

# ELEC-C4210 Sähkötekniikka ja elektroniikka

## Laboratoriotöiden työohjeet

Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan korkeakoulu  
Radiotieteen ja -tekniikan laitos

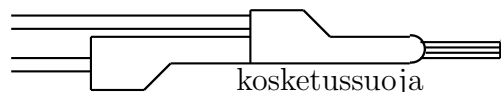
**Tutustu työohjeisiin etukäteen ja ota ne myös mukaasi laboratorioon.** Lue siis sen työn ohjeet, jota olet tulossa tekemään. Se helpottaa labrojen suorittamista huomattavasti! **Lue** ennen laboratoriotöiden alkua seuraavat **turvallisuusohjeet**. **Jos sinulla on labroista osasuorituksia aiemmilta vuosilta**, ilmoita niistä Kimmolle. Kerro myös töiden suorittamisvuosi (tai siitä jäljellä oleva muistikuva).

## TURVALLISUUSMÄÄRÄYKSET JA ENSIAPUOHJEET

Koska laboratoriotöiden tekemiseen liittyy tietty hengenvaara, on kaikkien laboratoriossa työskentelevien noudatettava seuraavia turvallisuusmääräyksiä ja tunnettava toimenpiteet, joihin tapaturman sattuessa on välittömästi ryhdyttävä. Turvallisuusmääräysten tunteminen on ehdoton edellytys laboratoriotöiden suorittamiseksi.

### YLEISIÄ TURVALLISUUSMÄÄRÄYKSIÄ

1. Jokaisen on ennen laboratoriotöiden alkua huolellisesti perehdyttävä näihin määräyksiin ja noudatettava assistentin ohjeita.
2. Laboratoriotöitä tehtäessä tulee huoneessa olla vähintään **kaksi henkilöä**.
3. Kytkeä suoritettaessa on varmistauduttava, että laitteet ovat **jännitteettömiä**.
4. Kytkeä tehtävissä haaroituksissa on käytettävä banaanikoskettimia, joissa on kosketussuoja. Banaanien metallikärjet eivät saa jäädä näkyviin. Kuvassa on kaksi banaani-liitintä kytketty toisiinsa. Oikealla olevan metallipään on oltava kiinni jossakin laitteessa.



5. Työn aikana on aina ilmoitettava jännitteen kytkemisestä kuuluvalla äänellä, esim. "varokaa, kytken jännitteen". Pienikin jännite saattaa väärin kytkettynä rikkoa elektroniikka-piirejä.
6. **Onnettomuuden sattuessa tai uhatessa jännite katkaistaan nopeimmin seinillä olevilla punakeltaisilla hätäkatkaisimilla.** Katkaisimen painaminen katkaisee sähköt. Virtaa ei saa kytkeä takaisin ennen kuin tilanne on selvitetty.
7. Lähin lääkekaappi on vahtimestarin huoneessa lähellä pääovea.

## SÄHKÖTAPATURMAN ENSIAPUOHJEET

1. Katkaise jännite nopeasti ja irrota vahingoittunut henkilö vaarantamatta itseäsi.
2. Suoritetaan tehtävien jako:
  - Kaksi henkilöä ryhtyy HETI antamaan ensiapua
  - Yksi henkilö tekee hälytyksen.
3. Totea rauhallisesti loukkaantuneen tila:
  - Hengittääkö loukkaantunut?
  - Tuntuuko pulssi?
  - Onko loukkaantunut shokkitilassa?
  - Onko suuria verta vuotavia haavoja?
4. Ensiapu:
  - Asetetaan potilas oikeaan asentoon
  - Jos potilas ei hengitä, aloitetaan tekohengitys ja painantaelvytys
5. Hälyttäminen;
  - Tilaa ambulanssi osoitteeseen Aalto-yliopisto TUAS-talo, Maarintie 8. Hälytys annetaan hätänumeroon 112.
  - Hälytä paikalle myös vahtimestari!

## SÄHKÖTAPATURMAT

Sähkövirta aiheuttaa ihmisessä virran voimakkuudesta, kestoajasta ja kulkutiestä riippuen seuraavanlaisia vaikutuksia:

Lievät lihaskouristukset ja hermostohäiriöt, verenpaineen nousu  
Voimakkaat kouristukset, et pysty irrottautumaan johdosta  
Sydänkammiovärinä, verenpaineen aleneminen  
Tajunnan menetys  
Sydämen kokoonpuristuminen  
Lieviä tai vaikeita palovammoja, hermosolujen myrkyttyminen  
Valokaaren aiheuttamia silmävammoja

### Vaaralliset jännitteet ja virrat

Ihmiselle vaarallisinta on 40...150 Hz:n vaihtovirta. Ihmisen resistanssi käden ja jalan välillä on  $600\text{ k}\Omega$ ... $6\text{ k}\Omega$ , joten 230 voltin pienjännitteellä ihmisen läpi kulkeva virta voi olla jopa noin 400 mA. Mikäli ihmisen läpi kulkeva virta on alle 10 mA, ei se yleensä ole haitallista. Jos virta on alle 25 mA, se voi johtaa lihaskouristuksiin, mutta on yleensä vaaratonta. 25...50 mA:n virta voi aiheuttaa häiriöitä sydämen toiminnassa, mutta on kuitenkin yleensä vaaraton. Pitempiaikaisena (yli 30 s) se voi kuitenkin aiheuttaa hengityslihasten kouristuksen ja kuolemaan johtavan tajuttomuuden.

Jos virta on 0,05...3 A, aiheutuu sähköiskusta tajuttomuus ja mahdollisesti hengityslihasten kouristus sekä sydänkammiovärinä, joka johtaa lyhyessä ajassa kuolemaan. Yli 3 A:n virrat aiheuttavat edellisten vaikutusten lisäksi sisäisiä palovammoja, joiden nopea sammuttaminen

edellyttää tehokasta jäähdytystä esim. juoksevan kylmän veden alla. Suurjännite voi aiheuttaa myös veren koostumuksessa muutoksia, joiden seurauksena on vaarallinen myrkytystila. Sähköisku aiheuttaa usein välillisesti tapaturman, kuten kaatumisen tai putoamisen.

### Sydänkammiovärinä tai shokki

Sydänkammiovärinällä tarkoitetaan sellaista sydämen toimintahäiriötä, jossa supistusten sijasta kammiot vain värisevät, eikä sydän pysty työntämään verta verenkiertoon. Tällöin verenpaine alenee vaaralliselle tasolle ja aiheuttaa happivajauksen aivoissa ja keuhkoissa. Jos sydäntä ei saada nopeasti toimimaan, vaurioituvat aivojen herkkimmät osat jo muutaman minuutin kuluessa.

Sähköiskun seurauksena voi olla myös shokki. Shokilla tarkoitetaan tilaa, jossa sydämeen palautuvan veren määrä on liian pieni. Onnettomuuden uhrin kalpeneminen on shokin ensioire. Shokin syvetessä iho muuttuu kauttaaltaan kelmeäksi, huulet tulevat värittömiksi ja kuiviksi. Kasvoihin ja kehoon voi kohota kylmä hiki. Seuraavassa vaiheessa potilas haukottelee ja on veltto. Katse harhailee, silmänmüstuaiset laajenevat, tajunta sumenee (tämä nyt ei ole naurun asia, mutta luennoilla moni näyttäisi olevan shokissa). Seurauksena on lopulta tajuttomuus. Värttinävaltimon (ranne) syke tihenee ja käy pehmeäksi (100–120 lyöntiä minuutissa). Shokin syvetessä ja tilanteen muuttuessa vaarallisemmaksi pulssi yhä tihenee (120–150 kertaa minuutissa). Pulssin mittaaminen vaikeutuu sen heikkouden ja pehmeiden takia. Shokkitila on aina hengenvaarallinen. Mitä pitempään se jatkuu, sitä kohtalokkaammat ovat seuraukset.

### Ensiapu ja ehkäisevä hoito

Jos kyseessä on vaikea tapaturma, voidaan itse onnettomuuspaikalla tehdä vain vähän shokkitilan korjaamiseksi. Huomio on kiinnitettävä shokkia ehkäiseviin toimenpiteisiin. Potilasta on kohdeltava mahdollisimman varovasti, tarpeetonta liikuttelua ja kääntelyä on ehdottomasti vältettävä. Tarkistetaan heti pystyykö potilas hengittämään, avataan kiristävät vaatteet kaulasta ja vyötäröltä. Potilasta EI SAA RIISUA. Kurkusta puhdistetaan mahdollinen veri, lima ja oksennus. Potilaan leuka nostetaan ylöspäin ja niska taivutetaan vähän taaksepäin. Tämä asento vapauttaa nielun.

