
Elektronske komponente in senzorji

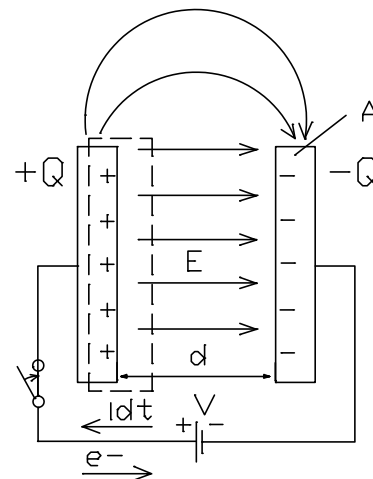
Kondenzatorji

Kondenzatorji

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

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

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



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

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

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

Dielektrik

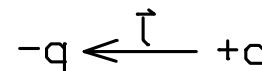
Material med ploščama kondenzatorja:

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

Polarizacija dielektrika – polarne molekule

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

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



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

Polarizacija dielektrika – nepolarne molekule

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

$$\vec{p} = 0$$



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



$$-q \xleftarrow{\tau} +q$$

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

Polarizacija

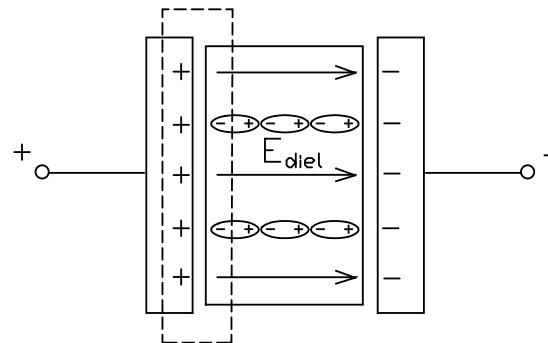
Polarizacija dielektrika opisuje stopnjo urejenosti električnih dipolov v dielektriku:

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

Kondenzator z dielektrikom

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

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

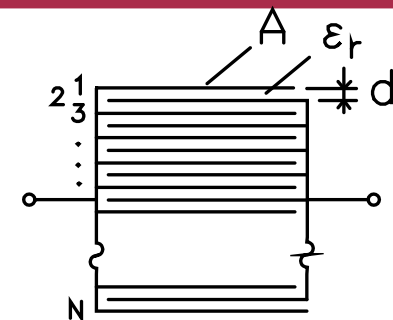


$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Kapacitivnost resničnih kondenzatorjev

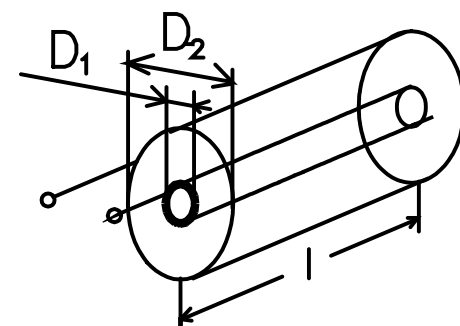
Ploščati (blok) kondenzator
z N dielektričnimi plastmi

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



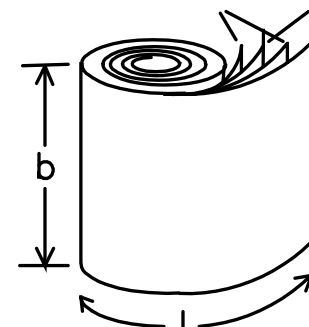
Cilindrični kondenzator

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



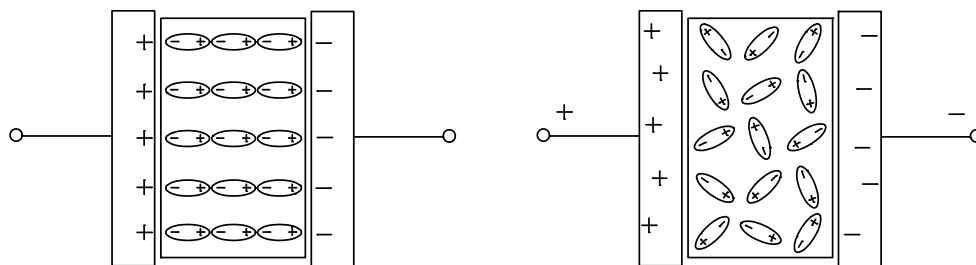
Naviti cilindrični kondenzator

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



Dielektrična absorpcija

- C nabijemo $\rightarrow$ kratak stik $\rightarrow U_C = 0 \rightarrow$ čez čas $\rightarrow U_C \neq 0$
- Vzrok za to je **dielektrična absorpcija**



Dielektrična absorpcija se meri kot % začetne polnilne napetosti, ki se po izpraznitvi ponovno pojavi.

Najvišja:

Elektrolitski(Al): do 15 %, (Ta) 2-3 %

Srednja:

poliesterski (PET) in sljuda: 0,5 %,

keramični (razred 2, npr. X7R), stekleni: 0,6-1,0 %.

Najnižja: polipropilenski (PP) in polistirenski (PS) kondenzatorji: < 0,02 %, keramični (razred 1, npr. C0G/NP0): < 0,6 %, Zračni in vakuumski: 0

Dielektrična absorpcija

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

Dielektrična absorpcija

Povzroči:

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

Lastnosti resničnega kondenzatorja

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

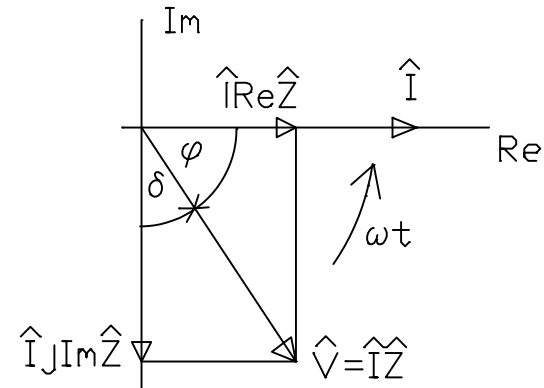
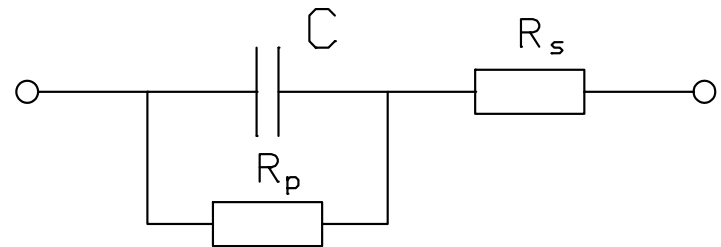
NF opis resničnega kondenzatorja

Nadomestno vezje s parazitnima upornostima, paralelno R_p in serijsko R_s

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

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

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



NF opis resničnega kondenzatorja

- **R_p** kondenzatorja podaja izgube v dielektriku oz. segrevanje kondenzatorja:
 - ohmske izgube oz. segrevanje zaradi izolacijskih tokov skozi dielektrik (frekvenčno neodvisen prispevek)
 - polarizacijske izgube oz. segrevanje zaradi rotacije dipolov pri AC signalih (frekvenčno odvisen prispevek)

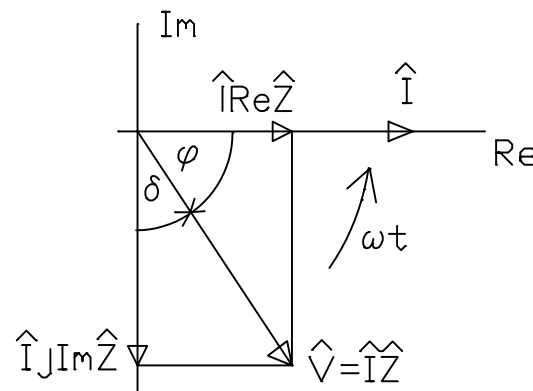
$R_p \approx G\Omega$ (upada s frekvenco).
- **R_s** kondenzatorja podaja izgube oz. segrevanje kondenzatorja zaradi ohmskih upornosti v resničnem kondenzatorju (upornost dovodnih žic, kontaktne upornosti, upornosti običajno tankih metalnih folij ali plasti). $R_s \approx 100\text{m}\Omega$.

Izgube v resničnem kondenzatorju

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

Izgubni faktor $\tan\delta$
določa izgube oz.
segrevanje
kondenzatorja
(ang. loss factor,
dissipation factor)

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



Analitična določitev izgub

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

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

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

Izgubni kot δ je majhen:

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

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

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

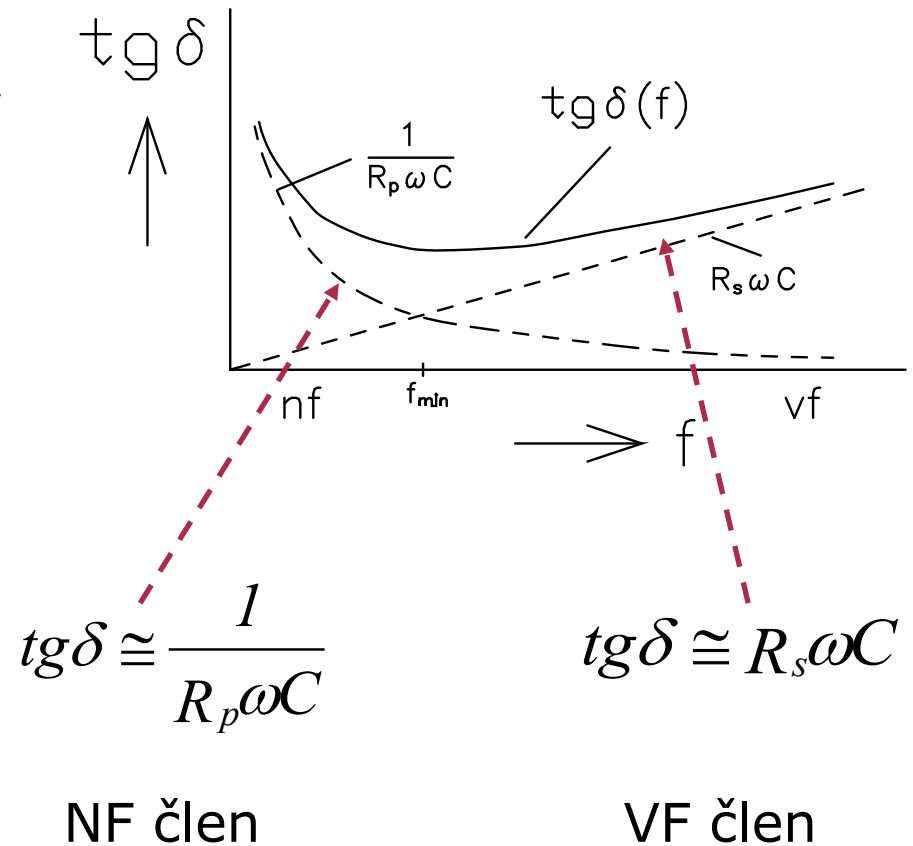
Frekvenční potek $\text{tg}\delta$

$$R_p \gg R_s$$

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

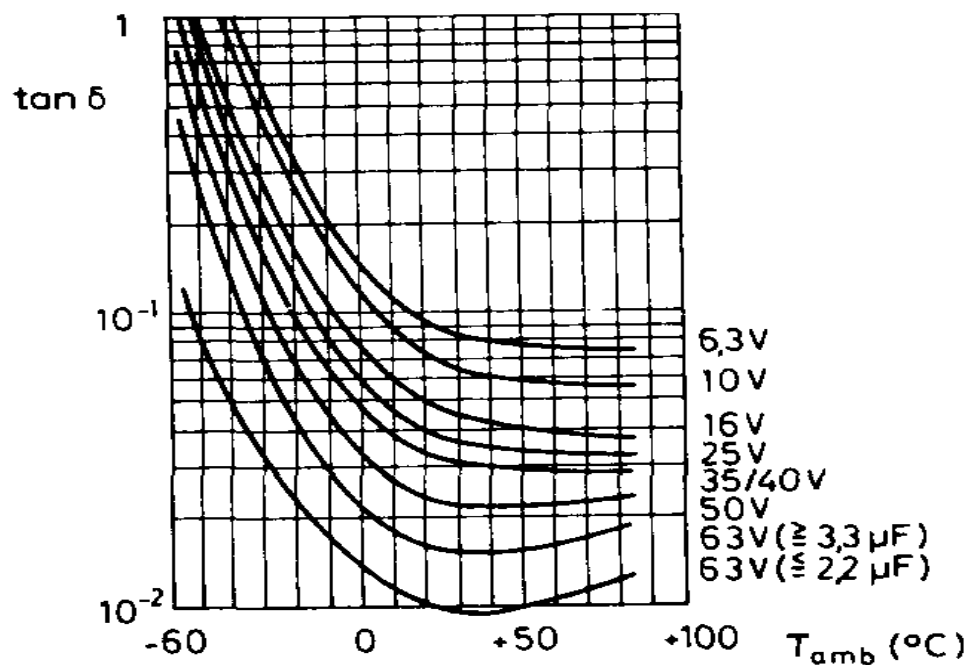
$$\text{tg}\delta = R_s\omega C + \frac{1}{R_p\omega C} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)$$

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



Temperaturni potek $\text{tg}\delta$

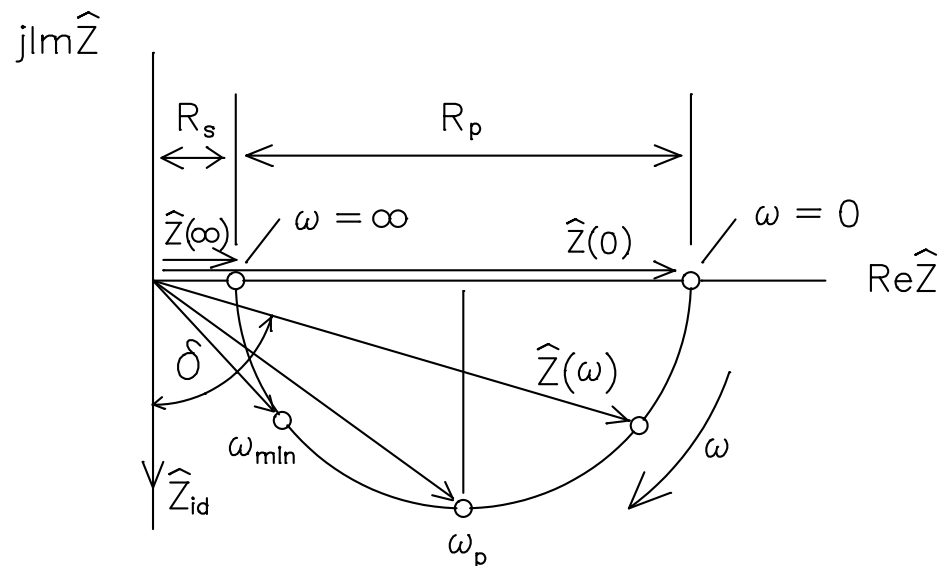
- S temperaturo se spreminjajo vsi elementi nadomestnega vezja R_S , R_p in C
- Izmerjeni diagrami: $\text{tg}\delta(T)|_f$ oz. $\text{tg}\delta(f)|_T$



VF analiza impedance kondenzatorja

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

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



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

VF analiza impedance kondenzatorja

- Potek impedance v treh očitnih primerih:

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

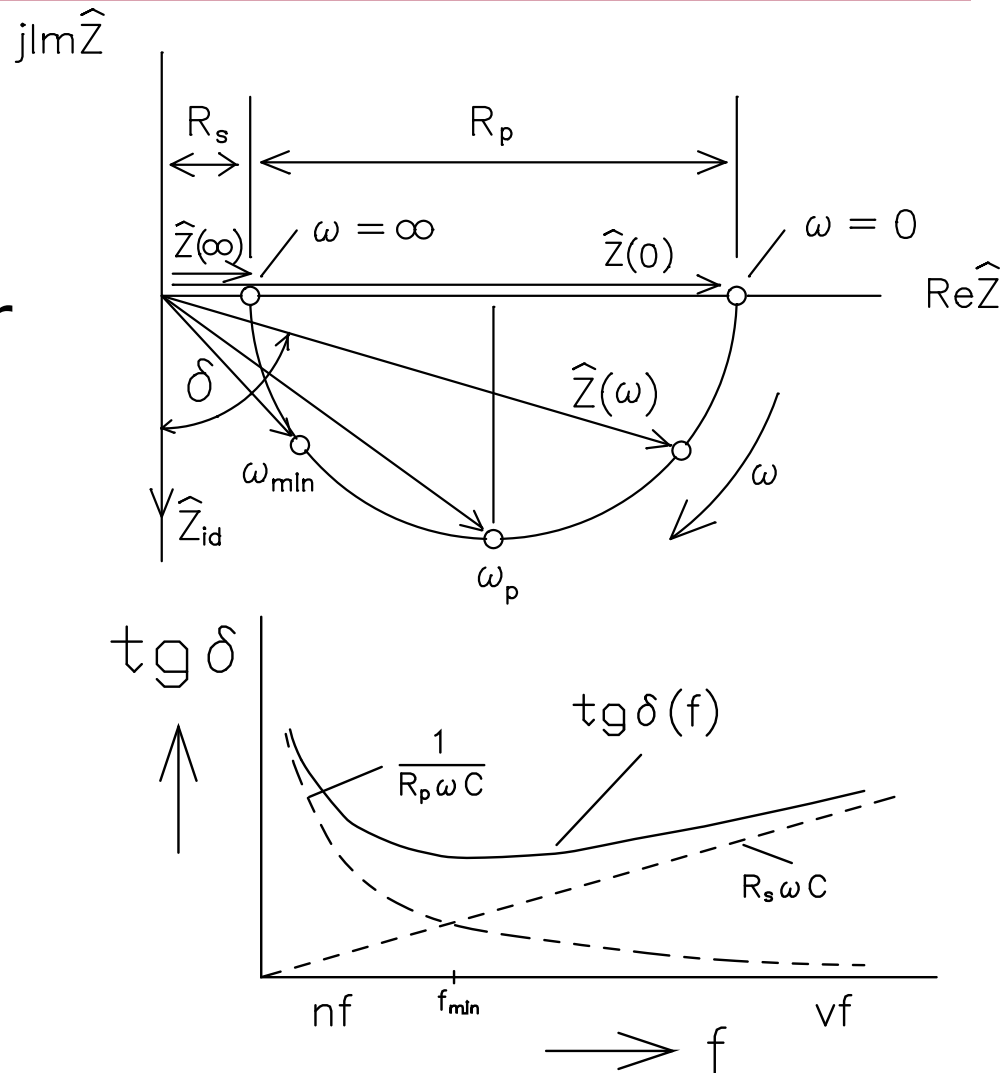
$$\omega \rightarrow 0 \text{ (nf primer): } Z(0) = R_s + R_p$$

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

$$\omega \rightarrow \infty \text{ (vf primer): } Z(\infty) = R_s$$

VF analiza impedance kondenzatorja

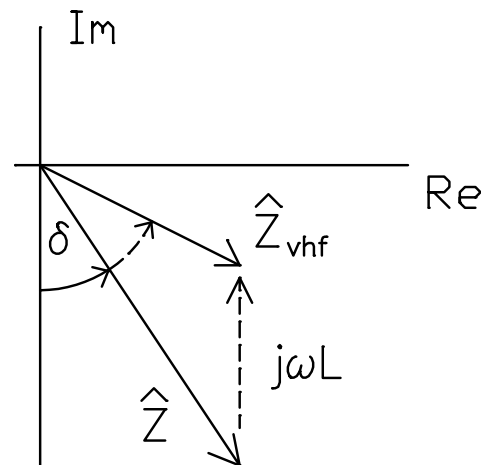
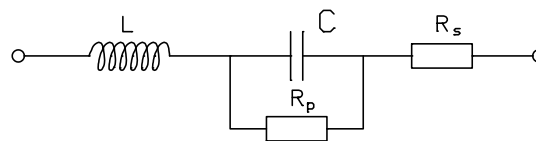
- Med temi točkami poteka impedanca zvezno po krožnici.
- Pri ω_{opt} ima kondenzator najmanjše izgube oz. izgubni kot



VHF impedanca kondenzatorja

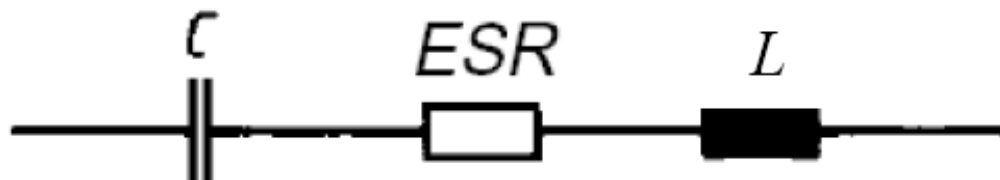
- Pri VHF → parazitne induktivnosti L .
- Analizo frekvenčnega poteka VHF impedance iz VF primera:

$$\hat{Z}_{vhf} = \hat{Z} + j\omega L$$



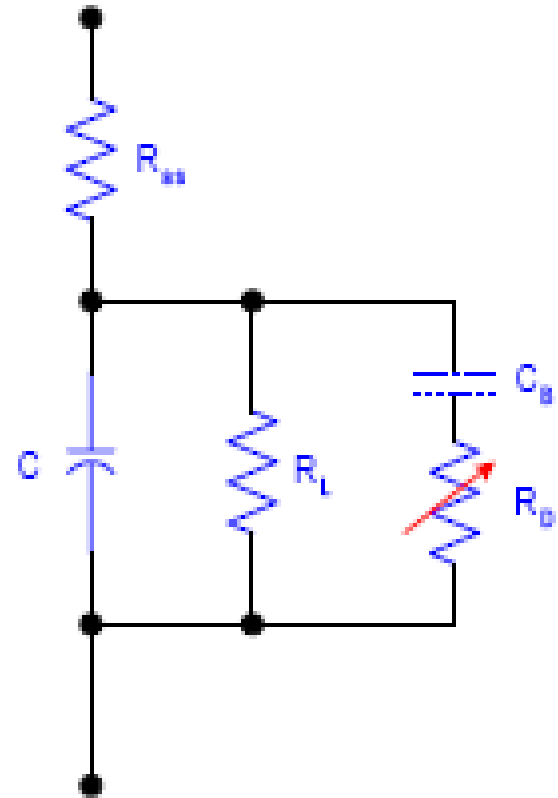
ESR

- Ekvivalentna serijska upornost (ang. Equivalent series resistance)
- Združitev **vseh** izgub v eni upornosti (ESR):
 - ESR zato ni enak R_S ! $\rightarrow ESR \gg R_S$
 - ESR vedno predstavlja upornost pri AC razmerah pri določeni frekvenci (tipično 100kHz; 25°C)
 - Meri se z:
 - ESR metrom
 - z osciloskopom in RMS A in V-metri.



