Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

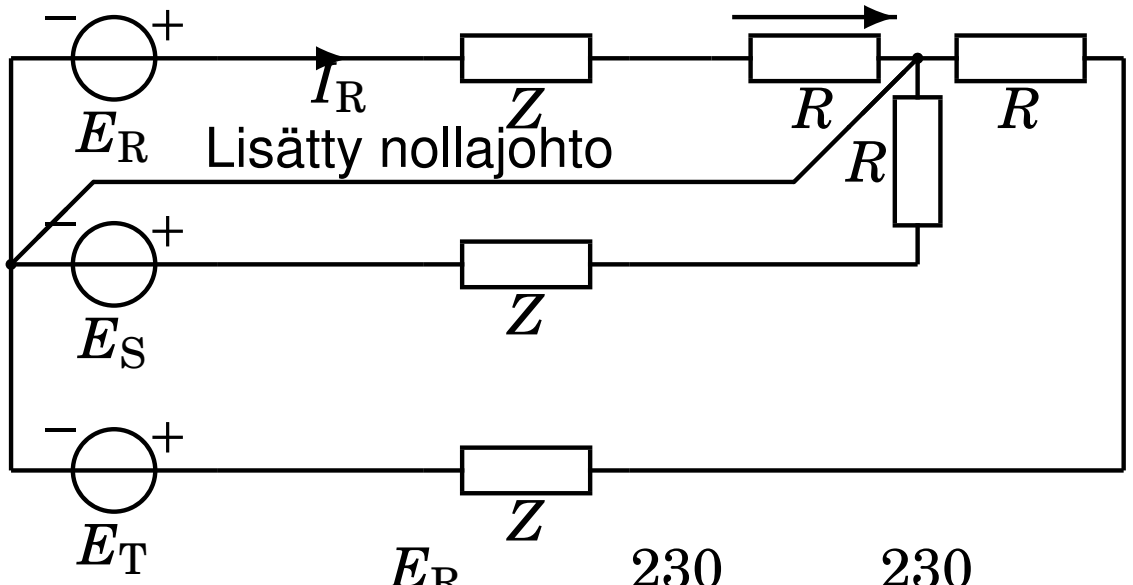
Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

12.10.2022

Kotitehtävä 4

Kuvassa on symmetrinen kolmivaihejärjestelmä. Laske yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla vastusten R yhdessä ottama teho eli pätöteho P. $E_\mathrm{R} = 230\angle 0°$ V, $Z = (2 + \mathrm{j}8)\ \Omega$, $R = 4\ \Omega$.



$$I_\mathrm{R} = \frac{E_\mathrm{R}}{Z+R} = \frac{230}{2+\mathrm{j}8+4} = \frac{230}{6+\mathrm{j}8} = 23\angle -53{,}13°\,\mathrm{A} \qquad (1)$$

$$P = 3\cdot \mathrm{Re}\left[UI^*\right] = 3\cdot P_\mathrm{R} = 3R|I_\mathrm{R}|^2 = 3\cdot 4\,\frac{230^2}{6^2+8^2} = 6348\,\mathrm{W} \qquad (2)$$

Siirtojohdot, *Transmission Lines*

Luento 12.10.2022, vrt. laboratoriotyö nr. 3.

- Siirtojohdon käsite
- Esim. antenni- tai muu koaksiaalikaapeli, ATK-verkko
- Aaltojen ja pulssien eteneminen äärellisellä nopeudella
- Tarkastelu ajan funktiona
- Ominaisimpedanssi (aallon näkemä, ei ole mikään vastus!)
- Heijastus- ja läpäisykerroin (jännitteen ja virran)
- Siniaallot siirtojohdolla (jatkuvassa tilassa)
- Smithin kartta ja siniaalto (oheismateriaalia)
- Teoriaa: Elektroniikka ja sähkötekniikka, kirjan sivut 427–455.

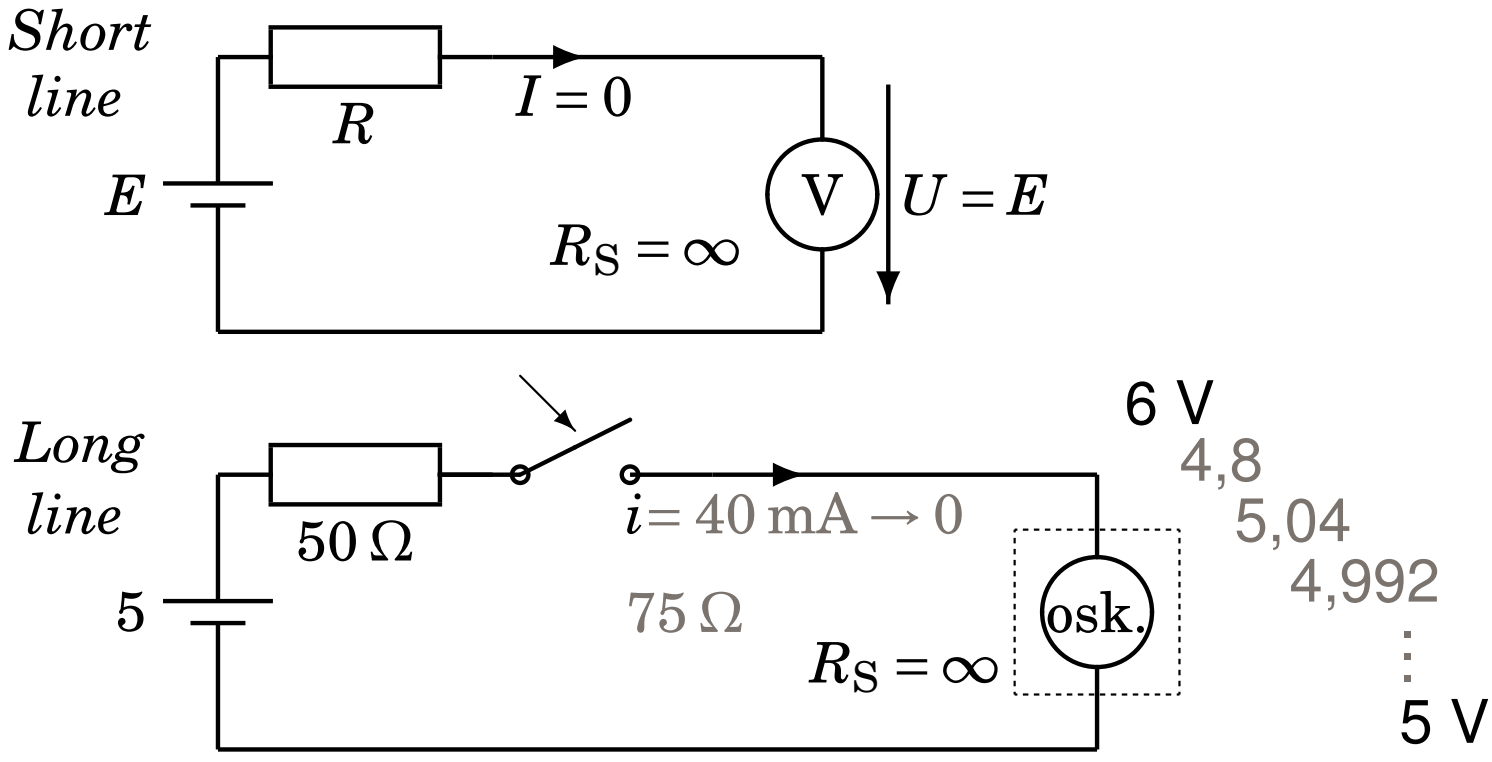
Tehtävä

- Kerro henkilölle, joka *ei ole* tällä kurssilla tai joka *on* tällä kurssilla, siirtojohtoteoriasta: mm. aaltojen heijastumisesta ja äärellisestä kulkuajasta, sovelluskohteista ym.
- Vakuuttele itsellesi ja hänelle asian mielenkiintoisuutta.
- Toista sama jollekin kurssin alkuosan viikoista siinä vaiheessa, kun kertaat laskuharjoituksia tai luentoja.
- Pyri tekemään tämä kaikkien viiden viikon osalta.
- Kerronta selkeyttää ajatuksiasi ja parantaa muistiasi.

