



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI NIEMINEN
DC/AC-INVERTTERIEN ANALYYSI JA TESTAUS

Kandidaatintyö

Tarkastajat: Lehtori Jari Kangas &
yliopistonlehtori Olli-Pekka Lundén

TIIVISTELMÄ

ANTTI NIEMINEN: DC/AC-invertterien analyysi ja testaus

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 42 sivua, 1 liitesivu

Kesäkuu 2018

Sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Elektroniikka

Tarkastaja: Lehtori Jari Kangas ja yliopistonlehtori Olli-Pekka Lundén

Avainsanat: invertteri, 555-ajastinpiiri, push-pull, muuntaja, DC/AC

Tämän työn tarkoituksena on perehtyä invertterien toimintaan. Työssä rakennetaan ja testataan invertteri, jolla 12 V:n tasajännite voidaan muuntaa 240 V:n ja 50 Hz:n vaihtojännitteeksi. Lisäksi tarkastellaan niin kutsuttua H-siltaa osana invertterikytkentää. Työ koostuu H-sillan toiminnan perusteista, rakennetun kytkennän lohkojen toimintojen analysoinnista sekä simulointi- ja mittaustuloksista ja niiden analysoinnista. Työn lopussa on myös pohdittu simulointi- ja mittaustuloksista tehtyjä havaintoja sekä miten työtä voisi jatkokehittää.

Työssä rakennetaan ja testataan invertteri, jonka lohkoja ovat 555-ajastinpiiri, push-pull-kytkentä sekä muuntaja. 555-ajastinpiiri toimii kytkennässä oskillaattorina, jonka avulla tasajännitteestä saadaan luotua vaihtojännitettä. Vastaavasti push-pull-kytkentä toimii kytkennässä virtavahvistimena. Muuntajan tehtävänä invertterissä on nostaa ulostulojännite halutulle tasolle.

Tässä työssä on esitetty eri lohkojen simulointi- ja mittaustuloksia. Ajastinpiirin astabiilin kytkennän toimintaa on simuloitu ja mitattu ensimmäisenä. Muuntajien toimintaa on tutkittu mittaamalla kahden muuntajan ulostulojännitteitä eri sisäänmenojännitteiden arvoilla. Näiden mittausten perusteella on tehty päätös invertterikytkennässä käytettävästä muuntajasta. Koko kytkennän simulointi- ja mittaustulokset on esitetty seuraavaksi, ja niiden perusteella on havaittavissa kytkennän ongelma eli kuormitusongelma. Kuorman pienentyessä kuorman syötettävä virta kasvaa, jonka seurauksena kytkennän sisäresistanssin aiheuttama jännitehäviö kasvaa. Sisäresistanssin vaikutukset ovat havaittavissa mittaustuloksista ulostulojännitteen laskemisena.

Jatkokehitysnäkyminä tälle työlle voidaan pitää erilaisten komponenttien vaikutusten kokeilemista kytkennän toimintaan. Kytkennässä käytetyt BJT:t lämpenevät melko paljon, joten niiden jäähdyttämiseksi kytkentään voitaisiin lisätä jäähdytyslevyt tai rajoittaa virtaa emitterivastuksilla. BJT:t voitaisiin myös korvata FET:illa tai Darlington-transistoreilla. Näiden lisäksi ulostulojännitteen suodatus kantiaallosta siniaalloksi olisi merkittävä jatkokehityskohde.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin kevätlukukauden aikana Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) elektroniikan laboratoriolle. Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat lehtori Jari Kangas ja yliopistonlehtori Olli-Pekka Lundén. Haluaisin kiittää ohjaajiani tuesta ja neuvoista, joita sain työtä tehdessä. Lisäksi kiitokset Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnalle hyvin organisoidusta kandidaatintyöseminaarista.

Tampereella 26.05.2018

Antti Nieminen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	INVERTTERI	2
2.1	Siltainvertterin toimintaperiaatteet	2
2.2	Tutkittavan kytkennän teoria ja toimintaperiaatteet.....	3
2.2.1	555-ajastinpiiri	5
2.2.2	Transistorit ja push-pull-vahvistin	11
2.2.3	Muuntajien toimintaperiaatteet	14
3.	SIMULOINTI- JA MITTAUSTULOKSET KOKEELLISEN OSUUDEN KYTKENNÄLLE	17
3.1	Ajastinpiirin toiminnan simulointi ja mittaustulokset.....	17
3.2	Muuntajien toiminnan analysointi mittaustulosten perusteella.....	23
3.3	Koekytkennän ulostulon simulointi ja mittaustulokset	26
3.4	Muut havainnot	37
4.	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET	41
	LIITE A: NE555-AJASTINPIIRIN PIIRIKAAVIO	

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1: Siltainvertterin periaatekuva [3].....</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 2. Tutkittavan invertterin lohkokaavio.....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 3. Kokeellisessa osuudessa käytettävän kytkennän piirikaavio ja lohkot. R_{B2} on 50 kΩ:n säätövastus, jonka avulla voidaan säätää kytkennän ulostulon taajuutta.....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 4. NE555:n funktionaaliset lohkot yksinkertaistettuna. Piirretty lähteen [4, s. 818] avulla. Kuvassa $\sim Q$ tarkoittaa alla olevan teoriaosuuden Q.....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 5. NE555:n astabiilin kytkennän konfiguraatio. Piirretty lähteen [5] avulla.</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 6. NE555:n astabiilin kytkennän ulostulon aaltomuoto ajan funktiona. Kuvassa T_H kuvaa aikaa, jolloin ajastimen ulostulo on ylhäällä ja T_L aikaa, jolloin ulostulo on alhaalla. Piirretty lähteen [4] avulla.</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 7. Kondensaattorin C jännite ajan funktiona astabiilissa kytkennässä. Piirretty lähteen [4] avulla.....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 8. Emitteriseuraajan rakenne. [9, s. 264].....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 9. Push-pull-kytkennän rakenne. [9, s. 277].....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 10. Ylimenosärön poistaminen diodeilla. [9, s. 279].....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 11. Periaatekuva muuntajasta.</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 12. Simulointikytkentä ajastimen ulostulon määrittämiseksi.</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 13. Mittauskytkentä ajastimen ulostulon määrittämiseksi.....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 14. Simuloitu ajastimen ulostulo R_1:n yli ennen vahvistinastetta.</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 15. Mitattu ajastinpiirin ulostulo R_1:n yli ennen vahvistinastetta.</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 16. Mittauskytkentä ajastimen ulostulon määrittämiseksi. Kondensaattori C_4 lisätty suodattamaan signaalin piikittymistä.</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 17. Ajastimen ulostulo ja sen kondensaattorilla C_4 suodatettu aaltomuoto.</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 18. Simuloitu kondensaattorin C yli oleva jännite.</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 19. Mitattu kondensaattorin C yli oleva jännite.</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 20. Muuntajan A aaltomuodot 50Hz:n ja 1 V_{rms}-sisäänmenolla.</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 21. Muuntajan A aaltomuodot 50 Hz:n kanttiaalto ja 1 V_{rms}-sisäänmenolla.</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 22. Muuntajan B aaltomuodot 50 Hz:n ja 1 V_{rms}-sisäänmenolla.</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 23. Muuntajan B aaltomuodot 50 Hz:n kanttiaalto ja 1 V_{rms}-sisäänmenolla.</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 24.. Simulointikytkentä ajastimen ulostulojännitteen määrittämiseksi ennen muuntajaa.</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 25. Mittauskytkentä ajastimen ulostulojännitteen määrittämiseksi ennen muuntajaa.</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 26. Piirin ulostulo ennen muuntajaa 100 Ω:n vastuksen yli.</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 27. Mitattu ulostulo ennen muuntajaa 100 Ω:n vastuksen yli.</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 28. Piirin ulostulo ennen muuntajaa 1 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 29. Mitattu ulostulo ennen muuntajaa 1 kΩ:n vastuksen yli.</i>	<i>29</i>

<i>Kuva 30. 10-kertaisella vaimennuksella toteutettujen simulointien kytkentä. Multisim-ohjelman 555 timer wizard-toiminnolla piirretty koko piirin kytkentäkaavio, josta näkyy vastuksilla R4 ja R5 toteutettu vaimennus.....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 31. Mittauskytkentä kokonaisuudessaan kaikkine komponenttiarvoineen.....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 32. Simuloitu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 1 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 33. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 1 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 34. Simuloitu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 10 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 35. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 10 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 36. Simuloitu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 100 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>33</i>
<i>Kuva 37. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 100 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 38. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 30 kΩ:n vastuksen yli.....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 39. Simuloitu ja mitattu ulostulojännitteen ja kuormavastuksen riippuvuus.....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 40. Sisäresistanssin määrittämiseen käytettävä kytkentä.....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 41. Mitattu koko piirin ulostulo, kun 4W:n led-polttimo kytkettynä.....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 42. Mitattu koko piirin ulostulo, kun 28 W:n halogeenipolttimo kytkettynä.</i>	<i>37</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Vaihtovirta
BJT	Bipolaaritransistori
CC	Yhteiskollektorikytkentä
DC	Tasavirta
<i>GND</i>	Maapotentiaali
<i>f</i>	Taajuus
Hz	Hertsi
IC	Mikropiiri
IGBT	Bipolaaritransistori, jonka hila on eristetty
555	Ajastinpiiri
<i>V</i>	Jännite
<i>V_{cc}</i>	Positiivinen käyttöjännite, esimerkiksi +15 V

1. JOHDANTO

Tasa- ja vaihtojännitettä on käytetty ja käytetään edelleen erilaisissa käyttökohteissa [1]. Usein esiintyy myös tilanteita, joissa on tarvetta joko vaihto- tai tasajännitteelle mutta tarvittavaa ja oikean tyyppistä sähköä ei ole saatavilla. Tällöin on käyttöä laitteelle, joka muuttaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi tai päinvastoin. Laitetta, joka muuntaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi, kutsutaan invertteriksi. Inverttereillä on pitkä historia, ja niitä käytetään edelleen monissa eri käyttökohteissa, muun muassa matkailuautoissa muuttamaan akun tasajännite kodinkoneiden tarvitsemaksi vaihtojännitteeksi.

Tämän kandidaatintyön aihe on eräs invertteri, jolla 12 V:n tasajännite muutetaan 240 V:n vaihtojännitteeksi. Tutkittavan invertterin keskeiset lohkot ovat 555-ajastinpiiri, push-pull-kytkentä ja muuntaja. Varsinaiset tutkimuskysymykset ovat invertterien perustoiminnan analysointi sekä tutkittavan kytkennän toiminnan analysointi ja parantaminen. Näihin kysymyksiin etsitään vastauksia teoreettisen ja kokeellisen analyysin avulla. Työssä tutustutaan myös lisäksi kahden muuntajan ominaisuuksiin ja eroihin eri taajuuksilla sisäänmenoilla. Muuntajien toimintaan tutustuminen kuuluu tutkittavan kytkennän toiminnan analysointiin, ja tutkimuksessa sisäänmenojännitteinä käytettiin 1 V_{rms} sini- ja kanttiaalto. Sisäänmenosignaalien taajuutena käytettiin 50 Hz muuntajien taajuuskäytätymisen havainnollistamiseksi. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on saada selville muuntajien ominaisuuksia ja valita käyttötarkoitukseen sopivin muuntaja.

Kandidaatintyön alussa tutustutaan yksinkertaisen invertterin toimintaan ja teoriaan sen taustalla. Työn edetessä siirrytään tarkastelemaan tarkemmin tutkittavan piirin toimintaa, sen komponentteja ja niiden vaikutusta piirin toimintaan. Kokeellisessa osuudessa rakennetaan koekytkentälevylle invertteri, jossa hyödynnetään 555-ajastinpiiriä ja sen astabiilia kytkentää. Mittaustulokset ja niiden vertailu teoriaan esitellään luvussa 3. Luvussa 3.2 on esitetty tutkittavien muuntajien eroja, ja luvussa 3.3 on esitetty tutkittavan piirin ulostulot eri kuormilla. Luvussa 3.4 on esitetty koko kytkennän simulointi- ja mittaustulokset. Simulointi- ja mittaustulosten yhteydessä on vertailtu saatuja tuloksia teoreettisiin arvoihin sekä arvioitu saatuja tuloksia kriittisesti. Työn loppuun kootaan yhteenveto yleisestä teoriasta, tutkittavan piirin teoriasta sekä saadut tulokset ja päätelmät.

2. INVERTTERI

Invertterin tehtävänä on muuttaa tasajännite halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi, jonka ulostulo on ideaalisessa tapauksessa siniaaltoa. Monesti kuitenkin ulostulon aaltomuoto eroaa siniaallosta. Matalilla tehoilla kanttiaalto on hyväksyttävä aaltomuoto, mutta tehon kasvaessa aaltomuodon tulisi olla mahdollisimman vähän vääristynyttä siniaaltoa. [2, s. 226–227]

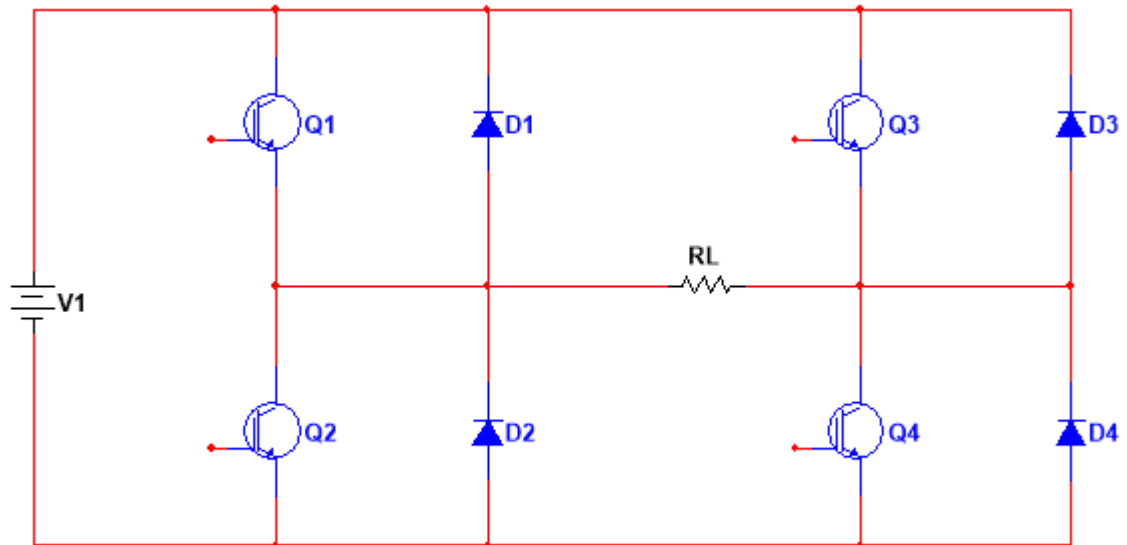
Inverttereitä on monenlaisia, niin yksi- kuin kolmivaiheisiakin, ja niitä käytetään monissa teollisissa käyttökohteissa, esimerkiksi vaihtosähkömoottorien ohjauksessa, induktiolämmityksessä ja muuttamaan aurinkopaneelien tuottama tasasähkö verkkosähköksi. Myös monet arkipäiväiset tehtävät vaativat jonkin sellaisen laitteen käyttöä, joka tarvitsee vaihtojännitettä toimiakseen. Aina vaihtojännitettä ei kuitenkaan ole saatavilla, minkä vuoksi tarvitaan inverttereiksi kutsuttuja laitteita muuttamaan tasajännite vaihtojännitteeksi. Inverttereillä korvataan verkkosähkön tarve 50 Hz:n taajuudella. Inverttereitä voidaan valmistaa monilla eri tavoilla, ja ne koostuvat elektroniikan peruskomponenteista. Tässä luvussa tarkastellaan siltainvertterin toimintaa invertterinä sekä kokeellisessa osuudessa tutkittavaa invertteriä, jonka toiminta perustuu NE555-ajastinpiiriin.

Invertterit voivat sisältää myös tyrstoreja, mistä esimerkkinä tyrstoreilla ohjattava sarjaresonanssiin perustuva invertteri. Näiden lisäksi invertterit voivat olla pulssinleveysohjattuja, jolloin saadaan ulostuloon halutun suuruinen vaihteleva jännite eli toisin sanoen mahdollisimman lähellä siniaaltoa oleva aaltomuoto. [2, s. 226–227, 241–245, 251–253]

2.1 Siltainvertterin toimintaperiaatteet

Eräs tapa toteuttaa invertteri on siltainvertteriksi kutsuttu kytkentä. Siltainvertteriä kutsutaan usein myös H-sillaksi sen kytkennän muodon vuoksi, joka voidaan havaita myös kuvasta 1. Siltainvertterissä on kaksi jalkaa, jotka kummatkin koostuvat kahdesta sarjaan kytketystä transistorista. [3, s. 196] Kytkennässä käytetty transistori, IGBT, hilaeristetty BJT, tarkoittaa puolijohdekomponenttia, joka vaihtaa BJT:n virtaohjauksen jänniteohjaukseksi, säilyttäen edelleen BJT:n hyvät ominaisuudet [3, s. 94].

Siltainvertterin toimintaperiaate on se, etteivät kummankin jalan ylimmät ja alimmat IGBT:t ole johtavassa tilassa yhtä aikaa, vaan johtavassa tilassa olevat IGBT:t ovat aina vastakkaisilla puolilla kuormaa. Näin ollen kuvan 1 avulla selitettynä $Q1$ ja $Q4$ ovat yhtä aikaa johtavassa tilassa, jolloin ulostulojännite on sisäänmenon suuruinen. Vastaavasti kun $Q2$ ja $Q3$ ovat johtavassa tilassa, ulostulojännite on sisäänmenojännitteen suuruinen mutta vastakkaismerkkinen. Näin saadaan tasajännitteestä luotua vaihtojännitettä. [2, s. 230]



Kuva 1: Siltainvertterin periaatekuva [3]

Jokaisen IGBT:n rinnalle on kytketty diodi, jonka tehtävänä on tarjota kuormavirralle vaihtoehtoinen kulkureitti IGBT:n ollessa johtamattomassa tilassa [3, s. 196]. Kun diodit *D1* ja *D4* johtavat, energiaa syötetään takaisin tasajännitelähteeseen, ja siksi niitä kutsutaankin takaisinkytkentädiodeiksi [2, s. 231] Siltainvertterin ohjaus toteutetaan muuntelemalla jokaisen IGBT:n päälläoloaikoja. Ohjauksessa otetaan myös huomioon se, että oikosulkuja ei pääse syntymään. Tämä toteutetaan siten, että ohjainpiiri varmistaa, etteivät saman jalan molemmat IGBT:t ole johtavassa tilassa samaan aikaan. [3, s. 196]

Kun ulostulojännite on kantiaaltoa, sen tehollisarvo on yhtä suuri kuin sisäänmenon tasajännite:

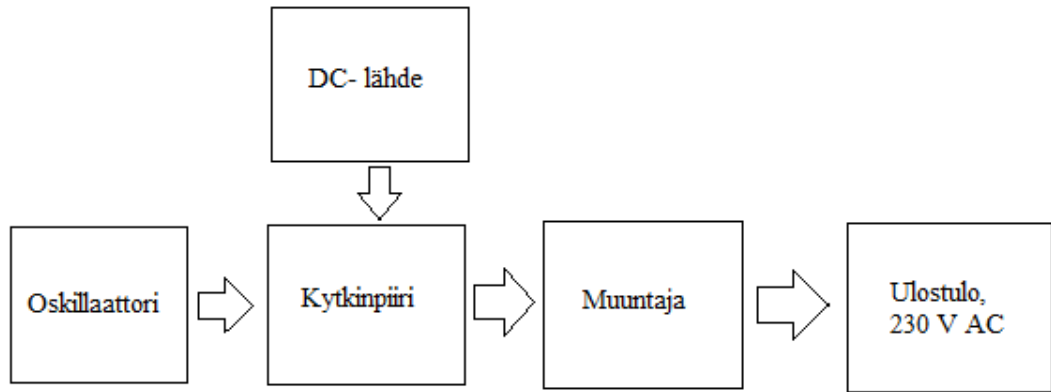
$$V_o = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = V_s, \quad (1)$$

jossa V_o on ulostulojännite, V_s sisäänmenojännite ja T_0 signaalin jaksonaika [2, s. 231].

