

BL10A1000 Kandidaatintyö ja seminaari

KANDIDAATINTYÖ
28.02.2009

Tommi Kärkkäinen
0312823
Säte TkK 3

Reaaliaikainen Clarcken muunnos

Tiivistelmä

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Tommi Kärkkäinen

Reaaliaikainen Clarken muunnos

Kandidaatintyö

2009

17 sivua, 7 kuvaa ja 4 liitettä

Tarkastaja: professori Pertti Silventoinen

Hakusanat: Clarken muunnos, laitesuunnittelu, oskilloskooppi, taajuusmuuttaja

Keywords: Clarke's transformation, hardware development, oscilloscope, variable frequency drive

Työssä suunniteltiin ja rakennettiin laite, joka suorittaa reaaliaikaisen Clarken muunnoksen kolmivaiheiselle mittaussignaalille. Kolmivaiheisella mittaussignaalilla tarkoitetaan tässä kolmivaiheisesta järjestelmästä mitattuja vaihevirtoja tai -jännitteitä. Lähtö tuottaa kaksivaiheisen mittaussignaalin, jota voidaan tutkia oskilloskoopilla. Käyttämällä oskilloskooppia xy-moodissa näytölle piirtyy virta- tai jänniteympyrä. Laitetta voidaan käyttää esimerkiksi taajuusmuuttajien testauksen apuvälineenä, jolloin parametrien muuttamisen vaikutus laitteen tuottaman sähkön laatuun nähdään välittömästi.

Abstract

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Electrical engineering degree programme

Tommi Kärkkäinen

Real time Clarke's transformation

Bachelor's thesis

2009

17 pages, 7 figures and 4 appendices

Examiner: professor Pertti Silventoinen

Keywords: Clarke's transformation, hardware development, oscilloscope, variable frequency drive

In this thesis a device was designed, which performs Clarke's transformation to a three phase measurement signal in real time. In this context, a three phase measurement signal is defined as a signal representing the phase currents or voltages measured from a three phase system. The output is a two phase signal which can be examined with an oscilloscope. By using the oscilloscope in the xy mode, the current or voltage circle is drawn on the display. The device can be used in testing variable frequency drives, for instance, to allow immediate observation of changes in the output of the drive caused by changes in the drive's parameters.

Sisältö

1	Johdanto	3
2	Vaatimukset ja toteutus	4
2.1	Tulot	4
2.1.1	Tulon skaalaustavat	4
2.1.2	Tuloelektroniikka käytännössä	6
2.2	Muunnoksen toteutus	8
2.2.1	Clarken muunnoksen matematiikka	8
2.2.2	Analoginen ja digitaalinen toteutustapa	9
2.2.3	Muunnoksen toteuttava elektroniikka	10
2.3	Käyttösjähköt	11
2.4	Mekaniikka ja piirilevy	11
3	Toiminnan testaus	12
3.1	Turvallisuus ja toimintaedellytykset	12
3.2	Testaus osana mittausjärjestelmää	13
3.3	Testaus suurella tulojännitteellä	14
4	Yhteenveto ja johtopäätökset	15
	Viitteet	17
Liitteet	I Tekniset tiedot ja käyttöohje	
	II Kytkenäkaavio	
	III Osaluettelo	
	IV Piirilevyn osasijoittelukaavio	

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

R	Vastuskomponentti, resistanssi
U, V	Jännite
x	Jännite- tai virtasuure

Alaindeksit

a, b, c	Kolmivaihejärjestelmän vaiheet
N	Negatiivinen
P	Positiivinen
0	Clarcken muunnoksen nollalähtö
α	Clarcken muunnoksen x-koordinaattilähtö
β	Clarcken muunnoksen y-koordinaattilähtö

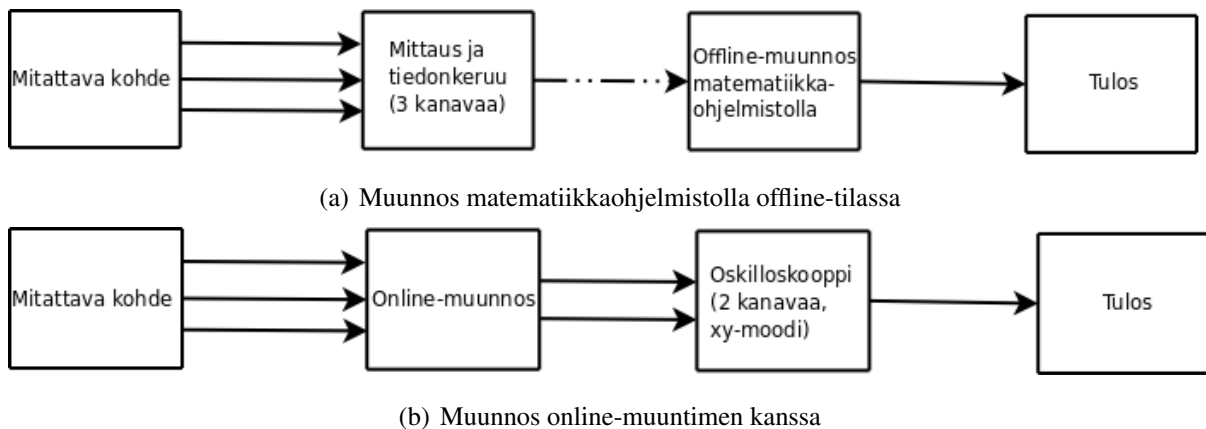
Lyhenteet

AC	Alternating Current, vaihtovirta
BNC	Bayonet Neill Concelman, liitintyyppi
DC	Direct Current, tasavirta
PGA	Programmable Gain Amplifier, säädettävä vahvistin
SOIC	Small Outline Integrated Circuit, mikropiirikotelo

1. Johdanto

Työssä suunniteltiin laite, joka suorittaa reaaliaikaisen Clarken muunnoksen kolmivaiheiselle jännite- tai virtasignaaleille. Kolmivaiheinen signaali tarkoittaa tässä esimerkiksi taajuusmuuttajalla ajetulta kolmivaihemoottorilta mitattua vaihejohtimien virtaa tai jännitettä. Muunnoksessa signaali muuntuu kaksivaiheiseksi, ja kun sitä tutkitaan oskilloskoopilla xy-moodissa, piiryy näytölle jännite- tai virtaympyrä, joka kuvastaa samalla moottorissa pyörivää kenttää. Puhdasta siniaaltoa sisältävässä symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä kuvaajasta tulee puhdas ympyrä; säröytyneestä ympyrästä voidaan päätellä, että signaali ei ole puhdasta siniaaltoa tai järjestelmä ei ole symmetrinen.

Muunnoksen tekeminen on aiemminkin ollut mahdollista, mutta vain keräämällä kolmivaiheinen mittatieto oskilloskoopilla tai muulla tallennuslaitteella ja tekemällä muunnos erikseen esimerkiksi MATLAB-ohjelmistolla. Laite mahdollistaa siis saman mittauksen tekemisen on-line, jolloin vaikkapa taajuusmuuttajan parametrien muuttamisen vaikutus nähdään välittömästi. Kuva 1.1 kuvaa molempia mittaustapoja lohkokaaavion muodossa.



Kuva 1.1 Online-muunnin mahdollistaa tulosten saannin oskilloskoopille online (b). Ilman muunninta tarvitaan kolmekanavainen tiedonkerääjä, ja muunnos tehdään erillisellä tietokoneella matematiikkaohjelmistolla (a).

Laitteen tarkoituksena on helpottaa taajuusmuuttajien mittaamista. Sen avulla taajuusmuuttajan parametreihin tehtyjen muutosten vaikutus nähdään välittömästi ilman tarvetta erilliselle tietokoneelle ja matematiikkaohjelmistolle.

2. Vaatimukset ja toteutus

Laitte voidaan karkeasti jakaa kolmeen lohkokon, joiden läpi signaali kulkee: tuloon, muunnokseen ja lähtöön. Tulon tehtävänä on tehdä signaalista käsittelykelpoista. Lähinnä se tarkoittaa suurijännitteisten signaalien vaimentamista. Vaimennusvaihtoehtoja on kolme: 0, -20 ja -40 dB. Muunnososa suorittaa nimensä mukaisesti itse muunnoksen. Lähdön tehtävänä on ajaa signaalia laitteesta ulos. Sen voi ajatella jänniteseuraajaksi kytkettynä operaatiovahvistimena, jonka lähtövirta saa olla suurempi kuin tavallisilla operaatiovahvistimilla. Lähtöä ajavat operaatiovahvistimet kuitenkin soveltuvat myös itse muunnoksen tekemiseen, joten lähdössä ei ole erillistä vahvistinta.

Tämä dokumentti lähinnä selostaa suunnitteluvaiheet ja perustelee tehdyt valinnat. Muu oleellinen informaatio on koottu liitteisiin. Käyttäjän kannalta oleellinen informaatio on liitteessä I suppean käyttöohjeen muodossa. Liitteet II - IV ovat huoltoa varten ja sisältävät kytkentäkaavion, osaluettelon ja piirilevyn osasijoittelukaavion.

