

# ELEC-C4210 SÄHKÖTEKNIikka JA ELEKTRONIikka Kimmo Silvonen

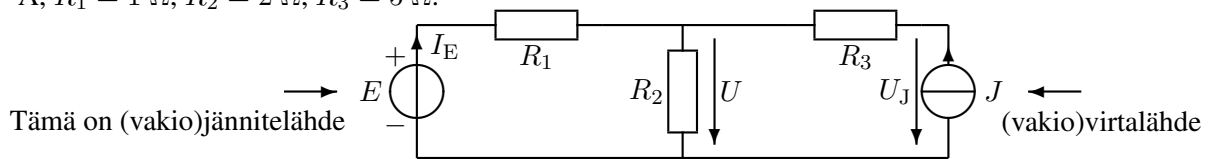
Laskuharjoitukset, versio 24.10.2022. Päivämääriä korjattu.

Tänä syksynä on laskuharjoitusten lisäksi palautettavia kotitehtäviä, ks. MyCo (MyCourses). Laskuharjoitukset määrittelevät parhaiten koalueen. Ratkaisut tulevat PDF-muodossa kohtaan *Materiaalit*. Suositus, joka pätee myös kokeissa: kirjoita yhtälöt ensin kirjainlausekkeina, sijoita sitten vasta lukuarvot; SI-järjestelmän yksiköt voit halutessasi jättää tällä kurssilla pois. Anna vastaus mielellään desimaalilukuna kolmen numeron tarkkuudella; tehtävien lukuarvot voit olettaa tarkoiksi. Välituloksissa on hyvä käyttää vähintään neljän numeron tarkkuutta. Sivunumerot viittaavat kirjaan *Elektroniikka ja sähkötekniikka* (Gaudeamus, 2018, 504 s.).

## Harjoitus 1. 12.–14.9.2022, kirjan sivut 29–45. Kotitehtävän (MyCo) palautus 18.9.

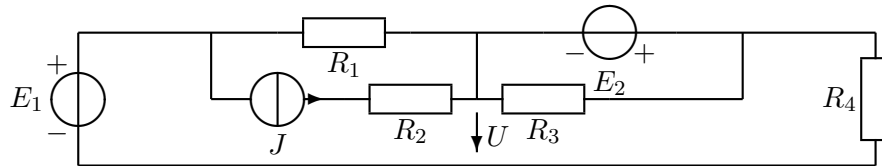
Kiinnitä huomiota: jännitteen fysikaalinen määrittely, virtojen merkitseminen, yhtälöiden muodostaminen, jännite- ja virtalähteen ero. Työkaluja ja perusjuttuja, tärkeä harjoitus! Koko kurssi tulee vahvasti pohjautumaan tähän ensimmäiseen laskuharjoitukseen — kanta-asiakkaat eivät sitä usko.

**11 (eli tehtävä 1). Peruskomponentit ja peruslait (työkalut).** Laske jännitteet  $U$  ja  $U_J$ .  $E = 7\text{ V}$ ,  $J = 2\text{ A}$ ,  $R_1 = 1\ \Omega$ ,  $R_2 = 2\ \Omega$ ,  $R_3 = 5\ \Omega$ .

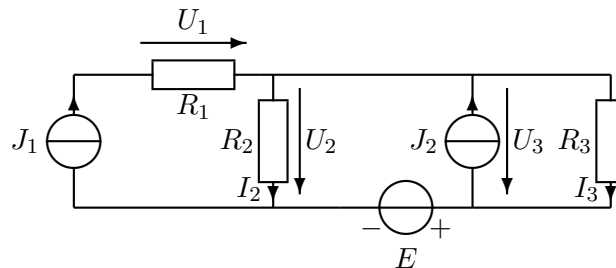


Monet tenttien osanottajat luulevat tietävänsä, mutta eivät tiedä, mikä on (vakio)virtalähde!

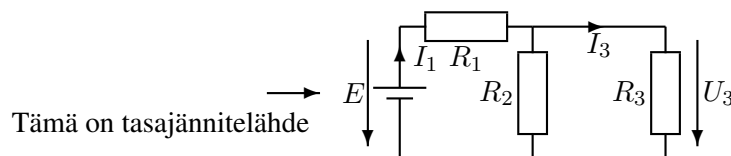
**12. Peruslait.** Laske jännite  $U$ .  $R_1 = 2\ \Omega$ ,  $R_2 = 2\ \Omega$ ,  $R_3 = 3\ \Omega$ ,  $R_4 = 5\ \Omega$ ,  $J = 2\text{ A}$ ,  $E_1 = 4\text{ V}$ ,  $E_2 = 6\text{ V}$ . Tämä muistuttaa eniten koetehtäviä!



**13. Yhtälöiden kirjoittaminen.** Laske vastusten jännitteet Kirchoffin lakien avulla.  $E = 2\text{ V}$ ,  $J_1 = 2\text{ A}$ ,  $J_2 = 2\text{ A}$ ,  $R_1 = 2\ \Omega$ ,  $R_2 = 2\ \Omega$ ,  $R_3 = 4\ \Omega$ . Ja tämä!



**14. Tasavirran teho.** Laske  $R_2$ :n ja  $R_3$ :n rinnankytkennän resistanssi  $R_{23}$  ja sen avulla  $R_3$ :n ottama teho  $P_3$ .  $E = 1\text{ V}$ ,  $R_1 = 100\ \Omega$ ,  $R_2 = 200\ \Omega$ ,  $R_3 = 50\ \Omega$ .



### Vastaukset:

11.  $U = 6\text{ V}$ ,  $U_J = 16\text{ V}$ ,  $I_E = 1\text{ A}$

12.  $U = 4\text{ V}$ ,  $I_{R_1} = 0$

13.  $U_1 = 4\text{ V}$ ,  $U_2 = 6\text{ V}$ ,  $U_3 = 4\text{ V}$

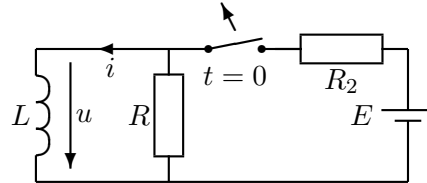
14.  $R_{23} = 40\ \Omega$ ,  $I_1 = \frac{1}{140}\text{ A}$ ,  $U_3 = \frac{2}{7}\text{ V} = 0,286\text{ V}$ ,  $I_3 = \frac{1}{175}\text{ A}$ ,  $P_3 = \frac{2}{1225}\text{ W} = 1,63\text{ mW}$

Seuraavat harjoitukset ovat hieman vaikeampia — toivottavasti ehdit mukaan!

