

18. Kondenzator

Vsebina poglavja: kondenzator kot naprava za shranjevanje naboja, kot naprava za shranjevanje električne energije, pomembne lastnosti kondenzatorjev, aplikacije kondenzatorjev.

Kondenzator kot naprava za shranjevanje naboja.

Kondenzator je naprava za shranjevanje naboja. Večja kot je napetost med ploščama (elektrodama), večja količina naboja se nakopiči na elektrodah. Konstanto sorazmernosti imenujemo kapacitivnost: $Q = CU$. Večja kot je kapacitivnost, več naboja lahko shranimo.

V začetnih raziskavah električnih pojavov pojma kondenzatorja niso poznali. Naboje so ločevali z ročno gnanimi elektrostaticnimi napravami, ki so z inventivnimi načini ločevale naboje in jih običajno kopičile na dveh ločenih prevodnih kroglih. Tipični primer je Whimshurstov elektrostaticni generator. Če so bile krogle blizu, na primer ne več kot nekaj centimetrov, je ob primernih pogojih kopičenja naboja med krogla preskočila iskra. Torej je morala biti ob krogli dosežena preboja trdnost zraka. Vzemimo kar skrajni primer osamljene naelektrene krogle polmera 2 cm. Preboja trdnost bo dosežena pri električni poljski jakosti 3 MV/m, od koder izračunamo naboj pri preboju $E_{\text{preb}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_0^2}$ od koder sledi $Q = 133,5 \text{ nC}$. Napetost bo

tedaj $V(E_{\text{preb}}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_0} = E_{\text{preb}} r_0 = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m} \cdot 0,02 \text{ m} = 60 \text{ kV}$. Seveda druge elektrode ne

moremo imeti v neskončnosti, lahko pa je večjega polmera in dovolj daleč. Vsekakor večje napetosti od 60 KV ne moremo doseči. Določimo lahko tudi kapacitivnost v primeru, da je druga elektroda v neskončnosti $C = 4\pi\epsilon_0 r_n \approx 2,2 \text{ pF}$. To je precej mala kapacitivnost. Torej med elektrodama v obliki kovinskih krogel ne moremo shraniti večje količine naboja. Ta količina je omejena s prebojno trdnostjo. Lahko pa povečamo polmer krogle, kot smo to videli pri izgradnji Van de Graffovih generatorjev, kjer sta imeli krogle 7 MV generatorja polmera 4,6 m.

Spodaj je del tabele iz Electrical Engineering Reference Book, kjer pa so podane prebojne napetosti med dvema sferama enakega polmera. Ugotovimo, da so prebojne napetosti seveda manjše, kot smo jo izračunali teoretično.



Superkondenzator (ali ultrakondenzator) podjetja Maxwell ima kapacitivnost 3000 F omogoča napetosti 75 V.
www.maxwell.com

Table 7.5 Sphere-gap breakdown voltages (kilovolts at peak)*; BS 358:1960

Gap (mm)	Sphere diameter			
	0.02	0.0625	0.125	0.25
0.5	2.8	—	—	—
1	4.7	—	—	—
1.5	6.4	—	—	—
2	8.0	—	—	—
4	14.4	14.2	—	—
5	17.4	17.2	16.8	—
6	20.4	20.2	19.9	—
8	25.8	26.2	26.0	—
10	30.7	31.9	31.7	31.7
15	(40)	45.5	45.5	45.5
20	—	58.5	59.0	59.0
30	—	79.5	85.0	86.0
40	—	(95)	108	112
50	—	(107)	129	137
100	—	—	(195)	244
150	—	—	—	(314)

