevanja enostavno izpari, defektno mesto samo sebe izolira. To je mogoče zaradi zelo tankih metaliziranih plasti, medtem ko v primeru ločene metalne folije prej pride do zažiga papirja in uničenja kondenzatorja.

A) OZNAKE, PODANE S ČRKAMI IN ŠTEVILKAMI NA OHIŠJU

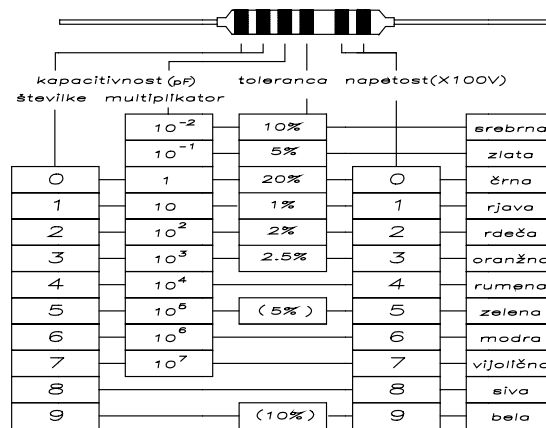


Tolerance, podane s črko:

M	K	J	H	G	E	F	D
±20%	±10%	±5%	±2.5%	±2%	±1.25%	±1%	±0.5%
T	S	R	P				
-20%	+100%	-20%	+50%	-20%	+30%	-0%	+100%

B) OZNAKE Z BARVNO KODO

I. CILINDRICNI KONDENZATORJI: BARVNI KOLOBARJI

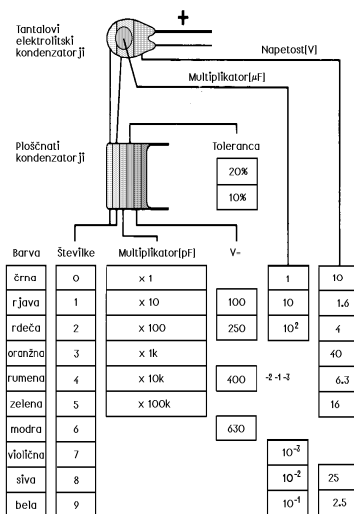


II. PLOŠČNATI (DISK) KONDENZATORJI:

BARVNE PIKE (ENAKA KODA KOT PRI KOLOBARJIH)



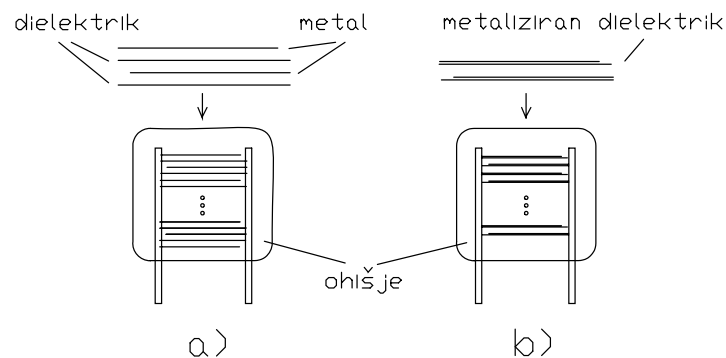
C) TANTALOVI ELEKTROLITSKI IN PLOŠČNATI KONDENZATORJI



SI 4.16 Označevanja kondenzatorjev

4.3.2 PLASTIČNI KONDENZATORJI

Dielektriki v plastičnih kondenzatorjih so različni organski plastični materiali z odličnimi dielektričnimi lastnostmi. Po strukturi obstajajo naviti plastični kondenzatorji, podobno kot pri papirnih (SI 4.15a) ter blok kondenzatorji, pri katerih se zloga lističe folij (SI 4.17). Podobno kot je bilo opisano če pri papirnih kondenzatorjih, obstajata pri blok kondenzatorju nemetalizirana (SI 4.17a) in metalizirana (SI 4.17b) izvedba z omenjenimi prednostmi. Struktura se nahaja v kovinskem ohišju, zalita v primeren material (epoksidna smola).



SI 4.17 Struktura blok kondenzatorja v nemetalizirani(a) in metalizirani(b) izvedbi

V splošnem so plastični kondenzatorji kvalitetnejši od papirnih pa tudi ostalih vrst kondenzatorjev glede izolacijske upornosti, izgub $\text{tg}\delta$, časovne konstante, frekvenčnega obsega itd. Slabši so le glede volumske kapacitivnosti [pF/cm^3] proti nekaterim drugim vrstam kondenzatorjev (elektrolitski, keramični). Vse to uvršča plastične kondenzatorje med profesionalne elemente za zahtevnejšo elektroniko.

V nadaljevanju bo podan pregled važnejših plastičnih kondenzatorskih družin.

4.3.2.1 Stirofleksni kondenzatorji

Poleg imena stirofleks (Siemens) srečamo za ta plastični dielektrični material še druga imena, npr. polistiren (Philips) ali polistirol. Stirofleks je gladka, prozorna folija odličnih dielektričnih lastnosti. Odlikuje jo visoka izolacijska upornost $10^{+17} \div 10^{+19} \Omega\text{cm}$, nizke izgube $\text{tg}\delta = 1 \div 10 \cdot 10^{-4}$ ter majhen, linearen in negativen temperaturni koeficient $\text{TK}_C = -100 \div -200 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, majhna dielektrična absorpcija $0.02 \div 0.1\%$, nizka absorpcija vlage pod $0.1\%/\text{dan}$, visoka dielektrična trdnost $E_B = 275 \text{ kV}/\text{mm}$, zmerna dielektričnost $\epsilon_r = 3.75$ in visoka časovna stabilnost, kar se doseže z umetnim staranjem. Slabost stirofleksa pa je, da ga ne moremo metalizirati.

Stirofleksni kondenzatorji imajo izbor nazivnih vrednosti po lestvicah od E12 do E96, konstanten in negativen temperaturni koeficient $\text{TK}_C = -150 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, visoko izolacijsko upornost $10^{+6} \text{ M}\Omega/\text{mF}$, nazivne napetosti V_n od 25V do 1600V, frekvenčni obseg nad 100MHz, neobčutljivi na vlago, nizke izgube $\text{tg}\delta = 1 \div 10 \cdot 10^{-4}$ ($f = 100\text{Hz} \div 10\text{kHz}$), naraščajo pri νf ,

izredno veliko časovno konstanto $RC > 10^{+5}$ s (za $C > 1\text{mF}$).

Stirofleksni kondenzatorji se pogosto uporabljajo v elektronskih vezjih, kadar so zahtevane visoka časovna stabilnost, majhne izgube pri ω , nizek TK_C itd. Srečamo jih v oscilatorskih vezjih, v ω in medfrekvenčnih filtrih, v integratorjih z velikimi časi integracije, za temperaturno kompenzacijo (negativen TK_C) npr. v kombinaciji s tuljavami s feritnimi jedri (pozitiven TK_L) za stabilizacijo resonančne frekvence oscilatorjev itd.

4.3.2.2 Poliestrski kondenzatorji

Včasih srečamo za ta dielektrik tudi ime polietilentereftalat(Philips) ali hostaphan(Siemens). V splošnem ima poliester nekaj slabše dielektrične lastnosti kot stirofleks, vendar ima pomembno prednost, da ga je mogoče metalizirati. Zato tu obstajata nemetalizirana in metalizirana izvedba s svojimi prednostmi, ki so bile podane če pri papirnih kondenzatorjih. Poliestrske kondenzatorje srečamo v elektronskih napravah za široko potrošnjo, v impulznih vezjih, kot vezne kondenzatorje, v filtrih itd. Obstajajo tudi posebne visokonapetostne izvedbe do 25 kV za uporabo v visokonapetostnih vezjih in napravah kot npr. zakasnilne linije v TV, visokonapetostni filtri in multiplikatorji itd.

4.3.2.3 Polikarbonatni kondenzatorji

Drugo ime za ta material je tudi makrofol(Siemens). Polikarbonat je dielektrik z odličnimi lastnostmi: stabilen do visokih temperatur(125°C), nizke izgube $\text{tg}\delta$, visoka izolacijska upornost, visoka dielektrična trdnost. Glavna slaba lastnost polikarbonata pa je visoka občutljivost na vlago. Obstoja metalizirana izvedba, ki ji pri visokonapetostnih kondenzatorjih dodajo še impregniran papir.

Uporaba teh kondenzatorjev je zaradi visoke občutljivosti na vlago omejena v široki potrošnji in jih zato srečamo predvsem v specialni opremi, ki je zaščitena pred vlago (npr. vesoljska, vojaška).