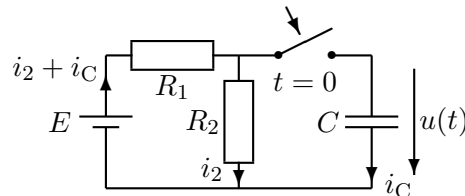
**Harjoitus 2. 19.–21.9.2022, kirjan sivut 295–309. Muista kotitehtävä 25.9.!**

*Derivaattamuotoiset yhtälöt, differentiaaliyhtälöiden muodostaminen Kirchhoffin laeista, yhtälöiden ratkaiseminen. Komponenttien eli rakenneseosien tunteminen on perustana lähes kaikkien sähkötekniisten laitteiden toiminnan ymmärtämiseen.*

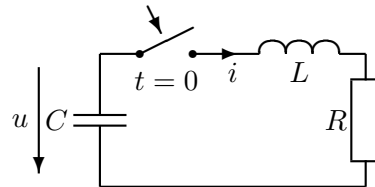
**21. Muutosilmiö, raja-arvot.** Laske kelan virta  $i$  ja jännite  $u$  ajan funktiona, kun tasajännitelähde irrotetaan piiristä avaamalla kytkin hetkellä  $t = 0$ . Laske myös kelan virta ja jännite juuri ennen kytkimen avaamista:  $i(0^-)$  ja  $u(0^-)$  ja heti sen jälkeen:  $i(0^+)$  ja  $u(0^+)$ .  $L = 100 \text{ mH}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \Omega$ ,  $E = 10 \text{ V}$ .



**22. Eksponenttikäyrät.** Laske jännite  $u$  ajan funktiona, kun kondensaattori liitetään piiriin hetkellä  $t = 0$ .  $C = 100 \mu\text{F}$ ,  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{C0} = -2 \text{ V}$ ,  $E = 10 \text{ V}$  (tasajännite). Paras tärppi!



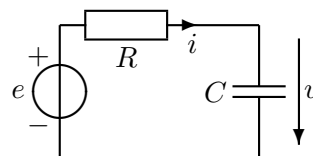
**23. Vaimeneva värähtely.** Kondensaattori on varattu jännitteeseen  $U_{C0} = 10 \text{ V}$ . Kytkin suljetaan hetkellä  $t = 0$ . Piirissä alkaa kulkea virta  $i = Ae^{-t/\tau} \sin \omega t$ . Kondensaattorin jännite on muotoa  $u = (D \cos \omega t + E \sin \omega t)e^{-t/\tau}$ , kun  $t \geq 0$ .  $A = 1 \text{ A}$ ,  $C = 40\,000 \mu\text{F}$ ,  $L = 5 \text{ H}$ ,  $R = 10 \Omega$ ,  $\omega = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ,  $\tau = 1 \text{ s}$ . Kuinka suurina ovat kertoimet  $D$  ja  $E$ ?



**24. Vaihtovirta.** Laske kondensaattorin virta  $i$  (ajan funktiona) jännitteen  $u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi)$  derivaatan avulla. Selvitä ensin tehollisarvo  $U$  ja vaihekulma  $\varphi$  (phi, vakio). Jännitelähde  $e = \sqrt{2}E \sin \omega t$ , missä  $E = 10 \text{ V}$  ja  $\omega = 2\pi \cdot 50 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .  $R = 10 \Omega$ ,  $C = \frac{1}{\pi} \text{ mF}$ .

$$\sin(\omega t + \varphi) = \sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi$$

$$\cos(\omega t + \varphi) = \cos \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \sin \varphi$$



**Tehtävä 24 on johdantoa ensi viikkoon, tutustu ratkaisuun kotona ja laske tehtävä ensi viikolla helpommin kompleksiluvuilla!**

**Vastaukset:**

**21.**  $i = e^{-t/\tau} \text{ A}$ ,  $u = -1000e^{-t/\tau} \text{ V}$ ,  $\tau = 0,1 \text{ ms}$ ,  $i(0^-) = i(0^+) = 1 \text{ A}$ ,  $u(0^-) = 0$ ,  $u(0^+) = -1 \text{ kV}$

**22.**  $u = (5 - 7e^{-t/0,5 \text{ s}}) \text{ V}$ ,  $A = -7 \text{ V}$ ,  $B = 5 \text{ V}$ ,  $\tau = 0,5 \text{ s}$

**23.**  $D = 10 \text{ V}$ ,  $E = 5 \text{ V}$

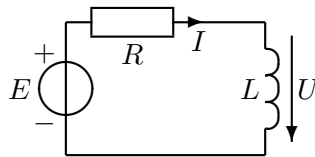
**24.**  $U = 5\sqrt{2} \text{ V}$ ,  $\varphi = -45^\circ$        $i(t) = 1 \cdot \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ A}$

**Seuraava laskuharjoitus on erityisen tärkeä.**

**Harjoitus 3. 26.–28.9.2022, kirjan sivut 316–343. Muista kotitehtävä!**

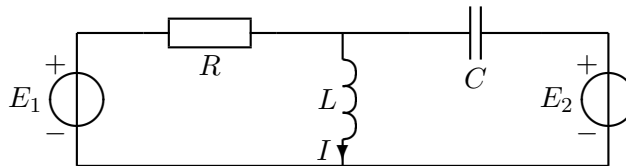
*Osoitinlaskenta: miten kompleksiluvut liittyvät siniaaltoihin, mitä tarkoittaa  $3 + 4j = 5\angle 53,13^\circ = 5e^{j0,9273 \text{ rad}}$ ? Tosi tärkeä harjoitus; ota laskin ja sen käyttöohje mukaan! Luennoitsija osaa ehkä käyttää laskintasi — kysy! Osoitinlaskenta on yksi tärkeimmistä sähkötekniikan ja elektroniikan laskumenetelmistä. Analogisen ja osin digitaalisen signaalin käsittely perustuvat siihen. Kaikkien laitteiden, jotka saavat käyttövoimansa vaihtovirrasta tai joissa kulkee vaihtovirtasignaaleja, toiminnan tarkastelussa joudutaan tekemisiin osoitinlaskennan kanssa. Tämän kurssin jälkeen hallitset kompleksilukulaskennan suvereenisti!*

**31. Osoitinlaskenta.** Kuvan piirissä on sinimuotoinen jännitelähde  $E$ . Laske kelan jännite osoitinlaskennalla (kompleksiluvut).  $E = 44\angle 0^\circ \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $R = 10 \Omega$ ,  $L = 18,38 \text{ mH}$ .

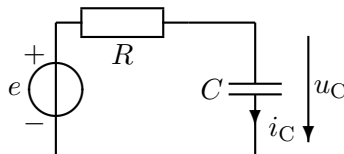


Nyt olisi hyvä laskea tehtävä 24 uudestaan kompleksiluvuilla!

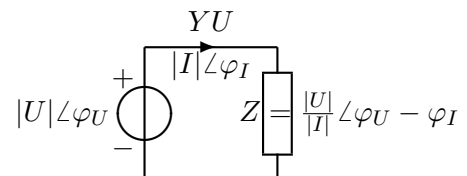
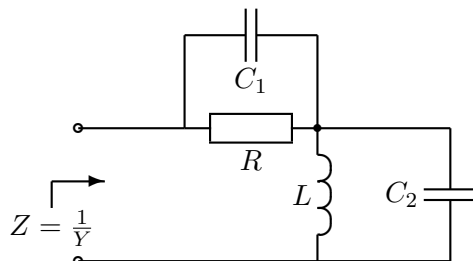
**32. Tyypitapaus, koetehtävän prototyyppi.** Laske virta  $I$ .  $E_1 = 10\angle 90^\circ \text{ V}$ ,  $E_2 = 5\angle 0^\circ \text{ V} = 5 \text{ V}$ ,  $R = 10 \Omega$ ,  $L = 25 \text{ mH}$ ,  $C = 500 \mu\text{F}$ ,  $f = 200/\pi \text{ Hz}$ .