SLIKA: Insert tabele iz Electrical Engineering Reference Book

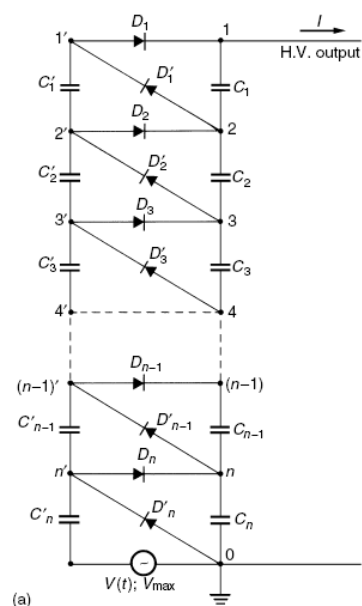
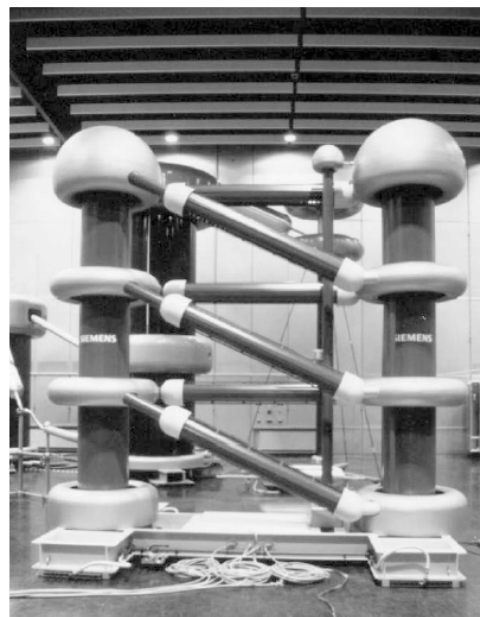


Figure 2.3 (a) Cascade circuit according to Cockcroft–Walton or Greinacher. (b) Waveform of potentials at the nodes, no load



SLIKA: Kaskadno vezje za zvišanje napetosti, tipična uporaba do 200 kV. Cockroft-Waltonov CD generator na ETH (Švica) 900kV/10mA.

Prve večje vrednosti kapacitivnosti so dosegli z uporabo steklenice, tako imenovane **Leidenske steklenice**, po kraju Leiden na Nizozemskem leta 1745. Zaslužen za inovacijo »steklenice« je profesor Pieter van Musschenbroek (1692 – 1791). Hkrati je do podobnih ugotovitev prišel tudi Ewald Georg von Kleist v Nemčiji. Notranjost in zunanost steklenice je bila delno prekrita s prevodnikom, steklenica pa je delovala kot dielektrik. Vzemimo hipotetičen primer steklenice premera 8 cm s 3 mm

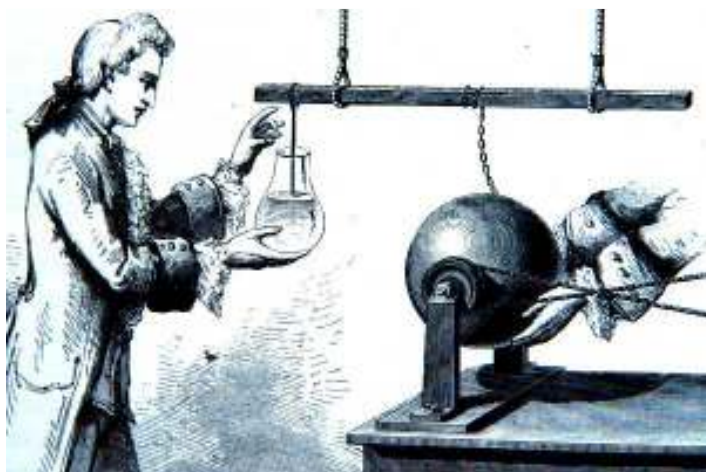


Pieter van Musschenbroek
(1692 – 1791)