2.2 Tutkittavan kytkennän teoria ja toimintaperiaatteet

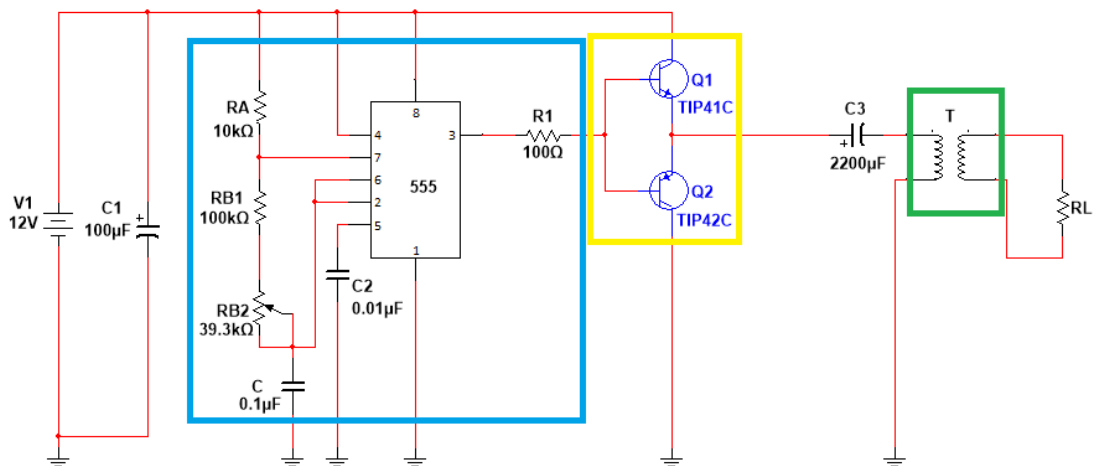
Tässä työssä tutkittava kytkentä koostuu vastuksista, kondensaattoreista, IC:stä, transistoreista ja muuntajasta. Kyseinen IC on 555-ajastinpiiri ja sen teoreettista toimintaa käsitellään luvussa 2.2.1.

Luvun 2.2 alaluvuissa käsitellään kytkennän toiminnallisia lohkoja. Kytkennän toiminnan tarkastelu on jaettu alalukuihin jokaisen erillisen lohkon mukaan, ja kyseisissä alaluvuissa esitellään lohkojen ja niiden sisältämien komponenttien vaikutukset invertterin toiminnan kannalta. Kuvassa 2 on esitetty kytkennän lohkoakaavio, josta voidaan huomata kytkennän toiminnalliset lohkot.



Kuva 2. Tutkittavan invertterin lohkokkaavio

Alla olevassa kuvassa 3 on esitetty piirikaavio ja toteutus tutkittavalle invertterikytkennälle. Kuvasta 3 voidaan huomata keskelle sijoitettu ajastinpiiri, transistorien muodostama push-pull-vahvistin sekä muuntaja. Näiden kaikkien lohkojen toimintaa tarkastellaan tarkemmin luvun 2.2 alaluvuissa. Piirikaaviosta on myös huomattavissa sisäänmenoon kytketty kondensaattori $C1$ ja 555-ajastinpiiriin ulostuloon kytketty kondensaattori $C3$. Kondensaattori $C1$ toimii sisäänmenon suodatuskondensaattorina. Kokonaisuutena kuvassa 3 esitetty invertteri koostuu vastuksista ja kondensaattoreista integroidusta piiristä ja muuntajasta. Näiden kaikkien komponenttien yhteisvaikutuksella tasajännite saadaan muutettua vaihtojännitteeksi ja samalla kasvatettua jännitteen amplitudi haluttuun arvoon.



Kuva 3. Kokeellisessa osuudessa käytettävän kytkennän piirikaavio ja lohkot. R_{B2} on 50 kΩ:n säätövastus, jonka avulla voidaan säätää kytkennän ulostulon taajuutta.

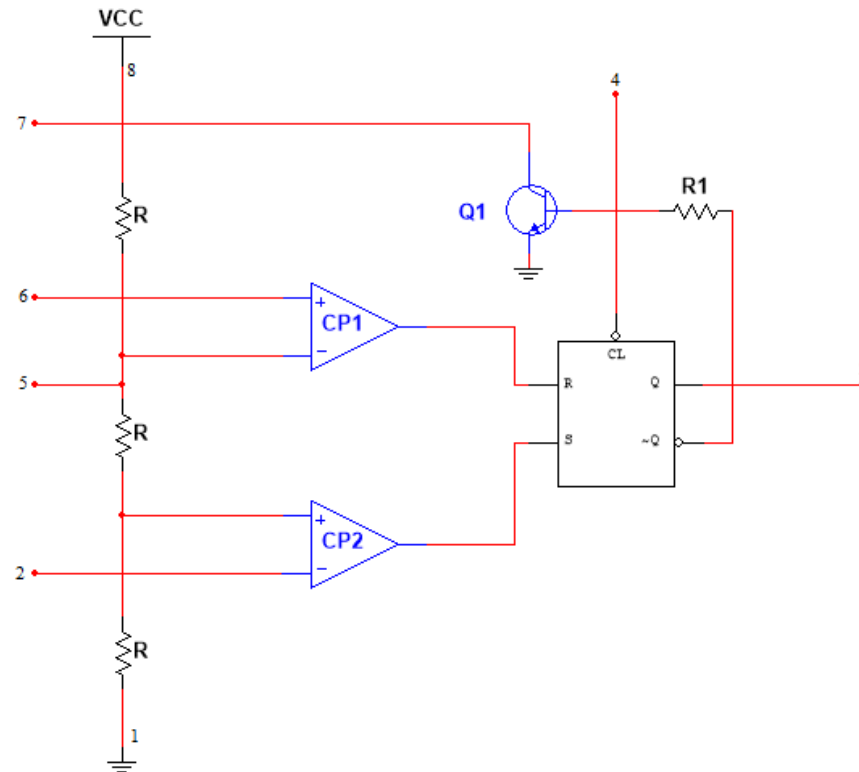
Kuvassa 3 sinisellä rajattu alue esittää NE555-ajastimen astabiilia kytkentää ja siihen tarvittavia ulkoisia komponentteja. Vastaavasti keltaisella rajattu alue esittää NPN- ja PNP-transistoreista muodostettua push-pull-vahvistinta ja vihreällä rajattu alue muuntajaa.

2.2.1 555-ajastinpiiri

555 on integroitu piiri, jolla voidaan saada aikaan monia erilaisia kytkentöjä erilaisiin tarkoituksiin. Nimitys ajastinpiiri on peräisin eräästä 555-ajastinpiirin käyttökohteesta eli käytöstä ajastimena. 555-piirien avulla saadaan aikaan oskillaattoreita ja tarkkoja kytkentöjä ajastinkäyttöön. Tässä kandidaatintyössä hyödynnetään 555-ajastinpiirin ominaisuuksia toimia oskillaattorina ja keskitytään kokeellisessa osuudessa hyödynnettävän oskillaattorikytkennän toiminnan teorian analysointiin.

555-ajastinpiirejä on monen eri valmistajan tekemiä ja tarkastellaan NE555-ajastinpiiriä. NE555 voidaan kytkeä toimimaan monostabiilisti ja astabiilisti. Monostabiilissa kytkennässä tarvitaan ulkoinen kytkin, ja siksi tätä kytkentää käytetään ajastinsovelluksissa [4, s. 818]. Astabiili kytkentä puolestaan muodostaa ulkoisten komponenttien avulla multivibraattorin eli oskillaattorin, joka tuottaa ulostuloonsa kanttiaaltoja. Näiden lisäksi NE555-ajastinpiiri voidaan kytkeä bistabiilisti, jolloin ajastinpiiri toimii kiikun tavoin. Bistabiilissa kytkennässä NE555-ajastinpiiriä ei käytetä varsinaiseen ajastukseen tai kanttiaallon tuottamiseen, vaan sen toimintaa ohjataan ulkoisilla set- ja reset- kytkimillä. [5]

NE555-ajastinpiirin avulla voidaan luoda ajastimia ja oskillaattoreita, joiden käyttöjännite on 4,5–16 V. NE555-ajastinpiiri pystyy sekä syöttämään kuormaan, että vetämään kuormasta 200 mA. NE555-ajastinpiirillä pystytään luomaan ajastimia aina mikrosekuntien tarkkuudesta tuntien tarkkuuksiin. [6]



Kuva 4. NE555:n funktionaaliset lohkot yksinkertaistettuna. Piirretty lähteen [4, s. 818] avulla. Kuvassa $\sim Q$ tarkoittaa alla olevan teoriaosuuden \bar{Q} .

Kuvassa 4 on esitetty NE555-ajastinpiirin funktionaaliset lohkot ja niiden kytkennät komponenttikotelon pinneihin. Taulukkoon 1 on koottu DIP-pakkauksellisen NE555:n pinneiden numeroinnit ja nimet sekä kuvaus pinnien toiminnasta osana ajastinpiiriä. Taulukon 1 tarkoituksena on yhdistää kuvan 4 kytkentä ja alla esitetty teoreettinen toimintaperiaate.

Kuvasta 4 voidaan huomata NE555-ajastimen koostuvan kolmesta identtisestä vastuksesta, kahdesta komparaattorista, transistorista, RS-kiikusta ja ulostuloasteesta. NE555:n sisäisten komponenttien avulla määräytyy ulostulon suuruus ja aaltomuoto, mutta niihin voidaan vaikuttaa ulkoisilla komponenteilla, jotka kytketään pinneihin 2,5 ja 6. Ulkoisten komponenttien liittämiseen NE555:n pinneihin syvennyttään tarkemmin tämän alaluvun lopussa, jossa analysoidaan astabiilia kytkentää.

Kokonaisuudessaan NE555:n funktionaaliset lohkot koostuvat useista transistoreista, diodeista ja vastuksista. NE555:n piirikaavio on esitetty liitteessä A [6]. Tässä kandidaattityössä tarkastellaan ajastinpiirin toimintaa kuvan 4 osoittamalla tasolla eli funktionaalisten lohkojen tasolla yksittäisten komponenttien sijaan.

Taulukko 1. NE555:n pinnien numerointi ja nimet sekä pinnien toiminnallisuudet [7]

Pinnin numero	Pinnin nimi	Toiminnan kuvaus
1	GND	Maapotentiaali eli maadoituspinni
2	Trigger	Asettaa kiikun tilan set- tai reset-tilaan. Ajastimen ulostulon suuruus riippuu pinnille tulevasta ohjauspussista.
3	Output	Ulostulopinni, jossa näkyy ajastimen ulostulon aaltomuoto.
4	Reset	Negatiivisella pulssilla ajastin voidaan resetoida tai sen toiminta voidaan lopettaa. Jos reset-toimintoa ei käytetä, kytketään pinni V_{cc} -jännitetasoon.
5	Control voltage	Ohjaa kynnysjännite- ja liipaisutasoja. Kyseinen pinni määrittää ulostulon aaltomuodon, ja ulkoisen ohjauspulssin avulla ulostuloa voidaan moduloida.
6	Threshold	Vertaa pinniin tulevaa jännitettä referensijännitteeseen, jonka suuruus on $2/3 V_{cc}$. Pinniin tulevan jännitteen suuruus määrittää kiikun set-tilan.
7	Discharge	Transistorikytkentä, joka purkaa kondensaattorin varauksen intervallien välillä. Ulostulon arvo muuttuu korkeammasta arvosta matalampaan pinnin jännitteen saavuttaessa $2/3 V_{cc}$ ja aiheuttaessa kondensaattorin latauksen purkautumisen transistorin kautta.
8	V_{cc}	Jännitelähteen tuottama sisäänmenojännite maapotentiaalin suhteen.

Taulukkoa 1 ja kuvaa 4 tarkastelemalla huomataan pinnien 2 ja 6 olevan kytketty komparaattoreille, joiden toiset sisäänmenot on kytketty vastusten muodostamaan jännitteenjakoverkkoon. Nämä komparaattorit vastaavat ajastinpiirin ulostulosta yhdessä RS-kiikun kanssa. [4, s. 817–818]

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin, kuinka NE555-ajastinpiiri toimii. Ajastinpiirin sisäisten identtisten vastusten luomalla jännitteenjakoverkolla saadaan luotua kaksi jänni-

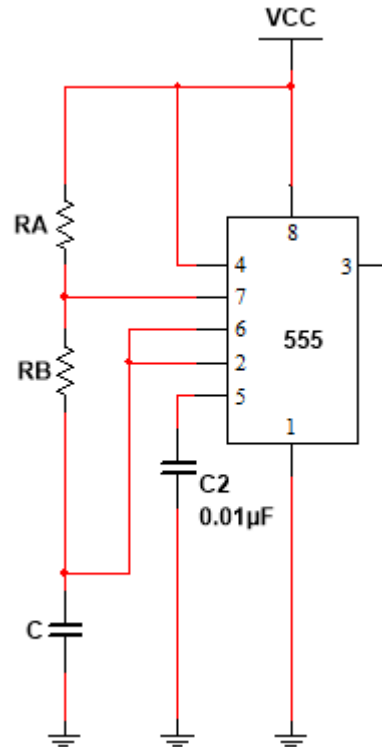
tetasoa, joiden avulla komparaattoreista saadaan haluttu ulostulo. Pinniin 6 kytketty komparaattori, CP_1 , saa jännitejakoverkosta inverttoivaan tuloonsa $2/3 V_{cc}$ suuruisen jännitteen, ja vastaavasti pinniin 2 kytketty komparaattori, CP_2 , saa ei-inverttoivaan tuloonsa $1/3 V_{cc}$ suuruisen jännitteen [4, s. 817]. Komparaattorit vertaavat inverttoivaan ja ei-inverttoivaan sisääntuloon tulevia jännitteitä, ja ei-inverttoivan jännitteen ollessa suurempi komparaattorin ulostulo on ylhäällä eli loogisessa tilassa 1, joka vastaa myös arvoa V_{cc} . Vastaavasti inverttoivan tulon ollessa suurempi komparaattorin ulostulo on alhaalla eli loogisessa tilassa 0, joka vastaa myös arvoa GND . [4, s. 800] Tästä seuraa se, että komparaattorin CP_1 ulostulo on ylhäällä, kun pinnin jännite on yli $2/3 V_{cc}$. Vastaavasti jos pinnin 6 jännite on alle $2/3 V_{cc}$, komparaattorin CP_1 ulostulo on alhaalla. Komparaattorin CP_2 ulostulo on ylhäällä, kun pinnin 2 jännite on alle $1/3 V_{cc}$, ja vastaavasti ulostulo on alhaalla pinnin 2 jännitteen ollessa yli $1/3 V_{cc}$. Komparaattorien ulostulot vaikuttavat kiikun tilaan joko aktiivoimalla set- tai reset-tilan. [4, s. 817]

RS-kiikku koostuu kahdesta transistorista ja vastuksista. Transistorit ovat joko saturaatiossa tai sulkutilassa. RS-kiikussa transistorit ovat aina vastakkaisissa tiloissa, ja tämän vuoksi RS-kiikulla on kaksi mahdollista ulostuloa, Q ja \bar{Q} . Kumpikin ulostulo voi olla joko ylhäällä tai alhaalla, mutta ne saavat aina vastakkaiset arvot. Kun Q on ylhäällä, \bar{Q} on alhaalla ja päinvastoin. [8, s. 880–881]

Tarkastellaan seuraavaksi kuvan 4 tilannetta, jossa ulostulo on kytketty kiikun Q -ulostuloon. Komparaattorin CP_2 ulostulo on ylhäällä, kun pinnin 2 jännite on pienempi kuin $1/3 V_{cc}$, ja näin ollen komparaattorin ulostulo asettaa kiikun set-tilaan, joka aiheuttaa ulostulossa näkyvän korkeamman jännitetason. Vastaavasti jos komparaattorin CP_1 ulostulo on ylhäällä eli pinnin 6 jännite on yli $2/3 V_{cc}$ komparaattorin ulostulo asettaa kiikun reset-tilaan, mikä aiheuttaa ulostulossa näkyvän matalamman jännitetason. Kiikun ulostulo tapahtui Q -ulostulosta, ja sen ollessa matalamassa jännitetasossa \bar{Q} on korkeammassa jännitetasossa aiheuttaen pinniin 7 kytketyn transistorin saturoitumisen. Kiikun ja ulostulon tila pysyy asetetussa tilassa niin kauan, kunnes toinen komparaattoreilta tullut pulssi aiheuttaa tilan vaihdon. [4, s. 818]

Kiikkuun on myös mahdollista kytkeä reset-sisäänmeno, jolla voidaan vaikuttaa kiikun tilaan komparaattoreista riippumatta. Tämä kyseinen kiikun sisäänmeno voidaan myös liittää V_{cc} -jännitetasoon, jolloin se ei vaikuta kiikun tilaan. Pinnillä 5 voidaan puolestaan vaikuttaa ajastimen ulostuloon ulkoisen ohjaussignaalin avulla. Usein pinni 5 on kytketty kondensaattorilla maatasoon, ja kondensaattorin tarkoituksena on estää jännitelähteestä johtuvaa kohinaa vaikuttamasta komparaattorien toimintaan. [4, s. 817–818]

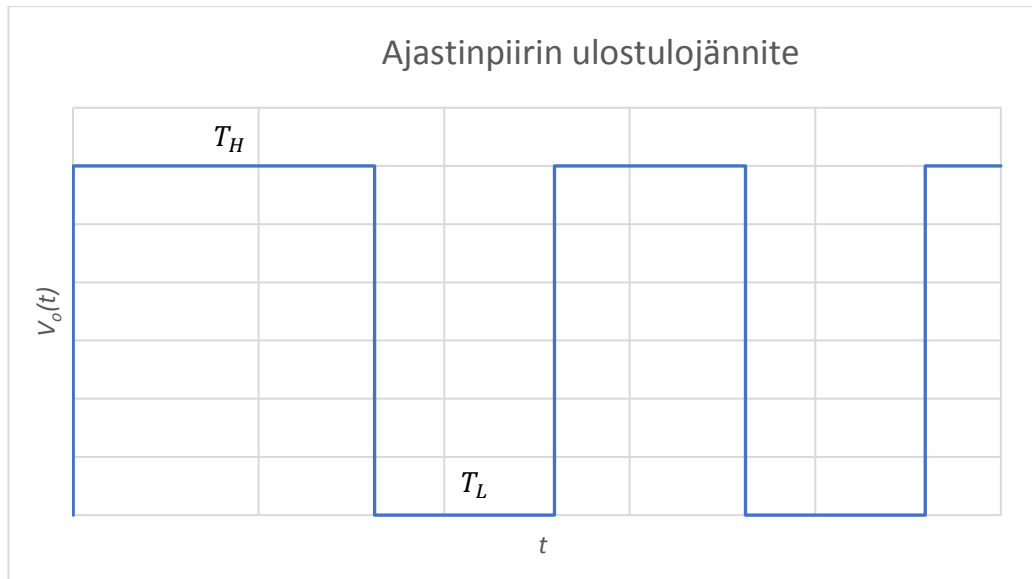
Tarkastellaan seuraavaksi NE555-ajastinpiirin astabiilia kytkentää. Alla olevassa kuvassa 5 on esitetty astabiili kytkentä ja siihen tarvittavat ulkoiset komponentit NE555:n lisäksi. Astabiilin kytkennän saa muodostettua kuvan 5 mukaisesti, lisäämällä kaksi vastusta, R_A ja R_B , sekä kondensaattorin C NE555-ajastinpiirin pinneihin.