ESR

- Prispevek R_p razdelimo na frekvenčno odvisen (R_D) in neodvisen (R_L) del:
 - ohmske izgube $\rightarrow R_L$: segrevanje zaradi izolacijskih tokov skozi dielektrik
 - polarizacijske izgube $\rightarrow R_D(f)$: segrevanje zaradi rotacije dipolov pri AC signalih
- $R_s \rightarrow$ segrevanje kondenzatorja zaradi ohmskih upornosti ($R_s \approx 100\text{m}\Omega$).



$$ESR = \frac{\operatorname{tg}(\delta)}{\omega \cdot C} = \omega \cdot R_s \cdot C + \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C} + \frac{1}{\omega \cdot R_D \cdot C}$$

Zakaj je pomemben ESR?

- Sčasoma (staranje) se ESR kondenzatorjev povečuje.
- Stikalni napajalnik ima na izhodu LC kombinacijo za glajenje izhodne napetosti. Eno izmed glajenih napetosti (običajno 5V za PC napajalnik) uporablja za krmilni signal povratne vezave PWM generatorja.
- Če napetost izhoda pade (npr. zaradi obremenitve), PWM generator poveča razmerje signal/pavza in tako kompenzira padec izhodne napetosti.
- Naj izhodna napetost **pade zaradi povečanja ESR** (ne obremenitve) gladilnega kondenzatorja na 5V liniji
- PWM generator poveča razmerje signal/pavza
- To posledično dvigne ostale napetosti napajalnika
- In to uniči vezja (diski, matične plošče), priključena na ostale napajalne napetosti.

Vpliv ESR

Elektrolitski (Al, Ta) imajo visok ESR:

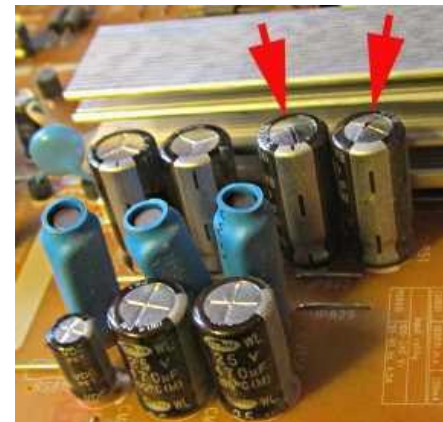
- ESR je posledica upornosti tekočega elektrolita in folij.
- Elektrokemični proces: Dielektrična plast je izjemno tanka in izdelana z elektrokemičnim postopkom, kar povzroča dielektrično absorpcijo in izgube.
- Frekvenčna odvisnost: ESR elektrolitskih kondenzatorjev je močno odvisen od frekvence. Pri višjih frekvencah se ESR zmanjša, a še vedno ostane relativno visok.
- Staranje: ESR se s časom (staranjem) in delovanjem na visoki temperaturi povečuje!

Keramični imajo izjemno nizek ESR

- Material dielektrika: Keramični dielektrik ima zelo nizke dielektrične izgube.
- Konstrukcija: Večslojna keramična konstrukcija z majhnimi razdaljami med ploščami omogoča minimalno serijsko upornost.
- Frekvenčna odvisnost: ESR keramičnih kondenzatorjev se ne spreminja bistveno s frekvenco.

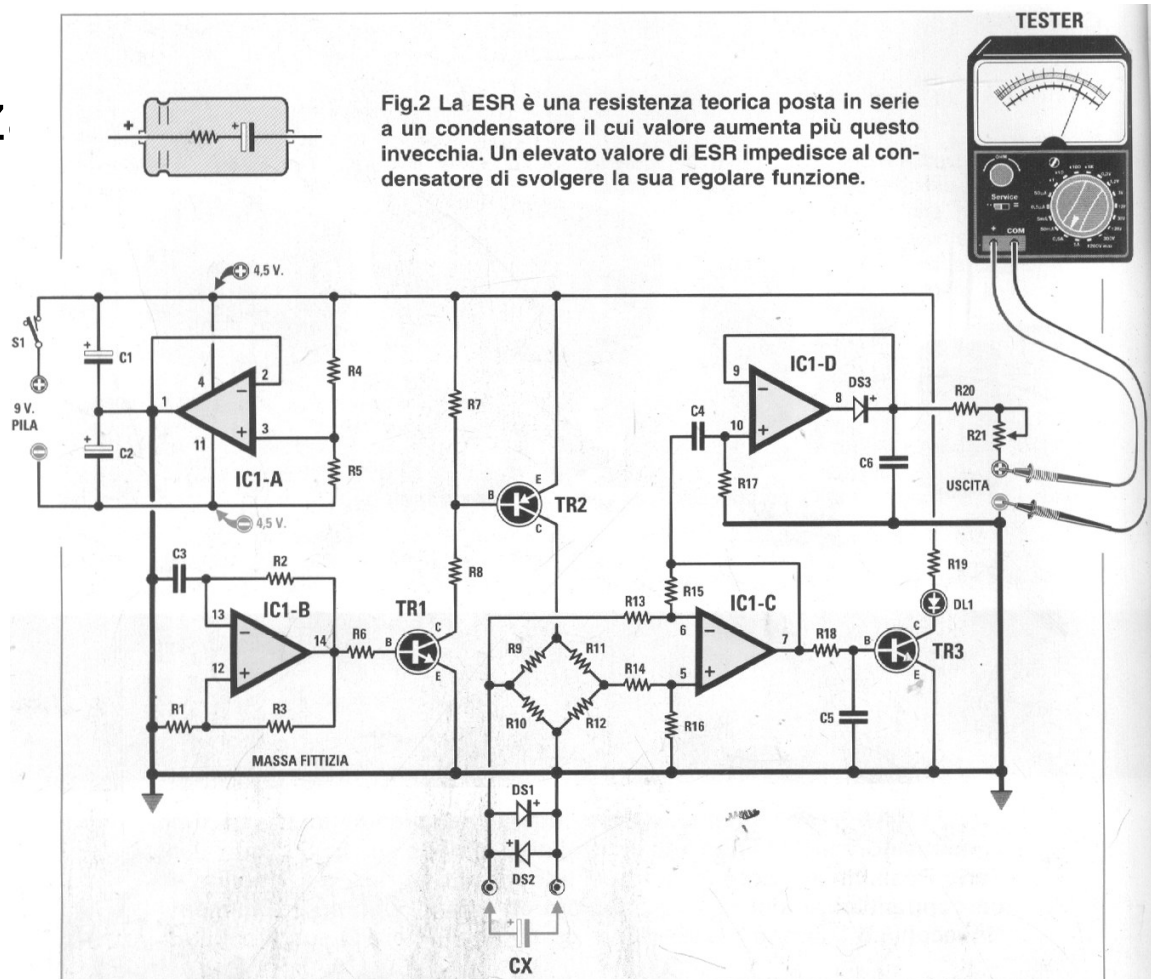
Vpliv ESR

- Al ELKO imajo relativno visok ESR, ki se povečuje s starostjo, temperaturo okolice in velikostjo valovitosti toka na njem.
- Točna meritev ESR običajno ni potrebna, ker je povečevanje ESR hiter proces.
- Defektne kondenzatorje običajno spoznamo po tem, da so "napihnjeni" (bulge) ali pa puščajo DC tok (leak).



Enostavna meritev ESR

- VF generator pravokotnega pulza (100kHz) (IC1B)
- Mostiček z merjencem Cx
- Odštevalnik signalov (IC1C)
- Precizni usmernik (IC1D)



VIR: [Nuova Elettronica N212](#)

Temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C

Temperaturna odvisnost kapacitivnosti:

- $\varepsilon_r(T)$
- debelina dielektrika $d(T)$
(raztezki dielektrika $\rightarrow$ upadanje C)

Uvedemo temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C :

$$C(T) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(T) \frac{A}{d(T)} \quad TK_C = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r(T)}{\partial T} - \frac{1}{d} \frac{\partial d(T)}{\partial T}$$

Temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C

- TK_C se podaja v [ppm/K] ob znani:
 - referenčni temperaturi ($T_{ref} \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$)
 - referenčni kapacitivnosti C_{ref}

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

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

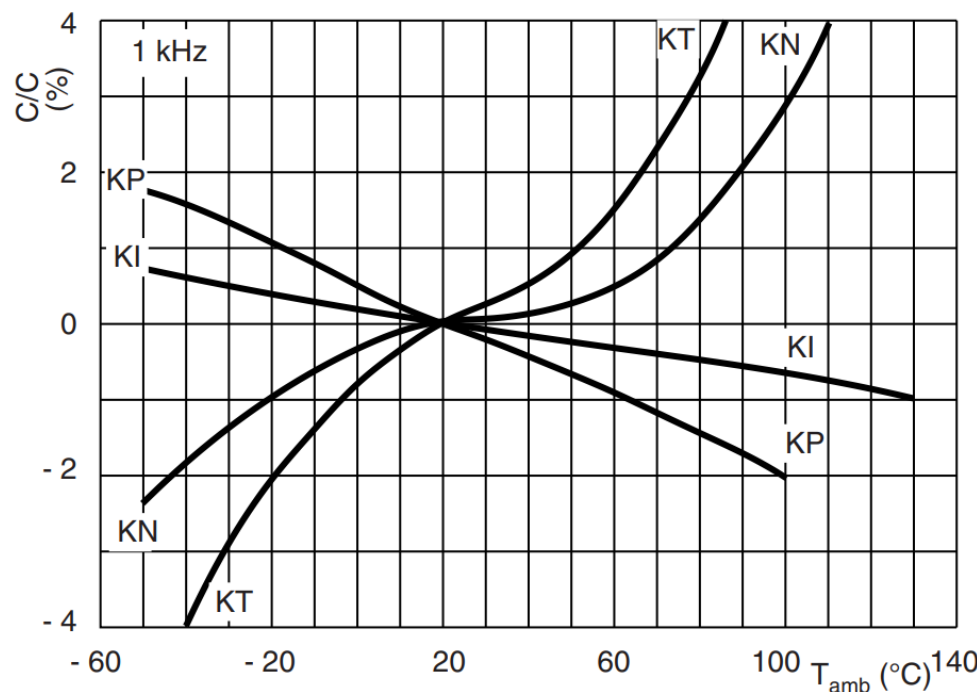
Temperaturni koeficient kapacitivnosti TK_C

TK_C podan kot izmerjeni diagram $\Delta C/C_{20}(T)$.

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

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

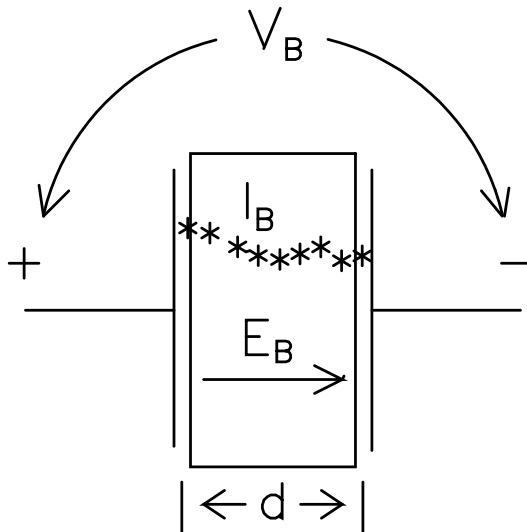
$$TK_C = \frac{\frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_2} - \frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_1}}{\frac{C}{C_{20}} \Big|_{T_1} (T_2 - T_1)}$$



Vishay: [Characteristics and Definitions Used for Film Capacitors](#)

Preboj kondenzatorja

- Visoka napetost → preboj:
tok med elektrodama začne naglo naraščati
- Prebojna napetost V_B (Breakdown Voltage)
- Prebojna napetost je odvisna od lastnosti dielektrika v kondenzatorju:
 - dielektrične trdnosti E_B [V/mm],
(maksimalna E , ki jo dielektrik še prenese)
 - debeline dielektrika d



$$V_B = E_B d$$

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

čas meritve: nekaj minut!

Preboj v dielektriku

- Dielektrik ni idealen izolator in ni homogen material
višje napetosti → prisotni majhni tokovi
- Nizki tokovi povzročijo lokalna segrevanja in s tem močno povišane lokalne temperature.
- Lokalna ionizacija materiala in s tem do nastanka novih nosilcev naboja.
- Toki se zato še povečajo, s tem se spet povišajo lokalno segrevanje in temperature, pride do generacije novih nosilcev naboja itd.
- Ta termični pobeg → preboj v dielektriku

Odvisnost prebojne napetosti V_B

V_B pada:

- pri povišanju temperature ambienta (zaradi znižanja specifične upornosti)
- pri povišanju vlage ambienta (zaradi višje prevodnosti površinskega sloja kot posledica absorbcije vlage)
- pri višjih frekvencah (zaradi trenutno močno povišanih vrednosti toka $i = C \, dv/dt$)
- pri časovno daljših obremenitvah (odpornost materiala proti preboju se z rastočim časom električne obremenitve zmanjšuje - visoka napetost počasi "načne" obremenjeni material)

Komponente, sestavi in senzorji

Družine
kondenzatorjev

Značilnosti kondenzatorskih družin

- Papirni
- Plastni (ang. film capacitors)
- Keramični
- Sljudni
- Stekleni
- Zračni
- Elektrolitski
- Specialni

Ime po vrsti dielektrika, pri elektrolitskih kondenzatorjih pa po materialu anode

Papirni kondenzatorji

- Dielektrik je kondenzatorski papir ($d=5 \dots 25 \mu\text{m}$), impregniran z mineralnimi olji, voski ali epoxyem (higroskopičnost).
- To prinese *višje prebojne napetosti*, vendar tudi nekoliko višje izgube $\text{tg}\delta$.
- Pri nemetalizirani izvedbi so Al elektrode iz tankih metalnih folij ($d \approx 5 \mu\text{m}$)



VIR: [PMR209MB5470M100R30 \(Kemet\)](#)

Lastnosti papirnih kondenzatorjev

- Odvisne od gostote papirja in njegove impregnacije.
- $\epsilon_r = 3 \dots 6$, pada s frekvenco in ima majhen pozitiven TK_ϵ .
- $\tan \delta$ (50 Hz, 25 ... 60°C) = 30 ... 60 * 10⁻⁴ (srednje), raste s temperaturo in frekvenco.
- **Frekvenčni obseg ≤ 1 kHz** (nizek zaradi temperaturnih omejitev)
- Izolacijska upornost je odvisna od vlage in temperature, pri sobni temperaturi znaša tipično 10⁴ MΩ/mF (srednje).
- TK_C (20 ... 60°C) = 50 ... 200 ppm/°C
- Prebojna napetost V_B upada s temperaturo (večje segrevanje → večje izgube).
- Enosmerna V_B je 2x ... 3x višja od izmenične:
Pri izmeničnem delovanju do ionizacije mehurčkov zraka, ki so vedno prisotni v papirju in med folijami, ioni zažigajo papir in metal, pride do uničenja.

Lastnosti papirnih kondenzatorjev

Uporaba:

- Impregniran papir (vosek, olje, epoxy) se je uporabljal v starejših kondenzatorjih.
- Uporabljajo se zelo zelo redko – v VN aplikacijah
- Nadomestili so jih plastni kondenzatorji (ang. film)

Slabosti:

- Fizično veliki (pF/cm^3)
- Papir je higroskopičen
- Absorbirana vlaga poveča dielektrične izgube ($\text{tg } \delta$) in zmanjša R_p
- Metalizirane izvedbe samo za aplikacije z nizkim tokom

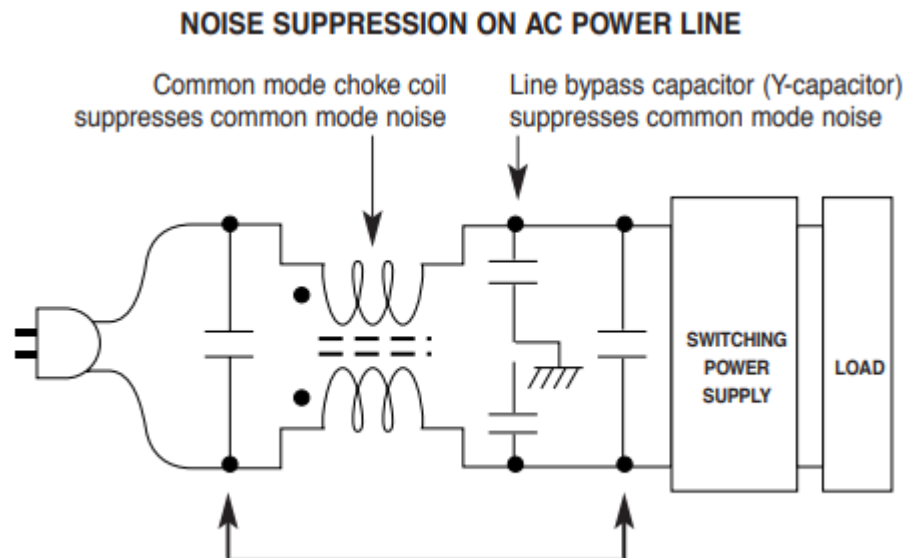
Metalizirani papirni kondenzatorji

- Metalna folija je nadomeščena s tanko metalizirano plastjo na papirju, ki se jo nanese z naparevanjem kovin Al ali Zn v vakuumu.
- Debelina metalizacije $d \approx 2 \dots 6 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, plastna upornost okrog 1Ω
- Avtoregeneracija (ang. self-healing)
- Temperaturno področje do 110°C
- Uporaba:
 - Za odpravo EMI/RFI motenj (X in Y razred)
 - Bela tehnika
 - TV/HiFi filtri za napajanje
 - Osvetlitev
 - Industrijski napajalniki
 - Stand-by aplikacije (slaba gorljivost)

Kondenzatorji za odpravo EMI/RFI motenj

Kondenzatorji za odpravo EMI motenj (EMI suppression capacitors) se vežejo na vhod vezja, da zmanjšujejo vhodno impedanco.

- Razred X so kondenzatorji, vezani med L in N vezja (line-to-line).
- V primeru odpovedi X kondenzatorja potencialne nevarnosti za električni udar ni
- Najbolj pogosti X2 kondenzatorji
- Razred Y so kondenzatorji, vezani na šasijo (line-to-ground). Običajno so nižjih vrednosti.
- V primeru odpovedi kondenzatorja Y obstaja potencialna nevarnost za električni udar.



X razred dielektrik:

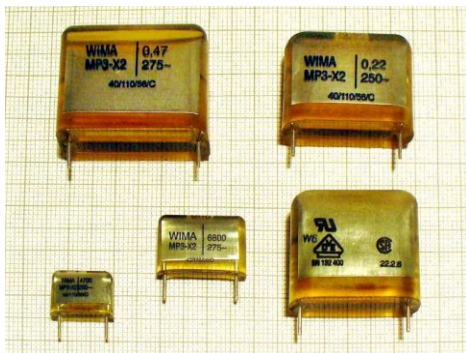
- poliester,
- polipropilen,
- keramika,
- papir

Y razred dielektrik:

- keramika (pogost) in
- papir (olja, epoxy)

VIR: [Vishay: EMI/RFI SOLUTIONS](#)

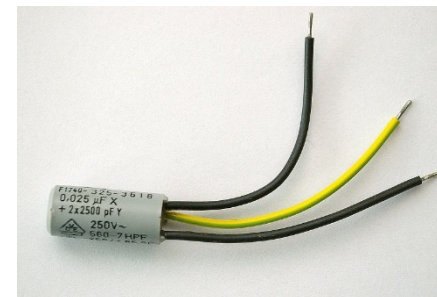
Kondenzatorji za odpravo EMI/RFI motenj



Metaliziran
papirni X2
kondenzator



Polipropilenski
(MKP) X2
kondenzator



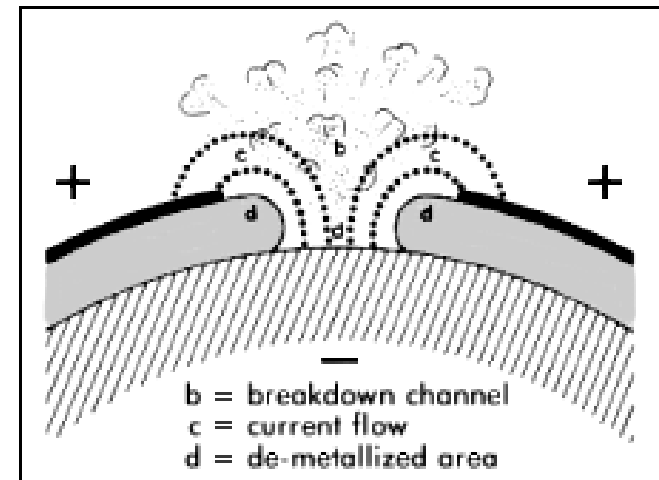
Kombiniran
X in Y
kondenzator

Meje EMI/RFI motenj so definirane v EMC direktivi EN 50081.

VIR: [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/X2_capacitor), WIMA

Avtoregeneracija

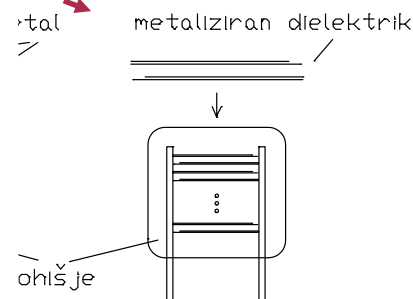
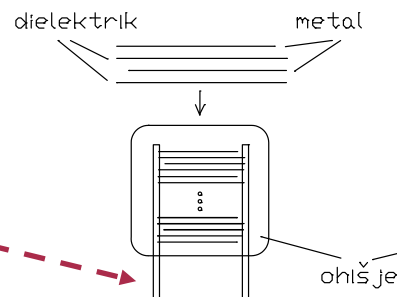
- **Avtoregeneracija:** (ang. self-healing)
Na mestu, kjer zaradi nekega defekta pride do lokalnega preboja, **tanka metalizacija** zaradi lokalnega segrevanja enostavno **izpari**, defektno mesto se **izolira**.
- Pri metaliziranih izvedbah kondenzatorjev zaradi odprave zračnih mehurčkov ne more priti do ionizacije in s tem do zažiga dielektrika:
 - višja dopustna napetost
 - manjše dimenzije kondenzatorja, zaradi tanjših plasti
- To je mogoče zaradi zelo tankih metaliziranih plasti, medtem ko v primeru ločene metalne folije prej pride do zažiga dielektrika in uničenja kondenzatorja.