4.3.2.4 Polipropilenski kondenzatorji

Polipropilen je dielektrik odličnih lastnosti: zmerna dielektričnost $\epsilon_r = 2.2$, nizke izgube $\text{tg}\delta < 10 \cdot 10^{-4}$, dobra temperaturna in časovna stabilnost, visoka maksimalna temperatura delovanja (100°C), visoka dielektrična trdnost $E_B = 350 \text{ kV/mm}$, neobčutljivost na vlago (absorbicija $< 0.1\%$ / dan), nizek negativen $TK_C (-250 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C})$, visoka izolacijska upornost ($10^{+5} \text{ M}\Omega/\text{mF}$). Polipropilen je tudi primeren dielektrik za kondenzatorje za velike moči, če ga impregniramo s sintetičnimi olji.

Polipropilenski kondenzatorji obstajajo v nemetalizirani in metalizirani izvedbi, z Zn (Al ni primeren). Debeline folij so $4 \div 25 \mu\text{m}$.

Uporaba polipropilenskih kondenzatorjev je v stalnem porastu. Glavne prednosti proti drugim tipom kondenzatorjev za delo pri višjih frekvencah so majhni volumni polipropilenskih kondenzatorjev in njihovo odlično prenašanje visokih periodičnih in enkratnih napetostnih pulzov.

4.3.2.5 Polisulfonski in teflonski kondenzatorji

Obema vrstama kondenzatorjev je skupno, da so, poleg ostalih dobrih lastnosti, to zlasti kondenzatorji, primerni za delo na visokih temperaturah. Osnovne podatke teh dveh kondenzatorskih družin prinaša Tabela 3.

Tabela 3 Lastnosti polisulfonskih in teflonskih kondenzatorjev

Dielektrik	Polisulfon	Teflon
Temp. obseg	$-55 \div +150^{\circ}\text{C}$	$-55 \div +200^{\circ}\text{C}$
TK_C	$+ 30 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$+ 60 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
$\text{tg}\delta$	$< 15 \cdot 10^{-4}$	$< 10 \cdot 10^{-4}$
Izolacijska upornost	$100 \text{ M}\Omega/\text{mF}$ (150°C)	$100 \text{ M}\Omega/\text{mF}$ (250°C)

Kot se vidi iz podatkov v Tabela 3, gre za izredno kvalitetne kondenzatorje. Izbor nazivnih vrednosti je v obeh primerih po lestvici E6.

S stališča uporabe so to torej visokokvalitetni, profesionalni elementi, ki so, še zlasti teflonski, tudi precej dragi. Uporabljajo se zato predvsem v posebnih primerih, kadar cena ni odločilni faktor, zahtevane pa so odlične lastnosti kondenzatorja pri visokih temperaturah, zlasti glede nizkih izgub $\text{tg}\delta$, visoke izolacijske upornosti in stabilnosti ter zanesljivosti elementa.

4.3.3 KERAMIČNI KONDENZATORJI

Dielektrik kondenzatorja je v tem primeru specialna keramika. Keramične kondenzatorje delimo glede na lastnosti uporabljene keramike v tri razrede: I, II in III.

4.3.3.1 Keramični kondenzatorji razreda I:

V tem primeru je dielektrik stabilna keramika na osnovi spojin titana Ti z magnezijem Mg ali kalcijem Ca. Pri teh keramikah so lastnosti še stabilne: dielektričnost ϵ se s časom ne spreminja, odvisnost kapacitivnosti od temperature, napetosti itd. je majhna in linearna. Nekaj osnovnih podatkov za te keramike :

- $\epsilon_r = 5 \div 250$ (visoka specifična kapacitivnost, do 30pF/mm³)
- $\rho = 10^{+15} \div 10^{+8} \Omega\text{cm}$
- $\text{TK}_\epsilon = +130 \div -3000 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (linearen; primerno za temperaturno kompenzacijo !)
- $\text{tg}\delta \sim 10 \cdot 10^{-4}$ v širokem frekvenčnem območju (visok Q, dobre vf lastnosti !)
- $E_B = 4 \div 10 \text{ kV/mm}$
- dobra odpornost na temperaturo, vlago
- stabilni elementi, dolga življenjska doba

Uporaba: kjer potrebujemo stabilne kondenzatorje z majhnimi tolerancami, relativno majhne izgube oz. visok Q, različne TKC za temperaturne kompenzacije ter velike (vendar ne maksimalne) specifične kapacitivnosti.

4.3.3.2 Keramični kondenzatorji razreda II:

V tem primeru je dielektrik nestabilna keramika na osnovi spojin titana Ti in cirkonija Zr z barijem Ba ali stroncijem Sr (titanati, cirkonati Ba, Sr). Pri teh keramikah so dielektrične lastnosti če 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. Nekaj osnovnih lastnosti za te keramike :

- $\epsilon_r = 250 \div 15.000$ (veliko; zelo visoke specifične kapacitivnosti do 500pF/mm³)
- $\rho = 10^{+16} \Omega\text{cm}$
- TK_ϵ je nestabilen, nelinearen
- $\text{tg}\delta = 50 \div 500 \cdot 10^{-4}$
- $E_B = 4 \div 6 \text{ kV/mm}$ (za trajno delovanje: 2 kV/mm !)

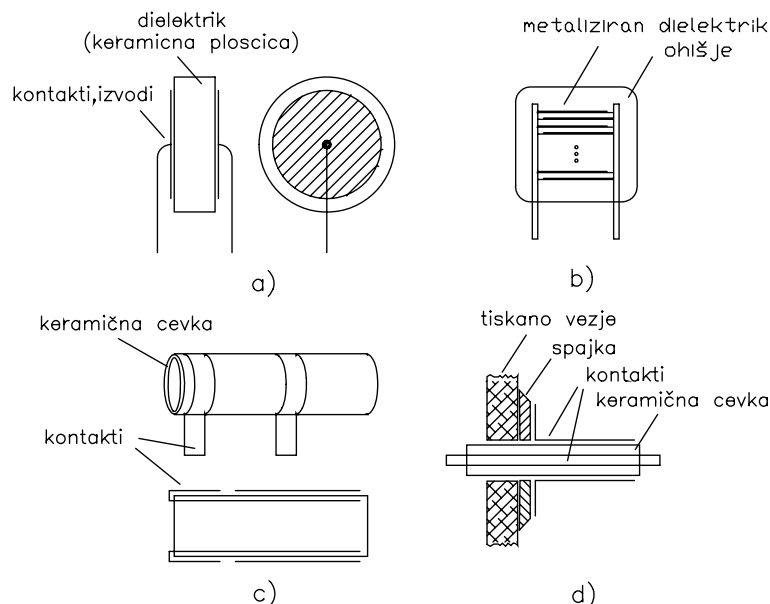
Uporaba: kjer rabimo zelo visoke specifične kapacitivnosti oz. majhne dimenzije, ostale lastnosti (visoke izgube, slaba stabilnost, velike tolerance itd.) pa niso kritične.

4.3.3.3 Keramični kondenzatorji razreda III:

V tem primeru nastopajo kot dielektriki specialne keramike z zelo veliko vrednostjo dielektrične konstante $\epsilon_r = 15.000 \div 10^{+5}$! Pri teh keramikah je struktura optimizirana le z enim samim ciljem: čim večja dielektričnost, ostalo ni važno. Posledica je zelo visoka specifična kapacitivnost teh kondenzatorjev do $1\text{nF}/\text{mm}^3$, v tem pogledu jih prekašajo edinole elektrolitski kondenzatorji ($1\mu\text{F}/\text{mm}^3$). Vendar so to zelo slabi kondenzatorji v vsakem drugem pogledu: zelo nestabilni, zelo visoke izgube $\text{tg}\delta$, zelo slaba paralelna upornost R_p itd.

Uporaba: kjer je osnovna zahteva zelo visoka specifična kapacitivnost oz. majhne dimenzije, glede ostalih lastnosti pa razmere niso kritične.

Nekaj tipičnih izvedb keramičnih kondenzatorjev prikazuje SI 4.18.