**33. Hetkellisarvon laskeminen.** Laske kondensaattorin virran ja jännitteen hetkellisarvot hetkellä  $t = 5 \text{ ms}$ .  $E = 10\angle 15^\circ \text{ V}$  eli  $e(t) = \sqrt{2} \cdot 10 \sin(\omega t + 15^\circ) \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $R = 2 \Omega$ ,  $C = 5/\pi \text{ mF}$ . Opiit ymmärtämään kompleksilukujen yhteyden hetkellisarvoihin.



**34. Impedanssi ja admittanssi.** Laske oheisen piirin impedanssi. Ilmoita tulos kulmam muodossa. Paljonko on admittanssi summamuodossa?  $R = 2 \Omega$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $C_1 = 250 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 500 \mu\text{F}$ ,  $\omega = 2000 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ . **Jääköön tämä vapaaehtoiseksi kotitehtäväksi!**



**Vastaukset:**

**31.**  $U \approx 11 + j19 \approx 22\angle 60^\circ \text{ V}$ ,  $\omega = 100\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} \approx 314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

**32.**  $I = 1 - j = 1,41\angle -45^\circ \text{ A}$ ,  $\omega = 400 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

**33.**  $i_C = 5 \sin(\omega t + 60^\circ) = 2,5 \text{ A}$ ,  $u_C = 10 \sin(\omega t - 30^\circ) = 8,66 \text{ V}$ ,  $\omega t = 90^\circ$

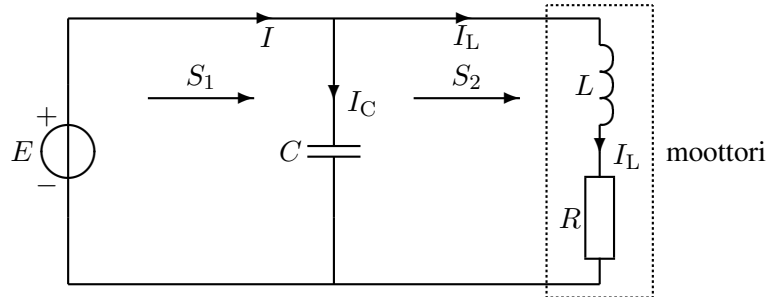
**34.**  $Z = 3,16\angle -71,6^\circ \Omega$ ,  $Y = (0,1 + 0,3j) \text{ S}$

Seuraavalla kerralla käsitellään osoitinlaskentaa lisää! Jess, jesss, jesssss!

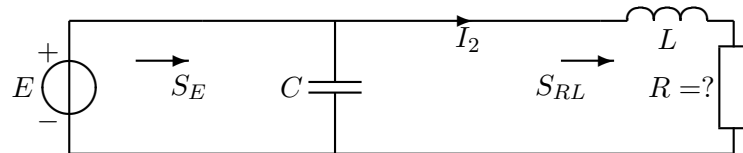
**Harjoitus 4. 3.–5.10.2022, kirjan sivut 359–372, 387–397. Muista kotitehtävä!**

Miksi teho  $P \neq UI$ , vaikka  $p = ui$ ? Mitä tarkoittaa kompleksisen tehon kulma  $\varphi$ ? 3-vaihejärjestelmän 1-vaiheinen sijaiskytkentä, kolmio- ja tähtikytkentä, pää- ja vaihejännite. Epätahtimoottori ja jättämä.

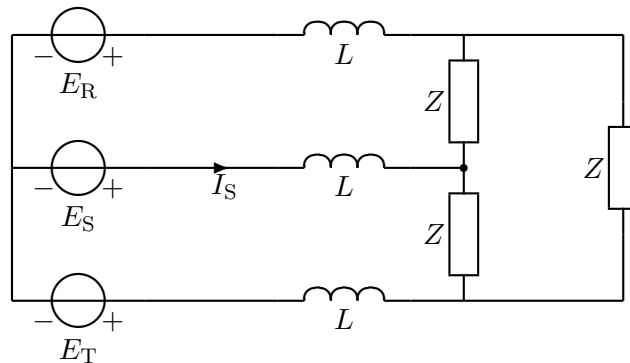
**41. Vaihtovirran päteho ja loisteho.** Laske päte-, lois- ja näennäistehot  $S_1 = S_{CLR} = P_1 + jQ_1$  ja  $S_2 = S_{LR} = P_2 + jQ_2$ . Laske vielä kuorman tehokerroin  $C$ :n kanssa ja ilman sitä. Vertaa virtoja  $I$  ja  $I_L$  toisiinsa.  $E = 20\angle 90^\circ$  V,  $\omega = 2$  rad/s,  $R = 2 \Omega$ ,  $L = 2$  H,  $C = 0,1$  F,  $I_C = -4$  A,  $I_L = 4 + 2j$  A.



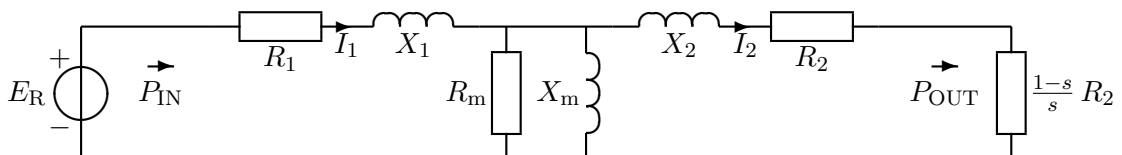
**42. Vaihtovirran teho.** Laske  $|I_2|$  ja jännitelähteen kompleksinen teho  $S_E$ , jos  $S_{RL} = 16 + 8j$  VA.  $L = 0,1$  H,  $C = 0,005$  F,  $\omega = 20 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ . Valitse:  $I_2 = |I_2|\angle 0^\circ$ . Huom.  $P_E = P_R$ .



**43. Symmetrinen kolmivaihejärjestelmä.** Laske vaihevirta  $I_S$  yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla.  $E_R = 230\angle 0^\circ$  V,  $Z = (15 + j15) \Omega$ ,  $\omega L = 5 \Omega$ . Muista, että kelan impedanssi on aina  $j\omega L$ !