Plastični kondenzatorji

Izvedbe:

- naviti plastični kondenzatorji,
- blok kondenzatorji (zlaganje lističev folij)
 - nemetalizirana in
 - metalizirana
- Struktura se nahaja v kovinskem ohišju, zalita v primeren material (epoksidna smola).
- So kvalitetnejši od večine ostalih vrst glede izolacijske upornosti, izgub tgδ, časovne konstante, frekvenčnega obsega itd. Slabši so le glede volumske kapacitivnosti [pF/cm^3] v primerjavi z elektrolitskimi in keramičnimi.



Dielektrik – polistiren (PS)

- Stirofleks (Siemens) / Polistiren (Philips) / Polistirol.
- Gladka, prozorna folija odličnih lastnosti:
 - Visoka izolacijska upornost $10^{17} \dots 10^{19} \Omega \text{ cm}$,
 - nizke izgube $\text{tg}\delta = 1 \dots 10 \cdot 10^{-4}$
 - majhen, linearen in negativen temperaturni koeficient
 $\text{TK}_C = -100 \dots -200 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$,
 - majhna dielektrična absorpcija $0.02 \dots 0.1\%$,
 - nizka absorbcija vlage $< 0.1\%/\text{dan}$,
 - visoka dielektrična trdnost $E_B = 275 \text{ kV/mm}$
 - zmerna dielektričnost $\epsilon_r = 3.75$
 - visoka časovna stabilnost
- Slabost polistirena → ne moremo metalizirati



Polistirenski (PS) kondenzatorji

- E12 → E96
- Stabilen in negativen $TK_C = -150 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$,
- Visoka izolacijska upornost $1\text{M}\Omega/\mu\text{F}$,
- $V_n \approx 25 \dots 1600 \text{ V}$ (visok)
- $f > 100 \text{ MHz}$,
- neobčutljivi na vlago,
- $\text{tg}\delta = 1 \dots 10 \cdot 10^{-4}$ (nizke izgube)
($f = 100 \text{ Hz} \dots 10 \text{ kHz}$), naraščajo pri VF,
- izredno velike RC konstante $> 10^5 \text{ s}$
(za $C > 1 \text{ mF}$)
- Aplikacije, kjer sta natančnost in stabilnost ključnega pomena: analogni filtri, oscilatorji in merilni instrumenti

Lastnosti PS kondenzatorjev

Uporaba:

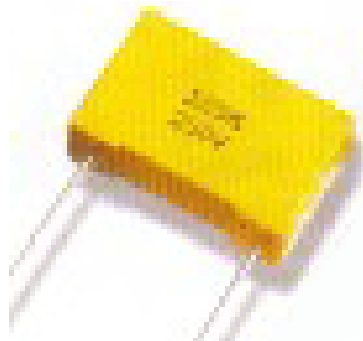
- RF aplikacije nizke moči in precizna analogna vezja, avdiofilska vezja (visoka časovna stabilnost, majhne VF izgube nizek TK_C)
 - Oscilatorskih vezjih,
 - medfrekvenčnih filtrov,
 - integratorjih z velikimi časi integracije,
- Za temperaturno kompenzacijo (negativen TK_C) v kombinaciji s tuljavami s feritnimi jedri (pozitiven TK_L)
- Za stabilizacijo resonančne frekvence oscilatorjev

Slabosti:

- Temperatura delovanja +85 °C (polistiren se topi)
- So fizično veliki
- Konstrukcija ne omogoča SMD izvedbe (danes redki)

Poliestrski (PET) kondenzatorji

- Drugo ime: Mylar
- Poliester ima slabše dielektrične lastnosti kot polistiren
- Poliester **lahko metaliziramo**:
 - nemetalizirana in
 - metalizirana izvedba
(prednost – tanke elektrode → majhno ohišje)



Poliestrski (PET) kondenzatorji

Uporaba:

- Dolgo časa so veljali kot cenena klasika v DC vezjih za široko potrošnjo, v impulznih vezjih, kot vezne kondenzatorje
- Visokonapetostne izvedbe do 25 kV
 - VN filtri in
 - VN kaskade

Slabosti:

- Temperaturno manj stabilni kot papirni kondenzatorji
- Nimajo dobrih toleranc ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$) – PP so cenovna alternativa!
- Neprimerni za RF aplikacije zaradi velikih dielektričnih izgub
- Neprimerni za visoke tokove zaradi navite izvedbe (pregrevanje)
- Ni SMD izvedbe

Polikarbonatni (PC) kondenzatorji

Polikarbonat – termoplastični polimer – enostaven za obdelavo (thermoforming):

- Mehansko izredno stabilen (Lexan stekla)
- Dielektrična konstanta: 3.2
- **Zelo stabilen** do visokih temperatur (-55...125°C)
- Nizek TK_C : ± 80 ppm/°C
- nizek tg δ : 0.0007@50Hz; 0.001@1MHz
- visoka izolacijska upornost,
- visoka dielektrična trdnost (38 kV / mm)
- Slabost → **visoka občutljivost na vlago** (0.16%)
- Obstaja metalizirana izvedba, ki ji pri VN kondenzatorjih dodajo še impregniran papir. Metalizirana izvedba je **avtoregenerativna**

Polikarbonatni (PC) kondenzatorji

- Bili so razširjeni v vezjih splošne uporabe - danes niso več.
- Vodilni proizvajalec (Bayer) je leta 2000 namreč ustavil proizvodnjo polikarbonata kot dielektrične plasti.
(VIR: [WIMA](#))
- Uporaba za nove aplikacije ni priporočljiva, ker so dobavitelji redki.

Zamenjave za polikarbonat kot dielektrik

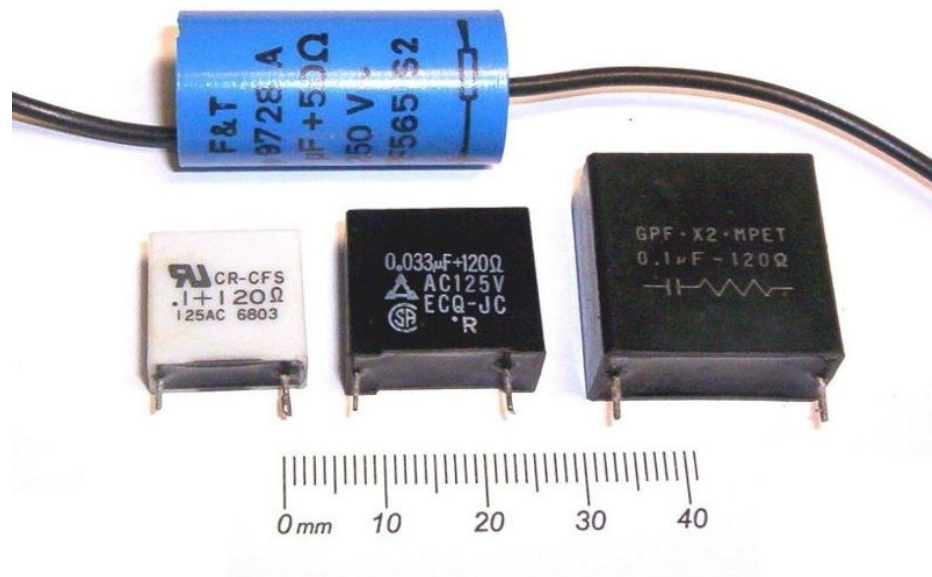
- Polietilen naftalat (PEN)
- Polifenilen sulfid (PPS)
- Polimid (PI)
- Politetrafluoroetilen (PTFE; TEFLON)
- Najbolj razširjena zamenjava za polikarbonat je PPS:
 - Praktično enaka dielektrična konstanta (podobna velikost kondenzatorjev)
 - Širše temperaturno območje (do 250°C) in
 - Nižji TK_C

Polipropilenski (PP) kondenzatorji

- Polipropilen (PP) - najbolj popularen dielektrik:
 - $\epsilon_r = 2.2$
 - zelo nizke izgube $\text{tg}\delta < 10 \cdot 10^{-4}$
 - dobra temperaturna in časovna stabilnost,
 - visoka maksimalna temperatura delovanja (125°C),
 - visoka dielektrična trdnost $E_B = 350 \text{ kV/mm}$,
 - neobčutljivost na vlago (absorbcija $< 0.1\%$ / dan),
 - **konstanten nizek negativen** TKC ($-250 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$),
 - visoka izolacijska upornost ($10^{+5} \text{ M}\Omega/\text{mF}$).
 - primeren za kondenzatorje za velike moči, če ga impregniramo s sintetičnimi olji.
- Polipropilenski kondenzatorji:
 - nemetalizirana in
 - metalizirana z Zn (Al ni primeren). $d \approx 4 \dots 25\mu\text{m}$
- Uporaba:
 - za delo pri VF (zelo nizke izgube $\text{tg}\delta$)
 - S/H vezja, oscilatorji, resonatorji, napajalniki, pretvorniki, avdio
 - Vrednosti od 1 to $100 \mu\text{F}$ @ 440 VAC → zagonski kondenzatorji za enofazne elektromotorje

"Snubber" kondenzatorji

- "Snubber" kondenzatorji prenesejo visok vršni tok, ki se pojavlja ob tranzientnih napetostih. Take napetosti se pojavljajo ob veliki spremembi toka (di/dt) v stikalnih vezjih
- Osnovni namen "snubber" RC vezja je, da absorbira energijo napetostnega pulza, ki nastane ob razklenitvi stikalnega elementa → zaščita stikalnega elementa
- Dodatni namen "snubber" vezja je izboljšava EMC preko:
 - zmanjšanja tranzientne napetosti ob razklenitvi stikalnega elementa
 - zmanjšanje iskrenja stikalnih kontaktov (vžigalna tuljava → avto)
 - omejevanje hitrosti naraščanja napetosti (dV/dt) na polprevodniških stikalnih elementih (triak, tiristor, IGBT, BJT)
- "Snubber" kondenzatorji mora imeti zelo majhen ESL in ESR ter visok vršni tok. Morajo biti zelo zanesljivi, saj ob odpovedi običajno odpove tudi stikalni element, ki ga ščiti.
- Za "snubber" kondenzatorje se zvečine uporabljajo **polipropilenski** kondenzatorji



Polisulfon in TEFLON kondenzatorji

Podobni polikarbonatnim.
Razlike:

- Višje temperaturno območje
- E6
- Profesionalni elementi
- Uporaba (ko cena ni faktor):
 - pri visokih temperaturah,
 - nizkih izgub $\text{tg}\delta$,
 - **izredno** visoke izolacijske upornosti
 - stabilnost ter zanesljivost elementa.

Dielektrik	Polisulfon	PTFE
T obseg	-55 ... +150°C	-55 ... +200°C
TK_C	+ 30.10 ⁻⁶ /°C	+ 60.10 ⁻⁶ /°C
$\text{tg}\delta$	< 15.10 ⁻⁴	< 10.10 ⁻⁴
Izolacijska upornost	100 MΩ/mF (150°C)	100 MΩ/mF (250°C)

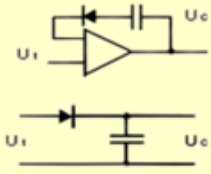
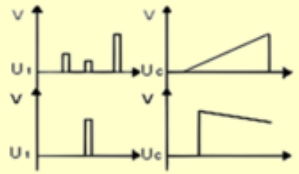
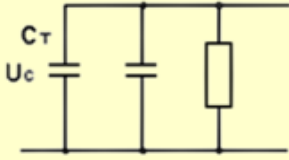
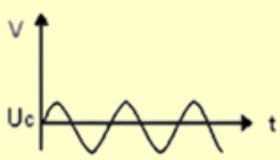
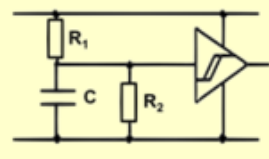
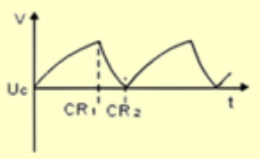
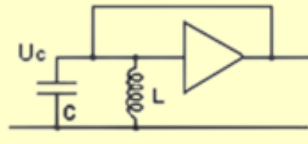
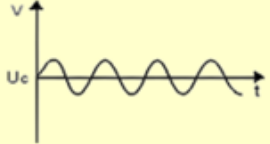
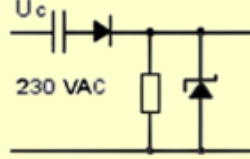
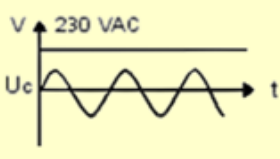
- Slabosti:
 - Cena
 - Velikost (nizka dielektrična konstanta)

Primerjava plastnih kondenzatorjev

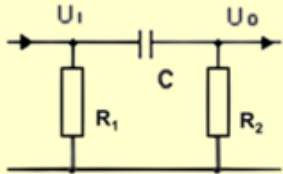
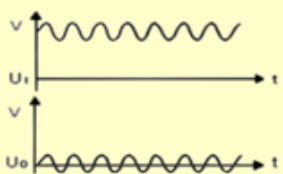
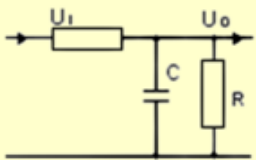
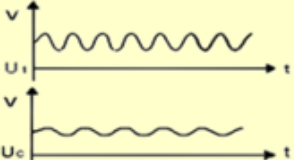
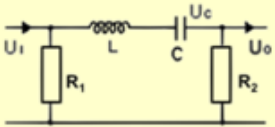
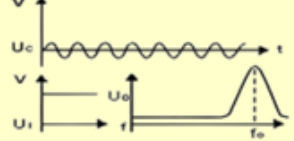
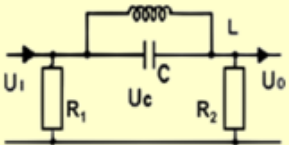
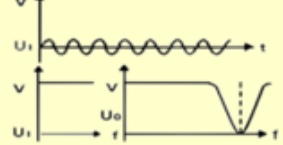
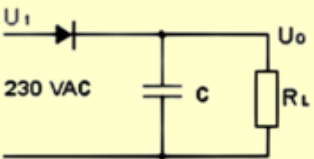
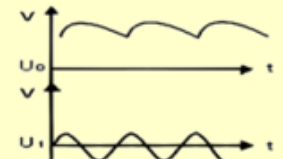
Lastnost		PET	PEN	PPS	PP
Relativna dielektričnost @ 1 kHz		3.3	3.0	3.0	2.2
Minimalna debelina plasti (μm)		0.7–0.9	0.9–1.4	1.2	2.4–3.0
Absorpcija vlage (%)		majhna	0.4	0.05	<0.1
Dielektrična trdnost (V/μm)		580	500	470	650
Komerzialne testne napetosti (V/μm)		280	300	220	400
Področje DC napetosti (V)		50–1000	16–250	16–100	40–2000
Območje kapacitivnosti		100 pF–22 μF	100 pF–1 μF	100 pF–0.47 μF	100 pF–10 μF
Temperaturno področje (°C)		–55 to +125 /+150	–55 to +150	–55 to +150	–55 to +105
ΔC/C po temperaturnemu področju (%)		±5	±5	±1.5	±2.5
tg(δ) (*10 ^{–4})	@ 1 kHz	50–200	42–80	2–15	0.5–5
	@ 10 kHz	110–150	54–150	2.5–25	2–8
	@ 100 kHz	170–300	120–300	12–60	2–25
	@ 1 MHz	200–350	–	18–70	4–40
Časovna konstanta R _{Insul} *C (s)	@ 25 °C	≥10,000	≥10,000	≥10,000	≥100,000
	@ 85 °C	1,000	1,000	1,000	10,000
Dielektrična absorpcija (%)		0.2–0.5	1–1.2	0.05–0.1	0.01–0.1
Specifična kapacitivnost (nF•V/mm ³)		400	250	140	50

VIR: [Wiki](#)

Uporaba plastnih kondenzatorjev

Capacitor purpose	Circuit application	Waveform	Capacitor requirements	
Sample and hold A-D converters Peak voltage detectors			Low dielectric absorption, High insulation resistance	PS in teflonski (minimalna dielektrična absorpcija)
Temperature compensating (other components)			Dedicated negative temperature characteristic	Polistirenski keramični razreda 1 (COG/NP0) predvidljiv in negativen TKC
Timing			Stable capacitance. High insulation resistance	PP, PS, sljuda, najboljša stabilnost, nizke izgube, visoko izolacijsko upornost
Oscillating			Low dissipation factor, Stable capacitance	
Voltage dropper			Good reliability	Metalizirani PET zanesljivost in nizka cena

Uporaba plastnih kondenzatorjev

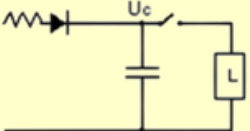
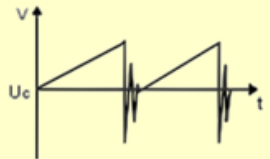
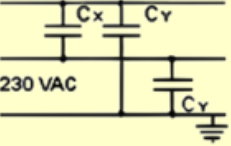
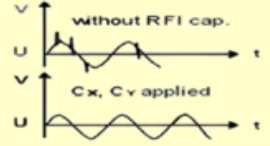
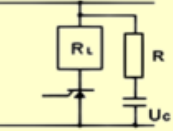
Capacitor purpose	Circuit application	Waveform	Capacitor requirements
Coupling or blocking			High insulation resistance. Correct voltage, Low self-inductance
Decoupling or bypassing			High insulation resistance, Low self-inductance
Filtering Pass filter			Low dissipation factor, Stable capacitance
Filtering Stop filter			Low dissipation factor, Stable capacitance.
Smoothing			Comparably high capacitance, Low dissipation factor

Keramični (npr. X7R, COG/NP0) in PET, PP. nizka ESL in dobre izolacijske lastnosti

PP (nizke izgube).
PS in sljuda

Elektrolitski (Al, Ta) z nizkim ESR.

Uporaba plastnih kondenzatorjev

Capacitor purpose	Circuit application	Waveform	Capacitor requirements
Energy storage / fast discharge			High pulse rise time rating, High (surge) current carrying capacity
EMI/RFI suppression			Particularly high reliability against active and passive flammability
Snubbing			Low dissipation factor, High pulse rise time rating

Elektrolitski. Za še hitrejš
pulze tudi PP kondenzatorji,
(izjemno nizek ESR)

Metalizirani papirni
(X in Y razred)
(avtoregeneracija)

PP (izjemno
nizek izgubni
faktor, nizek
ESR, ESL)

Keramični kondenzatorji –EIA I. razred

- Dielektrik je **stabilna keramika**:
 - dielektričnost ϵ se s časom ne spreminja,
 - odvisnost $C(T)$, $C(V)$ je majhna in linearna.
- $\epsilon_r = 5 \dots 250$
(visoka specifična kapacitivnost, do 30 pF/mm³)
- $\rho = 10^{+15} \dots 10^{+18} \Omega\text{cm}$
- $TK_\epsilon = +130 \dots -3000 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$
(linearen; primeren za temperaturno kompenzacijo)
- $\text{tg}\delta \approx 10 \cdot 10^{-4}$ v širokem frekvenčnem območju
(visok Q, dobre VF lastnosti)
- $E_B = 4 \dots 10 \text{ kV/mm}$
- Stabilni, z majhnimi tolerancami, dolga življenjska doba, relativno majhne izgube oz. visok Q, različne TK_C za temperaturne kompenzacije ter velike (vendar ne maksimalne) specifične kapacitivnosti.

Keramični kondenzatorji –EIA I. razred

1. Najbolj stabilni glede na temperaturno območje
2. Imajo skoraj linearno karakteristiko v uporabnem frekvenčnem področju
3. Dielektrik je:
 1. magnezijev titanat za pozitivni TK_ϵ in
 2. kalcijev titanat za negativen TK_ϵ
4. Z uporabo kombinacij teh dveh in ostalih dielektrikov lahko dosežemo ϵ_r med 5 in 150 in TK_ϵ med 40 ... -5000 ppm/°C
5. Imajo najboljše $tg(\delta)$ od vseh EIA keramičnih kondenzatorjev
6. Obstajajo v 1% (EIA-C0G) lestvici, medtem ko ostale družine v 5% in 10% lestvicah.

Keramični kondenzatorji –EIA I. razred

EIA oznake za temperaturno kompenzirane kondenzatorje:

- Prva črka podaja velikost (številko) TK_C preko temperaturnega območja v ppm/°C
- Druga črka množitelj ($\cdot 10^m$)
- Toleranca TK_C v ppm/C

Primer: C0G razred

$TK_C = 0$ ppm/°C

toleranca $TK_C = \pm 30$ ppm/°C
(oscilatorji, resonančna vezja)

Vrednost TK_C		Množitelj TK_C		Toleranca TK_C	
C	0.0	0	-1	G	+/-30
B	0.3	1	-10	H	+/-60
L	0.8	2	-100	J	+/-120
A	0.9	3	-1000	K	+/-250
M	1.0	4	+1	L	+/-500
P	1.5	6	+10	M	+/-1000
R	2.2	7	+100	N	+/-2500
S	3.3	8	+1000		
T	4.7				
V	5.6				
U	7.5				

Keramični kondenzatorji – EIA II. razred

- Dielektrik je **nestabilna keramika** (dielektrične lastnosti so precej nestabilne, ker je struktura optimizirana predvsem v smeri velike dielektrične konstante):
 - Dielektričnost ϵ_r se spreminja s časom,
 - odvisnost kapacitivnosti od temperature in napetosti je velika in nelinearna.
- $\epsilon_r = 250 \dots 15.000$
(veliko; **zelo visoke specifične kapacitivnosti** do $500\text{pF}/\text{mm}^3$)
- $\rho = 10^{+16} \Omega\text{cm}$
- TK_ϵ je nestabilen, nelinearen
- $\text{tg}\delta = 50 \dots 500 * 10^{-4}$
- $E_B = 4 \dots 6 \text{ kV}/\text{mm}$ (trajno delovanje: $2 \text{ kV}/\text{mm}$!)

Keramični kondenzatorji – EIA II. razred

- Večja volumska kapacitivnost, za ceno slabše natančnosti in stabilnosti
- Uporaba za razklop (decoupling/bypass), sklop (coupling) – povsod kjer natančnost ni bistvena.
- Tipičnemu kondenzatorju razreda II. se kapacitivnost spremeni za 15% na temperaturnem področju -50°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Izgubni faktor je običajno 2.5%.
- Ima slabšo natančnost (od 10% do $\pm 20\%$ do $\pm 80\%$).

