

5 Elektrimahtuvus

5.1 Elektrilaeng ja elektriväli (põhikooli füüsikakursusest)

Elektrilaeng on füüsikaline suurus, mis iseloomustab laetud kehade elektrilise vastastikmõju tugevust. Elektrilaengu tähiseks on Q . Keha elektrilaeng on elementaarlaengu täisarvkoradne $Q = \pm ne$.

Elektrilaengu ühikuks on 1 kulon, lühendatult 1 C. Sellele ühikule on nimi antud prantsuse füüsiku ja inseneri Charles Augustin de Coulombi (1736—1806) auks, kes avastas elektriseeritud kehade vastastikmõju seaduse.

1 kulon on elektrihulk, mis läbib juhi ristlõiget 1 sekundi jooksul kui voolutugevus on 1 amper
ehk
1 kulon = 1 ampersekund

Elektrilaenguga kehasid ümbritseb elektriväli, mis vahendab laetud kehade vastastikmõju. Elektriväli ei koosne aineosakestest. Inimene ei tunneta elektrivälja. Elektrivälja olemasolu saab kindlaks teha laetud kehaga.

Elektrivälja mistahes punktis mõjub laetud kehale alati kindla suuruse ja suunaga jõud, mis paneb selle keha liikuma.

Laetud keha ümbritsev elektriväli on seda tugevam, mida suurem on keha elektrilaeng.

5.2 Mahtuvuse mõiste

Mahtuvuseks nimetatakse kondensaatori võimet salvestada elektrilaengut. Mahtuvust mõõdetakse laenguga, mis tõstab juhi pinget ühe ühiku võrra:

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

C mahtuvus faradites (F)
 Q elektrilaeng kulonites (C),
1 kulon = 1 amper · 1 sekund
 U juhi potentsiaal voltides (V)

1 farad on sellise elektrijuhi mahtuvus, millele 1 kuloni suuruse laengu andmine tõstab pinget 1 voldi võrra.

Inglise füüsik Michael Faraday (1791—1867) on elektromagnetvälja mõiste looja.

Farad on ülisuur mahtuvusühik. Praktikas mõõdetakse mahtuvusi tavaliselt mikro- ja pikofaradites.

$$1 \text{ mikrofarad} = 1 \mu\text{F} = \frac{1}{1000000} \text{ F} = 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ nanofarad} = 1 \text{ nF} = \frac{1}{1000000000} \text{ F} = 10^{-9} \text{ F}$$

$$1 \text{ pikofarad} = 1 \text{ pF} = \frac{1}{1000000000000} \text{ F} = 10^{-12} \text{ F}$$

Mahtuvus ei sõltu juhi materjalist. Ühesuuruste vask- ja alumiiniumkuulide mahtuvused on ühesuurused. Mahtuvus ei sõltu ka keha massist. Kui kaks ühesuuruse massiga keha on erineva kujuga, siis on ka nende mahtuvused erinevad.

Juhi mahtuvus sõltub juhi pinna suuruselt. Mida suurem pind, seda suurem on mahtuvus.

5.3 Kondensaator

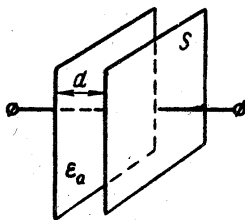
Kehade mahtuvusele avaldavad mõju läheduses asuvad teised kehad. Mida lähemal on kehad teineteisele, seda suurem on mahtuvus. Sel juhul tuleb rääkida kehade kogumi mahtuvusest.

Kahe keha vaheline mahtuvus on võrdne laengu suurusega, mis on vaja anda ühele neist kehadest, et nende kehade vaheline pinge muutuks ühe ühiku võrra:

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

Kaht dielektrikuga eraldatud metallplaati või mistahes kujuga elektrijuhti – elektroodi – nimetatakse kondensaatoriks. Kondensaatori mahtuvus on oluliselt suurem üksiku elektroodi mahtuvusest.

Lihtsaim on lamekondensaator, mille elektroodideks on kaks ühesugust teineteisega rööpselt metallplaati. Plaatide vahel on isoleeraine – dielektrik –, õhk, viik, portselan, kile, elektrolüüt jne.