2.1. Tulot

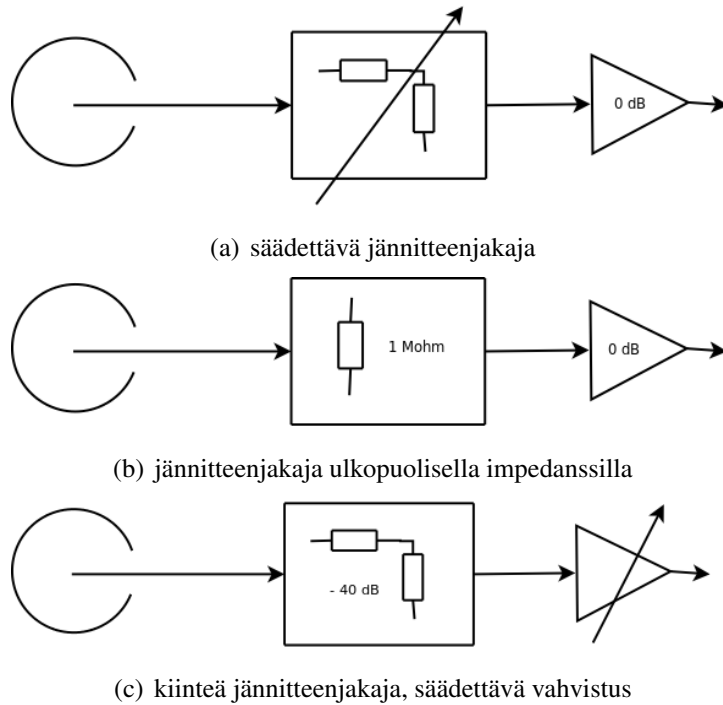
Laitteessa on kolme tuloa, joiden tuloimpedanssi on $1\text{ M}\Omega$. Tulosignaali muunnoksen tekeväälle osalle voi olla maksimissaan $\pm 5,0\text{ V}$. Suurempien tulojännitteiden käyttö on mahdollistettu vaimennuksen kautta, ja tuloterminaaliin voidaankin syöttää maksimissaan $\pm 500\text{ V}$ jännitettä millä tahansa aaltomuodolla.

2.1.1. Tulon skaalaustavat

Tuloaste tarjoaa kolme vaimennusvaihtoehtoa: 0, -20 ja -40 dB. Vaimennuksen tekemiseen on useita erilaisia tapoja, joista tässä työssä käsitellään kolmea.

Ensimmäinen, intuitiivisin malli (kuva 2.1a) tarjoaa kolme erilaista jännitteenjakajaa, joista valitaan yksi. Jännitteenjakajan perässä olisi jännitteen-seuraaja, jonka tehtävänä on poistaa tulon jälkeisen elektroniikan tuloimpedanssin vaikutus tulon toimintaan. Jännitteenjakaja valittaisiin releellä ja releitä aktivoitaisiin kiertokytkimellä. Releiden ongelmaksi muodostuu kuitenkin niiden jännitteenkesto. Piirilevylle tulevat sähkömekaaniset signaalireleet eivät yleensä kestä yli 250 V jännitettä, ja releen kelan vaatima virta asettaisi tehölähteelle suuremmat vaatimukset. Puolijohdereleidenkin jännitteenkesto rajautuu 400 V (AC-huippu tai DC):hen. Sinänsä 400 V voltin

rajoitus ei olisi haitallinen, mutta puolijohdereleiden resistanssi johtavassa tilassa sekä releiden avulla toteutetun kytkennän tilantarve piirilevyllä antoivat aiheita selvittää parempia vaihtoehtoja. Lisäksi on huomattava, että tällaisessa toteutuksessa väärän skaalausvaihtoehdon valitseminen rikkoisi tuloasteen.



Kuva 2.1 Tulon vaimennuksen kolme toteutustapaa. a):ssa jänniteenjakaaja on säädettävä ja vahvistin toimii puskurina tulon ja muun laitteen välillä. b):ssä tuloimpedanssi on vakio ja vaimennus toteutetaan laitteen ulkopuolisen impedanssin avulla. c):ssä vaimennus on vakio ja vahvistus säädettävä s.e. vahvistus \leq vaimennus.

Toinen tapa (kuva 2.1b) on tuttu oskilloskoopeista. Siinä jänniteenjako muodostuu tuloimpedanssista ja mittapään impedanssista (Witte 1993). Tapa itsessään olisi erittäin toimiva, mutta häiriöisessä käyttöympäristössä passiiviset mittapäät keräisivät huomattavan paljon häiriöitä, minkä takia tapa ei sovi tähän työhön.

Kolmas vaihtoehto (kuva 2.1c) on tehdä kiinteä jänniteenjako -40 dB vaimennuksella ja tarjota 0, 20 ja 40 dB vahvistukset. Tämän menetelmän merkittävin etu on, että tulon mahdollisesti suuressa jännitteessä ei tarvita mitään kytkinkomponentteja. Suurin haitta puolestaan on, että $\pm 5,0$ V rajoissa oleva jännite vaimenee ± 50 mV tasolle, jolloin se on alttiimpi kohinalle. Kohina- ja muun häiriötason ennustaminen häiriöisessä ympäristössä ei ole erityisen helppoa. Tämä kuitenkin valittiin lähestymistavaksi sen yksinkertaisuuden ja komponenttien kevyem-

pien vaatimusten vuoksi. Huomattavaa on myös, että näin liian pienen vaimennuksen valitseminen ei riko laitetta.

Säädettävän vahvistuksen tekemiseen on jälleen kerran useita tapoja. Helpoin näistä on käyttää valmista PGA-piiriä (programmable gain amplifier), joissa vahvistusta voidaan säätää digitaalisesti. Koska PGA:t on usein tarkoitettu "oikeiden" digitaalilaitteiden ohjattavaksi, niiden ohjaus on yleensä toteutettu jollakin sarjaväylällä, ja ne eivät usein toimi 5 voltin yksipuoleista käyttöjännitettä suuremmilla jännitteillä. Niiden tuloimpedanssit ovat yleensä verraten pieniä tavoitteena olevaan $1\text{ M}\Omega$:iin nähden. Myös 40 dB vahvistus on tällaiselle valmispiirille melko suuri vaatimus.

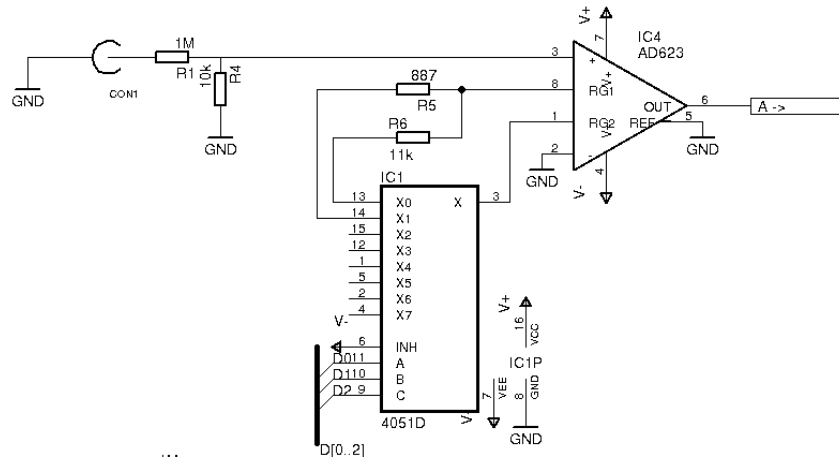
Seuraava vaihtoehto on imitoida muutettavan vahvistuksen piirien toimintaa erillisillä operaatiovahvistin- ja muilla piireillä. Sisäisesti PGA:t toteuttavat vahvistuksen säädön joko tarjoamalla vakiovahvistuksen ja säädettävän vaimennuksen tai muuttamalla vahvistimen takaisinkytkentävastuksia toivotun vahvistuksen mukaan. Toisen vaimennusasteen lisääminen ei ole houkutteleva vaihtoehto, sillä vahvistinasteen edessä oleva vakiovaimennus on jo melko suuri. Takaisinkytkentävastuksia operaatiovahvistinkytkennöissä on kaksi. Kun vastusvaihtoehtoja on useita ja niitä ohjataan ulkoisella kytkinpiirillä, piirilevy alkaa helposti muistuttaa spagettilautasta.

Instrumentointivahvistinpiirien vahvistus on yleensä säädettävissä yhdellä ulkoisella vastuksella. Varsin monessa piirissä vastus kytketään kotelon päätyjalkojen välille. Kun vastuksen valinta toteutetaan fiksusti koteloidulla analogisella multiplekseripiirillä, piirilevyllä on spagettilautasen sijaan yksi siisti silmukka. Instrumentointivahvistimien etuna on myös niiden suuri tuloimpedanssi.