Keramični kondenzatorji –EIA II. razred

EIA oznake za temperaturno
nekompenzirane
kondenzatorje:

- Spodnja meja temp. območja
- Zgornja meja temp. območja
- Velikost $\Delta C/C_0$ preko temperaturnega območja v ppm/°C

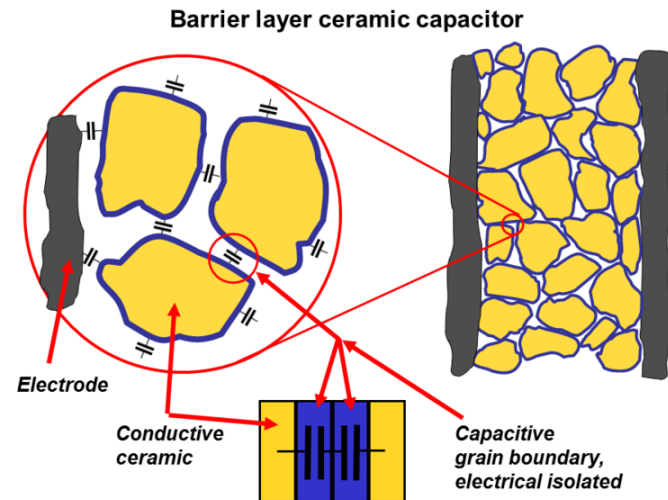
X7R (−55/+125 °C, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$),
Z5U (+10/+85 °C, $\Delta C/C_0 = +22/-56\%$)
Y5V (−30/+85 °C, $\Delta C/C_0 = +22/-82\%$)
X7S (−55/+125, $\Delta C/C_0 = \pm 22\%$)
X8R (−55/+150, $\Delta C/C_0 = \pm 15\%$)

VIR: [Wiki](#)

Sp. meja temperaturnega območja		Zg. meja temperaturnega območja		Sprememba kapacitivnosti	
X	-55C (-67F)	2	+45C (+113F)	D	+/-3.3%
Y	-30C (-22F)	4	+65 (+149F)	E	+/-4.7%
Z	+10C (+50F)	5	+85 (+185F)	F	+/-7.5%
		6	+105 (+221F)	P	+/-10%
		7	+125 (+257F)	R	+/-15%
				S	+/-22%
				T	+22% / -33%
				U	+22% / -56%
				V	+22% / -82%

Keramični kondenzatorji – EIA III. razred

- Dielektriki so specialne keramike z zelo veliko vrednostjo $\epsilon_r = 15.000 \dots 10^5$
- Čim večja dielektričnost, ostalo ni važno.
- Posledica visoke ϵ_r je zelo visoka specifična kapacitivnost do 1nF/mm^3 , (elektrolitski $\approx 1\mu\text{F/mm}^3$).
- Sicer zelo slabi: nestabilni, visoke izgube $\text{tg}\delta$, zelo slaba paralelna upornost R_p



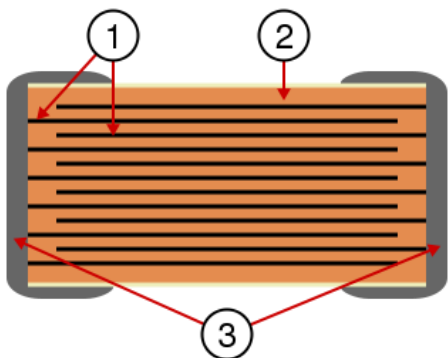
VIR: [Wiki](#)

Keramični kondenzatorji – EIA III. razred

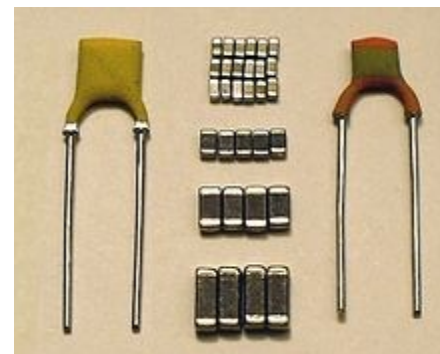
- Še vedno visoka volumska kapacitivnost, slabša natančnost, stabilnost in izgubni faktor
- **Ne zdržijo visokih napetosti**
- Dielektrik običajno barijev titanat ($\epsilon_r=1250$)
- Tipični kondenzator III. razreda ima spremembo kapacitivnosti od -22% do +50% preko temperaturnega področja +10°C ... +55°C.
- Izgubni faktor je 3 ... 5%.
- Slaba natančnost (20% ali -20/+80%).
- Uporaba za razklop (decoupling) in v napajalnikih, kjer natančnost ni zahtevana
- Niso primerni za uporabo v SMPS napajalnikih ker ne zdržijo špic (visoke napetosti)

SMD keramični kondenzatorji

- Večina keramičnih kondenzatorjev je danes v SMD izvedbi
- Klasične kvadraste oblike
- MLCC (ang. Multilayer ceramic chip capacitor) je sestavljen iz keramičnega dielektrika z veliko izmenjujočimi metalnimi elektrodami, kar poveča volumsko kapacitivnost. Notranji elektrodi sta povezani na izhodna priključka iz zlitine srebro-paladij (AgPd) 65/35, oz. so niklja, prekrit z (NiSn)



Oznaka	Velikost (mm)	Velikost (inch)
1812	4.6 x 3.0	0.18 x 0.12
1206	3.0 x 1.5	0.12 x 0.06
0805	2.0 x 1.3	0.08 x 0.05)
0603	1.5 x 0.8	0.06 x 0.03
0402	1.0 x 0.5	0.04 x 0.02
0201	0.6 x 0.3	0.02 x 0.01



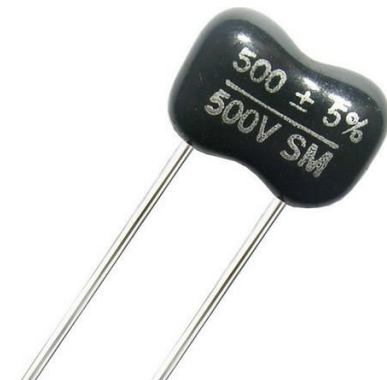
disk keramični C (levo, desno)
in SMD MLCC izvedba (sredina)

Sljudni kondenzatorji

- Dielektrik je sljuda (ang. MICA) → naravni silikat aluminijskega Al z dodatki atomov K, Mg, O, H.
- Slojevita struktura (cepiti se da na do 0.25 μm tanke lističe)

Lastnosti sljude:

- $\epsilon_r = 7 \dots 8$ izredno stabilna ($-55 \dots 300^\circ\text{C}$) in ($50 \text{ Hz} \dots 5 \text{ GHz}$)
- $\rho > 10^{+15} \Omega\text{cm}$ za izdelavo kondenzatorjev z visoko izolacijsko upornostjo
- $\text{TK}\epsilon \approx 10^{-5}/^\circ\text{C}$ (praktično zanemarljivo)
- $\text{tg}\delta < 2 \cdot 10^{-4}$ (zelo nizke izgube)
- $E_B = 40 \dots 200 \text{ kV/mm}$



VIR: [Wiki](#)

Stekleni kondenzatorji

- Dielektrik je trak borsilikatnega stekla, $d \approx 10\mu\text{m}$.
- Malo slabše dielektrične lastnosti kot sljuda:
- $\epsilon_r = 4$
- $\rho > 10^{+10}\Omega\text{cm}$
- $TK_\epsilon = 100 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$
- $\text{tg}\delta \sim 10 \cdot 10^{-4}$
- $E_B = 20 \text{ kV/mm}$

Lastnosti ohrani do visokih temperatur (200°C), visokih napetosti in visokih frekvenc (100MHz).

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

Zračni/vakuumski kondenzatorji

- Med ploščami je zrak
- Posebej zar RF aplikacije, VHF
- Visoka Q in temperaturna stabilnost
- Vakuumski –RF oddajniki, x0 kV, x00 pF

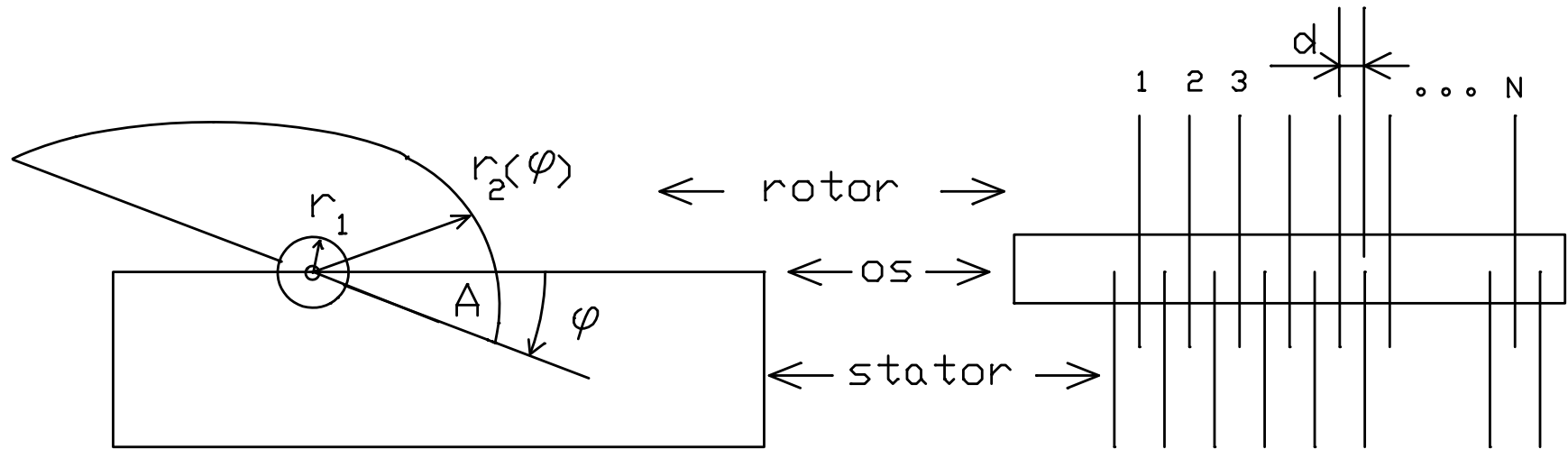
VIR: [doeeet](#)



Zračni vrtljivi kondenzatorji

- Običajno ima kondenzator dve vrsti plošč: nepomične (stator) in pomične (rotor).
- $TK_C \approx 100 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- $\text{tg}\delta \approx 30 \cdot 10^{-4}$

Zračni vrtljivi kondenzatorji



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

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

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

Elektrolitski kondenzatorji

Delitev elektrolitskih kondenzatorjev (ELKO)
po:

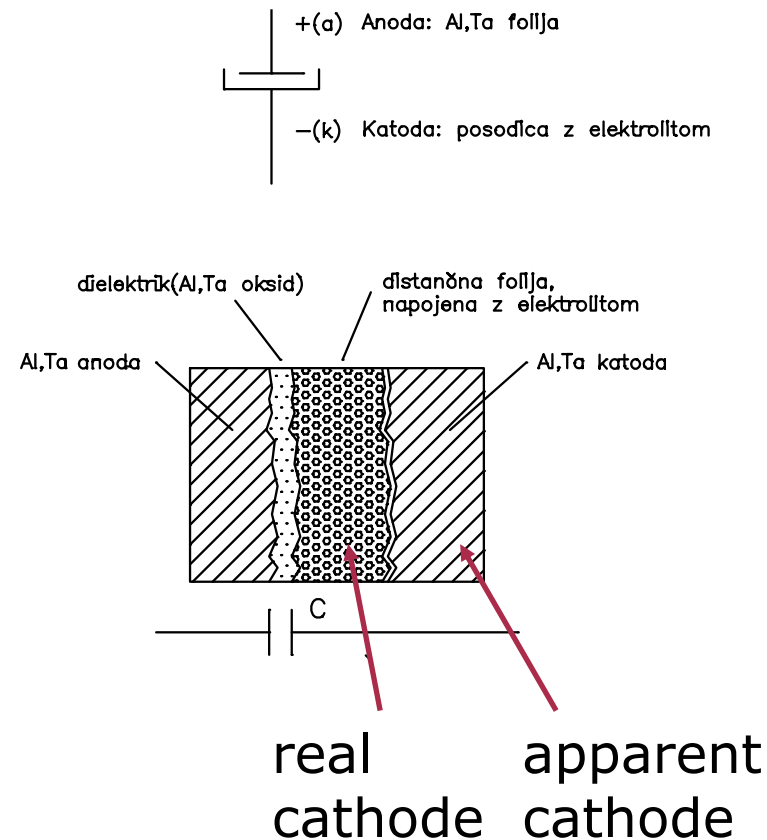
- materialu anode:
 - aluminijevi (Al),
 - tantalovi (Ta)
- vrsti elektrolita:
 - mokri (electrolytic; non-solid),
 - suhi (solid)
- značaju polarizacije:
 - polarni,
 - bipolarni (nepolarni)

Elektrolitski kondenzatorji

Vrsta C	Vrsta dielektrika	ϵ_r	Debelina dielektrika (μm)
Al- ELKO	Al_2O_3	7...10	(0.0013...0.0015/V)
Ta-ELKO	Ta_2O_5	24	(0.001...0.0015/V)
Plastni C	Poliester	3.2	0.5...2
Keramični	BaTiO_3	500...20000	5
Keramični C0G	TiO_2	15...250	5

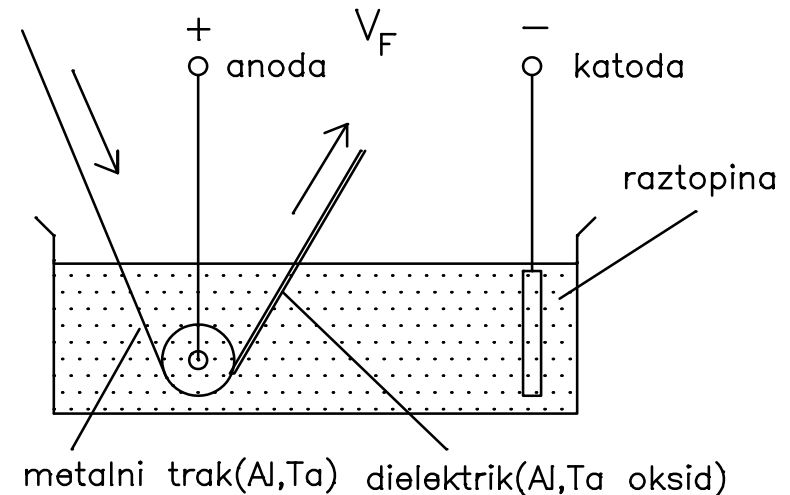
Elektrolitski kondenzatorji

- Dielektrik kondenzatorja je oksid na anodi (Al_2O_3 oz. Ta_2O_5)
- Površina anode je hrapava zaradi večje površine oz. kapacitivnosti,
- Zaradi boljšega električnega kontakta vstavljena med oksidirano anodo in katodo distančna folija, prepojena z dobro prevodnim elektrolitom, zaradi prisotnosti visokih koncentracij vodikovih (H^+) in elektrolitovih (El^-) ionov.
- Elektrolit → "tekoča elektroda", ki čimbolj objame anodo do tankega oksida (velika površina → velika C)



Mokri Al ELKO

- Izhodiščni material: tanek metalni Al trak $d \approx 100 \mu\text{m}$.
- Povečanje hrapavosti površine anode z jedkanjem Al folije v fosforni kislini.
- Ta je porozen $\rightarrow$ še s sintranjem Ta prahu na površino.
- Povečanje površine: 80-100x za nizkonapetostne C in 30-40x za srednje/visoko napetostne C (Al-ELKO)
- Povečanja površine pride za ceno večjega tg δ (do 4x).
- Izdelava dielektrika (anodna oksidacija): V elektrolitu se pod vplivom pozitivne napetosti formiranja na anodi V_F na obeh površinah metalnega traku tvori oksidna plast (Al_2O_3 oz. Ta_2O_5).
- Debelina plasti d je sorazmerna V_F
Al $\rightarrow K_F = 1.5 \text{ nm/V}$,
Ta $\rightarrow K_F = 1 \text{ nm/V}$



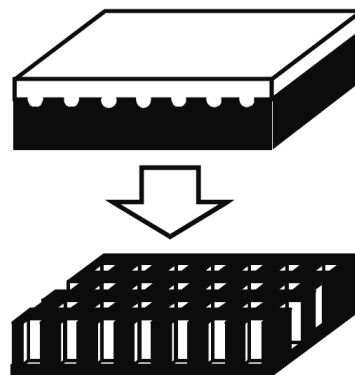
$$d = K_F V_F$$

Mokri Al ELKO

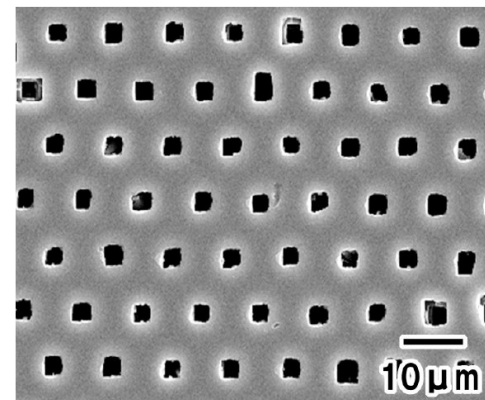
Anodno Al folijo visoke čistosti elektrokemijsko jedkamo v klorovi raztopini z DC, AC ali menjavo AC/DC ali kombinacijo AC/DC toka:

- Fino jedkano površino dobimo z AC elektrolizo → za nizkonapetostne C
- Tunelsko jedkanje z metalno masko dobimo z DC elektrolizo → za srednje/visokoapetostne C

Katodno Al folijo običajno jedkamo z AC elektrolizo za povečanje površine



Nadzor tunelskega jedkanja

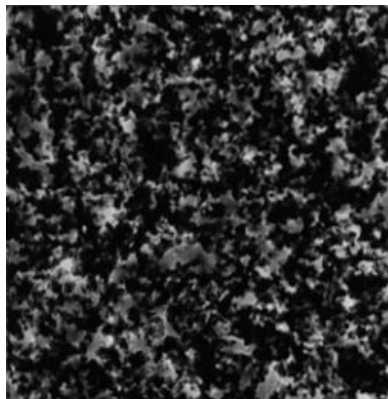


Tunelsko jedkana folija (zgoraj)

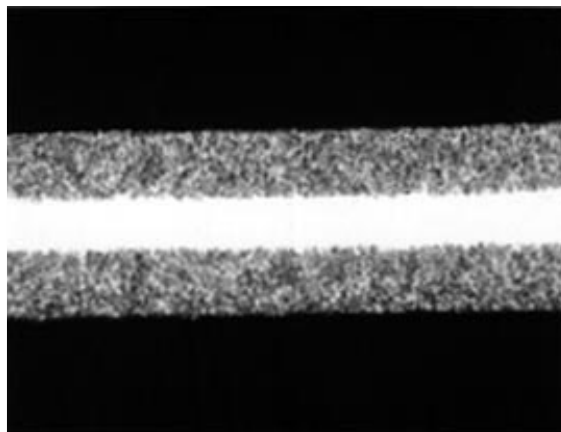
VIR: [Site Control of Tunnel Etching of Al for Electrolytic Capacitors Using Pretexturing by Mold](#)

Mokri Al ELKO – jedkanje anode/katode

Fino jedkana folija
(nizkonapetostni C)
(pogled zgoraj)



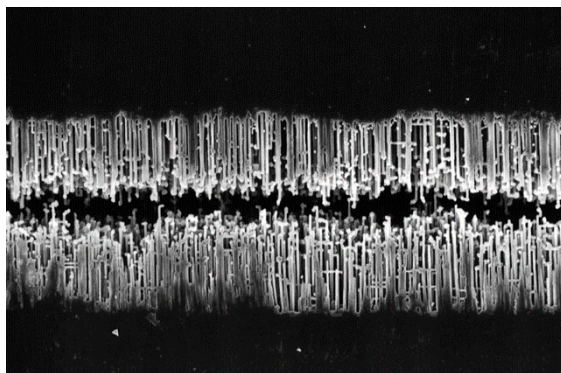
Fino jedkana folija
(nizkonapetostni C
presek)



Fino jedkana folija
(srednje/visokonap.)
(pogled zgoraj)



Fino jedkana folija
(srednje/visokonap
presek)



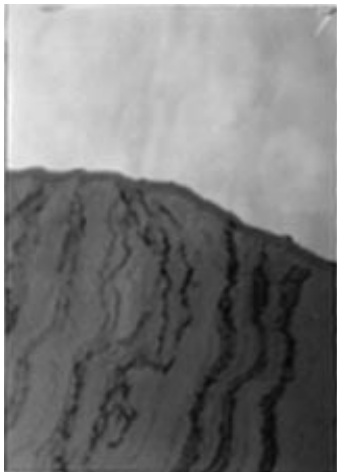
VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, NICHICON](#)

Mokri Al ELKO – dielektrik

- Najedkano Al folijo anodno oksidiramo v raztopini borove kisline, amoniaka in vode.
- Cilj je tvorba aluminijevega oksida na površini (dielektrika) Al- ELKO
- DC napetost na foliji s katero oksidiramo anodo → **napetost formiranja** V_F (forming voltage).
- Debelina dielektrika je *skoraj* proporcionalna $K_F(\text{Al}) = 1.3 \dots 1.5 \text{ (nm/V)}$

VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

Mokri Al ELKO – dielektrik



$V_F = 20V$



$V_F = 100V$

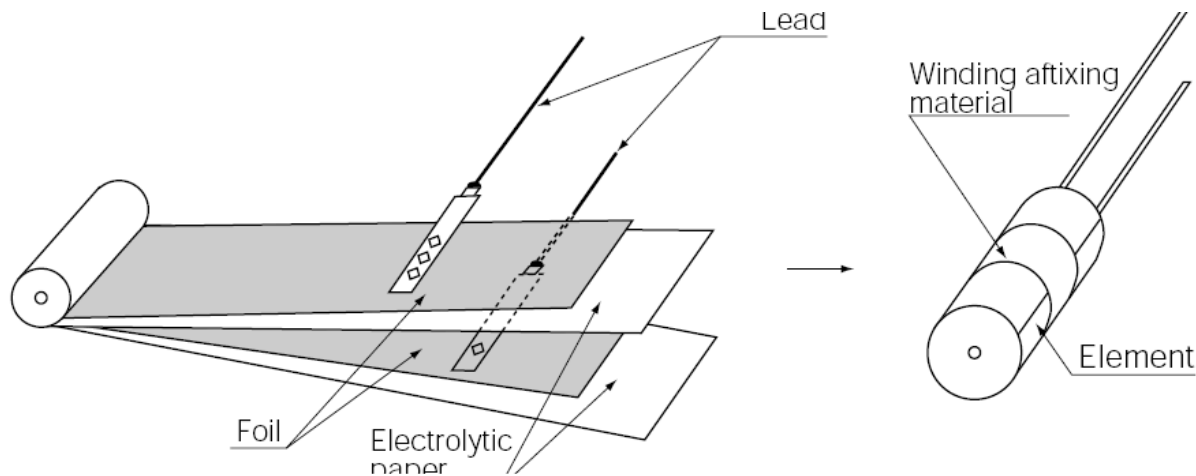


$V_F = 250V$

VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

Mokri Al ELKO – elektrolit

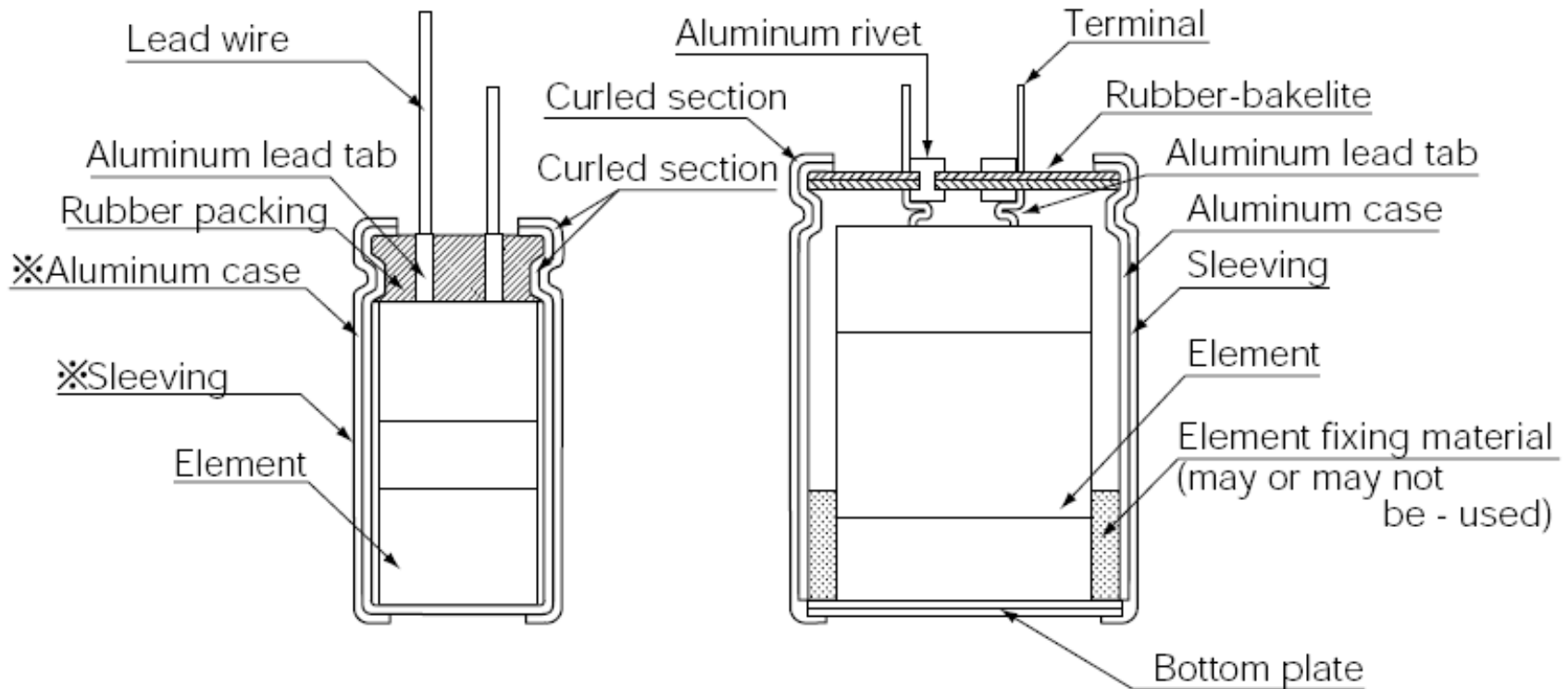
- Navijanje Al anode, Al katode in distančnih folij, prepojenih z elektrolitom (sendvič)
- Ko sendvič zvijemo, električno povežemo anodo in katodo
- Vstavljanje metalnih trakov za kontakte



VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

Mokri Al ELKO – enkapsulacija

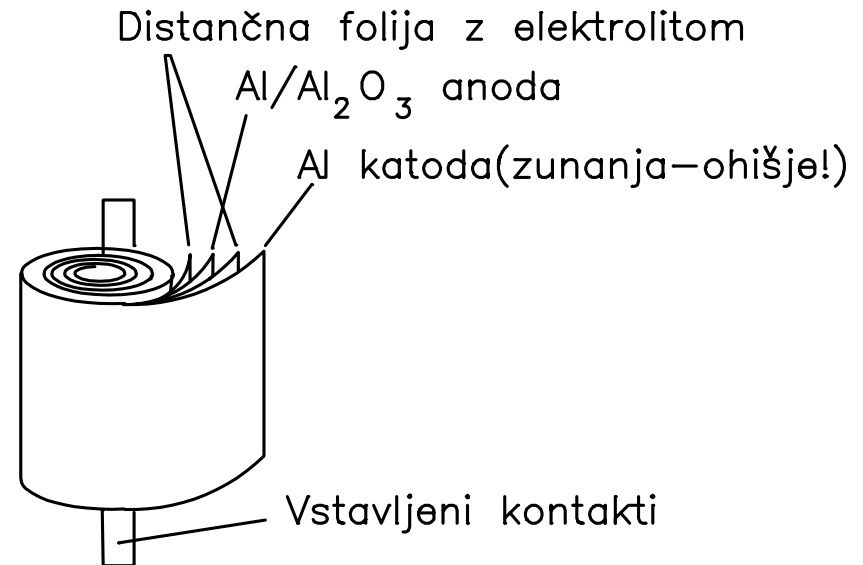
- Zalivanje v smole in zapiranje v kovinsko ohišje.



VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

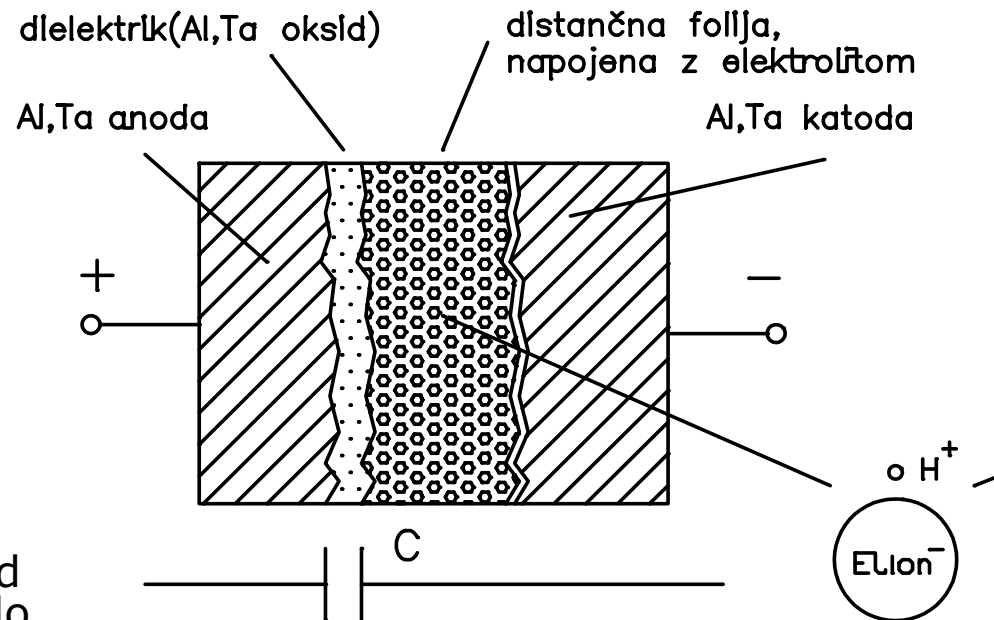
Mokri Al ELKO – varnostni faktor

- Previsoke napetosti povzročijo dodatno oksidacijo v elektrolitu kondenzatorja.
- To poveča debelino dielektrika → zmanjša kapacitivnost,
- Pri oksidaciji nastanejo plini, ki lahko uničijo element.
- Delovna napetost je zato za varnostni faktor ($k \approx 0.8$) nižja od V_F



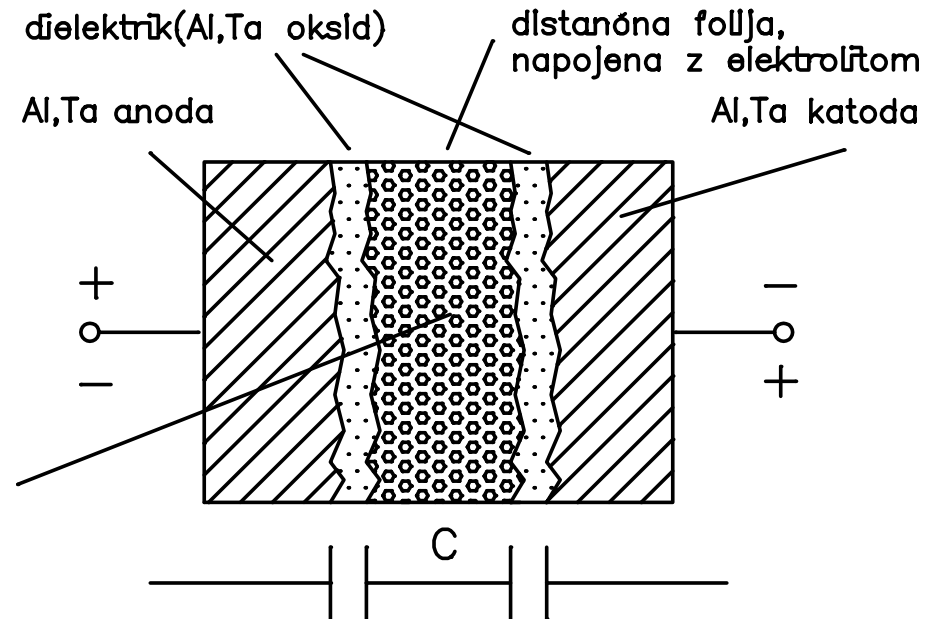
Polariteta ELKO

- Polarizacija(+/-) pritisnjene napetosti je → A je (+), K je (-)
- veliki negativni ioni elektrolita (El^-) ter mali prodorni pozitivni ioni vodika (H^+).
- **Pravilna polarizacija**
A je (+), K je (-):
 $V_{\text{delovna}} < V_F$
veliki ioni elektrolita ne prodrejo skozi oksid do anode → toka ni → oksidacije ni.
- **Nepravilna polarizacija**
A je (-), K je (+):
 H^+ ioni prodirajo skozi oksid do anode in se tam razelektrijo, izloča se vodik na anodi, oksid odstopa od anode, zaradi odkritih mest pride do naglega povečanja toka in izločanja plina (ventil)
- Katoda je zaščitena pred agresivnim elektrolitom s tankim oksidom ($V_F = 2\text{V}$).
 $V_{\text{delovna}} < V_F$ tudi pri nepravilni polarizaciji ne pride do reakcije.



Bipolarni ELKO

- Polarizacija napetosti ni pomembna (bipolarni)
- Struktura je enaka kot v polarnih z veliko razliko: **katoda je oksidirana** z isto V_F kot anoda
- Če je na anodi (-) pol napetosti → katoda je oksidirana → ioni ne morejo prodreti skozi oksid → toka in reakcije ni
- Neobčutljiv za DC/**AC napetost**
 $V_{\text{delovna}} < V_F$
- Slabost → 2x nižja kapacitivnost kot polarni



Nadomestno vezje mokrega Al ELKO

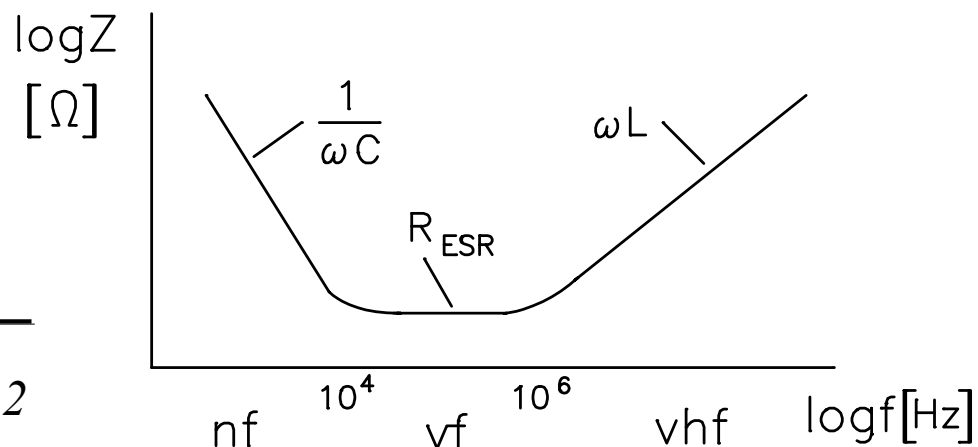
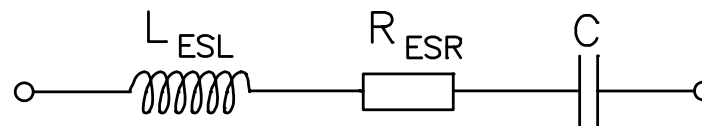
Nadomestno vezje ima dva parazitna elementa:

- **ekvivalentna serijska upornost** R_{ESR} :
ohmske upornosti dovodov, kontaktov,
metalne Al folije, elektrolita
 $R_{\text{ESR}} = (10^{-2} \dots 10^2 \Omega)$.
- **ekvivalentna serijska induktivnost** L_{ESL} :
induktivnost dovodov, navite strukture
metalne Al folije

Impedanca mokrega AI ELKO

$$\hat{Z} = R_{ESR} + j\omega L_{ESL} + \frac{1}{j\omega C}$$

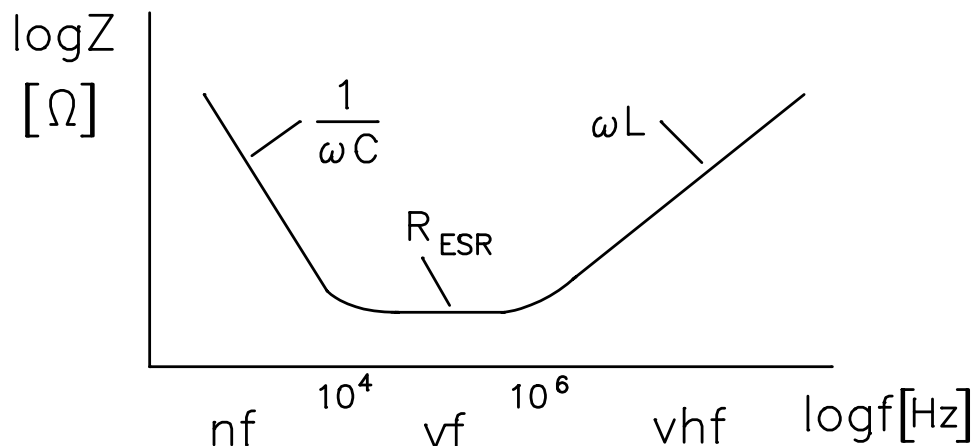
$$= R_{ESR} - j\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L_{ESL}\right)$$



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

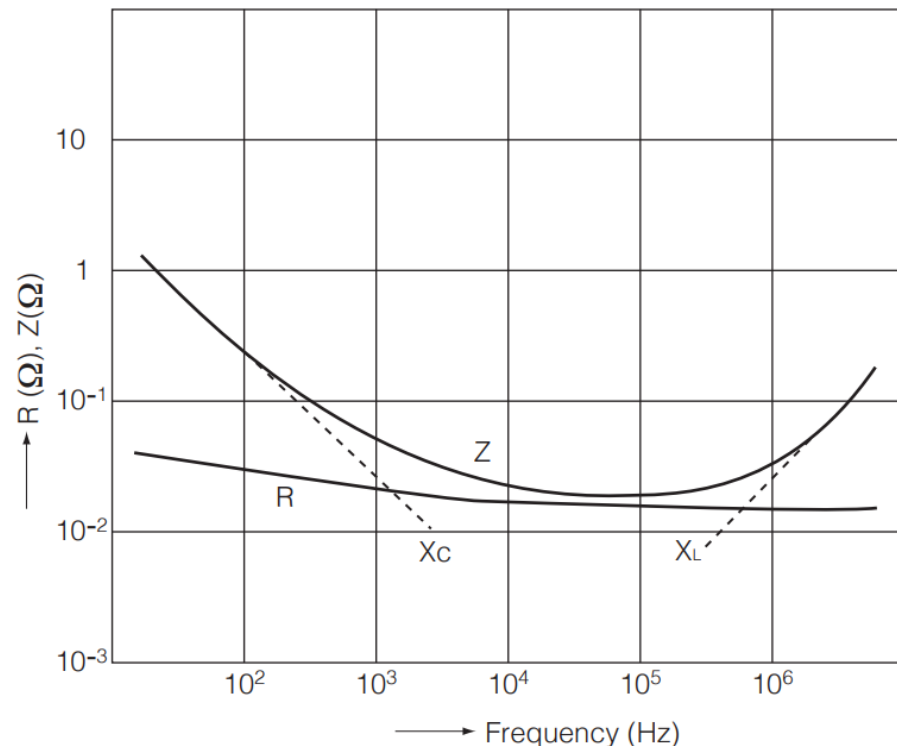
Impedanca mokrega AI ELKO

- **NF ($\omega \rightarrow 0$) :**
 $Z \approx 1/\omega C$ (idealni kondenzator) do $f_{NF} \approx 10\text{kHz}$
- **VF (ω velik) :** $Z \approx R_{ESR}$
(Izgublja uporabne lastnosti)
 $f_{VF} \approx 1\text{MHz}$.
- **VHF (ω zelo velik):**
 $Z \approx L_{ESL}$
- (prevzame lahko induktivni značaj)



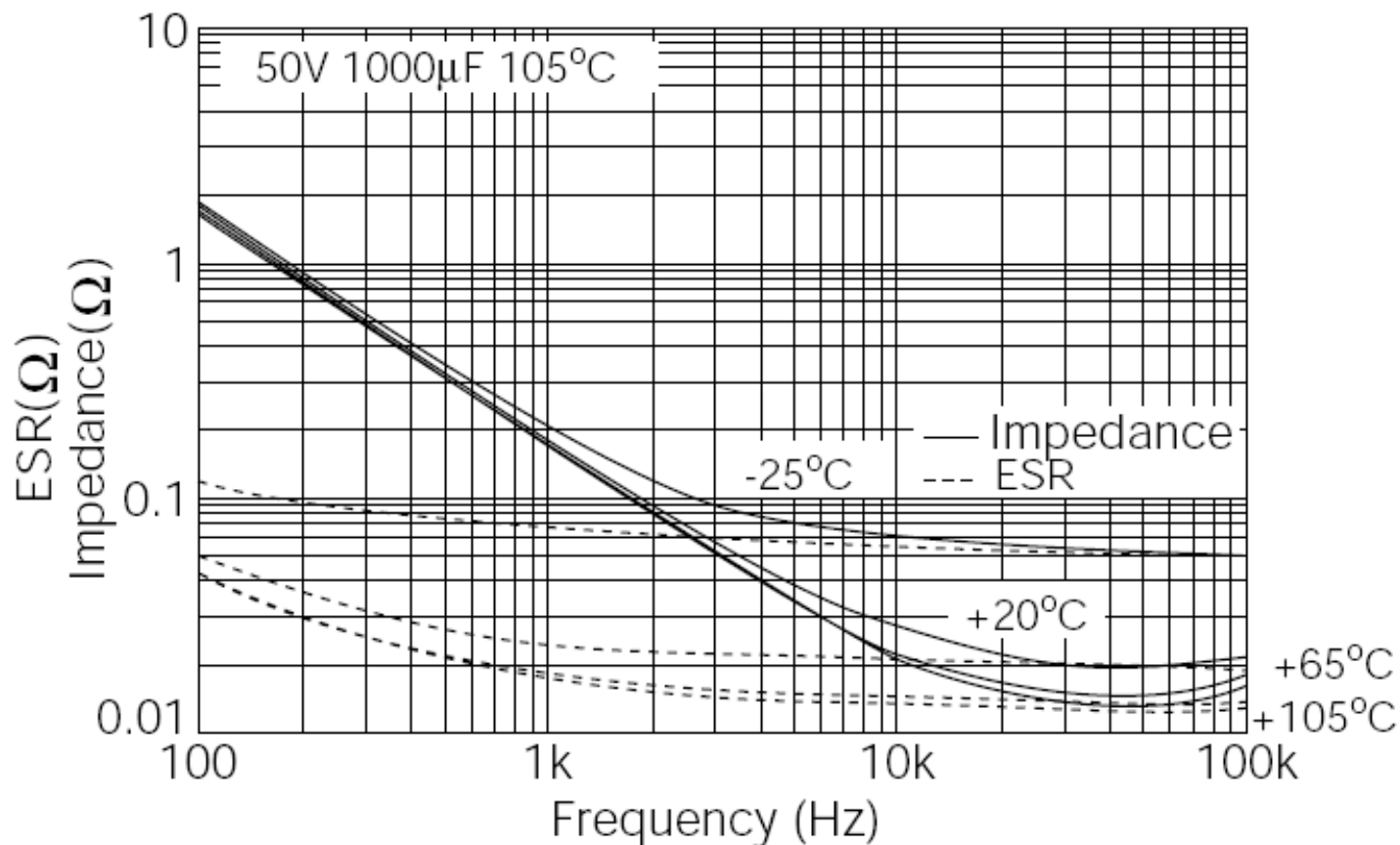
Impedanca mokrega Al ELKO

- $Z(f)$ resničnih elementov precej odstopajo, odvisno od strukture.
- Včasih srednje področje (R_{ESR}) ni izraženo.
- Izmerjeni diagrami odstopajo lahko tudi zato, ker v resnici parametri v nadomestnem vezju niso konstantni, ampak se spreminjajo zaradi najrazličnejših vplivov:
 - R_{ESR} upada s frekvenco in temperaturo.
 - C pogosto upada s frekvenco ter naraščanje s temperaturo in nazivno napetostjo.
 - Induktivnost L_{ESI} običajno narašča s temperaturo.