Jos potilas on loukkaantunut kasvoihin (ehkä alaleuan murtuma), voi kieli valua kurkkuun. Tällöin se on vedettävä ulos ja kielen valuminen uudelleen estetään kiinnittämällä se esimerkiksi hakaneulalla tai teipillä poskeen.

Mikäli henkilö ei hengitä itse, aloitetaan puhallus- ja painantaelvytys. **Uuden SPR:n elvytysohjeen mukaan sykkeen tunnusteleminen on maallikolle sen verran hankalaa, että sekä puhallus- että painanelvytys aloitetaan, jos henkilö ei ole herätettävissä eikä hengitä normaalisti!** Ensiapua annetaan keskeytyksettä sairaalaan asti. Palo- tai muiden vammojen hoito ei saa keskeyttää painantaelvytyksen tai tekohengityksen antamista.

Kun onnettomuuspaikalla on kolme tai useampia henkilöitä<sup>1</sup>:

- Yksi lähtee välittömästi hälyttämään ambulanssin ja hakemaan paikalle ensiapukoulutuksen saaneen henkilön (esim. osaston vahtimestarin).
- Toinen ryhtyy antamaan puhallus-painanelvytystä. Uusien ohjeiden mukainen rytmi on: 30 painelua ja 2 puhallusta. Painanelvytyksessä rintalastaa painetaan sen keskikohdasta n. 4–5 cm alaspäin.
- Elvytysvuoroa vaihdetaan 1–2 minuutin välein.

<sup>1</sup>SPR:n 27.1.2006 julkaistujen päivitettyjen elvytysohjeiden mukaan, kts. <http://www.spr.fi/>

- Elvytys päättyy vasta, kun potilas selvästi virkoaa tai hänet on saatu lääkintähenkilöstön hoitoon.

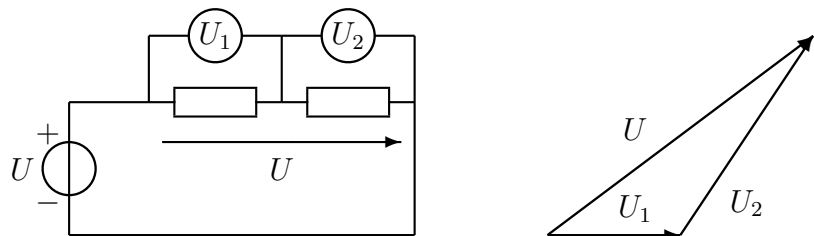
## YLEISOHJEITA LABROIHIN

Älä peitä vaatteilla tai muilla tavaroilla laitteita, joiden tuuletus saattaa tästä ratkaisevasti heikentyä. Jännitelähteiden  $\perp$  -napa on usein kytketty vain laitteen metallikuoreen, jolloin siitä ei saada virtaa.

### Oskilloskoopin käyttö

Koska oskilloskoopin runko on maadoitettu, on tarkistettava, että oskilloskoopin mittajohdon suojavaippa (usein musta johto) kytketään mitattavan piirin **maahan** (ei koskaan muualle), jotta ei aiheutettaisi mitattavaan piiriin oikosulkuja. Samoin signaaligeneraattorin maa kytketään piiriin maahan. Vaikka oikosulku ei tässä yleensä riko mitään, se estää signaalin kulun. (Nämä ovat asioita jotka usein unohdetaan.)

### Jännitteen, virran ja tehon mittaus



- Vaihtojännitemittauksissa on otettava huomioon, ettei jännitteitä voida laskea tehollisarvoina (mittarilukemina) yhteen, jos niiden välillä on vaihe-eroa. Kirchhoffin lait eivät toimi tehollisarvoille eli mittarilukemille!
- Virtamittari kytketään aina sarjaan mitattavan piirin kanssa.
- Tehomittari näyttää nolaa, jos pätöteho on nolla eli  $U$  tai  $I$  on nolla, tai jännitteen ja virran vaihe-ero on  $90^\circ$ . Tällöin virta tai jännite voi olla suurikin. Varminta on aina käyttää virtamittaria  $W$ -mittarin kanssa sarjassa. Piirissä voi siis olla vaarallinen jännite, vaikka  $W$ -mittari näyttää nolaa.
- Mittareilla ja mittamuuntajilla on otettava huomioon kertoimet. Tehomittareilla asteikon maksiminäyttämä määrätty jännite- ja virta-alueiden tulona.

**Turvallisuusohje päättyy tähän. Seuraavaksi laboratoriotyöohjeet.**

Tarkista kurssin Noppa-sivuilta, minkä laboratoriotöistä teet ensimmäisellä viikolla!

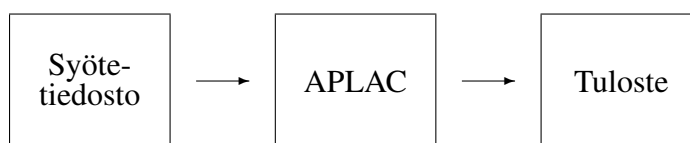
# 1 PIIRISIMULOINTI

## 1.1 Taustaa

Elektroniikkapiirien suunnittelu ei yleensä käy kovin suoraviivaisesti. Kun uusi piiriversio on suunniteltu, halutaan usein päästä kokeilemaan käytännössä, kuinka hyvin piiri vastaa vaatimuksia. Piirin rakentaminen maksaa paljon ja vie aikaa varsinkin, jos piiri on integroitu piisirulle.

Piirisimulointi helpottaa piirien suunnittelua huomattavasti. Piirisimulaattorilla tarkoitetaan tietokoneohjelmaa, jolla elektroniikkapiirien toimivuutta ja ominaisuuksia voidaan tutkia. Ohjelma ottaa syötteeksi piirin topologian eli komponenttien kytkennät toisiinsa, komponentteihin liittyvät parametrit (esim. vastuksen resistanssin) ja käskyt, jotka määräävät, mitä ohjelma antaa tulosteeksi. Piirisimulaattorilla voidaan esimerkiksi tutkia piirin solmupisteiden jännitteitä, haarojen virtoja tai kytkennän vahvistusta portista toiseen. Jännitteet ja virrat voivat olla vakioita tai ajasta riippuvia.

Alla on kaavakuva simulointiohjelman käytöstä syötetiedoston (engl. *netlist*) avulla.



## 1.2 Analyysimenetelmiä

**DC-analyysi** on piirisimulaattorin perusanalyysi. Tällöin kaikki piirin lähteet ovat tasasähkölähteitä, joten tulokseksi saadaan tasasähkösuureita, kuten solmupisteiden tasajännitteitä ja haarojen tasavirtoja. Piirin vaihto- tai transienttijännitelähteet (ks. selitys jäljempänä) on korvattu oikosuluilla ja vastaavat virtalähteet avoimella piirillä. Myös kaikki kondensaattorit korvataan avoimella piirillä (virtahan ei kulje kondensaattorin läpi muuta kuin jännitteen muuttuessa) ja induktanssit oikosululla. DC-analyysillä saadaan selville piirin toimintapiste.

**AC-analyysissä** virrat ja jännitteet ovat sinimuotoisia. Laskennassa käytetään tälläkin kurssilla opittavaa osoitinlaskentaa eli kompleksilukuja. Sinimuotoisilla suureilla on kaksi ominaisuutta: itseisarvo ja vaihekulma. Taajuus on kaikilla suureilla sama: analyysi tehdään tietyllä taajuudella. Simulaattoriohjelma tekee yleensä DC-analyysin automaattisesti ennen AC-analyysiä, vaikka käyttäjä ei tätä ole erikseen pyytänyt. AC-analyysi sopii suoraan lineaarisille komponenteille, kuten vastuksille, kondensaattoreille ja keloille. Epälineaariset komponentit, esim. diodi, linearisoidaan analyysiä varten: niille lasketaan piensignaalisijaiskytkentä. Matemaattisesti tämä tarkoittaa epälineaarisen käyrän korvaamista suoralla, jonka kulmakerroin on epälineaarisen käyrän tangentin kulmakerroin toimintapisteessä eli DC-analyysin ratkaisupisteessä. Linearisointi voidaan myös tulkita epälineaarisen funktion korvaamiseksi sen Taylorin sarjalla, kun tästä otetaan mukaan ainoastaan vakiotermi ja ensimmäisen asteen (lineaarinen) termi. AC-analyysillä voidaan tutkia esim. transistorivahvistimen piensignaalivahvistusta tai suodattimen taajuusvastetta. Tällöin AC-analyysi tehdään jokaisella tutkittavalla taajuudella erikseen.