2.1.2. Tuloelektronikka käytännössä

Kohdan 2.1.1 toteutustarvoista valittiin siis kolmas, kiinteää vaimennusta ja säädettävää vahvistusta käyttävä tapa. Tuloelektronikka yhtä lähtöä kohden on esitetty kuvassa 2.2. Kiinteää vaimennus toteutettiin vastuksilla. Jännitteenjaon muodostavista vastuksista ylemmän yli jää suuri jännite, ja niinpä jouduttiinkin valitsemaan suuria jännitteitä kestäviä vastuksia. Tuloliittimenä toimiva BNC-liitin kestää 1,5 kV jännitepiikit, joten periaatteessa yli 1,5 kV jännitekestoisten vastusten valitseminen on liioittelua. Vastus haluttiin kuitenkin pintaliitoskotelossa, ja johtuen sen signaalinkäsittelyllisestä roolista siltä vaadittiin myös 1 % toleranssi. Erikoisempien vastusten hankalamman saatavuuden vuoksi jouduttiin valitsemaan 3 kV jatkuvaa jännitettä kes-

tävä $1\text{ M}\Omega$ vastus 2512-kotelossa. Suuri jännitteenkesto olisi myös voitu saavuttaa kytkemällä sarjaan pienemmän jännitteen kestäviä vastuksia, mutta tällöin piirilevyllä olisi kulunut enemmän pinta-alaa, ja levyllä olisi ollut joka tuloasteessa useampia huomattavan suuren jännitteen pisteitä.

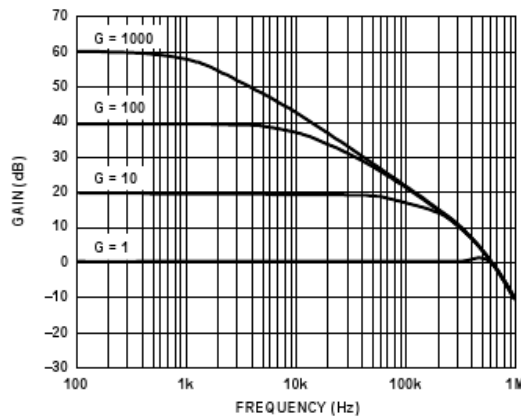


Kuva 2.2 Tuloelektronikka yhtä tuloa kohden. Vastuksen valitsevaa multiplekseripiiriä ohjataan kiertokytkimellä kuvan väylää D[0..2] pitkin.

Vahvistimeksi valittiin Analog Devicesin valmistama instrumentointivahvistin AD623, jonka tärkein ominaisuus on rail-to-rail -toiminta, eli se kykenee toimimaan sellaisilla tulojännitteillä ja tuottamaan sellaisen lähtöjännitteen, joka kattaa koko käyttöjännitealueen. Vahvistimen tuloresistanssi on $2\text{ G}\Omega$, joten sen vaikutus jännitteenjakajaan on käytännössä merkityksetön. Vahvistimen tulokapasitanssi on varsin pieni, noin 2 pF . (Analog Devices 2008)

Taajuusvasteeltaan AD623 on juuri ja juuri riittävä (kuva 2.3). Vahvistuksen nimellisarvoilla 0 ja 10 kaistanleveys riittää 100 kHz :iin ja yli, mutta vahvistuksen nimellisarvolla 100 kaistanleveys on juuri 10 kHz , jolla taajuudella muunnoksen toivottiin vielä onnistuvan. Se, että halutun taajuuskaistan suuritaajuisin osa hieman vaimeneekin tuskin kuitenkaan haittaa paljoa. Merkittävin haitta on, että kaistanleveyden kasvattaminen myöhemmin pienijännitteisille tulosignaaleille ei ole mahdollista ilman vahvistinpiirin vaihtamista.

Vahvistuksen määräävän vastuksen valinta tapahtuu analogisen multiplekseripiirin 4051 avulla. Multiplekserin johtavan tilan resistanssi on huomioitu vahvistuksen määräävien vastusten mitoittamisessa. Johtavan tilan resistanssin lämpötilariippuvuus on merkittävä (Fairchild Semiconductor 2002), mutta koska multiplekserin läpi kulkeva virta on vähäinen, sen ei oleteta lämpenevän riittävästi, jotta lämmön vaikutus alkaisi näkyä.



Kuva 2.3 Instrumentointivahvistimen AD623 vahvistus taajuuden funktiona vahvistuksen eri nimellis-arvoilla G . (Analog Devices 2008)

Multiplekseriä ohjataan kiertokytkimellä. Yksi kiertokytkin ohjaa kaikkien tulojen vahvistusta yhteisiä digitaalisia linjoja pitkin. Rinnakkaismuotoinen digitaalisignaali on saatu siten, että jokaisella datalinjalla on oma alavetovastuksensa, ja kiertokytkin vetää halutun linjan ylös.

2.2. Muunnoksen toteutus

Muunnoksen toteutuksessa perehdyttiin ensin Clarcken muunnoksen matematiikkaan. Tämän jälkeen pohdittiin, olisiko muunnos järkevämpää tehdä analogisella vai digitaalisella elektroniikalla. Tämän jälkeen päästiinkin suunnittelemaan itse elektroniikka.

2.2.1. Clarcken muunnoksen matematiikka

Matemaattisesti muunnos tehdään tunnetulla Clarcken muunnoksella. Kolmivaihejärjestelmässä se voidaan kirjoittaa matriisimuotoon

$$C = \begin{bmatrix} x_0(t) \\ x_\alpha(t) \\ x_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(-\frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\frac{2\pi}{3}) & \sin(-\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

missä $x_a(t)$, $x_b(t)$ ja $x_c(t)$ ovat tulosuuret (Canteli et al 2006; Clarke 1943). Symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä $x_0(t)$ asettuu nolllaksi, eikä se siksi ole tässä yhteydessä kovin mielenkiintoinen. $x_\alpha(t)$ ja $x_\beta(t)$ ovat kaksivaiheiset lähtösignaalit.

$x_\alpha(t)$ ja $x_\beta(t)$ voidaan kirjoittaa auki muotoon

$$\begin{cases} x_\alpha(t) = \frac{2}{3} \left(x_a(t) - \frac{1}{2}x_b(t) - \frac{1}{2}x_c(t) \right) \\ x_\beta(t) = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2}x_b(t) - \frac{\sqrt{3}}{2}x_c(t) \right) \end{cases} . \quad (2.2)$$

Tästä muodosta näkyy selvästi, että muunnin on oikeastaan vain summain, jossa summattavissa termeissä on vaimennusta sopivassa suhteessa.

2.2.2. Analoginen ja digitaalinen toteutustapa

Laitteen on tarkoitus kyetä muuntamaan sujuvasti enintään 10 kHz signaali. Digitaalinen toteutus edellyttäisi tällöin 20 kHz näytteistystaajuutta, jotta suurin taajuuskomponentti tulisi millään tavalla esille. Käytännössä näytteistystaajuuden tulisi kuitenkin olla suurempi. Kaikki kolme kanavaa olisi myös näytteistettävä samaan aikaan. Jotta AD-muunnos, tiedonsiirto AD-muuntimelta prosessorille, Clarken muunnos ja tiedonsiirto DA-muuntimelle saataisiin suoritettua ennen kuin uusi näyte on otettava, pitäisi sarjamuotoisissa tiedonsiirtoväylissä käyttää suurta taajuutta, mikä voi aiheuttaa ongelmia sähkömagneettisessa yhteensopivuudessa. Rinnakkaismuotoisten väylien kanssa puolestaan johdottaminen voi osoittautua ongelmalliseksi. Digitaalisuuden etuja ei laitteessa kuitenkaan juuri hyödynnetä: suoritettavat matemaattiset operaatiot eivät ole monimutkaisia, eikä mittausdatan siirrettävyydestä ja taltioitavuudesta juuri ole hyötyä, kun lähdöt ovat analogiset.

Analoginen toteutus on melko yksinkertainen, ja se osoittautuu nopeasti halvemmaksi ja rakentamisen kannalta helpommaksi kuin digitaalinen. Digitaalinen toteutus tarvitsisi tuloihin ja lähtöihin saman analogisen elektroniikan kuin analoginenkin. Analogisessa toteutuksessa taas muunnos voidaan tehdä operaatiovahvistinkytkennällä, jossa voidaan hyödyntää lähtöä ajavia vahvistimia. Lähtöä ajavat vahvistimet tarvitsevat analogisessa kytkennässä oheensa vain nipun vastuksia; digitaalisessa toteutuksessa tarvittaisiin erilliset prosessori-, AD-muunnin- ja DA-muunninpiirit.

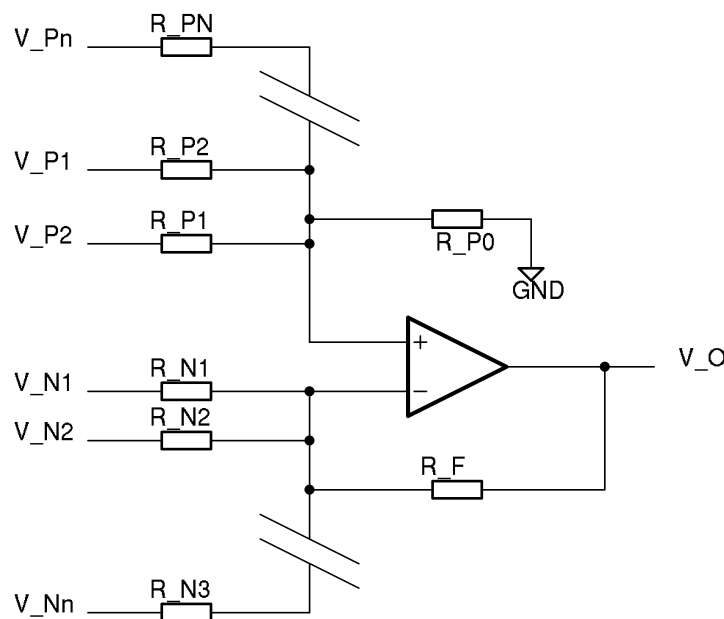
Laite päädyttiin siis tekemään analogisena.