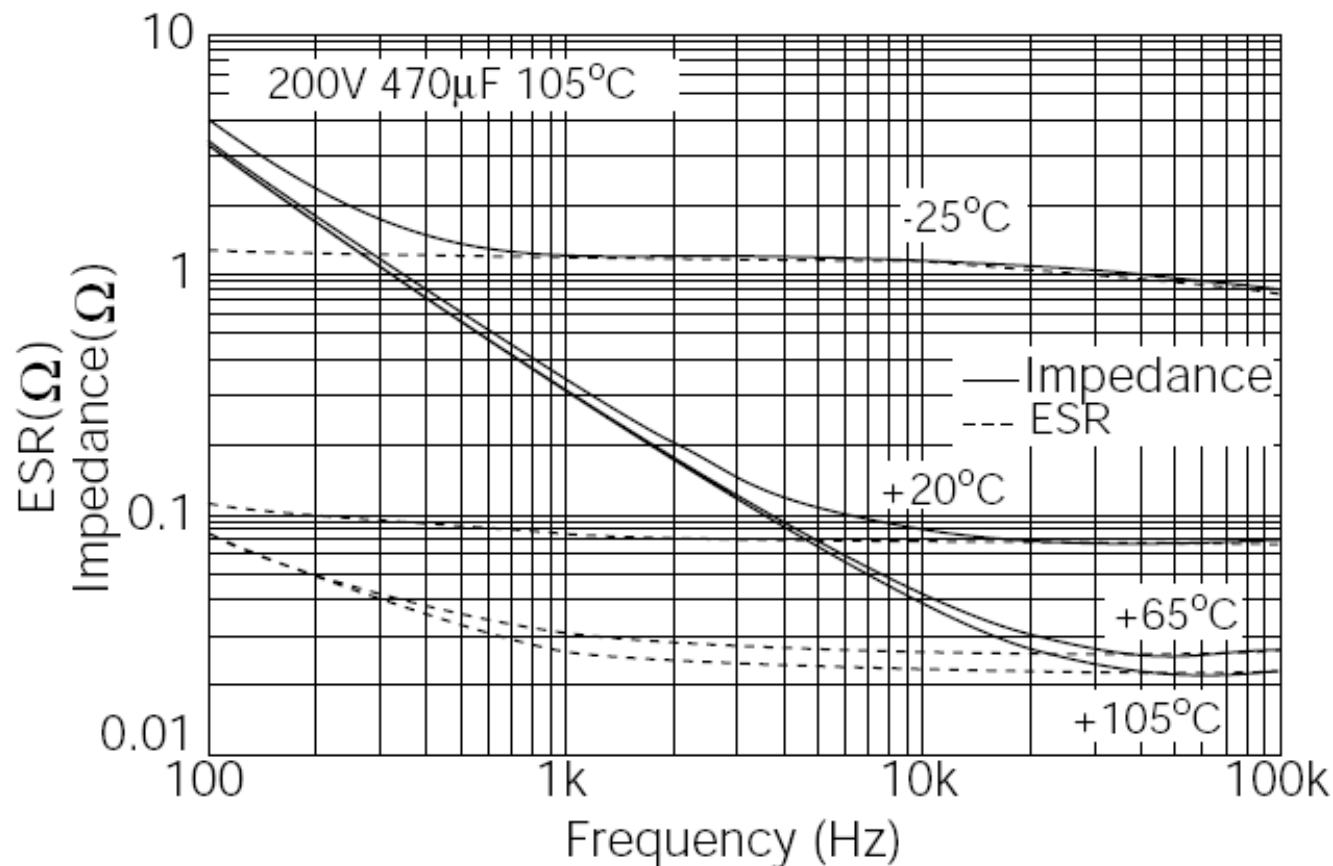
VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

Impedanca mokrega Al ELKO - 1000 μ F/50V



VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

Impedanca mokrega Al ELKO - 470 μ F/200V



VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

Tok puščanja I_p

- Tok puščanja/prečni tok I_p (ang. leakage current) je enosmerni tok, ki teče skozi ELKO zaradi priključene enosmerne napetosti.
- Narašča s temperaturo in upada s časom od priključitve enosmerne napetosti

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

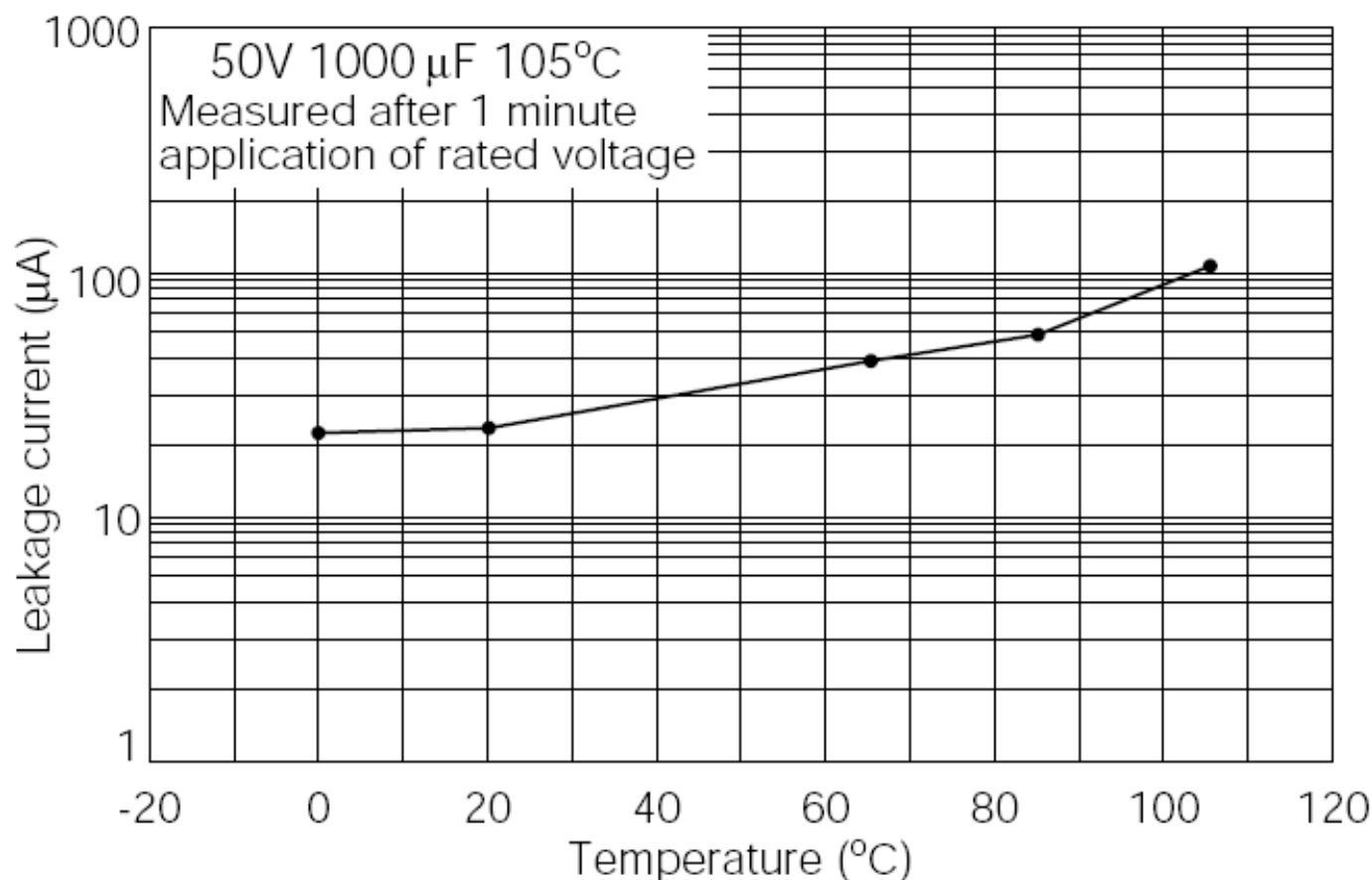
Tok puščanja I_p

Vzroki za povečanje toka puščanja:

- Polarizacija dielektrika (aluminijeva oksidna plast)
- Razformiranje dielektrika
- Absorbcija vlage v dielektriku
- Preboj dielektrika zaradi klorovih ali železovih delcev
- Tok puščanja lahko samo zmanjšamo s pravilno izbiro materialov, popolnoma izničiti ga nikdar ne moremo.

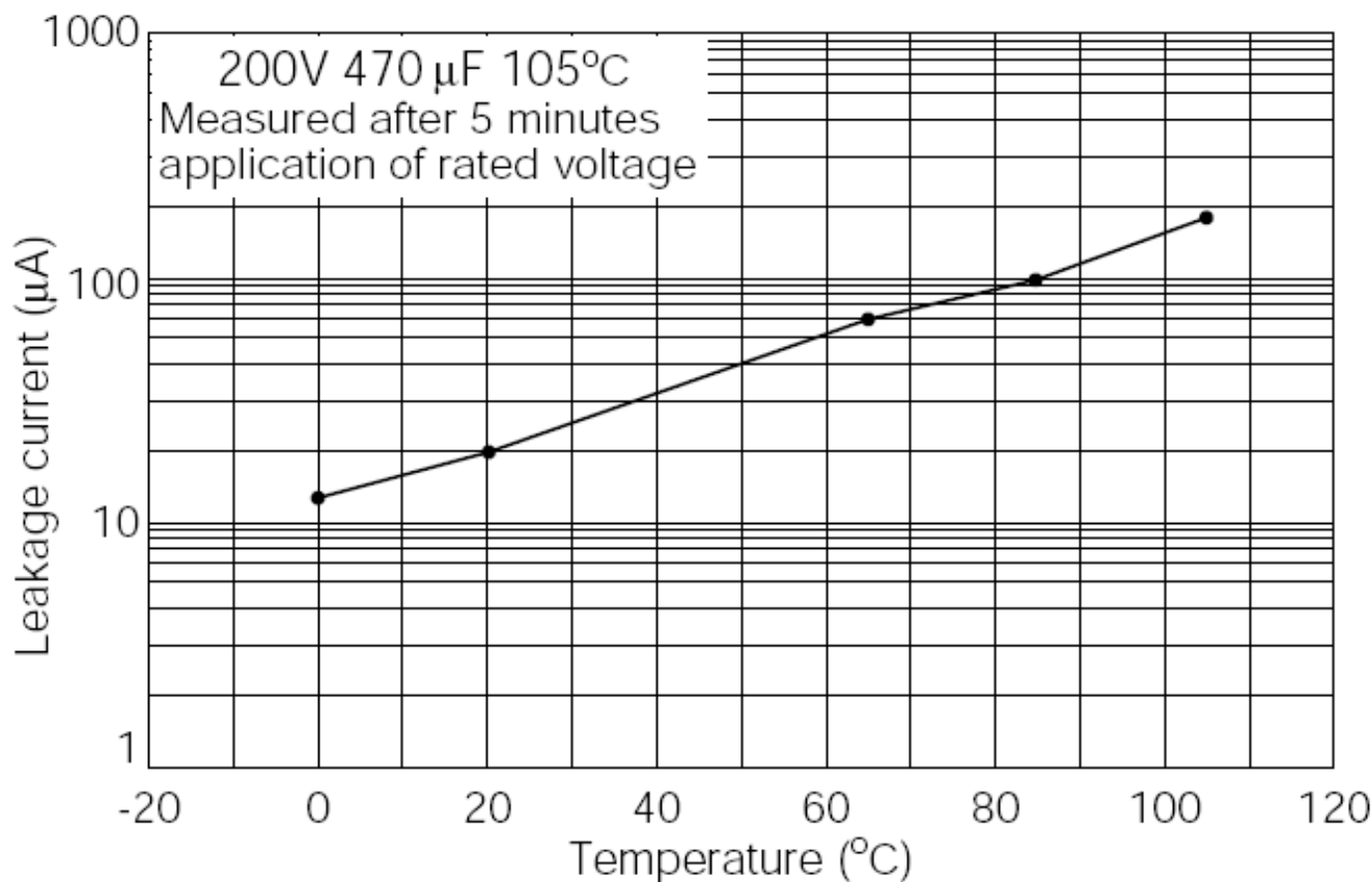
Meritev toka puščanja izvedemo pri nazivni napetosti na sobni temperaturi in vnaprej določenem času.

Tok puščanja I_p - 1000 μ F/50V



VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

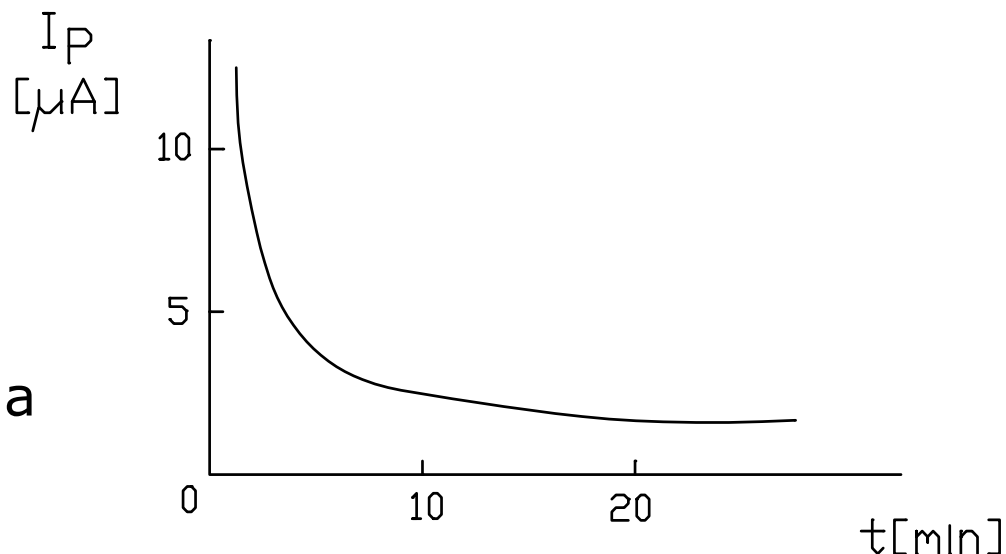
Tok puščanja I_p - 470 μ F/200V



VIR: [General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors](#) (NICHICON)

Razformiranje/regeneracija oksida

- Če ELKO dalj časa ni bil pod napetostjo, se njegov dielektrik (oksid) lahko raztopi (**razformira**) v agresivnem elektrolitu kondenzatorja
- To povzroči visoke I_p .
- Kondenzator regeneriramo tako, da ga priključimo na nazivno napetost → ponovna formacije oksida.
- Pri tem lahko v začetku toki močno narastejo, tudi do 100x višjih vrednosti
- I_p mora čez čas upasti (graf)



Omejitve električnih obremenitev

- **Omejitve glede toka:**
(RMS valovitost toka) I_{rmax} .
Omejitve nastopijo zaradi segrevanja kondenzatorja. Povišanje temperature ELKO zaradi električne obremenitve ne sme presegati $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$
- **Omejitve glede napetosti**
Vsota DC+AC napetosti ne sme preseči predpisane nazivne napetosti $V_n = k_F \cdot V_F$

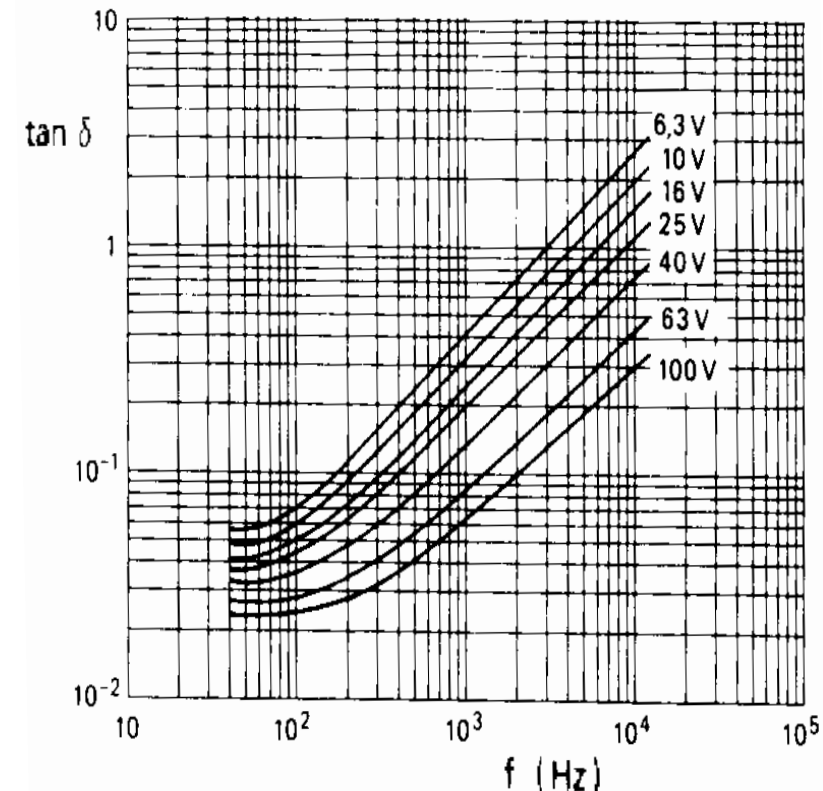
$$P = I_r^2 R_{ESR} = \sigma A (T_C - T_a)$$

$$V_{rmax} = I_{rmax} \cdot R_{ESR}$$

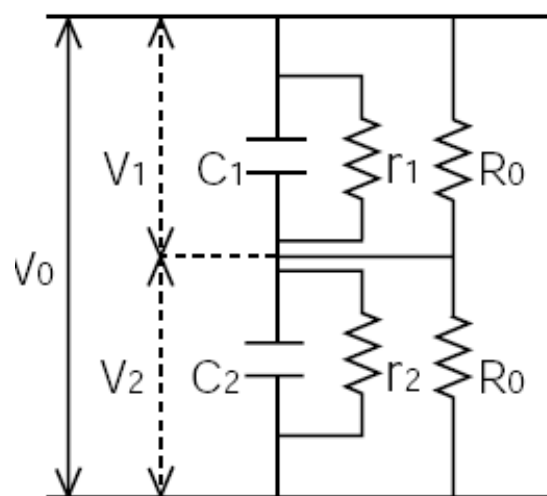
Lastnosti mokrih Al ELKO

- Lestvice E3, E6.
- Velike tolerance kapacitivnosti
- Omejitev:
 - nizke C: $C \cdot V < 500 \mu\text{As}$
 - visoke C : $C \cdot V < 25000 \mu\text{As}$
- $\text{tg}\delta \approx 10^{-2} \dots 1$
- Vrednosti $\text{tg}\delta$:
 - naraščajo s C_n , f
 - upadajo z V_n , T .
- Označevanje
 - polarni:
anoda $\rightarrow + \rightarrow + \rightarrow +$
 - Bipolarni:
 $+$ na anodi in na katodi.

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



Izenačitvena upornost pri zaporedni vezavi ELKO



C_1 : Aluminum Electrolytic Capacitor No.1

C_2 : Aluminum Electrolytic Capacitor No.2

r_1 : Leakage Current resistance of Capacitor No.1

r_2 : Leakage Current resistance of Capacitor No.2

V_1 : Voltage between terminals in Capacitor No.1

V_2 : Voltage between terminals in Capacitor No.2

R_0 : Balance Resistance

V_0 : Line Voltage

$$i_1 = \frac{V_1}{r_1} , i_2 = \frac{V_2}{r_2} \dots\dots\dots (2 - 3 \cdot 2 - 4)$$

$$V_0 = V_1 + V_2 , \quad V_1 - V_2 = R_0 \times (i_2 - i_1)$$

$$R_0 = \frac{V_1 - V_2}{i_2 - i_1} \dots\dots\dots (2 - 5)$$

Izenačitvena upornost pri zaporedni vezavi ELKO

- Če je nazivna napetost ELKO $V(V)$ in njegova kapacitivnost $C(\mu F)$, potem lahko spremembe toka puščanja za PCB kondenzator na sobni temperaturi opišemo s spodnjo oceno.

$$\begin{aligned} i_{\max} - i_{\min} &= \frac{\sqrt{C \times V}}{2} - \frac{\sqrt{C \times V}}{5} \\ &= \sqrt{C \times V} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{5} \right) \\ &= \frac{3}{10} \sqrt{C \times V} \dots (\mu A) \end{aligned}$$

- Dobljeno variacijo I_p moramo popraviti glede na pogoje delovanja:
- Faktor naraščanja I_p s temperaturo: pri $65^\circ C$ je 2-3, pri $85^\circ C$ 3-5 krat večji (I_p Al ELKO raste s T)
- Tok puščanja je odvisen od napetosti na ELKO in pogojev shranjevanja, zato množimo I_p še z faktorjem variacije toka puščanja.

