

Sähkömagnetismi III

Resistanssi

Esikvantifiointi ja kvantifiointi

Tarkastellaan komponenttien kykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Kutsutaan tätä ominaisuutta resistanssiksi. Kytetään komponentti sarjaan hehkulampun tai virtamittarin kanssa. Havaitaan, että metallilangan resistanssin vaikuttaa

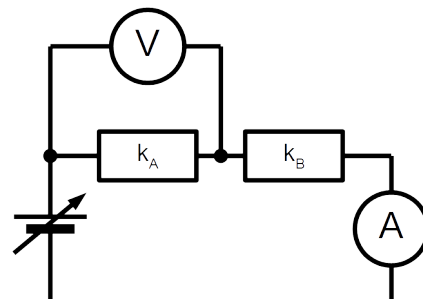
- johtimen pituus: mitä pitempi johdin, sitä suurempi resistanssi
- johtimen paksuus: mitä ohuempi johdin, sitä suurempi resistanssi
- johtimen materiaali: konstantanijohtimella on suurempi resistanssi kuin kuparijohtimella
- johtimen lämpötila: kuumen rautalangan resistanssi on suurempi kuin kylmän

Osoitetaan seuraavaksi, että komponentin resistanssi riippuu vain komponentista itsestään, ei muusta virtapiiristä.

Mitataan komponentin k_A läpi kulkevan sähkövirran voimakkuus ja napajännite tietyllä virtalähteen jännitteellä. Kytetään sen jälkeen toinen komponentti k_B sarjaan k_A :n kanssa. Havaitaan että sekä sähkövirran voimakkuus että k_A :n napajännite pienenevät.

Nostetaan virtalähteen jännitettä, kunnes k_A :n napajännite on noussut samaksi kuin ennen k_B :n lisäystä. Tällöin sähkövirran voimakkuus on noussut samaksi kuin ennen k_B :n lisäystä.

Havaitaan että tällöin k_A :n napajännite on myös noussut samaksi kuin ennen k_B :n lisäystä.

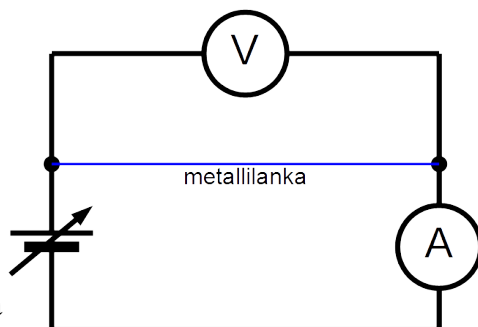


Kytetään sarjaan useita eri resistanssin omaavia komponentteja niin, että niiden läpi kulkee sama sähkövirta. Mitataan komponenttien napajännitteet. Todetaan että mitä suurempi on komponentin resistanssi, sitä suurempi on myös sen napajännite.

Esikvantifiointi antaa viitteen siitä, että komponentin napajännitteen ja komponentin läpi kulkevan sähkövirran voimakkuuden suhde on hyvä ehdokas resistanssiominaisuutta kuvaavaksi suureeksi.

Kvantifiointikokeessa idealisoinnit ovat tarpeen: koska lämpötilan on havaittu vaikuttavan resistanssiin, ja toisaalta sähkövirta lämmittää johdinta, lämpötila on joko pidettävä vakiona tai on pidettävä sähkövirran voimakkuus niin heikkona, ettei johdin lämpene merkittävästi.

Viereinen kuva esittää resistanssin kvantifiointikoneen kytkentää. Voidaan käyttää irtomittareita tai tietokoneavusteita

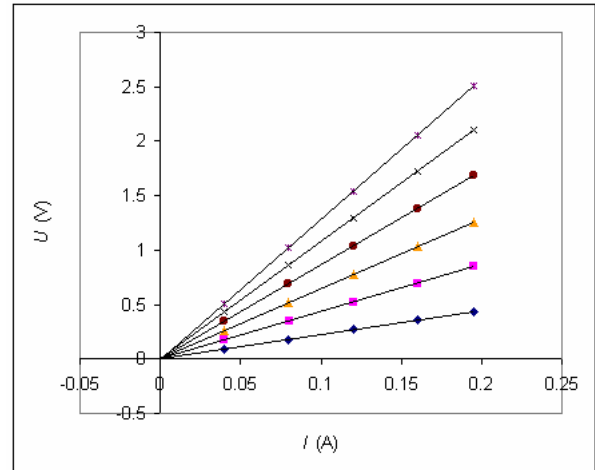


mittausta antureineen. Metallilankana kannattaa käyttää konstantiaania.

