

Aleksi Karppinen

Kapasitanssin jatkuva-aikainen mittaus teollisuusympäristössä

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Kevät 2022



**KAMK • University
of Applied Sciences**

Tiivistelmä

Tekijä: Karppinen Aleksi

Työn nimi: Kapasitanssin jatkuva-aikainen mittaus teollisuusympäristössä

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), Tieto- ja viestintätekniikka

Asiasanat: Kapasitiivinen mittaus, kapasitanssi, kapasitiivinen anturi

Tämän insinöörityön tavoitteena oli suunnitella ja testata mittausjärjestelmä pienen kapasitanssin mittaamiseen teollisuusympäristössä. Työ tehtiin yhteistyössä Exens Development Oy:n kanssa.

Työn teoriaosiossa esitellään lyhyesti läpi kapasitiivisen mittauksen perusasioita, anturirakenteita ja mitausmenetelmiä. Suunnitteluosiossa käydään läpi mittausjärjestelmän spesifikaatiot sekä millaisilla menetelmillä ja ratkaisuilla järjestelmä on toteutettu. Testausosiossa esitetään, kuinka mittausjärjestelmä on testattu ja millaisia tuloksia testauksella on saatu. Lopuksi analysoidaan työssä saavutetut tulokset sekä pohditaan, mitä kehityskohteita työssä tai lopputuloksessa on.

Abstract

Author: Karppinen Aleksi

Title of the Publication: Continuous measurement of capacitance in an industrial environment

Degree Title: Bachelor of Engineering, Information Engineering

Keywords: capacitive measurement, capacitance, capacitive sensor

The objective of this Bachelor's thesis was to develop and test a system for measuring low capacitance in an industrial environment. The work was done in cooperation with Exens Development Oy.

The theoretical part of the thesis briefly introduces the basics of capacitive measurement, sensor structures and measurement methods. The design section reviews the specifications of the measurement system, as well as the methods and solutions used to implement the system. The testing section shows how the measurement system has been tested and the results of executed tests. Finally, the test results are analyzed and some considerations for improving this study and developed system are presented.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kapasitiiviset anturit	2
3	Anturimallit ja -rakenteet	3
3.1	Vastakkain olevat elektrodit.....	3
3.2	Rinnakkain olevat elektrodit	3
3.3	Kamparakenne	4
3.4	Yksittäinen elektrodi.....	4
4	Mittausmenetelmiä	6
4.1	Lataus-purku -menetelmä	6
4.2	Siltamenetelmä	6
4.3	Resonanssimenetelmä	8
4.4	Vaihtovirtamenetelmä	8
5	Mittausjärjestelmän suunnittelu	10
5.1	Transimpedanssivahvistin	11
5.2	Signaalin vahvistus	12
5.3	Vaihelukittu vahvistin	13
5.4	Signaalin suodatus.....	13
6	Testaus.....	16
6.1	Mittaustarkkuus	18
6.2	Vasteaika	19
6.3	Häiriönsieto	20
7	Loppupohdinnat	23
8	Yhteenveto	24
	Lähteet	25
	Liitteet	

1 Johdanto

Tämän insinöörityön tarkoituksena on kehittää mittausjärjestelmä, jolla voidaan jatkuva-aikaisesti mitata pieniä kapasitansseja alle 10 ms:n vasteajalla. Mittausjärjestelmä suunniteltiin siten, että mittausaluetta voitaisiin säätää pienillä muutoksilla käyttötarkoitukseen sopivaksi ja mittauspiiriä voitaisiin käyttää elektrodirakenteesta riippumatta.

Aluksi työssä tarkasteltiin mahdollisia kapasitanssin mittaukseen käytettyjä menetelmiä, joista valittiin spesifikaatioiden perusteella tarkoitukseen sopivin. Mittausjärjestelmä lähdettiin suunnittelemaan valitun mittausmenetelmän pohjalta sellaiseksi, että teollisuusympäristössä esiintyvät sähköiset häiriöt eivät vaikuttaisi mittaustulokseen merkittäväksi. Koska tarkoituksena oli suunnitella vain mittauspiiri, häiriönsiedossa ei otettu huomioon järjestelmän kotelointia tai piirin ja muun järjestelmän väliseen tiedonsiirtoon kohdistuvia häiriöitä. Suunnitteluvaiheessa mittauspiiriä simuloitiin käyttämällä Texas Instrumentsin Tina-TI -ohjelmaa. Simuloinnilla saatiin havainnollistettua mittaussignaalin käyttäytymistä mittauksen eri vaiheissa ja tarkasteltua olennaisia suureita, kuten jänniteitä ja virtoja.

Suunnittelun jälkeen mittausjärjestelmästä toteutettiin prototyyppi testimittauksia varten. Työn lopussa on esitetty testimittauksen tulokset ja pohdittu keinoja, joilla mittausjärjestelmää voitaisiin parantaa.

2 Kapasitiiviset anturit

Kapasitiivisia antureita käytetään nykyään laajasti niin teollisuuden eri prosesseissa kuin kuluttajatuotteissakin, esimerkiksi melkein jokaisen taskusta löytyvän älypuhelimien kosketusnäytössä. Kapasitiivisilla antureilla voidaan mitata muun muassa etäisyyttä, kosteutta, kiinto-aineen tai nesteen tasoa, painetta ja jopa kiihtyvyyttä. [1.]

Kapasitiivisten antureiden toiminta perustuu kahden johtavan levyn ja niiden välisen dielektrisen materiaalin muodostaman kondensaattorin kapasitanssin muuttumiseen mitattavan suureen perusteella. Kondensaattorin kapasitanssi riippuu kaavan 1 mukaisesti levyjen poikkipinta-alasta A , levyjen välisestä etäisyydestä d sekä väliaineen suhteellisesta permittiivisyydestä ϵ_r . [2.]

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

missä

C = kapasitanssi

ϵ_0 = tyhjiön permittiivisyys

ϵ_r = väliaineen suhteellinen permittiivisyys

A = levyjen poikkipinta-ala

d = levyjen välinen etäisyys

Kondensaattorin kapasitanssi muuttuu, mikäli jokin kaavan 1 arvoista muuttuu. Kapasitanssin muutos voi perustua useaan eri mekanismiin ja kapasitiivisia antureita voidaan käyttää monissa erilaisissa sovelluksissa. [2.]

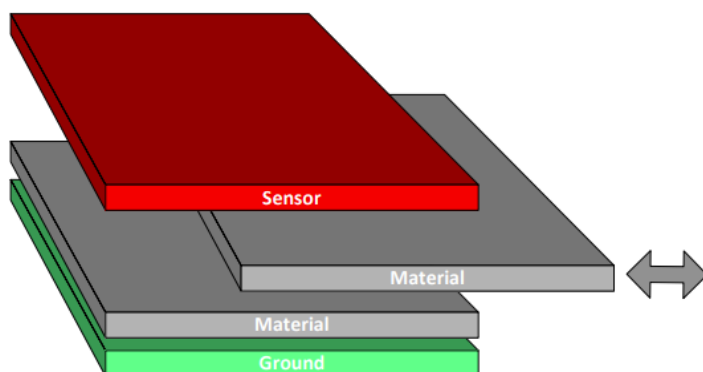
Kapasitiivisilla antureilla on useita etuja verrattuna esimerkiksi optisiin, induktiivisiin tai piezoresistiivisiin antureihin. Näitä etuja ovat pieni tehonkulutus, hyvä resoluutio, nopea mittausaika, useat käyttökohteet sekä kyky mitata ainetta jonkin toisen aineen lävitse. Kapasitiivisen mittauksen heikkous on herkkyys ympäristötekijöille, kuten lämpötilalle, kosteudelle, kohinalle ja ilmassa olevalle pölylle. Näiden haittavaikutusten välttäminen voi vaikeuttaa mittausjärjestelmän suunnittelua sekä tehdä toteutuksesta suhteellisen monimutkaisen. [3.]