Izenačitvena upornost pri zaporedni vezavi ELKO

- Določite izenačitveno upornost zaradi razlik v I_p pri zaporedni vezavi 400V, 470 μ F Al-ELKO pri temperaturi 60°C
- Faktor povečanja I_p s temperaturo (60°C) = 2
- Zahtevano uravnoteženje napetosti: 10%
- Faktor variacije I_p = 1.4

Uravnoteženje napetosti: $V_1 - V_2 = 400 \times 0.1 = 40 \text{ (V)}$

$$\begin{aligned} i_{\max} - i_{\min} &= \frac{3}{10} \sqrt{C \times V} \times 2 \times 1.4 \\ &= \frac{3}{10} \sqrt{470 \times 400} \times 2 \times 1.4 \\ &= 364 (\mu \text{ A}) \end{aligned}$$

Območje spreminjanja I_p $\therefore R_0 = \frac{40}{364 \times 10^{-6}} \approx 109000 \dots\dots 100\text{k}\Omega$

VIR: [Application Guidelines for Aluminum Electrolytic Capacitors \(Nichicon\)](#)

Suhi Al ELKO

- Modernejši elementi od mokrih
- Struktura je podobna strukturi mokrih:
 - Navite folije,
 - Distančna folija: namesto papirja → tkanina iz steklenih vlaken,
 - Elektrolit: je prevodna pasta mangan nitrata.
 - Elektrolit se ne izsuši (ker je suh) → **stabilnejši** kondenzatorji.
 - Prevodna pasta večjo prevodnost od mokrih elektrolitov, kar prinese nižjo ekvivalentno serijsko upornost R_{ESR} .
- relativno nizka odvisnost kondenzatorjevih lastnosti od temperature, zlasti okrog sobnih temperatur
- dolga življenjska doba in doba skladiščenja
- večji dopustni enosmerni toki ter toki polnjenja in praznjenja

Tantal ELKO

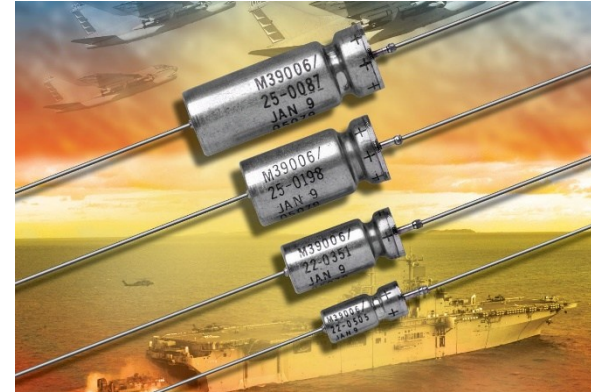
- So boljši od aluminijevih (višje kapacitivnosti)
- Struktura je podobna kot pri aluminijevih.
- Dielektrik: tantalov oksid Ta_2O_5 ,
dielektričnost $\epsilon_r = 30$ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 8$),
- $K_F = 1.0 \text{ nm/V}$ (50% nižja od Al!):
 - pri enaki debelini oksida za 50% višjo $V_F \rightarrow$ višja V_n ;
 - pri isti V_n za 50% nižjo debelino oksida $\rightarrow$ višjo C
- Lastnosti Ta_2O_5 :
 - kemijsko bolj stabilen od Al_2O_3 , $\rightarrow$ uporaba agresivnejših in koncentriranih elektrolitov $\rightarrow$ bolj prevodni $\rightarrow$ nižja R_{ESR} .
 - zelo stabilen material tudi $\rightarrow$ kondenzatorji so temperaturno stabilni elementi s širokim temperaturnim obsegom delovanja ($-55 \dots +125^\circ\text{C}$).

Tantal ELKO

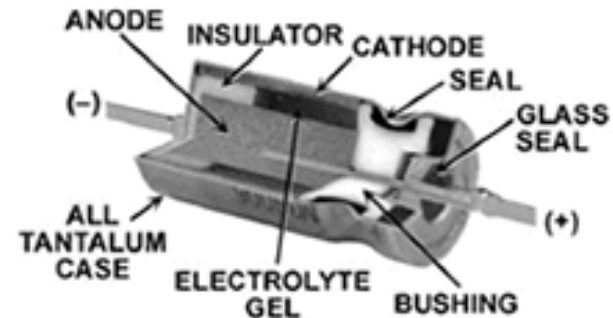
- Nižji valovitost toka kot Al ELKO
- Ne smemo obrniti polaritete napetosti, ali jo preseči (nimajo ventila → radi eksplodirajo), zato niso primerni za stikalne aplikacije, kjer se pojavljajo napetostne špice.
- Dražji od Al ELKO

Naviti mokri Ta ELKO

- Anoda → tanka ($d \approx 10\mu\text{m}$) oksidirana (Ta_2O_5) folija
- Distančna folija → papir ($d \approx 10\mu\text{m}$).
- Elektrolit:
 - litijev klorid (nižje V_n)
 - borova kislina (višje V_n).
- Katoda: Ta folija,
 - neoksidirana folija (polarni)
 - oksidirana folija (bipolarni),
- $C_n \approx 1\mu\text{F} \dots 2200\mu\text{F}$,
- $V_n \approx 15 \dots 125\text{ V}$.



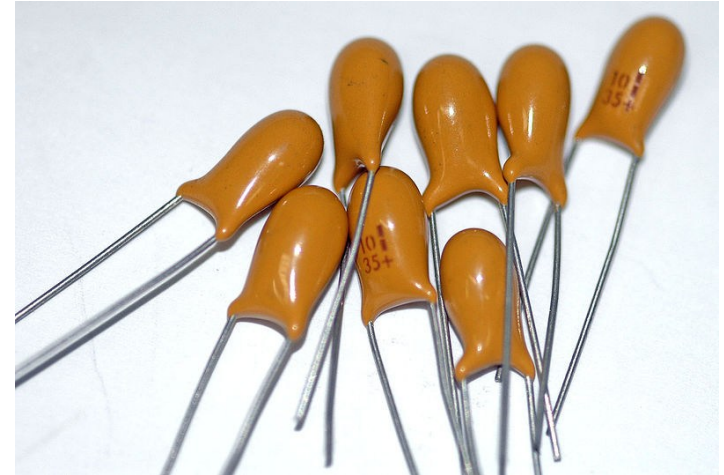
VIR: [Vishay M39006](#)



VIR: [Kyocera](#)

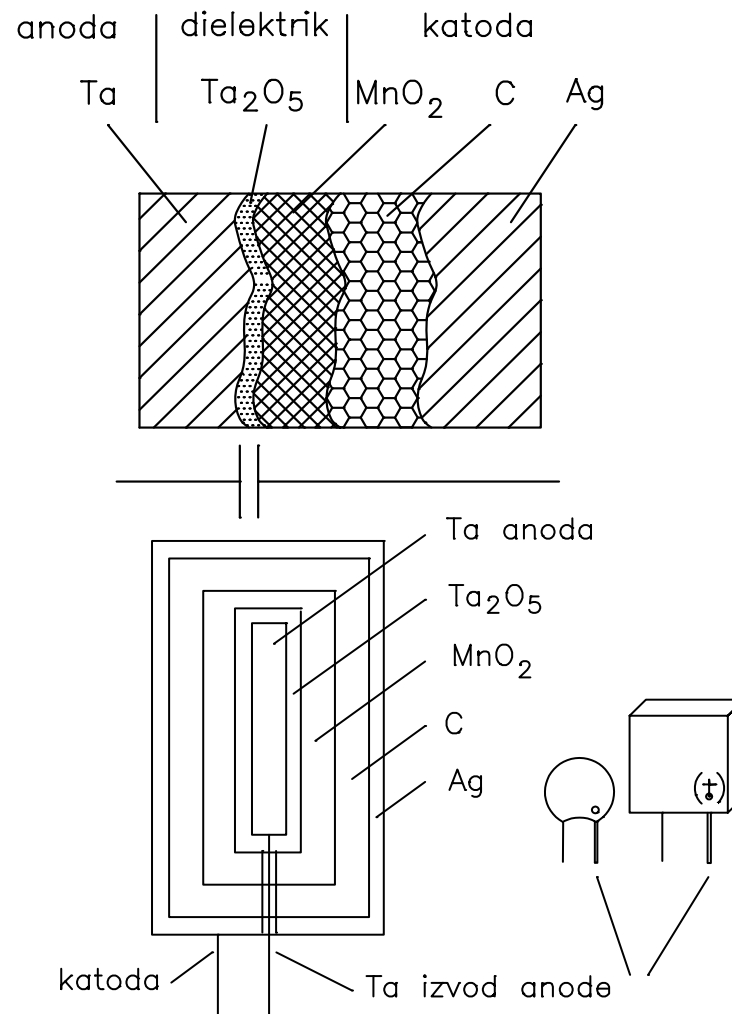
Ploščati mokri Ta ELKO

- Anoda → ploščica Ta
- Kapacitivnost povečana z naravno poroznostjo Ta + sintranjem finega Ta prahu
- Elektrolit:
 - žveplena kislina
 - litijev klorid → zelo nizke R_{ESR}
- Katoda (obenem ohišje) mora biti na delu, ki je v stiku z elektrolitom, iz srebra.
- $C_n \approx 2,2\mu F \dots 1200\mu F$ (E6)
- $V_n \approx 6.3V \dots 125V$



Suhi Ta ELKO

- Nima elektrolita, ampak trden polprevodniški material MnO_2
→ trdni (solid) kondenzatorji
- Anoda:
 - ploščica ali žička iz tantala Ta, ki ji površino še povečajo s sintranjem finega Ta prahu na površino.
- Katoda:
 - Impregnacija oksidirane anode z manganom nitrata, ki se nato z oksidacijo pretvori v manganov oksid MnO_2 .
 - MnO_2 je polprevodniški material, vendar ima zelo dobro prevodnost.
 - Ponavljamo, dokler plast MnO_2 ni dovolj debela in prevodna.
 - Plast MnO_2 ojačimo s prevodno (C) ali (Ag) prevleko in
 - Prispajkamo izvode.



Lastnosti suhih Ta ELKO

- Suhi boljši od Ta mokrih kondenzatorjev
- $C_n \approx 0,1 \mu\text{F} \dots 2200 \mu\text{F}$ (E6 lestvica)
- $V_n \approx 6.3 \text{ V} \dots 80 \text{ V}$
- Temperaturni obseg: $-55^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$
- visoka specifična kapacitivnost
- dobre VF lastnosti
- visoka temperaturna stabilnost
- $I_p \approx 0.5 \dots 5 \mu\text{A}$ (nižji kot pri mokrih)
- $\text{tg}\delta$ raste s frekvenco in pada s temperaturo;
 $\text{tg}\delta < 0.4$ ($f < 10\text{kHz}$) za $1\mu\text{F}/35\text{V}$ kondenzator
- dolg čas skladiščenja in dolga življenjska doba

[SMD T490](#)

[MnO2 capacitor \(KEMET\)](#)

Označevanje Ta ELKO

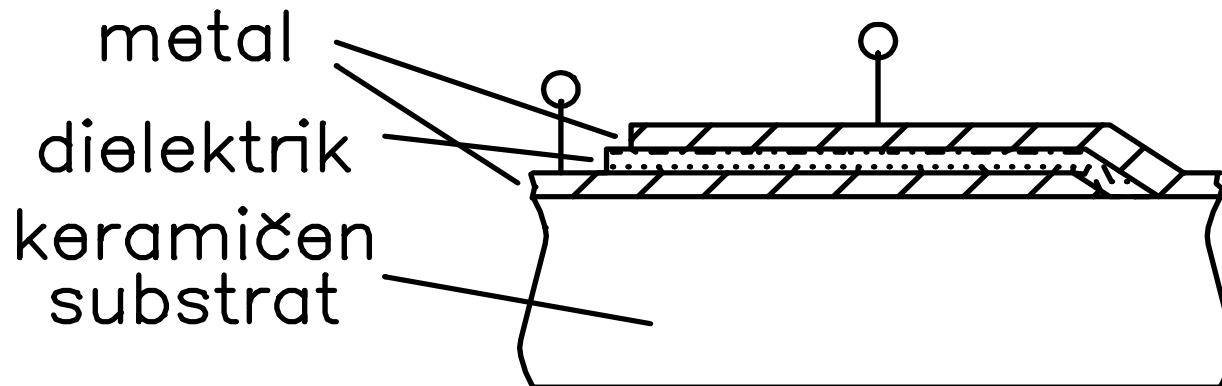
- Pri polarnih kondenzatorjih:
 - pika ali + ob anodi,
 - žični dovod anode debelejši
- Nima varnostnega silikonskega ventila (kot Al ELKO) in zato eksplodira (paziti na polariteto)

Specialni kondenzatorji

- **hibridne tehnologije**, ki jih delimo glede na karakteristične debeline nastopajočih plasti na
 - tankoplastne in
 - debeloplastne
- **monolitne tehnologije**
glede na izhodiščni material običajno na Si, GaAs ...
- **tiskana vezja**, ki jih delimo na
 - klasična tiskana vezja
(Printed Circuit Board, PCB)
 - tiskana vezja s površinsko montažo
(Surface Mounted Technology, SMT)
- Elementi nastopajo:
 - samostojni (tabletki)
 - kot del vezja (vgrajeni)

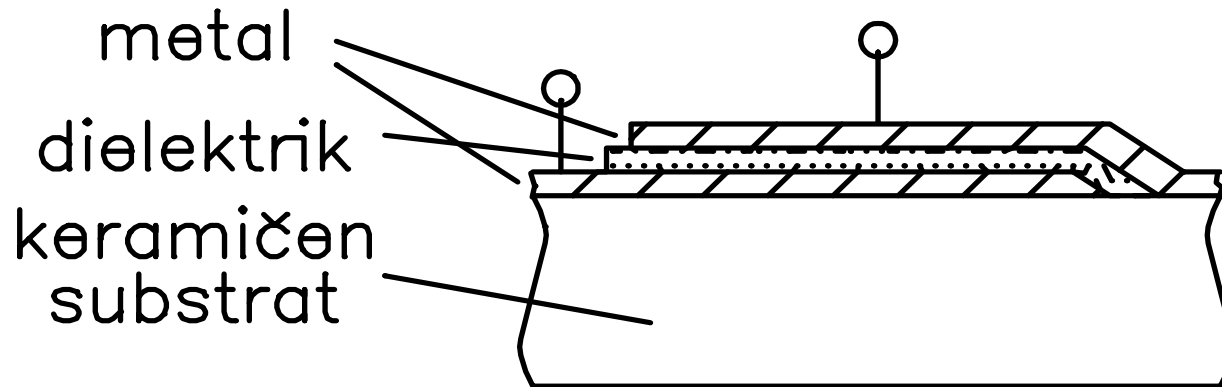
Tankoplastni kondenzatorji

- Nanesemo tanke metalne in dielektrične plasti na substrat (keramika, safir, steklo)
Z vakuumsko depozicijo (uporovno napajanje, napajanje z elektronskim topom ali naprševanje)
- $d \approx 1\mu\text{m}$ (tankoplastni)
- Geometrija elementa → fotolitografija



Debeloplastni kondenzatorji

- Struktura enaka kot pri tankoplastnih
- Izdelani so s postopki **tiskanja** ustreznih **metalnih** in **dielektričnih past**.
- $d \approx 10 \dots 100 \mu\text{m}$ (debele plasti)
- Geometrija elementa $\rightarrow$ fotolitografija

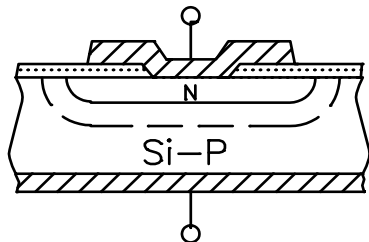


VIR: [Wiki](#)

PN spojni kondenzator

- Dielektrik kondenzatorja je osiromašeno področje PN spoja v zaporni smeri, ki je osiromašeno prostih nosilcev in se zato obnaša kot dielektrik.
- Zaporni polarizaciji PN spoja → polarni kondenzator.
- Izdelan s standardnimi polprevodniškimi tehnološkimi postopki:
 - termične oksidacije,
 - fotolitografije oksidne plasti,
 - skozi nastale odprtine selektivnega vnašanja donorskih ali akceptorskih primesi s pomočjo termične difuzije ali ionske implantacije.
- Širina osiromašenega področja je odvisna od zaporne napetosti → $C=C(V_R)$ (varicap)

$$C(V) = \epsilon \frac{A}{d(V)} = \frac{k}{V^n}$$

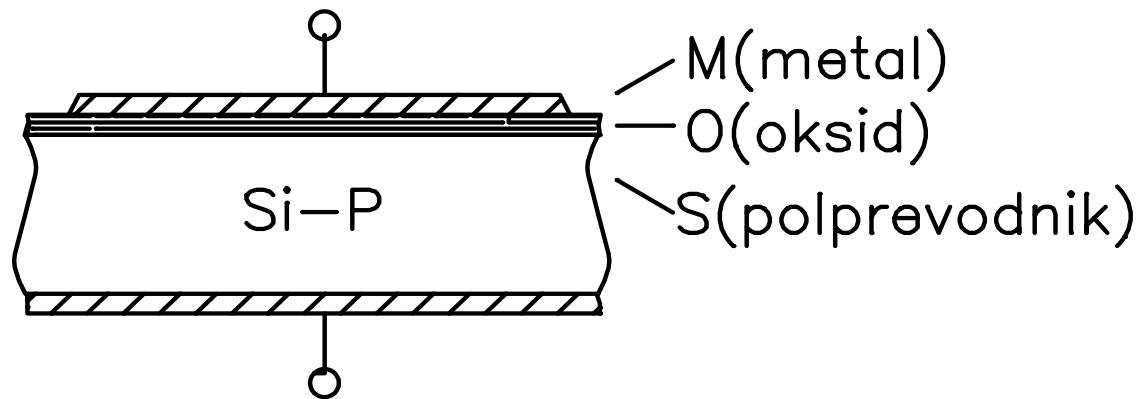


- ϵ dielektričnost polprevodnika $\epsilon_r(\text{Si}) = 12$
- $n \rightarrow$ odvisna od tipa PN spoja
 - $n=1/2 \rightarrow$ stopničast spoj
 - $1/3 \rightarrow$ linearen spoj,
 - vmes $\rightarrow$ za ostale tipe PN spojev
- $I_p \approx 50 \text{ nA/mm}^2$, $\text{tg} \delta \approx 100 \cdot 10^{-4}$

MOS kondenzator

- Dielektrik je silicijev oksid SiO_2 ($\epsilon_r(\text{SiO}_2)=4$) ($d_{\text{ox}} \approx 0.1 \dots 1 \mu\text{m}$)
- Zgornja elektroda je (Al, Au),
- Spodnja elektroda je dopiran polprevodnik

$$C = \epsilon \frac{A}{d_{\text{ox}}}$$



Vir: [MOS Capacitor](#)

Electrical double-layer capacitors (EDLC)

(EDLC) (**supercapacitor**, ultracapacitors) nimajo trdnega dielektrika. Elektrolit predstavlja prevodno povezavo med dvema aktivnima elektrodama, za razliko od ELKO, kjer je elektrolit del elektrode (katode)

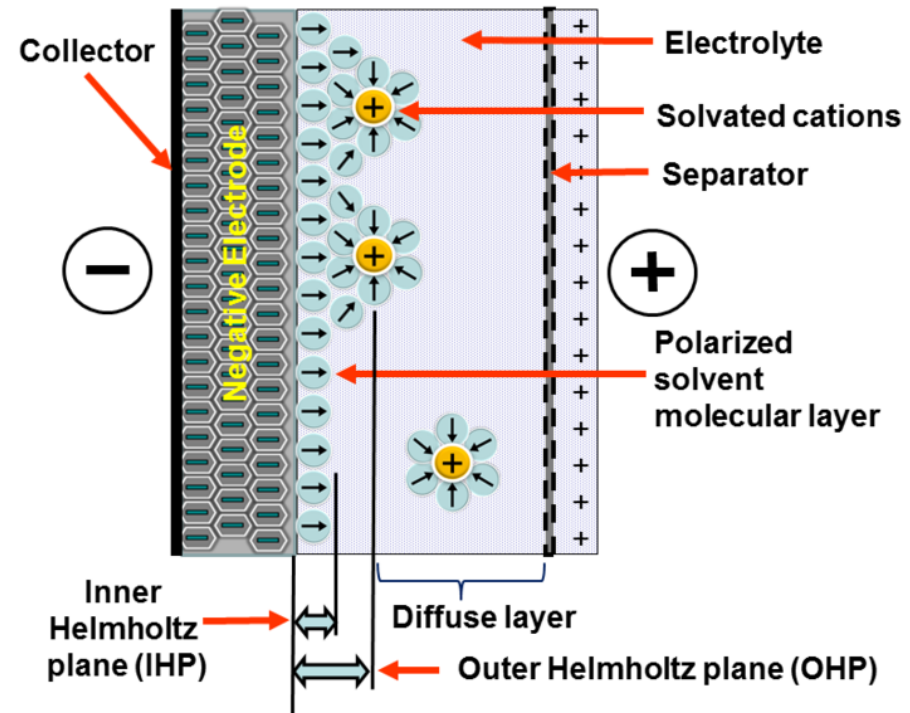
- Delitev po principu hranjenja naboja:
 - Dvojna Helmholtzeva plast (ang. double-layer capacitance)
Hranjenje naboja dosežemo z ločitvijo naboja v dvojni Helmholtzevi plasti med površino prevodne elektrode in elektrolitom (raztopina)
 - Debelina plasti: (0.3 ... 0.8 nm) → visok C
- Psevdokapacitivnost (Pseudocapacitance)
- Oba principa prispevata k celotni kapacitivnosti – razmerje prispevkov je odvisno od načrtovanja elektrod in sestave elektrolita.
- Psevdokapacitivnost lahko poveča velikost kapacitivnosti za razred velikosti čez prispevek dvojne Helmholtzevi plasti.