Lyhyt johdinpari vs. (pitkä) siirtojohto

Kuvan esimerkkilukuarvot ovat todellisia, siirtojohtoteoria ei ole satua!

Yläkuvassa lopputila, alakuvassa tilanteen kehittyminen:

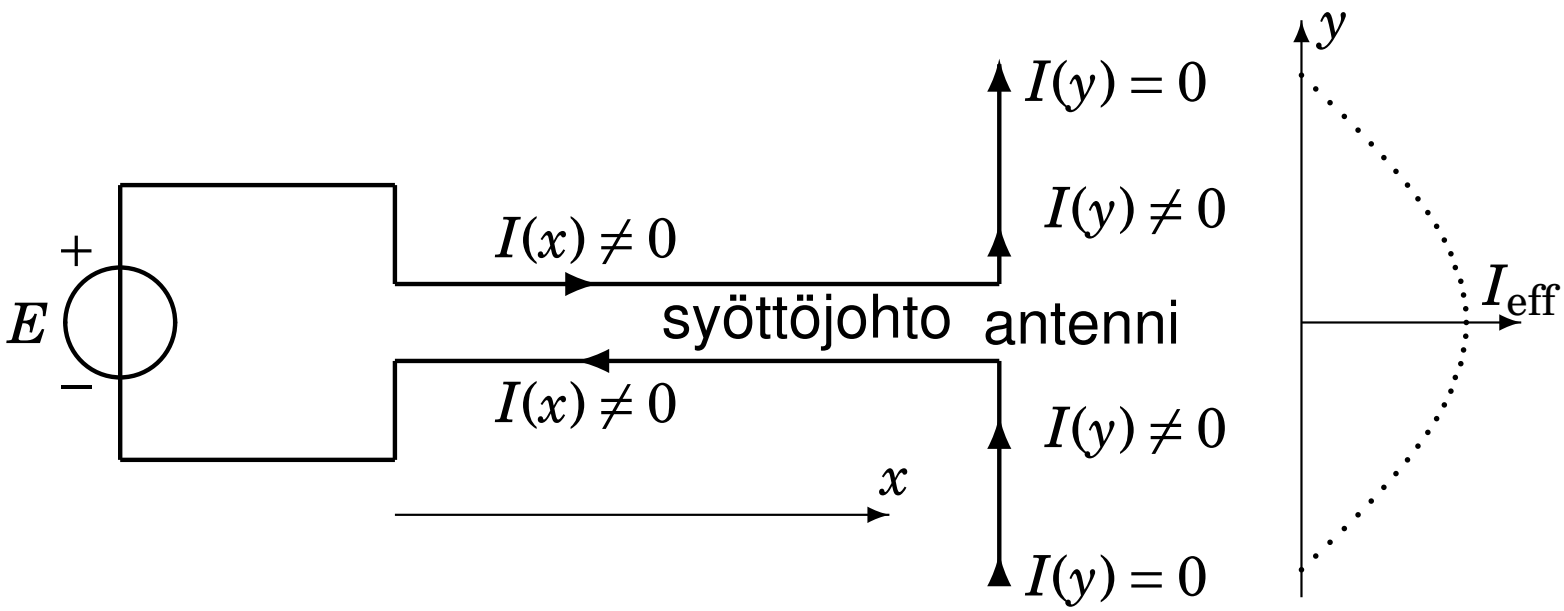


coaxial: esim. 100 m ← + 100 m → ⇔ 0,5 μs + 0,5 μs

Dipoliantennin virtajakauma muistuttaa siirtojohtoa

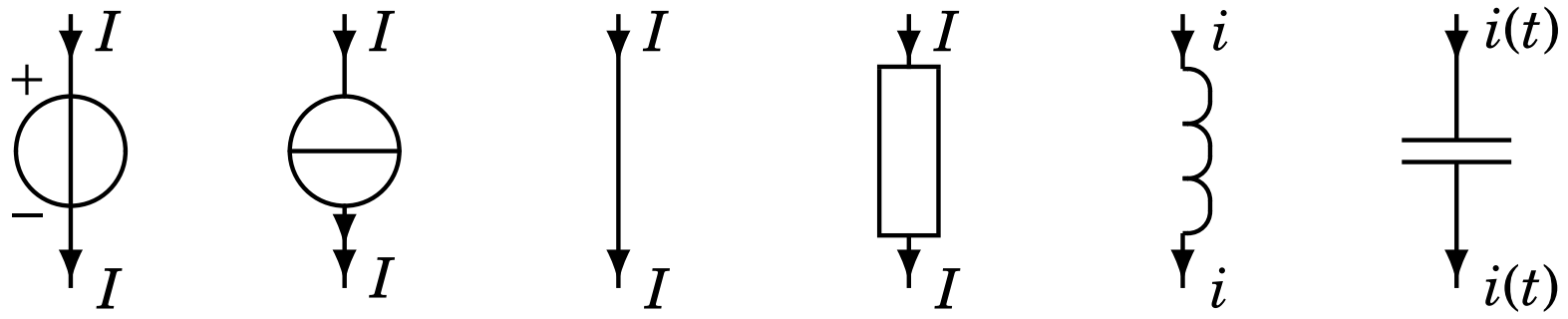
Koko pituus y-akselin suunnassa on $\lambda/2$

Virta ei voi kulkea "viiksien" päissä, koska johdin päättyy.
Silti lähetinantenniin kulkee virtaa, samoin vastaanottoantennista.