Kui kondensaator ühendada alalisvooluallikaga, kogunevad elektroodidele laengud, mis on suuruselt võrdsed, kuid vastasmärgilised. Laengute toimel tekib dielektrikus homogeenne elektriväli

$$E = \frac{Q}{\epsilon_a S} = \frac{U}{d},$$

- E elektrivälja tugevus volti meetri kohta (V/m)
- Q laeng kulonites (C)
- ϵ_a absoluutne dielektriline läbitavus faradites meetri kohta (F/m)
- S plaatide kohakutiolev pindala ruutmeetrites (m²)

U pinge voltides (V)
 d plaatidevaheline kaugus meetrites (m)

Lamekondensaatori mahtuvus

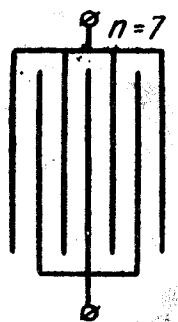
$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_a S}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d}$$

ϵ_r suhteline dielektriline läbitavus
 ϵ_0 elektriline konstant: $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

Mõne aine suhteline elektriline läbitavus ϵ_r :

Õhk	1
Isoleerõli	2 ... 2,8
Kondensaatorpaber	4 ... 8
Portselan, klaas	3 ... 6
Keraamika	10 ... 10 000
Polüester	3,3
polükarbonaat	2,8

Mahtuvuse suurendamiseks valmistatakse kondensaatorid tavaliselt mitmeplaadilised.



Mitmeplaadilise kondensaatori mahtuvus

$$C = (n-1) \frac{\epsilon_a S}{d},$$

C mahtuvus faradites (F)
 n plaatide arv

Suurem mahtuvus on kondensaatoril, millel on suurem kohakutiolev elektrodipind S , suurem dielektrilise läbitavusega dielektrik, väiksem plaatidevaheline kaugus d . Plaatidevahelise kauguse vähendamisega kaasneb suurem väljatugevus

$$E = \frac{U}{d},$$

mis ei tohi ületada kasutatavale dielektrikule lubatavat suurimat väärtust. Vastasel korral tekib elektriline läbilöök, mis rikub kondensaatori. Kondensaatorile märgitaksegi ta mahtuvus mikro- või pikofaradites ja suurim lubatav tööpinge voltides.

5.4 Ülikondensaator

20. sajandi lõpul õpiti veelgi suurendama kondensaatori mahtuvust. Selleks hakati valmistama kondensaatoriplaate erilisest väga poorsest söest. Niisuguse söeplaadi 1 grammi aktiivpind on umbes

2000 m². Elektroodide vahet ja poore täidab elektrolüüt. Nii on jõutud kondensaatoriteni, mille mahtuvus on mõõdetav faradites ja isegi kilofaradites. Erinevana tavalistest on neid hakatud nimetama ülikondensaatoriteks.

Ülikondensaatorid kujunevad ilmselt varsti arvestatavateks energiasalvestiteks – nad võimaldavad sama massi juures salvestada umbes 100 korda suuremat energiahulka ning on umbes 10 korda võimsamad kui tavaline kondensaator.

Ettekujutuseks väike energiasalvestite võrdlus:

	Pliiaku	Üli-kondensaator	Tavaline kondensaator
Laadimisaeg	1...5 h	0,3...30 s	$10^{-3}...10^{-6}$ s
Tühjendamisaeg	0,3...3 h	0,3...30 s	$10^{-3}...10^{-6}$ s
Erienergia, Wh/kg	10...100	1...10 Wh/kg	<0,1 Wh/kg
Laadimistsükleid	1000	>500 000	>500 000
Erivõimsus, W/kg	<1000	<10 000	<100 000
Tsükli kasutegur	0,7...0,85	0,85...0,98	>0,95

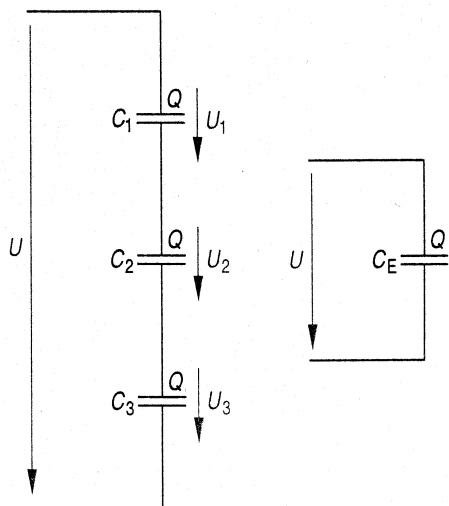
2500 faradise ehk 2,5 kilofaradise ülikondensaatori mõõtmed on 161x61x61 mm, mass 725 g, takistus alalisvoolule 1 mΩ, 100 Hz vahelduvvoolule 0,6 mΩ, nimipinge 2,5 V, nimivool 625 A (see on tühjenemisvool 5 s vältel kuni 0,5 voldini), töötemperatuur –40 C...60 C.

Kasutamist piirab esialgu väga suur hind ja väike pinge (kuni 5 V). Tööiga väheneb temperatuuri tõusuga praktiliselt kaks korda iga 10° C kohta üle 25° C.