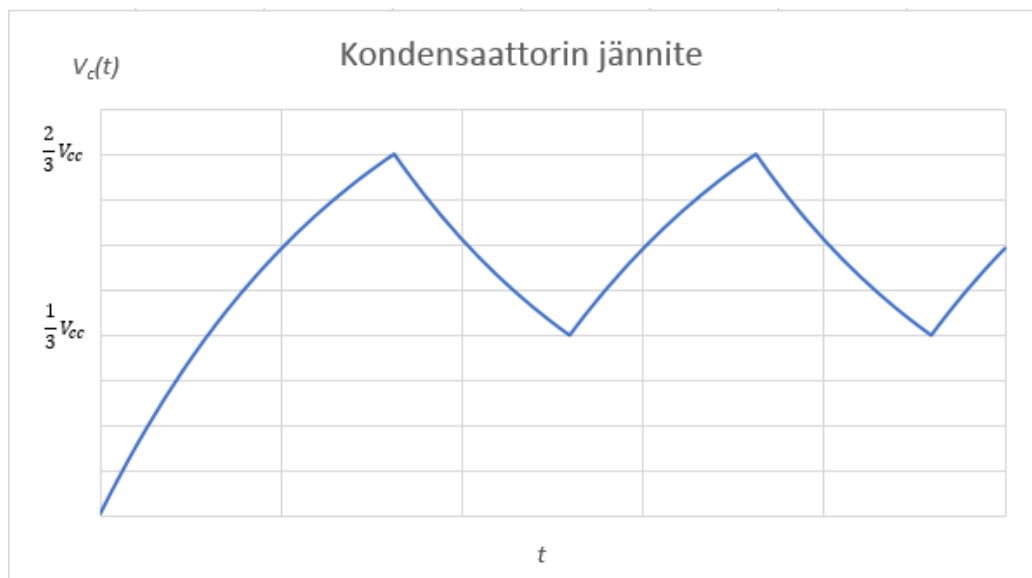
Kuva 5. NE555:n astabiilin kytkennän konfiguraatio. Piirretty lähteen [5] avulla.

Oletetaan, että kun jännitelähde kytketään piiriin, on kondensaattorin yli oleva jännite $V_c(t)$. Näin ollen pinnin 2 jännite on alhaalla, mikä johtaa siihen, että komparaattorin CP_2 ulostulo on ylhäällä. Tämän seurauksena kiikku asetetaan set-tilaan, ulostulon arvo on ylhäällä ja pinniin 7 kytketty transistori on sulkutilassa. Jännitelähteen kytkemisen jälkeen kondensaattori latautuu vastusten R_A ja R_B kautta ja kondensaattorin jännite lähestyy V_{cc} -jännitetasoa. [4, s. 820]

Tämän jälkeen, kun kondensaattorin yli oleva jännite ylittää $2/3 V_{cc}$, komparaattorin CP_1 ulostulo on ylhäällä ja kiikun reset-tila aktivoidaan. Näin ollen ajastimen ulostulo on alhaalla ja pinniin 7 kytketty transistori on johtavassa tilassa. Tämän seurauksena kondensaattorin lataus purkautuu vastuksen R_B ja ajastimen sisäisen transistorin kautta maihin. Kondensaattorin latauksen purkautuessa ja sen saavuttaessa $1/3 V_{cc}$ -jännitetason komparaattorin CP_2 ulostulo on ylhäällä aiheuttaen kiikun set-tilan aktivoinnin. Tämän seurauksena ajastimen sisäinen transistori on sulkutilassa ja ajastimen ulostulo on ylhäällä. Kondensaattorin lataus ei purkaannu transistorin ollessa sulkutilassa, ja kondensaattori alkaa latautua uudelleen. Kondensaattorin lataus vaihtelee $1/3 V_{cc}$ ja $2/3 V_{cc}$ välillä. [4, s. 820] Kuvassa 6 on havainnollistettu ajastimen ulostulon aaltomuotoa ja kuvassa 7 kondensaattorin C latautumis- ja purkautumisintervalleja, heti jännitelähteen kytkemisen jälkeen. Kuvia 3, 5 ja 6 vertaamalla huomataan yhteys kondensaattorin latauksen ja komparaattorien ulostulojen välillä.



Kuva 6. NE555:n astabiilin kytkennän ulostulon aaltomuoto ajan funktiona. Kuvassa T_H kuvaa aikaa, jolloin ajastimen ulostulo on ylhäällä ja T_L aikaa, jolloin ulostulo on alhaalla. Piirretty lähteen [4] avulla.



Kuva 7. Kondensaattorin C jännite ajan funktiona astabiilissa kytkennässä. Piirretty lähteen [4] avulla.

Ajastimen astabiilia kytkentää voidaan analysoida myös matemaattisesti. Alla on esitetty matemaattiset kaavat kondensaattorin C latautumisen- ja purkautumisintervalleille sekä niiden yhteys oskilloinnin jaksonaikaan ja taajuuteen.

Kondensaattorin C latautumisen kuluva aika voidaan laskea seuraavasti,

$$T_H = (R_A + R_B)C \ln(2), \quad (2)$$

jossa T_H on aika, joka kuluu kondensaattorin latautumiseen, ja se kuvaa aikaa, jolloin ajastimen ulostulo on ylhäällä. [4, s. 820]

Kondensaattorin C latauksen purkautumisen kesto voidaan laskea seuraavasti,

$$T_L = R_B C \ln(2), \quad (3)$$

jossa T_L on aika, joka kuluu kondensaattorin latauksen purkautumiseen, ja se kuvaa aikaa, jolloin ajastimen ulostulo on alhaalla. [4, s. 820]

Yhdistämällä kaavat 2 ja 3 saadaan oskilloinnin jaksonajalle seuraava kaava,

$$T = (R_A + 2R_B) C \ln(2), \quad (4)$$

jossa T on oskilloinnin jaksonaika. [4, s. 821]

Vastaavasti oskilloinnin taajuudelle saadaan taajuuden ja jaksonajan yhteydestä kaava,

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(R_A + 2R_B) C \ln(2)}, \quad (5)$$

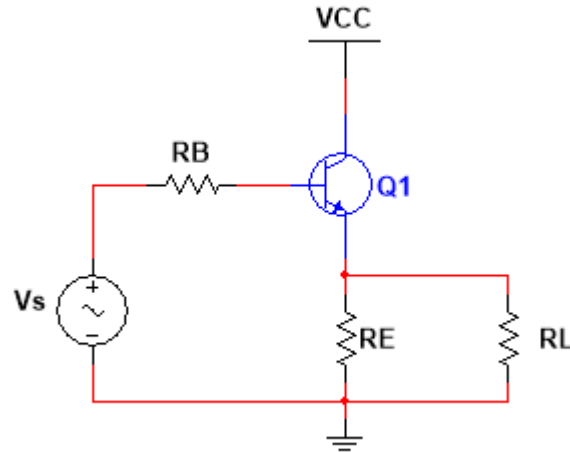
jossa f kuvaa oskilloinnin taajuutta. [4, s. 821]

Kaavoista 2–5 on huomattavissa, että vastusten ja kondensaattorin arvoja muuttamalla voidaan vaikuttaa niin kondensaattorin latautumiseen kuin purkautumiseenkin sekä oskilloinnin jaksonaikaan ja taajuuteen. Tämä ilmiö huomataan kokeellisen osuuden mitaustulosten analysoinnissa luvussa 3.

2.2.2 Transistorit ja push-pull-vahvistin

Tässä luvussa tutustutaan bipolaaritransistorista muodostettuun emitteriseuraajakytkentään ja push-pull-kytkentään sekä niiden ominaisuuksiin. PNP- ja NPN-transistorien, toimintaan ja perusteisiin ei tässä kappaleessa syvennytä, mutta niihin on löydettävissä syventävää tietoa tässä luvussa käytetyistä lähteistä.

Emitteriseuraaja eli yhteiskollektorikytkentä, lyhennettynä CC, on esitetty kuvassa 8, josta nähdään, että sisääntulosignaali on kytketty transistorin kannalle ja ulostulosignaali saadaan transistorin emitteriltä. Nimitys emitteriseuraaja on seuraus siitä, että emitteriltä saatava ulostulo seuraa sisääntuloa. Vahvistus emitteriseuraajakytkennässä on siis noin yksi. Aktiivisella alueella toimiessa kytkennän ulostulojännite on käyttöjännitteen, V_{cc} , ja kollektori-emitterijännitteen, V_{ce} , erotus. Tämä erotus on lähes yhtä suuri sisäänmenon kanssa, ja siitä on seurauksena kytkennän tunnusomainen nimitys. [9, s. 265-266] V_{ce} -jännitteen suuruus on löydettävissä käytetyn transistorin datalehdeltä. Tässä luvussa sen suuruutena käytetään lähteessä 9 esitettyä arvoa 0,6 V.



Kuva 8. Emitteriseuraajan rakenne. [9, s. 264]

Kytkenän jännitevahvistus voidaan laskea sisäänmeno- ja ulostulojännitteiden avulla,

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1 + \beta)R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E}, \quad (6)$$

jossa V_o kuvaa ulostulojännitettä, V_i sisääntuloa ja A_v jännitevahvistusta. [9, s. 266, 313]

Vaikka emitteriseuraaja ei aiheuta jännitevahvistusta, se aiheuttaa virtavahvistuksen, β . [9, s. 266] Emitteriseuraajakytkennän virtavahvistukselle saadaan määritettyä lauseke,

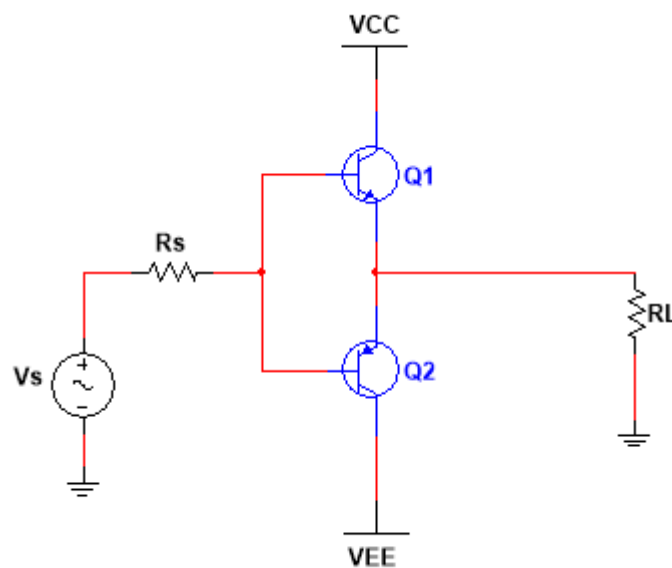
$$A_i = \frac{i_e}{i_i} = 1 + \beta, \quad (7)$$

jossa A_i kuvaa virtavahvistusta, i_i sisäänmenovirtaa ja i_e emitterivirtaa eli ulostulovirtaa. [9, s. 314]

Emitteriseuraajan ominaisuuksiin kuuluvat myös korkea sisäänmeno- ja alhainen ulostuloresistanssi. Sisäänmeno- ja ulostuloresistanssin suuri arvo on seurausta virtavahvistuksen arvosta, ja mitä suurempi virtavahvistus on, sitä suurempi on sisäänmeno- ja ulostuloresistanssi. Tämän vuoksi emitteriseuraajia käytetään vähentämään kytkennän kuormitusta pienillä resistiivisillä kuormilla. Ulostuloresistanssin arvo puolestaan pienenee virtavahvistuksen kasvaessa, eli toisin sanoen emitteriseuraaja on virtavahvistin. [9, s. 314–316]

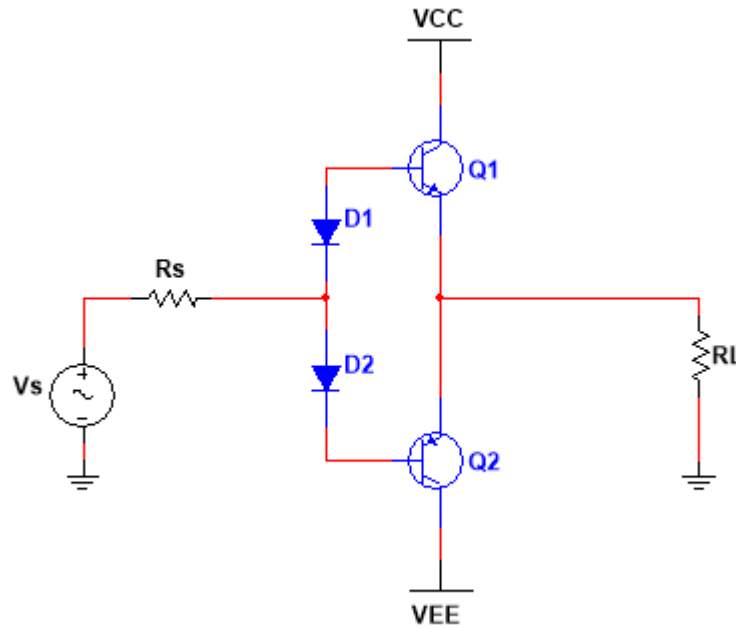
Push-pull-kytkentä on esitetty kuvassa 9, ja vertaamalla kuvia 8 ja 9 voidaan huomata push-pull-kytkennän koostuvan kahdesta emitteriseuraajasta. Kyseisestä kytkennästä voidaan käyttää myös nimitystä komplementaarinen pari [9]. Kyseisessä kytkennässä on kaksi transistoria kytketty yhteen niin, että niiden emitterit on yhdistetty ja sama sisääntulo on kytketty kummankin transistorin kannalle. Yksinkertaisimmillaan kyseinen kytkentä voidaan toteuttaa yhdellä PNP- ja yhdellä NPN-transistorilla, jolloin saadaan symmetrinen virtavahvistus. [9, s. 277]

Push-pull-vahvistimen toiminta voidaan kuvata lyhyesti seuraavalla tavalla. Kyseessä on elektroninen kytkentä, joka koostuu kahdesta transistorista, joista toinen toimii virtalähteenä ja toinen virtanieluna. Transistorien tehtävänä on vahvistaa signaalia: toinen transistoreista syöttää virtaa kuormaan ja toinen puolestaan vetää virtaa kuormasta. Tyypillisesti NPN-transistori syöttää virtaa kuormaan positiivisesta jännitelähteestä ja PNP-transistori vetää virtaa kuormasta negatiiviseen jännitelähteeseen. [10] Transistorien voi ajatella toimivan myös kytkiminä. Tutkittavan piirin tapauksessa push-pull -kytkennän transistorit toimivatkin ON/OFF-kytkimien tavoin, aiheuttaen vuorotellen virran syöttämisen kuormaan ja virran vetämisen kuormasta.



Kuva 9. Push-pull-kytkennän rakenne. [9, s. 277]

Push-pull-kytkennässä on NPN-transistori, joka toimii, kun V_s on suurempi kuin V_{ce} eli noin $+0,6$ V. Vastaavasti PNP-transistori toimii, kun vastaava jännite on pienempi kuin V_{ce} eli noin $-0,6$ V. Näin ollen edellä esitettyjen transistorien johtavuustilojen väliin jää alue, jossa kumpikaan transistori ei johda. Tällä alueella ulostulo pysyy nollassa niin kauan, kunnes jompikumpi transistoreista alkaa johtaa. Tämän seurauksena ulostulon aaltomuotoon syntyy säröä, jota kutsutaan ylimesosäröksi. [9, s. 278] Kanttiaallon tapauksessa signaalin nousu- ja laskuajat ovat todella nopeita, joten transistorin tilanvaihto tapahtuu nopeasti, minkä seurauksena ylimesosäröä ei kanttiaaltoa käytettäessä esiinny.



Kuva 10. Ylimenosärön poistaminen diodeilla. [9, s. 279]

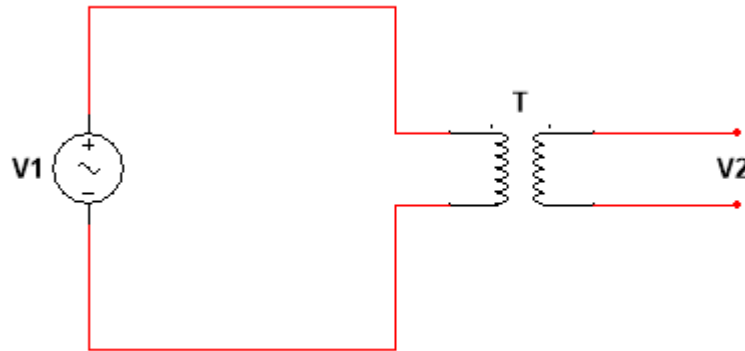
Ylimenosäro on siis seurausta siitä, että sisäänmeno-resistanssi ei ole lineaarinen transistorin ollessa cut-off-tilassa, minkä seurauksena etenkin push-pull-kytkennässä tapahtuu merkittävää signaalin vääristymää siirryttäessä toisen transistorin cut-off-tilasta toisen transistorin vastaavaan tilaan [11, s. 210]. Ylimenosärön poistamiseksi on useita erilaisia metodeja ja kuvassa 10 on esitetty diodeilla toteutettu topologia. Diodien lisääminen biasoi molemmat transistorit johtavaan tilaan sillä hetkellä, kun jännitelähteen jännite on nolla. Kytkennän muu toiminta säilyy ennallaan, eli NPN-transistori johtaa edelleen, kun jännitelähteen arvo kasvaa yli $+0.6\text{ V}$:n ja PNP-transistori kun jännitelähteen arvo laskee alle -0.6 V :n. Diodien avulla saadaan varmistettua, että vähintään toinen transistoreista on koko ajan johtavassa tilassa ja näin ollen saadaan vähennettyä ylimenosäröä. [9, s. 278]

2.2.3 Muuntajien toimintaperiaatteet

Muuntaja on komponentti, joka koostuu kahdesta tai useammasta kelasta, jotka on magneettisesti liitetty toisiinsa [12]. Muuntajan toiminnan perustana ovat muuttuvan virran aiheuttama magneettikenttä ja muuttuvan magneettikentän indusoituminen [5, s. 405]. Toisin sanoen muuntajan toiminnan perustana ovat Amperen laki ja Faradayn induktiolaki.

Yksinkertaistettuna kaksi toisiaan lähelle kytkettyä käämiä muodostaa muuntajan. Tätä on havainnollistettu kuvassa 11. Muuntajan ensiökäämiin kytketään vaihtojännite, ja vaihtovirta saa aikaan ajan suhteen muuttuvan magneettikentän, jonka suuruus riippuu vaihtojännitteen suuruudesta. Tämä magneettikenttä indusoi virran toisiopuolen käämiin

aiheuttaen jännitteen nousun. Toisiopuolen jännite nousee samaa tahtia kuin magneettikentän suuruus kasvaa ja pienenee magneettikentän suuruuden pienentyessä. [5, s. 406]. Näin ollen ulostulossa näkyy vastaavanlainen signaali kuin sisäänmenossa, mutta jännitteen amplitudi on erisuuruinen.



Kuva 11. Periaatekuva muuntajasta.

Amperen laki kuvaa johteessa kulkevan virran aiheuttamaa magneettikenttää, ja sitä voidaan mallintaa seuraavasti,

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_m N_m i_m, \quad (8)$$

jossa \mathbf{H} on magneettikentän voimakkuus, $d\mathbf{l}$ on viivan C pituusalkio, N_m on käämin m johtimen kierrosten lukumäärä ja i_m käämin johtimessa m kulkeva virta. [12, s. 46–47] [13, s. 198]

Faradayn induktiolaki kuvaa johtimeen indusoituvaa jännitettä magneettivuon muuttuessa, ja sitä voidaan mallintaa seuraavasti,

$$e = \frac{d(N\phi)}{dt} = N \frac{d\phi}{dt}, \quad (9)$$

jossa ϕ kuvaa magneettivuota ja N johtimen kierrosten lukumäärää [12, s. 50]. Kaavassa 9 esiintyvä magneettivuo voidaan esittää pintaintegraalina magneettivuon tiheydestä \mathbf{B} . Amperen laissa esiintyvä magneettikentän tiheys \mathbf{H} on verrannollinen vuon tiheyteen \mathbf{B} , ja niiden avulla voidaan laskea magneettivuo ϕ . Tämä yhtäläisyys on esitetty kaavassa 10,

$$\phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}, \quad (10)$$

jossa A kuvaa pintaa, jonka läpi magneettivuo kulkee. [13, s. 192]

Muuntajan toimintaan liittyy monenlaisia epäideaalisuuksia. Näitä ovat ytimen reluktanssi, ytimen aiheuttamat häviöt, käämien johtimien resistanssit sekä hajavuot. [14, s.

58–59] Edellä mainittujen epäideaalisuuksien tutkimiseen ja analysointiin ei tässä työssä keskitytä vaan niiden sijaan analysoidaan tarkemmin ideaalisen muuntajan teoriaa ja toimintaa.