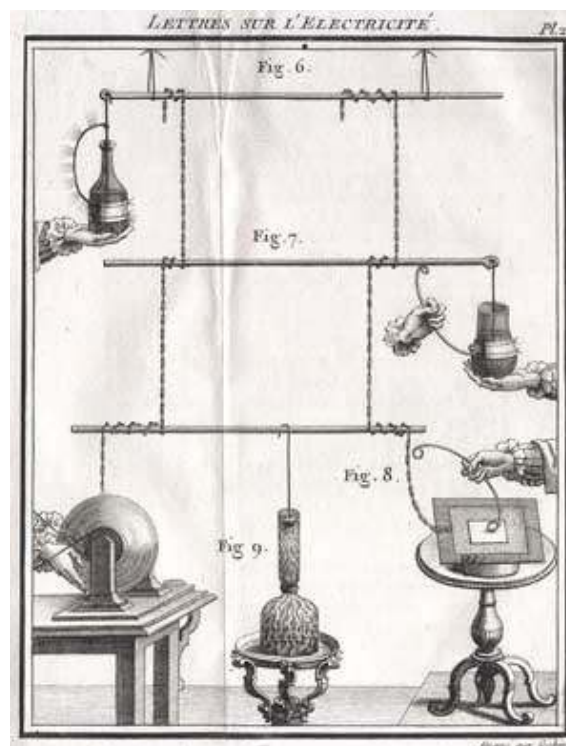
debelo steno. Znotraj steklenice naj bo voda nalita do višine 15 cm, zunaj pa je prekrita s prevodnikom (aluminijasto folijo). Relativna dielektričnost stekla naj bo 10. Kapacitivnost steklenice je

$$C \approx \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} = 10 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{2\pi \cdot 0,08 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 742 \text{ pF}.$$

V primerjavi s kapacitivnostjo kovinske krogle je to že kar solidna kapacitivnost. To veliko odkritje je prineslo tudi nekaj več previdnosti pri uporabi. Razelektritev naboja iz steklenice z dotikom namreč ni več tako »nedolžna«. Je pa doprinesla k razvoju znanosti, saj je bilo šele z Leidensko steklenico mogoče nakopičiti in shranjevati večjo količino naboja. Naslednja prav tako pomembna in znamenita inovacija je bila Voltina baterija. Volta je med drugim tudi predlagal uporabo imena kondenzator. V tedanjem času sta bili to vsekakor zelo pomembni invenciji, primerljivi z današnjimi dosežki nagrajenimi z Nobelovimi nagradami.



SLIKA: Primer eksperimentov v zgodovini: Na desni preprost elektrostatični generator (ročno gnana steklena krogla, naboj se ločuje z roko, ki na eni strani trsa ob kroglo, na drugi strani pa drži prevodno verigo).



SLIKA: Prve slike uporabe Leidenske steklenice.



SLIKA: Primer Leidenskih szeklenic. Desno elektroskop.

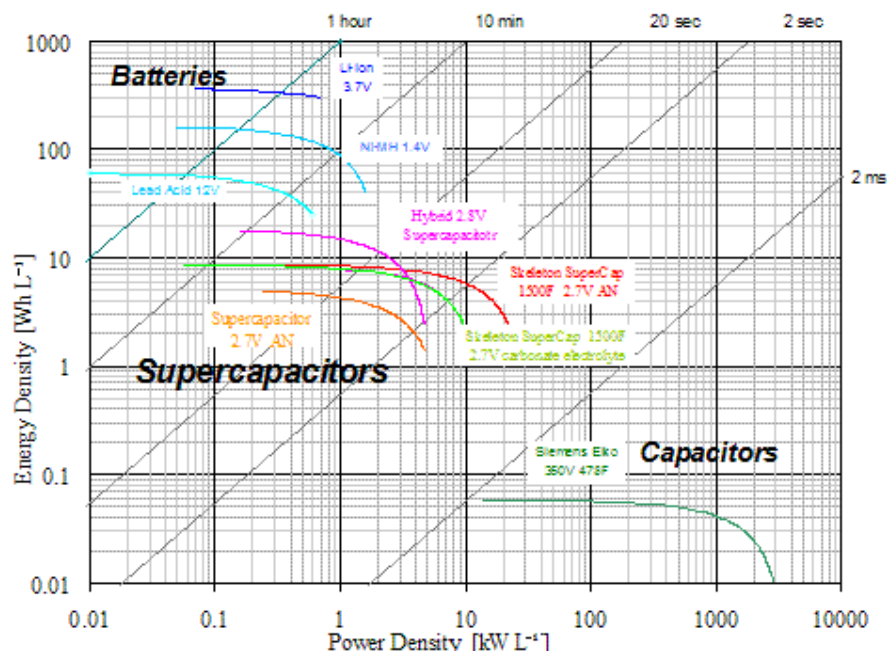
Kondenzator kot naprava za shranjevanje električne energije.