SI 4.18 Tipične izvedbe keramičnih kondenzatorjev: ploščični oz. disk(a), večplastni(b), cevasti(c) in skožni(d)

4.3.4 SLJUDNI KONDENZATORJI

V tem primeru je dielektrik kondenzatorja sljuda (MICA), ki je po svoji zgradbi naravni silikat aluminija Al z dodatki atomov K, Mg, O, H. Glede na podrobnosti kemijske zgradbe obstoji mnogo vrst sljud, najbolj znani in kvalitetni sta muskovit in flogopit iz Indije. Osnovna značilnost teh dielektričnih materialov je slojevita struktura in posledica tega, da se izredno dobro cepijo, do $0.25\mu\text{m}$ tankih lističev. Poleg tega je sljuda naravni dielektrični material izrednih lastnosti, ki tudi danes v marsikaterem pogledu v laboratoriju še niso bile dosežene. Nekaj osnovnih dielektričnih lastnosti sljude :

- $\epsilon_r = 7 \div 8$, izredno stabilna v širokem temperaturnem ($-55 \div +300^\circ\text{C}$) in frekvenčnem (50 Hz \div 5 GHz) intervalu !
- $\rho > 10^{+15} \Omega\text{cm}$, stabilna do visokih temperatur; omogoča izdelavo kondenzatorjev z visoko izolacijsko upornostjo
- $\text{TK}_\epsilon \sim 10^{-5}/^\circ\text{C}$ (praktično zanemarljivo !)
- $\text{tg}\delta < 2 \cdot 10^{-4}$ (zelo nizke izgube !)
- $E_B = 40 \div 200 \text{ kV/mm}$ (odlične prebojne lastnosti; pri višjih temperaturah ima sljuda najvišjo prebojno trdnost od vseh poznanih materialov !)

Izvedbe sljudnih kondenzatorjev:

1. Večplastni sljudni kondenzatorji: (podobno, kot če opisano pri plastičnih kondenzatorjih)

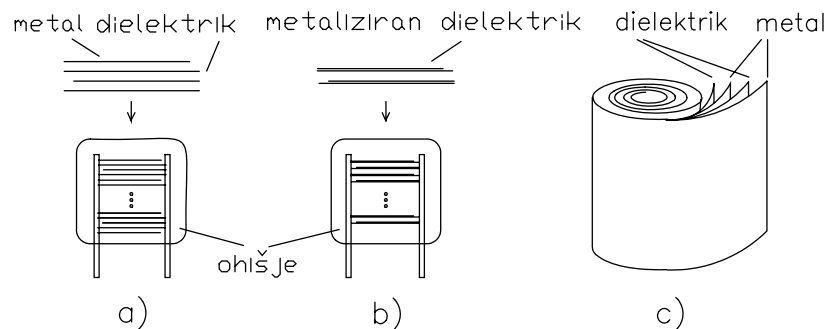
a) nemetalizirana oz. folijska izvedba (Sl 4.19a): V posamezne bloke se zlagajo tanki lističi sljude in metala (Cu ali Sn); bloki se lahko povezujejo vzporedno (za višje kapacitivnosti) ali zaporedno (za višje delovne napetosti) dalje v večje bloke.

b) metalizirana izvedba (Sl 4.19b): Nemetalizirana izvedba ni najbolj zanesljiva, ker prihaja pri uporabi zaradi vedno prisotnih vibracij itd. do premikov lističev in s tem do odpovedi. Zato je primernejša metalizirana izvedba, pri kateri je na ploščico sljude nanešena, običajno z naparevanjem srebra Ag v vakuumu, tanka plast metalizacije. S tem pridobimo še manjši volumen kondenzatorja zaradi tanjših plasti in višje delovne napetosti, ker zaradi odsotnosti mehurčkov zraka ne pride do prezgodnje ionizacije.

2. Naviti sljudni kondenzatorji (Sl 4.19c):

Najprej se sljuda strga na drobne, tanke lističe, ki se nato primešajo kondenzatorski papirni masi, ki služi kot vezivo. Tako dobimo izboljššan dielektrični material - sljudni kondenzatorski papir, ki se nato, kot je bilo že opisano pri papirnih kondenzatorjih, navija v navite sljudne kondenzatorje. Na ta način združimo dobre lastnosti sljude z dobro tehnologijo navitih papirnih kondenzatorjev !

Uporaba: sljudni kondenzatorji so zelo natančni, zanesljivi in stabilni elementi, posebej primerni za uporabo pri visokih frekvencah in v ekstremnih temperaturno-klimatskih pogojih. So najprimernejši kondenzatorji, kadar poraba prostora in cena nista kritični.



SI 4.19 Sljudni kondenzatorji: nemetalizirana(a) in metalizirana(b) izvedba ter naviti(b)

4.3.5 STEKLENI KONDENZATORJI

Dielektrik je v tem primeru tanek trak borsilikatnega stekla, debeline okrog $10\mu\text{m}$. Borsilikatno steklo ima podobne, vendar v splošnem slabše, dielektrične lastnosti kot sljuda. Nekaj lastnosti tega materiala :

- $\epsilon_r = 4$
- $\rho > 10^{+10}\Omega\text{cm}$
- $\text{TK}_\epsilon = 100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$
- $\text{tg}\delta \sim 10 \cdot 10^{-4}$
- $E_B = 20 \text{ kV/mm}$

Dobre lastnosti borsilikatno steklo ohrani do visokih temperatur (200°C), visokih napetosti in visokih frekvenc (100Mhz).

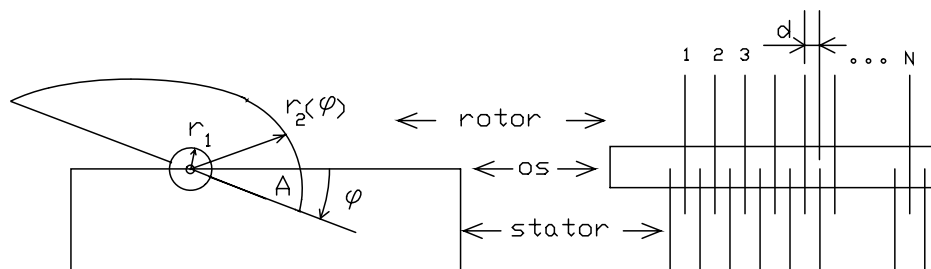
Izvedbe: zlaganje steklenih in metalnih (Al) lističev, podobno kot pri sljudnih nemetaliziranih kondenzatorjih. Nato postavijo tak blok na visoko temperaturo, da se steklo zatali in s tem kondenzator hermetizira.

Uporaba: steklene kondenzatorje srečamo kot cenejši a manj kvaliteten nadomestek (višje izgube, nižje frekvence) za sljudne kondenzatorje.

4.3.6 ZRAČNI KONDENZATORJI

V tem primeru je med ploščami zrak, včasih pa še kakšen drug dielektričen material. Običajno ima kondenzator dve vrsti plošč: nepomične (stator) in pomične (rotor). Tipičen predstavnik te vrste kondenzatorjev je prikazan na SI 4.20.

Tipične vrednosti temperaturnega koeficienta kapacitivnosti TK_C pri zračnih kondenzatorjih znašajo okrog $100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, izgube $\text{tg}\delta$ pa okrog $30 \cdot 10^{-4}$.



SI 4.20 Zračni vrtilni kondenzator

Osnovni podatek pri takem kondenzatorju je zunanja oblika plošč rotorja, kar določa odvisnost kapacitivnosti od kota zavrtitve. Te zvezo lahko hitro izpeljemo, če najprej določimo prirastek površine pri infinitezimalnem zasuku rotorja (Sl 4.20)

$$dA = \frac{1}{2} r_2 r_2 d\varphi - \frac{1}{2} r_1 r_1 d\varphi = \frac{1}{2} (r_2^2 - r_1^2) d\varphi \quad (4.39)$$

Prirastek kapacitivnosti pri tej zavrtitvi je podan z izrazom

$$dC = 2N\varepsilon \frac{dA}{d} = \frac{\varepsilon N}{d} (r_2^2 - r_1^2) d\varphi \quad (4.40)$$

Iz gornje zveze, en(4.40), lahko dobimo običajno bolj zanimivo obratno zvezo, ki podaja obliko rotorskih plošč, posredno podano v obliki $r_2(\check{c})$, v odvisnosti od potrebne odvisnosti kapacitivnosti od zavrtitve $C(\check{c})$

$$r_2(\varphi) = \sqrt{r_1^2 + \frac{d}{N\varepsilon} \frac{dC}{d\varphi}} \quad (4.41)$$

Primer: Določite obliko rotorskih plošč za logaritemski kondenzator :
 $\log(C/C_0) = K \check{c}$!