Keskitetty komponentti, *Lumped Component*

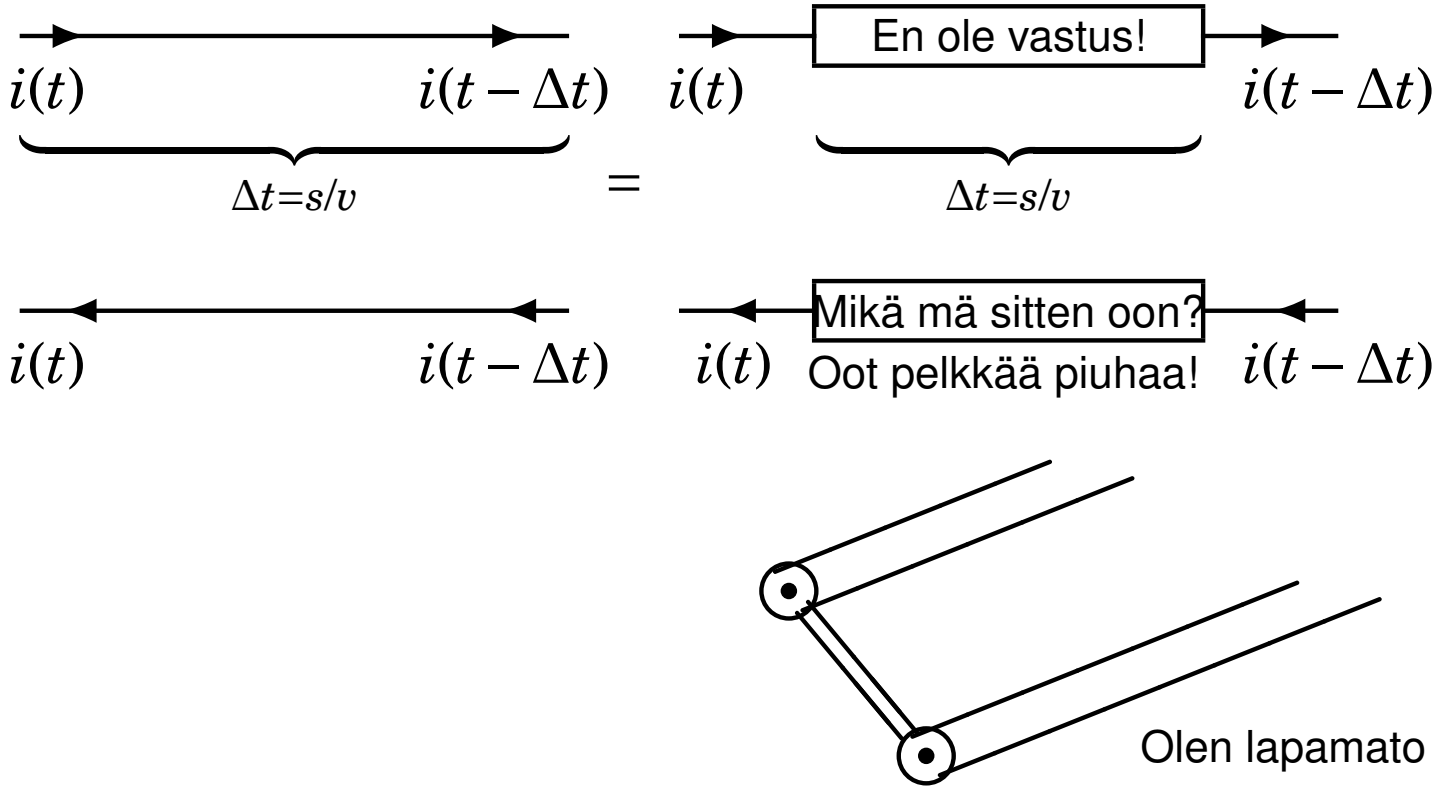
Molemmissa päissä samalla hetkellä sama virta



Tätä viikkoa lukuunottamatta kurssin komponentit ovat keskitettyjä! Oletus pätee pienillä taajuuksilla ja "hitaissa" digitaalipiireissä.

Siirtojohto (johdinpari), *Distributed Component*

Johdon viive Δt otetaan huomioon. Kaksi piirrosmerkkiä (vrt. lapamato):



Aalto etenee kuvissa vasemmalta oikealle. Jotta virran hetkellisarvo olisi sama, esim. $i(t_1) = 1$ mA, pitää kellon eli ajan t olla johdon loppupäässä Δt:n verran enemmän kuin alkupäässä.

