

Tiia Monto
tiia.monto@jyu.fi
04075218560

Työ tehty: 1.3. ja 8.3.2010

FysE301/A Peruskomponentit: vastus, diodi ja kanavatransistori

Assistentti:

Arvostellaan:

Abstract

Työssä tutkittiin vastusta, diodia ja transistoria. Melko yksinkertaisessa kytkennässä tote-
sin mitatun ja Kirchhoffin lakeja käyttämällä laskettujen virran arvojen vastaavan toisiaan
mainiosti. Toisessa kytkennässä määrättiin Thevenin jännite ja vastus sekä mitatuista ar-
voista kuormitussuoraa käyttäen että Thevenin teoreeman avulla laskien, jolloin lasketut
arvot olivat mitattuja arvoja hieman suurempia. Sekä diodi- että transistorikytkennän
kokeellisista arvoista saadut jännite-virta -arvoparit osuvat sopivasti ominaiskäyräsovi-
tuksiini, mutta mittauspisteiden vähyysdin vuoksi käyrät ovat vain suuntaa antavia.

Sisältö

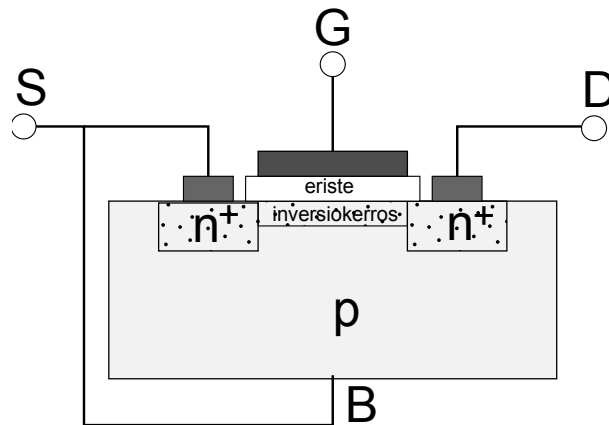
1	Johdanto	1
2	Teoreettiset lähtökohdat	1
2.1	Ohmin ja kirchhoffin lait	1
2.2	Thevenin ekvivalentti	2
2.3	Diodi	3
2.4	Transistori	3
3	Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät	3
3.1	Kytkentälevy	3
3.2	Muu laitteisto ja mittaukset	4
4	Havainnot ja laskut	5
4.1	Virran jakautuminen ja superpositioteoreema	5
4.2	Jännitteen jako, Thevenin teoreema	6
4.2.1	Kuormitussuora	6
4.2.2	Thevenin ekvivalentti	7
4.3	Diodi	8
4.3.1	Toimintapiste	9
4.3.2	Dynaaminen resistanssi	10
4.4	Rajoittimet	10
4.4.1	Sarjarajoitin	10
4.4.2	Rinnakkaisrajoitin	11
4.5	Transistori	13
5	Johtopäätökset	14
6	Liitteet	14

1 Johdanto

Työssä tutkittiin kolmea elektroniikan peruskomponenttia: vastusta, diodia ja kanavatransistoria.

Vastus on usein sylinterinmuotoinen muutamia millimetrejä pitkä elementti, [2, s. 952] jolla on jokin tietty resistanssin arvo. Toinen vastusmuoto on säätövastus, josta käyttäjä voi portaattomasti säätää resistanssin arvoa nollan ja jonkin tietyn maksimiarvon väliltä. Vastuksen merkitys piirissä on pienentää potentiaalia.

Diodi on kaksipäinen komponentti, joka toimii kuin kytkin päästäen virran kulkemaan myötäsuuntaan ja pyrkien estämään virran kulku estosuuntaan.[1, s. 77] Ideaalinen diodi on lineaarinen ja se estää virran kulun estosuuntaan kokonaan. Sen sijaan reaalinen pn-diodi on luonteeltaan epälineaarinen ja sen pn-rajapinnan lävitse kulkee pieni estosuuntainen vakiovirta vähemmistövarauksenkuljettajien kuljettamana.



Kuva 1: NMOS-transistori

Kanavatransistori (FET) on työn monimutkaisin tutkittava elementti. Kyseessä oli kuvan 1 kaltainen MOSFET-tyyppinen transistori, joka muistuttaa paljonkin JFET-transistoria. Siinä on kolme piiriin kiinnitettävää päätä, jotka vastaavat transistorin kolmea osaa: lähdettä, nielua ja hilaa. Lähde- ja nieluosa ovat kummatkin kiinnitettyinä sisustassa olevaan kahteen n-puolijohdeosaan, joita yhdistää hilaa koskettava p-tyypin puolijohdeosa. Hilajännitteellä kontrolloidaan transistorin virtaa ja n-puolijohdeiden välille syntyy n-tyyppinen inversiokerros.[1, s. 147]

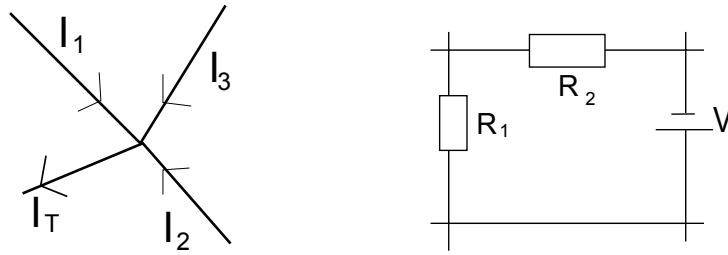
2 Teoreettiset lähtökohdat

2.1 Ohmin ja kirchhoffin lait

Ohmin lain mukaan jännitehäviö V vastuksen R yli voidaan laskea yhtälöllä

$$V = RI, \quad (1)$$

missä I on tutkittavan vastuksen läpäisevä virta.