Ideaalisessa muuntajassa häviöitä ei esiinny, joten sisäänmeno- ja ulostuloteho ovat yhtä suuret,

$$v_1 i_1 = v_2 i_2, \quad (11)$$

jossa v_1 kuvaa sisäänmenojännitettä, v_2 ulostulojännitettä, i_1 sisäänmenovirtaa ja i_2 ulostulovirtaa. Yhtälö 11 pätee kun jännite ja virta ovat samassa vaiheessa. Vastaavasti sisäänmenojännitettä v_1 voidaan mallintaa seuraavasti,

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}. \quad (12)$$

Ulostulojännitettä v_2 voidaan mallintaa samalla periaatteella,

$$v_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}. \quad (13)$$

Muuntajien toiminta perustuu siis vaihtovirtaan, sillä tasavirralla ensiöpuolen jännite ei muutu ajan suhteen, ja näin ollen magneettikentän suuruus ei muutu. Staattinen magneettikenttä ei indusoi jännitettä toisiopuolelle, ja näin ollen jännitetason muutosta ei tapahdu. [5, s. 408]

Muotoilemalla kaavaa 11 ja lisäämällä siihen kaavat 12 ja 13 saadaan muuntajan muuntosuhteelle seuraava yhtälö,

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (14)$$

Edellä esitetyt yhtälöt ovat yksinkertaistuksia muuntajan toiminnan perusteista sillä oletuksella, että muuntaja on ideaalinen eikä se kuluta energiaa eli toiminta on häviötöntä. [14, s. 56–57] Kaavasta 14 voidaan myös huomata, että muuntajia on kahdenlaisia, jännitettä nostavia ja jännitettä laskevia muuntajia [5, s. 407].

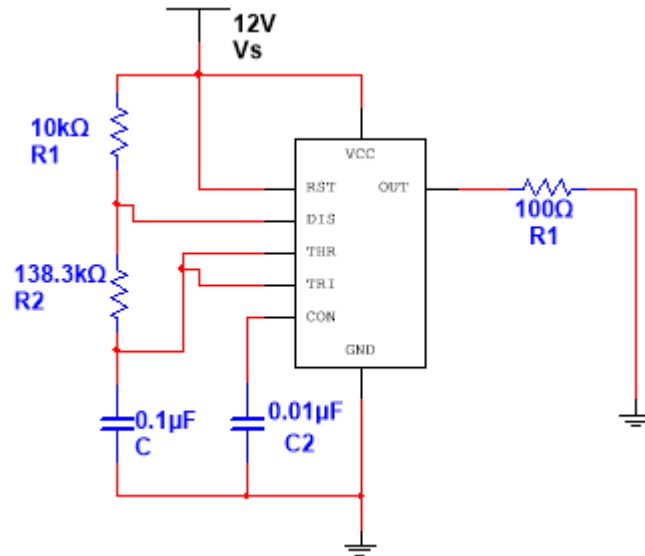
3. SIMULOINTI- JA MITTAUSTULOKSET KOKEELLISEN OSUUDEN KYTKENNÄLLE

Tässä luvussa analysoidaan käytetyn piirin lohkojen sekä koko piirin simulointi- ja mitaustuloksia. Simuloinneissa käytettiin Multisim-ohjelmaa [15] ja mittauksissa VirtualBench-mittalaitteistoa [16] sekä erillistä oskilloskooppia. Saadut tulokset on esitetty ensin lohkotasolla ja sen jälkeen koko piirin tasolla. Lohkotasolla tutkitaan ajastinpiirin ja kahden muuntajan toimintaan, ja niiden jälkeen tutkitaan piirin ulostuloa ennen jännitetasoa nostamista muuntajalla. Viimeisessä alaluvussa tutkitaan koko kokeellisen osuuden piirin toimintaa. Tässä luvussa verrataan saatuja tuloksia teoreettisiin arvoihin ja arvioidaan kriittisesti saatuja tuloksia.

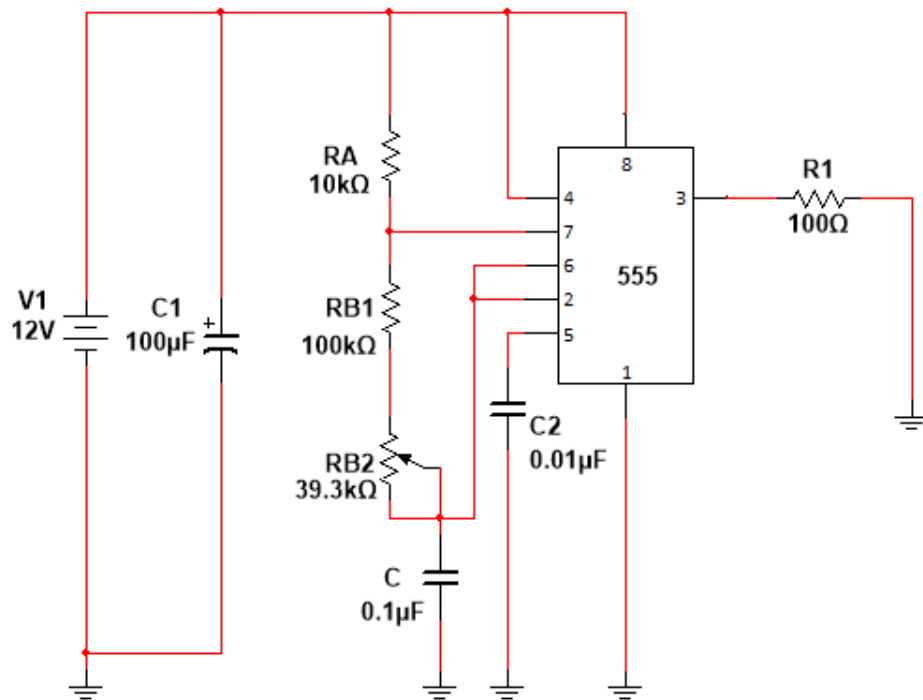
3.1 Ajastinpiirin toiminnan simulointi ja mitaustulokset

Kuvassa 12 on esitetty kytkentäkaavio, jonka avulla ajastinpiirin toimintaa simuloitiin Multisim-ohjelmalla, ja saatu tulos on esitetty kuvassa 14. Simulointia vastaava mittaus tehtiin National Instrumentin VirtualBench-mittalaitteistoa käyttäen, kuvan 13 mukaisella kytkennällä, ja saatu mitaustulos on esitetty kuvassa 15. Ajastimen ulostuloa suodatettiin kondensaattorilla, ja saatu, suodatettu, mitaustulos on esitetty kuvassa 17. Vastavasti kuvassa 18 on esitetty kondensaattorin yli olevan jännitteen simuloitu aaltomuoto ajan funktiona ja kuvassa 19 kondensaattorin yli oleva mitattu jännitteen aaltomuoto ajan funktiona.

Simulointi suoritettiin ideaalisella muuntajalla ja Multisim-ohjelman 555 timer wizard -työkalua käyttäen [17]. Mittauksissa käytettiin koekytkentälevyä ja läpiladottavia komponentteja kytkennän rakentamiseen ja todentamiseen. Tässä luvussa on esitetty Multisim-ohjelman 555 timer wizard -työkalun avulla toteutettujen simulointien kytkentäkaavio sekä mittauksissa käytetty kytkentäkaavio, jossa erona ovat sisääntulon suodatuskondensaattori *CI* sekä ajastimen ulostulon suodatuskondensaattori *CA*.



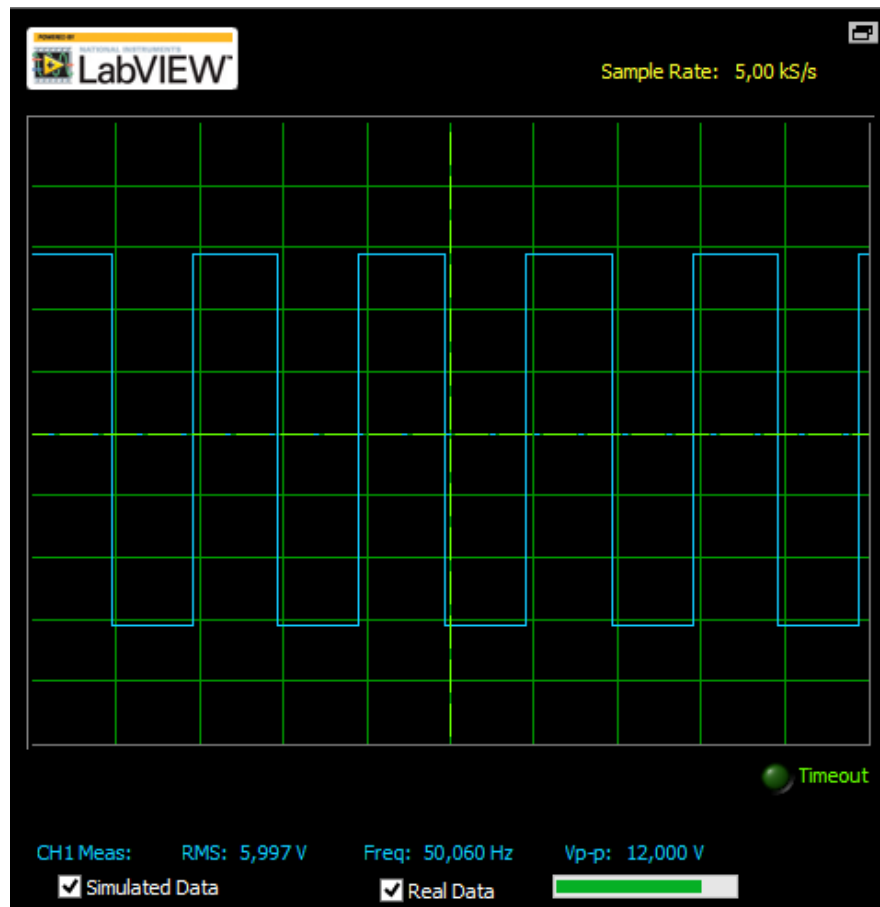
Kuva 12. Simulointikytkentä ajastimen ulostulon määrittämiseksi.



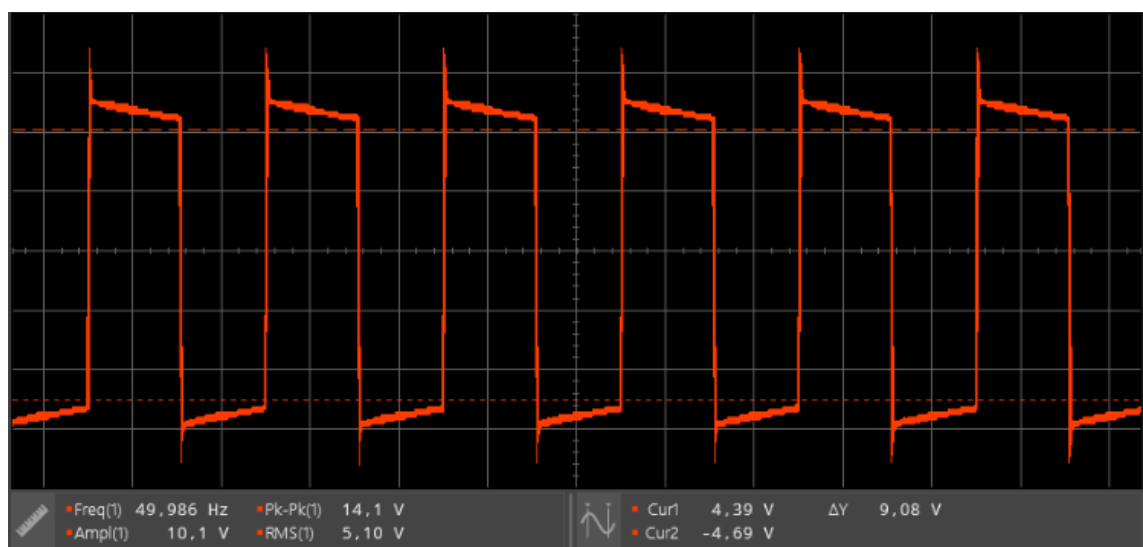
Kuva 13. Mittauskytkentä ajastimen ulostulon määrittämiseksi.

Kuvista 14, 15 ja 17 voidaan huomata eroavaisuuksia simulointien ja mittausten välillä. Vastaava teoreettinen aaltomuoto on esitetty kuvassa 5. Näiden kuvien perusteella voidaan huomata, ettei käytetty 555-ajastinpiiri toimi ideaalisesti. Epäideaalisuudet ovat huomattavissa vertaamalla kuvaa 6 ja kuvaa 15. Kuvassa 14 esitetty simuloitu ajastinpiirin toiminta on hyvin lähellä teoreettista toimintaa. Kuvassa 15 esitettyssä aaltomuodossa on havaittavissa piikittymistä kantiaallon nousevilla ja laskevilla reunoilla sekä sitä, ettei

kanttiaalto ole aivan tasainen kummassakaan huipussaan. Piikittymiselle syynä on todennäköisesti 555-ajastimen sisäiset epäideaalisuudet ja äärellinen kanttiaallon nousunopeus.

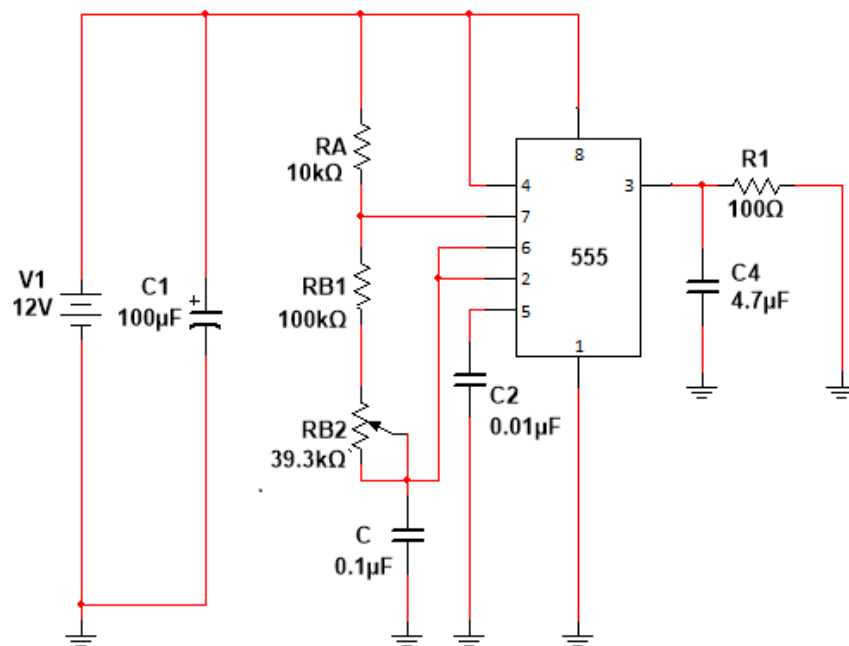


Kuva 14. Simuloitu ajastimen ulostulo R1:n yli ennen vahvistinastetta.

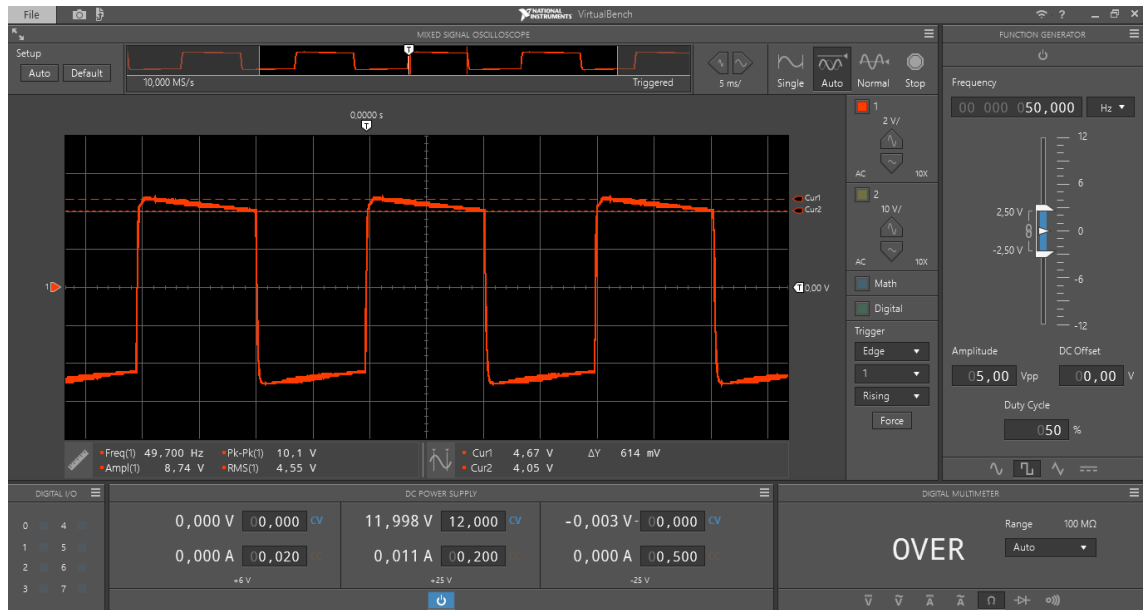


Kuva 15. Mitattu ajastinpiirin ulostulo R1:n yli ennen vahvistinastetta.

Kuvassa 17 on esitetty keino piikkittymisen vähentämiseksi. Tämä keino on kondensaattorin lisääminen ajastinpiirin ulostulopinnan ja maan välille eli pinnan 3 ja maan välille. Kondensaattori, $C4$, latautuu ja purkautuu aikavakionsa mukaisesti ja näin ollen samalla tasoittaa kantiaaltoa ajastimen ulostulossa. Kondensaattorin $C4$ lisäämisen vaikutus on esitetty kuvassa 17. $C4$:n suuruus valittiin kokeilemalla eri kapasitanssien vaikutusta ulostulojännitteen aaltomuotoon ja $4,7 \mu\text{F}$ osoittautui kokeilujen perusteella parhaaksi vaihtoehdoksi. Pienemillä kapasitansseilla ulostulojännitteen piikkittymistä ei saatu suodatettua pois yhtä hyvin. Valittu $4,7 \mu\text{F}$:n kondensaattorin todettiin olevan tarpeeksi suuri piikkittymisen poistamiseen. Lisäksi käytännössä ajastinpiirin ulostulojännite on $10 \text{ V}_{\text{p-p}}$, kun teoriassa ja simuloitaessa vastaava arvo on $12 \text{ V}_{\text{p-p}}$. Tähänkin eroavaisuuteen ovat syynä ajastinpiirin sisäiset epäideaalisuudet.

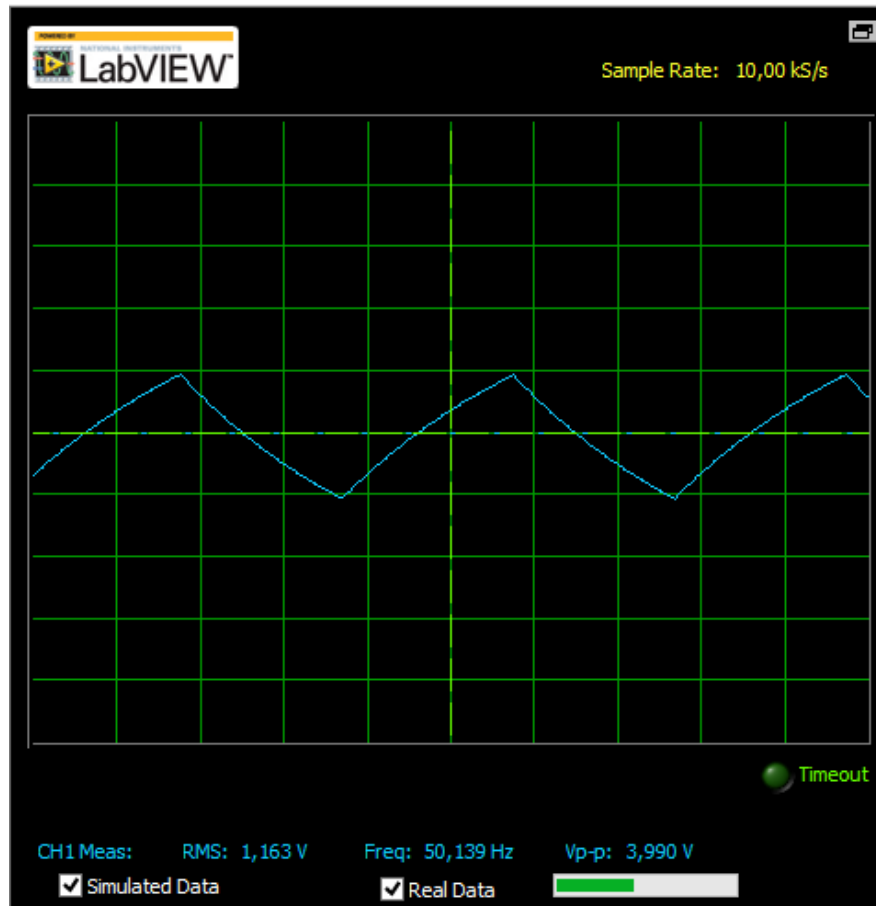


Kuva 16. Mittauskytkentä ajastimen ulostulon määrittämiseksi. Kondensaattori $C4$ li-sätty suodattamaan signaalin piikkittymistä.