Še bolj pomembna kot količina shranjenega naboja je količina shranjene električne energije. Za električno energijo v kondenzatorju je pomemben produkt naboja in napetost med elektrodama $W = \frac{1}{2}QU$.

Vzemimo primer osamljene kovinske kroglice polmera 2 cm, ki je maksimalno naelektrena, toliko, da električno polje na površini doseže brebojno trdnost. Izračunali smo naboj 133,5 nC in napetost 60 kV. Shranjena energija bo enaka $W = \frac{QU}{2} = \frac{133,5 \text{ nC} \cdot 60 \text{ kV}}{2} = 4 \text{ mJ}$.

Vzemimo za primerjavo kondenzator povprečno velike kapacitivnosti 1 μF in nanj priključimo napetost 100V. Energija shranjena v kondenzatorju je $W = \frac{CU^2}{2} = \frac{1 \mu\text{F} \cdot (100 \text{ V})^2}{2} = 5 \text{ mJ}$. Torej je v kondenzatorju velikem za palec ali tudi dosti manj shranjeno enako veliko energije, kot med osamljeno naelektreno kroglo polmera 2 cm pri prebojni napetosti.

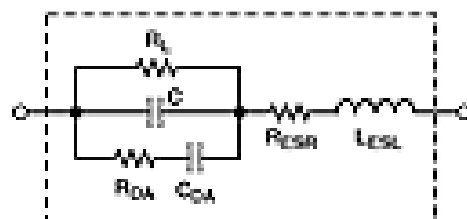
Poleg uspešnosti shranjevanja energije je pomembno tudi to, kako hitro lahko to energijo kondenzator sprazni. Na primer, elektrolitske baterije zelo uspešno shranjujejo veliko količino energije, je pa ne morejo hitro izkoristiti. Na drugi strani so elektrolitski kondenzatorji, ki so majhnih dimenzij, so nekoliko manj učinkoviti v smislu gostote shranjene energije, se pa lahko njihov shranjen naboj zelo hitro razelektri. Vez med baterijami in elektrolitskimi kondenzatorji so t.i. superkondenzatorji ali ultrakondenzatorji, ki ne omogočajo visokih napetosti, imajo pa izredno visoke kapacitivnosti (več sto faradov) in so trenutno posebno primerni za vmesno shranjevanje energije.



SLIKA: Primerjava med različnimi tipi kondenzatorjev, baterijami in superkondenzatorjem. Elektrolitski kondenzatorji omogočajo razelektritev velikih tokov vendar v zelo kratkem času. Baterije omogočajo shranjevanje velike količine energije vendar jo ne morejo zelo hitro izkoristiti. Superkondenzatorji so vez med navadnimi kondenzatorji in baterijami. Omogočajo relativno velike toke razelektritve v precej daljšem času kot navadni kondenzatorji. Vir: Skeleton Supercaps.

Pomembne lastnosti kondenzatorjev.

Kondenzatorji imajo v idealnem smislu le kapacitivne lastnosti in so idealni izolatorji. V resnici pa idealnih lastnosti ni mogoče doseči. Neidealne električne lastnosti prikažemo z nadomestno shemo realnega kondenzatorja, ki je v osnovi vzporedna vezava kondenzatorja z uporom R_p in zaporedno z induktivnostjo L_S in upornostjo R_S .