3 Anturimallit ja -rakenteet

Kapasiivisia anturirakenteita on useita ja oikea rakenne valitaan mittaussovelluksen mukaan. Rakenteen valintaan vaikuttavat muun muassa anturin ja kohteen etäisyys toisistaan, mitattavan kohteen suhteellinen permittiivisyys, haluttu mittausnopeus sekä haluttu tarkkuus. [3.] [4.]

3.1 Vastakkain olevat elektrodit

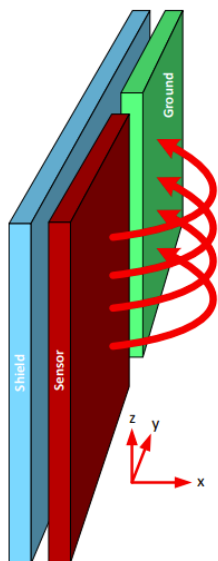
Tässä rakenteessa elektrodien asettelu muistuttaa perinteistä levykondensaattoria. Kun kahden vastakkain asetetun elektrodin väliin asetetaan materiaalia (kuvassa 1), jonka permittiivisyys on eri kuin ilmalla, elektrodien muodostaman kondensaattorin mitattava kapasitanssi muuttuu. Tämä malli sopii erittäin hyvin materiaalianalyysiin tai sovelluksiin, joissa halutaan tarkkailla esimerkiksi kappaleen paksuutta. [3.] [4.]



Kuva 1. Vastakkain asetetut elektrodit materiaalianalyysissä [4]

3.2 Rinnakkain olevat elektrodit

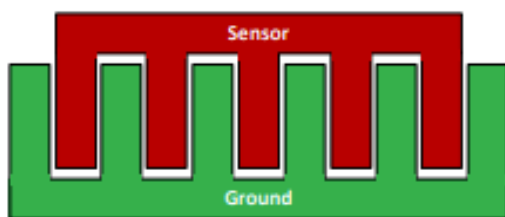
Tässä mallissa rinnakkain asetettujen elektrodien välille muodostuu sähkökenttä, joka on tiheämpi levyjen sisäreunalla jolloin herkkyys z-akselin suuntaan kasvaa (kuva 2). Elektrodien takana on suojaus, jonka avulla sähkökenttä saadaan suunnattua levyjen toiselle puolelle. Tämä soveltuu erityisen hyvin nesteen pinnan mittaamiseen. [4.]



Kuva 2. Rinnakkain asetetut elektrodit [4]

3.3 Kamparakenne

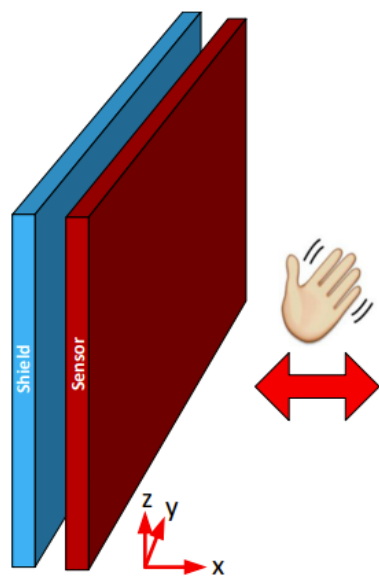
Rinnakkain asetetuilla elektrodeilla voi tehdä useita erilaisia rakenteita, joista yksi on kuvassa 3 esitetty kamparakenne. Kamparakenne sopii hyvin sovelluksiin, joissa tarvitaan isoa tunnistuspinta-alaa sekä korkeaa resoluutiota. [4.]



Kuva 3. Kamparakenne [4]

3.4 Yksittäinen elektrodi

Tämä malli sopii kosketuskytkimiin tai sovelluksiin, joissa halutaan havaita jokin maadoitettu kohde. Malli koostuu vain yhdestä elektrodista, jolloin maadoitettuna elektrodina toimii havaittava kohde, kuten ihmisen sormi. Elektrodin takana on suojaus, joka auttaa suuntauksessa, mutta myös suojaa sähkömagneettiselta häiriöltä ja hajakapasitanssilta (kuva 4). [4.]



Kuva 4. Yksittäinen elektrodi ja suojaus kosketuksen tunnistuksessa [4]

4 Mittausmenetelmiä

Kuten jo aikaisemmin on mainittu, kapasitiivinen mittaus soveltuu moneen käyttökohteeseen, jolloin luonnollisesti mittausmenetelmiäkin on useita erilaisia. Toiset mittausmenetelmät ovat yksinkertaisia ja usein myös hinnaltaan edullisia, mutta esimerkiksi mittauksen resoluutio ja vasteaika eivät välttämättä vastaa tarvetta. Mitä tarkempia ja nopeampia mittauksia halutaan, sitä monimutkaisemmaksi anturin toteutus muodostuu. [5.][6.] Tarkkaa mittausta suunniteltaessa tulee myös ottaa huomioon hajakapasitanssit, jotka ovat kapasitiivisen mittauksen suurin mittausvirhelähde vaihdellen välillä 10 pF–10 nF [7].

Kapasitiivisissä mittausmenetelmissä kapasitanssia mitataan tyypillisesti epäsuorasti, esimerkiksi mittaamalla piirin yli vaikuttavan AC-signaalin tasoa tai mittaamalla tuntemattoman kondensaattorin lataus- ja purkuaikaa. [7.]

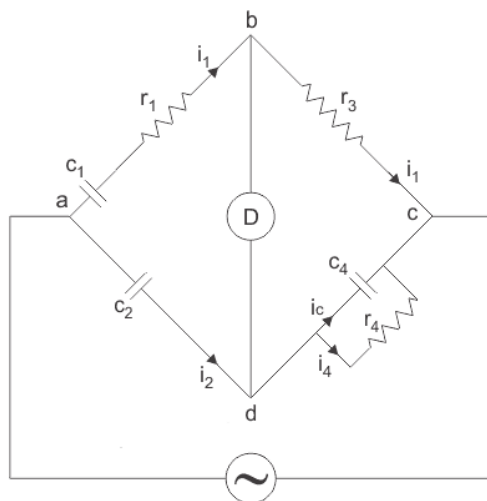
4.1 Lataus-purku -menetelmä

Lataus-purku -menetelmä perustuu relaksaatio-oskillaattoriin. Se on yksinkertainen mittausmenetelmä, jota käytetään muun muassa yleismittareissa. Kytkenässä mitattava kondensaattori muodostaa osan oskillaattorin RC- tai LC-piiristä. Tuntematonta kondensaattoria ladataan tunnetulla virralla, jolloin kaavan 2 mukaisesti kondensaattorin kapasitanssi on yhtä suuri kuin virta jaettuna jännitteen muutosnopeudella. Näin ollen kapasitanssi voidaan laskea mittaamalla aika, jonka kuluttua kynnysjännite on saavutettu. Tämä menetelmä ei kuitenkaan sovi erittäin pienien kapasitanssien mittaamiseen. Pieni kapasitanssi latautuu nopeasti, jolloin tarkka ajan mittaus on haastavaa. [7.][8.]

$$C = \frac{I}{dV/dt} \quad (2)$$

4.2 Siltamenetelmä

Toinen mittausmenetelmä perustuu Scheringin siltaan, joka on samankaltainen kuin Wheatstonen silta. Kuvassa 5 on esitetty Scheringin silta,



Kuva 5. Scheringin silta [9]

jossa

C_1 = mitattava kondensaattori

C_2 = tunnettu kondensaattori

C_4 = muutettava kondensaattori

R_1 = sarjavastus

R_3 = tunnettu vastus

R_4 = muutettava vastus

D = nollailmaisin

Scheringin sillan tasapainoehto on esitetty kaavassa 3.

$$\frac{Z_{ab}}{Z_{bc}} = \frac{Z_{ad}}{Z_{dc}} \quad (3)$$

Sijoittamalla arvot yllä olevaan kaavaan saadaan johdettua kaavat 4–6.