Rešitev: Podano karakteristiko kondenzatorja diferenciramo po \check{c}

$$\frac{1}{C(\ln 10)} \frac{dC}{d\varphi} = K \quad (4.42)$$

oziroma

$$\frac{dC}{d\varphi} = K(\ln 10) 10^{K\varphi} \quad (4.43)$$

Potrebna oblika rotorskih plošč je torej

$$r_2(\varphi) = \sqrt{r_1^2 + K(\ln 10) \frac{d}{N\varepsilon} 10^{K\varphi}} \quad (4.44)$$

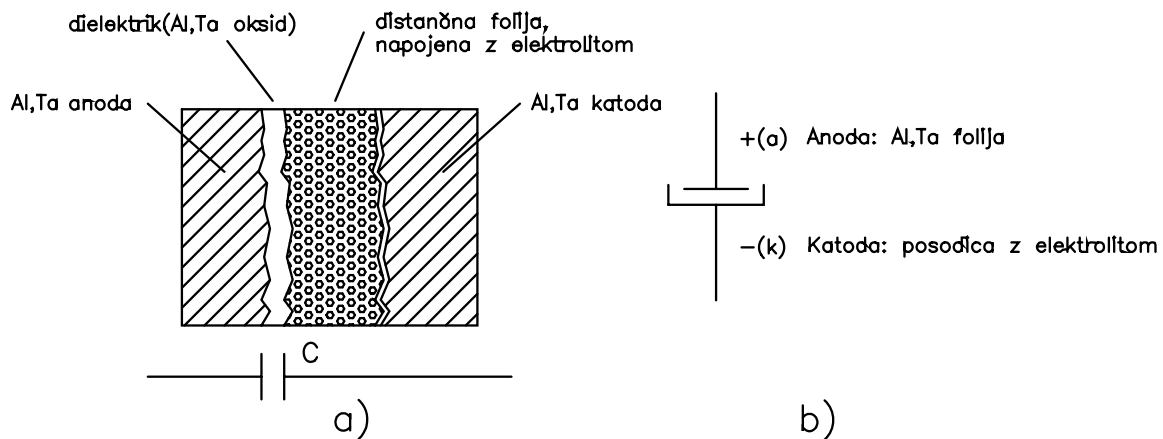
4.3.7 ELEKTROLITSKI KONDENZATORJI

Elektrolitske kondenzatorje razvrstimo, glede na različne značilnosti, na več načinov :

- po materialu anode: aluminijevi (Al), tantalovi (Ta)
- po vrsti elektrolita: mokri (electrolitic), suhi (solid)
- po značaju polarizacije: polarni, bipolarni (nepolarni)

Kot bomo videli, v splošnem velja, da so tantalovi kondenzatorji kvalitetnejši od aluminijevih, suhi kondenzatorji kvalitetnejši od mokrih in seveda, kvalitetnejši kondenzatorji so vedno dražji.

Struktura elektrolitskega kondenzatorja in električni simbol elementa sta prikazana na Sl 4.21. Dielektrik kondenzatorja je v tem primeru oksid na anodi (Al_2O_3 oz. Ta_2O_5). Ker je površina anode zaradi večje površine oz. kapacitivnosti hrapava, je zaradi boljšega električnega kontakta vstavljena med oksidirano anodo in katodo posebna distančna folija, prepojena z dobro prevodnim elektrolitom, zaradi prisotnosti visokih koncentracij vodikovih (H^+) in elektrolitovih (EI^-) ionov.. Elektrolit v elektrolitskem kondenzatorju ima torej vlogo nekakšne tekoče elektrode, ki prodre v vse pore hrapave anode prav do tankega oksida.



SI 4.21 Struktura in simbol elektrolitskega kondenzatorja

4.3.7.1 ALUMINIJEVI ELEKTROLITSKI KONDENZATORJI

Najprej bo na kratko opisana tehnologija izdelave teh elementov, ker bo to omogočilo razumevanje nekaterih njihovih lastnosti. Podobne tehnološke postopke srečamo tudi pri izdelavi tantalovih kondenzatorjev. Nato bodo podane osnovne značilnosti, omejitve in uporaba teh elementov.

1. Mokri aluminijevi elektrolitski kondenzatorji

Izhodiščni material pri izdelavi mokrih Al elektrolitskih kondenzatorjev je tanek metalni Al trak debeline $d \sim 100 \mu\text{m}$.

Zaradi višje specifične kapacitivnosti najprej povečamo hrapavost površine anode. Pri Al kondenzatorjih izvedemo to z jedkanjem Al folije v fosforni kislini. Pri tantalu, ki je če sam po sebi porozen, se poveča površino še s sintranjem finega Ta prahu na površino. Tako se dosežejo precejšnja povečanja površine (do 100x), vendar se pri tem povečajo tudi izgube $\text{tg}\delta$ (do 4x).

Izdelava dielektrika poteka z anodno oksidacijo materiala anode (SI 4.22a). V elektrolitu se pod vplivom pozitivne napetosti formiranja na anodi V_F tvori na obeh površinah metalnega traku ustrezen oksidni film (Al_2O_3 oz. Ta_2O_5). Končna debelina filma d je sorazmerna napetosti formiranja V_F

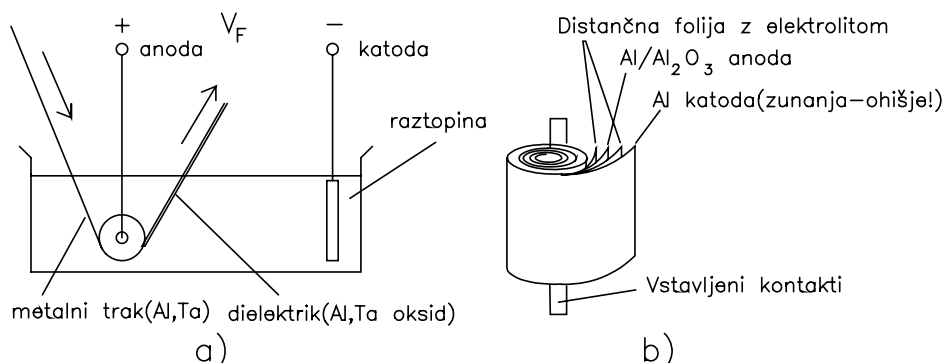
$$d = K_F V_F \quad (1)$$

kjer je K_F konstanta formiranja in podaja debelino filma na 1V pritisnjene napetosti formiranja. Pri Al znaša $K_F = 1.5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m/V}$, pri Ta pa $K_F = 1.0 \cdot 10^{-3} \mu\text{m/V}$.

Tudi med normalnim delovanjem elementa pride lahko zaradi previsokih napetosti še do nadaljnje oksidacije v elektrolitu kondenzatorja. To bi povzročilo zaradi večje debeline dielektrika zmanjšanje kapacitivnosti, pri reakciji nastali plini pa bi lahko uničili element. Zato proizvajalci običajno kot eno od omejitev podajo maksimalno delovno napetost, ki je za določen varnostni faktor k nižja od napetosti formiranja V_F danega kondenzatorja.

Varnostni faktor pri običajnih kondenzatorjih znaša $k=0.8$, pri profesionalnih, kjer je zahtevana večja zanesljivost, pa je ta faktor manjši, tipično $k=0.2-0.6$.

Od tu dalje je postopek izdelave podoben kot je bilo to če opisano pri papirnih kondenzatorjih (SI 4.22b): navijanje Al in distančnih folij, prepojenih z elektrolitom. Kontakti so izvedeni z vstavljanjem kontaktnih metalnih trakov na ustrezna mesta anode in katode. Zadnji postopek, enkapsulacija, je običajno izveden z zalivanjem v ustrezne smole, ki mu včasih sledi še zapiranje v kovinsko ohišje.



SI 4.22 Izdelava dielektrika z anodno oksidacijo(a) in navijanje folij(b)

a) Polarni elektrolitski kondenzator:

Pri tej vrsti kondenzatorja je polarizacija pritisnjene napetosti važna: na anodo mora biti vedno pritisnjen pozitivni pol napetosti, sicer pride do uničenja elementa.

Struktura polarnega kondenzatorja je prikazana na SI 4.23a. Prikazani so tudi v elektrolitu prisotni ioni: veliki negativni ioni elektrolita (El^-) ter mali prodorni pozitivni ioni vodika (H^+).

V primeru pravilne polarizacije (pozitivni pol napetosti na anodi) se ne zgodi nič posebnega: ker je normalna delovna napetost vedno omejena pod napetost formiranja, veliki ioni elektrolita ne prodrejo skozi oksid do anode, toka ni, reakcije oz. oksidacije ni.

V primeru nepravilne polarizacije (negativni pol napetosti na anodi) mali prodorni H^+ ioni prodirajo skozi oksid do anode in se tam razelektrijo, izloča se torej plin vodik na anodi, oksid odstopa od anode, zaradi odkritih mest pride do naglega povečanja toka in izločanja plina, končna posledica je uničenje elementa.