Kuva 2: Kirchhoffin virtalaki pätee mille tahansa piirin solmupisteelle ja jännitelaki mille tahansa silmukalle.

Kirchhoffin virtalain mukaan piirissä mihin tahansa pisteeseen saapuvien virtojen summa on oltava nolla. Eli kuvan 2 vasemman puoleisen kuvan virtojen solmupisteessä on siis pädeittä

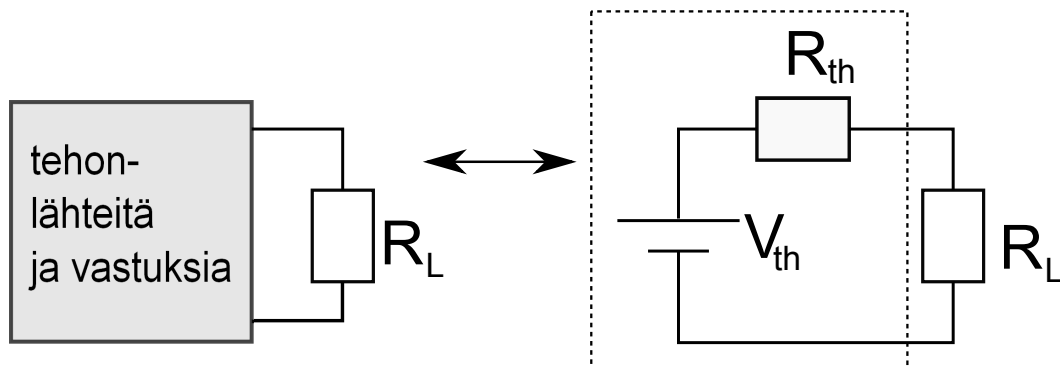
$$I_T = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2)$$

Kirchoff on määrännyt myös jännitelain, jonka mukaan mille tahansa silmukalle kokonaisjännitteen on oltava nolla. Kuvan 2 oikean puoleisessa silmukan muodostavassa piirin osassa jännitelähteen jännite V on oltava yhtä suuri kuin vastuksien R_1 ja R_2 aiheuttama jännitehäviöiden summa. Kun vastuksien läpi kulkevat virrat ovat I_1 ja I_2 , voidaan jännitehäviöt laskea yhtälöllä 1, jolloin saadaan silmukalle

$$V = R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2. \quad (3)$$

2.2 Thevenin ekvivalentti

Ekvivalenttikytkeä aiheuttaa kuormavastukselle saman läpi kulkevan virran ja jännitehäviön kuin alkuperäinen kytkentä.



Kuva 3: Vasemmanpuoleinen kytkentä ja oikean puoleisen kytkennän katkoviivoitetun laatikon sisällä oleva osa on kuormavastuksen R_L kannalta samat.

Jos tarkasteltavassa kytkennässä on kuormavastus R_L sekä tehonlähteitä ja muita vastuksia, voidaan kytkennälle tehdä Thevenin ekvivalentti. Tällöin muunnetaan alkuperäinen kytkentä sellaiseen muotoon, että siinä on vain yksi jännitelähde ja yksi vastus sarjassa kuormavastuksen kanssa, kuten kuvan 3 oikean puolen kytkennässä on esitetty. Kuvassa jännite V_{th} on Thevenin jännite ja vastus R_{th} on Thevenin vastus.

Thevenin ekvivalentin kuormitussuora määritellään yhtälöllä

$$V_L = V_{th} - R_{th}I, \quad (4)$$

missä siis V_L on kuorman aiheuttama jännitehäviö ja I kuorman läpi kulkeva virta. Kuormitussuora on lineaarinen ja laskee virran nuostessa. Suora kertoo, paljon kuorman aiheuttama jännitehäviö on sen läpi kulkevan virran funktiona.

2.3 Diodi

Diodin ominaiskäyrä on muotoa

$$V_d = V_0 \ln\left(\frac{I_d}{I_0} + 1\right), \quad (5)$$

missä muuttujat I_d on diodin läpäisevä virta ja V_d diodin aiheuttama jännitehäviö. Parametrit V_0 ja I_0 ovat vakioita.

Diodillekin voidaan määrittää kuormitussuora tarkastelemalla diodikytkennän Thevenin ekvivalenttia, jolloin siis pätee yhtälö 4.

Toimintapiste on piste, jossa samaan kuvaajaan sijoitetut kuormitussuora ja ominaiskäyrä leikkaavat toisensa. Nyt siis kuormitussuoran ja ominaiskäyrän avulla voidaan ratkaista diodille toimintapiste yhtälöitä 4 ja 5 käyttämällä:

$$V_0 \ln\left(\frac{I_d}{I_0} + 1\right) = V_{th} - R_{th}I. \quad (6)$$

Ylläolevasta yhtälöstä voidaan siis ratkaista toimintapisteen virta I_d , kun tiedetään käyttöjännite V_{th} .

2.4 Transistori

Transistorin ominaiskäyrät määritellään kuvaajaan, jossa muuttujat ovat transistorin D-kanavaan saapuva virta I_d ja D- ja S-kanavan välinen jännite V_{ds} . Pienimmillä jännitteen arvoilla virta kasvaa voimakkaasti, mutta saturaatioalueella virta stabiloituu ja näkyy kuvassa lähestulkoon vaakasuorana viivana.

3 Mittauslaitteisto ja kokeelliset menetelmät

3.1 Kytkentälevy

Jokaisessa työn vaiheessa käytössä oli kuvan 4 mukainen kytkentälevy (Project Boards, K and H, Model GL-24).