Lastnosti EDLC

- Materiali za telo: velika poroznost, dobre dielektrične lastnosti
 - Aktiviran ogljik (zrna) iz lupin kokosovih orehov ($250 \text{ m}^2/\text{g}$)
 - Grafen (enoatomska urejena plast C atomov) ima veliko specifično površino, dobra el. prevodnost
 - C nanocевke na substratu
 - C aerogel (pena) največja spec. površina od vseh ($1000 \text{ m}^2/\text{g}$)

Učinek dvojne plasti (EDL effect)

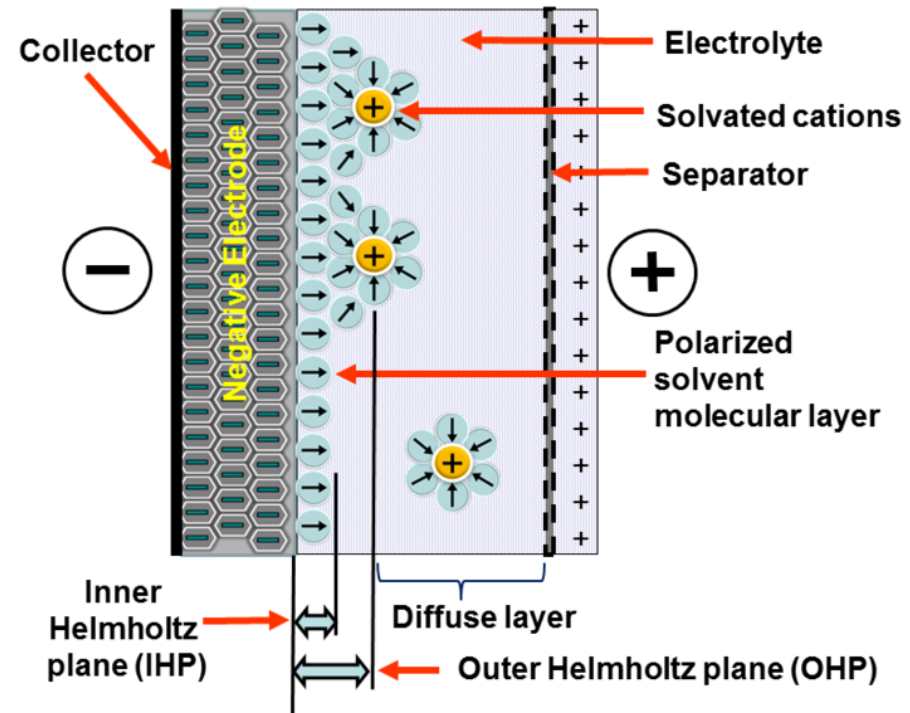
- Se pojavlja med prevodno kovinsko elektrodo in sosedno tekočo elektrodo (elektrolit)
- Elektrolit je mešanica pozitivnih in negativnih ionov, raztopljeni v topilu (npr. vodi)
- Na površini elektrode obstaja stična plast tekočega elektrolita in kovinske elektrode, kjer pride do učinka dvojne plasti
- Če na elektrodi priključimo napetost, se ustvarita plasti polariziranih ionov:
 - Ena plast ionov je na površinski mrežni strukturi kov. elektrode,
 - Druga plast ionov (obraten naboj) pa izvira iz raztopljenih ionov, porazdeljenih v elektrolitu.
- Plasti ionov sta ločeni s plastjo molekul topila (npr. voda)



VIR: [Understanding the Electric Double-Layer Structure, Capacitance, and Charging Dynamics](#)

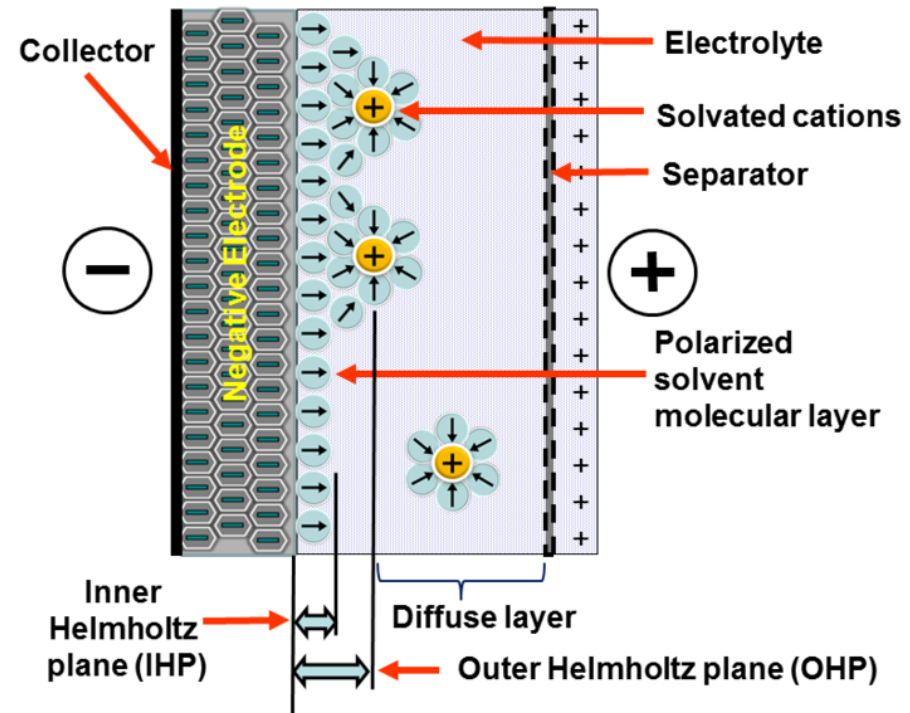
Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- Plast molekul topila tvori notranjo Helmholtzevo ravnino (IHP – inner Helmholtz plane)
- IHP se z adsorpcijo drži površine elektrode in ločuje nasprotno polarizirani plasti ionov – tvori **molekularni dielektrik**.
- Naboj na elektrodi je kompenziran z nasprotnim nabojem v zunanji Helmholtzevi ravnini (OHP – outer Helmholtz plane).
- OHP je področje, kjer se zberejo polarizirani ioni elektrolita.



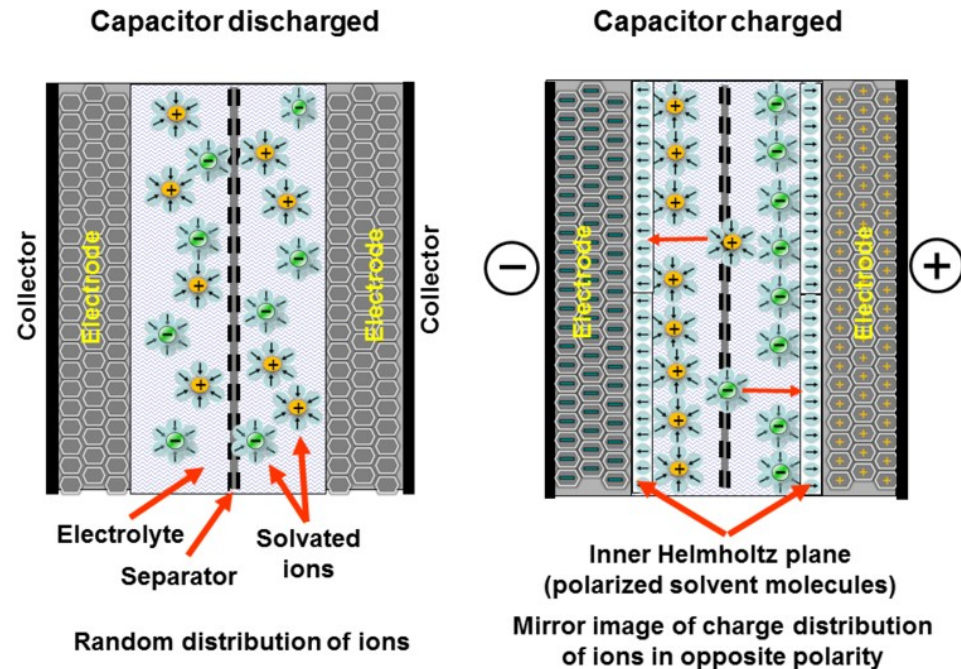
Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- Opisano ločevanje plasti služi hranjenju naboja.
- Naboj v dvojni plasti ustvarja statično električno polje v molekularni IHP plasti molekul topila, ki ustreza priključeni napetosti:
 - "Debelina" nabite plasti kovinske elektrode je okoli 0.1 nm.
 - "Debelina" nabite plasti v elektrolitu je odvisna od velikosti molekul topila ter gibanja/koncentracije ionov v topilu. (0.1 do 10 nm)
- Vsota IHP in OHP prispevkov → skupna debelina dvojne plasti.
- V zelo tanki IHP se ustvarjajo zelo visoka električna polja (npr. $U=2V$; $d=0.4\text{ nm}$ → $E=5\text{ kV/mm}$)



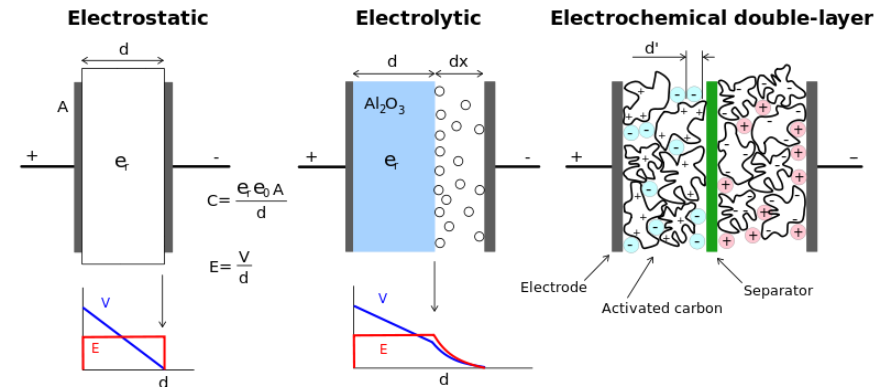
Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- Dvojna plast predstavlja dielektrično plast klasičnega kondenzatorja z debelino molekule.
- Poenostavljen Helmholtzev model kapacitivnosti temelji na diferencialni kapacitivnosti C_d , ki je neodvisna od gostote naboja – odvisna je le od dielektrične konstante ϵ in debeline dvojne plasti δ .
- Če je topilo v elektrolitu voda, potem vpliv visokega električnega polja v plasti ustvari dielektričnost $\epsilon=6$, namesto $\epsilon(\text{voda})=80@ (E=0)$ polja. Debelina ločevalne plasti $\delta \approx 0.3 \text{ nm}$,
- Specifična kapacitivnost 18 F/cm^2 .



Učinek dvojne plasti (EDL effect)

- V resničnih EDLC učinek dvojne plasti ni edini vzrok povečanju kapacitivnosti (površina elektrod; debelina ločevalne plasti)
- Kapacitivnost je odvisna od strukture/materiala elektrod in mešanice elektrolita in psevdokapacitivnosti
- Zaradi zrcaljenja naboja se na drugi elektrodi ustvarijo enake razmere nasprotne polaritete, torej si celotno strukturo predstavljamo kot dva zaporedno vezana kondenzatorja. V idealnem primeru sta prispevka simetrična $\rightarrow C/2$



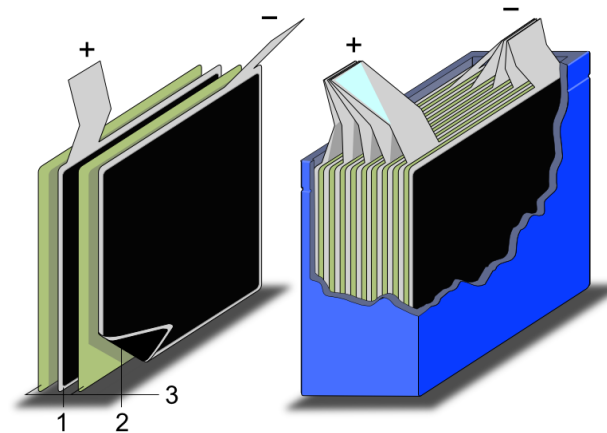
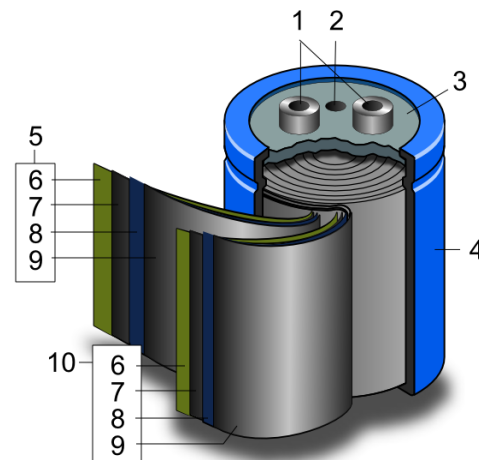
Delitev EDLC

- Delitev glede na načrtovanje elektrod:
 - DLC - ogljikove elektrode
(visoka gostota moči)
 - Psevdokondenzatorji – elektrode iz kovinskih oksidov/prevodnih polimerov
(večja energijska gostota)
 - Hibridni (DLC + psevdokondenzator)
(Li-ion kondenzatorji)
boljše razmerje med močnostno in energijsko gostoto

Struktura EDLC

1. Priključka
2. Varnostni ventil
3. Pokrov
4. Al ohišje
5. + pol
6. Distančnik
7. Ogljikova elektroda
8. Zbiralna elektroda
9. Ogljikova elektroda
10. - pol

VIR: [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor)



EDLC : Baterije

- Najvišja specifična kapacitivnost/gostota energije ($>60\text{kW/kg}$)
- Ogromne kapacitivnosti (10^4 krat večje od ELKO)
do 12 kF @ $V_n=1.2\text{ V}$ do 3 V
- Premoščajo razlike med kondenzatorji in baterijami
(baterije imajo 10x večjo kapacitivnost kot EDLC):
 - Baterije imajo 10 do 20-krat večjo energijsko gostoto
 - Superkondenzatorji imajo pa 10 do 100-krat večjo močnostno gostoto in hitrejši in številčnejši (10^5) polnilni, praznilni cikel
- Enostavno polnjenje – ni treba zaščite pred prenapolnjenjem.
- Dolga življenjska doba
- Nizka ESR
- Visoka zanesljivost
- Okolju prijazni materiali (Pb free) /nekorozivni elektrolit

Slabosti EDLC

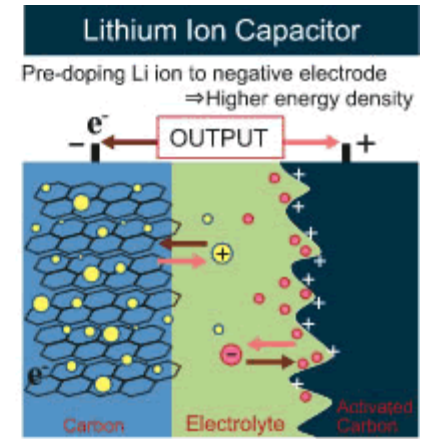
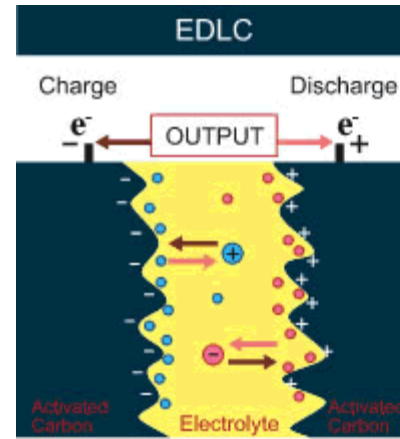
- Velika dielektrična absorbcija
- Velika samopraznjenje (50% v nekaj dneh)
- Nizke delovne napetosti (1.2 ... 5V)
- Vsi EDLC so polarizirani (+ elektroda je vedno na anodi, določeni s prostorskim nabojem). Polariteta je določena z načrtovanjem asimetričnih elektrod. Če načrtujemo simetrične elektrode je polariteta določena s polariteto V_F

Uporaba EDLC

- Baterija za SRAM elemente (majhen, dolgotrajen tok)
- KERS (Kinetic energy recovery system): zelo kratek pulz velikega toka
- Rekuperacija energije pri zaviranju/zagotavljanje moči pri pospeševanju hibridnih avtomobilih, avtobusih, vlakih in tramvajih.
- Premostitev izpada elektrike/zagotovilo za dodaten tok v času največje porabe (ang. peak shaving).
- Varnostne kopije (ang. backup power), UPS sistemi, alarmi in sistemi za hot-swap diskov.
- Digitalni fotoaparati: hitro polnjenje bliskavice.
- Brežžični senzorji in IoT naprave: napajanje senzorjev, ki so aktivni le kratek čas.
- Medicinski pripomočki: defibrilatorji, shranjevanje energije in zagotavljanje močnega električnega impulza, ki je nujen za reanimacijo.

Li-Ion kondenzator (LIC)

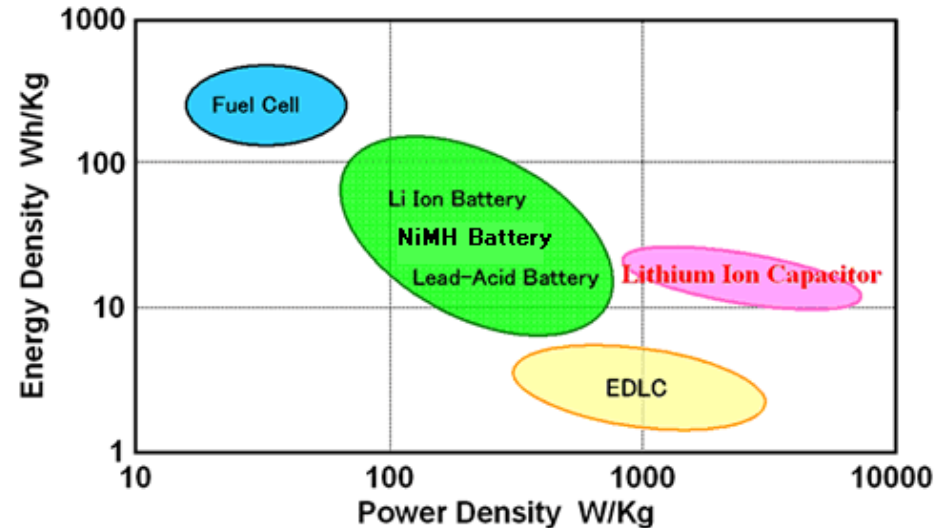
- Li-ion kondenzator (LIC) je hibridna vrsta EDLC, ki združuje principa delovanja litijeve baterije z EDLC
- Katoda: aktivni ogljik – (dvojna plast)
- Anoda: ogljik, dopiran z Li ioni (to poveča izhodno napetost)
- Elektrolit: litijeva sol
- Delovna napetost: 3.8 ... 4.0V
- ESR: 150 ... 200 mΩ



VIR: [JSR Micro](#)

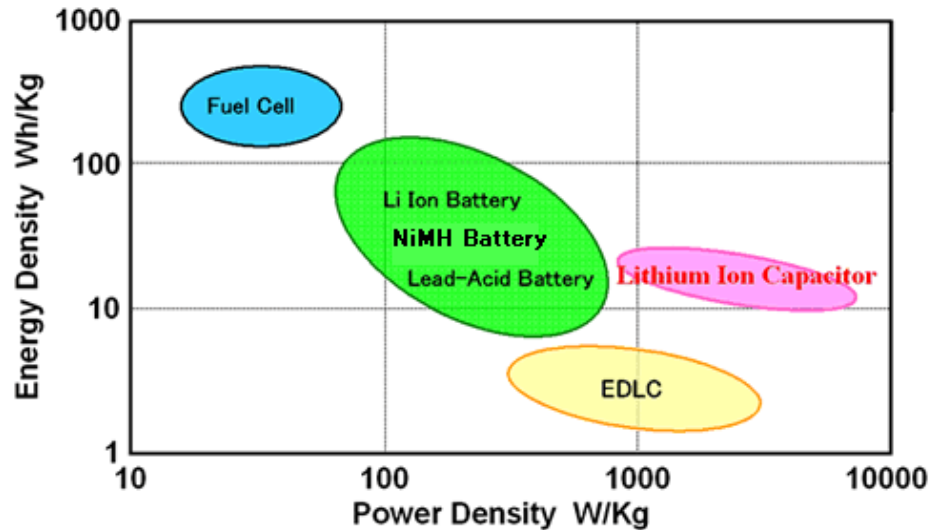
Lastnosti LIC

- Visoka kapaciteta (velika anoda) 2-3kF@4V
- Visoka gostota energije (14 Wh/kg)
- Visoka gostota moči
- Visoka zanesljivost
- Temperaturno področje uporabe: $-20 \dots 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Majhno samopraznjenje: ($<5\%$ padca napetosti @ 25°C v treh mesecih; EDLC do 50% v nekaj dneh)
- C€na: 105€/100F (Farnell)



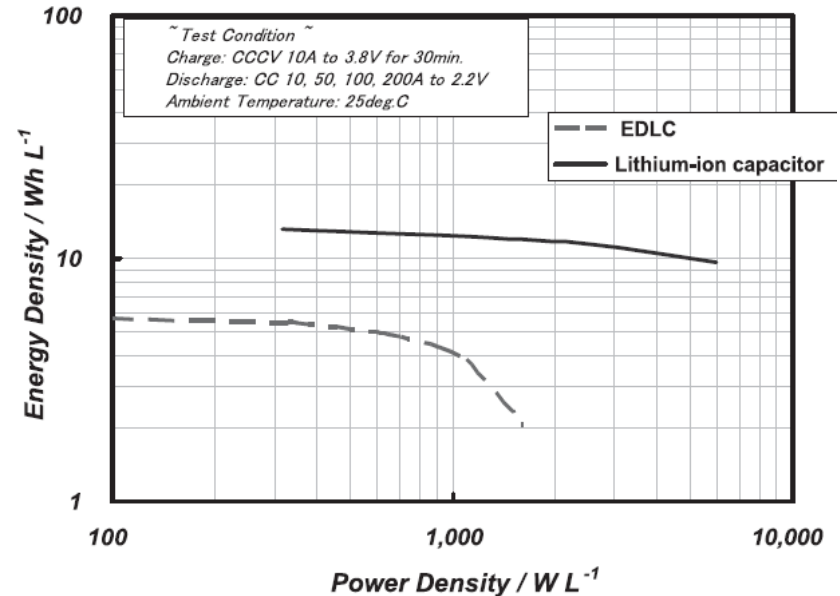
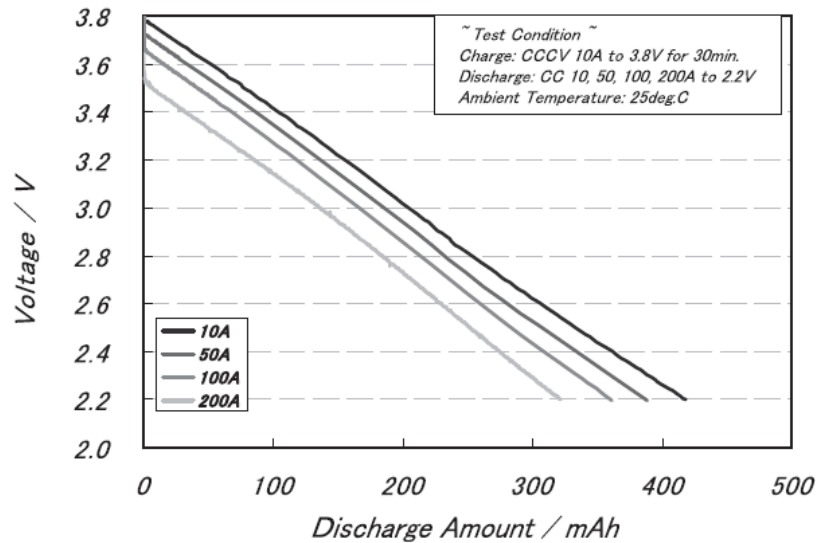
Uporaba LIC

- LIC imajo večjo gostoto energije v primerjavi z Li-Ion baterijami (LIB)
- LIC so varnejši kot LIB (termični pobeg)
- LIC imajo višje delovne napetosti kot EDLC
- LIC imajo podobne gostote moči, a večje gostote energije kot EDLC
- Število polnjenj/praznjenj je podobno EDLC → mnogo boljše kot pri LIB



Uporaba LIC

Evaluation Items		Phase 1	Phase 2 (Improved model)
Rated voltage	Upper limit	3.8V	3.8V
	Lower limit	2.2V	2.2V
Cell size	L × W × H	192 × 95 × 5.4 mm	192 × 95 × 5.5 mm
	Weight	190g	190g
Initial performance	Capacitance	1,200F	1,100F
	ESR	1.3mΩ	1.0mΩ
	DC-IR	1.8mΩ	1.3mΩ



VIR: [Development of high-power lithium-ion capacitor](#)