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) \left(\frac{R_4}{1+j\omega C_4 R_4}\right) = \frac{R_3}{j\omega C_2} \quad (4)$$

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) R_4 = \frac{R_3}{j\omega C_2} (1 + j\omega C_4 R_4) \quad (5)$$

$$R_1 R_4 - \frac{jR_4}{\omega C_1} = -\frac{jR_3}{\omega C_2} + \frac{R_3 R_4 C_4}{C_2} \quad (6)$$

Kun imaginääriosat ja reaalisosat merkitään keskenään yhtä suuriksi, saadaan C_1 :lle ja R_1 :lle tasapainoehdon mukaiset kaavat 7 ja 8. [9.][10.]

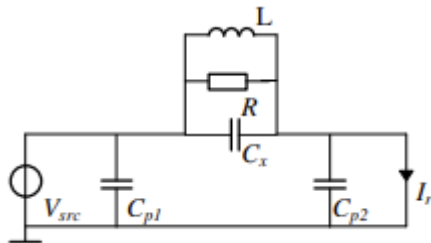
$$C_1 = \frac{C_2 R_4}{R_3} \quad (7)$$

$$R_1 = \frac{C_4 R_3}{C_2} \quad (8)$$

Siltamenetelmä sopii hyvän mittaustarkkuuden vuoksi erityisen pienien kapasitanssien mittaukseen, mutta sillan tasapainon löytäminen vie aikaa ja mittausten menetelmä on hidas [6].

4.3 Resonanssimenetelmä

Resonanssimenetelmässä mitattavan kapasitanssin rinnalle kytketään induktanssi, jolloin muodostuu kuvan 6 mukainen rinnan kytketty RLC-piiri [6].



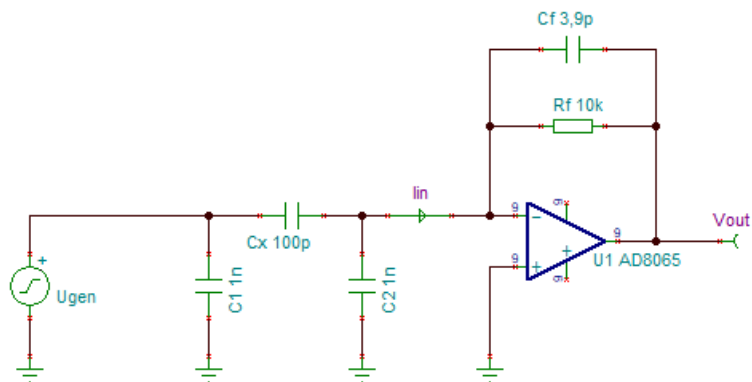
Kuva 6. Resonanssimenetelmä

Resonanssitaajuus selvitetään säätämällä tulojännitteen taajuutta, kunnes virta on maksimiarvoon. Tämän jälkeen kapasitanssi voidaan laskea kaavalla 9. Menetelmä on tarkka, mutta resonanssitaajuuden etsimisestä johtuen suhteellisen hidas. [6.]

$$C_x = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \quad (9)$$

4.4 Vaihtovirtamenetelmä

Vaihtovirtamenetelmässä vakiotajuinen sinisignaali on kytketty kuvan 7 mukaisesti sarjaan mitattavan kapasitanssin kanssa. Mitattava kapasitanssi on kytketty transimpedanssivahvistimeen, jolla kaavan 10 mukaisesti sisään tulevasta virrasta saadaan jännitesignaali, jonka amplitudi on verrannollinen mitattavaan kapasitanssiin. [11.][12.]



Kuva 7. Transimpedanssivahvistin

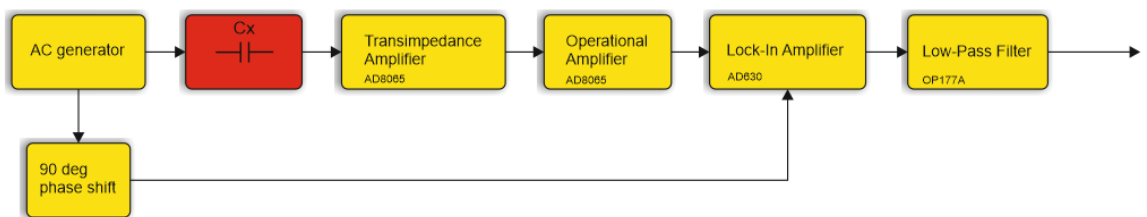
$$V_{out} = -I_{in}Z_F = -I_{in} \frac{R_F}{1 + j2\pi f R_F C_F} \quad (10)$$

Tällä menetelmällä mittaus on nopea, mutta herkkä ulkoisille häiriöille, minkä takia ei sellaiseen sovellu tarkkaan mittaukseen. Häiriönsietoa voidaan parantaa käyttämällä mittauksen lähdössä suodatusta, vaihelukittua vahvistinta, chopper-vahvistinta tai muuta menetelmää signaalikohinasuhteen parantamiseksi. [11.][13.]

5 Mittausjärjestelmän suunnittelu

Työn tavoitteena oli suunnitella ja testata kapasitanssin mittaukseen järjestelmä, jota voitaisiin pienillä muutoksilla käyttää useissa eri sovelluksissa. Mittausjärjestelmän suunnittelu käynnistettiin määritettyjen spesifikaatioiden perusteella. Mittauksen haluttiin olevan jatkuva-aikainen ja kapasitanssin mittaussäily tuli olla 1 pF–100 pF ja vasteaika alle 10 ms. Mittaustarkkuuden kriteerinä oli pysyä referenssimittauksissa käytettyjen kondensaattoreiden toleranssien sisällä. Toimintaan hyvin teollisuusympäristössä mittausjärjestelmän pitää sietää sähköisiä häiriöitä, joita ympäristössä mahdollisesti esiintyy. Häiriönsieto tässä työssä keskittyy itse mittauspiiriin, joten esimerkiksi piirin ja muun järjestelmän väliseen tiedonsiirtoon vaikuttavia häiriöitä ei ole otettu huomioon.

Mittausmenetelmää valittaessa kytkentöjä simuloitiin Texas Instrumentsin Tina-TI -ohjelmalla. Simulaatioilla saatiin tarkasteltua helposti piirin virtoja ja jännitteitä sekä havainnollistettua mitaussignaalin käyttäytymistä vahvistimissa ja suodattimissa. On kuitenkin huomattava, että simuloititulosissa ympäristöstä kytkeytyvät häiriöt eivät näy, mikäli niitä ei erikseen mallinneta simulointiin ja kaikki käytettävien komponenttien ominaisuudet eivät välttämättä näy simuloititulosissa simulointimallien epätäydellisyyden vuoksi. Mittausmenetelmäksi valittiin vaihtovirta-signaaliin perustuva menetelmä, koska se täytti halutut spesifikaatiot silloin, kun lisäksi käytetään vaihelukittua vahvistinta ja suodatusta signaali-kohinasuhteen parantamiseksi. Mittausjärjestelmän lohkokaavio on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Mittausjärjestelmän lohkokaavio

Mittausta simuloitiin käyttämällä 100 kHz sinisignaalia, jonka amplitudi on 5V.

5.1 Transimpedanssivahvistin

Signaali viedään mitattavan kondensaattorin C_x läpi transimpedanssivahvistimelle, joka muuntaa tulovirran suhteelliseksi lähtöjännitteeksi. Transimpedanssivahvistimen lähtö riippuu tulovirrasta ja piirin impedanssista jo aiemmin esitetyn kaavan 10 mukaisesti.