Varioidaan metallinlangan napajännitettä U , ja mitataan langan läpi kulkeva sähkövirta I . Piirretään (I, U) -kuvaaja, jonka havaitaan olevan origon kautta kulkeva suora. Jännitteen ja sähkövirran välillä siis vallitsee verrannollisuus $U \propto I$. Toistetaan koe eripituisilla langoilla, joilla tiedetään olevan sitä pienempi resistanssi mitä lyhyempi lanka on kyseessä (kuvaaja). (I, U) -kuvaajat ovat jälleen suoria, ja kulmakerroin on sitä pienempi mitä pienempi on johtimen resistanssi. Näin ollen suoran kulmakerroin voidaan määrittellä resistanssia kuvaavaksi suuoreksi, jota myös kutsutaan

resistanssiksi: $R = \frac{U}{I}$. Resistanssin määrittelylaki

tunnetaan myös nimellä Ohmin laki.



Komponentteja joille Ohmin laki ei ole voimassa

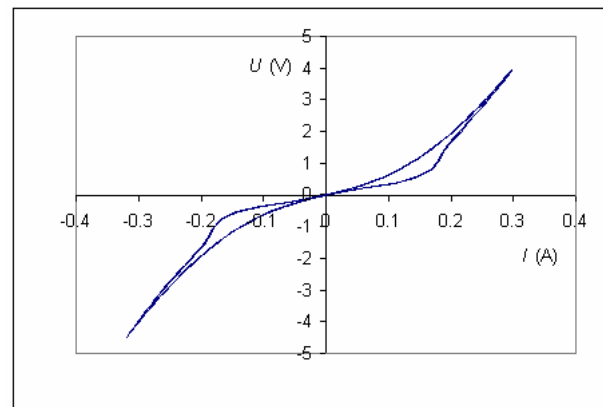
Hehkulamppu

Metallijohtimille $U \propto I$ vain jos lämpötila on vakio (tai resistanssiominaisuuden lämpötilariippuvuus on vähäinen, kuten konstantaanilla). Hehkulampun hehkulanka on volframia, joka lampun palaessa kuumenee voimakkaasti kun sähkövirta nostetaan nolasta voimakkuuteen jolla lamppu valaiseen normaalisti.

Nostetaan hehkulampun napajännite nolasta nimellisarvoonsa, ja lasketaan sitten takaisin nolaa. Hehkulangan sähkövirta ja napajännite mitataan. Havaitaan että (I, U) -kuvaaja ei ole suora. Havaitaan myös hystereesi: (I, U) -kuvaaja kulkee eri reittiä sähkövirran kasvaessa ja heiketessä.

Ohessa on kuvaaja kokeesta, jossa sähkövirran tuottamiseen käytetään signaaligeneraattoria eli taajuudeltaan ja amplitudiltaan säädettävää jännitelähdettä. Tällöin kuvaajasta saadaan sileämpi kuin käsisäädöllä, ja samaan kuvaajaan saadaan myös sähkövirran ja jännitteen käyttäytyminen negatiivisilla arvoilla. Havaitaan että hehkulampulla käyttäytyminen on symmetristä.

On ilmeistä että hystereesi johtuu hehkulangan hitaudesta muuttaa lämpötilaansa lämmitystehon mukaan, eli hehkulangan lämpökapasiteetista.