Jos halutaan tutkia piiriä, johon kuuluu eritaajuisia lähteitä tai signaalit eivät ole sinimuotoisia, käytetään transienttianalyysiä. Piiri voi sisältää myös epälineaarisia komponentteja, esimerkiksi diodeja. **Transienttianalyysissä** lähteiden ja muiden komponenttien virrat ja jännitteet ovat

mitä tahansa ajan funktioita. Simulointiohjelma ratkaisee tutkittavien suureiden arvot integroiden piiriyhtälöitä numeerisesti ajan suhteen. Laskenta sujuu DC- ja AC-analyysiä hitaammin. Transienttiansalyysiä yleensä käytetään piirin muutos- tai käynnistyshetken ilmiöiden tutkintaan. Toki sillä voidaan laskea suureiden jatkuvan tilan aaltomuotoja (eli tilannetta, kun muutosilmiöt ovat tasaantuneet pois), mutta tätä varten on nopeampiakin analyysimenetelmiä.

Muita menetelmiä ovat esimerkiksi **harmoninen balanssi** jatkuvuustilan suoraa laskemista varten, **kohina-analyysi** ja tilastollinen **Monte Carlo -analyysi**.

### 1.3 Komponenttimallit

Kun käyttäjä kertoo ohjelmalle komponentin sijainnin piirissä, ohjelma sijoittaa vastaavalle paikalle komponenttimallin. Malliin on koottu komponentin käyttäytymistä kuvaavat yhtälöt tai komponentin sijaiskytkentä muiden komponenttien avulla.

### 1.4 APLAC

Teoreettisen sähkötekniikan laboratoriossa on 1970-luvun alusta lähtien kehitetty APLAC-piirisimulointiohjelmaa. Tässä työssä tutkitaan sen Windows-version käyttöä yksinkertaisten piirien analysointiin.

APLACin täysin toimivan demoversion ja käyttöohjeet PDF-tiedostoina saa halutessaan laboratorion (kysy luennoitsijalta lisätietoja).

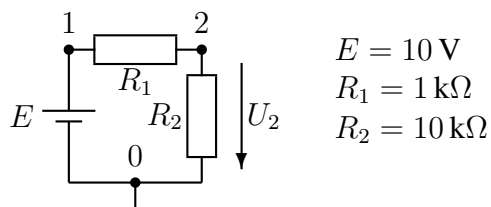
Nykyisin APLAC on osana National Instrumentsin omistamaa AWR-ohjelmistoa.

### 1.5 Esimerkkisimulointeja APLACilla

APLACissa, kuten muissakin simulaattoreissa, on mahdollista syöttää kytkentä ohjelmalle piirikaavioeditorin avulla. Tässä perehdytään kuitenkin *netlist*-pohjaiseen tietojen syöttämistapaan. Simulointiohjelma tekee joka tapauksessa kytkentäkaavion perusteella syötetiedoston, joten piirtämisvaihe olisi vain tarpeeton hidaste. Tutkitaan aluksi helppoa kahden vastuksen sarjaan-kytkentää. Halutaan tietää suuremman vastuksen jännite. Aloitetaan kirjoittamalla syötetiedosto APLAC-piirisimulointiohjelmaa varten.

#### Esimerkki 1. DC-analyysi

Huom! APLACissa voit käyttää isoja ja pieniä kirjaimia sekaisin.



Tarvittava syötetiedosto:

§ Tämä on kommenttirivi. Dollarimerkki aloittaa kommentin.

```
Volt E 1 0 DC=10 § 10 voltin jännitelähde solmujen 1 ja 0 välille
Res R1 1 2 1k § 1 kilo-ohmin vastus solmujen 1 ja 2 välille
Res R2 2 0 10k § 1 kilo-ohmin vastus solmujen 2 ja 0 välille
```

```
Analyze DC § Suoritetaan DC-analyysi
```

```
Print s "Jännite solmussa 2 on" REAL Vdc(2) s "volttia." LF
```

Tulosteeksi saadaan:

```
Jännite solmussa 2 on 9.091 volttia.
```

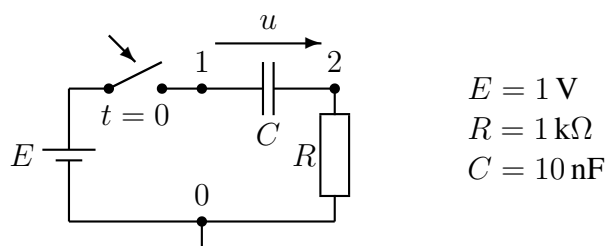
Aluksi kerrotaan komponenttien kytkennät toisiinsa. Yleensä jokaista komponenttia varten tarvitaan oma rivi syötetiedostoon. Rivin aloittaa tunniste, joka kertoo komponentin tyyppin. Ensimmäisellä rivillä sanotaan, että jännitelähde  $E$  kytketään solmun 1 ja maasolmun väliin ja sen tyyppi määrätyään  $10\text{ V}$ :n suuruinen tasajännitelähde. Ohjelma tietää tunnisteesta `Volt`, että on kyse jännitelähteestä. Sen sijaan komponenttien nimen (tässä  $E$ ) voi valita vapaasti. Samoin solmusymbolit saavat olla mielivaltaisia sanoja maasolmua  $0$  eli GND lukuunottamatta; tässä on käytetty numeroita.

Vastukset on kuvattu kahdella seuraavalla rivillä. Ensin kerrotaan komponentin tyyppi `Res`, sitten nimi, solmut, joiden välillä vastus on ja resistanssin arvo. Tässä vaiheessa ohjelma tietää, mitä komponentteja simuloitava piiri sisältää ja miten ne on kytketty toisiinsa. Seuraavaksi ohjelmalle kerrotaan, mikä analyysi tehdään ja mitä tuloksia halutaan nähdä. `Analyze DC` tarkoittaa DC-analyysiä.

Ilman erityistä pyyntöä ohjelma ei tulosta mitään, joten seuraavaksi ohjelmalta kysytään solmun 2 tasajännitettä. `Print`-käskyä seuraa tulostettavan tyyppi ( $S = \text{string}$  eli merkkijono, `REAL` = reaalityyppi) ja tulostettava (merkkijono laitetaan lainausmerkkeihin). Tyyppi, tulostettava -pareja voi kirjoittaa peräkkäin vaikka kuinka monta. Tulostettavan tyyppin tilalla voi olla tunniste (esim. `BL` = *blank* eli välilyönti tai `LF` = *line feed* eli rivinvaihto); tunnisteiden jälkeen ei tule mitään muuttujaa. `APLAC`:in `Print`-rivi on täysiverinen funktiolaskin. Tiedosto voidaan ajaa `APLACilla`, jolloin vastaukseksi saadaan solmun 2 tasajännite (`Vdc(2)`).

Esimerkissä 2 lisätään esimerkin 1 piiriin kondensaattori, muutetaan  $E$  vaihtojännitelähteeksi ja tutkitaan solmun 2 vaihtojännitettä taajuudella  $1\text{ kHz}$ .