5.5 Kondensaatorite ühendamine

5.5.1 Kondensaatorite jadaühendus

Jadaühenduse korral on laengud kõigi kondensaatorite elektroodidel suuruselt võrdsed, sest laengud liiguvad toiteallkast ainult välistele elektroodidele. Sisemistel elektroodidel tekivad nad varem teineteist neutraliseerinud laengute eraldumise tulemusena.



Tähistades kondensaatori ühe elektroodi laengu Q -ga, saab kirjutada pinged kondensaatoril

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{Q}{C_3}.$$

Seega on erineva mahtuvusega kondensaatorite pinge erinev.

Pinge ahela klemmidel

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Avaldades pinge kondensaatorite laengu ja mahtuvuse suhtena

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3},$$

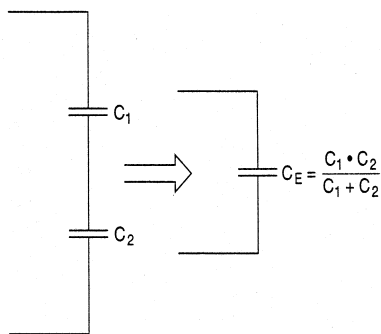
millest Q -ga jagamisel saab kogumahtuvuse valemi

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Kondensaatorite jadaühendusel võrdub kogumahtuvuse pöördväärtus üksikute kondensaatorite mahtuvuste pöördväärtuste summaga.

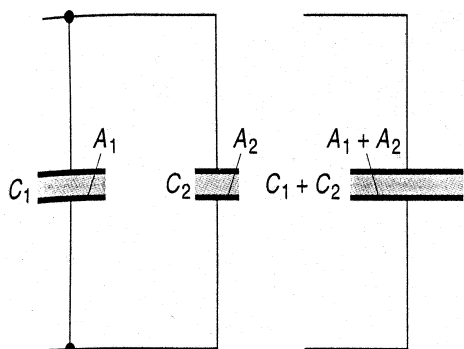
Kahe kondensaatori jadaühendusel on kogumahtuvus

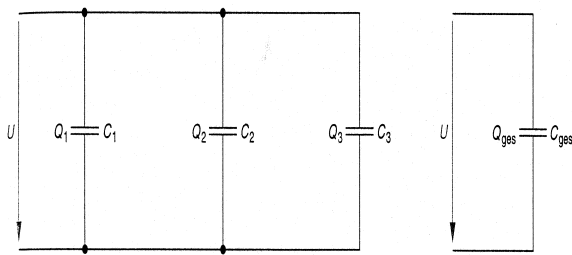
$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$



5.5.2 Kondensaatorite rööpühendus

Rööpühenduse korral on pinge kõigil kondensaatoritel võrdne, laeng aga üldjuhul erinev





Laengud

$$Q_1 = C_1 U, \quad Q_2 = C_2 U, \quad Q_3 = C_3 U.$$

Rööpkondensaatorite kogulaeng on võrdne üksikute kondensaatorite laengute summaga

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

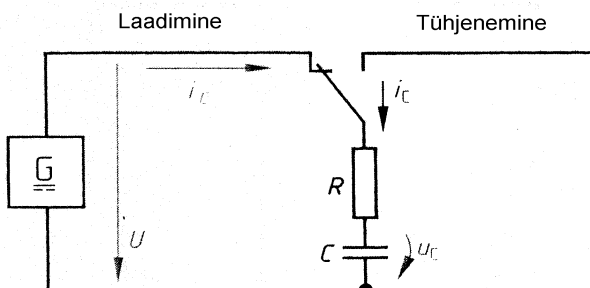
Pingega läbijagamisel saab

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Rööpühenduses kondensaatorite kogumahtvus on võrdne üksikute kondensaatorite mahtuvuste summaga.

5.6 Kondensaatori laadimis- ja tühjenemisvool. Ajakonstant

Kui kondensaator, või mõni teine mahtuvust omav juht või tarviti, mille mahtvus on C , ühendada vooluallikaga, siis tekib **laadimisvool** i_C , mis kestab seni, kuni plaatide potentsiaal võrdsustub allikapingega. Seejärel vool katkeb, sest kondensaatori dielektrik alalisvoolu läbi ei lase.