Ohmin lakia (U/I on vakio) noudattamattoman komponentin käyttäytymistä voidaan kuvata kahdella sähkövirran voimakkuuden ja jännitteen pisteittäistä käyttäytymistä kuvaavalla Ohmin laista yleistetyllä suureella:

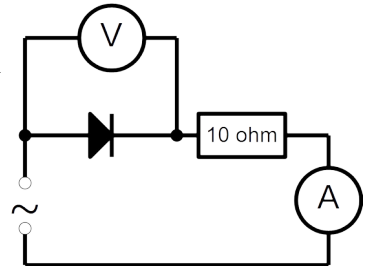
- Differentiaalinen eli dynaaminen resistanssi $R_d = \frac{dU}{dI}$ eli $U(I)$ -kuvaajan tangentin kulmakerroin kuvaa paikallista jännitteen käyttäytymistä sähkövirran funktiona.
- Staattinen resistanssi $R_s = \frac{U(I)}{I}$ kuvaa yksittäisen $U(I)$ -kuvaajan pisteen edustamaa jännitteen ja sähkövirran suhdetta. Hehkulampun staattinen resistanssi kasvaa kun lamppu kirkastuu.

Diodi, LED

Vaikka diodi ja LED eivät ole käsitteenmuodostuksen kannalta keskeisiä oliota, tarkastellaan niitä kuitenkin lähemmin koska ne erityisesti mainitaan LOPS:ssa. Pidetään tarkastelu puhtaasti kokeellisella pohjalla, jätetään toiminnan selittäminen sivuun.

Kytetään sarjaan paristo, hehkulamppu ja diodi (sähkövirran kesto noin 1 A). Käännetään diodi kytkennässä toisin päin. Havaitaan että diodi päästää läpi sähkövirtaa vain toiseen suuntaan. Päästösuunnassakin diodi vastustaa sähkövirran kulkua jonkin verran.

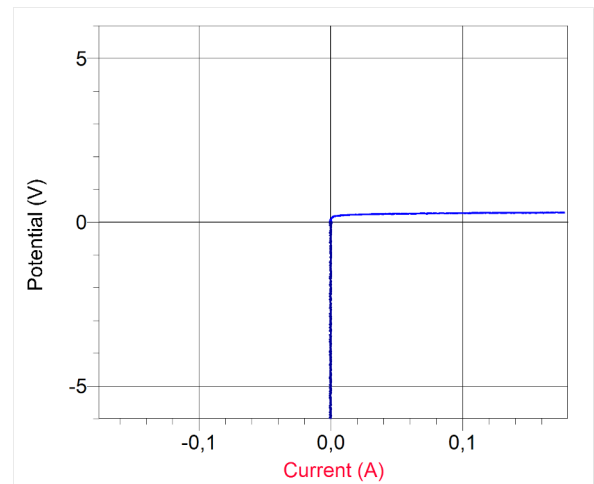
Tutkitaan diodin käyttäytymistä tarkemmin viereisen kuvan kytkennällä. Käytetään signaaligeneraattoria jännitelähteenä ja mitataan jännitettä ja sähkövirtaa mieluiten tietokoneella. 10 ohmin vastus estää sähkövirran kasvun liian suureksi. Havaitaan että



- Estosuunnassa diodin staattinen ja dynaaminen resistanssi ovat kumpikin lähes äärettömiä.
- Päästösuunnassa diodi alkaa johtaa kun napajännite saavuttaa tietyn arvon, ns. kynnysjännitteen. Tämän jälkeen diodin napajännite säilyy lähes vakiona sähkövirran voimakkuudesta riippumatta. Eli dynaaminen resistanssi on nolla, ja staattinen resistanssi pienenee kun sähkövirta kasvaa.

Hohtodiodi (LED, ledi) säteilee valoa kun sen läpi kulkee sähkövirta. Muuten ledi käyttäytyy sähköisesti periaatteessa kuten tavallinen diodi. Käytännössä tavalliset pienet merkkivalo-ledit on tarkoitettu toimimaan 20 mA virralla, eivätkä ne kestä 50 mA suurempaa sähkövirtaa tai 5 V suurempaa estosuuntaista jännitettä. Kynnysjännite vaihtelee erivärisillä ledeillä, mutta on tyypillisesti 2 – 3 V luokkaa. Jos ledi kytetään paristoon tai jännitelähteeseen jossa ei ole sähkövirran rajoitusta, ledi tarvitsee aina sarjavastuksen, joka estää sähkövirran kasvun liian suureksi. Vastuksen resistanssi voidaan laskea lausekkeesta

$R = (U - U_L) / I_L$, jossa U on käyttöjännite (virtalähteen napajännite), U_L on ledin kynnysjännite ja I_L on haluttu sähkövirta jolla lediä poltetaan (20 mA tai alle). Käytännössä 1 kOhm etuvastus sopii kaikille tavallisille ledeille 4,5 – 9 V käyttöjännitteillä.