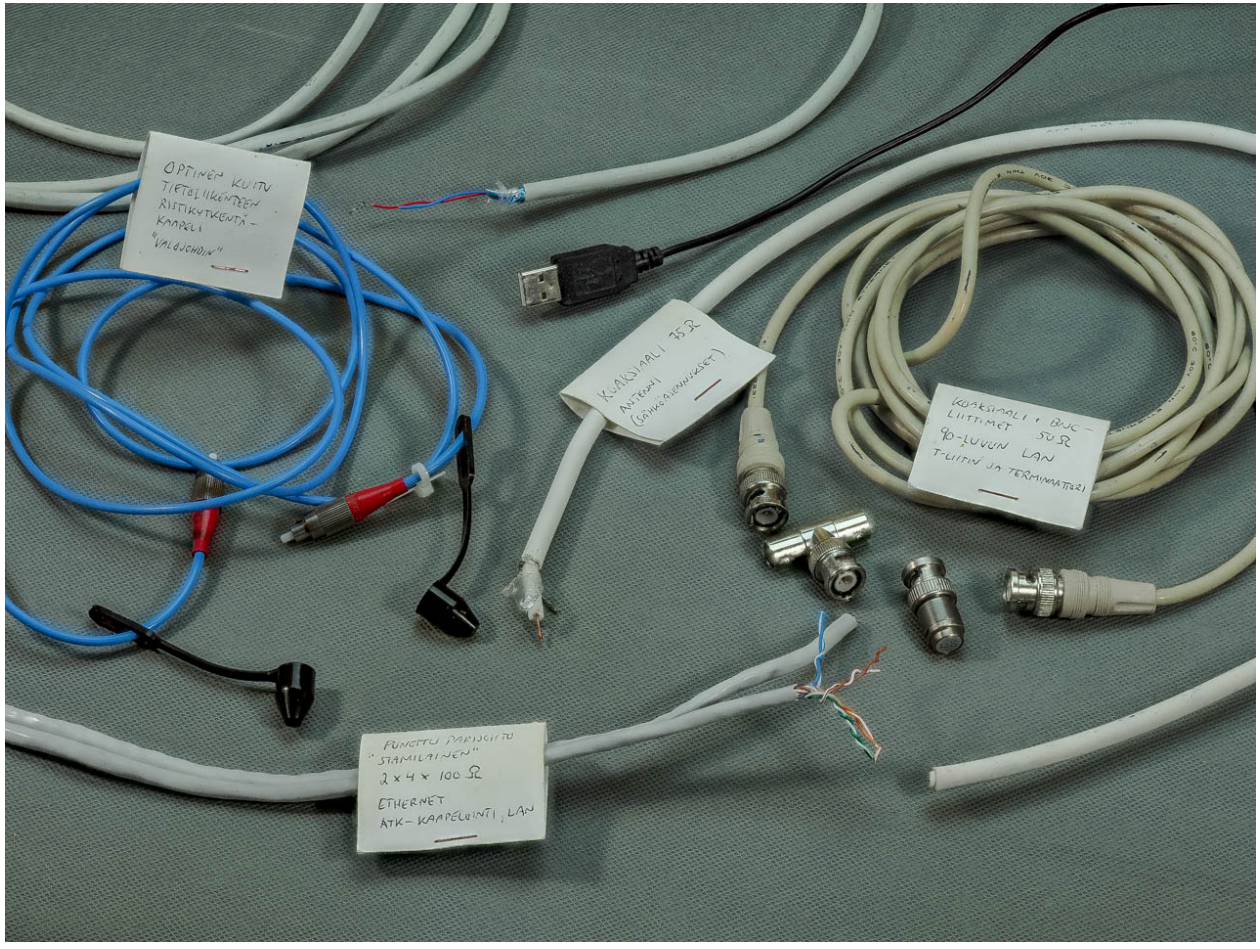
Siirtojohtoja

Mikä tahansa tavallinen kaapeli on siirtojohto

- Häviötön: johtimissa ei ole resistanssia ja eriste ei vuoda
- Ominaisimpedanssi riippuu vain poikkileikkauksesta (muoto), poikkileikkauksesta (A, d) ja poikkileikkauksesta (eriste).
- Johdon pituus tai johtimien materiaali ei vaikuta!
- Koaksiaalikaapeli, antennikaapeli (*coaxial cable*) $50 \ldots 75\ \Omega$
- Parijohto, lapamato (*twin wire*) $240 \ldots 300\ \Omega$
- Punottu parijohto, ethernet-kaapeli (*twisted pair*) $100\ \Omega$
- USB3-kaapeli $90 \pm 7\ \Omega$
- Liuskajohto piirilevyllä (*microstrip line*) $Z \propto \frac{1}{Width}$
- Optinen kuitukaapeli, aaltoputki (*waveguide*)
- Siirtojohtoanalogia: ääni, radioaallot tai valo

Siirtojohtoja käytännössä

USB-kaapeli, 2 x koaksiaali sekä T-liitin ja terminaattori (keskellä ja oikealla), ethernet (alhaalla), optinen kuitu (sininen), ylimpänä puhelinkaapeli

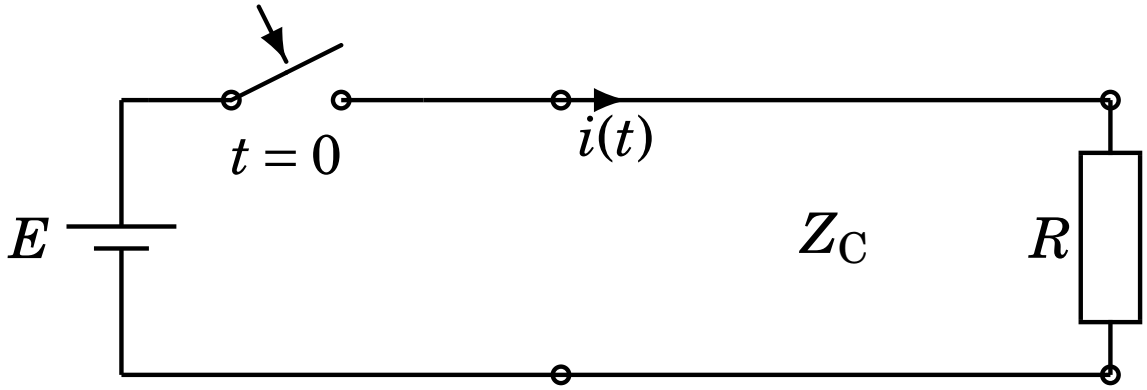


Valo kulkee optisessa kuidussa

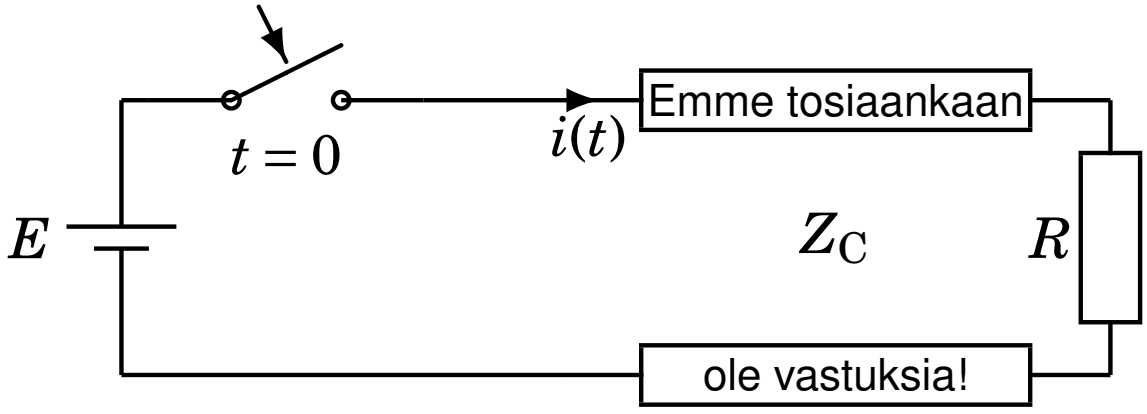
Sinisen lasikuidun toinen pää pilkistää mansikkalaatikon pohjan reiästä

Siirtojohto, *Transmission Line*

Ominaisimpedanssin merkitys. Ylä- ja alakuva ovat samoja eri merkinnöin.



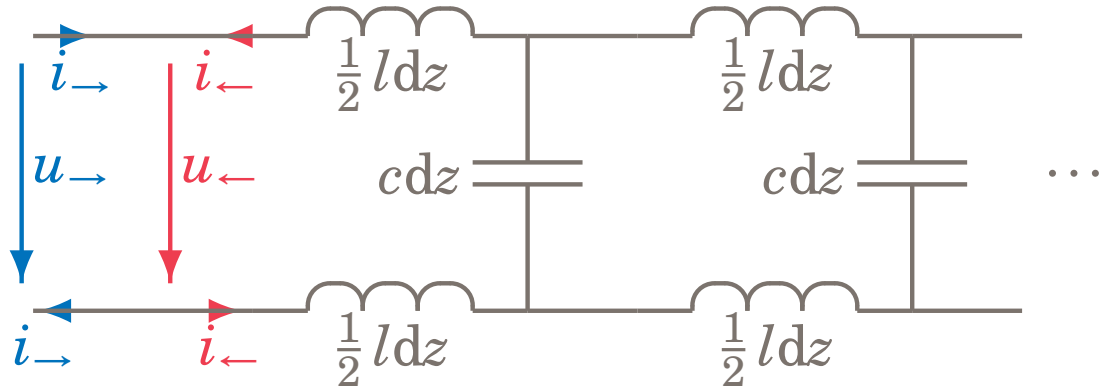
=



$$i(0) = \frac{E}{Z_C} \qquad i(t) \to \frac{E}{R}$$

Häviötön siirtojohto, *Lossless Transmission Line*

Piirimalli, ei resistansseja! Aallon jännite ja virta (sininen tai punainen, vrt. suunta)



Ominaisimpedanssi *Characteristic impedance* ei riipu pituudesta
Etenemisnopeus *Speed of light*