Levyn pyöreät liittimet kytketään jännitelähteisiin. Katkoviivat kuvastavat ns. reikäjonoja, joihin tutkittavat komponentit kiinnitetään jalakkeistaan. Vaakasuorat katkoviivarivit



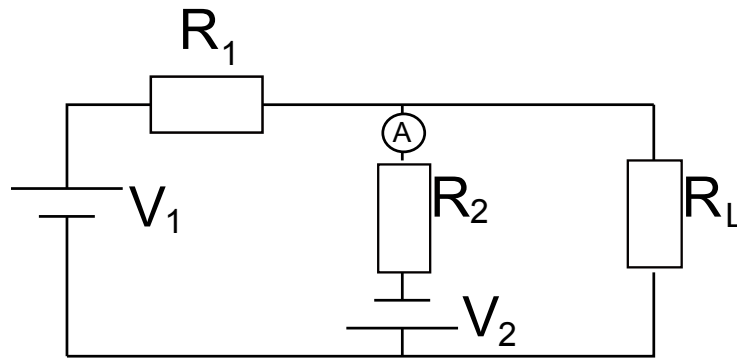
4 Havainnot ja laskut

Laskut suoritin Wolfram Mathematica 6.0.0 -ohjelmalla ja ne ovat liitteessä [2].

Vastuksien virheiksi määrittelen 5% vastuksen suuruudesta ja GW-jännitelähteen tasajännitteen virheeksi määrään suuruudesta riippumatta 0,5 V.

4.1 Virran jakautuminen ja superpositioteoreema

Tein kuvan 5 mukaisen kytkennän käyttäen vakiovastuksia $R_1 = 390\Omega$, $R_2 = 680\Omega$ ja $R_L = 560\Omega$. Lasken teoreettisen arvon vastuksen R_2 läpi kulkevalle virralle I_2 säätäen jännitteitä V_1 ja V_2 .



Kuva 5: Vastuksen R_1 läpi kulkee virta I_1 , vastuksen R_2 virta I_2 ja vastuksen R_L virta I_L . Virtamittari on sijoitettu mittaamaan virtaa I_2 .

Virtalakia, eli yhtälöä 2 mukaillen voidaan merkitä kuvan 5 kytkennän virroille pätevä yhtälö

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (7)$$

Samoin jännitelain yhtälöä 3 apuna käyttäen saadaan piirin silmukoille jännitettä ja jännitehäviötä kuvaavat yhtälöt

$$V_1 - I_1 R_1 - I_2 R_2 + V_2 = 0 \quad (8)$$

$$V_1 - I_1 R_1 - I_L R_L = 0. \quad (9)$$

Nyt muunnetaan yhtälö 7 muotoon $I_L = I_1 - I_2$. Sijoittamalla tämä yhtälöön 9 saadaan

$$\begin{aligned} V_1 - I_1 R_1 - (I_1 - I_2) R_L &= 0 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{V_1 + I_2 R_L}{R_1 + R_L}. \end{aligned} \quad (10)$$

Sijoitetaan yllä saatu muoto virrasta I_1 yhtälöön 8:

$$\begin{aligned} V_1 - \frac{V_1 + I_2 R_L}{R_1 + R_L} R_1 - I_2 R_2 + V_2 &= 0 \\ \Rightarrow I_2 &= \frac{(R_1 + R_L)(V_1 + V_2) - V_1 R_1}{R_L R_1 + R_2(R_1 + R_L)} \end{aligned} \quad (11)$$

Virhe saadaan yleisellä virheenetenemiskaavalla $\delta q = \sqrt{\sum_i \frac{\partial q}{\partial x_i} \delta x_i}$. Eli virran virhe saadaan yhtälöllä

$$\delta I_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial I_2}{\partial R_1} \delta R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial I_2}{\partial R_2} \delta R_2\right)^2 + \left(\frac{\partial I_2}{\partial R_3} \delta R_3\right)^2 + \left(\frac{\partial I_2}{\partial V_1} \delta V_1\right)^2 + \left(\frac{\partial I_2}{\partial V_2} \delta V_2\right)^2}, \quad (12)$$

jota käytin virheiden laskemisessa, laskut liitteessä [2].

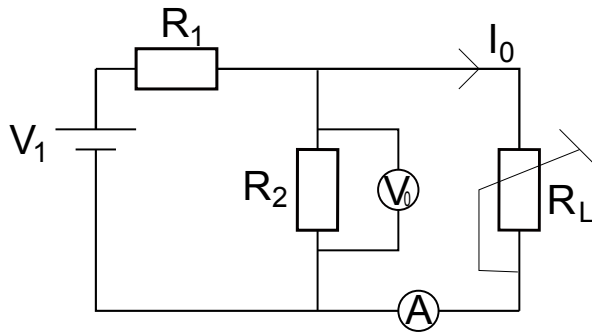
Ensimmäisessä mittauksessa ensimmäinen jännitelähde oli oikosuljettu $V_1 = 0$ ja $V_2 = 5$ V. Sitten oikosuljin toisen jännitelähteen $V_2 = 0$ ja säädin ensimmäiselle arvoksi $V_1 = 10$ V. Lopuksi annoin jännitteille arvot $V_1 = 5$ V ja $V_2 = 10$ V. Kutakin kolmea tapausta vastaavat virran lasketut (I_2) ja mitatut (I_{2K}) virran arvot sekä laskettua arvoa vastaavat virheet (δI_2) ovat taulukossa 1.