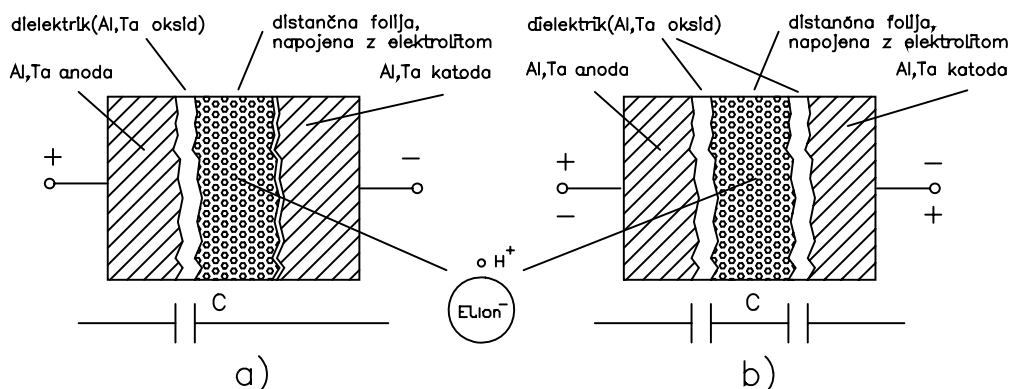
V resnici je tudi katoda zaščitena pred agresivnim elektrolitom s tankim oksidom ($V_F = 2V$). Zato pri napetostih pod to vrednostjo tudi pri nepravilni polarizaciji se ne pride do reakcije. Vendar proizvajalci običajno zaradi varnosti ne dopuščajo uporabe te možnosti.

b) Bipolarni elektrolitski kondenzator:

V tem primeru polarizacija napetosti ni važna. Strukturo bipolarnega oz. nepolarnega elektrolitskega kondenzatorja je prikazana na SI 4.23b.

Struktura je enaka kot v prejšnjem primeru z eno samo razliko: tudi katoda je tu oksidirana, z isto napetostjo formiranja kot anoda! če torej v tem primeru pritisnemo na anodo negativni pol napetosti, se ne zgodi nič posebnega: katoda je če oksidirana, ioni ne morejo prodreti skozi oksid, toka in reakcije ni. Tak kondenzator je torej neobčutljiv za vse enosmerne ali izmenične napetosti ne glede na njihovo polarizacijo, seveda dokler so nižje od napetosti formiranja.

Slaba stran bipolarnih kondenzatorjev pa je za faktor 2 nižja kapacitivnost v primerjavi z ustreznim polarnim kondenzatorjem (SI 4.23).

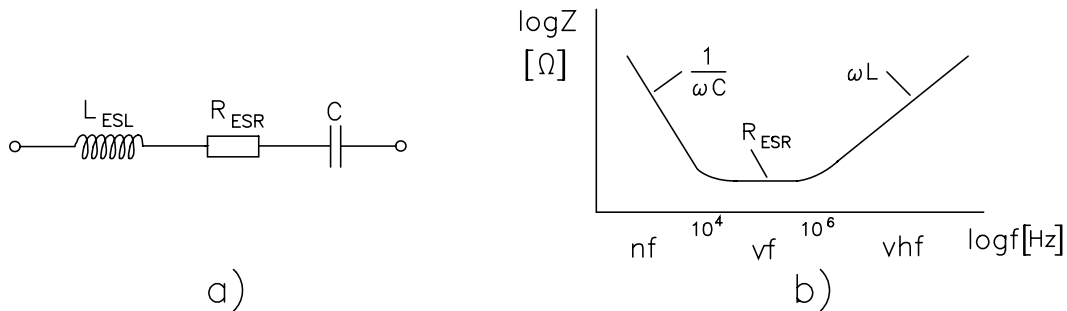


SI 4.23 Struktura polarnega(a) in bipolarnega(b) elektrolitskega kondenzatorja

c) Nadomestno vezje mokrega Al elektrolitskega kondenzatorja

Običajno tvorimo nadomestno vezje tega elementa z dodatkom dveh parazitnih elementov (SI 4.24a):

- ekvivalentna serijska upornost R_{ESR} : podaja ohmske upornosti dovodov, kontaktov, metalne Al folije, elektrolita itd. Tipične vrednosti so $10^{-2} \div 10^{+2} \Omega$, odvisno od izvedbe.
- ekvivalentna serijska induktivnost L_{ESL} : podaja induktivnosti dovodov, navite strukture metalne Al folije itd.



SI 4.24 Nadomestno vezje(a) in impedanca(b) mokrega Al elektrolitskega kondenzatorja

d) Impedanca mokrega Al elektrolitskega kondenzatorja

Impedanca resničnega mokrega Al elektrolitskega kondenzatorja je torej podana z enačbo

$$\begin{aligned}\hat{Z} &= R_{ESR} + j\omega L_{ESL} + \frac{1}{j\omega C} \\ &= R_{ESR} - j\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_{ESL}\right)\end{aligned}\quad (4.45)$$

Absolutna vrednost impedance je tedaj enaka

$$Z = \sqrt{R_{ESR}^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_{ESL}\right)^2}\quad (4.46)$$

Frekvenčni potek absolutne impedance lahko torej v splošnem razdelimo na tri področja(SI 4.24b):

- **nf področje ($\omega \rightarrow 0$)** : $Z \sim 1/\omega C$

Kondenzator se pri nizkih frekvencah obnaša torej kot idealen kondenzator, vplivov ostalih parazitnih elementov še ni. Tipična gornja frekvenčna meja tega normalnega področja delovanja je okrog 10kHz.

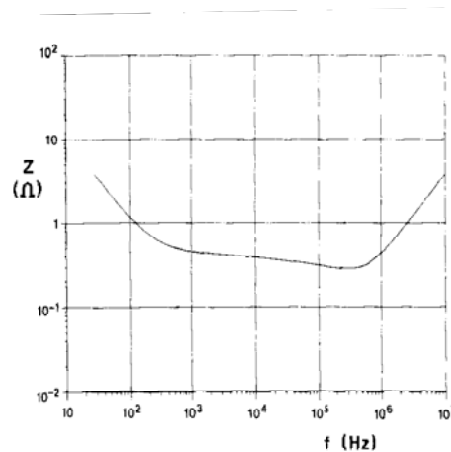
- **vf področje (ω velik)** : $Z \sim R_{ESR}$

Kondenzator pri visokih frekvencah izgubi svoje uporabne lastnosti. Tipična gornja frekvenčna meja tega področja je okrog 1MHz.

- **vhf področje (ω zelo velik) :** $Z \sim \omega L_{ESL}$

Kondenzator pri zelo visokih frekvencah popolnoma izgubi svoje uporabne lastnosti, saj lahko prevzame celo induktivni značaj, lastnosti so tedaj določene s parazitno induktivnostjo L_{ESL} .

Izmerjeni diagrami $Z(f)$ resničnih elementov (SI 4.25) od opisane slike precej odstopajo, odvisno od konkretne kondenzatorske strukture. Pri nekaterih kondenzatorjih npr. srednje področje (R_{ESR}) sploh ne pride do izraza. Izmerjeni diagrami odstopajo lahko tudi zato, ker v resnici parametri v nadomestnem vezju niso konstantni, ampak se spreminjajo zaradi najrazličnejših vplivov. Tako npr. R_{ESR} v splošnem upada s frekvenco in temperaturo. Kapacitivnost C pogosto kaže upadanje s frekvenco ter naraščanje s temperaturo in nazivno napetostjo. Induktivnost L_{ESL} pogosto kaže rahlo naraščanje s temperaturo.



SI 4.25 Tipičen frekvenčni potek absolutne impedance resničnega mokrega Al elektrolitskega kondenzatorja

e) Prečni tok

Prečni tok I_p oz. tok puščanja (leakage) elektrolitskega kondenzatorja je enosmerni tok, ki teče skozi resnični elektrolitski kondenzator zaradi priključene enosmerne napetosti. Pri elektrolitskih kondenzatorjih je ta tok lahko zelo velik, v splošnem narašča s temperaturo in upada s časom od priključitve enosmerne napetosti (SI 4.26a). Vzroki za to so opisani pri regeneraciji oksida. Tipične vrednosti prečnih tokov podaja Tabela 4.