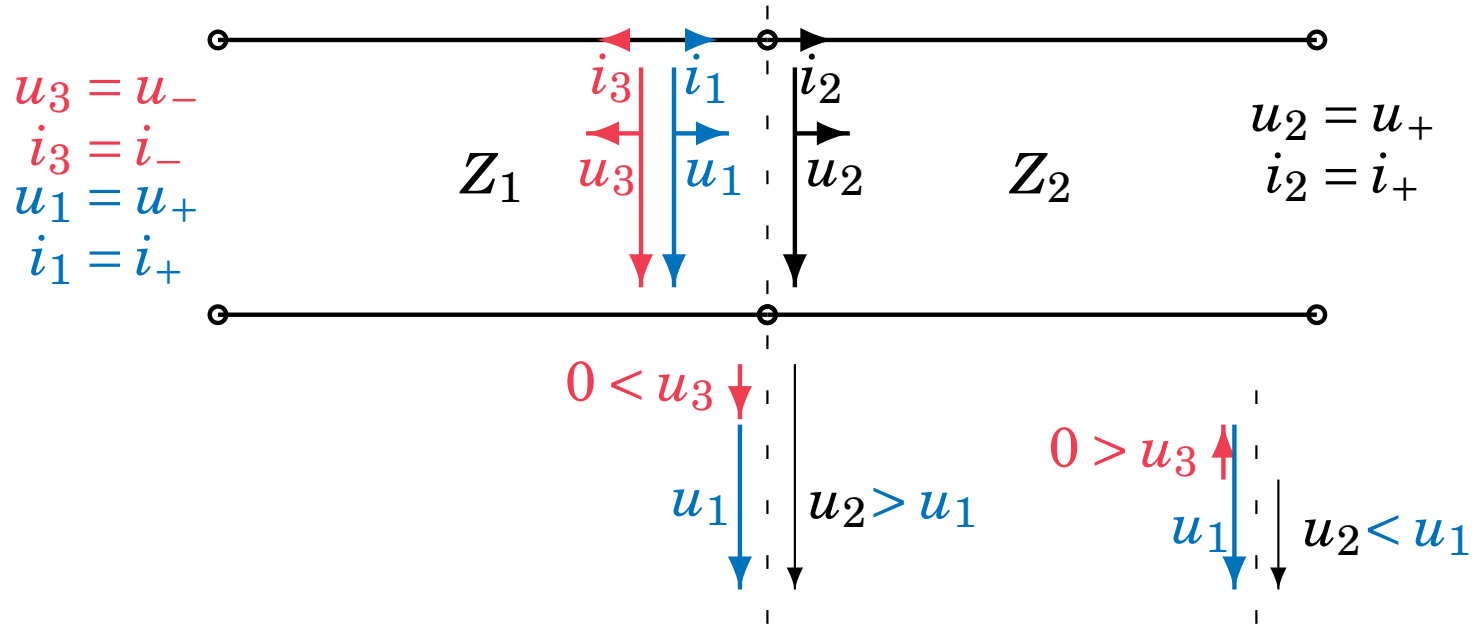
$$Z_\mathrm{C} = \frac{u_\rightarrow}{i_\rightarrow} = \frac{u_\leftarrow}{i_\leftarrow} = \sqrt{\frac{l}{c}} \qquad v = \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_\mathrm{r}\varepsilon_\mathrm{r}}}$$

Ominaisimpedanssi = etenevän aallon (ei johdon) $\frac{jännite}{virta}$

Rajapintaehdot, *Border Conditions*

Kerrostamis- eli superpositioperiaate. Johdon jännite ja virta = aaltojen summa

$$i_1 - i_3 = i_2 \qquad \frac{u_1}{Z_1} - \frac{u_3}{Z_1} = \frac{u_2}{Z_2}$$



$$u_1 + u_3 = u_2 \qquad (superposition)$$

Huom! $p_1 = p_2 + p_3$, mutta $p_1 + p_3 \neq p_2$ eli tehoa ei voi kerrostaa.

Tehtävä

Johda edellisen sivun yhtälöiden perusteella seuraavat suhdeluvut impedanssien funktiona eliminoimalla joko u_3 tai u_2:

$$\frac{u_2}{u_1} = ?$$

$$\frac{u_3}{u_1} = ?$$

Tarkista, että teho "säilyy"eli tuleva = läpäissyt + heijastunut:

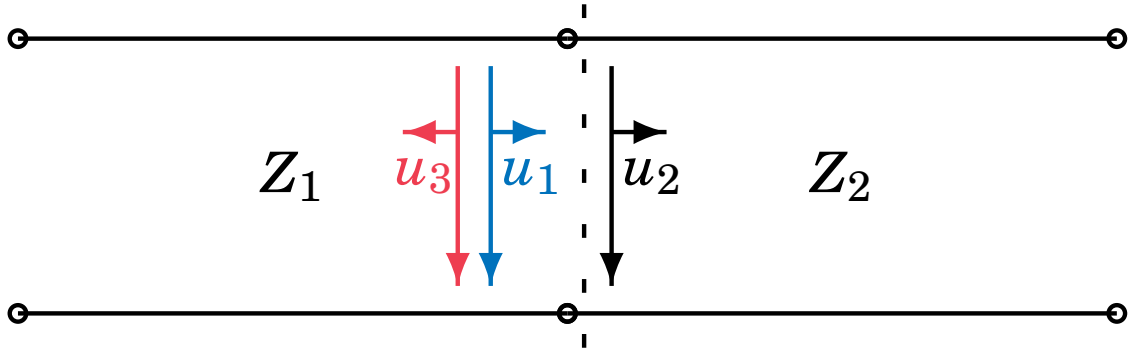
$$p_1 = p_2 + p_3 \tag{3}$$

$$u_1 i_1 = u_2 i_2 + u_3 i_3 \tag{4}$$

$$\frac{u_1^2}{Z_1} = \frac{u_2^2}{Z_2} + \frac{u_3^2}{Z_1} \tag{5}$$

Heijastus- ja läpäisykerroin

ρ ja τ ratkaistaan edellisen sivun yhtälöistä. Siirtojohtojen rajapinnassa:



Reflection Coefficient ρ, Transmission Coefficient τ

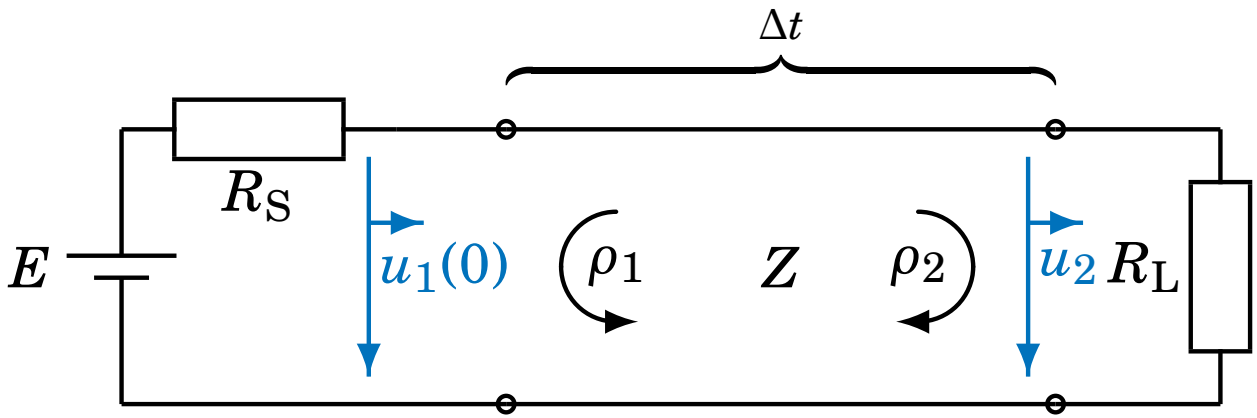
$$u_3 = \overbrace{\rho}^{\text{rho}} u_1 \qquad u_2 = \overbrace{\tau}^{\text{tau}} u_1 = \overbrace{(1+\rho)}^{\tau} u_1$$

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \qquad \tau = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Kertoimia käytetään **vain** johdolta tulevalle aallolle, ei jännitelähteestä tulevalle (mutta kyllä siihen menevälle)!