Taulukko 1: Virta I_2 vastuksen R_2 yli

V_1 (V)	V_2 (V)	I_2 (mA)	δI_2 (mA)	I_{2K} (mA)
0	5	5,5	0,7	5,5
10	0	6,6	0,8	6,5
10	5	12,0	0,9	12,1

4.2 Jännitteen jako, Thevenin teoreema

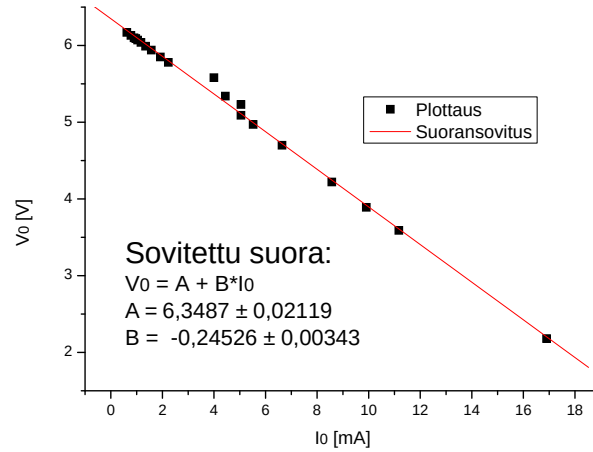
Thevenin ekvivalenttia koskevissa mittauksessa käytin kuvan 6 mukaista kytkentää, jossa käytin vastuksia $R_1 = 390\Omega$ ja $R_2 = 680\Omega$, jännitelähdettä $V_1 = 10$ V sekä kuormavastusta $R_L = \max. 100k\Omega$.



Kuva 6: Kytkenä

4.2.1 Kuormitusuora

Plottasin kuvan 6 kytkennän mukaisesta piiristä mitatut jännitteen V_0 ja virran I_0 arvot Origin Pro 7.5 -ohjelmalla kuvaan 7. Tein pisteille suoransovituksen, joka siis vastaa nyt kuormitusuoraa. Kuormitusuoran yhtälöksi Origin antoi $V_0 = A + B \cdot I_0$, missä $A =$



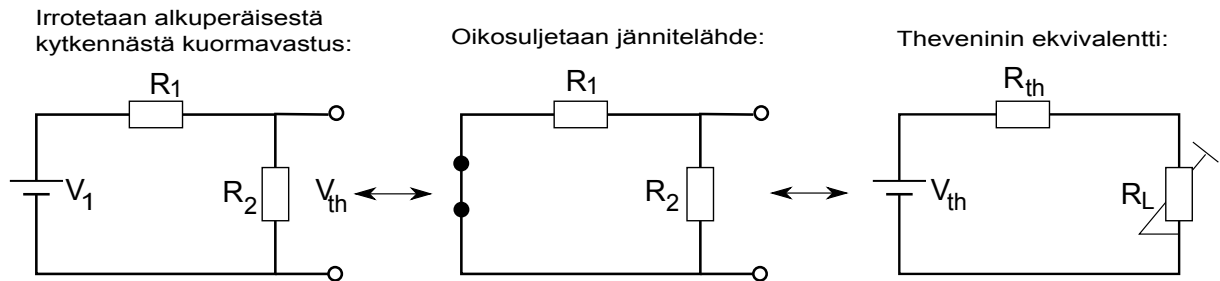
Kuva 7: Kuvan 6 kytkennästä mitatut jännitteen V_0 ja sitä vastaavat virran I_0 arvot plotattu kuvaan ja siihen sovitettu ns. kuormitussuora.

$(6,3487 \pm 0,02119)$ V ja $B = (-0,24526 \pm 0,00343) \frac{\text{V}}{\text{mA}}$. Thevenin jännitteen ja vastuksen funktiona kuormitussuora esitetään yhtälössä 4, jota käyttäen voidaan merkitä

$$V_L = V_{th} - IR_{th} \approx 6,35\text{V} - 245,26 \frac{\text{V}}{\text{A}} I_0. \quad (13)$$

Eli Thevenin jännite on $V_{th} \approx 6,35\text{V}$ ja Thevenin vastus $R_{th} \approx 245,26\Omega$.

4.2.2 Thevenin ekvivalentti



Kuva 8: Theveninin ekvivalentin määrittäminen kuvan 6 kytkennästä.

Kappaleessa 2.2 esitetty Thevenin ekvivalentti kuvan 6 kytkennästä määritetään kuvassa 8. Ensimmäiseksi irroitetaan kuormavastus alkuperäisestä kytkennästä, kuten kuvan vasemmanpuolisessa kytkennässä on tehty. Olkoon silmukan virta I , jolloin Thevenin jännite V_{th} saadaan yhtälöllä:

$$V_{th} = IR_2 = \frac{V_1}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{10\text{V}}{390\Omega + 680\Omega} 680\Omega \approx 6,355\text{V}. \quad (14)$$

Kuvan keskimmaisessa kytkennässä jännitelähde on oikosuljettu. Nyt voidaan määrätä Thevenin vastus laskemalla, paljon kytkennän kokonaisvastus on, kun tarkastellaan vastuksia R_1 ja R_2 rinnankytkennässä:

$$R_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{390 \cdot 680}{390 + 680} \Omega \approx 247,850\Omega. \quad (15)$$

Oikeanpuoleisin kytkentä on Thevenin ekvivalentti, joka siis vastaan kuormavastuksen R_L kannalta kuvan 6 alkuperäistä kytkentää.