Kytkenässä tulee kiinnittää huomiota siihen, että transimpedanssivahvistin on herkkä värähtelemään. Vahvistin saadaan pysymään stabiilina, kun valitaan kytkentään riittävällä kaistanleveydellä oleva vahvistinpiiri ja lasketaan takaisinkytkennän muodostavien komponenttien arvot kaavoilla 11 ja 12, jotta päästään mahdollisimman lähelle kaavan 13 ehtoa. [12.]

$$f_P \approx \sqrt{\frac{GBW}{2\pi R_F C_D}} \quad (11)$$

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBW} \left(1 + \sqrt{(1 + 8\pi R_F C_D GBW)} \right) \quad (12)$$

Kaavoissa

GBW = Operaatiovahvistimen kaistanleveys

f_p = Napataajuus

C_F = Takaisinkytkennän kapasitanssi

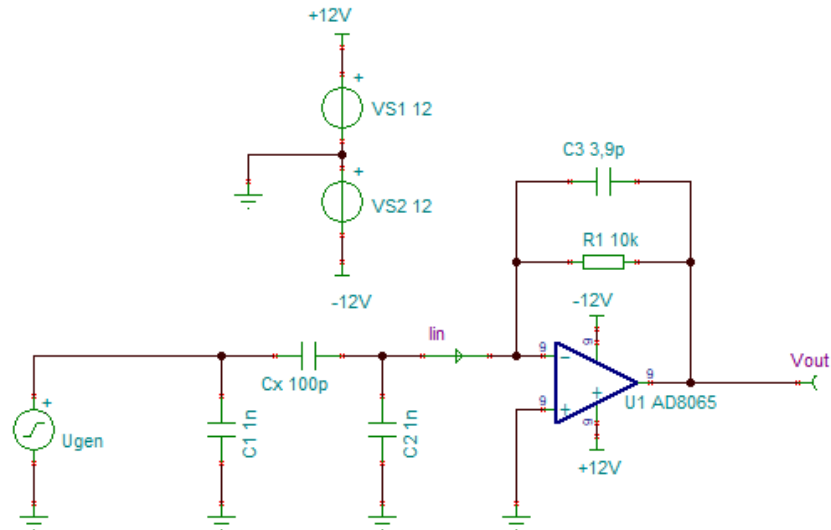
C_D = Mitattava kapasitanssi

R_F = Takaisinkytkennän resistanssi

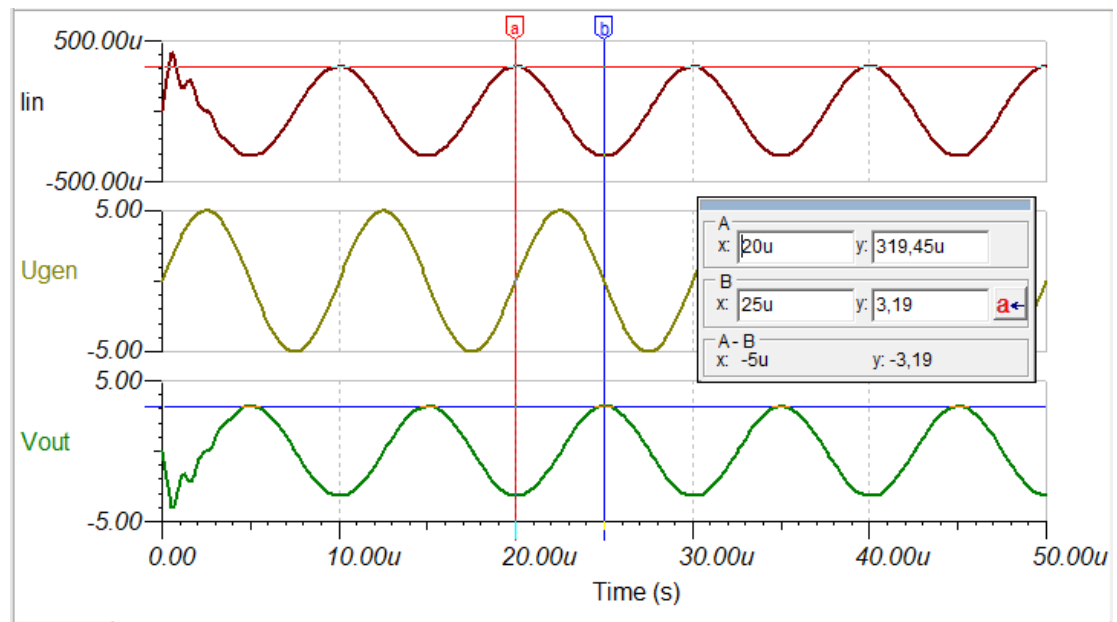
$$\frac{GBW}{f_P} = \frac{C_F + C_D}{C_F} \quad (13)$$

Ehto 13 ei käytännössä ole jatkuvasti tosi, koska mitattava kapasitanssi muuttuu mittauksen aikana. Vahvistin pysyy kuitenkin stabiilina, kun mittausalue pidetään riittävän pienenä, jolloin yhtälön puoliskojen ero ei kasva liian suureksi.

Kytkenä ja signaalit on esitetty kuvissa 9 ja 10.



Kuva 9. Transimpedanssivahvistin



Kuva 10. Tulosignaali, sisään menevä virta sekä lähtösignaali

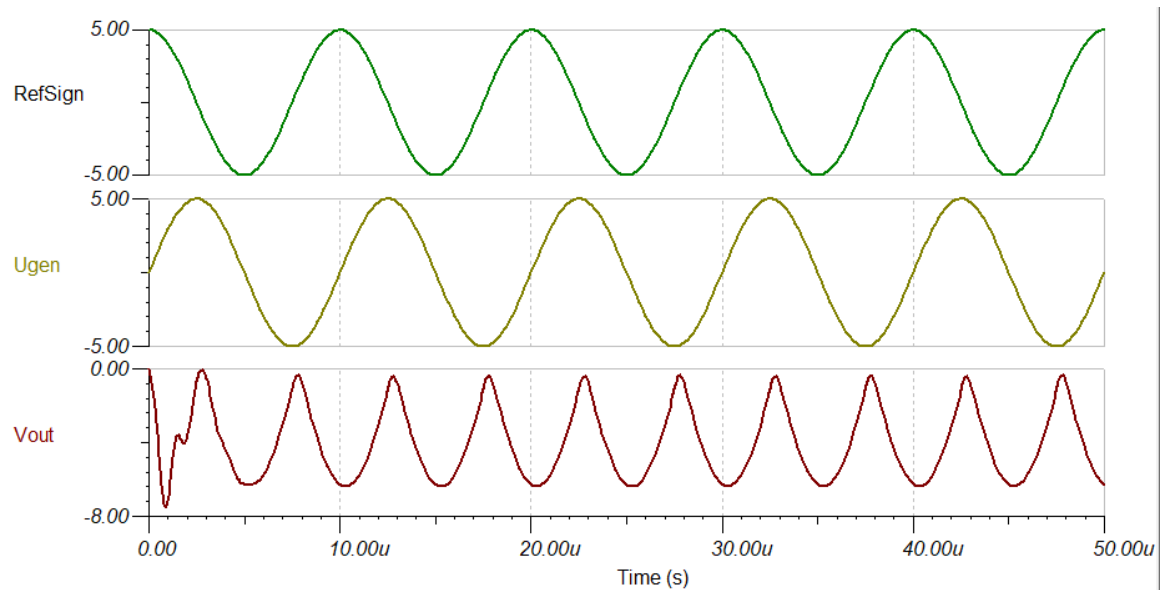
5.2 Signaalin vahvistus

Transimpedanssivahvistimen jälkeen signaali vietään invertoivalle operaatiovahvistimelle, jonka vahvistus lasketaan kaavalla 14.

$$U_{out} = -U_{in} \frac{R_3}{R_4} \quad (14)$$

5.3 Vaihelukittu vahvistin

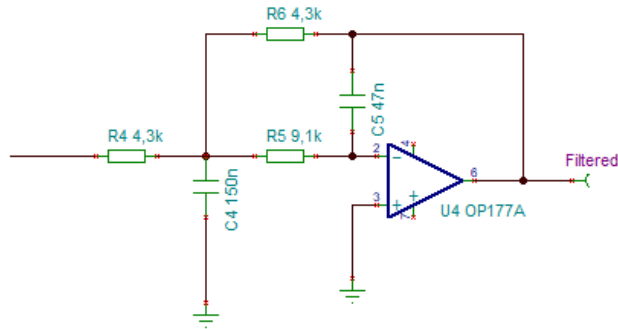
Seuraavaksi signaali viedään vaihelukitulle vahvistimelle. Vaihelukittu vahvistin käyttää vaiheherkkää tunnistusta erottamaan mitattavan signaalin kohinasta ja ympäristöstä peräisin olevista häiriösignaaleista. Vaiheherkkä tunnistus erottaa halutun signaalin kohinasta vertaamalla sisään-tulon taajuutta ja vaihetta vahvistimelle syötettyyn referenssisignaaliin. Ne häiriösignaalit, joiden taajuus tai vaihe poikkeavat referenssisignaalista, suodattuvat pois. Kuvassa 11 on esitetty signaali vaihelukitun vahvistimen jälkeen.