## Esimerkki 2. Transienttiansalyysi

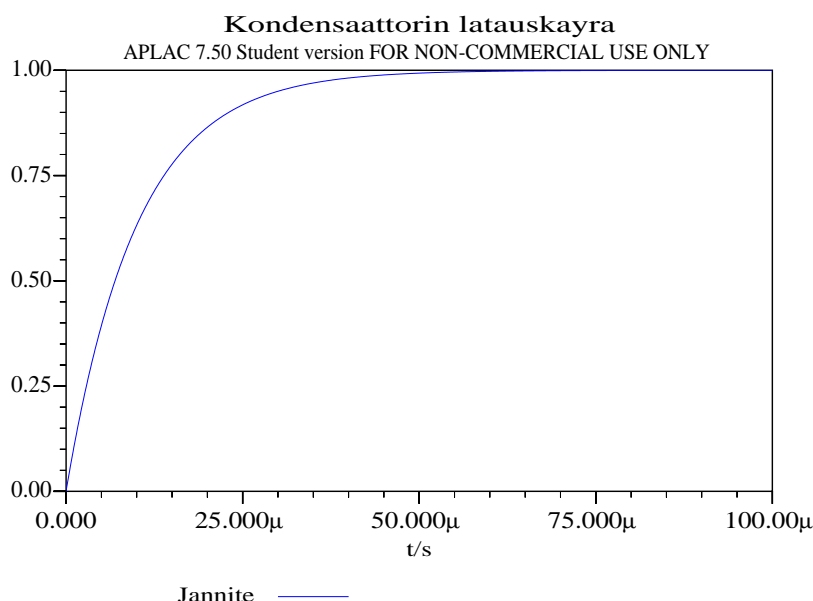


Tarvittava syötetiedosto:

```
Volt E 1 0 TRAN=1*(t>0) $ 1 V lähde päälle hetkellä t=0
Cap C 1 2 10n $ 10 nF konkka
Res R 2 0 1k $ 1 kilo-ohmin vastus
```

```
Sweep "Kondensaattorin latauskayra"
+ LOOP 1001 TIME LIN 0 0.1m
$ 1001 aika-analyysipistettä välillä 0 - 0,1 millisek.
Display Y "Jännite" Vtran(1)-Vtran(2)
$ Y-akselille solmujen 1 ja 2 välinen jännite
EndSweep
```

Tulosteeksi saadaan:



Ajasta riippuva lähde määritellään TRAN-tunnisteella. Muuttuja  $t$  viittaa APLACin sisäiseen simulointiaikaan: lauseke  $t > 0$  saa arvon 1 hetkellä  $t = 0$  s. Kytkimen vaikutus otetaan siis huomioon jännitteen lausekkeessa.

Esimerkkien 1 ja 2 DC- ja AC-analyysissä kaikki suureet olivat vakioita analyysin aikana. Transienttiansalyysi tarkoittaa piirin suureiden laskemista ajan suhteen, joten on oletettavissa, että piirin suureet eivät ole vakioita ainakaan koko analyysin ajan. Komennolla Sweep voidaan pyyhkäistä jotain piirin suuretta arvosta toiseen; transienttiansalyysissä pyyhkäistävä suure on simulointiaika.

Sweep-komennolla aloitettavan ohjelmalohkon alussa kerrotaan nimi tulostettavalle kuvalle. LOOP-tunnisteen jälkeen kerrotaan, kuinka monessa aikapisteessä transienttiansalyysi tehdään. Usein käytetään jotain tasalukua plus yhtä (näin otetaan huomioon, että jos jokin väli jaetaan esimerkiksi kymmeneen osaan, pääte- ja rajapisteitä on yhteensä yksitoista). Sitten kerrotaan pyyhkäistävä muuttuja, simulointiaika TIME. Tunnisteella LIN ilmaistaan, että simulointiaikaväli jaetaan tuhanteen osaan lineaarisesti (eikä esim. 10-kantalogaritmisesti, tunniste LOG). Tunnisteen jälkeen kerrotaan simulointiajan alku- ja loppuarvo.

Rivin alussa olevan +-merkin avulla pitkiä rivejä voidaan jakaa useaan osaan. Toisin sanoen esim. tunniste LOOP liittyy Sweep-käskyyn. Komento Display avaa ikkunan piirrettävää käyrää varten. Tunnisteen Y jälkeen kerrotaan  $y$ -akselin nimi ja suure, joka kuvaan halutaan piirtää.  $X$ -akseliksi tulee oletusarvoisesti pyyhkäistävä muuttuja, ellei akselia määritellä erikseen. Sweep-lohko päätetään komentoon EndSweep.

Muuttujan TIME pyyhkäisy tarkoittaa automaattisesti transienttiansalyysiä, joten tunnistetta TRAN ei tarvitse erikseen ilmoittaa Sweep-komennolle. Samoin muuttujan FREQ pyyhkäisy tarkoittaa AC-analyysiä. Jos sen sijaan haluttaisiin pyyhkäistä jotain muuttujaa, esimerkiksi vastuksen  $R_1$  arvoa esimerkissä 1  $1\text{ k}\Omega$ :sta  $10\text{ k}\Omega$ :iin, ja tehdä DC-analyysia sen eri arvoilla, Sweep-komento vaatisi tunnisteen DC. Vastuksen arvo pitäisi lisäksi määritellä muuttujaksi. Esimerkin 1 syötetiedostosta tulisi seuraavan näköinen:

```
APLACVAR res $ Määritellään muuttuja "res"
```

```
Volt E 1 0 DC=10
```

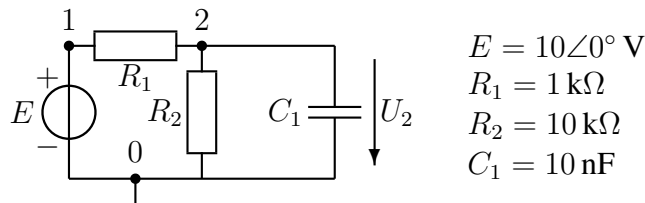
```
Res R1 1 2 res
```



```
Res R2 2 0 10k
```

```
Sweep "Jannite U2 vastusarvon funktiona." DC
+ LOOP 1001 APLACVAR res LIN 1k 10k $ Pyyhkäistään muuttujaa res 1k -> 10k
Display Y "Jannite" Vdc(2) $ Tulostetaan jännitekäyrä
EndSweep
```

### Esimerkki 3. AC-analyysi



Tarvittava syötetiedosto:

```
Volt E 1 0 AC=(10'0) $ 10 V AC-jännitelähde solmujen 1 ja 0 välille
Res R1 1 2 1k $ 1 kilo-ohmin vastus solmujen 1 ja 2 välille
Res R2 2 0 10k $ 10 kilo-ohmin vastus solmujen 2 ja 0 välille
Cap C1 2 0 10n $ 10 nF kondensaattori solmujen 2 ja 0 välille
```

```
Analyze AC FREQ=1k $ AC-analyysi taajuudella 1 kilohertsi
```

```
Print s "Jannite solmussa 2 on " MA Vac(2) s " voltia." LF
```

Tulosteeksi saadaan:

```
Jannite solmussa 2 on ( 9.076 '-3.3 ) voltia.
```

Syötetiedosto muuttui muutamilta osin esimerkistä 1. Lähde muuttui vaihtojännitelähteeksi; APLACissa kompleksiluku  $10\angle 0^\circ$  ilmoitetaan (10'0). Piiriin lisättiin kondensaattori  $C_1$ . Analyysiksi vaihdettiin AC-analyysi, jolle täytyy ilmoittaa analysointitaajuus. Tulostusrivi on sama paitsi, että nyt kysytään piensignaali-jännitettä (muuttuja  $V_{ac}(2)$ ). Koska tämä on kompleksiluku, tyypiksi on vaihdettu MA (*magnitude-argument-* eli kulmamuoto).

## 1.6 Vinkkejä APLACin käyttöön

### Laskutoimituksia, vertailua ym.:

\*, /, +, -, ^, =, <, <=, >, >=, ==, !=, and, or, ;

### Suureiden etuliitteitä:

PET, T, G, MEG, k, %, m, mil, u, n, p, f

### Esimerkkirivejä komponenttien määrittelyistä:

Bipolaaritransistori, kela (ja sen sarjavastus), oikosulku (esim. virran  $I_{dc}(I2)$  laskemista varten), jänniteohjattu virtalähde, jossa on kaksi ohjausjännitettä

```
Trans T1 c b e NPN
IND L1 n1 n2 4.7m R 10k
SHORT S n4 n5 I=I2
VCCS Nimi n1 n2 2 n3 0 n4 0
```

**Muita syntaksiin liittyviä vinkkejä:**

- § erottaa loppurivin syötetiedostosta kommentiksi,
- \* rivin alussa erottaa koko syötetiedoston rivin kommentiksi,
- tunnisteen ja arvon välissä voi olla välilyönti tai ==-merkki,
- + -merkillä jälkimmäisen rivin alussa voi pitkän rivin jakaa kahteen osaan,
- isot ja pienet kirjaimet ovat samanarvoisia

**Pikakomentoja APLACin Windows-versioon**

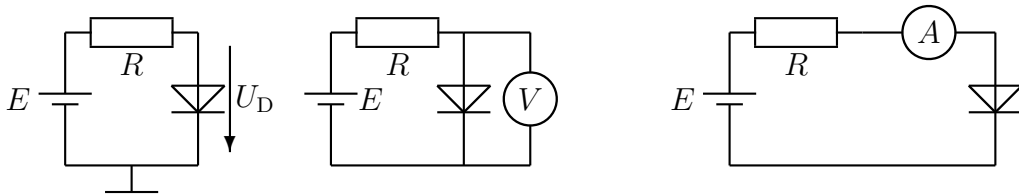
(nämä eivät toimi uusimmissa APLAC-versioissa, mutta toimivat labrassa):

$e=edit$ ,  $f=select\ file$ ,  $r=run$

Lisää simulointiesimerkkejä ja käyttöohjeita on mm. oppikirjassa (*Sähkötekniikka ja elektronikka*).