Virheet yhtälöille 14 ja 15 lasken yleisellä virheenetenemislailalla. Jännitteelle saan virheen yhtälöksi

$$\delta V_{th} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{th}}{\partial V_1} \delta V_1\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{th}}{\partial R_1} \delta R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{th}}{\partial R_2} \delta R_2\right)^2} \approx 0,4 \quad (16)$$

ja vastaavasti vastuksen virheyhtälö on

$$\delta R_{th} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{th}}{\partial R_1} \delta R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{th}}{\partial R_2} \delta R_2\right)^2} \approx 10. \quad (17)$$

Laskin virheet Mathematicalla, laskut ovat liitteessä [2].

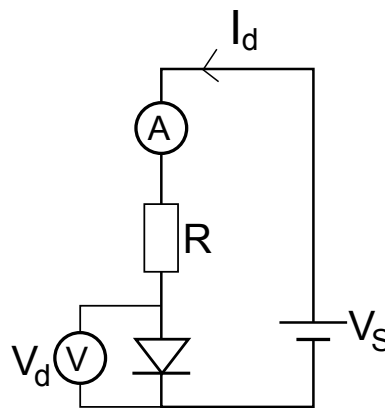
Taulukossa 2 ovat sekä kuormitussuorasta saatu kokeellinen että Thevenin ekvivalentti-kytkennästä laskettu Thevenin jännite ja vastus virheineen.

Taulukko 2: Thevenin jännitteen ja vastuksen kokeellinen ja laskettu tulos

	kokeellinen	laskettu
$V_{th} \text{ (V)}$	6,35	$6,4 \pm 0,4$
$R_{th} \text{ (}\Omega\text{)}$	245,26	250 ± 10

4.3 Diodi

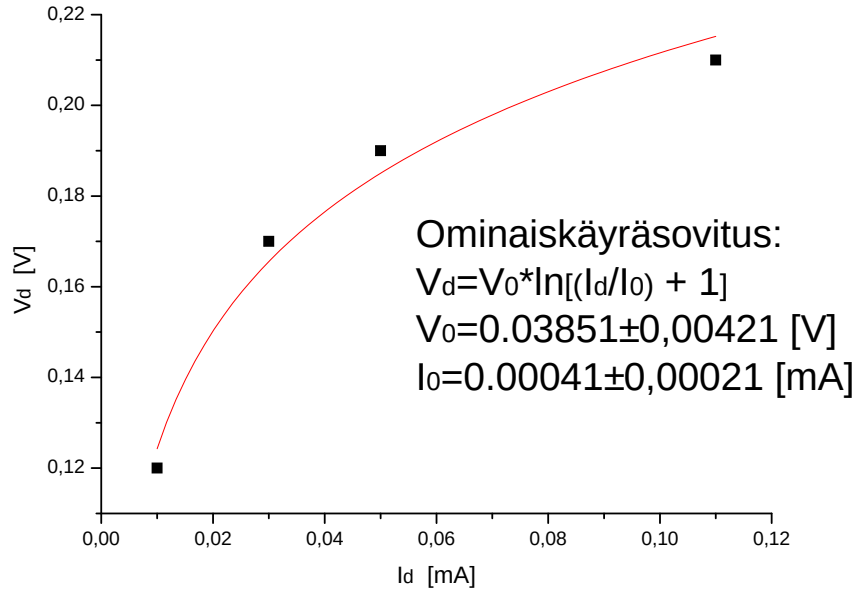
Diodimittauksessa käytin piirissä vakiovastusta $R = 1k\Omega$. Säädin lähdejännitettä V_S ja kirjoitin ylös jännitteen V_d ja sitä vastaavat piirissä kulkevan virran I_d arvot. Ne on plotattu kuvaajaan 10.



Kuva 9: Diodimittauksen kytkentä

Kuvasta 9 voidaan nähdä, että kyseinen kytkentä on jo sellaisenaan Thevenin ekvivalentti, jossa Thevenin jännite on V_S , Thevenin vastus R ja kuormakomponentti on tutkittava diodi. Kuormitussuora diodille saadaan käyttämällä yhtälöä 4, jolloin voidaan merkitä

$$V_d = V_S - I_d R. \quad (18)$$



Kuva 10: Diodin jännitehäviön V_d ja sitä vastaavat virran I_d arvot plotattuna samaan kuvaajaan. Kuvaajaan sovitettu ominaiskäyrän yhtälö.

Sovitin kuvan 10 mitattujen jännitteen ja virran arvoparien pisteisiin Originin Advanced Fitting Tool -toiminnolla käyrän, jonka määräsin diodin ominaiskäyrän muotoon

$$V_d = V_0 \cdot \ln \frac{I_d}{I_0} + 1. \quad (19)$$

Valmiiksi tämän muotoista sovitettavaa käyrää ei Originissa ollut. Origin antoi käyräsovituksen parametrien arvoksi $V_0 \approx 0,039\text{V}$ ja $I_0 \approx 0,00000041\text{A}$.

Käytin mittauspöytäkirjassa olleista arvopareista vain neljää ensimmäistä, sillä kaksi viimeistä arvoa olivat liian suuria eikä pistejoukkoon olisi saanut sovitettua käyttämäni logaritmisovitusta. Hylkäämieni pisteiden liian suuret arvot voi johtua diodin lämpenemisestä.