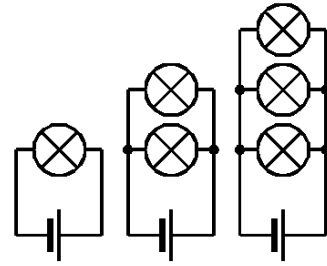
Sähköteho

On havaittu sähkövirran lämpövaikutuksen pystyvän tuottamaan lämpöä, ja sähkövirran magneettisen vuorovaikutuksen pystyvän tekemään mekaanista työtä. On siis ilmeistä, että sähkövirralla on tietty teho, joka määrää miten paljon lämmitystyötä tai mekaanista työtä sähkövirta aikayksikössä tekee.

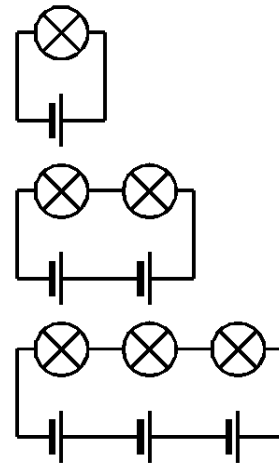
Esikvantifiointi

Sähkötehon esikvantifiointi perustuu ideaan, että samanlaisissa ja samalla kirkkaudella palavissa lampussa sähkövirran energiaa muuttuu lämmöksi ja valoksi samalla teholla.

Kytetään paristoon yksi, kaksi jne. lampua rinnan. Kaikki lamput palavat yhtä kirkkaasti, joten ilmeisesti sähköteho on verrannollinen lampujen lukumäärään. Myös sähkövirta on verrannollinen lampujen lukumäärään, mutta lampuyhdistelmän napajännite pysyy kokeessa vakiona. Näin ollen sähköteho on verrannollinen sähkövirran voimakkuuteen.



Seuraavaksi kytketään sarjaan ensin yksi paristo ja yksi lampu, sitten kaksi paristoa ja kaksi lampua, jne. Jälleen lamput palavat joka kytkennässä yhtä kirkkaasti, joten sähköteho on verrannollinen lampujen lukumäärään. Nyt sähkövirran voimakkuus on sama kaikissa kytkennöissä, mutta lampuyhdistelmän napajännite on verrannollinen lampujen lukumäärään. Näin ollen sähköteho on verrannollinen jännitteeseen.

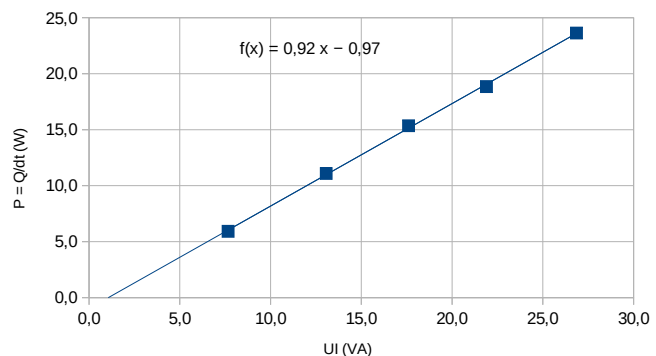


Yhdistämällä tulokset saadaan ennuste: sähköteho on verrannollinen sähkövirran voimakkuuden ja jännitteen tuloon.

Sähkötehon lain kvantifiointi

Lämmitetään uppokuumentimella vettä. Mitataan uppokuumentimen napajännite ja sähkövirta, sekä veden lämpenemisteho (veteen siirtyvä lämpömäärä aikayksikössä). Varioidaan napajännitettä ja sähkövirran voimakkuutta. Piirretään kuvaajaksi veden lämpenemisteho sähkövirran ja jännitteen tulon funktiona. Verrannollisuuskertoimen todetaan olevan (lähes) 1. Siis sähköteho $P = UI$.