Terminaattorit

Heijastuminen ja läpäisy kuten siirtojohtojen rajapinnassa

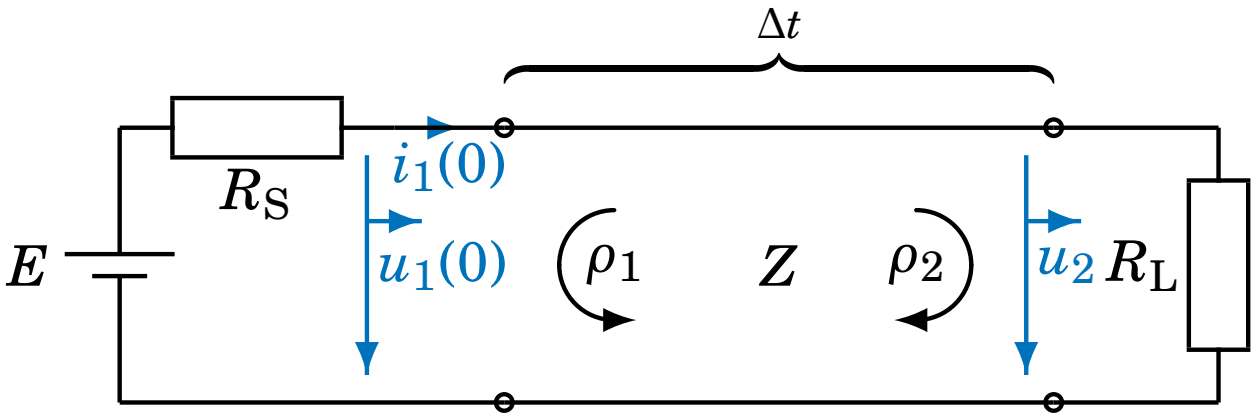


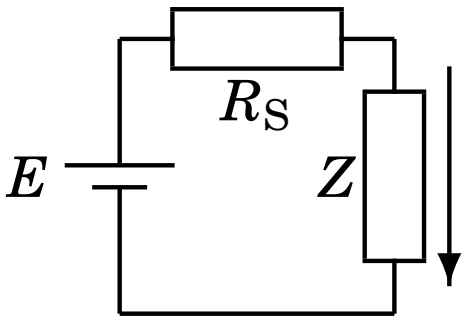
$$\rho_1 = \frac{R_S - Z}{R_S + Z} \qquad \rho_2 = \frac{R_L - Z}{R_L + Z}$$

$$\tau = \frac{2R_L}{R_L + Z}$$

Johdolle lähtevä aalto

Jännite johdolla, kun $t = 0 \ldots \Delta t$. Jännitteenjakaja. Huom. τ ei toimi alkupäässä!