Pri različnih aplikacijah je pomembna različna lastnost. Na primer, izgubna (vzporedna R_p) upornost je pomembna v aplikacijah pri izmeničnih tokih in aplikacijah, kjer je pomembno natančno shranjevanje naboja, kot na primer za integratorje ali »sample-hold« vezja ali ko jih uporabljamo pri visokih frekvencah. Elektrolitski (tantalove ali aluminijasti) kondenzatorji dosegajo visoke kapacitivnosti vendar zaradi slabe izolacije tudi velike izgubne toke, na primer 5 – 20 nA na μF . V omenjene namene je bolje uporabiti »plastične« kondenzatorje: polipropilenske ali polistirenske.

SLIKA: Nadomestna shema realnega kondenzatorja. (po Analog Devices)

Zaporedna (ang. equivalent series resistance) upornost R_S je pomembna pri aplikacijah z velikimi tokovi, saj se na kondenzatorjih z veliko serijsko upornostjo porablja velika (izgubna) moč. Kondenzatorji z majhno R_S so iz filmov ali iz sljude (ang. mica).

Serijska induktivnost je tudi lahko problematična pri visokih frekvencah. Elektrolitski, papirni in plastični kondenzatorji niso primerni za visokofrekvenčne aplikacije, saj so večinoma sestavljeni iz dveh kovinskih plasti ločenih s plastjo dielektrika in zviti v svitke. Za visokofrekvenčne aplikacije so primerni keramični kondenzatorji.

Pomemben podatek je faktor disipacije (polnilni faktor), ki predstavlja razmerje energije, ki jo kondenzator potroši z energijo, ki jo shrani.

Dielektrična absorpcija nam pove histerezne lastnosti kondenzatorja. Torej, kako je ponovljivo elektrenje kondenzatorja brez efekta spomina.

Tipi kondenzatorjev. Dandanes so tudi kondenzatorji precej drugačni. poznamo jih veliko različnih tipov, iz različnih materialov, dimenzij, oblik z zelo različnimi električnimi (in mehanskimi) lastnostmi. Pa si jih oglejmo nekaj:

- 1) Elektrolitski kondenzatorji so izdelani iz dveh tankih aluminijastih elektrod. Prva ima dodano tanko oksidno membrano (izolator, dielektrik), druga elektroda pa je v kontaktu s papirjem omočenim z elektrolitom . Tanka oksidna plast povzroči veliko kapacitivnost kondenzatorja ($C \sim \varepsilon \frac{A}{d}$),



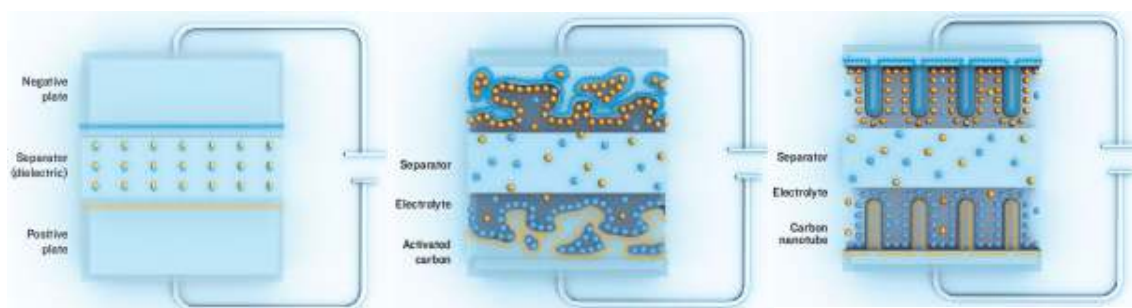
visoko prebojno trdnost, pa tudi polarizacijo. To pomeni, da ga lahko obremenimo le tako, da je ena od sponk vedno bolj pozitivna od druge. V nasprotnem primeru postane neuporaben oziroma nevaren, saj lahko eksplodira. Ti kondenzatorji so ceneni in se pogosto uporabljajo, recimo kot filtri. Ker se kondenzator lahko pokvari, če je obremenjen z višjo napetostjo kot je nazivna, je v praksi modro uporabiti kondenzator z dvakrat višjo nazivno napetostjo, kot je potrebna. Prednosti elektrolitskih kondenzatorjev so predvsem velika kapacitivnost (cenenost), ki je posledica uporabe tanke izolacijske plasti dielektrika in visoka napetost določena s prebojno trdnostjo dielektrika. Pomankljivost pa je neidealna karakteristika zaradi polprevodniških lastnosti kombinacije prevodnika in oksida, relativno velika upornost, slabša visokofrekvenčna karakteristika in manjša življenska doba (v primerjavi z drugimi tipi kondenzatorjev).