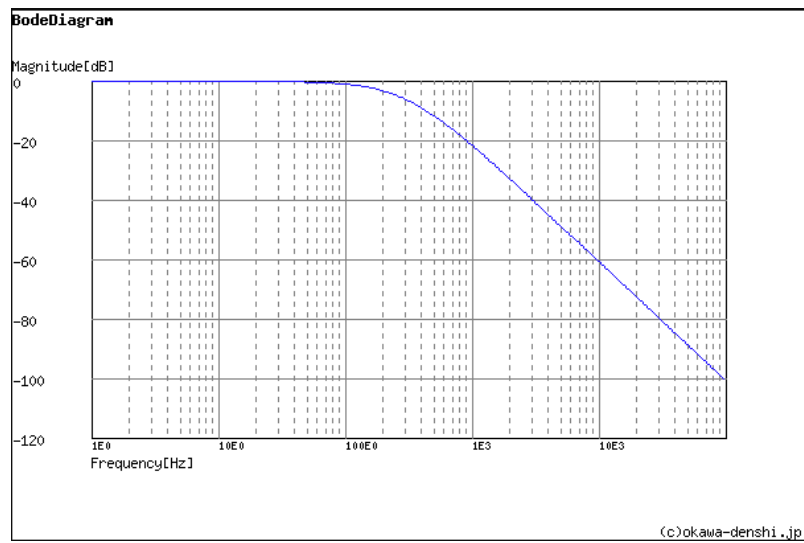
Kuva 11. Tasasuunnattu signaali vaihelukitun vahvistimen jälkeen

5.4 Signaalin suodatus

Viimeisenä vaiheena suodatetaan signaalista AC-komponentit, jotta mittaustulos olisi luettavissa. Suodattimena on käytetty kuvassa 12 esitettyä alipäästösuodatinta, jonka rajataajuus f_c on noin 300 Hz ja vahvistus $G = -1$. Suodattimen rajataajuus ja vahvistus saadaan laskettua kaavoilla 15 ja 16. Alipäästösuodattimen Boden diagrammi on esitetty kuvassa 13.



Kuva 12. Alipäästösuodatin

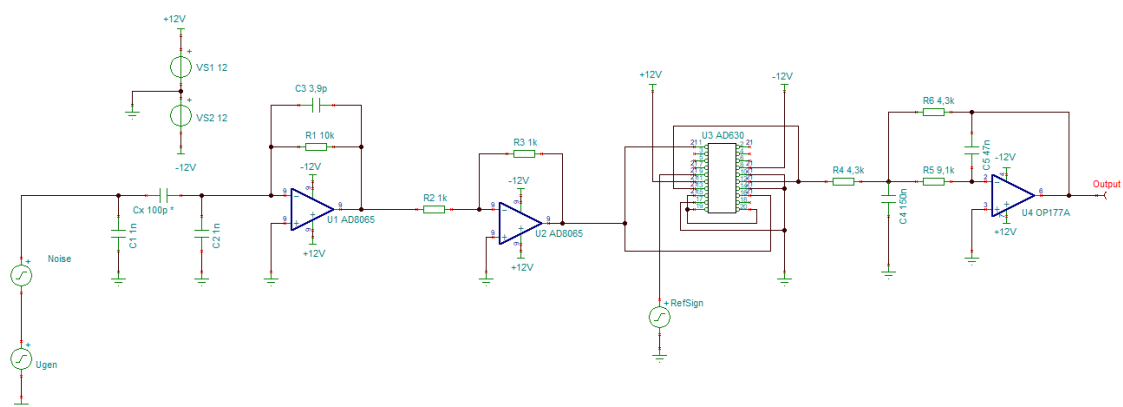


Kuva 13. Alipäästösuodattimen Boden diagrammi

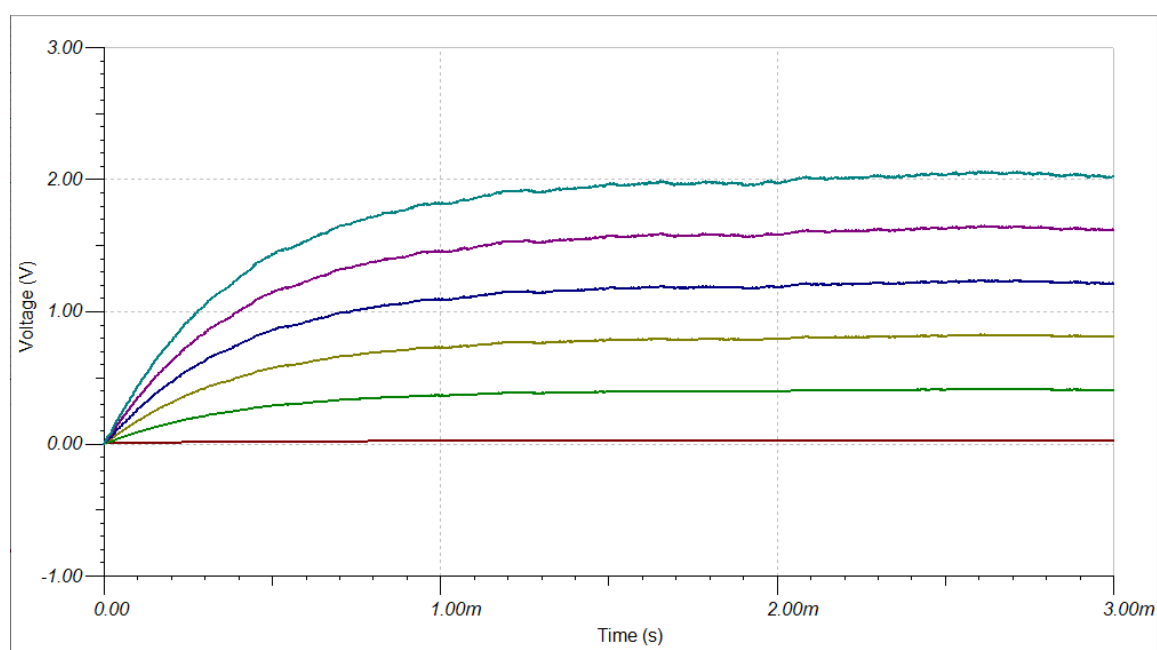
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_5 R_6 C_4 C_5}} \quad (15)$$

$$G = -\frac{R_6}{R_4} \quad (16)$$

Simulaatio on ajettu lopuksi läpi porrastetulla tuntemattoman kapasitanssin C_x :n arvoilla ja mit-tasignaaliin on syötetty satunnaista kohinaa. Kuvasta 15 voidaan nähdä, että mittaus on lineaari-nen ja vasteaika on alle 10 ms. Valmis kytkentä on esitetty kuvassa 14.