Koe kannattaa tehdä laitteella, jossa uppokuumentimena toimii hehkulamppu, jolloin nähdään että laite on toiminnassa. Tällöin osa energiasta poistuu systeemistä valona, mutta tämä osuus on lämpöenergiaan verrattuna mitätön. Jos karkuun pääsevä energia halutaan minimoida, veteen voi lisätä mustetta.



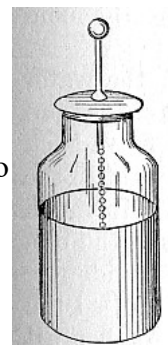
Uppokuumentimen

(UI,P)-kuvaaja

Edellä olemme käytännön tarpeesta esitelleet voltin jännitemittareissa käytettynä yksikkönä, kytkemättä sitä muuhun yksikköjärjestelmään. Ankara käsittehierarkia menisi niin päin, että vasta sähkötehon kvantifiointikoe määrittelee yksikön voltin, että laki $P = UI$ toteutuu ilman kertoimia.

Kondensaattori

Ensimmäinen tunnettu kondensaattori oli ns. *Leidenin pullo*. Se koostuu lasiastiasta, jonka ulkopinnalla on metallipäällyste. Ensimmäisissä versioissa astia oli osittain täytetty vedellä tai muulla sähköä johtavalla nesteellä; myöhemmin myös astian sisäpinta päällystettiin metallilla. Kun Leidenin pullon ulkopinta maadoitetaan ja sisäpintaan tuodaan varausta, pullo varautuu. Kohtuullisenkin kokoinen Leidenin pullo pystyy vastaanottamaan ja säilyttämään niin suuren varauksen, että varauksen purkautuessa syntyvä kipinä on paljon "lihavampi" kuin esim. nauhageneraattorissa. Isosta Leidenin pullosta voi saada hyvin voimakkaan, jopa vaarallisen sähköiskun.



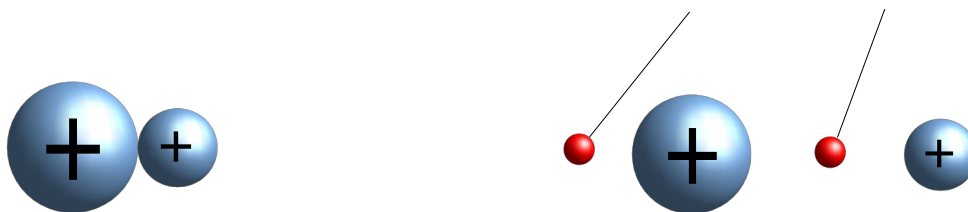
Turvallinen tapa demonstroida Leidenin pullon toimintaa on kokeilla influenssikoneella, millainen ero kipinäinnissä havaitaan kun koneeseen kuuluvat Leidenin pullot kytketään ensin irti, sitten takaisin käyttöön.

Ennen pitkää huomattiin että mitkä tahansa lähekkäin olevat johdekappaleet, joiden välissä on ilmaa tai eristeainetta, muodostavat kondensaattorin. Kunnia *levykondensaattorin* keksimisestä kuuluu Benjamin Franklille.

Nimi "kondensaattori" on samaan juurta kuin *condensation*, tiivistyminen. Kondensaattorit ajateltiin sähkövarauksen "tiivistäjiksi", koska niillä saatiin suuri sähkövaraus talteen pieneen tilaan.

Jännite on sähköisten tilojen tasoero

Aikaisemmin on havaittu, että kun varattu ja varaamaton kappale (tai erimerkkisesti varatut kappaleet) yhdistetään, kappaleiden välillä siirtyy varausta. Suurella ja pienellä metallipallolla voidaan todeta että siirtymisen jälkeen kappaleet vuorovaikuttavat testivarauksen kanssa eri voimakkuudella, joten kappaleiden *varaukset eivät asetu samoiksi* vaikka epäilemättä niiden *sähköiset tilat* jollain tavalla tasoittuvat.



Edelleen aikaisemmin on havaittu että varauksen siirtyminen on sähkövirtaa, ja toisaalta jännite on sähkövirran syy. Tästä herää ajatus että *sähköisten tilojen tasoero on sama kuin jännite*.