Tabela 4 Prečni toki

$C_n V_n [\mu A s]$	$I_p [\mu A]$	
	tip I (profesionalni)	tip II (neprofesionalni)
≤ 1000	$\leq 10^{-2} C_n V_n$ oz. $1 \mu A^1$	$\leq 5 \cdot 10^{-2}$ oz. $5 \mu A^1$
> 1000	$\leq 6 \cdot 10^{-3} C_n V_n + 4 \mu A$	$\leq 3 \cdot 10^{-2} C_n V_n + 20 \mu A$

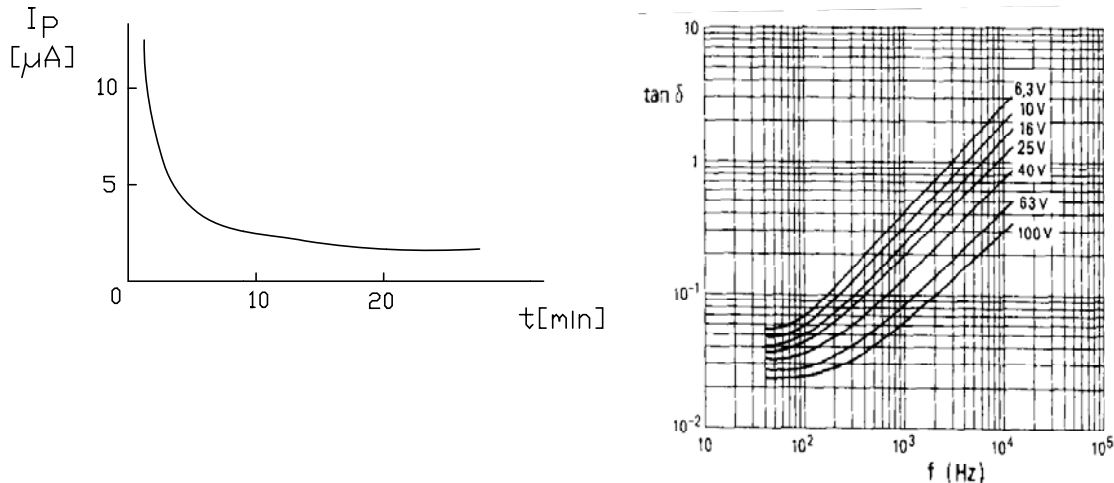
Enote: $C_n [\mu F]$, $V_n [V]$

¹⁾ - večja vrednost od obeh !

f) Regeneracija oksida

Če nek elektrolitski kondenzator dalj časa ni bil pod napetostjo, se njegov dielektrik (oksid) lahko raztopi v agresivnem elektrolitu kondenzatorja oz. se razformira. Tak elektrolitski kondenzator seveda nima predpisanih lastnosti, zlasti registriramo visoke prečne toke I_p .

Tak kondenzator lahko običajno uspešno regeneriramo kar sami enostavno s tem, da ga priključimo na nazivno napetost, pri čemer pride do ponovne formacije oksida. Pri tem lahko v začetku toki močno narastejo, tudi do 100x višjih vrednosti kot so v Tabela 4, pa bo tak kondenzator še vedno uporaben, če le toki v predpisanem času upadejo na normalne vrednosti !



SI 4.26 Upadanje prečnega toka s časom(a) in frekvenčni potek izgubnega faktorja pri mokrih Al elektrolitskih kondenzatorjih(b)

g) Omejitve električnih obremenitev

Omejitve glede toka : vsak elektrolitski kondenzator lahko pri neki aplikaciji obremenimo le z določeno maksimalno efektivno vrednostjo izmeničnih oz. valujočih (ripple) napetosti oz. tokov V_{rmax} oz. I_{rmax} . Te omejitve nastopijo zaradi segrevanja kondenzatorja in ustreznega odvajanja sproščanje toplote, kot opisuje enačba

$$P = I_r^2 R_{ESR} = \sigma A (T_c - T_a) \quad (4.47)$$

Proizvajalci določajo maksimalno dopustno vrednost valujočega toka I_{rmax} običajno z zahtevo, da povišanje temperature elektrolitskega kondenzatorje zaradi električne obremenitve ne sme presegati $\Delta T = 10^\circ C$! Tako proizvajalci podajajo kot eno izmed omejitev za dani kondenzator (tip, C_n , V_n itd) ter pogoje delovanja (f , T_a itd) ustrezni I_{rmax} . Predpisana obremenitev (I_{rmax}) pa se lahko tudi poviša, če uvedemo forsirano hlajenje.

Omejitve glede napetosti: nastopijo lahko zaradi dveh vzrokov

1) **segrevanje :** iz podobnih razlogov kot v prejšnjem primeru, zato velja

$$V_{rmax} = I_{rmax} R_{ESR} \quad (4.48)$$

- 2) **uničenje oksida** : totalna napetost (vsota enosmerne in izmenične napetosti) ne sme v nobenem trenutku preseči predpisane nazivne napetosti, določene z napetostjo formiranja oksida V_F in varnostnim faktorjem k (tipično $0.3 \div 0.8$)

$$V_n = k V_F \quad (4.49)$$

Opozorimo ponovno še na eno napetostno omejitev: pri polarnih kondenzatorjih ne sme nikoli priti do obratne polarizacije !

h) Tipične lastnosti mokrih Al elektrolitskih kondenzatorjev

Nazivne kapacitivnosti C_n so v intervalu $0.47\mu\text{F} \div 220\mu\text{F}$, vrednosti dobimo po tolerančnih lestvicah E3, E6. Nazivna vrednost C_n je običajno podana za enosmerne razmere pri $T = 25^\circ\text{C}$, in je običajno zapisana na ohišju elementa, kot tudi odstopanje (tolerance). Odstopanja kapacitivnosti so pri teh elementih pogosto v pozitivni smeri večja, npr. $-10/+30$, $-10/+50$, $-10/+100$. Vzrok je v tipičnih aplikacijah teh elementov (premoščanje, glajenje itd), kjer večja vrednost kapacitivnosti od nazivne predstavlja kvečjemu izboljšanje.

Zaradi strukture teh elementov (debelina oksida določena z napetostjo formiranja, ki določa nazivno napetost), obstaja med kapacitivnostjo in napetostjo neke družine določena omejitelna zveza, npr.

- družina nizkih kapacitivnosti: $C V < 500 \mu\text{As}$
- družina visokih kapacitivnosti: $C V < 25000 \mu\text{As}$

Izgubni faktor $\text{tg}\delta$ je zelo velik, tipično $10^{-2} \div 1$. Konkretni vrednosti so odvisne od tipa kondenzatorja (običajna delitev: I - profesionalni, II - splošni), delovnih pogojev (npr. f , T), nazivne napetosti in kapacitivnosti. V splošnem izgube neke kondenzatorske družine naraščajo z C_n , f ter upadajo z V_n , T . Tipičen frekvenčni potek izgub prikazuje Sl 4.26b.

i) Označevanje

Osnovni podatki kondenzatorja (C_n , V_n itd.) so običajno kar s črkami in številkami napisani na ohišju elementa. Tolerance kapacitivnosti so podane s črkami:

	K	M	Q	T	V
$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$-10/+30\%$	$-10/+50\%$	$-10/+100\%$	

Pri polarnih kondenzatorjih je anoda označena z znakom + ali črto, včasih pa tudi s serijo znakov $\rightarrow + \rightarrow + \rightarrow + \dots$, pri čemer puščica kaže v smeri proti anodi. Katoda je običajno vezana na ohišje.

Bipolarni kondenzatorji so označeni običajno z znakom + na anodi in na katodi. Včasih, če je prostor, pa še z napisom na ohišju: BIP ali krajše BP.

j) Uporaba

Mokri Al elektrolitski kondenzatorji se uporabljajo v elektronskih vezjih, kadar so zahtevane velike kapacitivnosti ob majhni porabi prostora, ostale lastnosti kondenzatorja pa niso važne. Tako te elemente srečamo v splošnih elektronskih vezjih in napravah kot npr. radio in TV, HIFI, splošne industrijske aplikacije itd. v vlogi filtrirnih, veznih, gladilnih, premoščevalnih, shranjevalnih itd. kondenzatorjev.

2. Suhi aluminijevi elektrolitski kondenzatorji

Suhi kondenzatorji so v splošnem modernejši elementi od mokrih in jih prekašajo v osnovnih kondenzatorskih lastnostih.

Struktura suhih kondenzatorjev je podobna strukturi mokrih: tudi v tem primeru gre za navite folije, le da je tu kot distančna folija namesto papirja uporabljena tkanina iz steklenih vlaken, elektrolit pa ni tekočina temveč prevodna pasta mangan nitrata. Ta suhi elektrolit določa glavne prednosti suhih kondenzatorjev - ker se suh elektrolit ne izsuši, so taki kondenzatorji stabilnejši. Poleg tega imajo te paste večjo prevodnost od mokrih elektrolitov, kar prinese nižjo ekvivalentno serijsko upornost R_{ESR} .