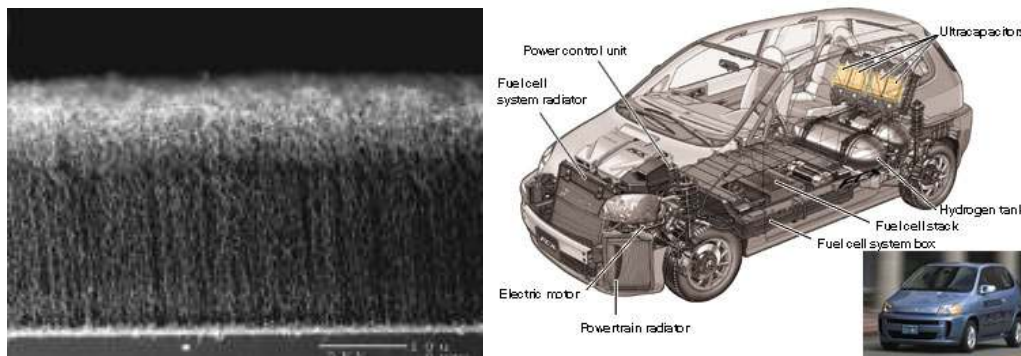
- 2) Posebni tip elektrolitskega kondenzatorja je tantalov elektrolitski kondenzator. Namesto aluminijaste elektrode ima tantalovo, oziroma iz tantalovega pentoksida. Ima boljše električne lastnosti kot »navadni« elektrolitski kondenzatorji, predvsem glede temperaturnih in frekvenčnih karakteristik. So pa nekoliko dražji kot »navadni«.
- 3) Poliesterski film: ti kondenzatorji uporabljajo kot dielektrik plast poliesterskega filma. So poceni, temperaturno stabilni in se pogosto uporabljajo.
- 4) Polipropilenski kondenzator: uporabimo, ko so zahteve po tolerancah večje. Do frekvence 100 kHz imajo zelo majhne tolerance (1%).



- 5) Polistirenski kondenzator: so izdelani kot koluti in niso primerni za visoke frekvence. So uporabni za aplikacije nekaj sto kilohercov.  do
- 6) Metalizirani poliesterski: imajo boljše lastnosti od navadnih poliesterskih. So dimenzijsko majhni.
- 7) Epoksi:
- 8) Keramični: izgledajo kot mali diski in niso izdelani v zavitkih, zato imajo dobre frekvenčne karakteristike in jih uporabljamo za visokofrekvenčne aplikacije. Na primer za filtriranje visokofrekvenčnih motenj. 
- 9) Nastavljivi kondenzatorji (trimerji): vsebujejo lahko keramični ali plastični dielektrik.
- 10) Nastavljivi zračni kondenzatorji: uporabljajo zrak kot dielektrik. Običajno jih najdemo v radijih.  
- 11) Superkondenzatorji: imajo izrazito veliko kapacitivnost, na primer 0,47 F, kljub temu pa so majhnih dimenzij. Te lastnosti je mogoče doseči z uporabo električnega dvojnega sloja. Zapolnjujejo vrzel med baterijami, ki sicer shranjujejo velike količine naboja, ne morejo pa se hipno izprazniti in »klasičnimi« kondenzatorji, ki omogočajo hitre naelektritve in razelektritve vendar relativno majhno kapacitivnost (gostoto energije). 
- Ultrakondenzatorji trenutno omogočajo gostote energij velikosti 30 Wh/kg, se pa ta vrednost z izboljšavo tehnologije stalno povečuje. Poleg tega v primerjavi s klasičnimi baterijami ultrakondenzatorji omogočajo zelo veliko ciklov praznenja in polnjenja in ne izgubijo svojih lastnosti niti po daljšem času izpraznitve. Za primerjavo dosežejo klasične svinčeve baterije energijsko gostoto 30 Wh/kg, litij-ionska baterija pa 120 Wh/kg. Hkrati pa je kalorična vrednost bencina 12000 Wh/kg.