4.3.1 Toimintapiste

Tarkastelen nyt diodin toimintapistettä. Etsin nyt sellaisen virran I_d arvon, jolle pätee yhtälö 6:

$$V_d = V_S - I_d R = V_0 \cdot \ln \left(\frac{I_d}{I_0} + 1 \right). \quad (20)$$

Sijoitin ylläolevaan arvot $V_S = 3\text{V}$ (käyttöjännite), $R = 1000\Omega$, $V_0 = 0,039\text{V}$ ja $I_0 = 0,00000041\text{A}$ ja ratkaisin yhtälön laskimen (TI-86) solver-toiminnolla. Tulokseksi sain toimintapisteen virraksi $I_d \approx 0,00266\text{A}$. Toimintapisteen jännite on tällöin

$$V_d = V_S - I_d R = 3\text{V} - 0,00266\text{A} \cdot 1000\Omega \approx 0,34\text{V}. \quad (21)$$

4.3.2 Dynaaminen resistanssi

Määrittelen dynaamisen resistanssin R_{DYN} ominaiskäyrän kulmakertoimenä, eli derivoidaan yhtälö 19

$$R_{DYN} = \frac{dV_d}{dI_d} = \frac{V_0}{(\frac{I_d}{I_0} + 1)I_0}. \quad (22)$$

Dynaaminen resistanssi virran arvolla $I_d = 8\text{mA}$ on

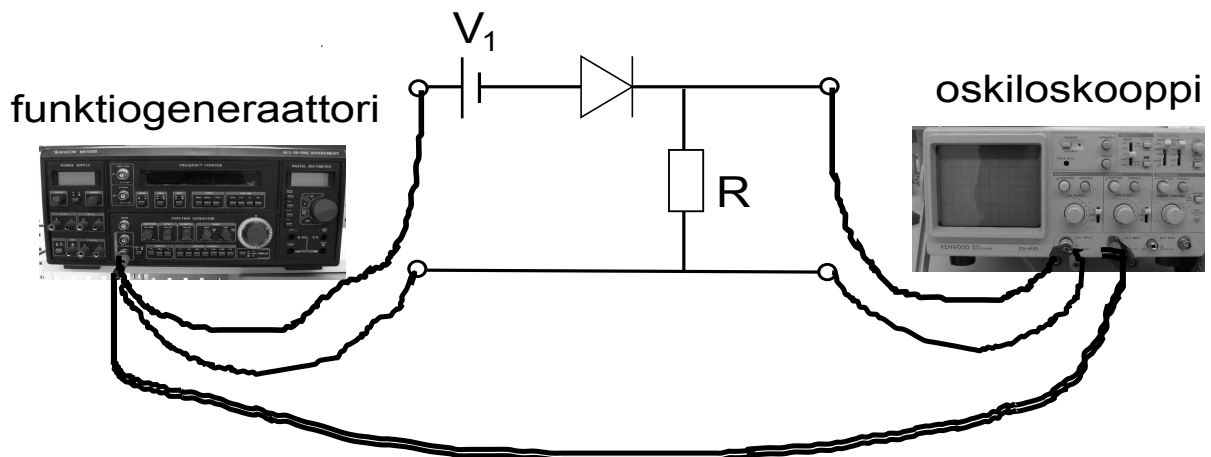
$$R_{DYN}(I_d = 0,008\text{A}) = \frac{0,039}{(\frac{0,008}{0,00000041} + 1)0,00000041}\Omega \approx 4,87\Omega. \quad (23)$$

4.4 Rajoittimet

Rajoitinkytkennöissä käytin vastusta $R = 2,2k\Omega$ ja säädin funktiogeneraattorin tuottamaan siniaaltoa, jonka jännite huipusta huippuun on 20V taajuudella 15kHz .

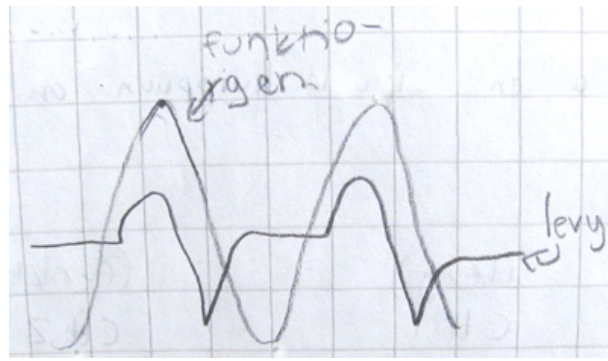
4.4.1 Sarjarajoitin

Sarjarajoitinmittauksessa tein kuvan 11 kaltaisen kytkennän, jossa siis mittasin oskilloskoopilla sekä funktiogeneraattorin levyyn syöttämää että levyn ulostulojännitettä. Diodin kanssa sarjaan kytketty tasajännitteen arvo mittauksissa oli $V_1 = 5\text{V}$.

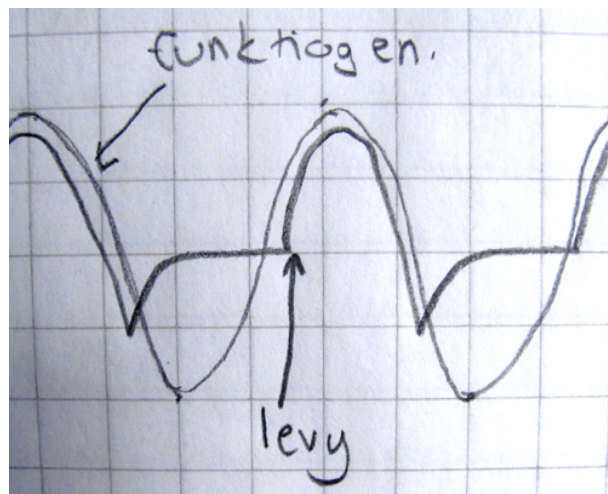


Kuva 11: Sarjarajoitin: oskilloskoopin kanava 1 mittaa levyn ja kanava 2 funktiogeneraattorin jännitettä.

Oletan nyt, että jännitteen V_1 napaisuus vaihdetaan, eli se saa negatiivisen arvon. Nyt siis tasajännite on diodin suhteen myötäsuintainen. Kuvaajasta 12 päätellen voisi olettaa, että napaisuuden muutoksen jälkeen oskilloskoopin mitaamat jännitteiden muoto olisi kuvan 13 kaltainen, jossa siis levyn jännitteen käyrä nousee korkeammalle.