2.2.3. Muunnoksen toteuttava elektronikka

Yhtälöissä (2.2) kuvatut lähtöjen ja tulojen suhteet ovat toteutettavissa yhdellä operaatiovahvistinkytkenällä per lähtö. Kuvan 2.4 mukaisen kytkennän lähdölle voidaan johtaa yhtälö

$$v_O = - \sum_{i=1}^n \frac{R_f}{R_{Ni}} v_{Ni} \left[1 + \frac{R_f}{R_N} \right] \sum_{i=1}^n \frac{R_P}{R_{Pi}} v_{Pi}, \quad (2.3)$$

jossa $R_N = R_{N1} || R_{N2} || \dots || R_{Nn}$ ja $R_P = R_{P1} || R_{P2} || \dots || R_{Pn} || R_{P0}$ (Sedra ja Smith 2004, s. 129). Yhtälö on samaa muotoa kuin yhtälöt (2.2), ja vastusarvot oikein mitoittamalla yhtälöstä (2.3) saadaankin muovattua molemmat tarvittavat lähdöt.



Kuva 2.4 Summainkytkentä, joka vähentää tulojen $V_{P1} \dots V_{Pn}$ summasta termien $V_{N1} \dots V_{Nn}$ summan skaalaten summan termejä vastusarvojen mukaan. (Sedra ja Smith 2004, s. 129)

Muunnoksen toteuttavaksi operaatiovahvistimeksi valittiin LT1807. Tärkein valintakriteeri oli vahvistimen kyky syöttää 100Ω kuormaa mielivaltaisella aaltomuodolla, kunhan se pysyy $\pm 5 \text{ V}$ rajoissa. Vahvistimen kaistanleveys ulottuu yli 300 MHz :iin (gain bandwidth product) (Linear Technology 2000). Laitteen lähtöön on kytketty $49,9 \Omega$ vastus, joten sen lähtöimpedanssi on noin 50Ω ja kuormittavan laitteen tuloimpedanssi voi olla $\geq 50 \Omega$.

Käytännön laitteessa takaisinkytkentävastuksen rinnalle kytkettiin $3,3 \text{ pF}$ kondensaattori. Kondensaattori estää lähdön oskilloinnin, ja tarve sille huomattiin simulointivaiheessa. Kondensaattorin mitoitus ja sijoitus tehtiin operaatiovahvistimen datalehden suositusten mukaan.

2.3. Käyttösähköt

Käytettävät operaatiovahvistimet vaativat kaksipuoleisen käyttöjännitteen. Laitesuunnittelullisesti helpointa olisi käyttää kolmea liitintä, joilla tuotaisiin positiivinen ja negatiivinen käyttöjännite sekä ma. Tällöin laitetta ei kuitenkaan voisi käytännössä käyttää muualla kuin laboratoriotopöydän ääressä, mikä voi olla ongelma joissakin käyttöskenaarioissa.

Toinen tapa olisi käyttää jotakin valmista verkkolaitetta. Niiden ongelma on, että ne tuottavat yksipuoleista käyttöjännitettä. Yksipuoleisen jännitteen muuttamisessa kaksipuoleiseksi on kaksi tapaa: joko tuotetaan virtuaalinen maataso yksipuoleisen käyttöjännitteen potentiaalien väliin, tai tehdään hakkurilla aito negatiivinen käyttöjännite. Virtuaalinen maataso voi olla ongelmallinen, jos sen kautta kulkee merkittävästi virtaa. Hakkurista säteilevä hurina puolestaan voi häiritä laiteessa kulkevaa mittaussignaalia.

Lopulta parhaaksi vaihtoehdoksi valikoitui, että laite ottaa sisäänsä suoraan verkkosähköä, joka viedään piirilevyvuuntaajalle. Vuuntaajassa on kaksi toisiokäämiä, jotka molemmat tuottavat nimellisesti 9 V vaihtojännitettä. Toisiokäämit on kytketty sarjaan, ja niiden jännitteet tasasuunnattu. Tasasuunnattu jännite on suodatettu ja reguloitu $\pm 5,0$ volttiin.

Verkkosähköjen tuloliittimenä käytetään ns. kojeliitintä. Suojamaajohdin on kytketty suoraan laitteen koteloon, ja piirilevyn maatasoon BNC-liittimien kautta. Vaihejohtimet on viety kytkimelle, jolla laitteen virta voidaan sammuttaa. Kytkin katkaisee sekä vaihe-, että nollajohtimen. Piirilevyllä toinen verkkojohtimista kulkee vielä sulakkeen kautta ennen vuuntaajalle päätymistään.

2.4. Mekaniikka ja piirilevy

Laite on koteloitu tiiviiseen metallikoteloon häiriöisen käyttöympäristön takia. Kytkennän ja piirilevyn suunnitteluvaiheessa kotelon mitat eivät vielä olleet tiedossa, joten soveltuvuutta eri kokoisille kotelolle parannettiin sijoittamalla verkkosähköliitin ja virtakytkin piirilevyn ulkopuolelle. Tuloliittimet sijoitettiin piirilevyn reunaan vierekkäin. Liittiminä käytetään 50Ω BNC-runkoliittimiä. Koska laite rakennettiin häiriöisen ympäristön takia metallikoteloon, ei koteloinnin tuomaa häiriösuojasta kannatanut pilata muovisilla liittimillä, ja niinpä liittimiksi valittiin hieman kalliimmat metalliliittimet. Tulojen skaalauksen valitsimena toimii kiertokytkin, joka on sijoitettu piirilevyn ulkopuolelle.

Piirilevyn koteloon kiinnittämistä varten levyssä on kiinnitysreiät, joista se on ruuvattu kotelon pohjaan kiinnitettyihin korotepaloihin. Reikiä on yksi levyn joka nurkassa ja yksi lisäreikä piirilevymuuntajan lähellä parantamassa mekaanista kestoja verraten raskaan komponentin ympäristössä. Kiinnitysreikien kaulus on kytketty laitteen sähköiseen maahan, joka on nimellisesti samassa potentiaalissa suojamaan kanssa.

Piirilevysuunnittelu noudattelee yleisiä periaatteita: johdinvedot on pyritty pitämään lyhyinä ja yksinkertaisina. Ne komponentit, joiden kanssa se oli mahdollista, otettiin pintaliitoskotelossa. Ainoat läpijuotettavat komponentit ovat liittimet, muuntaja ja käyttöjännitettä suodattavat elektrolyyttikondensaattorit. Johdinkerroksia piirilevyllä on kaksi. Alapuoli levystä on varattu ensisijaisesti maatasolle. Lisäksi sieltä on kuljetettu multipleksereitä ohjaavat kolme digitaalista linjaa sekä tuloasteiden lähtösignaalit. Muut signaalijohtimet ovat levyn yläpuolella kuten myös +5 V ja -5 V kuparikaadot.

3. Toiminnan testaus

Laitteelle suoritettiin perustestaus, jonka tavoitteena oli selvittää, onko laite käyttäjälleen ja muulle laitteistolle turvallinen, onko sillä mitään edellytyksiä toimia, ja toimiiko se senkään vertaa, että jatkotestausta kannattaa tehdä.