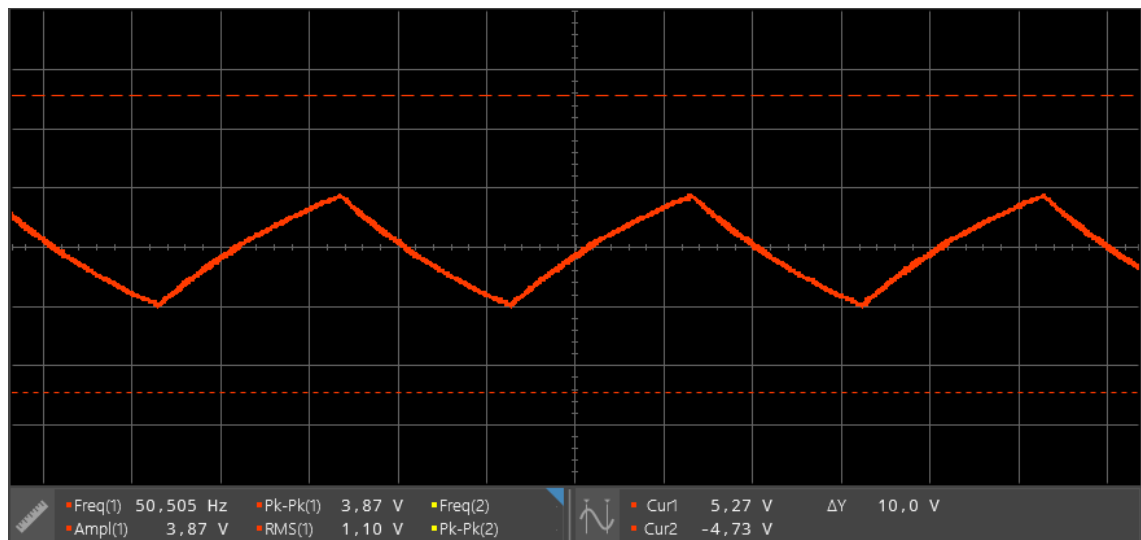


Kuva 17. Ajastimen ulostulo ja sen kondensaattorilla C4 suodatettu aaltomuoto.

Astabiilin kytkennän toimintaa voidaan analysoida kuvien 7, 18 ja 19 avulla. Kyseisissä kuvissa on esitetty astabiilin kytkennän aikaansaamiseksi lisätty ulkoisen kondensaattorin C yli oleva jännite ajan funktiona. Kuvassa 7 on nähtävissä kondensaattorin ensimmäinen latautuminen, minkä vuoksi aaltomuoto on aluksi hieman erilainen. Kokonaisuudessaan kuvista 7, 18 ja 19 on selkeästi huomattavissa kaksi jännitetasoa, joiden välillä kondensaattorin jännite vaihtelee. Aaltomuodoista on myös nähtävissä kondensaattorille tyypilliset aaltomuodot latautumiselle ja purkautumiselle.



Kuva 18. Simuloitu kondensaattorin C yli oleva jännite.



Kuva 19. Mitattu kondensaattorin C yli oleva jännite.

Mittaustulokset eroavat vain hieman simulointituloksista, ja tämä pieni eroavaisuus johtuu ajastinpiirin sisäisen jännitteenjako-verkon vastusten toleransseista, sillä kondensaattorin jännite vaihtelee $1/3 V_{cc}$ ja $2/3 V_{cc}$ välillä.

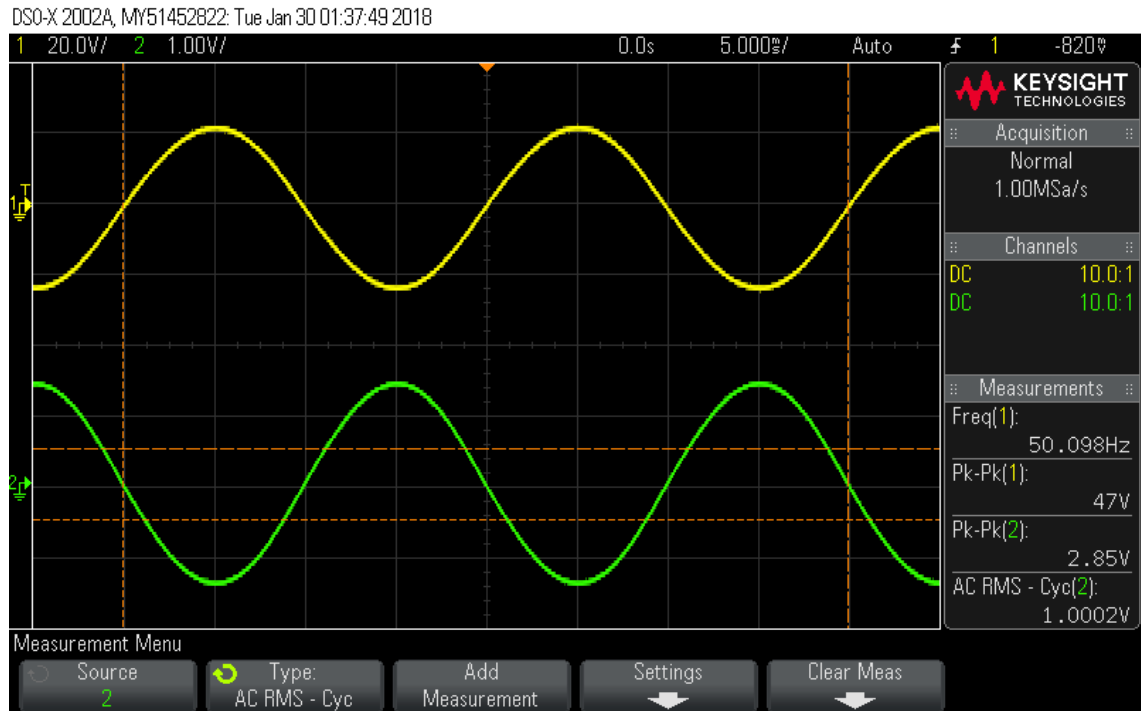
3.2 Muuntajien toiminnan analysointi mittaustulosten perusteella

Tässä alaluvussa tarkastellaan kahden muuntajan toimintaa eri taajuuksilla ja sisäänmenoilla. Muuntajien toimintaa tarkastellaan 50 Hz:n taajuudella niin sini- kuin kanttiaallollakin. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia kahden muuntajan ominaisuuksia eri taajuisilla ja suuruisilla sisäänmenojännitteillä. Saatujen tuloksien perusteella valitaan tutkituista muuntajista käyttötarkoitukseen sopivin.

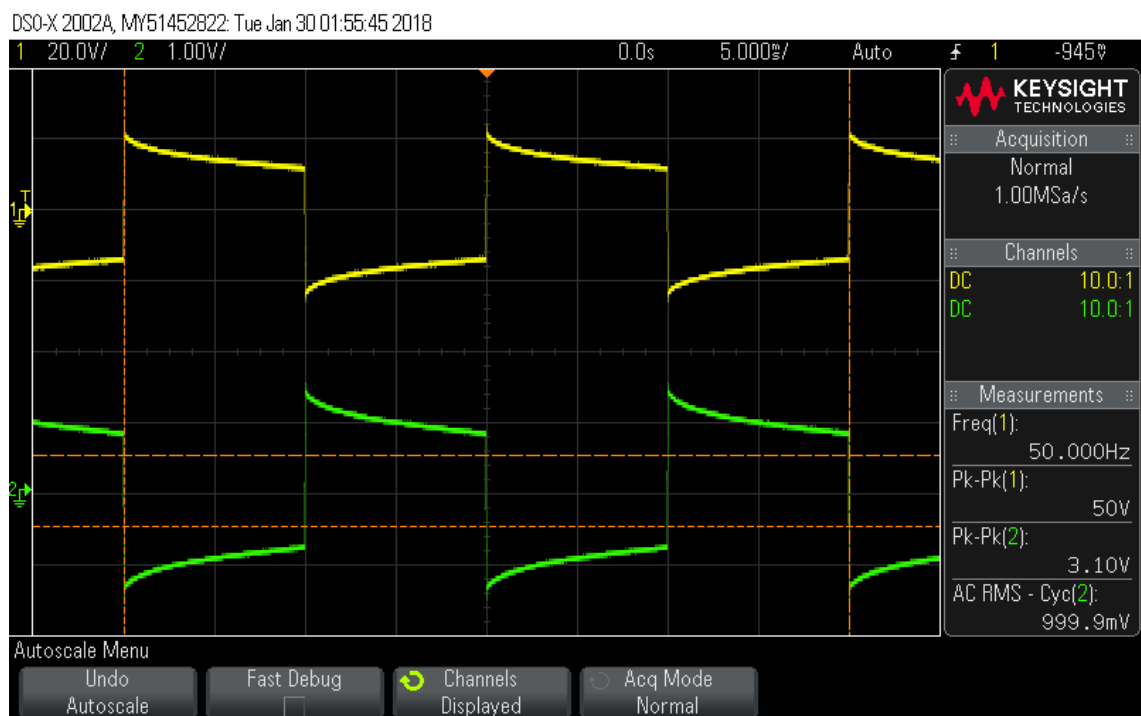
Tutkittavat muuntajat, muuntaja A ja muuntaja B, ovat kumpikin jännitettä laskevia muuntajia. Kumpikin muuntaja on merkitty merkinnällä $230\text{ V} / 2 \times 12\text{ V}$, joka tarkoittaa sitä, että muuntajassa on kaksi toisiota ja yksi ensiö. Käytettäessä sisäänmenojännitteenä 230 V muuntajien ulostuloina on 12 V kummassakin toisiossa. Tässä työssä molempia muuntajia on tutkittu ja käytetty jännitteen nostamiseen eli sisäänmenona on käytetty 12 V ja haluttu ulostulojännite on 230 V. Muuntajan A tehoksi on merkitty 15 VA ja muuntajan B tehoksi puolestaan 25 VA.

Kuvissa 20 ja 21 on esitetty muuntajan A toimintaa 1 V_{rms} -sisäänmenojännitteellä. Vastaavat tulokset muuntajalle B on esitetty kuvissa 22 ja 23. Kaikissa mittauskuvissa vihreä signaali kuvaa sisäänmenojännitettä ja keltainen ulostulojännitettä. Tehdyt mittaukset suoritettiin oskilloskoopilla, ja tässä luvussa esitetyt kuvat on tallennettu sen näytöltä.

Muuntajan A mittauksissa esiintyvä 180 asteen vaihe-ero johtuu mittausteknisestä syystä. Mittauksia tehdessä muuntajan ulostulojännitettä mitanneet mittapäät kytkettiin päinvastoin kuin sisäänmenojännitettä mitanneet mittapäät. Tämän seurauksena oskilloskoopin kuvissa näkyvät signaalit ovat vastakkaisissa vaiheissa.

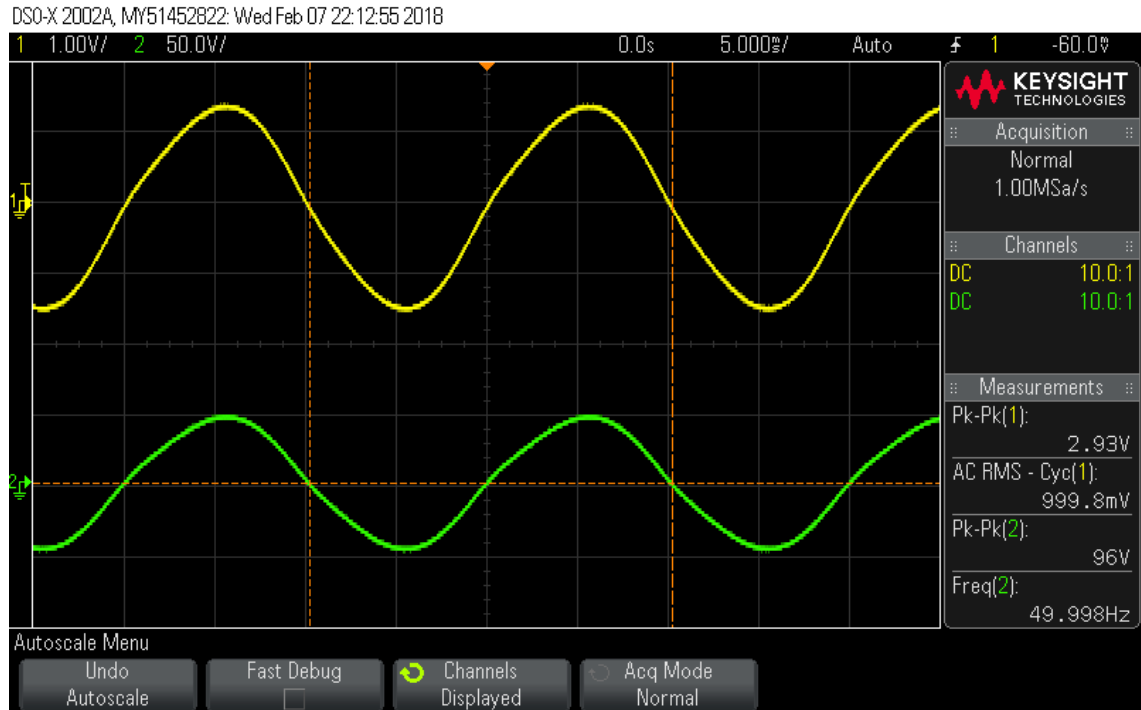


Kuva 20. Muuntajan A aaltomuodot 50Hz:n ja 1 V_{rms} -sisäänmenolla.

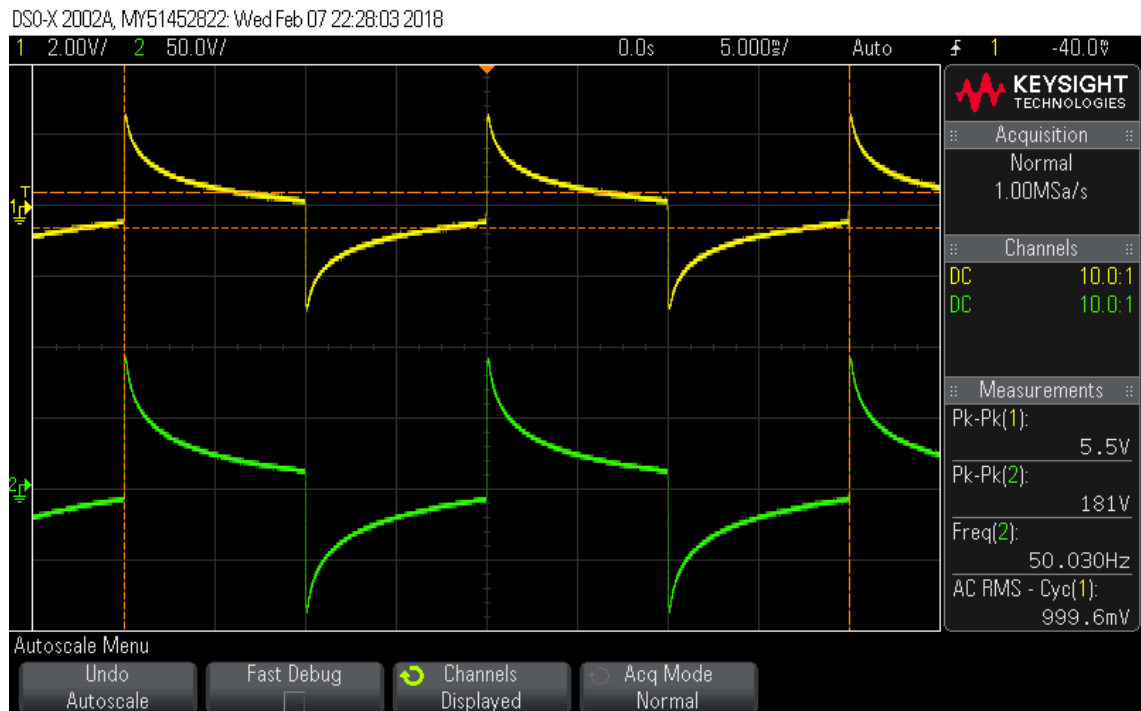


Kuva 21. Muuntajan A aaltomuodot 50 Hz:n kanttiaalto ja 1 V_{rms} -sisäänmenolla.

Muuntajaa B tutkittaessa muuntajan ulostulojännitettä mitanneet mittapäät kytkettiin samoin päin kuin sisäänmeno mitanneet, joten signaalit ovat samassa vaiheessa.



Kuva 22. Muuntajan B aaltomuodot 50 Hz:n ja 1 V_{rms} -sisäänmenolla.



Kuva 23. Muuntajan B aaltomuodot 50 Hz:n kanttiaalto ja 1 V_{rms} -sisäänmenolla.

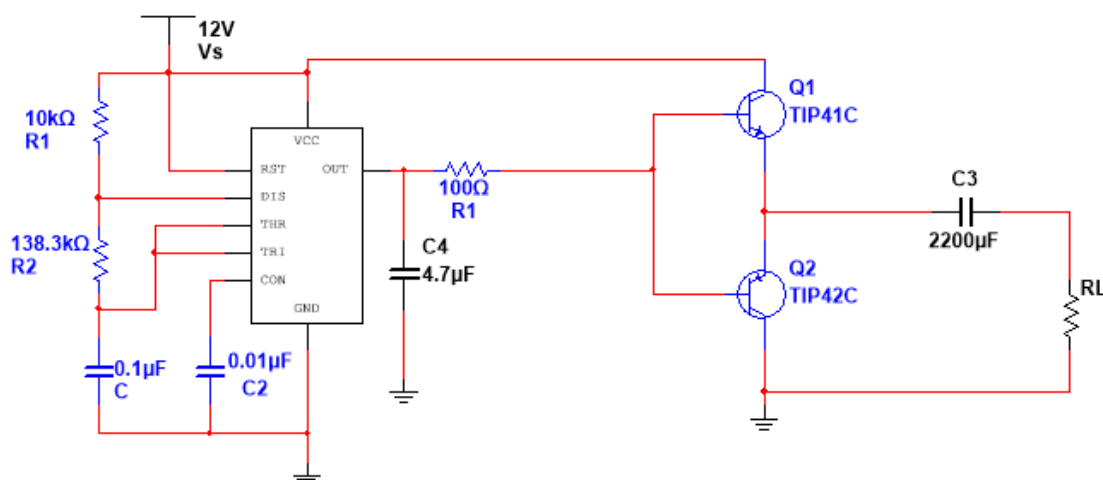
Invertterissä käytettävän muuntajan valinta suoritettiin edellä esitettyjen kuvien 20–23 avulla. Mittausten perusteella muuntaja A, osoittautui käyttötarkoitukseen sopivammaksi, ja tämä voidaan huomata vertailemalla kuvia 21 ja 23. Kyseisissä kuvissa on esitetty molempien muuntajien toimintaa 50 Hz:n kantiaallolla sisäänmenojännitteen ollessa 1 V_{rms} . Näiden kuvien perusteella muuntaja A toimii paremmin, koska ulostulojännite on lähempänä kantiaaltoa. Muuntajan B muuntosuhde on kaksi kertaa suurempi kuin muuntajan A ja se olisi parempi vaihtoehto käytettäväksi invertterissä. Korkeamman muuntosuhteen vuoksi muuntajaa B ei tarvitsisi purkaa kovinkaan paljoa, jotta saavutettaisiin tarpeeksi suuri muuntosuhde invertterikytkentää varten.