Kuva 12: Käsien hahmoteltu oskilloskoopin näyttämästä kuvan 11 kaltaisen kytkennän levyn ja funktiogeneraattorin jännitteistä

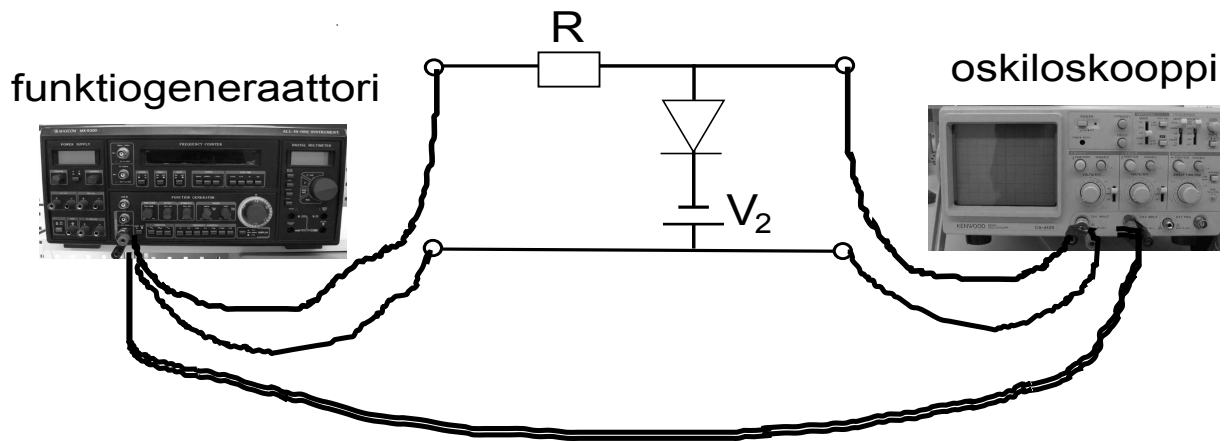


Kuva 13: Levyn ulostulojännitteen ja siniaallon kuvaaja, kun muutetaan kuvan 11 kytkennästä jännitteen V_1 suunta.

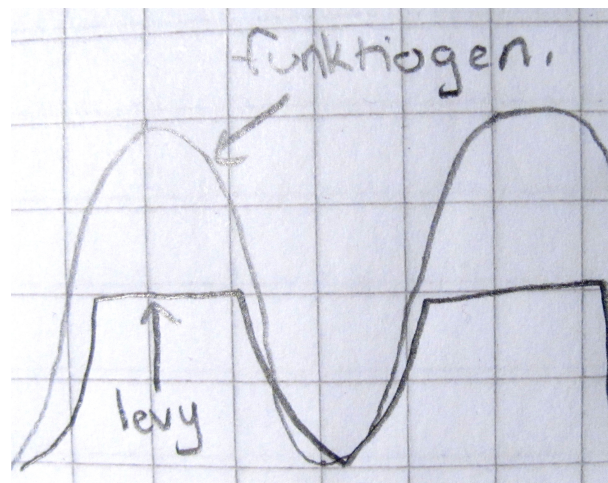
4.4.2 Rinnakkaisrajoitin

Mittauksissa käyttämäni rinnakkaisrajoittimen kytkentä oli kuvan 14 kaltainen, jossa käytetty tasajännite oli $V_2 = 5V$. Oskilloskoopin mitaamat jännitteiden muodot on hahmoteltu kuvaan 15

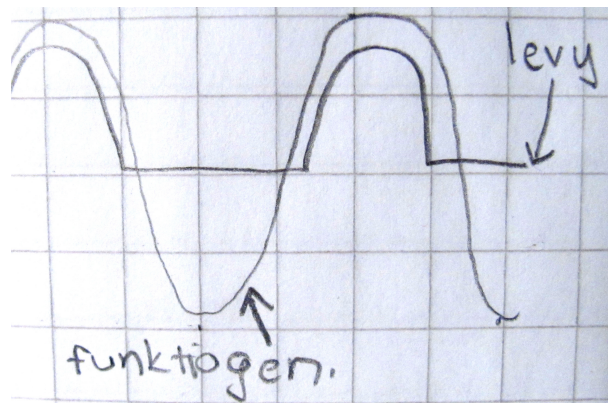
Muutettaessa diodin suuntaa diodi päästää virtaa vastakkaiseen suuntaan. Oletan tämän vaikuttavan levyn ulostulojännitteeseen kuvan 16 kaltaisesti.



Kuva 14: Rinnakkaisrajoitinkytkentä



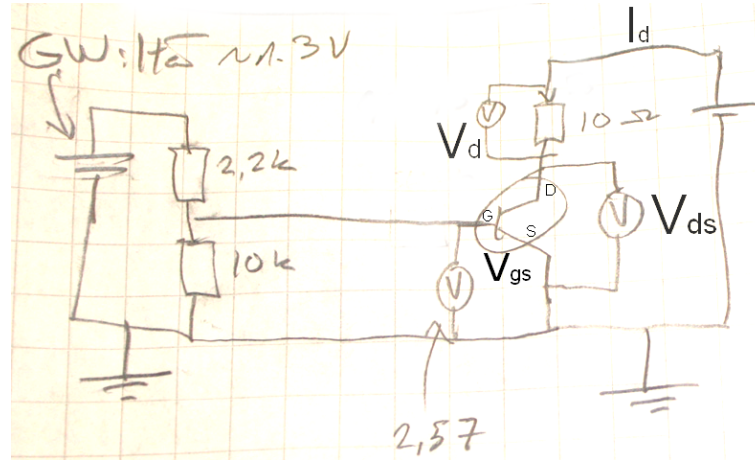
Kuva 15: Oskiloskoopin mitaamat funktiogeneraattorin levyyn syöttämä ja levyn ulostulojännitteet kuvan 14 mukaisessa kytkennässä



Kuva 16: Oletus jännitteiden muodolle, kun kytkennän diodi käännetään vastakkaiseen suuntaan

4.5 Transistori

Viimeisessä mittauksessa käsittelin kuvan 17 kaltaista kytkentää.