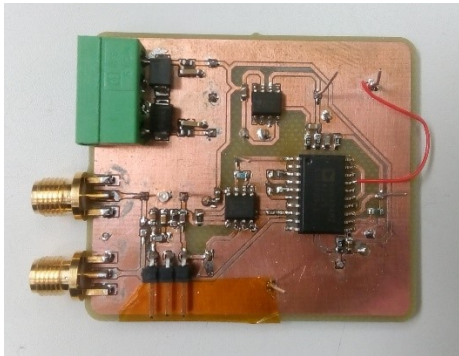
Kuva 14. Koko kytkentä



Kuva 15. Simuloinnin tulokset kapasitansseilla 1 pF, 20 pF, 40 pF, 60 pF, 80 pF ja 100 pF

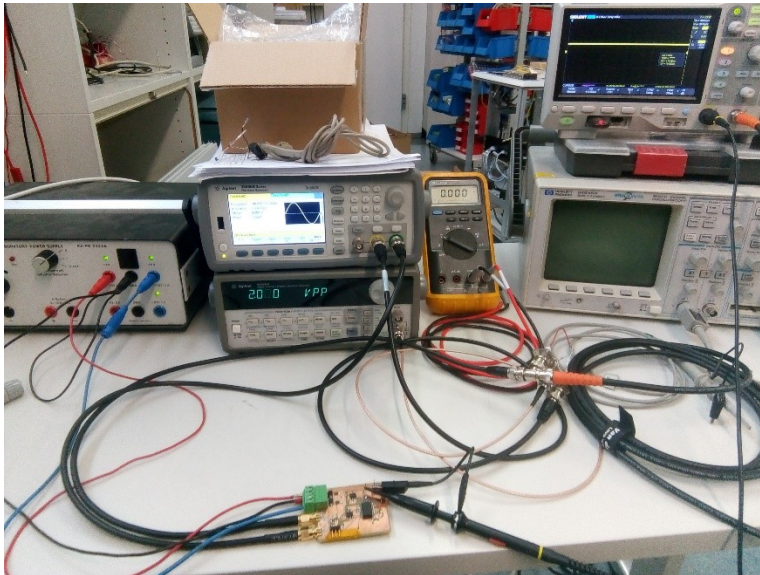
6 Testaus

Testausta varten suunniteltiin ja valmistettiin kuvan 16 piirilevy. Levyn piirikaavio on esitetty liitteessä 1. Levyllä on tulot käyttäjännitteelle ja kahdelle signaalille, joista toinen on mittaussignaalille ja toinen lukkovahvistimen referenssisignaalille. Levyllä on myös useita testipisteitä jännitteiden ja signaalien tarkastelua varten. Mitattava kondensaattori voidaan juottaa suoraan levyille tai kytkeä levyn alalaidassa olevaan liittimeen.



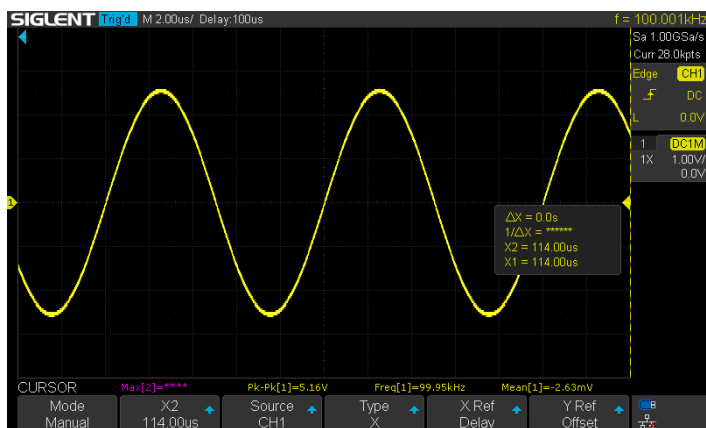
Kuva 16. Testilevy

Testaukset suoritettiin laboratorioympäristössä käyttäen kuvan 17 mukaista laitteistoa.

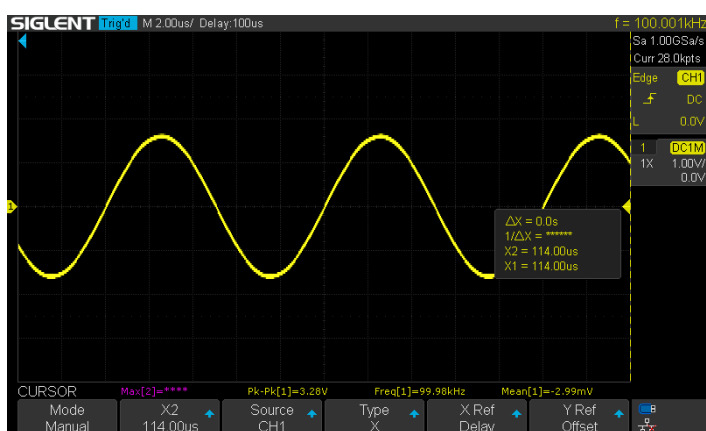


Kuva 17. Mittauslaitteisto

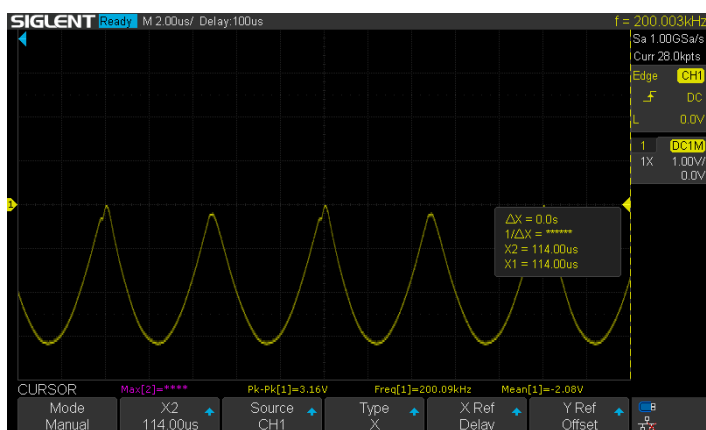
Testauksen alussa piirin toiminta varmistettiin tarkastelemalla signaalia piirilevyn testipisteissä. Kuvissa 18–21 on esitetty mittasignaalit eri testipisteissä.



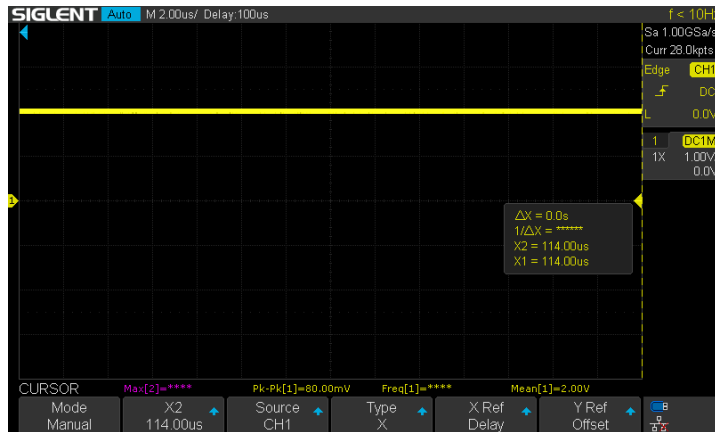
Kuva 18. Mittaussignaali piirin tulossa



Kuva 19. Mittaussignaali transimpedanssi- ja operaatiovahvistimien jälkeen



Kuva 20. Mittaussignaali vaihelukitun vahvistimen jälkeen



Kuva 21. Mittaussignaali lähdössä

6.1 Mittaustarkkuus

Mittaustarkkuudesta puhuttaessa voidaan tarkoittaa sisäistä tarkkuutta, tai ulkoista tarkkuutta. Sisäinen tarkkuus viittaa toistettujen mittaustulosten yhtäpitävyyteen, kun taas ulkoisella tarkkuudella tarkoitetaan mitatun arvon ja todellisen arvon välistä yhtäpitävyyttä. [14.]

Mittaustarkkuutta testattiin kuudella eri kondensaattorilla, joiden kapasitanssia verrattiin yleismittarilla piirin lähdöstä mitattuun jännitteeseen. Mittaukset toistettiin neljä kertaa ja niiden tulokset keskiarvoineen on esitetty taulukossa 1.