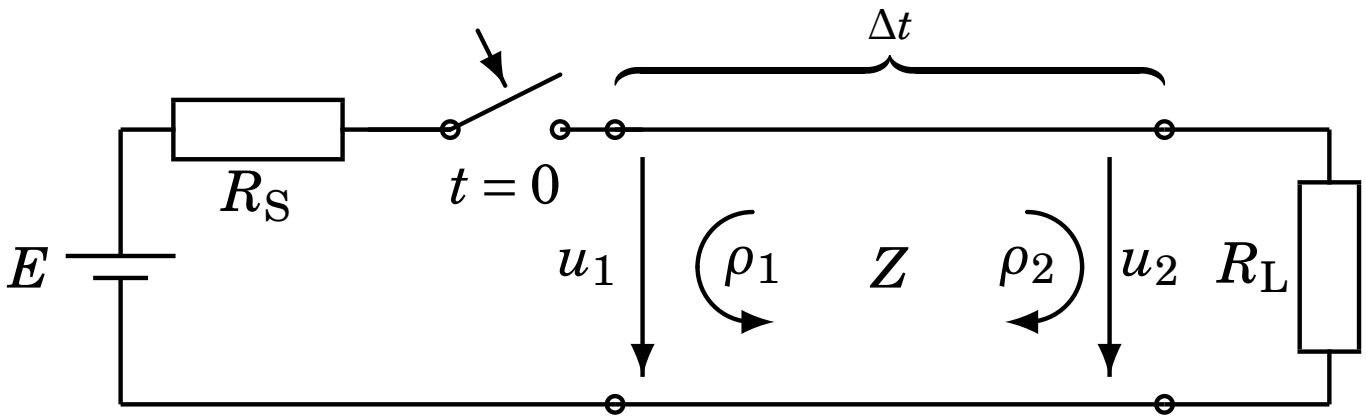


$$u_1(0) = Z i_1(0) = \frac{Z}{R_S + Z} E \qquad u_2(\Delta t) = \tau u_1(0)$$

Alakuvassa tilanne johdon alkupään kannalta

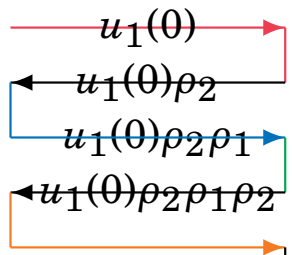
Edestakaiset heijastukset

Jännitteet kerrostuvat



$$u_1(0) = \frac{Z}{R_S + Z} E$$

$$u_2(0) = 0 \qquad \tau = 1 + \rho_2$$



Geometrinen sarja

$$u_2(\Delta t) = u_2(0) + \tau u_1(0)$$

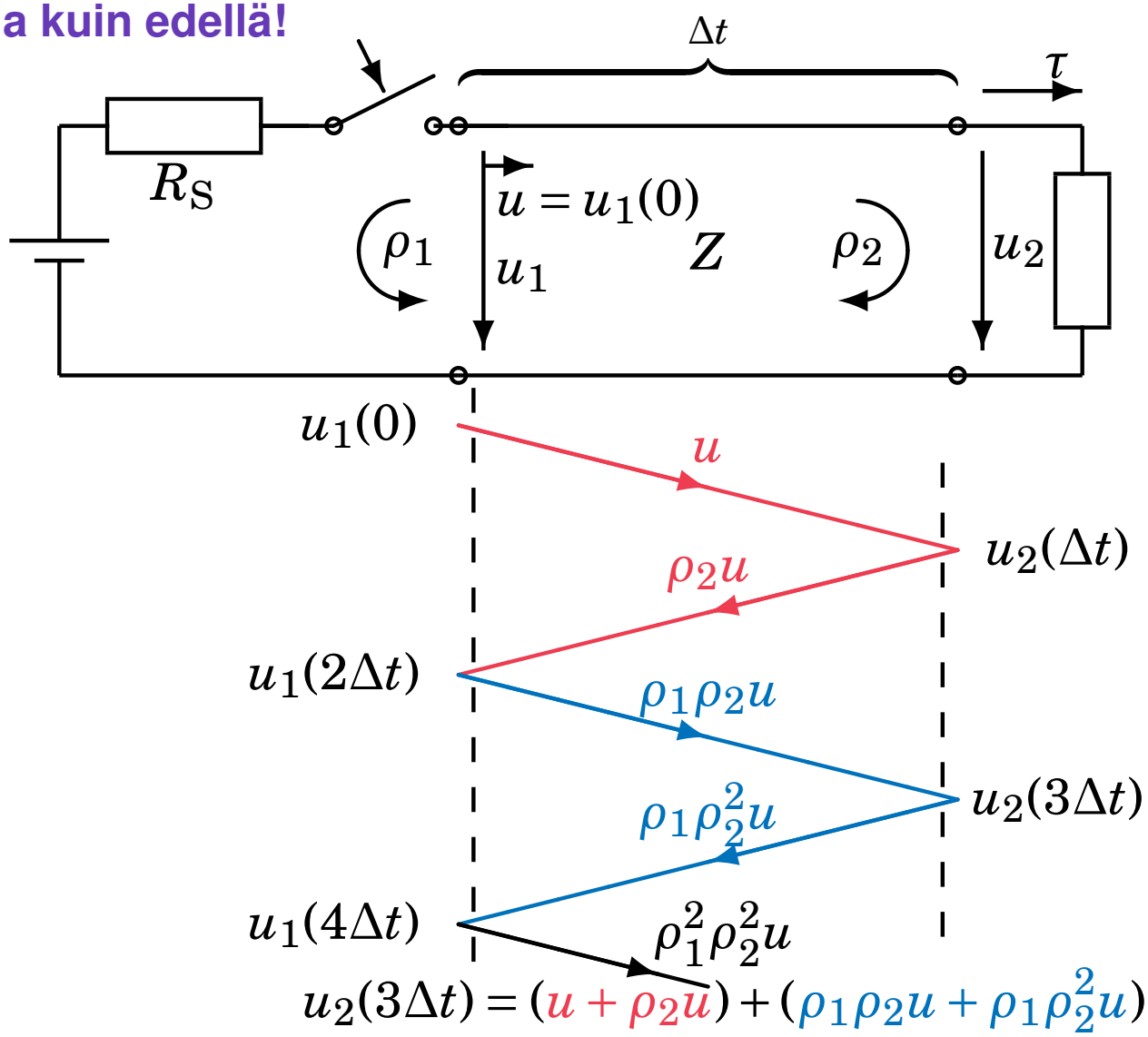
$$u_2(3\Delta t) = u_2(\Delta t) + \rho_1\rho_2\tau u_1(0)$$

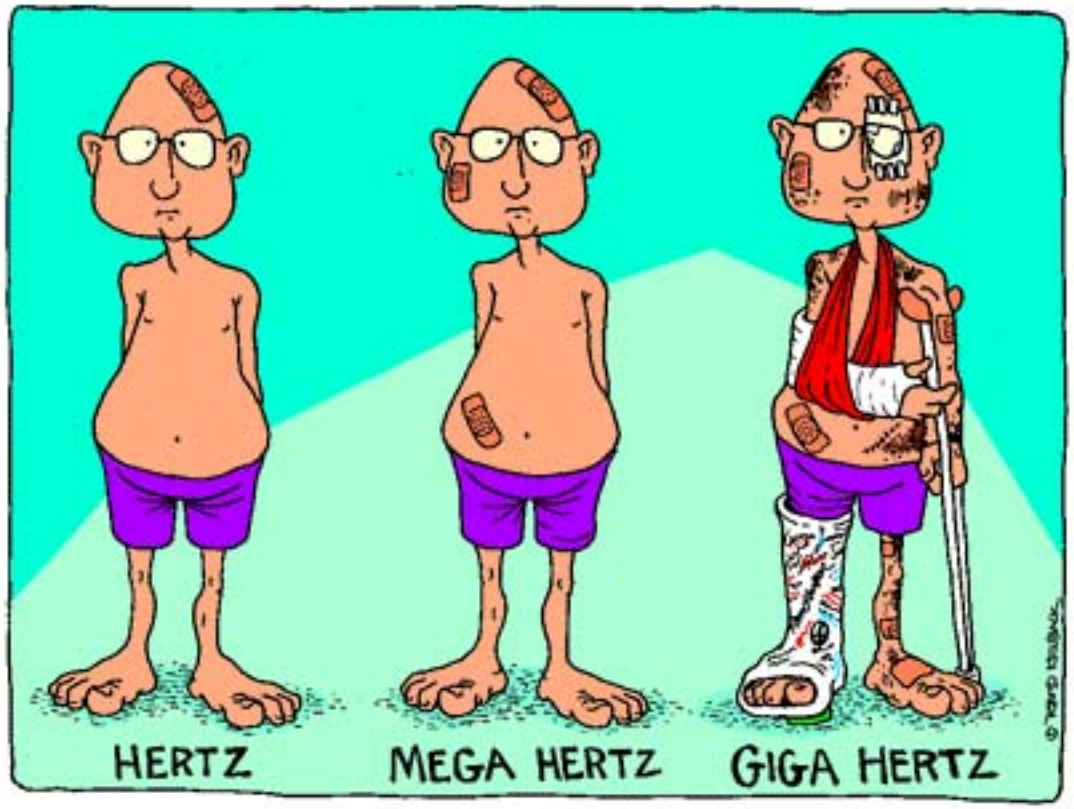
$$u_2(5\Delta t) = u_2(3\Delta t) + (\rho_1\rho_2)^2\tau u_1(0)$$

$$\rightarrow \frac{\tau u_1(0)}{1 - \rho_1\rho_2} = \frac{R_L}{R_S + R_L} E$$

Heijastuskaavio, edestakaiset heijastukset

Sama asia kuin edellä!



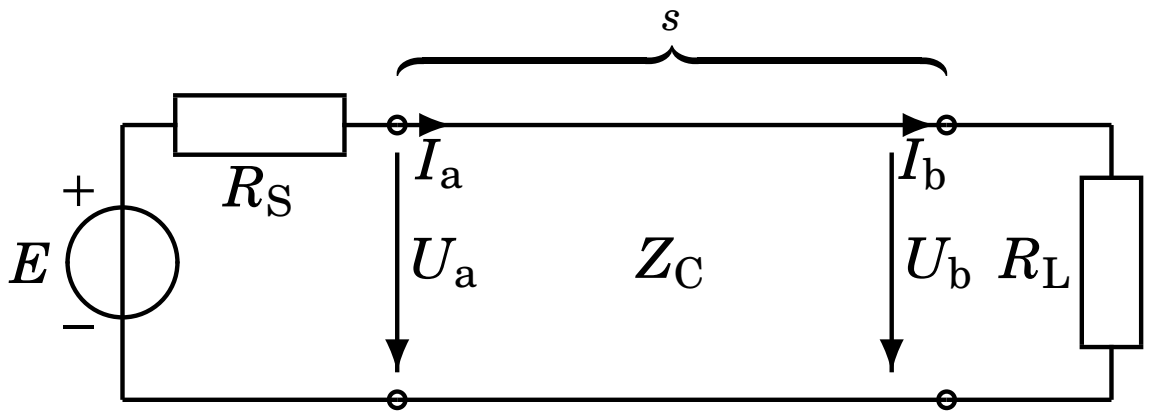


©Rand Kruback, Agilent Technologies

Terahertsialue (kaukoinfrapuna) millimetriaaltojen ja valon aallonpituuksien välissä on vielä lähes käyttämätön spektrin resurssi!