**44. Epätahtimoottorin sijaiskytkentä.** Kuvassa on epätahtimoottorin yhden vaiheen sijaiskytkentä. Laske yhden vaiheen tyhjäkäyntivirta ( $s = 0$ ) ja moottorin hyötysuhde kuormitustilanteessa jättämän arvolla  $s = 0,1$ .  $E_R = 230\angle 0^\circ$  V,  $R_1 = 0,6 \Omega$ ,  $R_2 = 0,4 \Omega$ ,  $R_m = 400 \Omega$ ,  $X_1 = \omega L_1 = 0,8 \Omega$ ,  $X_2 = \omega L_2 = 0,5 \Omega$ ,  $X_m = \omega L_m = 20 \Omega$ . Muista, että kelan impedanssi on aina  $jX$ !  $I_1 = 48,8\angle -25,1^\circ$  A ja  $I_2 = 46,7\angle -14,1^\circ$  A. **Vapaaehtoinen kotitehtävä.**



**Vastaukset:**

**41.**  $S_1 = 40 + j0$  VA,  $S_2 = 40 + j80$  VA,  $\cos \phi_1 = 1$ ,  $\cos \phi_2 = 0,447$ ,  $I = 2j$  A.

**42.**  $|I_2| = 2$  A,  $S_E = 16 + j0$  VA

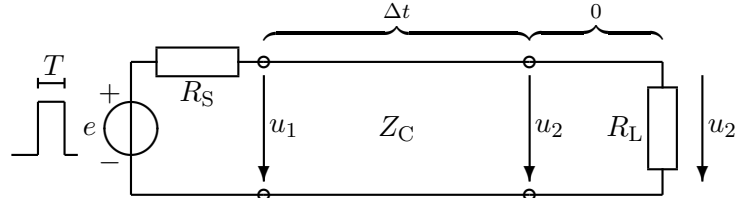
**43.**  $I_S = 20,6\angle 177^\circ$  A

**44.**  $\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{3,7,85 \text{ kW}}{3,10,16 \text{ kW}} = 77 \%$ ,  $I_0 = \frac{E_R}{Z_1 + Z_m} = 11,1\angle -88,3^\circ$  A

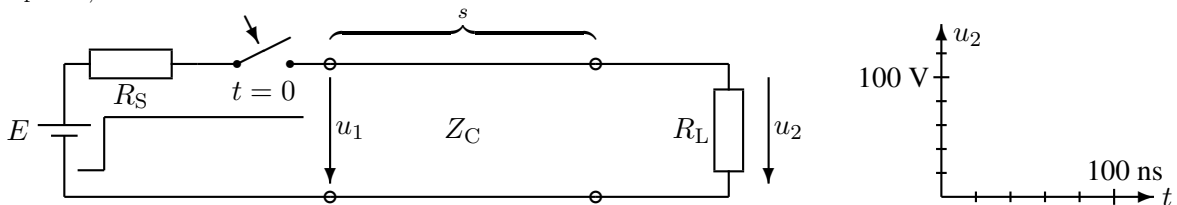
**Harjoitus 5. 10.–12.10.2022, kirjan sivut 427–455. Muista kotitehtävä!**

Aina, kun taajuus on suuri (esim. TV-antenni) tai pulssit lyhyitä (esim. LAN), tarvitaan siirtojohtoteoriaa. Moni muu kuin sinä ei sitä osaa! Eikö valonnopeuskaan riitä poistamaan viiveitä, mitä tarkoittaa ominaisimpedanssi tai aallon heijastuminen ja läpäisy?

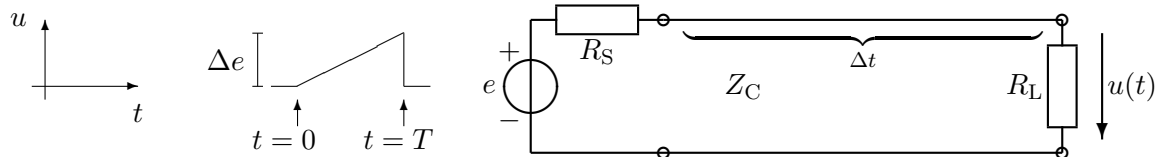
**51. Pulssi ja siirtojohto.** Jos  $T < 2\Delta t$ , näkyy jännitelähteen ( $e = 5$  V) lähettämä pulssi vaimenevana pulssijonona johdon toisessa päässä. Mitkä ovat pulssien korkeudet  $u_2(t)$ ?  $R_S = 150 \Omega$ ,  $Z_C = 50 \Omega$ ,  $R_L = 200 \Omega$ .



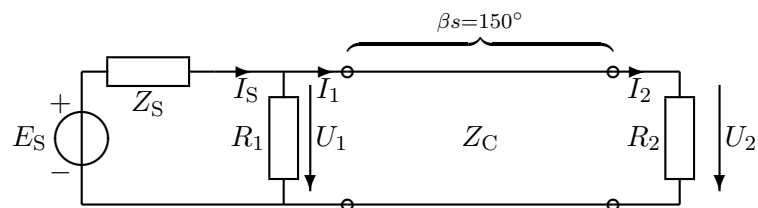
**52. Tasajännite ja siirtojohto.** Tasajännitelähde liitetään tavalliseen teflon-eristeiseen pariijohtoon hetkellä  $t = 0$ . Piirrä kuormavastuksen jännite  $u_2(t)$  ajan funktiona ottamalla huomioon jänniteaallon edestakaiset heijastukset johdon päässä.  $E = 100$  V,  $R_S = 0 \Omega$ ,  $Z_C = 100 \Omega$ ,  $R_L = 150 \Omega$ ,  $s = 4,14$  m,  $\epsilon_r = 2,1$ .



**53. Pulssin laskostuminen.** Siirtojohdon ominaisimpedanssi on  $Z_C = 50 \Omega$  ja viive  $\Delta t = 100$  ns. Laske jännite  $u(t)$ , kun  $t = 105$  ns.  $\Delta e = 10$  V,  $T = 10$  ns,  $e(0) = 0$  V,  $R_S = 100 \Omega$ ,  $R_L = 150 \Omega$ . Vapaaehtoinen kotitehtävä.



**54. Siirtojohtoyhtälöt.** Laske siirtojohtoyhtälöiden avulla sinimuotoisen signaalilähteen virta  $I_S$ , kun kuormavirta  $I_2 = 1 \angle 0^\circ$  A.  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$ ,  $Z_C = 60 \Omega$ ,  $s = \frac{5}{12} \lambda$ .



**Vastaukset:**

**51.**  $u_2((2n + 1) \cdot \Delta t) = 2$  V; 0,6 V; 0,18 V; 0,054 V; ...; 0 V

**52.**  $\Delta t = 20$  ns  $u_2((2n + 1) \cdot \Delta t) = 120$  V; 96 V; 100,8 V; 99,84 V; ...; 100 V

**53.**  $u(\Delta t + \frac{T}{2}) = 2,5$  V

**54.**  $I_S = 4,1 \angle 129^\circ$  A,  $U_1 = -10\sqrt{3} + j30$  V,  $I_1 = -\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{6}$  A

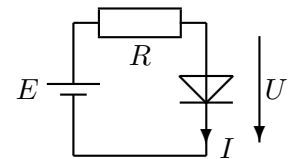
Tähän päättyy 1. välikokeen alue Kolme seuraavaa viikkoa on omistettu tärkeimmille puolijohdekomponenteille. Ne ovat esimerkiksi mikropiirien perusosia, mutta on niillä paljon sovelluksia erilliskomponenteinakin.