Meas.	1 pF tol. 0,1 pF	20 pF tol. 1%	39 pF tol. 1%	56 pF tol. 1%	82 pF tol. 1%	100 pF tol. 1%
1	0,020 V	0,398 V	0,787 V	1,128 V	1,633 V	1,998 V
2	0,020 V	0,398 V	0,786 V	1,127 V	1,632 V	1,997 V
3	0,020 V	0,398 V	0,786 V	1,127 V	1,632 V	1,997 V
4	0,020 V	0,398 V	0,786 V	1,127 V	1,632 V	1,997 V
Avg.	0,020 V	0,398 V	0,78625 V	1,12725 V	1,63225 V	1,99725 V

Taulukko 1. Mittaukset ja niiden keskiarvot

Taulukosta 1 voidaan havaita, että toistettujen mittausten tulokset ovat lähes samat joka mittauksella. Kapasitanssina mittaushajonta edustaa noin 0,01 pikofaradia, joten voidaan todeta, että sisäinen tarkkuus on riittävä.

Mittaustuloksien vertaus referenssiarvoihin on esitelty taulukossa 2. Kapasitanssia vastaava jännite laskettiin kaavalla 17. Kaavassa transimpedanssivahvistimen lähtö on kerrottu koko signaaliketjun vahvistuksilla.

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{\frac{1}{\omega C_x}} R_1 G_{AMP} G_{LIA} \frac{2}{\pi} G_{LPF} \quad (17)$$

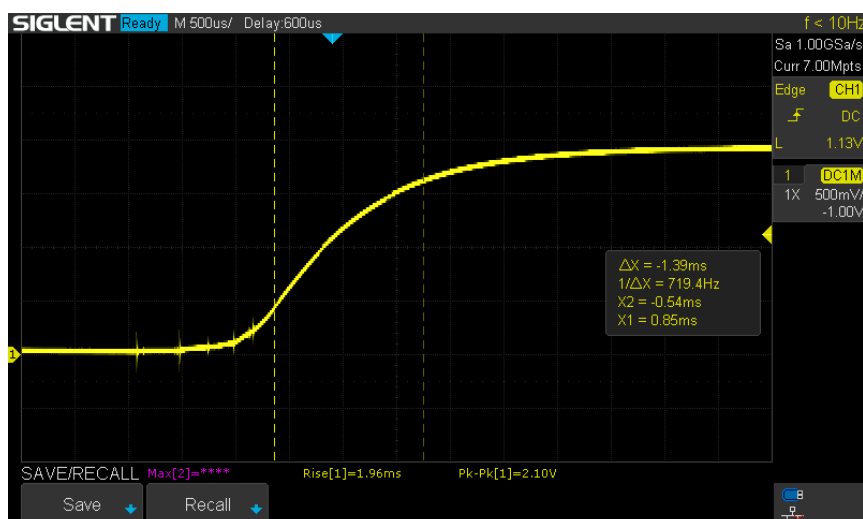
Reference capacitance [pF] tol. $\pm 1\%$	Calculated response [V]	Measured response [V]	Calculated capacitance [pF]	Difference to reference
1	0,02	0,02	1	0,00 %
20	0,4	0,398	19,9	0,50 %
39	0,78	0,78625	39,3125	-0,80 %
56	1,12	1,12725	56,3625	-0,65 %
82	1,64	1,63225	81,6125	0,47 %
100	2	1,99725	99,8625	0,14 %

Taulukko 2. Mittaustulokset verrattuna referenssiin

Taulukosta 2 voidaan havaita, että referenssiarvojen ja mitattujen arvojen välillä on pieniä eroja, mutta mittausvirhe on kuitenkin suhteellisen pieni. Mittauksen ulkoista tarkkuutta on vaikea arvioida, koska referenssien tarkkoja arvoja ei tunneta. Samasta syystä kehitetyn mittalaitteen kalibrointi tässä vaiheessa on vaikeaa. Kaikki mitatut arvot ovat ilmoitetun toleranssin sisällä, joten voitiin todeta mittaustarkkuuden olevan riittävän hyvä asetettujen kriteerien täyttämiseksi. Referenssiksi olisi ollut hyvä saada kapasitanssien tarkat arvot, mutta käytössä ei ollut riittävän tarkkaa mittalaitetta niiden mittaamiseksi.

6.2 Vasteaika

Vasteaika mitattiin oskilloskoopilla, kun mitattavaa kapasitanssia vaihdettiin kytkimen avulla yhdestä pikofaradista sataan pikofaradiin. Kuvassa 22 on esitetty jännitteen muutos ajan suhteen ja siitä voidaan huomata, että vasteaika on noin 2 ms. Pienet häiriöt signaalin nousuhetkellä johtuivat mitattavien kondensaattorien vaihtoon käytetystä kytkimestä.

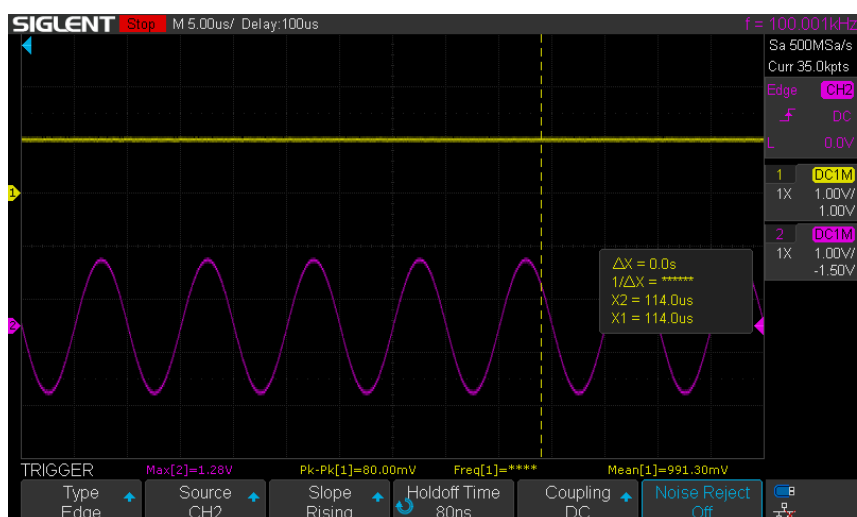


Kuva 22. Vasteajan mittaus

6.3 Häiriönsieto

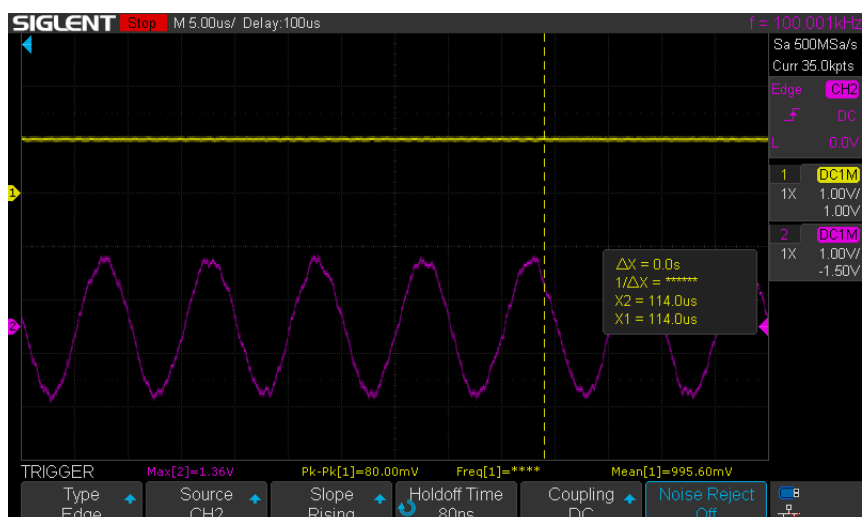
Häiriönsietoa testattiin syöttämällä mittasignaalin rinnalle kohinaa toisesta signaaligeneraattorista. Lähtöä tarkasteltiin erilaisilla häiriösignaaleilla, jotka on esitetty kuvissa 23–27. Kuvissa keltainen signaali on piirin lähtöä ja violetti signaali on kohinainen mittasignaali.