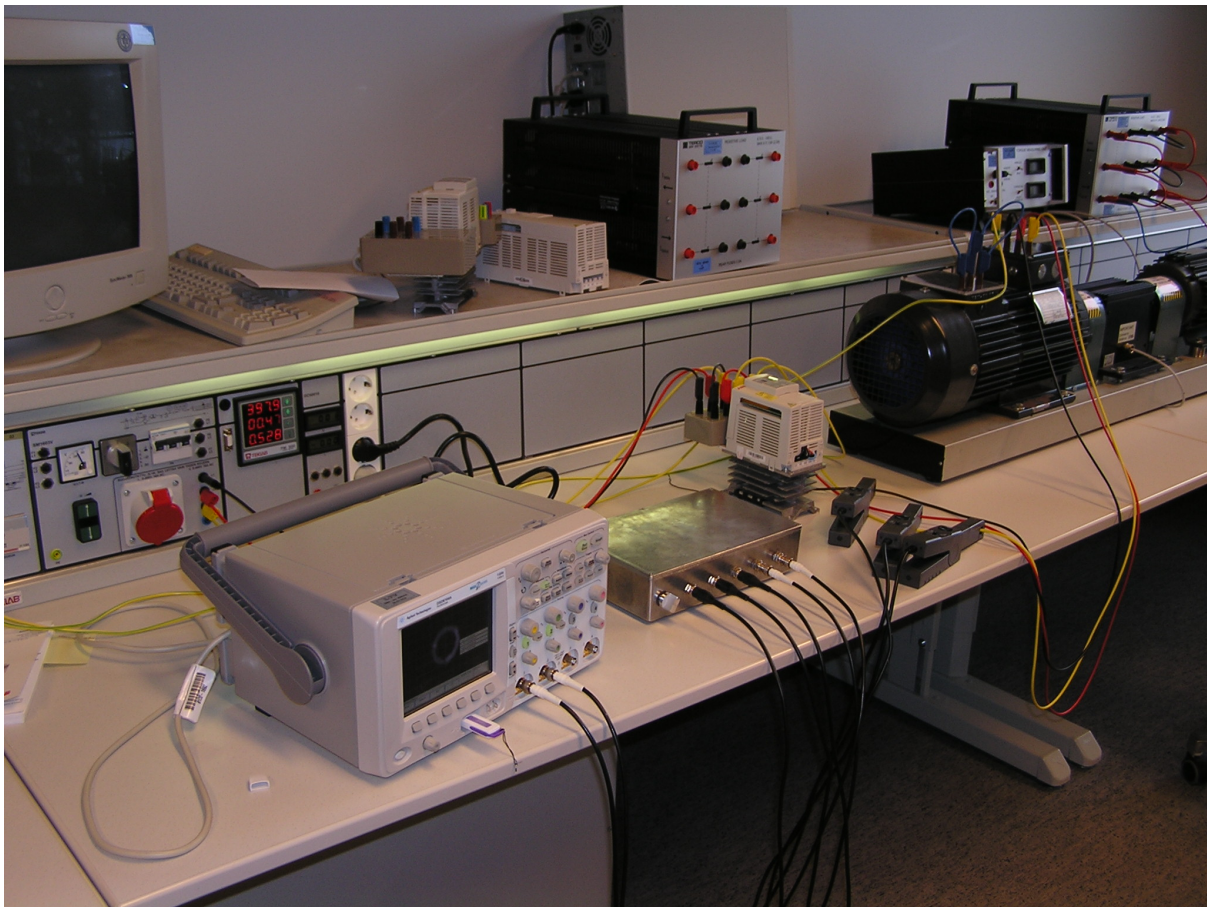
3.1. Turvallisuus ja toimintaedellytykset

Laitteen turvallisuus käyttäjälle määritettiin tutkimalla laitetta ensin silmämääräisesti. Heikkoja kohtia ei tällä tavalla löytynyt. Tämän jälkeen laite kytkettiin pistorasiaan, ja kytkimestä käännettiin virta päälle. Jännitekoettimen mukaan kuoreen ei tullut jännitettä, joten laitteen uskalsi testata koskettamalla sitä.

Laitteen sähköverkosta ottama virta oli n. 5 mA. Tälläkin virralla muuntaja lämpeni huomattavasti käytön aikana, jopa sormia polttavaksi. Lämpö tuntui myös laitekotelon kannen läpi. Ilmeisesti lämmön kertyminen johtuu siitä, että ilma muuntajan ympärillä ei pääse umpinai-sesta kotelosta pois. Lämmitettävä ilmassa on siis kohtuullisen pieni, ja ainoa jäähdytystapa on lämmön johtuminen. Näin ollen tuuletusaukkojen tekemistä kanteen kannattaa harkita. Aivan muuntajan vieressä on verkkojännitteinen kaapeli, jonka eristeen ei kannata antaa sulaa muuntajan takia!

3.2. Testaus osana mittausjärjestelmää

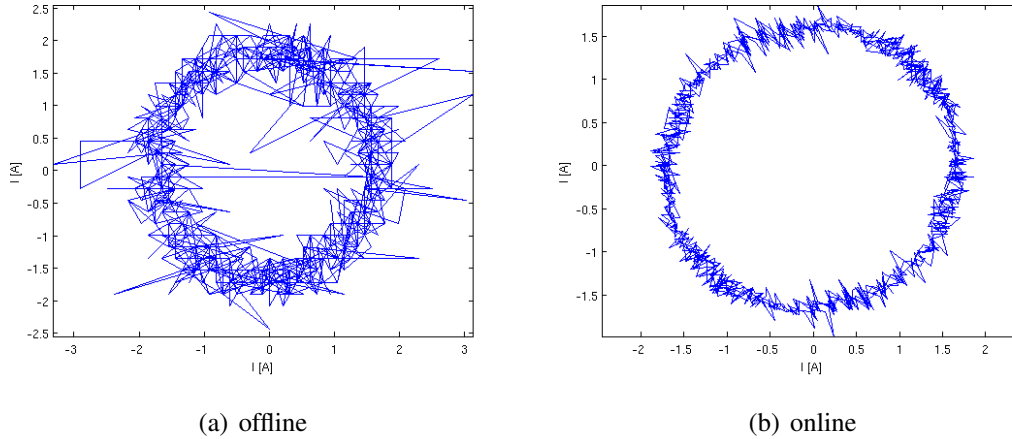
Kuva 3.1 esittää mittausjärjestelyä, jossa oikosulkumoottoria syötetään taajuusmuuttajalla. Oikosulkumoottorille menevistä vaihejohtimista mitataan virtaa. Ensin mittaus suoritettiin mitaamalla virta oskilloskoopilla ja tallentamalla mittausdata myöhempää tietokoneella tehtävää muunnosta varten. Jokaisen kanavan virta piti saada mitattua kerralla, joten oskilloskoopista tarvittiin kolme kanavaa käyttöön. Tämän jälkeen mittaus toistettiin tekemällä muunnos reaaliaikaisesti työssä suunnitellulla laitteella.



Kuva 3.1 Mittausjärjestely, jossa työssä suunniteltu muunnin (oskilloskoopin vieressä) suorittaa muunnosta oikosulkumoottorille menevistä vaihejohtimista mitatuille virroille. Oikosulkumoottoria syötetään taajuusmuuttajasta.

Kuva 3.2 esittää molemmilla mittauksilla saatuja virtaympyröitä. Kuvista huomataan välittömästi, että online-mittauksen tuloksena saatu ympyrä on siistimmän näköinen. Offline suoritussa muunnoksessa käytetyssä datassa oli mukana suuritaajuisia piikkejä, jotka suodattuivat online-muunnoksessa pois. Suodattuminen ei ole välttämättä huono asia, sillä se mahdollistaa

paremman käsityksen ympyrän muodosta yleensä. Lyhytaikaisia piikkejä ei myöskään välttämättä huomaa oskilloskoopin ruutua silmämääräisesti seurattaessa.



Kuva 3.2 Virtaympyrät, jotka on saatu offline- (a) ja online-mittauksessa (b) Clarken muunnoksen avulla

Ympyrän säde vaikuttaa molemmissa kuvissa olevan 1,5 ampeeria, joka vastaa vaihejohtimissa kulkevan virran huippuarvoa. Tarkka määrittäminen silmämääräisesti on hankalaa. Oskilloskooppia ei kuitenkaan ole tarkoitettu tarkkuusmittalaitteeksi, joten muuntimen tarkkuus lienee riittävä silmämääräiseen tarkasteluun. Muuntimelle täytyy kuitenkin tehdä myös jonkinlainen kalibrointi ennen kuin sitä voidaan käyttää mittalaitteena. Tässä työssä se ei aikataulun puitteissa valitettavasti ollut mahdollista.

3.3. Testaus suurella tulojännitteellä

Laitteen teknisissä tiedoissa (liite I) keuhetaan, että se kestää ± 500 V rajoissa olevan tulojännitteen. Tässä vaiheessa laitetta ei kuitenkaan ole vielä testattu niin suurella jännitteellä. Laitetta kuitenkin kokeiltiin mittaamalla kolmivaihemuuntajasta 230 V vaihejännitesignaali laitteen tuloihin. Huippujännitteen voidaan siis laskea olleen 325 V. Laite toimi näillä tulosignaaleilla hyvin.

Tässä vaiheessa testausta huomattiin, että kiertokytkimen kytkennässä on virhe. Kunnollinen lähtösignaali olisi pitänyt saada kiertokytkimen ollessa käännettynä ääriasentoonsa myötäpäivään. Tällöin signaali kuitenkin leikkautui. Oikea toiminta saatiin kiertokytkimen ollessa keskiasennossa. Laite korjataan toimimaan käyttöohjettaan (liite I) vastaavasti.

4. Yhteenveto ja johtopäätökset

Kokonaisuutena on todettava työn onnistuneen hyvin. Vaikka testaus ei ollutkaan kattava, saadut tulokset ovat lupaavia ja antavat aihetta jatkotestaamiseen. Alkuun laitetta kannattaa käyttää rinnakkain offline-mittauksen kanssa, jotta varmistutaan, ettei laite tee pahoja mittausvirheitä vaikeammillakaan signaaleilla. Tähän saakka ainoa testaus on tehty jo viimeistellyn taajuusmuuttajan lähtövirtaa ja kolmivaiheisen muuntajan lähtöjännitettä tutkimalla, joten sen käyttäytymistä ja lähtösignaalin laatua keskeneräisen taajuusmuuttajan mahdollisesti rosoisempaa lähtösignaalia mitattaessa ei tunneta. Jonkinlainen kalibrointi täytynee myös tehdä.