Siniaalto, vain jatkuva tila, *Steady State*

Jännite ja virta johdon alku- ja loppupäässä edestakaisten heijastusten resultanttina



Yhtälöt on johdettu kirjassa EjSt:

$$U_a = U_b \cos \beta s + \mathrm{j} Z_C I_b \sin \beta s$$

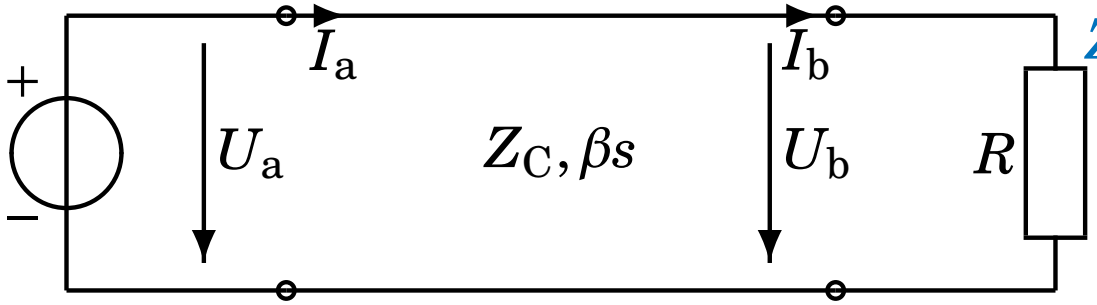
$$I_a = \mathrm{j} \frac{U_b}{Z_C} \sin \beta s + I_b \cos \beta s$$

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{360^\circ}{\lambda} \qquad v = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} = \lambda f$$

Muuttuuko jännite, kun johto pitenee?

Ja mihin suuntaan?

Esim.
$Z_C = 2R$



$$U_a = U_b \left[\cos \beta s + j \frac{Z_C}{R} \sin \beta s \right]$$

$$\beta s = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 0 = 0^\circ \Rightarrow U_a = U_b \cdot 1{,}0 \angle 0^\circ$$

$$\beta s = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{50} = 7{,}2^\circ \Rightarrow U_a = U_b \cdot 1{,}02 \angle 14{,}2^\circ$$

$$\beta s = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{20} = 18^\circ \Rightarrow U_a = U_b \cdot 1{,}13 \angle 33{,}0^\circ$$

$$\beta s = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{10} = 36^\circ \Rightarrow U_a = U_b \cdot 1{,}43 \angle 55{,}5^\circ$$

Siirtojohto vai ei (rajana $\lambda/50$)?

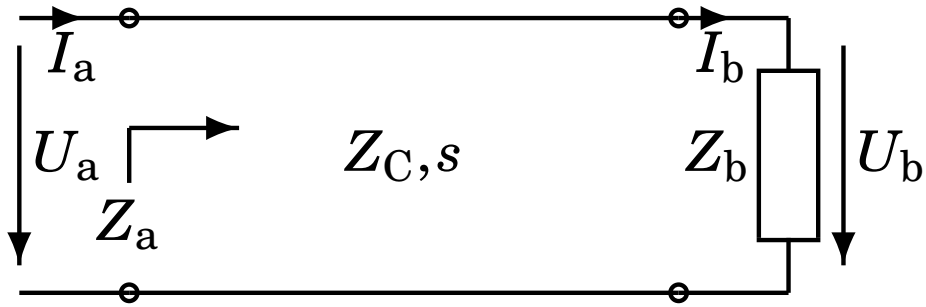
Oletuksena $\varepsilon_\mathrm{r} = 4$. Virta kulkee pääosin johtimen pintakerroksessa δ.

	f	*Length more than* $\lambda/50$ $(\varepsilon_\mathrm{r} = 4)$	*Skin Depth* δ/mm (Cu)
Verkkovirta	50 Hz	60 km	9,3
Audio	1 kHz	3 km	2,1
HiFi	20 kHz	150 m	0,47
FM-radio	100 MHz	3 cm	0,007
WLAN, Bluetooth	2,4 GHz	1,2 mm	0,001

Aallon (valon) nopeus v ja virran tunkeutumissyvyys δ:

$$\mu_\mathrm{r} = 1 \qquad v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_\mathrm{r}}} = \lambda \cdot f \qquad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

Z_a riippuu syöttöjohdon pituudesta, $Z_\mathrm{a} \neq Z_\mathrm{b}$



$$Z_\mathrm{a} = \frac{U_\mathrm{a}}{I_\mathrm{a}} = \frac{\overbrace{U_\mathrm{b}}^{Z_\mathrm{b} I_\mathrm{b}} \cos \beta s + \mathrm{j} Z_\mathrm{C} I_\mathrm{b} \sin \beta s}{\mathrm{j} \frac{U_\mathrm{b}}{Z_\mathrm{C}} \sin \beta s + I_\mathrm{b} \cos \beta s}$$

$$\frac{Z_\mathrm{a}}{Z_\mathrm{C}} = \frac{\frac{Z_\mathrm{b}}{Z_\mathrm{C}} + \mathrm{j} \tan \beta s}{1 + \mathrm{j} \frac{Z_\mathrm{b}}{Z_\mathrm{C}} \tan \beta s} \Rightarrow \text{Smithin kartta}$$

Luentoviikkojen sisältö

Yhteyksiä käytäntöön

1. Kaikissa virtapiireissä olennaiset peruslait.
2. Komponenttien toiminnan perusta. Ajan funktiona muuttuvat ei-periodiset (ja periodiset) jännitteet ja virrat (signaalit). Kytkimien aiheuttamat kertailmiöt.
3. Siniaalto ja muut jaksolliset aaltomuodot, muutos toistuvaa. Signaalien käsittely elektroniikassa. Sähkövoimatekniikka, vaihtovirta 50 Hz.
4. Vaihtovirran teho. Sähkön tuotanto ja siirto kuluttajien ja teollisuuden näkökulmista.
5. Sähkön aaltoluonne. Suuret taajuudet, pitkät johdot, RF-tekniikka. Nopeat digitaalitekniikan pulssit.
6. . . . 10. Elektroniikkaa

1. välikoe, ti 18.10. klo 14.00-17.00 C-sali (Kandikeskus, 2. krs.)

- Kako, laskin (myös graafinen), (MAOL), (sanakirja)
- 4 laskua
- Tulokset ja ratkaisut tulevat Mycoon
- Vanhat koetehtävät: https://mycourses.aalto.fi/course/view.php?id=37237&section=4
- Palautejärjestelmä avataan myöhemmin. Lisäpisteet!
- Kurssi jatkuu välikokeen jälkeen 2. periodilla elektroniikalla. Siihen pääsee helposti kiinni, vaikka ei vielä osaisi kompleksilukuja. Tsemppiä!
- Laboratoriotyöt alkavat 24.10.2022.

Ensi kerralla

- Toisella periodilla aloitetaan elektroniikka ja puolijohdekomponentit
- Kotitehtävät jatkuvat
- 6. Diodi, LED
- 7. Bipolaaritransistori: BJT
- 8. Kanavatransistorit: FET
- 9. Operaatiovahvistin (IC)
- 10. Teholähteet (Regulaattori, Switched-mode)
-
- 2. välikoe ja tentti
- Tsemppiä!