SLIKA: Razlika med klasičnim tipom »ploščnega« kondenzatorja in ultrakondenzatorji je v veliki površini elektrod, ki jih pri ultrakondenzatorjih uspemo doseči s tehnologijo poroznega ogljika, v novejšem času pa z uporabo ogljikovih nanocevk. Vir: <http://www.spectrum.ieee.org/print/5636>



SLIKA: Prerez elektrode ultra-kondenzatorja, izdelanega iz ogljikovih nanocevk. Na ta način se izjemno poveča površina kondenzatorja in s tem kapacitivnost. Vir: <http://www.spectrum.ieee.org/print/5636>. Na desni, možnosti uporabe ultrakondenzatorjev v avtu: Honda FCX.

CAPACITOR COMPARISON CHART

TYPE	TYPICAL DIELECTRIC ABSORPTION	ADVANTAGES	DISADVANTAGES
NPO ceramic	<0.1%	Small case Inexpensive Good stability Wide range of values Many vendors	sizeDA generally low, but may not be specified Limited to small values (10 nF)
Polystyrene	0.001% to 0.02%	Low inductance Inexpensive Wide range of values Good stability	Damaged by temperature case > +85° C availableLarge valuesHigh inductance
Polypropylene	0.001% to 0.02%	Low inductance Inexpensive Wide range of values Good stability	Damaged by temperature case > +105° C availableLarge valuesHigh inductance
Teflon	0.003% to 0.02%	Low inductance Good stability Operational above +125° C Wide range of values	High inductance availableRelatively stabilityLarge valuesHigh inductance
MOS	0.01%	Good stability Small size Operational above +125° C Low inductance	DA Limited Available only in small capacitance values
Polycarbonate	0.1%	Good stability Low inductance Wide temperature range	stabilityLarge costDA limits to 8-bit applications
Polyester	0.3% to 0.5%	Moderate stability Low inductance Wide temperature range Low inductance (stacked film)	stabilityLarge costDA limits to 8-bit applications
Monolithic (High K)	ceramic>0.2%	Low inductance Wide range of values	inductancePoor stability Poor DA High voltage coefficient
Mica	>0.003%	Low loss Low inductance Very stable Available in 1% values or better	HFQuite stableExpensive valuesLow values (<10 nF)
Aluminum electrolytic	High	Large size High currents High voltages Small size	valuesHigh currentsUsually voltagesPoor stability Poor inductive sizeQuite valuesUsually high leakage polarized stability accuracy
Tantalum electrolytic	High	Small size Large inductance Medium inductance	valuesQuite valuesUsually high leakage polarized stability accuracy Expensive Expensive Poor Poor accuracy

SLIKA: Primerjalna tabela lastnosti kodenзаторjev. Po: Analog Devices: Ask The Applications Engineer – 21 (iz spleta)