Osnovne lastnosti suhih kondenzatorjev v primerjavi z mokrimi so:

- relativno nizka odvisnost kondenzatorjevih lastnosti od temperature, zlasti okrog sobnih temperatur
- relativno dolga življenjska doba in doba skladiščenja
- relativno večji dopustni enosmerni toki ter toki polnjenja in praznjenja

Uporaba suhih Al elektrolitskih kondenzatorjev sega v podobna področja kot velja to za mokre in jih zato zamenjujejo, kadar so pogoji glede temperaturnih odvisnosti pa tudi ostalih lastnosti strožji. Podobno zamenjujejo tudi sicer kvalitetnejše a dražje tantalove suhe kondenzatorje, kadar zahteve niso prehude.

4.3.7.2 TANTALOVI ELEKTROLITSKI KONDENZATORJI

V splošnem velja pri elektrolitskih kondenzatorjih pravilo, da so tantalovi kondenzatorji boljši od aluminijevih, suhi boljši od mokrih in vedno so boljši kondenzatorji tudi dražji od slabših.

Struktura tantalovih (Ta) kondenzatorjev je podobna kot pri aluminijevih. Dielektrik je v tem primeru tantalov oksid Ta_2O_5 , ki ima dielektričnost $\epsilon_r = 30$ (Al_2O_3 le 8!), kar prinese ustrezno višje kapacitivnosti. Konstanta formiranja je pri tantalu $K_F = 1.0 \cdot 10^{-3} \mu m/V$ (50% nižja od Al!), kar pomeni pri enaki debelini oksida za 50% višjo V_F in s tem višjo V_n ; ali tudi obratno, pri isti V_n za 50% nižjo debelino oksida in s tem višjo kapacitivnost. Tantalov oksid je tudi kemijsko bolj stabilen od aluminijevega, kar omogoča uporabo agresivnejših, bolj koncentriranih elektrolitov, ki so zato bolj prevodni in ima tako element nižjo R_{ESR} . Tantalov oksid je zelo stabilen material tudi pri velikih temperaturnih spremembah, zato so tudi kondenzatorji s tem dielektrikom temperaturno zelo stabilni elementi s širokim temperaturnim obsegom delovanja ($-55 \div +125^\circ C$).

1. Mokri tantalovi elektrolitski kondenzatorji

Tehnološki postopek je v tem primeru podoben kot pri aluminijevih kondenzatorjih -anodna oksidacija Ta traku itd. (gl. Tehnologijo mokrih Al elektrolitskih kondenzatorjev!). Tu srečamo dve osnovni strukturi: naviti in ploščati (disk) mokri Ta elektrolitski kondenzatorji.

Naviti kondenzatorji imajo za anodo tanko ($10\mu\text{m}$) folijo Ta, ki je oksidirana, da dobimo dielektrik kondenzatorja. Distančna folija je tu papir enake debeline kot anoda. Kot elektrolit nastopa v tem primeru ali litijev klorid (nižje V_n) ali borna kislina (višje V_n). Katoda je spet Ta folija, neoksidirana pri polarnem kondenzatorju in oksidirana pri bipolarnem, iz enakih razlogov kot je bilo to razloženo že pri aluminijevih kondenzatorjih.

Tipične nazivne kapacitivnosti C_n te družine so $1\mu\text{F} \div 680\mu\text{F}$, nazivne napetosti V_n pa v intervalu $15\text{V} \div 150\text{V}$. Ploščati (disk) kondenzatorji imajo za anodo ploščico Ta. Površina in s tem kapacitivnost je tu še povečana (poleg naravne poroznosti Ta) s sintranjem finega Ta prahu na površini ploščice, kar ima za posledico visoke specifične kapacitivnosti (kapacitivnost na enoto volumna) te družine. Kot elektrolit se tu uporabljata žveplena kislina ali litijev klorid, ki oba omogočata zelo nizke R_{ESR} . Ohišje elementa, ki služi obenem kot katoda, mora biti vsaj na tistem delu, ki je v stiku z elektrolitom, iz srebra.

Tipične nazivne kapacitivnosti C_n te družine so $2,2\mu\text{F} \div 1200\mu\text{F}$, po tolerančni lestvici E6, nazivne napetosti V_n pa v intervalu $6,3\text{V} \div 125\text{V}$.

2. Suhi tantalovi elektrolitski kondenzatorji

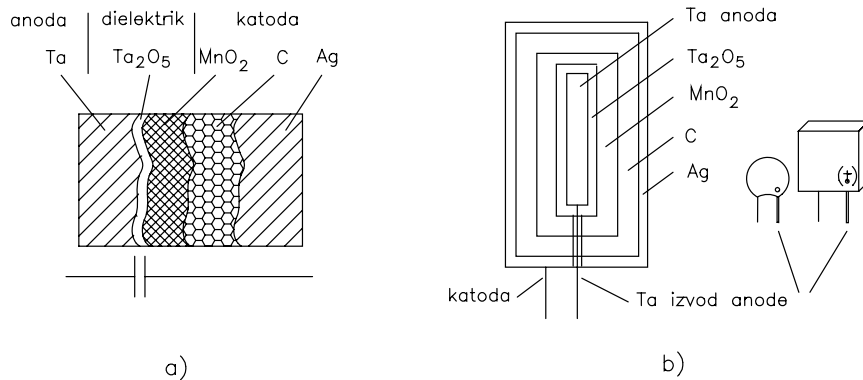
Včasih pravijo tem kondenzatorjem tudi trdni (solid) kondenzatorji, po trdnem polprevodniškem materialu MnO_2 , ki ga srečamo v tem elementu namesto elektrolita. Tako so v tem primeru vsi materiali kondenzatorja trdni (solid).

Anoda je pri teh kondenzatorjih ploščica ali žička iz tantala Ta, ki ji površino še povečajo s sintranjem finega Ta prahu na površino. Dielektrik je tudi tu izdelan z anodno oksidacijo anode.

Izdelava katode poteka v več korakih. Najprej se impregnira oksidirana anoda z manganom nitrata, ki se nato z oksidacijo pretvori v manganov oksid MnO_2 . Manganov oksid je sicer polprevodniški material, vendar ima zelo dobro prevodnost. Ta postopek se večkrat ponovi, vse dokler plast MnO_2 ni dovolj debela in prevodna. Končno se plast MnO_2 še ojači z dobro prevodno grafitno (C) in srebrno (Ag) prevleko in prispajka izvode.

Opisano strukturo tega elementa prikazuje sl.27a. Tak kondenzator torej sestavljajo sami zelo stabilni, temperaturno neobčutljivi materiali in zato je tak tudi element sam.

Končna zaščita elementa se doseže z zapiranjem v ohišje, ki je lahko metalno, plastično ali iz raznih epoksidnih smol. Tipične oblike teh elementov so kapljice ali ploščice (SI 4.27b).



SI 4.27 Struktura suhega Ta kondenzatorja(a) in tipične oblike ter oznake Ta kondenzatorjev(b)

Po osnovnih lastnostih so ti elementi podobni Al suhim elektrolitskim kondenzatorjem, le da so boljši a dražji. V splošnem so tudi boljši od Ta mokrih kondenzatorjev. Predvsem te elemente odlikuje v primerjavi z mokrimi Ta kondenzatorji sledeče:

- visoka kapacitivnost ob majhnem volumnu
- dobre vf lastnosti
- visoka temperaturna stabilnost
- nižji prečni toki ($0.5 \div 5 \mu\text{A}$) proti mokrim
- nižji izgubni faktor $\text{tg} \delta$, ki v splošnem raste s frekvenco in pada s temperaturo; tipično ima suhi Ta elektrolitski kondenzator $1 \mu\text{F}/35\text{V}$ izgube $\text{tg} \delta < 0.4$ ($f < 10\text{kHz}$)
- dolg čas skladiščenja in dolga življenjska doba
- tipični interval nazivnih kapacitivnosti C_n te družine je $0.1 \mu\text{F} \div 1000 \mu\text{F}$, nazivne napetosti V_n so v intervalu $6.3\text{V} \div 80\text{V}$, temperaturni obseg pa $-55^\circ\text{C} \div +85^\circ\text{C}$.