**1.7 TEHTÄVÄT****Tehtävä 1. Yksinkertainen diodipiiri**

$$E = 8,3\text{ V} \quad I_S = 1\text{ nA} \quad n = 2 \quad R = 10\text{ k}\Omega$$



- a) Käynnistä APLAC ja kirjoita vasemmanpuoleisesta piiristä syötetiedosto. Voit käyttää tiedostoa "esim1.i" mallina tai pohjana. Talleta tiedostosi mielellään samaan hakemistoon samalla nimellä mallitiedoston päälle (*select file, edit*). Diodi on APLACissa Diode — tarvitset sen kanssa tunnuksia  $I_S$  ja  $N$  (katso tarvittaessa muovitaskussa olevaa käyttöohjetta). Ota tulostettavaksi diodin jännite ja virta. Virran saa helpoiten, kun kirjoittaa sen lausekkeena vastuksen  $R$  resistanssista ( $10k$ ) ja jännitteestä ( $V_{dc}(1)-V_{dc}(2)$ ). Aja tiedoston APLAC-simulointiohjelmalla (*run*). Mitä APLAC antoi jännitteeksi ja virraksi?
- b) Mitataan todellinen virta ja jännite kytkennässä (kuva oikealla). Kytke komponentit toisiinsa banaani johdoilla ja säädä pöydällä olevan jännitelähteen jännite  $8,3$  volttiin. Mittaa diodin päiden välinen jännite digitaalisella yleismittarilla (mittarin V- ja COM-liittimet). Kytke sitten yleismittari sarjaan diodin kanssa ja mittaa diodin virta (A- ja COM-liittimet). Mitä ovat diodin jännite ja virta, kun jännitelähteen jännite on  $8,3\text{ V}$ ? Tuntuvatko APLACin antamat tulokset järkeviltä?
- c) Tutkitaan diodin ominaiskäyrää APLACin avulla. Tämä tehdään siten, että pyyhkäistään jännitelähteen  $E$  jännitettä välillä  $0 - 15\text{ V}$  Sweep-komennon avulla. Lisää syötetiedoston alkuun pyyhkäistävän muuttujan  $U$  määrittely:

AplacVar U

Muuta lähdejännitteen arvoksi muuttuja  $U$ . Kirjoita `Analyze DC` -käselyn tilalle alla oleva Sweep-lohko. Jaetaan väli tuhanteen osaväliin, ja analysoidaan piiri osavälien päätepisteissä. `Display XY` -komennolla piirretään käyrä  $xy$ -muodossa. Kommentoita seuraa vapaavalintainen nimi ja käyrän  $x$ - ja  $y$ -lausekkeet. Huomaa kohdat `jannite` ja `virta`. Kirjoita näiden paikalle oikeat jännite- ja virtalausekkeet ilman REAL-tunnisteita solmujännitteiden ja vastusarvon avulla.

```

Sweep "Diodi" DC
$ Pyyhkäistään jännite U lineaarisesti 0 -> 15 V
+ LOOP 1001 APLACVAR U LIN 0 15
$ Tulostetaan jännite x-akselille, virta y-akselille
Display XY "Ominaiskäyry" jännite virta
EndSweep

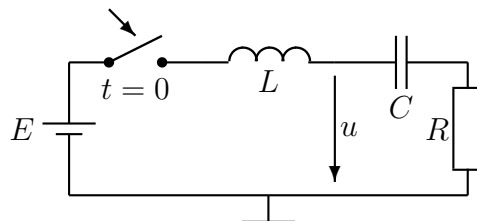
```

Aja tiedosto APLACilla ja esittele ominaiskäyry assistentille. Voit muuttaa  $x$ - ja  $y$ -akselin skaalausta (0 ... 0,8, -50u ... 1,4m)

- d) Tiedetään, että diodin virta riippuu eksponentiaalisesti sen jännitteestä. Usein sanotaan yksinkertaistaen, että virran kulkiessa jännite on noin 0,7 V. Kuinka hyvin yksinkertaistus pitää mielestäsi paikkansa?

### Tehtävä 2. RLC-piirin latauskäyry

- a) Simuloidaan kuvan mukaista piiriä. Analysoi jännite  $u$  ajan funktiona, kun kytkin suljetaan hetkellä  $t = 0$ . Esimerkkiä 2 kannattaa käyttää apuna. Kela on APLACissa IND. Huom! Jos käytät esimerkin 2 sweeppiä pohjana, muuta sweepin loppuhetki 0.1m  $\rightarrow$  1m eli 100 mikrosekunnista yhteen millisekuntiin. Muuten ilmiö ei näy kokonaan.

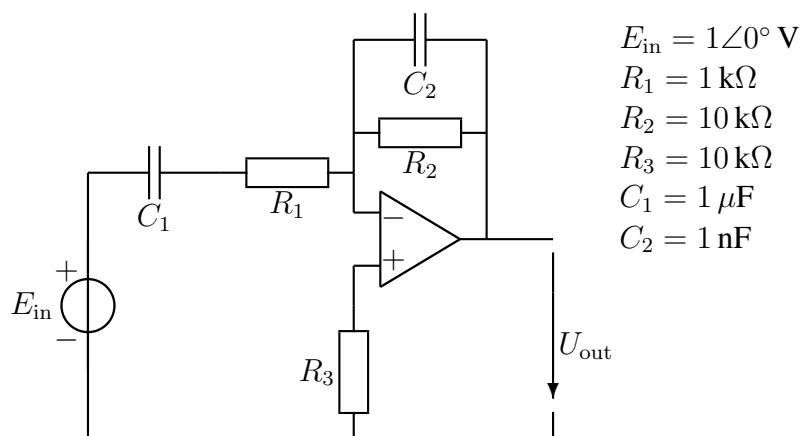


$$\begin{aligned}
 E &= 2 \text{ V} \\
 R &= 10 \Omega \\
 C &= 1 \mu\text{F} \\
 L &= 1 \text{ mH}
 \end{aligned}$$

- b) Eroako jännite esimerkin 2 jännitteestä? Jos eroaa, miten? Miksi (kysy assarilta)?
- c) (Vapaaehtoinen) Kokeile piiriin seuraavia vastuksen arvoja: 100  $\Omega$ , 0,1  $\Omega$  ja lopuksi  $-10 \Omega$ . Yritä arvata ennen simulaatiota, millainen käyrästä tulee!

### Tehtävä 3. Suodattimen taajuusvaste

- a) Tutkitaan kuvan mukaisen operaatiovahvistimen sisältävän kytkennän taajuusvastetta välillä 63 Hz – 32 kHz. Kirjoita piiriin syötetiedosto. Oikea määrä solmuja on viisi + maa.



$$\begin{aligned}
 E_{in} &= 1 \angle 0^\circ \text{ V} \\
 R_1 &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 10 \text{ k}\Omega \\
 R_3 &= 10 \text{ k}\Omega \\
 C_1 &= 1 \mu\text{F} \\
 C_2 &= 1 \text{ nF}
 \end{aligned}$$

Ideaalinen operaatiovahvistin kirjoitetaan syötetiedostoon seuraavasti neljän solmun avulla (neljäs solmu on aina maa 0 tai GND):

```
Opamp Nimi + - output 0 IDEAL
```

Annetaan jännitelähteen  $E_{in}$  arvoksi  $1\angle 0^\circ$  V, jotta jännite  $U_{out}$  olisi suoraan suodattimen vahvistus. Tulosta tämä taajuuden funktiona DISPLAYn avulla. Huomaa, että  $V_{ac}$  on kompleksiluku – vahvistuskäyrän piirtämistä varten sinun pitää laskea sen itseisarvo (joka siis on piirin vahvistus)  $MAG()$  -funktion avulla. Käytä Sweep-lohkoa ja logaritmisena pyyhkäisymuuttujana taajuutta FREQ. Voit matkia Sweep-osion suoraan edellisestä tehtävästä (kunhan laitat TIME:n tilalle FREQ ja LIN:n tilalle LOG, koska nyt pyyhkäistään taajuutta logaritmisesti, eikä aikaa lineaarisesti!).