**Harjoitus 6. 24.–26.10.2022, kirjan sivut 109–129. Muista kotitehtävä!**

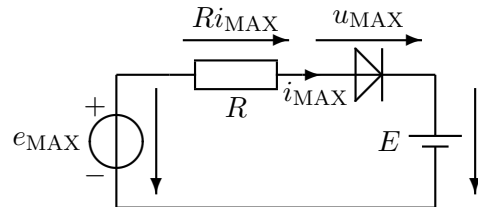
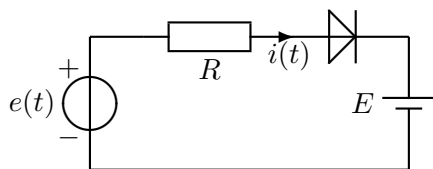
Ominaiskäyrän yhtälö ja parametrit. Mikä on toimintapiste, miksi signaali näkee puolijohdekomponentit eri tavalla kuin tasavirta? Diodeja käytetään mm. vaihtovirran tasasuuntaukseen, moduloidun hyöty-signaalin erottamiseen kantaallosta (ilmaisin), aaltomuodon muokkaamiseen, jännitteen rajoittimena, valaisuun (LED), kaukosäätimissä (IR), optisessa tietoliikenteessä (laser), ym.

**61. Diodin parametrit.** Diodin ominaiskäyrä on muotoa:  $I = I_S \left( e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right)$ , missä  $U_T = 25 \text{ mV}$ . Oheisesta piiristä mitataan diodin jännite  $U$  kahden eri vastuksen kanssa. Kun  $R_1 = 170 \Omega$ , on diodin jännite  $U_1 = 0,7 \text{ V}$ , ja arvolla  $R_2 = 9,5 \text{ k}\Omega$  on  $U_2 = 0,5 \text{ V}$ . Laske likimain parametrit  $I_S$  ja  $n$ . Lähdejännite  $E = 10 \text{ V}$  (tasajännite).

$$I = I_S \left( e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) \approx \begin{cases} I_S \left( e^{\frac{U}{nU_T}} \right) & (U \gg nU_T) \\ I_S (-1) & (U \ll 0) \end{cases}$$



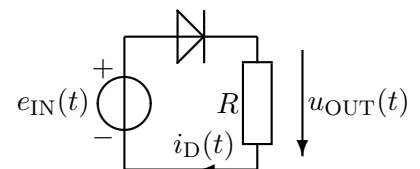
**62. Iterointi.** Laske virran maksimi-arvo esim. iteroimalla.  $e(t) = 10 \sin(\omega t) \text{ V}$ ,  $E = 5 \text{ V}$ ,  $R = 500 \Omega$ ,  $I_S = 1 \text{ nA}$ ,  $nU_T = 50 \text{ mV}$ .



**63. Taylorin sarja ja neliölaki.** Erään diodin virta on  $I_D = 0,59 \text{ mA}$ , kun  $U_D = 0,7 \text{ V}$ . Mihin arvoon virta pienenee, jos diodin jännite pienenee  $10 \text{ mV}$  ( $u_d = -10 \text{ mV}$ )?  $k = \frac{1}{nU_T} = 20 \frac{1}{\text{V}}$ . **Vapaaehtoinen kotitehtävä.**

$$i_D(U_D + u_d) \approx I_S e^{\frac{U_D + u_d}{nU_T}} \approx I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}} \underbrace{\left[ 1 + ku_d + \frac{(ku_d)^2}{2!} + \frac{(ku_d)^3}{3!} + \dots \right]}_{e^{\frac{u_d}{nU_T}}}$$

**64. Tasavirta- ja piensignaalianalyysi.** Piirissä on lähdejännite, jossa pieni sinisignaali ratsastaa suuremman tasajännitteen päällä:  $e_{IN}(t) = (4 + 0,067 \sin \omega t) \text{ V}$ . Laske diodin toimintapisteen virta  $I_D$  sekä tasavirtaresistanssi  $R_{DC}$ , kun  $U_D = 0,7 \text{ V}$ . Laske vielä dynaamisen resistanssin  $r_d$  avulla vastuksen jännite  $u_{OUT}(t)$ . Aaltomuodon vähäistä muuttumista ei oteta huomioon.  $R = 5600 \Omega$ ,  $I_S = 0,49 \text{ nA}$ ,  $nU_T = 50 \text{ mV}$ .



**Vastaukset:**

**61.**  $n = 1,999$ ,  $I_S = 45 \text{ nA}$ ,  $I_1 = 54,7 \text{ mA}$ ,  $I_2 = 1,0 \text{ mA}$

**62.**  $i(t)_{\max} = 8,4 \text{ mA}$ ,  $u_D(t)_{\max} = 0,7972 \text{ V}$

**63.**  $I_D(0,69 \text{ V}) \approx 0,483 \text{ mA}$

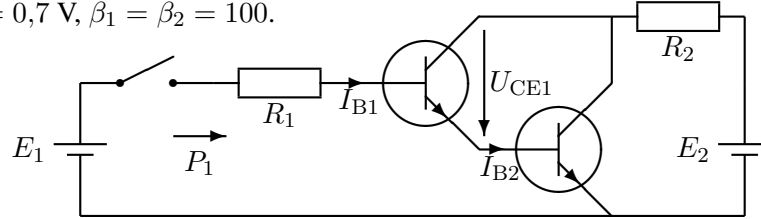
**64.**  $I_D = 0,589 \text{ mA}$ ,  $R_{DC} = 1188 \Omega$ ,  $r_d = 84,8 \Omega$ ,  $u_{OUT}(t) \approx (3,3 + 0,066 \sin \omega t) \text{ V}$

Ensi kerralla käsitellään bipolaaritransistoria; sen perustana on diodin tapaan *pn*-liitos eli kahden *Si*-kerroksen rajapinta. Toinen puoli on heikosti seostettu III ja toinen puoli V ryhmän alkuaineella. Toisin kuin vastuksessa tällaisen rajapinnan resistanssi riippuu virran suunnasta ja suuruudesta (joka riippuu jännitteestä). Mikropiirit toteutetaan nykyään yleensä kanavatransistoreilla, jotka ovat aiheena kahden viikon päästä.

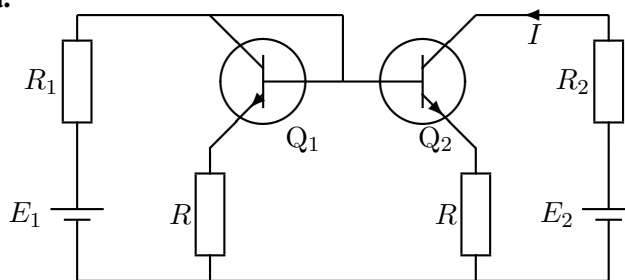
**Harjoitus 7. 31.10.–2.11.2022, kirjan sivut 147–164. Muista kotitehtävä!**

*Virtavahvistus; BJT-transistorin kantavirralla voidaan ohjata paljon suurempaa C–E-virtaa; tähän perustuu toiminta signaalinvahvistimena, kytkimenä tai loogisen portin osana. Miksi transistori kyllästyy?*

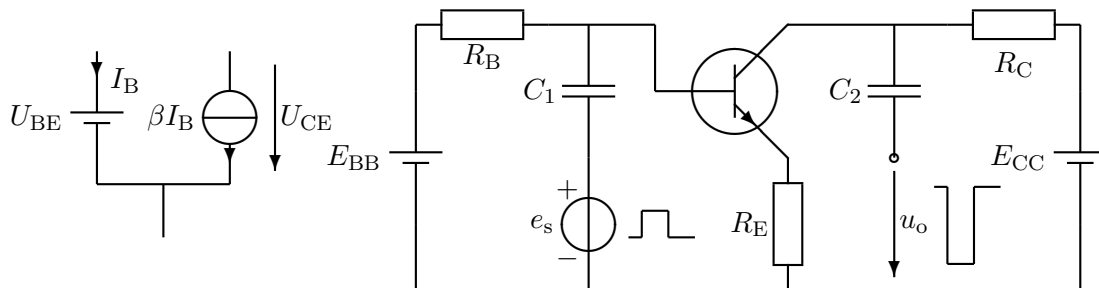
**71. Darlington-pari.** Transistorit muodostavat jänniteohjatun kytkimen. Miten suuri (ohjaus)teho  $P_1$  on jännitelähteestä  $E_1$  otettava, jotta vastukseen  $R_2$  saadaan tehoa  $P_2 = 80 \text{ W}$ ?  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 5 \Omega$ ,  $U_{BE1} = U_{BE2} = 0,7 \text{ V}$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 100$ .