Kun kondensaattori on varautunut, sen levyillä on vastakkaismerkkiset varaukset, siis sähköinen tasoero. Kytetään kondensaattori elektrometriin, eli jännitemittariin jonka läpi ei kulje lainkaan sähkövirtaa (esim. ES-9078). Varataan kondensaattori ensin sähköstaattisesti ja sitten paristolla, ja todetaan mittarin näyttävän jännitettä kummassakin tapauksessa.



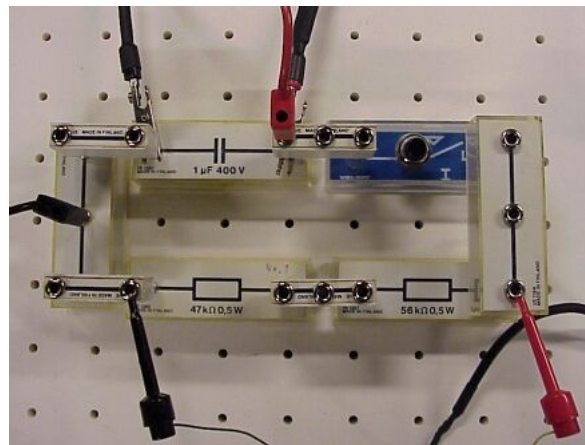
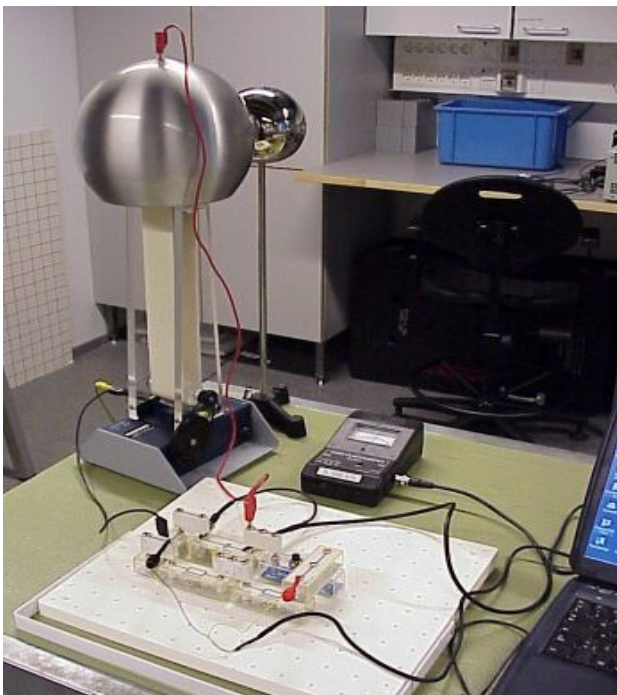
Siirtyvän varauksen ja sähkövirran yhteys

Koska sähkövirta on varauksen liikettä, sähkövarauksen ja sähkövirran välillä vallitsee ilmeisesti jokin kvantitatiivinen laki.

Osoitetaan kokeella, että sähkökoneet (nauhageneraattori, influenssikone) tuottavat vakiona pysyvän sähkövirran, kun koneen kampea pyöritetään tasaisesti; sähkövirta on sitä suurempi, mitä nopeammin kampea pyöritetään. Toisaalta jokainen kammien pyörähdys tuottaa yhtä paljon varausta. Tästä voi ennustaa, että sähkövirran voimakkuus on verrannollinen varauksen

tuottonopeuteen, $I \propto \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, ja näin ollen sähkövirran ollessa vakio $\Delta Q \propto I \Delta t$, ja muuttuvalla virralla $Q \propto \int I dt$.

Testataan ennustetta kvantitatiivisesti. Varataan nauhageneraattorilla kondensaattoria varioiden varauksen määrää. Käytetään varauksen yksikkönä yhdellä kammien kierroksella syntyvää varausta. Puretaan kondensaattori ja mitataan purkausvirta ajan funktiona.



Kondensaattori voi olla esimerkiksi 1 µF. Se varautuu n. 0,5 V / generaattorin kammien kierros. Varautumista pitää seurata (parhaiten se käy mittarilla ES-9078), ei saa ylittää tietokoneen jänniteanturin maksimijännitettä. Kondensaattori puretaan n. 100 kΩ vastuksen kautta. Mitataan vastuksen napojen välistä jännitettä tietokoneella, lasketaan mittausohjelmassa vastuksen napajännitteestä purkausvirta. Lasketaan purkausvirran integraali mittausohjelmassa.