- b) Jos olet tehnyt työn 2, olet varmaan jo unohtanut, että simuloitu piiri on sama kuin työssä 2 mitattu. Miten hyvin simuloitu ja mitattu taajuusvaste vastaavat toisiaan? No, hyvin tietysti!

### Kysymys

Mitä hyötyä uskot piirisimulaattorista olevan suunniteltaessa elektroniikkapiirejä?

## 2 OPERAATIOVAHVISTIN

Operaatiovahvistin on analogiatekniikan peruskomponentti. Sillä voidaan toteuttaa esimerkiksi summaimia, derivaattoreita, integraattoreita, erilaisia vahvistimia, signaaligeneraattoreita ja virta-jännitemuuntimia.

### 2.1 Ideaalinen operaatiovahvistin

Analysoitaessa operaatiovahvistinkytkentöjä voidaan olettaa operaatiovahvistimet ideaalisiksi, tuloapojen virrat nolliksi ja vahvistus äärettömäksi. Äärettömän vahvistuksen oletus voidaan sanoa toisinkin, käytännön laskuissa hyödyllisemmällä tavalla: tuloapojen välinen jännite on nolla. Siis kiteytettynä: tuloavat ovat samassa potentiaalissa ja niiden virrat ovat nolliä.

$$I_- = 0 \ \& \ I_+ = 0 \tag{1}$$

$$U_+ - U_- = 0 \tag{2}$$

Nämä yhtälöt ovat operaatiovahvistimen toiminnan perusta. Vaikka toiminnasta ei ymmärtäisi-kään mitään muuta, näiden tietojen avulla voi analysoida hyvinkin monimutkaisia kytkentöjä.

### 2.2 Käyttöjännitteet

Vaikka operaatiovahvistimen piirrosmerkissä ei näy lainkaan käyttöjännitteitä, ei todellinen vahvistin voi toimia ilman niitä. Tämä on syytä muistaa käytännön kytkentöjä tehtäessä. Käyttöjännitteet vaikuttavat operaatiovahvistimen toimintaan muutenkin; lähtöjännite ei voi mennä käyttöjännitealueen ulkopuolelle. Jos käyttöjännite rajoittaa lähtöjännitettä, operaatiovahvistimen sanotaan olevan epälineaarilla toiminta-alueella. Tällöin piiri ei enää toimi ideaalisen operaatiovahvistimen tavoin.

### 2.3 Käytännön operaatiovahvistimet

Todellinen operaatiovahvistin on pakattu mikropiiriin, joten käytännössä operaatiovahvistin ei muistuta lainkaan piirrosmerkkiään. Todellisen operaatiovahvistimen vahvistus ei myöskään ole ääretön, vaan se on suuruusluokkaa  $10^5$ . Vahvistus ei pysy vakiona taajuuden muuttuessa, vaan pienenee taajuuden kasvaessa.

Tuloapojen virta ei ole todellisessa operaatiovahvistimessa nolla, mutta se on niin pieni, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon. Tuloapojen jännitteet eivät saa olla mitä tahansa, vaan niiden täytyy pysyä tiettyjen rajojen sisällä. Tyypillisesti jännitteet eivät saa mennä kahta voltia lähemmäksi käyttöjännitteitä. Operaatiovahvistimen lähtöjännite ei voi saavuttaa edes käyttöjännitteitä. Normaalisti lähtöjännite ei pääse 1–2 voltia lähemmäksi niitä.

Seuraavissa tehtävissä tulee selvästi näkyviin siirros- eli *offset*-jännite: käytännössä operaatiovahvistimen lähtöjännite ei ole nolla, silloin kun tulojännite on nolla.

## 2.4 MITTAUKSET

### Välineet:

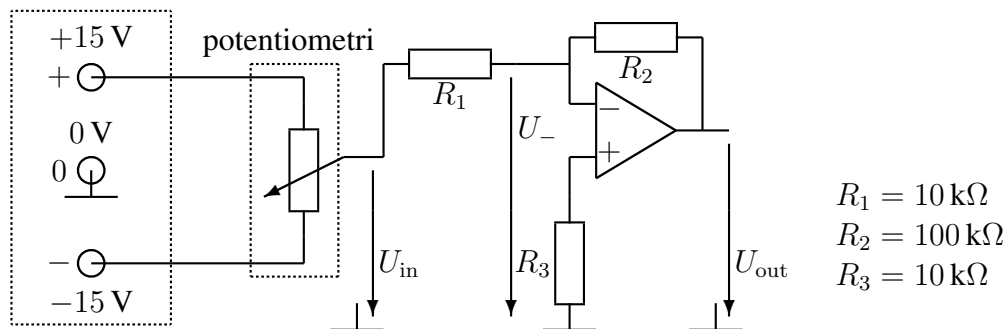
kytkentälevy komponentteineen, banaanijohtoja  
tasajännitelähde  
digitaalioskilloskooppi, 3 mittajohtoa  
signaaligeneraattori

### Tehtävä 1. Invertoivan vahvistimen vahvistus

Tee oheinen kytkentä mittausalustalle. Kytke alustan reunassa olevat käyttöjännitteen liitäntäpisteet (+,0,-) jännitelähteeseen ja edelleen potentiometriin. Liitäntäpisteet on sisäisesti johdettu operaatiovahvistimille. Katso, että operaatiovahvistin on kiinni mikropiirikannassaan. Jännitteet  $U_{in}$ ,  $U_-$  ja  $U_{out}$  mitataan oskilloskoopilla. Kytke ne kanaviin 1, 2 ja 3. Pyydä assistenttia neuvomaan oskilloskoopin käytössä; oikeat asetukset nopeuttavat mittauksia ja ovat muutenkin työn kannalta välttämättömät. Oskilloskooppia käytetään tässä digitaalivolttimittarina.

**Ennen kuin kytket piiriin jännitteet, tarkista että olet kytkenyt oskilloskoopin mittajohdojen maajohdot (ne mustat piuhat) vain ja ainoastaan maahan, ei mihinkään muualle. Miksikö? Katso turvallisuusohjeen viimeistä sivua.**

alustan liitäntäpisteet

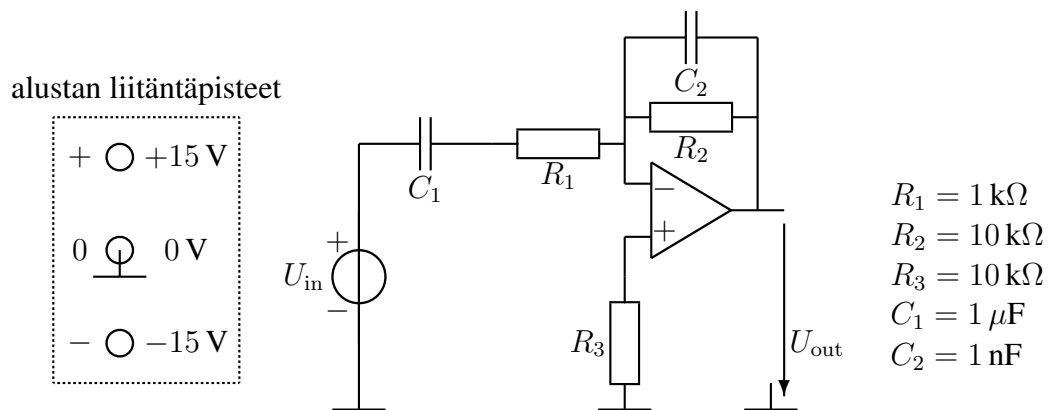


- Kuinka suuri on vahvistus teoreettisesti  $A = \frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$ ?
- Säädä tulojännitteeksi NOIN  $U_{in} = 0,5$  V. Mittaa vahvistus käytännössä?  
Älä pyri turhan suureen tarkkuuteen jännitteen säätämisessä. *Offset*-jännite saattaa aiheuttaa yllättävän suuren virheen tulokseen.
- Säädä potentiometristä tulojännitteeksi  $U_{in}$  arvot  $-1$ ;  $-0,5$ ;  $1$ ;  $2$ ;  $3$ ;  $5$ ;  $7$  ja  $9$  voltia. Mittaa oskilloskoopilla invertoivan navan jännite  $U_-$  ja lähtöjännite  $U_{out}$ . Tee jännitteistä taulukko. Tässä mittauksessa tulokset ovat erittäin havainnolliset, vaikka säätäisit jännitteen vain suurin piirtein kohdalleen.
- Millä tulojännitteellä vahvistin menee epälineaarisele alueelle (lähtöjännite kyllästyy, koska käyttöjännitteet rajoittavat sen kasvua)
- Pysyykö operaatiovahvistimen miinustulonavan potentiaali nollassa? Invertoivassa kytkennässä sen pitäisi pysyä nollassa.
- Irrota jännitteen  $U_-$  mittausjohto piiristä. Kytke potentiometri irti ja funktiogeneraattori sen tilalle vahvistimen tuloon. Huom! Sinun ei käsketty kytkeä tasajännitelähdettä funktiogeneraattoriin. Tasajännitelähde jää edelleen kiinni kytkentälevyn reunan liittimiin (käyttöjännite operaatiovahvistimelle). Määritä kytkennän vahvistus  $1$  kHz:n sinisignaaliilla  $U_{inpp} = 0,5$  V (huipusta huippuun -arvo).