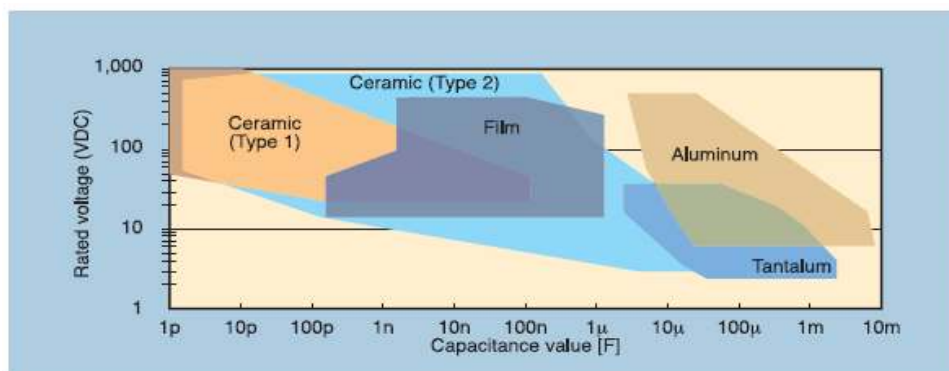


Fig. 1: Relation between capacitance value and rated voltage in each capacitor

SLIKA: različni tipi kondenzatorjev glede na zahtevano nazivno napetost. Vir: www.murata.com.

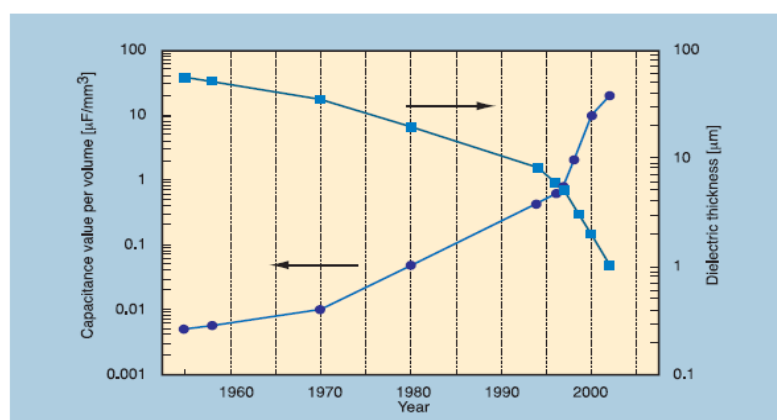


Fig. 2: Transition of capacitance value per volume and dielectric thickness

SLIKA: Primer napredovanja tehnike izdelave kondenzatorjev. Hkrati s tanjšanjem debeline dielektrika se večja kapacitivnost na enoto volumna.

Nekaj aplikacij kondenzatorjev.

- **začasno nadomeščanje** baterijskega napajanja v vezjih
- za usmerjanje v močnostnih aplikacijah
- charge-pump kasakada (zvišanje napetosti)
- glajenje signalov
- izločanje AC komponente
- izločanje DC komponente
- kompenzacija moči
- fluorescenčna osvetlitev
- filtracija signalov
- za doseganje resonančne frekvence

Uporaba kondenzatorskega principa:

- senzor razdalje (majhne razdalje)
- senzor pospeška (ADXL)
- senzor nivoja tekočine
- kondenzatorski mikrofoni
- senzorji dotika

- visokonapetosti kondenzatorji za shranjenje energije in hitro praznenje (pulzni laserji, elektromagnetno izstreljevanje, radar, pospeševalniki, detonatorji,



Podnapis pod fotografijo: Filtrska kompenzacija s KLV-kondenzatorji, Acroni, Jesenice

SLIKA: Kompenzacijski kondenzatorji v Acroni Jesenice. Vir:
<http://www.iskra.si/upload/Iskra%20KONDENZATORJI.pdf>

WWW: <http://www.uoguelph.ca/~antoon/gadgets/caps/caps.html>

http://www.hobby-elec.org/e_capa.htm

http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolytic_capacitor

<http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>

http://www.elna-america.com/tech_al_principles.php

http://www.maxwell.com/ultracapacitors/technical-support/white_papers.asp

<http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1050&context=itsdavis>