Mittausten perusteella voitiin päätellä, että muuntajan A taajuuskäyttäytyminen eroaa hieman muuntajan B käyttäytymisestä. Tämän taustalla voivat olla muuntajien ytimessä käytetyn materiaalin ominaisuudet ja muuntajan kierroslukumäärä. Kaiken kaikkiaan mittausten perusteella päädyttiin siihen, että muuntaja A on parempi vaihtoehto sen vuoksi, että siinä aaltomuoto säilyy paremmin ja muuntosuhdetta voidaan nostaa purkamalla muuntajan A ensiöstä kierroksia.

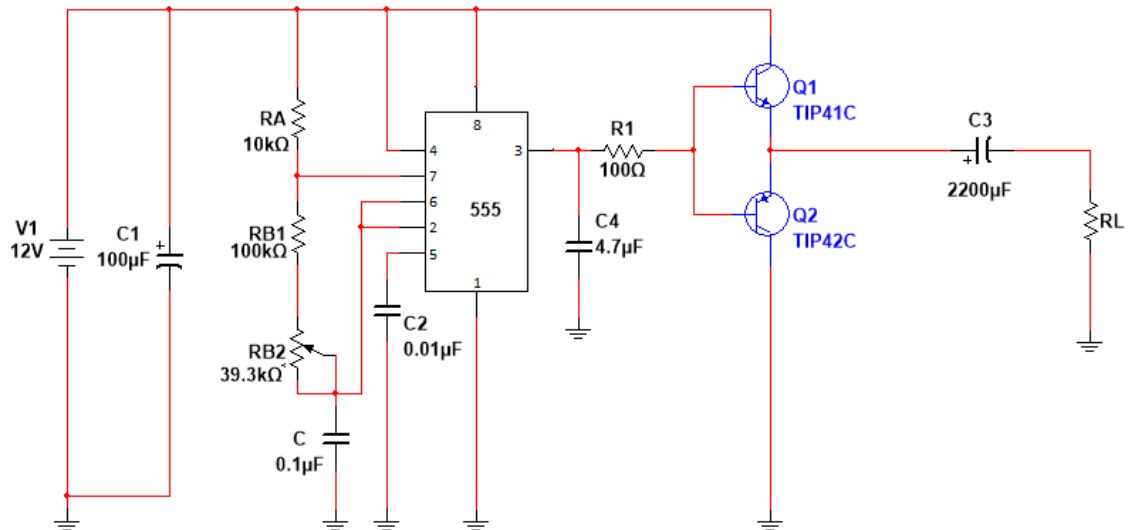
3.3 Koekytkennän ulostulon simulointi ja mittaustulokset

Tässä alaluvussa tutustutaan tutkittavan piirin ulostulon analysointiin ennen muuntajaa, eli mittaukset on tehty sijoittamalla kuormavastus kuvassa 3 näkyvän kondensaattorin C3 jälkeen ja irrottamalla muuntaja kytkennästä. Vastaavalla kuormavastuksella saadut simulointi- ja mittaustulokset on esitetty peräkkäin, jotta niiden vertailu olisi helppoa.

Kuvassa 24 on esitetty käytetty simulointikytkentä ja sitä vastaava mittauskyskentä on esitetty kuvassa 25. Kuvien 24 ja 25 erona ovat lisätty kondensaattori C1 sekä vastuksen R2 korvaaminen vastuksen ja säätövastuksen sarjaankytkennällä. Mittauskytkentään edellä esitetyt muutokset on tehty taajuuden säätöä ja signaalin suodatusta varten.

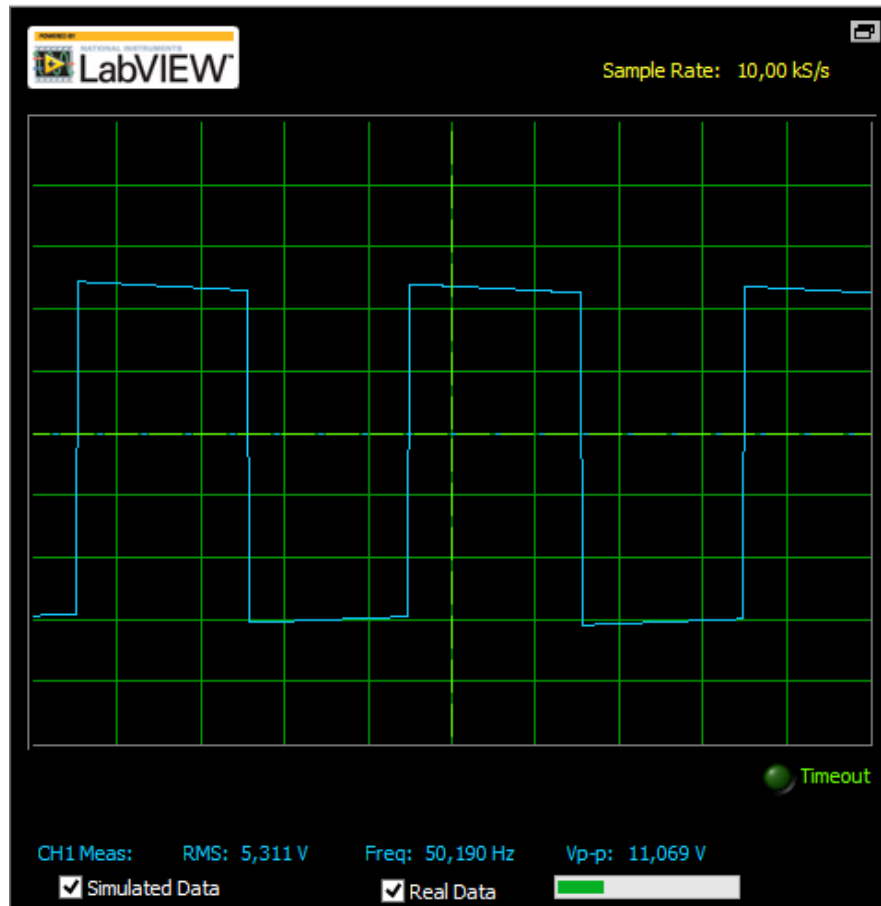


Kuva 24. Simulointikytkentä ajastimen ulostulojännitteen määrittämiseksi ennen muuntajaa.

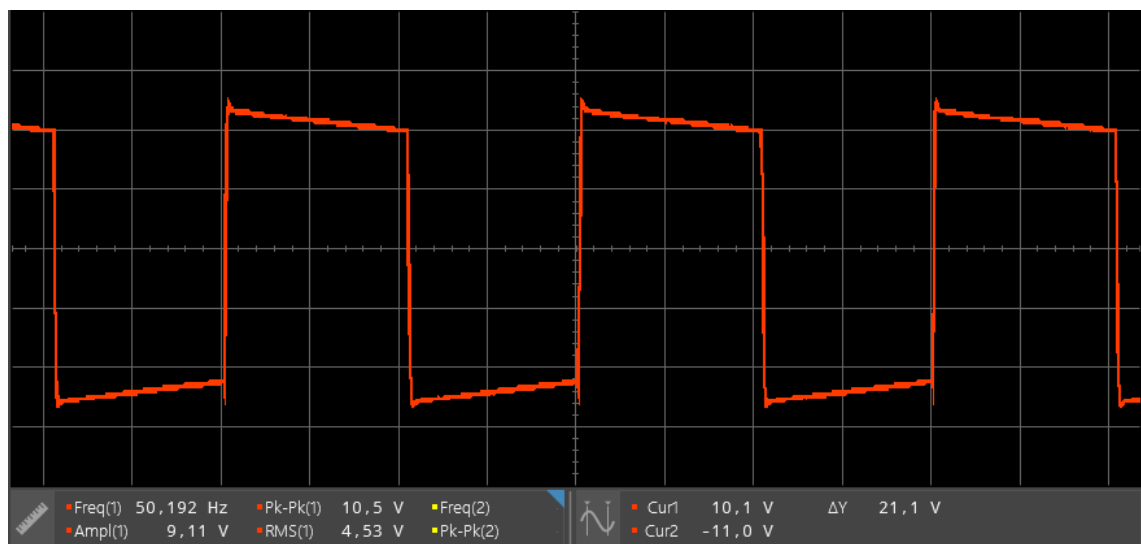


Kuva 25. Mittauskytkentä ajastimen ulostulojännitteen määrittämiseksi ennen muuntajaa.

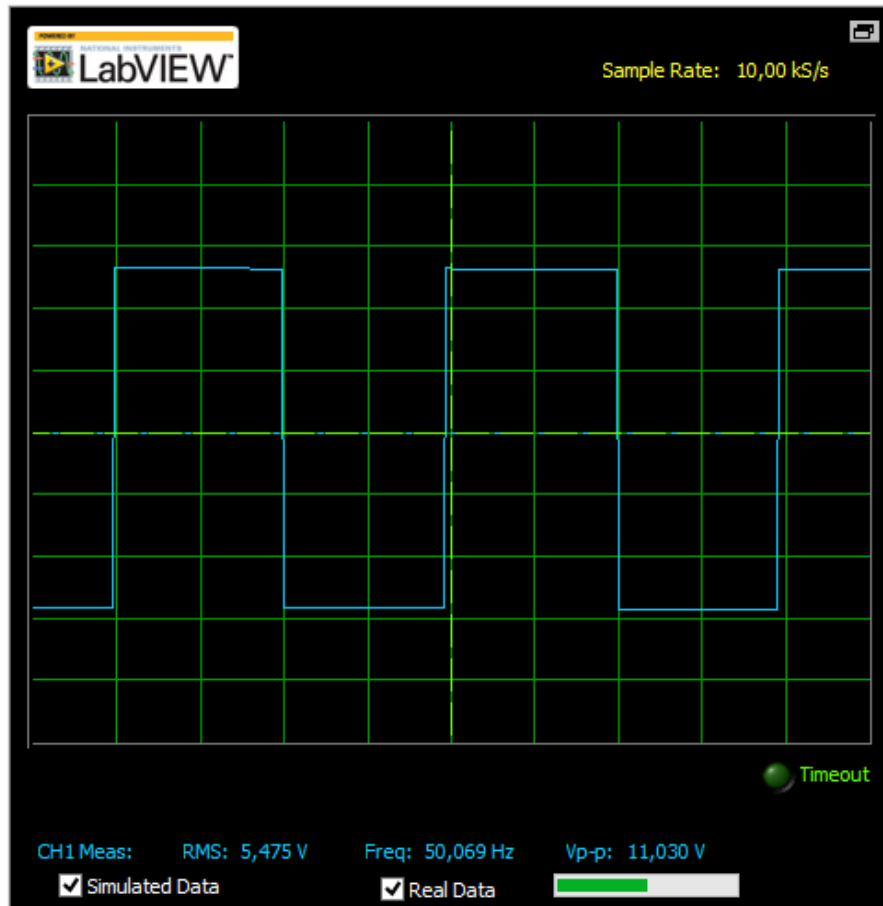
Kuvissa 26 ja 27 on esitetty piirin ulostulo $100\ \Omega$:n kuormavastuksen yli, ja kuvissa 28 ja 29 on esitetty vastaavat tulokset $1\ \text{k}\Omega$:n kuormavastuksen yli. Simulointi- ja mittauskuvien avulla voidaan analysoida ajastinpiirin ja push-pull-kytkennän yhteistoimintaa kahdella eri kuormalla. Varsinaista teoreettista vastinetta kyseisille mittauksille ei tästä työstä löydy, mutta simulointi- ja mittaustuloksia verrataan keskenään. Kummassakaan mittaus-tuloksessa ei päästä $12\ \text{V}$:n ulostuloon, mutta suuremmalla kuormavastuksella päästään korkeampaan ulostulon arvoon kuin pienemmällä kuormavastuksella. Sama ilmiö on huomattavissa myös simulointituloksissa. Näistä tuloksista voidaan huomata, että ajastinpiiriä kuormitettaessa ulostulojännitteen arvo ei pysy sisääntulojännitteen tasolla, ja mitä enemmän piiriä kuormitetaan, sitä enemmän ulostulojännitteen arvo laskee sisääntulojännitteeseen verrattuna. Kuvien 26–29 perusteella voidaan huomata tämän topologian suurin heikkous, eli kuormitusongelma. Tämä tarkoittaa sitä, että kytkennän virranantokyky rajoittaa käytettävän kuorman, esimerkiksi vastuksen, suuruutta. Teoriassa mainittu $200\ \text{mA}$:n virranantokyky rajoittaa näin ollen mahdollisten kuormien käyttöä. Jos kytkentää liitetään paljon virtaa kuluttava kuorma aiheuttaa se kuvissa 26–29 näkyvää ulostulojännitteen tippumista.



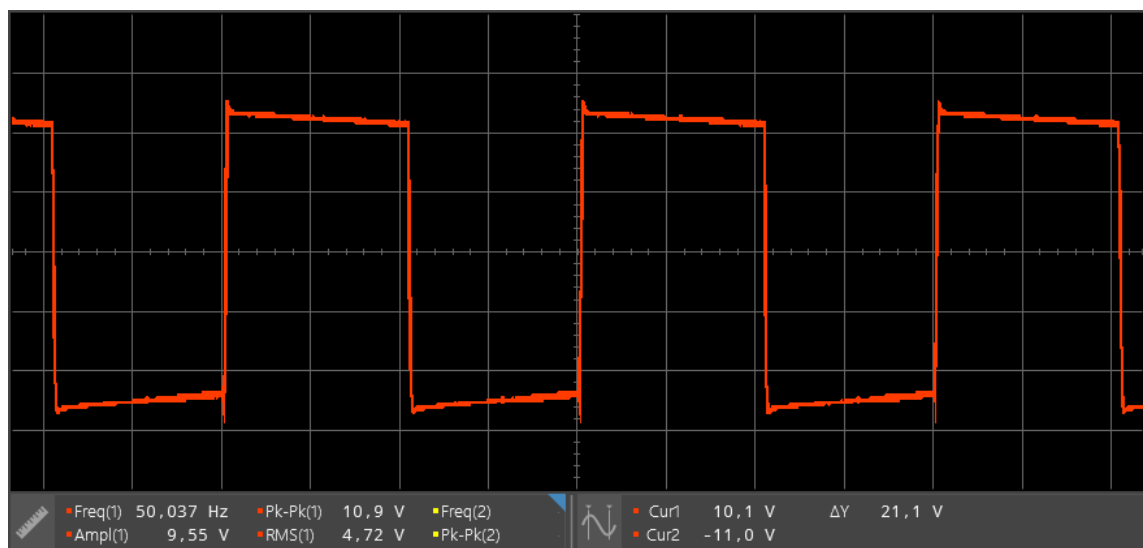
Kuva 26. Piirin ulostulo ennen muuntajaa 100 Ω :n vastuksen yli.



Kuva 27. Mitattu ulostulo ennen muuntajaa 100 Ω :n vastuksen yli.



Kuva 28. Piirin ulostulo ennen muuntajaa $1\text{ k}\Omega$:n vastuksen yli.

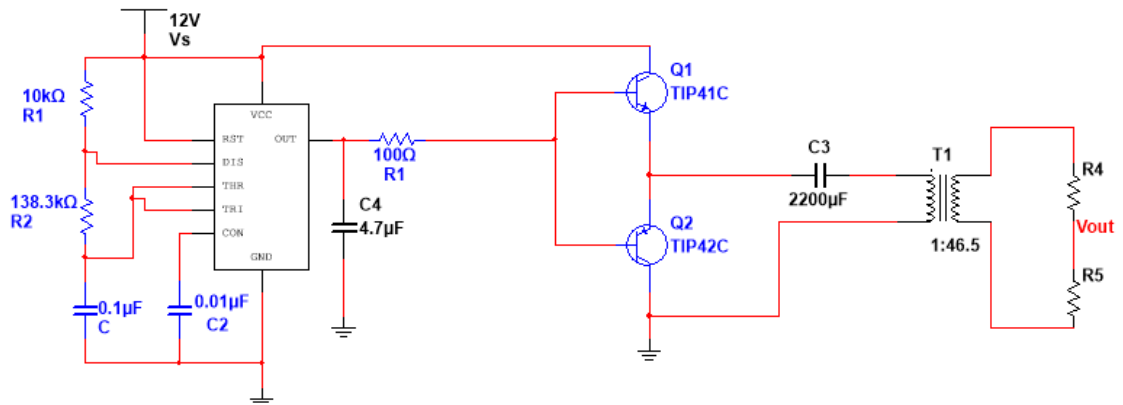


Kuva 29. Mitattu ulostulo ennen muuntajaa $1\text{ k}\Omega$:n vastuksen yli.

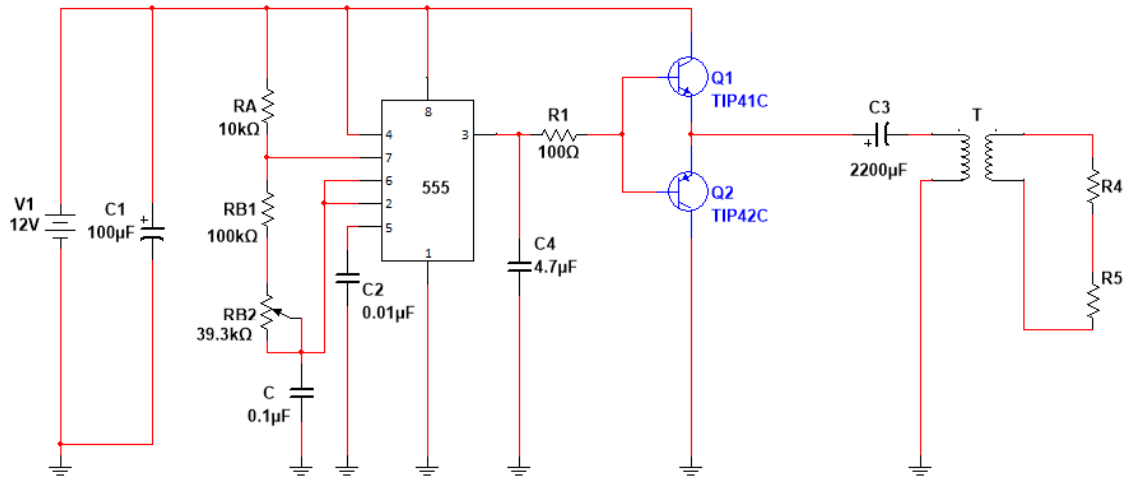
Kuvassa 30 on esitetty tutkimuksessa käytetty simulointikytkentä, jonka avulla vastuksien R_4 ja R_5 arvoja muuttamalla saatiin jännitteenjaolla aikaan 10-kertainen vaimennus ulostuloon. Kuvassa 31 esitettyä kytkentää on käytetty mittauksia tehdessä, ja 10-kertaista

vaimennusta käytettiin mittausten yhteydessä, jotta ulostulon aaltomuodot saatiin mahtumaan kokonaisuudessaan oskilloskoopin näytölle. Vaimennuksella tarkoitetaan kuvissa 30 ja 31 esitettyä kuormavastuksen jakoa kahteen vastukseen. Jännitteenjaolla ja valitsemalla vastukset siten, että ne vastaavat kokonaisuudessaan halutun suuruista kuormavastusta. Vastusten arvot valitaan siten, että R_4 on yhdeksän kertaa pienempi kuin R_5 . Näin ollen jännitteenjaolla saadaan ulostulojännitteeksi kymmenesosa siitä, minkä suuruinen ulostulo näkyisi, jos olisi vain yksi kuormavastus R_L ja sen suuruus olisi $R_4 + R_5$. Simuloinneissa käytettiin samaa vaimennusta, jotta tuloksia olisi helppo verrata keskenään. Simuloinneissa on lisäksi käytetty ideaalista muuntajaa.