- g) Muuta signaalin taajuudeksi 500 kHz. Jos muutit vahingossa taajuudeksi 500 Hz, muuta se nyt vihdoin arvoon 500 kHz. Mikä vahvistus on tällä taajuudella?
- h) Muuta tulosignaali  $U_{\text{inpp}} = 1 \text{ V}$  (huipusta huippuun). Taajuus pidetään 500 kHz:nä. Pysykö lähtösignaali sinimuotoisena? Miksi ei (kysy assarilta)? Selkeimmin ilmiö näkyy lisäämällä amplitudia hitaasti puolesta voltista yhteen volttiin ja ylikin.

## 2. Taajuusvasteen mittaus

Tee kuvan mukainen kytkentä; älä turhaan irrota edellisen tehtävän johtoja, mutta huomaa, että **komponenttiarvot ovat erilaiset kuin edellisessä mittauksessa!** Kuvassa vasemmalla olevat käyttöjännitteen liitännätpisteet kytketään tasajännitelähteeseen kuten edellä.



Tulosignaali saadaan funktiogeneraattorista. Kytetään funktiogeneraattori antamaan siniaaltoa ( $U_{\text{in}} = 1 \text{ V}$  huipusta huippuun). Kytke oskilloskoopin toinen kanava mittaamaan tulosignaalia ja toinen lähtösignaalia.

- a) Mittaa vahvistuskäyrä desibeleissä  $A = 20 \lg \left| \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \right|$ . Kirjoita taulukkoon vahvistus taajuuksilla (yksikkö Hz) 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k, 16k, ja 32k.
- b) Jos olet tehnyt työn 1, huomasit varmaan, että mitattu piiri on sama kuin työssä 1 simuloitu. Miten hyvin mitattu ja simuloitu taajuusvaste vastaavat toisiaan?

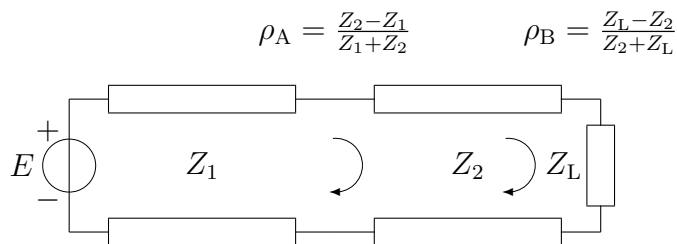
### 3 SIIRTOJOHDOT

Tästä työstä saa eniten irti lukemalla ensin oppikirjasta siirtojohtoja käsittelevän osuuden.

Siirtojohtoteoria nousee merkittäväksi käsitteeksi sähkötekniikassa, kun piirissä kulkevan signaalin aallonpituus lähestyy samaa suuruusluokkaa piirissä olevien komponenttien fyysisen koon kanssa. Audiovahvistinpiirissä, jossa suurimmat signaalin taajuudet ovat luokkaa 20 kHz, on signaalin aallonpituus useita kilometrejä, eikä siirtojohtoteoriaa tarvitse ottaa huomioon laitetta suunniteltaessa.

Esimerkiksi kaiuttimen voi liittää vahvistimeen kahta erilaista peräkkäin kytkettyä kaapelia käyttäen, ilman että äänen laatu kärsii. Sen sijaan televisiota ei saisi liittää antenniin yhdistelmällä erilaisia johtoja - antennijohtoa pitkin kulkevan signaalin taajuus on satoja megahertsejä, ja aallonpituus metrin suuruusluokkaa. Jokainen muutoskohta kaapelissa aikaansaa heijastuksen, joka huonontaa digitaalisen signaalin laatua.

Siirtojohdon epäjatkuvuuskohdalle voidaan laskea heijastuskerroin, joka kertoo, miten suuri osa epäjatkuvuuskohtaan saapuvasta jännitepulsista heijastuu takaisin. Esimerkiksi, jos heijastuskerroin on  $\rho = \frac{1}{4}$ , heijastuu 10 V pulssista takaisin 2,5 V korkuinen pulssi. Jos heijastuskerroin on negatiivinen, on heijastunut pulssi "väärin päin", ts. sen jännitteen etumerkki vaihtuu.



Kuvan siirtojohtopiirissä voi heijastus tapahtua sekä siirtojohtojen (ominaisimpedanssit  $Z_1$  ja  $Z_2$ ) välissä että kuormaimpedanssin  $Z_L$  ja siirtojohdon  $Z_2$  rajapinnasta.

#### 3.1 Mittaukset

Työssä tutkitaan jännitepulslien käyttäytymistä siirtojohdoilla.

##### Välineet:

- oskilloskooppi
- pulssigeneraattori
- pitkä musta kaapeli RG58
- pitkä valkoinen kaapeli RG59
- T-liitin ja lyhyt musta kaapeli
- yleismittari

Kytke T-liitin oskilloskoopin kanavaan 1. Kytke pulssigeneraattori lyhyellä mustalla johdolla T-liittimeen, ja kytke pitkä musta kaapeli T-liittimen toisen haaran ja oskilloskoopin kakkoskanavan väliin. Säädä pulssigeneraattori lähettämään 50 ns pulsseja 10 kHz taajuudella ja säädä oskilloskoopista molempien kanavien kuva näkyviin – **jos oskilloskooppi ei ole ennestään tuttu laite, pyydä rohkeasti apua assistentilta.**



- a) Laske pulssin etenemisnopeus mustassa kaapelissa oskilloskooppikuvan perusteella, kun tiedetään, että kaapelin pituus on 38 metriä. Mieti myös, miksi kakkoskanavan pulssi on kaksi kertaa korkeampi kuin ykköskanavassa näkyvä pulssi (edellyttäen, että pystyakselien skaalaukset ovat samat).
- b) Irrota musta kaapeli kakkoskanavasta ja jätä se ilmaan roikkumaan. Säädä pulssin pituudeksi 50 ns. Säädä oskilloskoopin kuvaa niin, että ruudulla näkyvät lähtevän pulssin jälkeiset tapahtumat muutaman sadan nanosekunnin ajalta. Miksi ruudulla näkyy kaksi pulssia? Miten kuvasta näkyy, että siirtojohdolla tapahtuu häviöitä?
- c) Kytke mustan johdon päähän oikosulkupäätte. Mitä pulssille tapahtui, ja miksi?
- d) Irrota oikosulkupäätte, ja kiinnitä tilalle säätövastus. Säädä vastusta niin, että heijastunut pulssi häviää ruudulta. Irrota säätövastus piiristä ja mittaa sen resistanssi. Miksi heijastunut pulssi häviää juuri tällä vastusarvolla?
- e) Kytke valkoinen kaapeli mustan kaapelin jatkeeksi. Liitä potentiometri valkoisen johdon vapaaseen päähän ja kokeile säätöä! Mikä valkoisen kaapelin ominaisimpedanssi mahtaa olla oskilloskooppikuvan perusteella? Miksi ruudulla näkyy useita heijastuneita pulssia? Pyydä tässä vaiheessa assistentti paikalle ja esittele kuva hänelle. Voit lopuksi tarkistaa valkoisen kaapelin ominaisimpedanssin mittaamalla potentiometrin vastuksen tietyllä säädöllä.