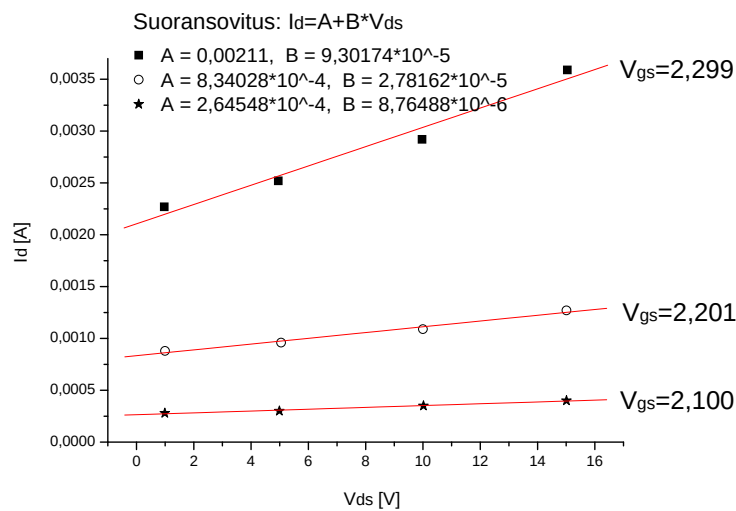


Kuva 17: MOSFET-transistori kytkettynä piiriin

Eri jännitteen V_{gs} arvoilla kirjoitin ylös transistorin yli olevan jännitteen V_{ds} ja sitä vastaavan transistorin ja signaaligeneraattorin välissä olevan vastuksen ($R = 10\Omega$) yli olevan jännitteen V_d . Jännitteestä V_d saadaan määrättyä transistorin D-kanavan kautta kulkeva virta I_d laskemalla

$$I_d = \frac{V_d}{R}. \quad (24)$$

V_d :n ja V_{ds} :n arvot ovat mittauspöytäkirjassa. Tein V_d - I_d -arvopareista plottauksen Originilla kuvaajaan 18 kolmella eri V_{gs} -jännitteen arvolla. Tein kutakin V_{gs} :ää vastaaville pistejoukoulle suoransovitukset, jotka vastaavat transistorin ominaiskäyrän saturaatioaluetta.



Kuva 18: MOSFET-transistorin ominaiskäyrät

5 Johtopäätökset

Luvun 4.1 kytkennälle sekä mittasin mittarilla että laskin virran I_2 arvoja muuntelemalla piirin jännitteitä. Kuten taulukosta 1 voi huomata, ovat mitatut ja lasketut arvot hyvin lähellä toisiaan. Ensimmäisellä jännitekombinaatiolla laskettu arvo täsmää täysin mitattua arvoa. Kahdella muulla jännitekombinaatiolla laskettu arvo on yhden kymmenestuhannesosa-amppeeria mitattua arvoa suurempi. Tästä voin päätellä, että Kirchhoffin yhtälöt toimivat hyvin ainakin näin yksinkertaisissa piireissä.

Luvun 4.2 kytkennässä määrittelin kuormitus-suoran avulla Thevenin jännitteen ja vastuksen. Määritin alkuperäisestä kytkennästä Thevenin ekvivalentin ja käyttämällä piirissä olleen vakiovastuksen ja jännitelähteen arvoa selvitin Thevenin jännitteen ja vastuksen myös laskennallisesti. Sekä laskettu Thevenin vastus että jännite vastasivat virherajojen puitteissa kokeellisia arvoja, joskin lasketut arvot olivat hieman suurempia, kuten taulukosta 2 nähdään. Tämä voi johtua siitä, että piiriin vaikuttaa tekijöitä, joita en ole huomioinut. Esimerkiksi johtimet voivat lisätä piirin vastusta tai ympäröivä magneettikenttä vaikuttaa siihen, miten sähkö piirissä kulkee.

Diodille sovittamastani V_d - I_d -ominaiskäyrästä kuvassa 10 tuli nouseva ja loiveneva, kuten siitä pitääkin tulla. Mittauspisteitä oli vain vähän, joten käyrän voidaan katsoa olevan vain suuntaa antava eikä välttämättä vastaa täydellisesti diodin todellista ominaiskäyrää.

Transistorin ominaiskäyristä tuli melko lineaarisia, kuten odottaa saattaa. Saamani käyrät eivät ole vaakasuoria, vaan hieman ylöspäin viettäviä. Mitä suurempi V_{gs} :n arvo, sitä korkeammalla ja jyrkempiä käyrät näyttäisivät olevan.

6 Liitteet

Liite 1. Mittauspöytäkirja

Liite 2. Mathematica-laskut

Viitteet

- [1] R. J. Smith. *Electronics: Circuits and devices*. John Wiley and Sons, 2. edition, 1980. ISBN 0-471-05344-9.
- [2] H. Young and R. Freedman. *University Physics with Modern Physics*. Pearson, 11. edition, 2004. ISBN 0-321-20469-7.