Piirretään tuloksista $(\int I dt, Q)$ -kuvaaja. Havaitaan pisteiden asettuvan suoralle. SI-järjestelmässä varauksen yksikkö valitaan niin, että suoran kulmakerroin on 1, joten saadaan laki $Q = \int I dt$. Varauksen yksikkö $[Q] = As = \text{coulomb (C)}$.

Kapasitanssi

Edellä havaittiin, että samalla sähköisen tilan tasolla isoon metallipalloon "mahtuu" enemmän sähkövarausta kuin pieneen. Edelleen huomattiin, että sama varaus eli sama määrä generaattorin kammien kierroksia, joka varaa generaattorin hyvin suureen jännitteeseen, saa aikaan kondensaattorissa vain volttien suuruisen jännitteen. Ja myös, että sama määrä kondensaattoriin tuotua varausta näyttää nostavan jännitettä aina saman verran.

Näyttää siis siltä että johdekappaleilla ja kondensaattoreilla varauksen ja jännitteen suhde voisi olla

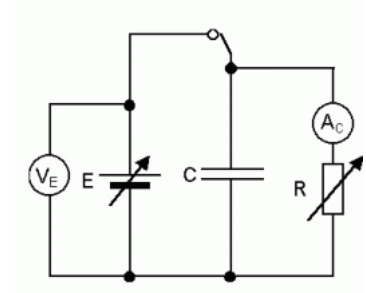
varautumiskykyä kuvaava vakio. Testataan tätä kvantifioivalla kokeella.

Koe voidaan toteuttaa samalla laitteistolla kuin lain $Q = \int I dt$ kvantifiointi. Kondensaattorin voi ladata tasavirtalähteellä, tai nauhageneraattorilla kuten edellä. Latausjännitteet saa tällöin luettua kondensaattorin $U(t)$ -käyrän huippukohdasta.

Saadaan tulos, että tietylle kondensaattorille $\frac{\int I dt}{U} = \frac{Q}{U}$ on vakio. Nimetään tämä vakio kapasitanssiksi C , $[C] = [Q]/[U] = C/V = 1 \text{ faradi} = 1 \text{ F}$.

Kokeen voi tehdä myös yksinkertaisemmin, ilman tietokonemittausta (kuva). Tällöin kannattaa käyttää elektrolyyttikondensaattoreita, 220 – 1000 μF . Tällaisen kondensaattoreiden varauskykyä voi ensin tutkia kvalitatiivisesti: ladataan kondensaattori paristolla ja kokeillaan, kauanko kondensaattoriin kytketty lamppu palaa. Kvantifioivassa kokeessa puretaan kondensaattori säädettävän vastuksen läpi niin, että purkuvirta pysyy vakiona. Tällöin $Q = I \Delta t$. Havaitaan että

kondensaattorille $\frac{Q}{U}$ on vakio, joka kuvaa kondensaattorin kykyä varastoida varausta.



Kondensaattorikytkentöjen lait

Kondensaattorikytkentöjä kannattaa tarkastella ensin käyttäen sarjaa samanlaisia esim. 1 μF kondensaattoreita. Kapasitanssit on kätevintä määrittää erityisellä kapasitanssimittarilla; joissain yleismittareissa on myös kapasitanssin mittaushetkinä.

- Rinnan kytkettyjen kondensaattoreiden yhteinen kapasitanssi havaitaan olevan kapasitanssien summa: $C_{tot} = \sum C_i$. Tämä pätee myös erikokoisille kondensaattoreille.
- Sarjaan kytkettyjen samanlaisten kondensaattoreiden yhteinen kapasitanssi havaitaan olevan $C_{tot} = \frac{1}{N} \cdot C$. Tämä ei aivan suoraan yleisty erikokoisille kondensaattoreille, vaan niiden sarjaankytkennälle täytyy johtaa ennuste $C_{tot} = \left(\sum \frac{1}{C_i} \right)^{-1}$, joka testataan kokeellisesti.