## 4 VAIHTOSÄHKÖTEHON MITTAAMINEN

### 4.1 Sähköteho

Sähköisen piirin teho tietyllä hetkellä on virran ja jännitteen senhetkisten arvojen tulo:

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (3)$$

Jos jännite ja virta ovat sinimuotoisia, tehoksi saadaan

$$p(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \phi_u) \cdot \hat{i} \sin(\omega t + \phi_i) = \hat{u}\hat{i} \sin(\omega t + \phi_u) \sin(\omega t + \phi_i) \quad (4)$$

missä  $\hat{u}$  ja  $\hat{i}$  ovat jännitteen ja virran huippuarvot ja  $\phi_u$  ja  $\phi_i$  jännitteen ja virran vaihekulmat nolлахetkellä. Sinimuotoisella virralla huippukerroin on  $\sqrt{2}$ :

$$\hat{u} = \sqrt{2}U \quad \text{ja} \quad \hat{i} = \sqrt{2}I \quad (5)$$

missä  $U = |\underline{U}|$  ja  $I = |\underline{I}|$  ovat jännitteen ja virran *tehollisarvot*.

$$p(t) = UI \cos(\phi_u - \phi_i) - UI \cos(2\omega t + \phi_u + \phi_i) \quad (6)$$

Tässä ensimmäinen termi on vakiotermi, joka riippuu jännitteen ja virran vaihe-erosta  $\phi_u - \phi_i$ . Toinen termi vaihtelee sinimuotoisesti alkuperäiseen taajuuteen nähden kaksinkertaisella taajuudella. Yleensä tehosta puhuttaessa tarkoitetaan pätötehoa, tehon aikakeskiarvoa. Sinimuotoisen signaalin aikakeskiarvo on nolla, joten pätöteho on yleisesti

$$P = UI \cos \phi \quad (7)$$

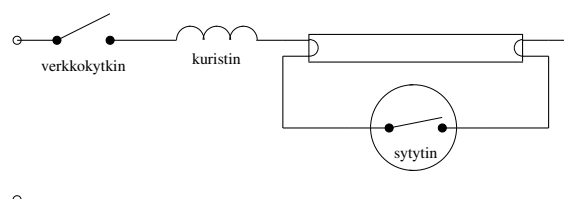
missä  $\phi$  on jännitteen ja virran välinen vaihe-ero  $\phi_u - \phi_i$  ja termi  $\cos \phi$  tehokerroin.

Näennäistehon itseisarvo  $S = |\underline{S}|$  on jännitteen ja virran tulo ilman kosinitermiä.  $S$  saadaan laskettua suoraan jännite- ja virtamittarin lukemista. Loisteho  $Q$  taas on  $Q = UI \sin \phi$ . Näin pätöteho ja loisteho voidaan kuvata kateetteina suorakulmaisessa kolmiossa, jonka hypotenuusa on näennäistehon itseisarvo.

### 4.2 Loisteputkivalaisin

Tässä työssä tutustutaan vaihtosähkötehon mittaamiseen käyttämällä kuormana niinkin arkipäiväistä vempeltä kuin loisteputkivalaisinta. Sähkötehon mittaamisen lisäksi opit jotain loisteputkivalaisimen sielunelämästä sytyttimiseen ja kuristamiseen.

Toisin kuin hehkulamppu, loisteputkea ei voi kytkeä suoraan sähköverkkoon, vaan on käytettävä kuvan mukaista piiriä:



Sytyttimen napoihin on lisäksi voitu kytkeä kondensaattori vaimentamaan sytytyksessä syntyviä häiriöitä.

Loistevalaisin toimii seuraavasti:

- Kun verkkokytkin suljetaan, loisteputki ei johda virtaa, koska kaasupurkauksen syttyminen vaatii satojen volttien jännitteen. Tällöin sytyttimen yli on 230 voltin verkkojännite, ja sytyttimessä syttyy kaasupurkaus.
- Kaasupurkaus lämmittää sytyttimessä olevaa kahta metalliliuskaa, jotka lämmön vaikutuksesta lähtevät taipumaan toisiaan kohti.
- Liuskat koskettavat toisiaan, jolloin sytyttimen läpi kulkee äskeistä suurempi virta, joka lämmittää loisteputken päiden hehkulankoja. Liuskojen koskettaessa toisiaan sytyttimen sisällä ei ole enää lämmittävää kaasupurkausta, ja liuskat jäähtyvät. Jäähtyessään liuskat lähtevät taipumaan toisistaan pois päin — ne irtoavat toisistaan, jolloin virta katkeaa. Koska piirissä olevan kuristimen (= iso kela) virta ei voi muuttua yhtäkkiä, kela jatkaa virran työntämistä väkisin loisteputken (ja sytyttimen) läpi. Tämä loisteputken läpi kulkeva virtasysäys sytyttää putken.
- Kun loisteputkessa on kaasupurkaus, sen jännite on vain noin sata volttia. Tämä ei riitä aikaansaamaan kaasupurkausta sytyttimessä, jolloin sytytin lakkaa toimimasta.
- Kelan tarkoitus on paitsi sytyttää loisteputki jännitepulssilla, myös rajoittaa loisteputken läpi kulkevaa virtaa sen syttyessä.

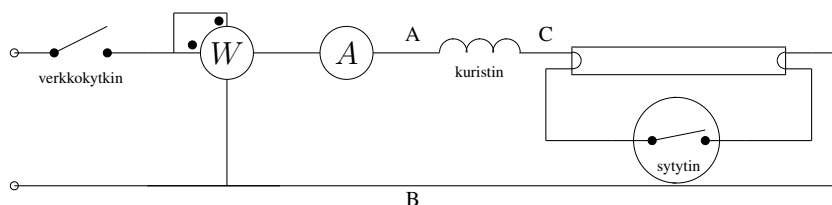
### 4.3 Mittaukset

**Tässä laboriotyössä on noudatettava erityistä varovaisuutta. ÄLÄ LAITA SÄHKÖJÄ PÄÄLLE ennen kuin assistentti on tarkastanut kytkennän.**

Valaisin kytketään sähköverkkoon, jonka jännite on hengenvaarallinen (230 V). Vaarallisimpia ovat mittareiden välillä olevat banaanijohdot, koska niiden kummassakin päässä sähköä johtava metalliosa on kosketettavissa. Opettele varmuuden vuoksi kytkemään banaanijohdot niin, että kosket ainoastaan sähköä eristävään liittimen suojakuoreen.

**ÄLÄ MISSÄÄN TAPAUKSESSA TEE TAI MUUTA KYTKENTÄÄ, JOS PISTOTULPPA ON KYTKETTYNÄ PISTORASIAAN.** Irrota pistotulppa lopuksi pistorasiasta ja pura vasta sen jälkeen kytkentä.

Rakenna kuvan mukainen kytkentä, mutta **älä laita töpseliä seinään, ennen kuin assistentti on tarkastanut kytkennän.** Kuristin on se painava valkoinen mökkula, sytytin on pieni musta mökkula.



Kytke **lopuksi** volttimittari solmujen A ja B väliin (siltoin sitä on **helppo siirrellä** kohta). Kun assistentti on tarkastanut kytkennän, voit laittaa töpselin seinään. Seuraa tarkkaan, mitä kytkennässä tapahtuu, kun kytket töpselin. Lue mittareista ja kirjoita ylös seuraavat asiat:

- a) Kelan ja lampun sarjaankytkennän yli oleva jännite (volttimittari solmujen A ja B välissä).
- b) Lampun ja kelan virta.
- c) Kytkennän verkosta ottama pätöteho.

Irrota töpseli, ja siirrä jännitemittari mittaamaan lampun yli olevaa jännitettä (eli kytke se solmujen B ja C väliin). Kirjaa lukema ylös. Irrota töpseli, ja siirrä jännitemittari mittaamaan kelan yli olevaa jännitettä (solmujen A ja C väliin). Kirjaa lukema ylös!

Irrota töpseli, ja siirry seuraavaan kappaleeseen käsittelemään tuloksia. Pura kytkentä vasta, kun assari on hyväksynyt mittaustuloksesi ja laskutoimitukset!

#### 4.4 Mittaustulosten käsittely

- a) Kuinka suuren lois-, näennäis- ja pätötehon kytkentä ottaa sähköverkosta?
- b) Miten hyvin kelan, lampun ja kelan+lampun yli mittaamasi jännitteet sopivat yhteen Kirchhoffin jännitelain kanssa (pelkkä "hyvin" tai "huonosti" ei käy vastaukseksi :-)?
- c) Kuinka suuri on jännitteen ja virran välinen vaihe-ero kelan ja loisteputken muodostamassa piirissä?

**Tämä on labraohjeiden viimeinen sivu. Nelostyön jälkeen teet ykköstyön, ellet ole sitä jo tehnyt.**