Jos jatkotestaus osoittaa, että seuraavassa versiossa tarvitaan suurempaa kaistanleveyttä, voidaan nykyistä muunnoselektroniikkaa silti hyödyntää. Suurin työ täytyy tehdä tuloelektronikassa, jossa käytetty instrumentointivahvistin AD623 käytännössä määrää laitteen kaistanleveyden. Muuhun elektroniikkaan ei oikeastaan tarvitse juuri kajota, sillä muunnoksen tekemiseen ja lähdön ajamiseen käytetyn operaatiovahvistimen LT1807 kaistanleveys riittää satoihin megahertzeihin saakka.

Testauksessa ilmeni kytkentävirhe, joka on korjattavissa ja joka ei haittaa laitteen toimintaa. Lähinnä se vaikeuttaa käyttämistä. Lisäksi ilmeni mahdollinen lämpenemisongelma, joka lienee tarvittaessa korjattavissa tuuletusaukkoja lisäämällä. Saadun kokemuksen perusteella voidaan mahdollisen seuraavan version kehittämiseen suositella muiden käyttöjännitteen tuottotapojen tutkimista. Vaikka tuuletusaukot ratkaisisivatkin lämpenemisongelman, jokainen laitekoteloon tehty aukko on lisäreitti häiriöille. Yksi tapa olisi kättää tässä työssä vältelyä hakkuriteholähdettä. Ne tuottavat laajakaistaisia ja suuritaajuisia häiriöitä, mutta häiriöt lienevät hoidettavissa käyttämällä pientä kytkentätaajuutta ja tarvittaessa laittamalla hakkuri EMC-häkin sisään.

Suunnitteluvaiheessa yllättävää oli tuloelektroniikan suunnittelun merkittävä osuus työmäärästä. Ennakkoon arvattavissa oli, että käyttöjännitteeseen nähden moninkertaisen signaalin ohjaaminen ja käsittely vaatisi huomattavan panostuksen. Suunnittelussa jouduttiin kuitenkin käymään läpi kolme eri toteutustapaa komponenttivalintoja ja -mitoituksia myöten loppuun asti, mikä oli odotettua enemmän. Itse muunnoksen suorittavan elektroniikan suunnittelu puolestaan oli yllättävän suoraviivaista. Digitaalisessa toteutuksessa se olisi todennäköisesti ollut työläämpää komponenttien ja johdinvetojen suuremman määrän ja monimutkaisuuden takia. Analoginen toteutus lienee siis ollut hyvä ratkaisu.

Laitteelle voi keksiä muitakin käyttökohteita kuin taajuusmuuttajien tutkimisen. Sitä voisi teoriassa käyttää myös opetuksessa demonstroimaan, kuinka kolmivaiheisella virralla saadaan ai-

kaan pyörivä kenttä. On kuitenkin kyseenalaista, havainnollistaisiko laite oikeasti mitään, vai näkyisikö se oppilaille pelkkänä “mustana laatikkona”, joka vain tuottaa jotain pyörivää kuvaa.

Jatkokehityksessä tulee pohtia laitteen roolia mittauksissa. Mitä enemmän mittaukseen osallistuu laitteita, sitä monimutkaisempi ja virhe- ja vika-alttiimpi mittausjärjestelmä on. Vaikka nykyaikaisista oskilloskoopeista löytyykin signaalinkäsittely- ja laskentatoimintoja, ne eivät ole mielivaltaisia. Mahdollisesti tulevaisuudessa, kun oskilloskoopit mutkistuvat ja niiden ominaisuudet monipuolistuvat, muunnoksen voi toteuttaa suoraan oskilloskoopilla. Toisaalta olisi myös mahdollista rakentaa muunnin, jossa itsessään on näyttö, jolle se voi piirtää mitatun virta- tai jänniteympyrän. Tällaisen muuntimen rakentamisen voidaan spekuloida tulevan halvemmaksi kuin oskilloskoopin hankkimisen, mutta yhteen mittaukseen sopivan laitteen hankkiminen ei koskaan liene järkevää, ellei mittauksia tehdä vähintään päivittäin.

Viitteet

Analog Devices: 2008, Datalehti: AD623 – Single-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier

Canteli, Mario Mañana, Fernandez, Alfredo Ortiz, Eguíluz, Luis Ignacio ja Estébanez, Carlos Renedo: 2006, “Three-Phase Adaptive Frequency Measurement Based on Clarke’s Transformation”. IEEE Transactions on Power Delivery, osa 21, no. 3, ss. 1101–1105

Clarke, Edith: 1943, Circuit analysis of a.c. Power Systems, osa I. Wiley, New York

Fairchild Semiconductor: 2002, Datalehti: CD4051BC, CD4052BC, CD4053BC – Single 8-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer, Dual 4-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer, Triple 2-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer

Linear Technology: 2000, Datalehti: LT1806/LT1807 – 325 MHz, Single/Dual, Rail-to-Rail Input and Output, Low Distortion, Low Noise Precision Op Amps

Sedra, Adel S. ja Smith, Kenneth C.: 2004, Microelectronic Circuits, 5th ed. Oxford University Press, Inc., New York

Witte, Robert A.: 1993, Electronic Test Instruments. Prentice-Hall P T R, New Jersey

Tekniset tiedot ja käyttöohje

Tulot

Tuloimpedanssi	1 M Ω
Kaistanleveys	10 kHz
Tulojännite	± 500 V

Ilmoitettu tulojännite on suurin jännite, jolla voidaan saada järkeviä mittaustuloksia, kun käytetään suurinta vaimennusta. Laite kestää suurempiakin jännitteitä. BNC-liittimen jännitekestoksi on luvattu 1,5 kV, ja muun elektronikan pitäisi laskennallisesti kestää tällainen tulojännite.

Kaistanleveys on -3 dB kaistanleveys, kun vaimennukseksi on valittu 0 dB. Muilla vaimennusvaihtoehdoilla kaistanleveys voi olla suurempi.

Lähdöt

Lähtöimpedanssi	50 Ω
Kuormittava impedanssi	≥ 50 Ω

Huomaa, että pieni-impedanssisia kuormia

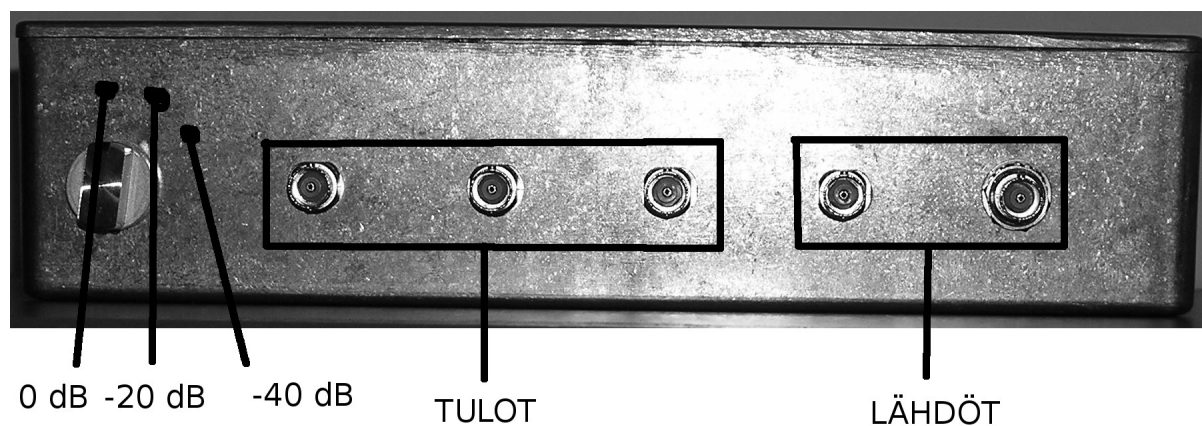
syötettäessä lähtöjännite muuttuu!