3. Označevanje Ta kondenzatorjev

- polariteta je pri polarnih kondenzatorjih označena z znakom + ali piko ob anodi, včasih pa je žični dovod anode debelejši (SI 4.27b). Pri Ta kondenzatorjih je treba še zlasti paziti, da ne pride do zamenjave polaritete, ker kondenzator nima varnostnega silikonskega čepka kot npr. Al elektrolitski kondenzatorji in zato nenadoma eksplodira.
- nazivne kapacitivnosti C_n , nazivne napetosti V_n , tolerance itd. se označujejo podobno kot ostali kondenzatorji

4. Uporaba

Tantalovi elektrolitski kondenzatorji se uporabljajo namesto Al elektrolitskih kondenzatorjev, kadar so zahtevane boljše lastnosti, višja cena pa ni ovira.

4.3.8 SPECIALNI KONDENZATORJI

V tem poglavju si bomo ogledali specialne kondenzatorje, ki jih srečamo v modernih elektronskih tehnologijah. Te tehnologije oz. vezja lahko razdelimo v naslednje družine:

- **hibridne tehnologije**, ki jih delimo glede na karakteristične debeline nastopajočih plasti na tankoplastne in debeloplastne tehnologije
- **monolitne tehnologije**, ki jih delimo glede na izhodiščni material običajno na silicijeve, galijarzenidne in druge tehnologije oz. vezja
- **tiskana vezja**, ki jih delimo na klasična tiskana vezja (Printed Circuit Board, PCB) ter moderna tiskana vezja s površinsko montažo (Surface Mounted Technology, SMT)

V teh vezjih lahko elementi nastopajo kot samostojne tabletki (čipi) za vgradnjo ali pa so organski, vgrajeni del vezja.

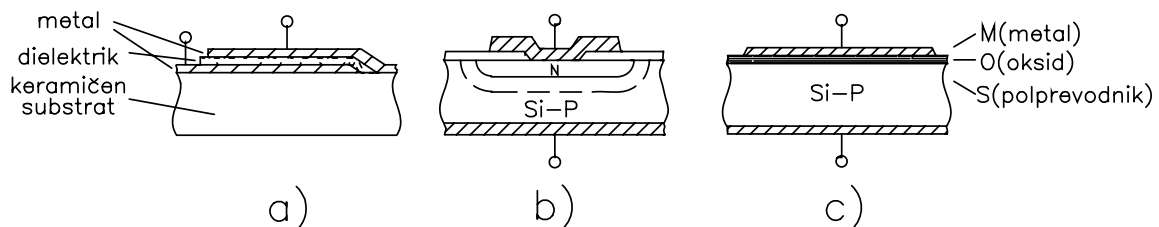
4.3.8.1 Kondenzatorji v hibridnih tehnologijah

a) Tankoplastni (SI 4.28a)

Z vakuumsko depozicijo (uporovno napajanje, napajanje z elektronskim topom ali naprševanje) nanese tanke metalne in dielektrične plasti na ustrezen substrat (keramika, safir, steklo). Debeline plasti so tu tipično v razredu $1\mu\text{m}$. Geometrija oz. topologija elementa je izdelana s fotolitografskimi metodami (osvetljevanje fotoresistov skozi ustrezne maske, razvijanje, jedkanje).

b) Debeloplastni

Struktura je v principu enaka kot pri tankoplastnih (SI 4.28a), le da je tu element izdelan s postopki tiskanja ustreznih metalnih in dielektričnih past. Debeline plasti so tu tipično v intervalu $10\mu\text{m} \div 100\mu\text{m}$.



SI 4.28 Struktura: a) tankoplastnega in debeloplastnega, b) PN spojnega in c) MOS kondenzatorja

4.3.8.2 Kondenzatorji v monolitnih tehnologijah

V tem primeru je substrat monokristal ustreznega polprevodnika (Si, GaAs itd.). Tu srečamo dve osnovni kondenzatorski strukturi: PN spojni in MOS kondenzator.

a) PN spojni kondenzator (Sl 4.28b)

V tem primeru je dielektrik kondenzatorja kar osiromašeno področje PN spoja v zaporni smeri, ki je osiromašeno prostih nosilcev in se zato obnaša kot dielektrik. Zaradi zahteve po zaporni polarizaciji PN spoja je to polaren kondenzator.

Kondenzatorska struktura je izdelana 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.

Ti kondenzatorji zaradi odvisnosti širine osiromašenega področja od zaporne napetosti kažejo upadanje kapacitivnosti z napetostjo (varycap)

$$C(V) = \varepsilon \frac{A}{d(V)} = \frac{k}{V^n} \quad (4.50)$$

kjer je ε dielektričnost polprevodnika ($\varepsilon_r/\text{Si}=12$). Potenca n , ki podaja upadanje kapacitivnosti z zaporno napetostjo, je odvisna od tipa PN spoja ($n=1/2$ za stopničast spoj oz. $1/3$ za linearen spoj, za ostale tipe PN spojev pa vmes).

Tipični toki puščanja so pri teh kondenzatorjih v razredu $50\text{nA}/\text{mm}^2$, tipičen izgubni faktor pa $\text{tg}\delta \sim 100 \cdot 10^{-4}$.

b) MOS kondenzator (Sl 4.28c) :

Dielektrik tega kondenzatorja je običajno silicijev oksid SiO_2 tipične debeline $0.1\mu\text{m} \div 1\mu\text{m}$, gornja elektroda je metalna (Al, Au), spodnja elektroda pa dopiran polprevodnik.

Kapacitivnost tega kondenzatorja lahko enostavno izračunamo s pomočjo običajnega izraza za kapacitivnost

$$C = \varepsilon \frac{A}{d_{\text{ox}}} \quad (4.51)$$

kjer je d_{ox} debelina oksida ($\varepsilon_r/\text{SiO}_2=4$).

REFERENCE

- 1) G.W.A.Dummer, "FIXED CAPACITORS", Sir Pitman & Sons, London, 1956.
- 2) L.W.Matsch, "CAPACITORS, MAGNETIC CIRCUITS, AND TRANSFORMERS", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA, 1964.
- 3) J.Furlan, osebni zapiski
- 4) N.Keršič, "OSNOVE ELEKTROTEHNIKE I", Založba FER, Ljubljana, 1988.
- 5) C.A.Harper, "Handbook of Components for Electronics", McGraw-Hill, 1977.
- 6) O.Zinke, "Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe", Springer-Verlag, Berlin, 1965.
- 7) M.Kaufman, A.H.Seidman, "Handbook for Electronics Engineering Technicians", McGraw-Hill, 1984.
- 8) F.W.Sears, M.W.Zemansky, "UNIVERSITY PHYSICS", ADDISON-WESLEY, 1964.
- 9) č.A.Spasojevič, Z.V.Popovič, "Elektrotehnički i elektronski materijali", Naučna knjiga, Beograd, 1979.
- 10) S.Ristič, "ELEKTRONSKE KOMPONENTE", I.DEL, Univerzitet u Nišu, 1985.
- 11) "Capacitors for use in electronics", Iskra Semič, III/1991.
- 12) "KONDENZATORJI ZA ELEKTRONIKO", Iskra Semič, VIII/1991.
- 13) "Film capacitors", PHILIPS Data handbook, Components and materials, Book C22, 1986.
- 14) "Capacitors for Power Electronics", Siemens, 1986/87.
- 15) "STYROFLEX Capacitors, Polypropylen Capacitors", Siemens, Data Book 1990/91.
- 16) "Metallized Film Capacitors", Siemens, Data Book 1989/90.
- 17) "Kondenzatorji za energetska elektronika", Iskra Semič, III/1990.
- 18) "Elementi za odpravo radiofrekvenčnih motenj", Iskra Semič, IX/1990.
- 19) "EMC Filters, EMP Protection Units", Siemens, Data Book 1988/89.
- 20) "Motorski kondenzatorji tip KNM", "Nizkonapetostni močnostni kondenzatorji za izboljšanje faktorja moči tip KNK", "Kondenzatorji za svetilke tip KNF", Iskra Semič, IX/X 1990.
- 21) "Ceramic Capacitors", PHILIPS Data handbook, Components and materials Book C15, 1986.
- 22) "Ceramic Capacitors", Siemens Data Book, 1986/87.
- 23) "Ceramic Multilayer Capacitors", Siemens, Short Form Catalog 1989/90.
- 24) "Variable capacitors", PHILIPS Data Handbook, Components and materials Book C7, 1985.
- 25) "Aluminijevi elektrolitski kondenzatorji", Iskra Tovarna elektrolitov Mokronog, 1985/86.
- 26) "Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren", SIEMENS Datenbuch, 1974/75.
- 27) "Electrolytic and solid capacitors", PHILIPS Data handbook, Components and materials Book C14, 1986.
- 28) "High-Performance Electrolytic Capacitors SIKOREL", SIEMENS, 1985/86.
- 29) "Tantalum Chip Capacitors SMD", SIEMENS, 1987.