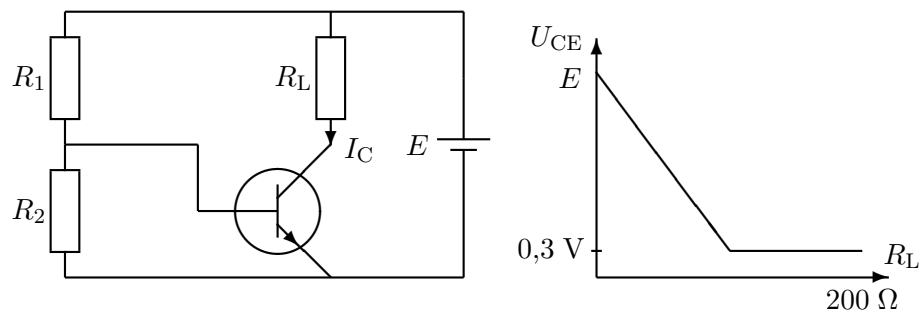
**72. Virtapeili.** Paljonko virta  $I$  muuttuu (esim. prosentteina), jos  $\beta_1 = \beta_2 = 100$  kaksinkertaistuvat arvoon 200?  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 0 \Omega$ ,  $R = 100 \Omega$ ,  $E_1 = E_2 = 4 \text{ V}$ ,  $U_{BE1} = U_{BE2} = 0,7 \text{ V}$  (eivät muutu). **Vapaaehtoinen kotitehtävä.**



**73. Toimintapiste (lin.).** Laske oheisen transistorivahvistimen toimintapiste ( $I_B$ ,  $I_C$  ja  $U_{CE}$ ) olettaen, että  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$  ja  $\beta = 99$ .  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $E_{BB} = 2,7 \text{ V}$ ,  $E_{CC} = 9 \text{ V}$ .



**74. Transistorin kyllästyminen (epälin.).** Mitä arvoja saa virta  $I_C$ , kun kuormavastus  $R_L$  vaihtelee välillä  $0 \dots 200 \Omega$ . Oleta, että  $U_{CE}$  kyllästyy kuvan mukaisesti arvoon  $0,3 \text{ V}$ .  $R_1 = 4,65 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 700 \Omega$ ,  $\beta = 100$ ,  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ ,  $E = 10 \text{ V}$ .



**Vastaukset:**

**71.**  $P_1 \approx 2 \text{ mW}$ ,  $I_2 = 4 \text{ A}$ ,  $I_{B1} = 0,392 \text{ mA}$ ,  $E_1 = 5,32 \text{ V}$

**72.**  $I = 2,94 \dots 2,97 \text{ mA}$ ; muutos on noin 1 %.

**73.**  $I_B = 10 \mu\text{A}$ ,  $I_C = 0,99 \text{ mA}$ ,  $U_{CE} = 5,03 \text{ V}$

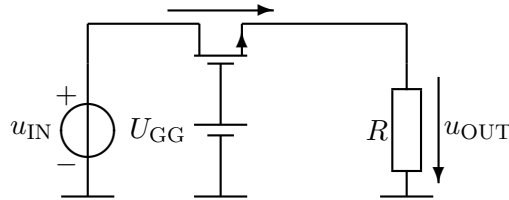
**74.** Kun  $R_L \leq 97 \Omega \Rightarrow I_C = 0,1 \text{ A}$

**Ensi kerralla mikropiirien yleisin perusosa, kanavatransistori eli FET.**

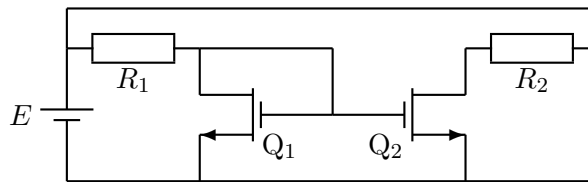
**Harjoitus 8. 7.–9.11.2022, kirjan sivut 183–206. Muista kotitehtävä!**

*Ollaanko triodi- vai saturaatioalueella? Transistorien ja fettien sovelluskytkenät ovat samantapaisia. Jännite  $u_{GS}$  ohjaa ( $D-S$ -)virtaa  $i_D$ . MOSFETin suurimpana etuna on erittäin hyvä integroitavuus (CMOS). Ilman niitä ei olisi mikroprosessoria eikä nykyisiä hilavitkuttimia ja viihde-elektroniiikan vimpaimia. Toisaalta jäisi enemmän aikaa esim. pajupillien veistelyyn.*

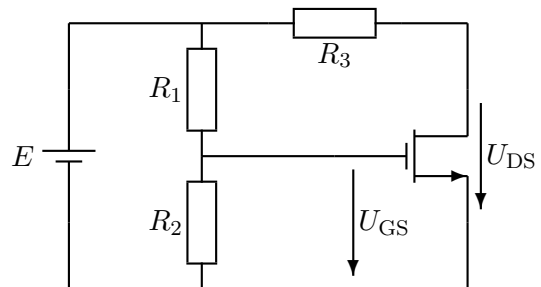
**81. FET kytkimenä.** Mikä on kytkimen jännitehäviö  $u_{IN} - u_{OUT}$  ja kanavan resistanssi  $r_{DS}$ , kun  $u_{OUT} = 1$  V?  $K = 1 \text{ mA/V}^2$ ,  $U_t = 2 \text{ V}$ ,  $U_{GG} = 5 \text{ V}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ .



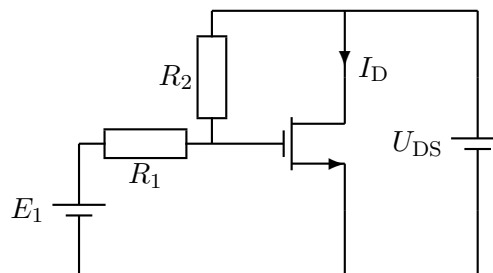
**82. Saturaatioalue.** Laske jännite  $U_{GS}$ .  $U_t = 2 \text{ V}$ ,  $K = 100 \mu\text{A/V}^2$ .  $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 10 \text{ V}$ .