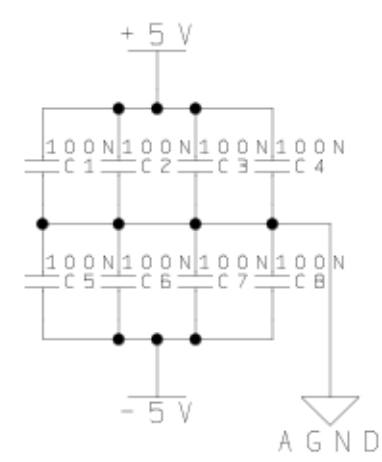
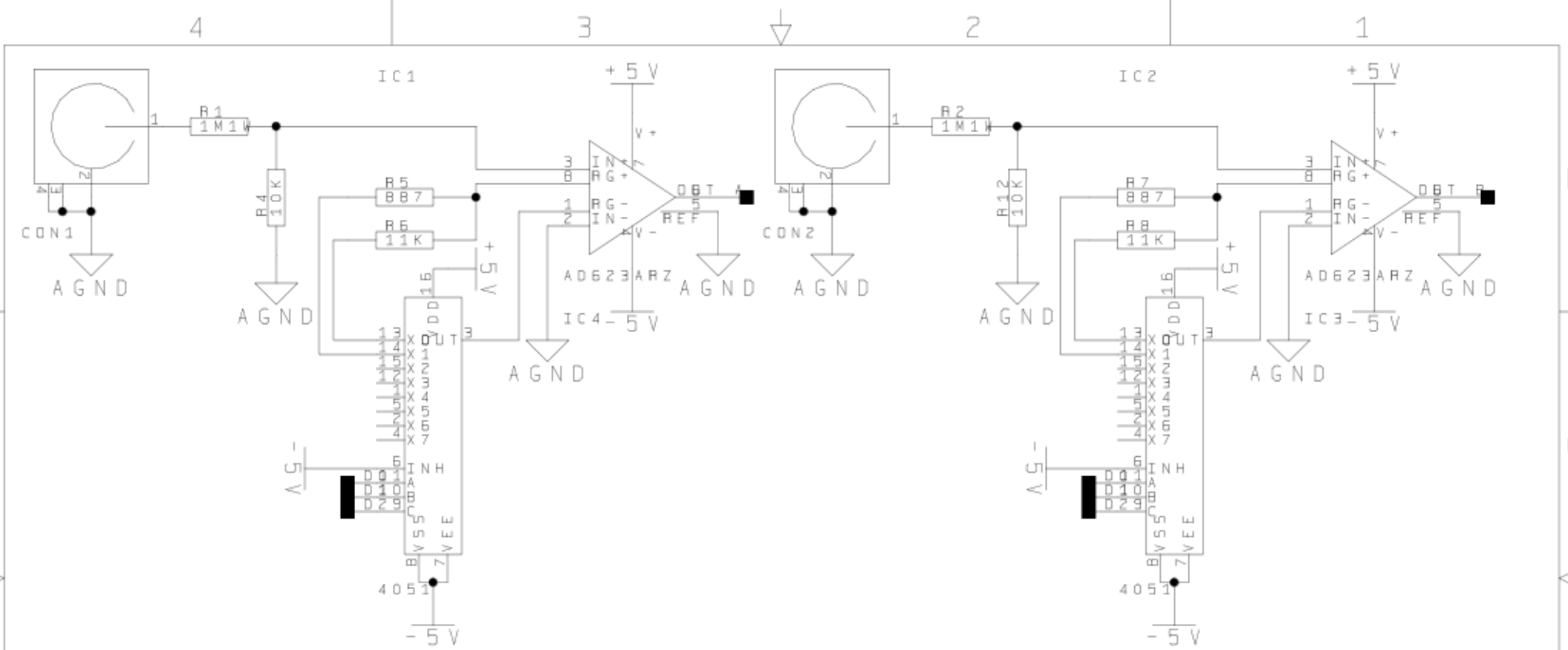
Käyttö

Laitteeseen kytketään virrat päälle tuomalla verkkosähköt takapaneelissa olevaan kojeliitimeen. Tämän jälkeen mitattavat vaiheet kytketään tuloliittimiin. Kun laitetta katsotaan edestä, tuloliittimet ovat kolme kiertokytkintä lähinnä olevaa liittintä. Kaksi jäljelle jäävää ovat lähtöliittimet, jotka kytketään oskiloskooppiin.

Kiertokytkimellä valitaan tulojen vaimennus. Muunnoksen tekevä elektronikka voi käsitellä vain ± 5 V rajoissa olevaa jännitettä. Tämän vuoksi kiertokytkimellä voidaan valita 0, -20 tai -40 dB vaimennus, jolloin voidaan käyttää jopa ± 500 V jännitettä. Tulosignaaliin nähden liian pienen vaimennuksen valitseminen ei riko laitetta, mutta mittauksesta ei saada järkeviä tuloksia.

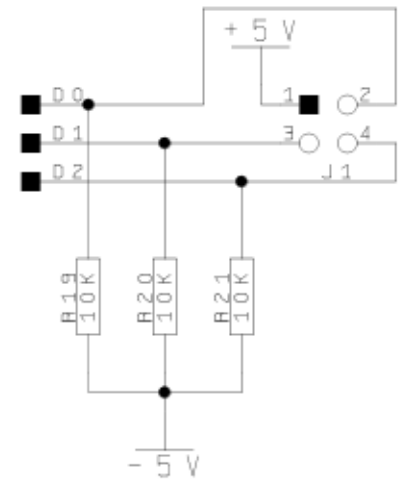
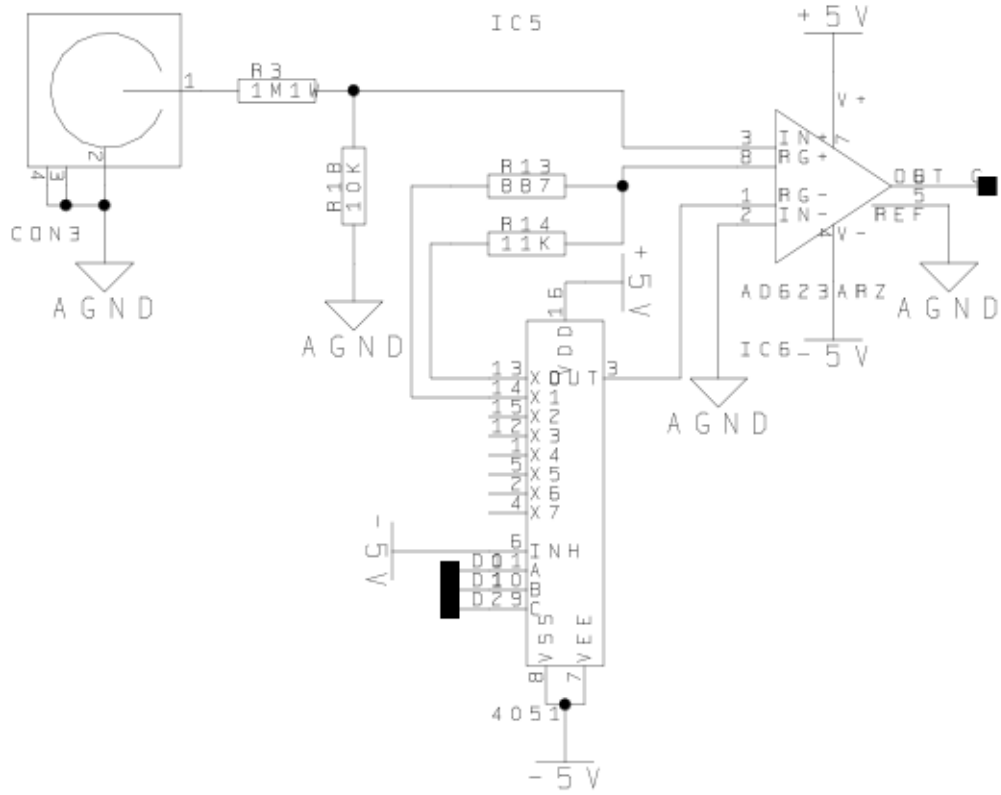
Tämän sivun alareunassa oleva kuva havainnollistaa käyttöliittymää.



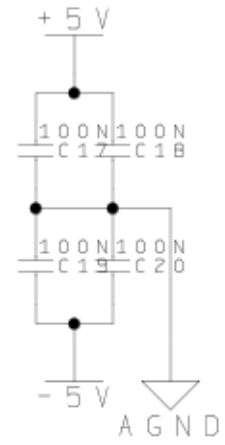


TITLE		
M U N N I N		
SIZE	DWG NO	REV
A 4	LIITE II	0
SCALE	SHEET	of
	1	4
12-5-2008_11:51		

DRAWN BY
<YOUR NAME HERE>



Kiertokytkeimen kytkent J1
 COM: pinnä 1
 Asento 1: NC
 Asento 2: pinnä 2
 Asento 3: pinnä 3