Mittaustulokset on tehty saatavilla olevien vastusarvojen mahdollisuuksien mukaan, ja näin ollen vaimennus ei aina ole täsmällisesti 10-kertainen. Lisäksi kuvassa 30 on esitetty muuntajan muuntosuhde mutta kuvassa 30 näin ei ole. Tämä johtuu siitä, että muuntajan uudelleen käämimisen jälkeen luvun 3.2 kaltaisia mittauksia ei toistettu, joten tarkka muuntosuhde ei ole tiedossa.

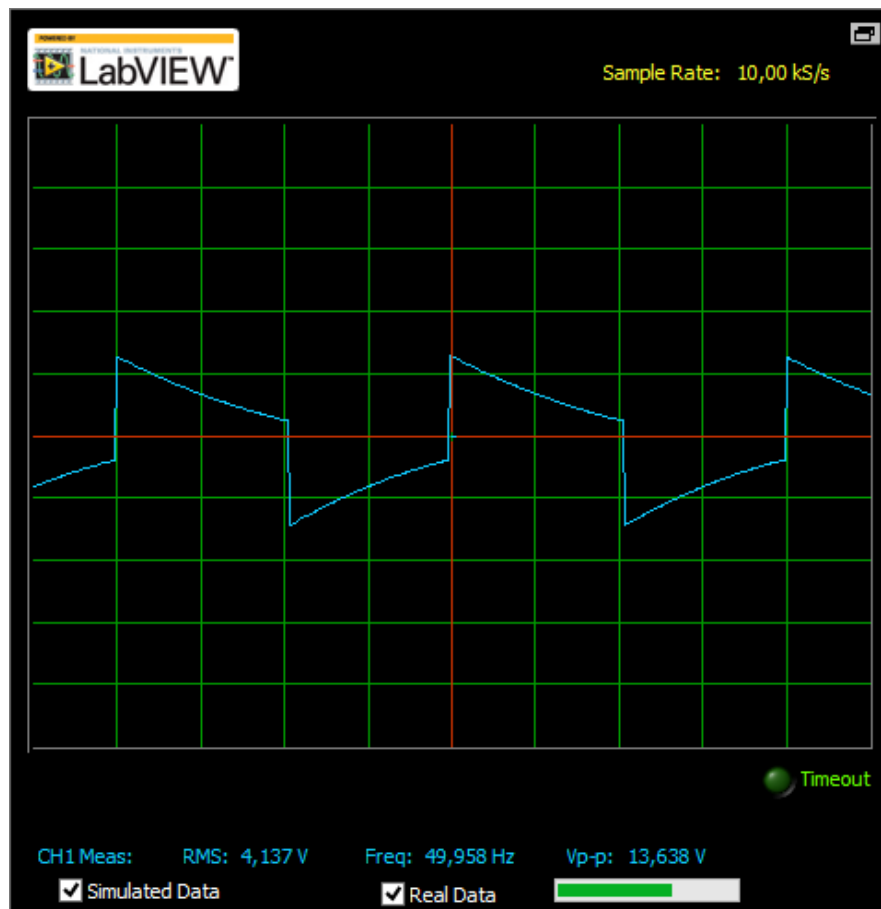


Kuva 30. 10-kertaisella vaimennuksella toteutettujen simulointien kytkentä. Multisim-ohjelman 555 timer wizard-toiminnolla piirretty koko piirin kytkentäkaavio, josta näkyy vastuksilla R_4 ja R_5 toteutettu vaimennus.

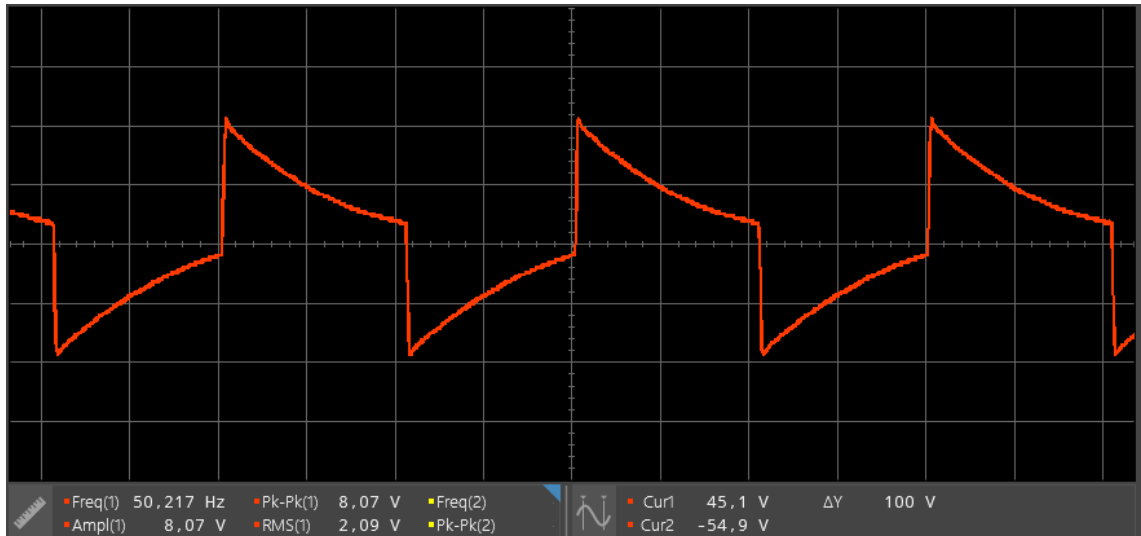


Kuva 31. Mittauskytkentä kokonaisuudessaan kaikkine komponenttiarvoineen.

Kuvan 32 simuloinnissa ja kuvan 33 mittauksessa on käytetty samoja vastusarvoja, jotta mittaustulokset saatiin oskilloskoopin ruudulle selkeästi näkyviin ja tuloksia on helppo vertailla keskenään. Kuvista 32 ja 33 voidaan huomata simuloitien ja mittausten vastaavan toisiaan niin aaltomuodoltaan kuin ulostulojännitteiltään.

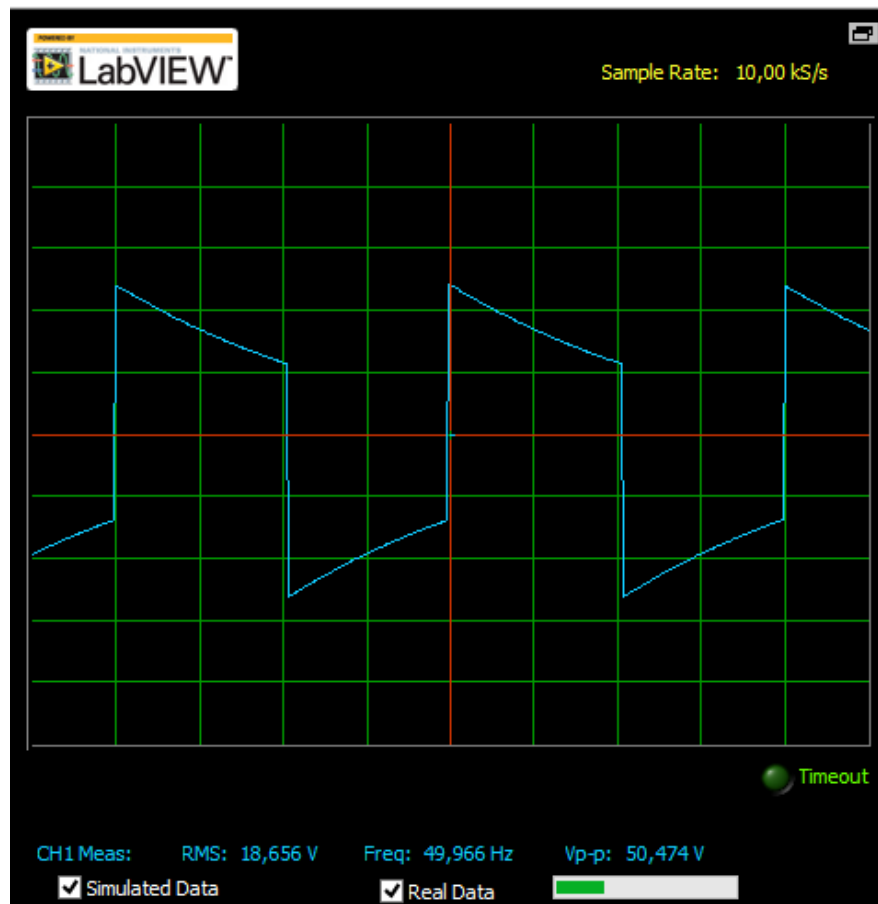


Kuva 32. Simuloitu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 1 kΩ:n vastuksen yli.

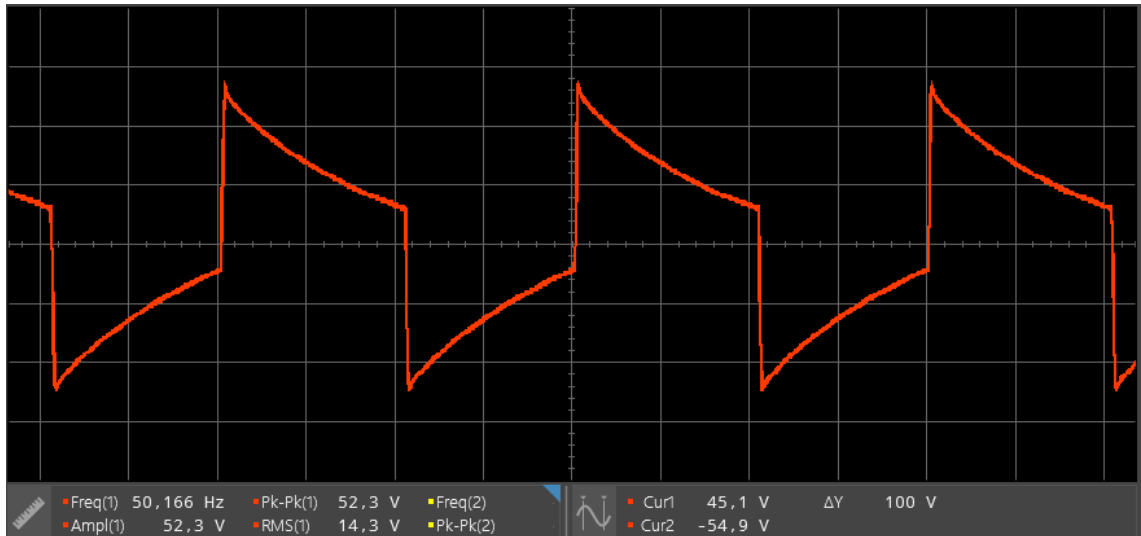


Kuva 33. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 1 k Ω :n vastuksen yli.

Kuvissa 34 ja 35 on esitetty koko kytkennän ulostulojännitteen aaltomuoto 10 k Ω :n kuormalla. Tässäkin tapauksessa aaltomuodot ovat hyvinkin samanlaiset ja ulostulojännitteiden arvot ovat myös lähes saman suuruiset.

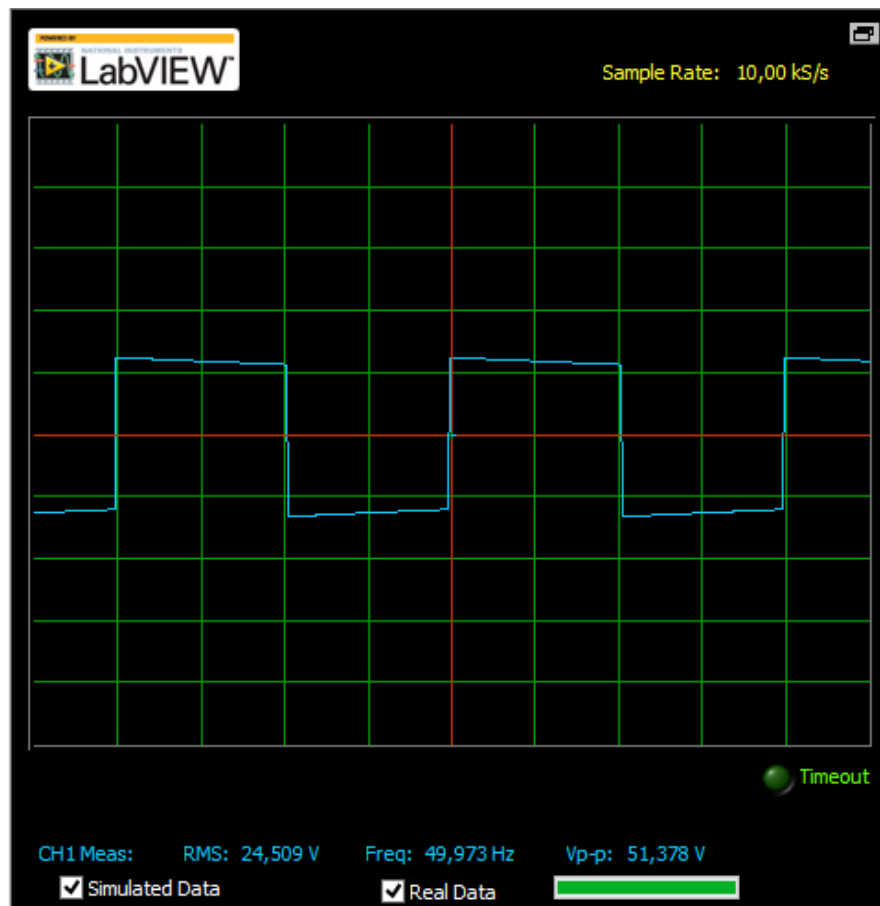


Kuva 34. Simuloitu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 10 k Ω :n vastuksen yli.

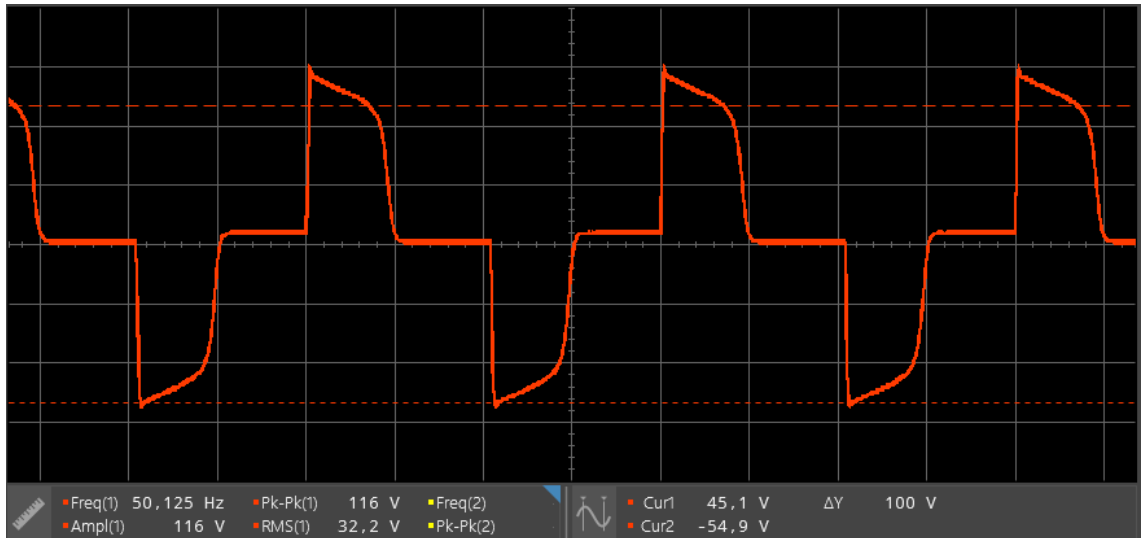


Kuva 35. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 10 kΩ:n vastuksen yli.

Kuvissa 36 ja 37 on esitetty koko kytkennän ulostulojännite 100 kΩ:n kuormalla. Tällä kuormalla on havaittavissa suuri ero simuloitun ja mitatun ulostulojännitteen välillä. Simuloinnissa aaltomuoto lähestyy kantiaaltoa mutta mittauksessa aaltomuoto vääristyy.

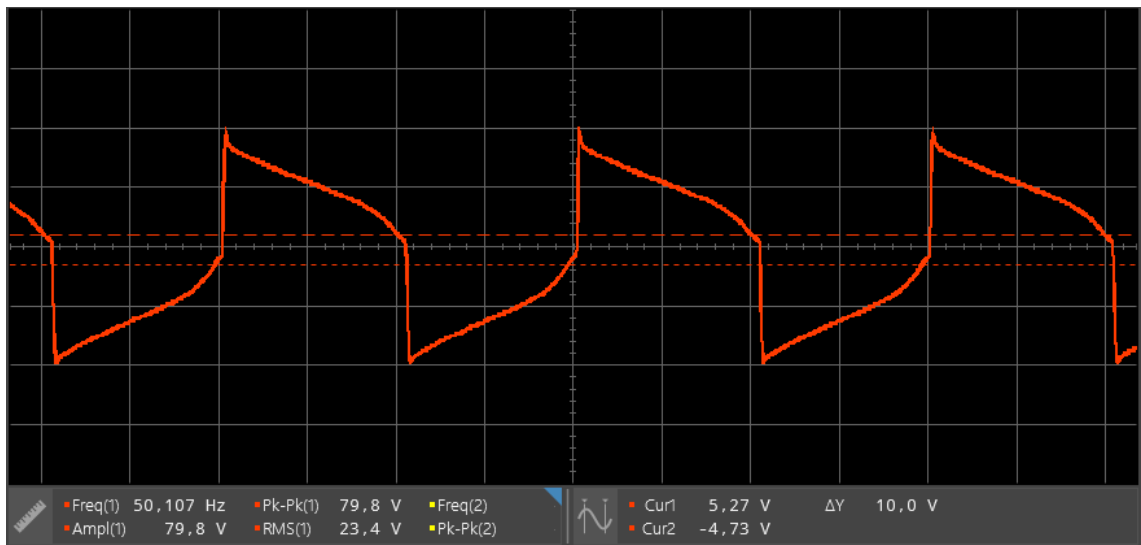


Kuva 36. Simuloitu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 100 kΩ:n vastuksen yli.



Kuva 37. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 100 kΩ:n vastuksen yli.

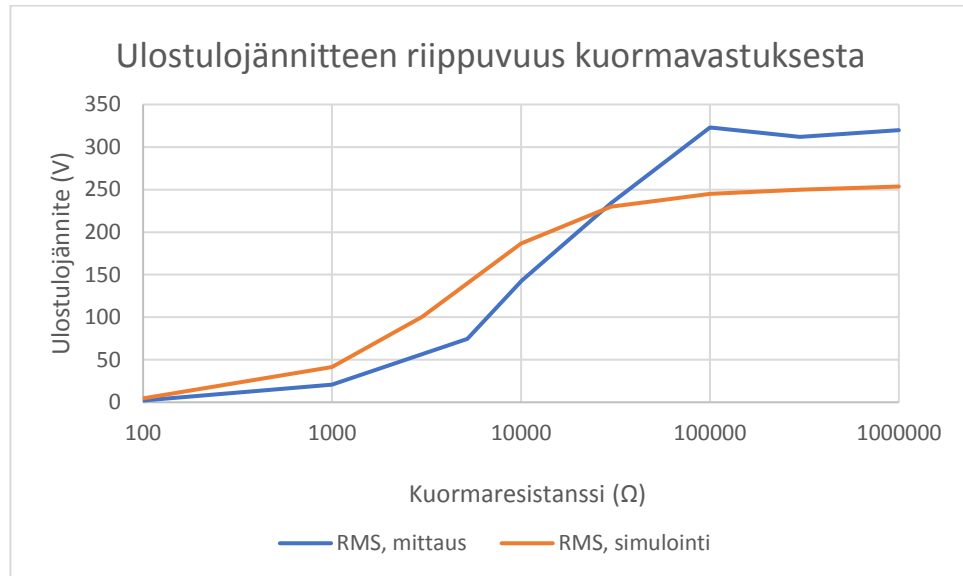
Kuvalle 38 ei ole simuloitua vastinetta, ja sen tarkoituksena on näyttää toteen, että kyseisellä invertterikytkennällä saadaan verkkosähköä vastaava jännite oikein mitoitettuun kuormaan. Tämän invertteritoteutuksen oikein mitoitettulla kuormalla tarkoitetaan kuvassa 38 esitetyn kuorman, eli 30 kΩ:n kuormaa.