**83. TRI vs. SAT.** Millä  $R_3$ :n arvolla FET on TRI- ja SAT-alueiden rajalla?  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 40 \text{ k}\Omega$ ,  $E = 5 \text{ V}$ ,  $U_t = 2 \text{ V}$ ,  $K = 0,1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ . **Vapaaehtoinen kotitehtävä**



**84. Triodi-alue.** Laske kanavan resistanssi  $r_{DS}$  triodi-alueen tarkalla kaavalla.  $E_1 = 5 \text{ V}$ ,  $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $U_t = 2 \text{ V}$ ,  $K = 0,1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ .



**Vastaukset:**

- 81.**  $u_{DS} = 0,268$  (0,250) V,  $r_{DS} = 268$  (250)  $\Omega$
- 82.**  $U_{GS1} = U_{GS2} = 4 \text{ V}$
- 83.**  $R_2 = 7,5 \text{ k}\Omega$
- 84.**  $r_{DS} = 10 \text{ k}\Omega$

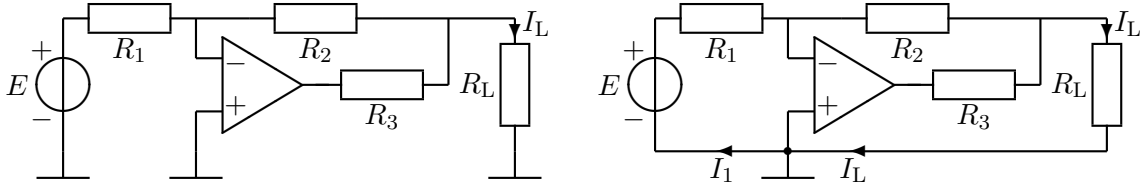
**Ensi viikolla käsiteltävä analogiaelektroniiikan peruslohko, operaatiovahvistin, on erittäin suositeltava rakenneosa käytännön sovelluksiin.**



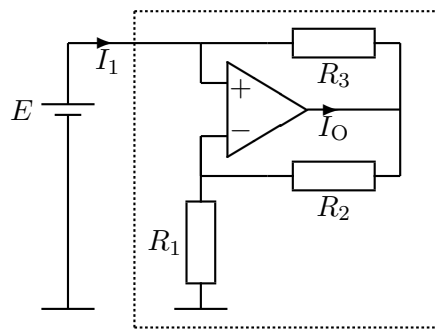
**Harjoitus 9. 14.–16.11.2022, kirjan sivut 211–235. Muista kotitehtävä!**

Mitä merkitsevät ideaalioperaatiovahvistimen kolme nollaa? Operaatiovahvistin on ideaalisuutensa takia suosittu elektroniikan yleistyökalu. Se ei maksa juuri mitään, mutta silti sen soveltaminen käytäntöön on yhtä juhlaa; kaikki toimii aina!

**91. Invertoiva vahvistin.** Laske virta  $I_L$ .  $E = 1\text{ V}$ ,  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 47\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 100\ \Omega$ ,  $R_L = 1000\ \Omega$ .  $E$  voisi olla esim. CD-soitin ja  $R_L$  kuuloke.

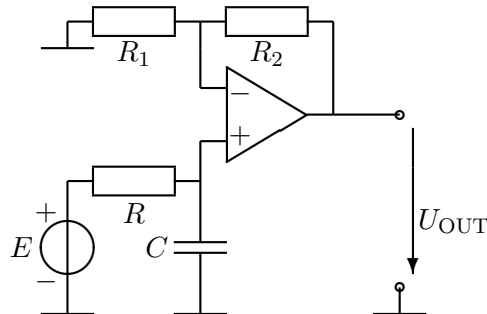


**92. Negatiivinen resistanssi.** Laske virrat  $I_O$  ja  $I_1$ .  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 5\text{ k}\Omega$ ,  $E = 1\text{ V}$ .

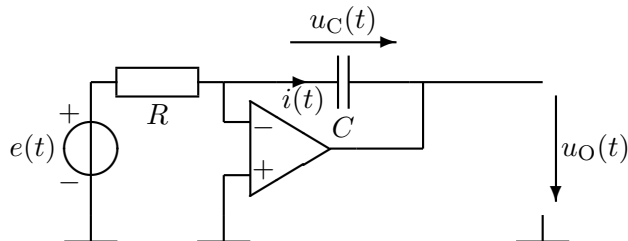


Tätä piiriä voi käyttää Chuan piirissä (APLAC chua-circuit.i), joka on yksinkertaisin kaaosteorian testialusta (ks. E-St s. 145).

**93. Aktiivinen suodatin.** Laske kuvan alipäästösuodattimen siirtofunktio  $\frac{U_{\text{OUT}}}{E}(j\omega)$ .  $R = 1\ \Omega$ ,  $R_1 = 1\ \Omega$ ,  $R_2 = 9R_1$ ,  $C = 1\text{ F}$ .



**94. Integraattori.** Kondensaattorin jännite on muotoa:  $u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + u_C(0)$ . Laske piirin lähtöjännite  $u_O(t)$ , kun  $e(t) = \hat{e} \cdot \sin \omega t\text{ V}$ ,  $\hat{e} = 1\text{ V}$ ,  $\omega = 10\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ,  $R = 10\text{ k}\Omega$ ,  $C = 1\ \mu\text{F}$ ,  $u_C(0) = 0$ .



**Vastaukset:**

**91.**  $I_L = -4,7\text{ mA}$

**92.**  $I_O = 1,4\text{ mA}$ ,  $I_1 = -0,4\text{ mA}$

**93.**  $\frac{U_2}{E} = \frac{10}{j\omega + 1}$

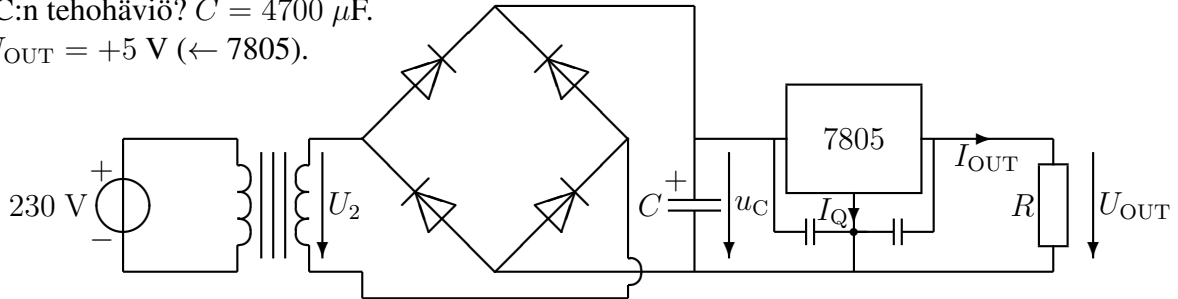
**94.**  $u_O = (10 \cos \omega t - 10)\text{ V}$

**Viimeinen harjoitus keskittyy elektroniikkalaitteiden teholähteisiin — tärkeä ja jopa keskimääräistä hyödyllisempi aihe!**