TITLE		
A 4 SHEET		
SIZE	DWG NO	REV
A 4	LIITE II	0
SCALE	SHEET of	12-5-2008_11:51
	2 of 4	

DRAWN BY
 <YOUR NAME HERE>

4

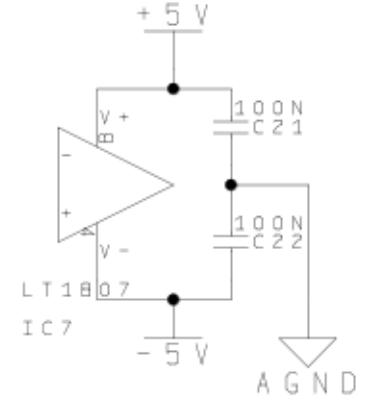
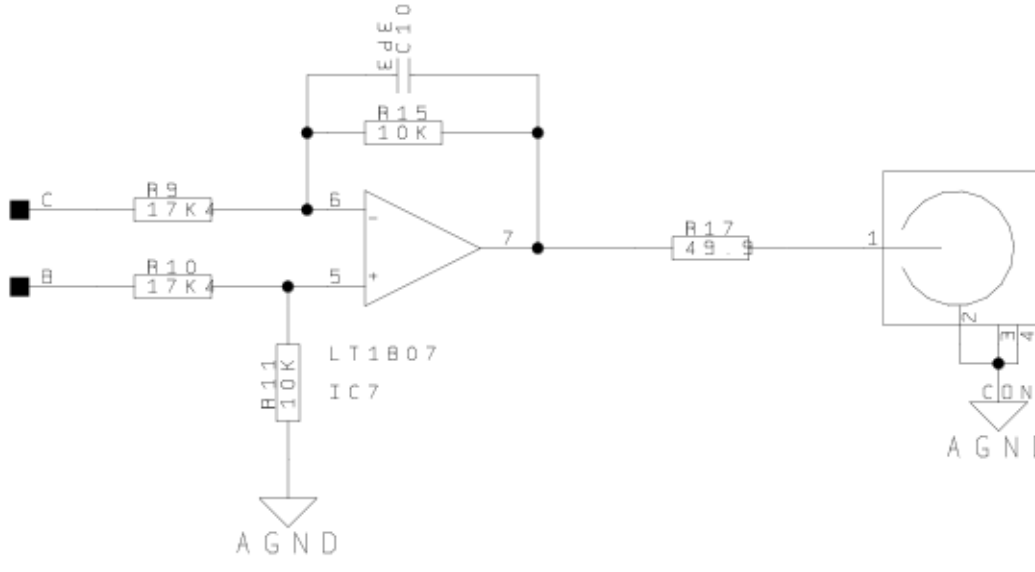
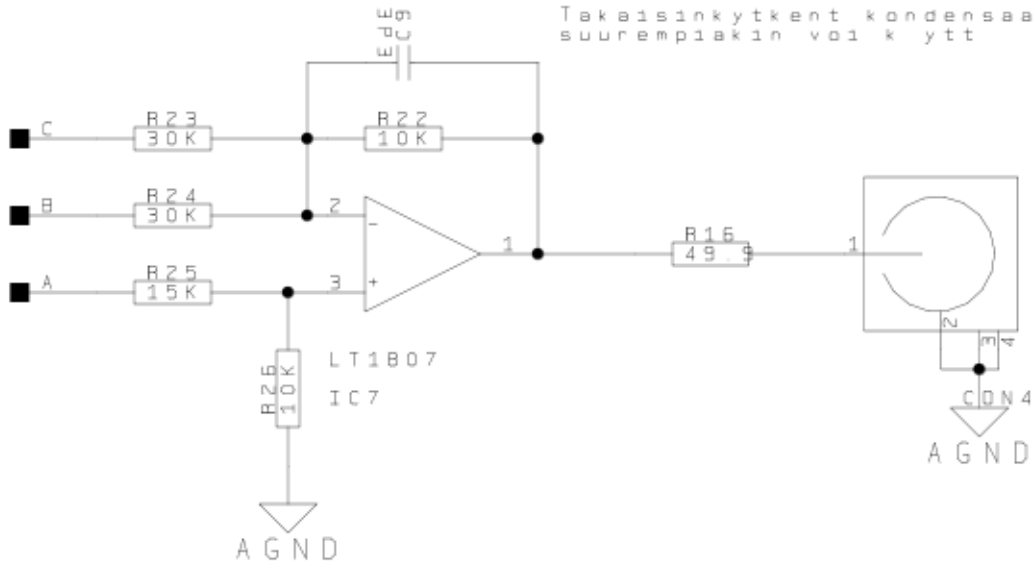
3

2

1

Takaisinkytkent kondensaattorit nimellisestä 3 pF.
suurempiakin voi käyttää jos löytyy

Vastukset t.11 sivulla 0805-kotelossa, paitsi
vastukset 1206-kotelossa. Toleranssi kaikilla
sivun vastuksilla 1 %.



Mentor Graphics®

TITLE
MUUNNIN

SIZE	DWG NO	REV
A 4	LIITE II	0

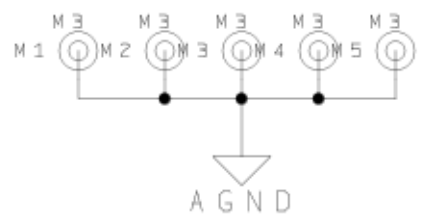
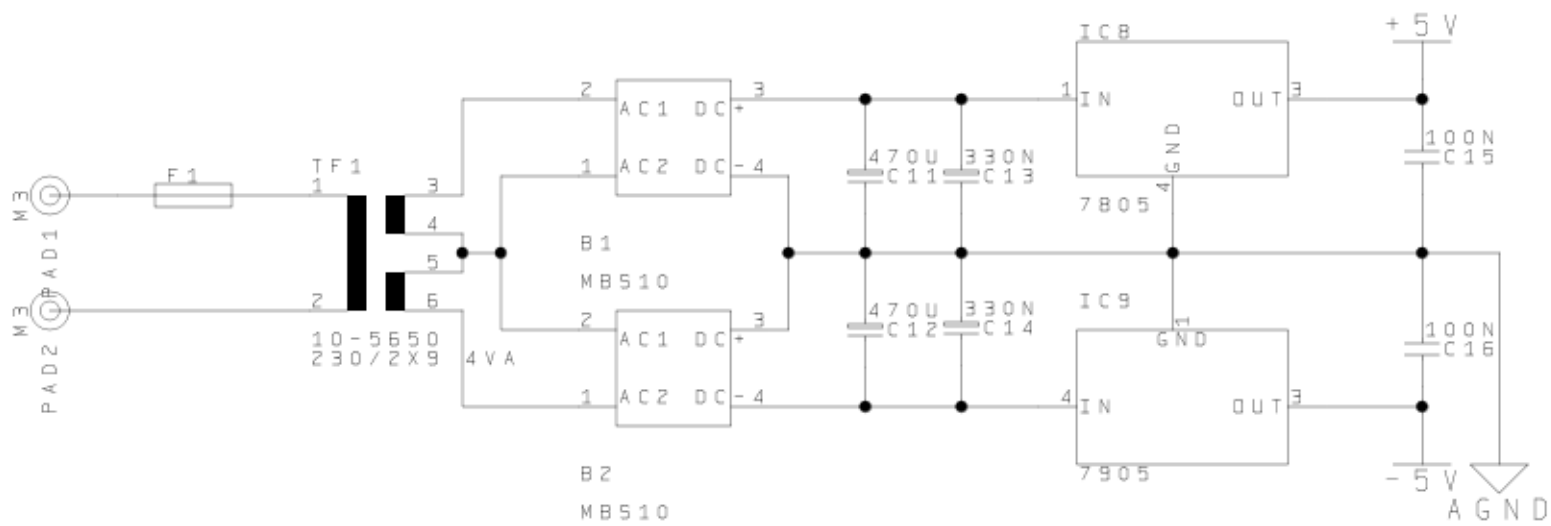
DRAWN BY	SHEET	of	12-5-2008_13:27
<YOUR NAME HERE>	3	4	

4

3

2

1



TITLE		
M U N N I N		
SIZE	DWG NO	REV
A 4	LIITE II	0
SCALE	SHEET	of
	4	4
		12-5-2008_11:51

DRAWN BY
<YOUR NAME HERE>

Tunniste	Kuvaus	Numero	Valmistaja	Määrä	Koodi (Farnell)
IC7	2xopamp, RRIO, high lout	LT1807	Linear	1	
IC4-IC6	Instr. vahv, SO-8	AD623	Analog Devices	3	9426213
CON1-CON5	BNC-liitin, 50 ohm, shielded	1-1337494-0		5	
L1	Muuntaja 4 VA 230/2x9	10-5650	Clairtronic	1	1504306
IC1-IC3	Analoginen multiplekseri	CD4051BCM	Fairchild	3	1014062
B1-B2	Tasasuuntaussilta	MBS10	Taiwan Semiconductor	2	
IC8	Lineaariregulaattori +5 V	L7805ACD2T-TR	ST Microelectronics	1	
IC9	Lineaariregulaattori -5 V	L7905CD2T-TR	ST Microelectronics	1	1467769
C1-C8, C15-C16	Kerko, SMD0805, 100nF			10	
C9-C10	Kerko, SMD0805, 3,3 pF			2	
C11-C12	Elko, 16 V, 470µF, 5mm pitch			2	8126275
C13-C14	Tanko, 330nF, A-kotelo			2	
R4, R12, R18, R22, R26, R11, R15	10kΩ, 1%, SMD0805			7	
R9-R10	17,4kΩ, 1%, SMD0805			2	1353223
R23-R24	30kΩ, 1%, SMD0805			2	
R25	15kΩ, 1%, SMD0805			1	
R16-R17	49,9Ω, 1%, SMD1206 250mW			2	1612051
R19-R21	10kΩ, 10%, SMD0805			3	
R1-R3	1M, 1 % SMD2512, 3kV			3	1506200
R5, R7, R13	887Ω, 1%, SMD0805			3	1575781
R6, R8, R14	11kΩ, 1%, SMD0805			3	1469863
(ei piirilevyllä)	Liitin, IEC	JR-101	Multicomp	1	9521631
(ei piirilevyllä)	Keinukytkin, 2-nap. on/off	1552.3102	Marquardt	1	7892527
F1	Lasiputkisulakepidin	PTF15		1	
(ei piirilevyllä)	Kiertokytkin, 1-nap. 3-as.	CK1029	Lorlin	1	1123705
(ei piirilevyllä)	Kytkimen nuppi, 6 mm akseli	5582.6611	Mentor	1	1282618

Komponentit, joiden Farnell-koodit ovat näkyvissä, on tilattu Farnellista prototyyppiä varten
 Muut komponentit ESK:n komponenttivarastosta lukuunottamatta IC7:aa, joka saatiin samplena