Kuva 38. Mitattu koko piirin ulostulo 10-kertaisella vaimennuksella 30 kΩ:n vastuksen yli.

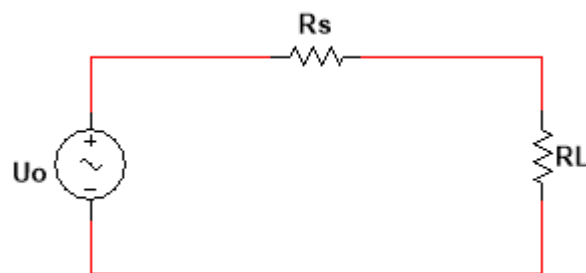
Kuvassa 39 on esitetty simulointi- ja mittaustulosten avulla saatu yhteys kuormavastuksen suuruuden ja ulostulojännitteen välille. Kuvan 39 käyrissä on huomattavissa eroja ja niiden syinä ovat muuntajan ominaisuudet ja muuntajan purkamisen eli purkamalla käämilankaa muuntajan ensiöstä saatiin sen kierroksia vähennettyä. Tämän tarkoituksena oli saada nostettua muuntajan muuntosuhdetta sille tasolle, että käytetyllä sisäänmenojännitteellä saataisiin 230 V:n ulostulojännite. Simuloinneissa ulostulojännitteen arvo saturoitui

noin 250 V:in. Käytännön mittauksissa ulostulojännite saturoitui paljon korkeampaan arvoon, noin 320 V:in ja tähän on syynä muuntajan muuntosuhteen muuttaminen. Muuntosuhteesta saatiin uudelleen käänimällä hieman liian suuri ja sen seurauksena kuvan 39 käyrissä on havaittavissa eroavaisuuksia. Kuitenkin, kuvan 39 käyrät muistuttavat muodoltaan toisiaan ja näin ollen voidaan päätellä simulointi- ja mittaustulosten vastaavan toisiaan. Kuvien 32–39 avulla voidaan huomata jo aikaisemmin mainittu kuormitusongelma eli kuormavirran kasvaessa ulostulojännite laskee.



Kuva 39. Simuloitu ja mitattu ulostulojännitteen ja kuormavastuksen riippuvuus.

Mittausten perusteella voidaan Theveninin teoreemaa hyödyntäen määrittää signaalilähteen sisäresistanssi. Kuvassa 40 on esitetty malli, jonka avulla sisäresistanssi voidaan määrittää saatujen mittaustulosten avulla.



Kuva 40. Sisäresistanssin määrittämiseen käytettävä kytkentä.

Kuvassa 40 R_s kuvaa määritettävää sisäresistanssia, R_L kuvaa kuormaresistanssia ja U_0 kuvaa kuormittamattoman signaalilähteen jännitettä. Kuvan 40 piirissä voidaan ulostulojännite,

$$U_L = \frac{R_L}{R_s + R_L} U_0, \quad (16)$$

josta

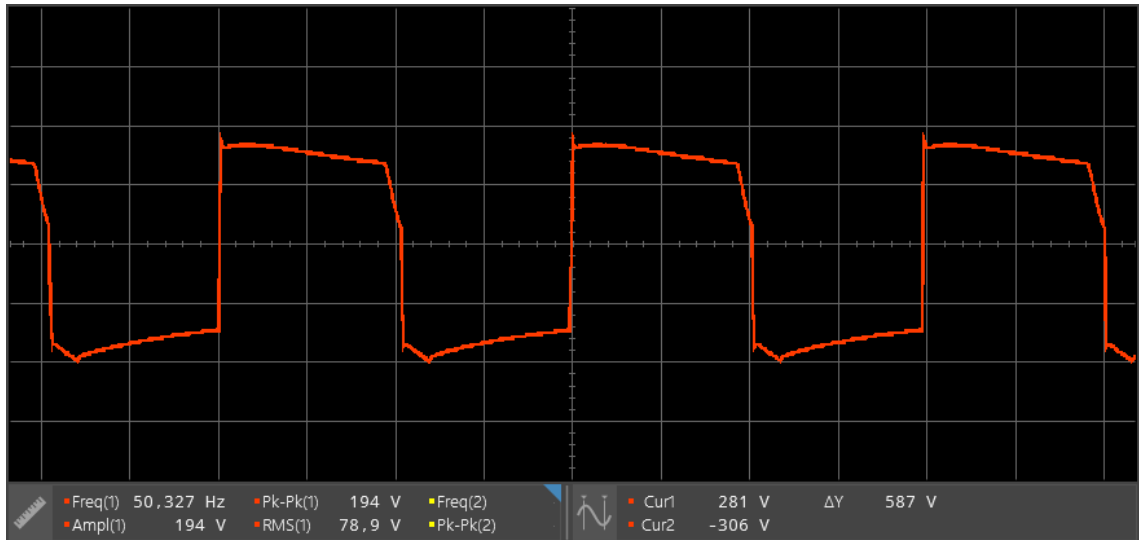
$$R_s = R_L \left(\frac{U_0}{U_L} - 1 \right). \quad (17)$$

Yhtälön 17 avulla saatiin määritettyä sisäresistanssille arvoja eri kuormavastusten arvoilla ja saadut tulokset on koottu taulukkoon 2. Kaavassa 17 käytetty U_0 on luettu kuvasta 39. Laskemalla keskiarvo taulukon 2 sisäresistanssien on, $R_s = 13,0 \text{ k}\Omega$. Suuresta sisäresistanssin arvosta voidaan päätellä kytkennän kuormitusongelma. Tämä on havaittavissa siitä, että kuormavastuksen pienentyessä kuormaan syötettävä virta kasvaa, jonka seurauksena sisäresistanssin aiheuttama jännitehäviö kasvaa. Ulostulojännite vastaavasti laskee sisäresistanssin aiheuttaman jännitehäviö vuoksi.

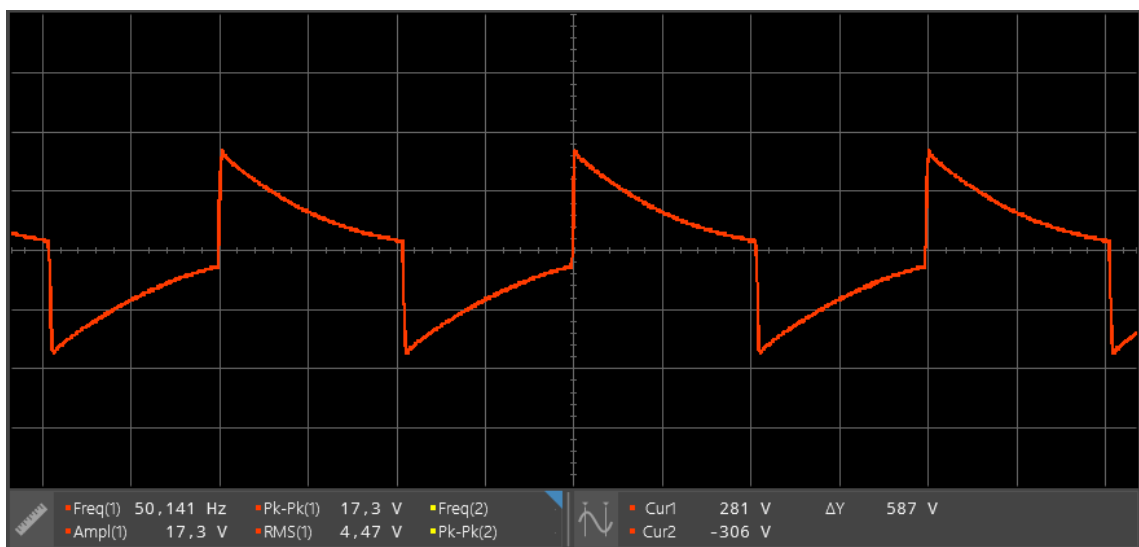
Taulukko 2. Sisäresistanssien arvot eri kuormavastuksilla.

$R_L (\Omega)$	$U_0 (\text{V}_{\text{rms}})$	$U_L (\text{V}_{\text{rms}})$	$R_s (\Omega)$
100	322	2,1	15200
1000	322	20,9	14400
10000	322	143	12500
30000	322	234	9750

Kuvissa 41 ja 42 on esitetty todellisella kuormalla eli erilaisilla polttimoilla saatuja mitaustuloksia.



Kuva 41. Mitattu koko piirin ulostulo, kun 4W:n led-polttimo kytkettynä



Kuva 42. Mitattu koko piirin ulostulo, kun 28 W:n halogeenipolttimo kytkettynä.

Kuvista 41 ja 42 huomataan myös kuorman suuruuden vaikutus ulostulojännitteeseen. Enemmän kuormittava 28 W:n halogeenipolttimo aiheuttaa suuremman jännitteen tippumisen kuin 4 W:n led-polttimo. Kun kytkentää kuormitettiin led- ja halogeenipolttimoilla havaittiin, että led-polttimo saatiin syttymään mutta halogeenipolttimoa ei. Tämä on suora seuraus jännitteen tippumisesta ja kuormitusongelmasta.

3.4 Muut havainnot

Tässä luvussa tarkastellaan työn suorituksen aikana tehtyjä havaintoja, mutta ei analysoida tuloksia teorian kannalta. Tämän luvun tarkoituksena on tutustua siihen, miten työtä voisi jatkokehittää tai parantaa saatuja tuloksia, sekä esitellään tehtyjä havaintoja.

Mittausten aikana transistorit lämpenivät huomattavasti, mitä voisi vähentää virranrajoitusvastuksilla eli emitterivastuksilla. Näillä vastuksilla transistorien lämpenemistä saataisiin vähennettyä mutta samalla rajoitettaisiin push-pull-vahvistimen ulostulovirtaa ja näin ollen muun piirin toimintaa. Pienentämällä virtaa kytkennän kuormitusongelman vaikutukset kasvaisivat eikä kytkennällä voitaisi ajaa kuin suuria kuormia. 555-ajastinpiirin ulostulovirta on valmiiksi jo niin pieni, ettei sen rajoittaminen ole muun piirin toiminnan kannalta järkevää. Toisaalta ilman emitterivastuksia piirin pitkäaikainen käyttö saattaa rikkoa transistorit. Toinen tapa vähentää transistorien lämpenemistä olisi jäähdytyslevyjen lisääminen. Näin ollen transistorien lämpenemistä voitaisiin vähentää vaikuttamatta alentavasti ajastinpiirin ulostulovirtaan.

Erilaisilla polttimoilla saadut tulokset, jotka on esitetty luvussa 3.4, ja kuormittamattoman piirin ulostulo olisi saatu lähemmäksi verkkojännitettä käänimällä muuntajaa tarkemmin ja testaamalla vastusjaolla alusta alkaen. Työtä voi siis parantaa erilaisella muuntajalla tai käänimällä käytettyä muuntajaa hieman tarkemmin. Muuntajaa purkamalla ulostulojännite saataisiin nostettua ja käytetyn muuntajan A tapauksessa vastaamaan verkkosähköä. Paremmalla käämimisellä toteutetun invertterin toiminta vastaisi paremmin kaupallisia inverttereitä, ja tutkitun piirin toimintaa voitaisiin näin jatkokehittää ja parantaa. Lisäksi valitsemalla toisenlaisen muuntajan koko kytkennän toiminta saattaisi parantua, sillä usein muuntajilla on jokin tietty ominaistajuus ja muuntajien ominaisuudet riippuvat myös monista muista muuntajien valmistukseen sekä materiaaleihin liittyvistä yksityiskohdista. Muuntajan muuntosuhde vaikuttaa invertterin lähtöresistanssiin ja muuntosuhteen kasvaessa lähtöresistanssi kasvaa muuntosuhteen neliön verran.

Kokonaisuutena työssä saadut mittaustulokset ovat hyviä, mutta joitakin eroja on huomattavissa. Joitakin mittauksia tehdessä oli vaikeuksia saada tuloksia näkyviin, ja syynä tähän oli koekytkentälevyn kontaktien kuluminen ja näin ollen piirin toimimattomuus. Toisena syynä mittausten ja teorian välisiin eroihin ovat käytettyjen komponenttien toleranssit, jotka aiheuttavat pientä vaihtelua esimerkiksi vastusarvoihin.

Jatkokehitysnäkyminä voidaan pitää muuntajien teorian tarkempaa analysointia ja sen soveltamista koko piirin toiminnan kannalta. Toisena kehityskohteenä voi pitää diodin kytkemistä kuvassa 3 esitetyn piirin vastuksen R_B rinnalle jolloin pulssisuhdetta saataisiin säädettyä ja sen vaikutusta käytännössä tutkittua. Kytkennässä käytettyjen bi-polaaritransistorien tilalle voitaisiin vaihtaa kanavatransistorit eli FET:t ja testata kytkennän toimintaa ja saada näin vertailukohta myös erilaisten transistorikytkentöjen välille. Vastaavasti voitaisiin myös jatkokehittää ja kokeilla Darlington-transistoreja tavallisten transistorien sijaan ja saada mahdollisesti kytkennän toimintaa parannettua ja lisättyä lämpenemistä vähentävät emitterivastukset. Näiden lisäksi ulostulojännitettä voitaisiin suodattaa kantiaallosta siniaalloksi, jotta se vastaisi paremmin verkkosähköä. Lisäksi 555-ajastinpiirin ja push-pull -kytkennän väliin voisi lisätä puskurin, jolloin 555-ajastinpiirin virranantokyky ei olisi enää ongelma.

4. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin DC/AC-invertterien toiminnan perusteita ja tarkasteltiin tarkemmin 555-ajastinpiirin sisältävän invertterikytkennän teoreettista toimintaa lohkotasolla sekä toimintaa käytännössä koekytkentälevylle rakennetun kytkennän avulla. Työssä 555-ajastinpiiri on kytketty astabiiliksi oskillaattoriksi tuottamaan tasajännitteestä vaihtojännitettä. Kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin rakennettua invertterikytkentää, kytkennän lohkojen toimintaa sekä koko kytkennän toimintaa erilaisilla kuormavastuksilla. Saatuja tuloksia analysoitiin vertaamalla niitä teoreettisiin arvoihin, ja muodostettiin kuva kytkennän toiminnasta käytännössä.

Inverttereitä on monenlaisia ja tässä työssä tarkemmin tutkittu invertteri koostuu 555-ajastinpiiristä, push-pull -kytkennästä ja muuntajasta. Tutkittu kytkentä on yksinkertainen, eikä se sisällä kovinkaan monia komponentteja mutta siihen liittyy myös omat heikkoudet, joista esimerkkinä kuormitusongelma. Kyseinen ongelma tulee ilmi, kun kuormavastusta pienennetään, koska tällöin 555-ajastinpiirin maksimaalinen virransyöttö ja -veto tulevat vastaan ja ulostulojännitteen arvot alkavat laskea.

Työssä rakennetussa kytkennässä 555-ajastinpiirin tehtävänä on tuottaa akun tasajännitteestä 50 Hz:n taajuista vaihtojännitettä, joka puolestaan syötetään kahdesta BJT:stä koostuvaan push-pull-vahvistimeen. Vahvistimen tehtävänä on vahvistaa kytkennän virtaa ja mahdollistaa näin muuntajan toiminta. Muuntajan toiminta perustuu muuttuvaan virtaan, joka aiheuttaa muuttuvan magneettikentän indusoitumisen. Muuntajalla nostetaan jännite halutulle tasolle koko kytkennän ulostuloon.

Työssä tehdyt simuloinnit ja mittaukset vastaavat suurelta osin toisiaan ja myös teoriaa. Simuloinnit suoritettiin Multisim-ohjelmiston 555 timer wizard -työkalulla. Eroja on löydettävissä, muun muassa suurella kuormalla mitattu ulostulojännite on täysin erilainen verrattuna simulointitulokseen. Tämän eroavaisuuden taustalla vaikuttavat muun muassa muuntajan ominaisuudet, sillä simuloinnit on suoritettu ideaalisella muuntajalla, mutta mittauksissa käytetty muuntaja ei ole ideaalinen. Mittaustulosten avulla saatiin myös määritettyä lähteen sisäresistanssi mallintamalla kytkentää Theveninin teoreeman avulla, ja sisäresistanssin, R_s , arvoksi saatiin 13,0 k Ω . Suuri sisäresistanssin arvo viittaa suoraan kuormitusongelmaan. Tämä on selitettävissä sillä, että kuormavastuksen pienentyessä kuormaan syötetään suurempi virta, ja virran kasvaessa sisäresistanssin aiheuttama jännitehäviö kasvaa. Tämän seurauksena ulostulojännite laskee eli voidaan havaita kytkennän kuormitusongelma.

Varsinaisten mittausten lisäksi invertterillä syötettiin onnistuneesti led- ja halogeenipolttimoita. 4 W:n led-polttimo syttyi, kun se liitettiin invertteriin mutta 28 W:n halogeenipolttimo ei syttynyt.

Jatkokehitysnäkymiä analysoitiin tämän työn lopussa ja sieltä voidaan esiin nostaa muun muassa erilaisten transistorien käyttäminen nykyisten bipolaaritransistorien sijaan, erilaisen muuntajan käyttäminen, muuntajan tarkempi käämiminen juuri verkkojännitettä vastaavan jännitteen saamiseksi ja diodin lisääminen pulssisuhteen muuttamisen mahdollistamiseksi. Näiden lisäksi ulostuloa voitaisiin vielä suodattaa, jotta kanttiaallosta saataisiin siniaalto, koska siniaallon käyttäminen on turvallisempaa monen herkän elektronisen laitteen kannalta verrattuna kanttiaaltoon.

LÄHTEET

- [1] I. Lindell, Sähkön pitkä historia, Gaudeamus Helsinki University Press Oy Yliopistokustannus, Tampere, 2009.
- [2] M. H. Rashid, Power electronics circuits, devices and applications, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [3] T. L. Skvarenina, The power electronics handbook, Industrial electronics series, CRC Press, 2002.
- [4] A. R. Hambley, Electronics, 2nd edition, Upper Saddle River Prentice-Hall Inc, New Jersey, USA, 2000.
- [5] D. Lowe, Electronics All-In-One for Dummies, 2nd edition, John Wiley & Sons, Hoboken New Jersey, USA, 2017, pp. 337 – 354. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tut/reader.action?docID=4790370&ppg=347>.
- [6] NE555, SA555, SE555 General purpose single bipolar timers, ST, November 2008. Saatavissa (viitattu 30.03.2018): <https://datasheet.octopart.com/NE555N-STMicroelectronics-datasheet-503160.pdf>.
- [7] LM555 timer, Texas Instruments, Literature Number: SNAS548D, February 2000, revised January 2015. Saatavissa (viitattu 30.03.2018): <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf>.
- [8] A. P. Malvino, Electronic Principles, 6th international edition, McGraw-Hill, New York, USA, 1999.
- [9] S. D. Senturia & B. D. Wedlock, Electronic circuits and applications, John Wiley & Sons, 1975.
- [10] M. Snelgrove, Push-pull amplifier, Department of Electronics, Carleton University, Ontario, Canada, 2014. Saatavissa (viitattu 23.05.2018): <https://www.accessscience.com/content/557900>.
- [11] R. L. Riddle & M. P. Ristenbatt, Transistor physics and circuits, Prentiss Hall, New Jersey, 1958.
- [12] N. Mohan & T. M. Undeland & W. P. Robbins, Power electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, Republic of Singapore, 1989.

- [13] B. S. Guru & H. R. Hiziroğlu, *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*, 2nd edition, Cambridge University Press, Edinburgh, UK, 2004.
- [14] R. Stein & W. T. Hunt Jr, *Electric power system components transformers and rotating machines*, Litton Educational Publishing, New York, USA, 1979.
- [15] Multisim, National Instruments, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.6.2018): <http://www.ni.com/fi-fi/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim/multisim-education.html>
- [16] VirtualBench, National Instruments, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.6.2018): <http://www.ni.com/fi-fi/shop/electronic-test-instrumentation/virtualbench/what-is-virtualbench.html>
- [17] 555 timer wizard, National Instruments, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.6.2018): <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/375482B-01/multisim/555timerwizard/>

LIITE A: NE555 -AJASTINPIIRIN PIIRIKAAVIO