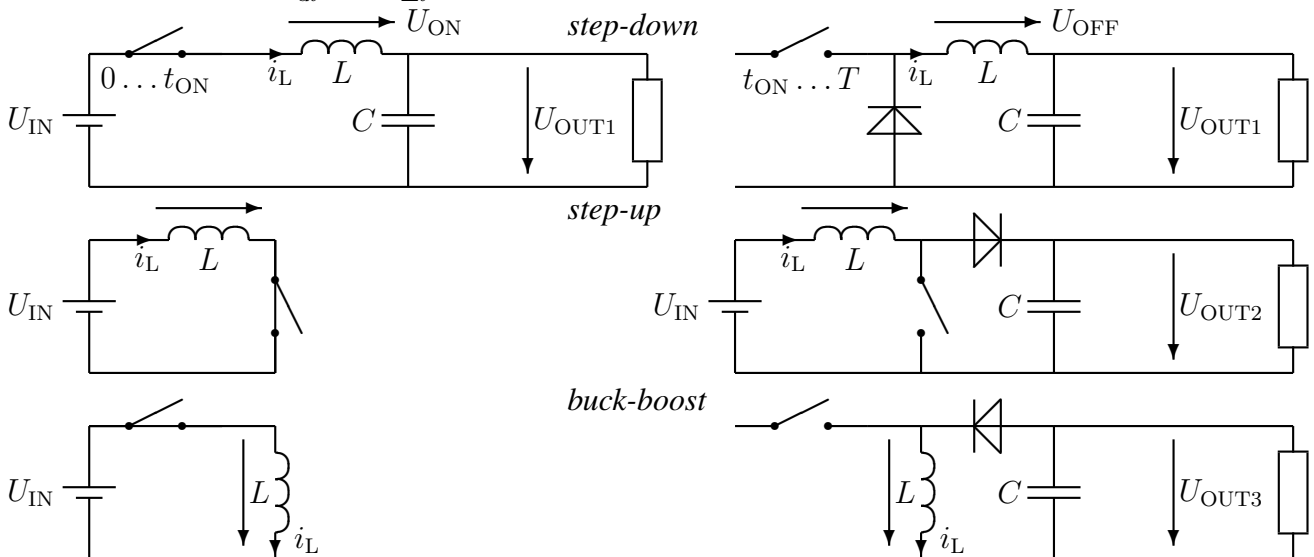
Tarkastelu lohkoittain, yksinkertaistukset, mikä on regulaattori? Laitteet vaativat toimiakseen syöttötehoa; aina sitä ei saada paristoista tai USB-liitimestä. Ylikuumeneminen on estettävä.

**101. Tasasuuntaus, regulointi.** Verkkomuuntajan ( $f = 50$  Hz) toisiojännite on  $U_2 = 8$  V. Laske kondensaattorin maksimijännite  $\hat{u}_C$ , jos yhden diodin jännitehäviöksi oletetaan  $U_D = 0,7$  V. Kuinka suurta on likimain jännitteen  $u_C$  aaltoilu, jos  $R = 10 \Omega$  ja  $I_Q = 0$ ? Mikä on regulaattori-IC:n tehohäviö?  $C = 4700 \mu\text{F}$ .

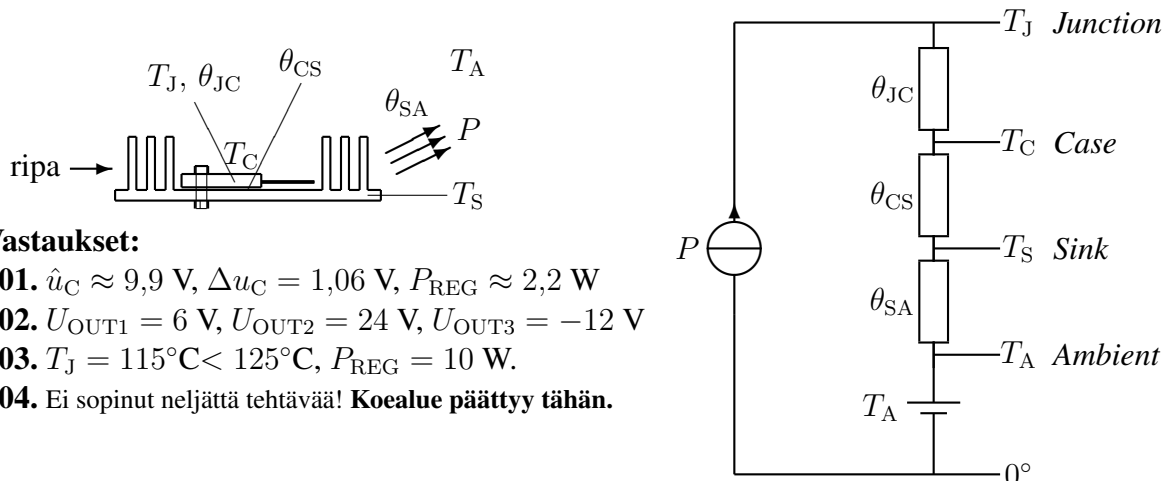
$U_{\text{OUT}} = +5$  V ( $\leftarrow$  7805).



**102. Hakkuriteholähde, SMPS.** Vasemmalla olevat kuvat esittävät yksinkertaistettuja hakkuriteholähteitä, kun kytkin on kiinni. Oikealla olevissa kuvissa kytkin on auki. Oleta, että kytkin on kiinni puoli jaksoa kerrallaan ( $t_{\text{ON}} = t_{\text{OFF}} = \frac{T}{2}$ ). Diodin voit olettaa ideaaliseksi ja lähtöjännitteen vakioksi, jolloin kelan ( $L = 0,2$  H) jännite on vakio yhden puolijakson ( $\Delta t = T/2$ ) aikana ( $u_L = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}$ ). Laske lähtöjännitteet  $U_{\text{OUT}1} \dots U_{\text{OUT}3}$ , kun  $U_{\text{IN}} = 12$  V.



**103. Jäähdytysriipa.** IC-regulaattorin jännitehäviö on  $U_{\text{REG}} = 5$  V ja läpikulkeva virta 2 A. Regulaattori on TO-220-kotelossa, jonka lämpöresistanssi on noin  $\theta_{\text{JC}} \approx 4^\circ/\text{W}$ . Se kiinnitetään jäähdytysriipaan, jolle valmistaja ilmoittaa  $\theta_{\text{SA}} \approx 4,6^\circ/\text{W}$ . Arvioi mikropiirin ja jäähdytysriivan väliseksi lämpöresistanssiksi  $\theta_{\text{CS}} \approx 0,4^\circ/\text{W}$ ! Regulaattorin suurin sallittu liitoslämpötila on  $T_{\text{J}} = 125^\circ$  ja ympäristön lämpötila  $T_{\text{A}} = 25^\circ$  – toimiiko regulaattori, vai kuumeneeko liikaa?



**Vastaukset:**

- 101.  $\hat{u}_C \approx 9,9$  V,  $\Delta u_C = 1,06$  V,  $P_{\text{REG}} \approx 2,2$  W
- 102.  $U_{\text{OUT}1} = 6$  V,  $U_{\text{OUT}2} = 24$  V,  $U_{\text{OUT}3} = -12$  V
- 103.  $T_{\text{J}} = 115^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{REG}} = 10$  W.
- 104. Ei sopinut neljättä tehtävää! Koalue päätty tähän.