Kui laetud kondensaator nüüd ümberlülitiga lahutada vooluallikast ja ta jääb järjestikku takistiga R , tekib **tühjenemisvool** i_C . Laadimis- ja tühjenemisvoolu kestus sõltub kondensaatori mahtuvusest ja vooluringi takistusest. Mahtvus ja takistus määravad vooluringi ajakonstandi τ (kreeka väiketäht *tau*)

$$\tau = RC$$

τ vooluringi ajakonstant sekundites (s)
 R vooluringi aktiivtakistus oomides (Ω)
 C vooluringi mahtvus faradites (F)

Kontrollime mõõtühikut:

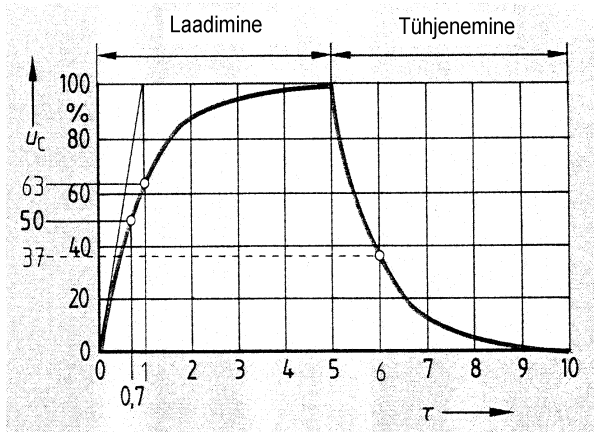
$$\Omega \cdot F = \frac{V}{A} \cdot \frac{As}{V} = s$$

Kondensaatori täislaadimiseks kulub aega praktiliselt viis ajakonstanti:

$$t = 5\tau$$

see on viis ajakonstanti.

Esimese ajakonstandi lõpuks on kondensaatori pinge saavutanud 63% toitepingest.



Samamoodi kulgeb tühjakslaadimine. Esimese ajakonstandi lõpuks langeb pinge 63% võrra ehk teisiti öeldes omab väärtuse 37% sellest, mis tal oli täislaetuna.

Niisugust pinge muutumise protsessi ajas nimetatakse eksponentsiaalseks ja seda kirjeldavat matemaatilist funktsiooni eksponentfunktsiooniks ja kõverat eksponendiks.

Ettekujutuseks:

Kui kondensaatori mahtuvus $C = 10 \mu\text{F}$, siis pinge saavutab 63% väärtuse

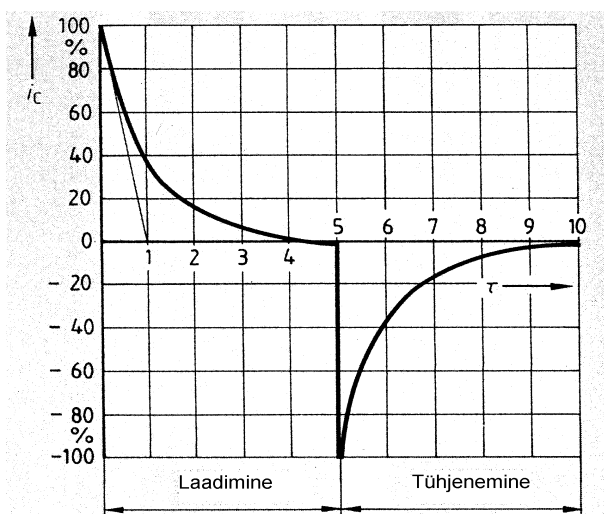
10 sekundiga kui takistus $R = 1 \text{ M}\Omega$,

1 sekundiga kui takistus $R = 100 \text{ k}\Omega$,

0,1 sekundiga kui takistus $R = 10 \text{ k}\Omega$.

Täispinge saavutatakse siis vastavalt umbes 50, 5 või 0,5 sekundiga.

Sama kaua kestab ka tühjakslaadimine.



5.7 Elektrivälja energia

Kondensaatori laadimisel muundub toiteallikast saadavast energiast osa takistis R soojuseks, osa salvestub kondensaatori elektriväljas.

Laadimise käigus kondensaatori laeng kasvab võrdeliselt pingega, sest

$$Q = CU.$$

Elektriväljas tehtud töö võrdub laengu ja pinge korrutisega:

$$A = QU.$$

Laadimisprotsessi vältel kondensaatori pinge muutub nullist kuni toiteallika pingeni. Keskmine pinge võrdub siis poole lõpp-pingega. Järelikult on laetud kondensaatori energia

$$W_e = A = Q \frac{U}{2}.$$

Et $Q = CU$,

siis elektrivälja energia

$$W_e = \frac{CU^2}{2}$$

W_e elektrivälja energia džaulides (J) ehk vattsekundites (Ws)

C mahtuvus faradites (F)

U pinge voltides (V).

Niisama suur energia muundub takistis R soojuseks:

$$W_{\text{soojus}} = W - W_e = QU - \frac{QU}{2} = \frac{QU}{2}.$$

Näide

Kui suur energia salvestub kondensaatori elektriväljas, kui mahtuvus $C = 10 \mu\text{F}$ ja pinge $U = 12 \text{ V}$?

$$W_e = \frac{CU^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2}{2} = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ Ws} = 0,72 \text{ mWs}$$