Kuvassa 23 on esitetty tilanne, jossa mittasignaalin ei ole kohinaa.



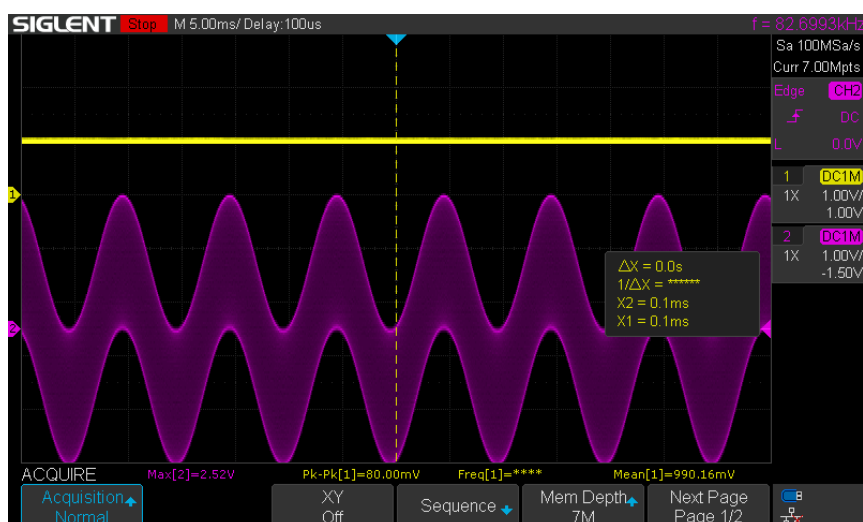
Kuva 23. Kohinaton signaali

Kuvassa 24 on mittasignaalin rinnalle syötetty satunnaista kohinaa, jonka amplitudi on 2 V.



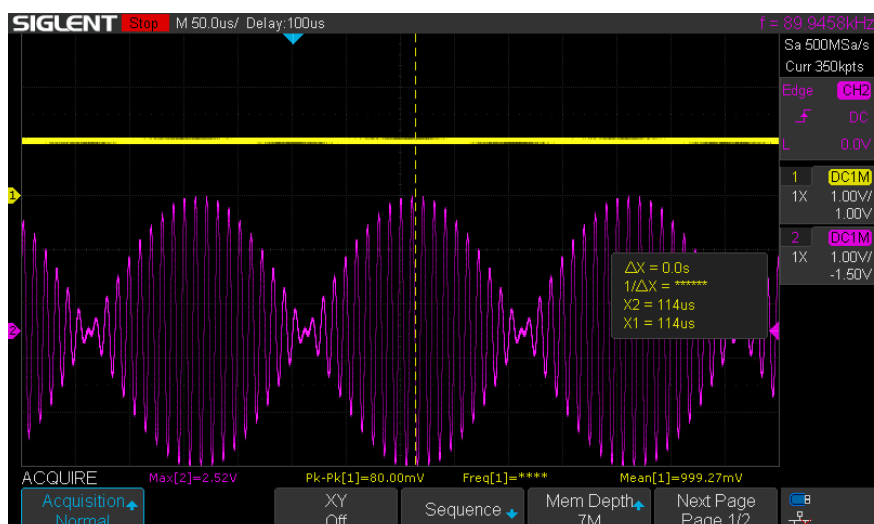
Kuva 24. Mittaus satunnaisella kohinalla

Kuvassa 25 on esitetty tilanne, jossa mittasignaalin rinnalle syötettiin signaali, jonka taajuus on 100 Hz ja amplitudi 5 V.



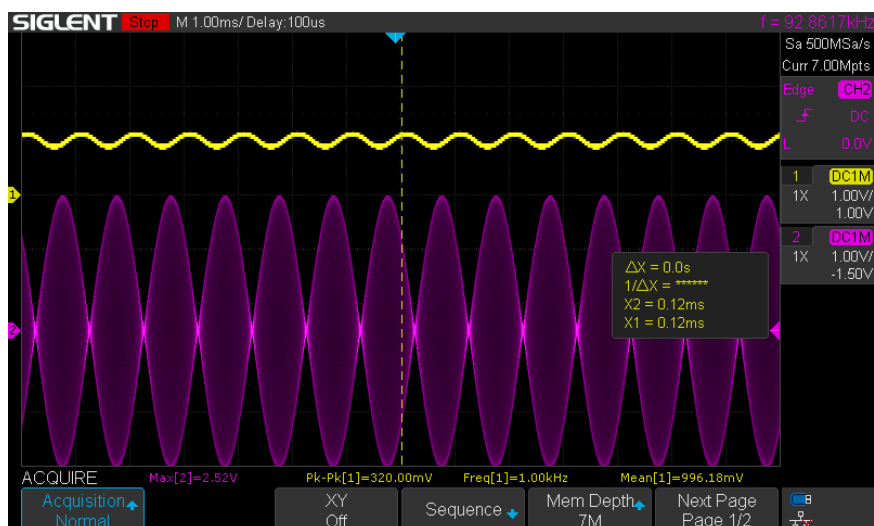
Kuva 25. Häiriösignaalin taajuus 100 Hz ja amplitudi 5 V

Kuvassa 26 häiriösignaalin taajuutta nostettiin 90 kHz:iin.



Kuva 26. Häiriösignaalin taajuus 90 kHz ja amplitudi 5 V

Mittauksista voidaan nähdä, ettei häiriöillä ole juuri minkäänlaista vaikutusta mittauksen ulostuloon, vaan merkittävä häiriösignaali ja kohina suodattuvat pois vaihelukitun vahvistimen ja alipäästösuodattimen avulla. Tilanne on kuitenkin eri kuvassa 27, jossa häiriösignaalin taajuutta nostettiin vain kilohertsin päähän mittasignaalin taajuudesta. Mittasignaalin jännitteen keskiarvo pysyy vielä samana, mutta nyt siinä on havaittavissa signaalien erottaajuus. Kun häiriösignaalin taajuus lähestyy mittauksessa käytettävää signaalia, järjestelmän kyky vaimentaa häiriötä heikenee.



Kuva 27. Häiriösignaalin taajuus 99 kHz

Näillä testeillä pystyttiin toteamaan, että mittausjärjestelmä toimii hyvin kohinaisessa ympäristössä.

7 Loppupohdinnat

Suoritettu työ tarjosi paljon uutta opittavaa sekä uusia näkökulmia jo opittuihinkin asioihin. Yksi uusista asioista oli vaihelukittu vahvistin ja vaiheherkkä tunnistus, joka olikin mielenkiintoinen osittausjärjestelmää varsinkin, kun sen toiminnan tehokkuutta tarkasteltiin testimittauksia tehdessä. Suunniteltua mittausjärjestelmää olisi lopuksi ollut mielenkiintoinen verrata johonkin kaupalliseen ratkaisuun, mutta sitä ei aikataulun puitteissa pystytty tekemään.

Työn aikana selvitettiin useita erilaisia tapoja mitata kapasitanssia sekä tapoja hyödyntää kapasitanssin ominaisuuksia eri sovelluskohteissa. Mittausmenetelmien ja sovelluksien paljous tulikin pienenä yllätyksenä, jolloin asioiden tutkimiseen piti käyttää huomattava osa työajasta.

Työn aikataulun suhteen olisi pitänyt olla hieman suunnitelmallisempi ja ottaa enemmän huomioon mahdollisia eteen tulevia haasteita ja niistä johtuvia viivästyksiä. Vaikka vähän kiire meinasi tulla, tuli työ kuitenkin ajallaan valmiiksi. Kaiken kaikkiaan työn suorittaminen oli pienistä vastoinkäymisistä huolimatta mukavaa ja mielenkiintoista.

8 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli suunnitella teollisuusympäristöön soveltuva mittausjärjestelmä jatkuva-aikaiseen pienen kapasitanssin mittaukseen. Työn suunnittelu ja testaus tehtiin Exens Development Oy:n tiloissa Kajaanissa.

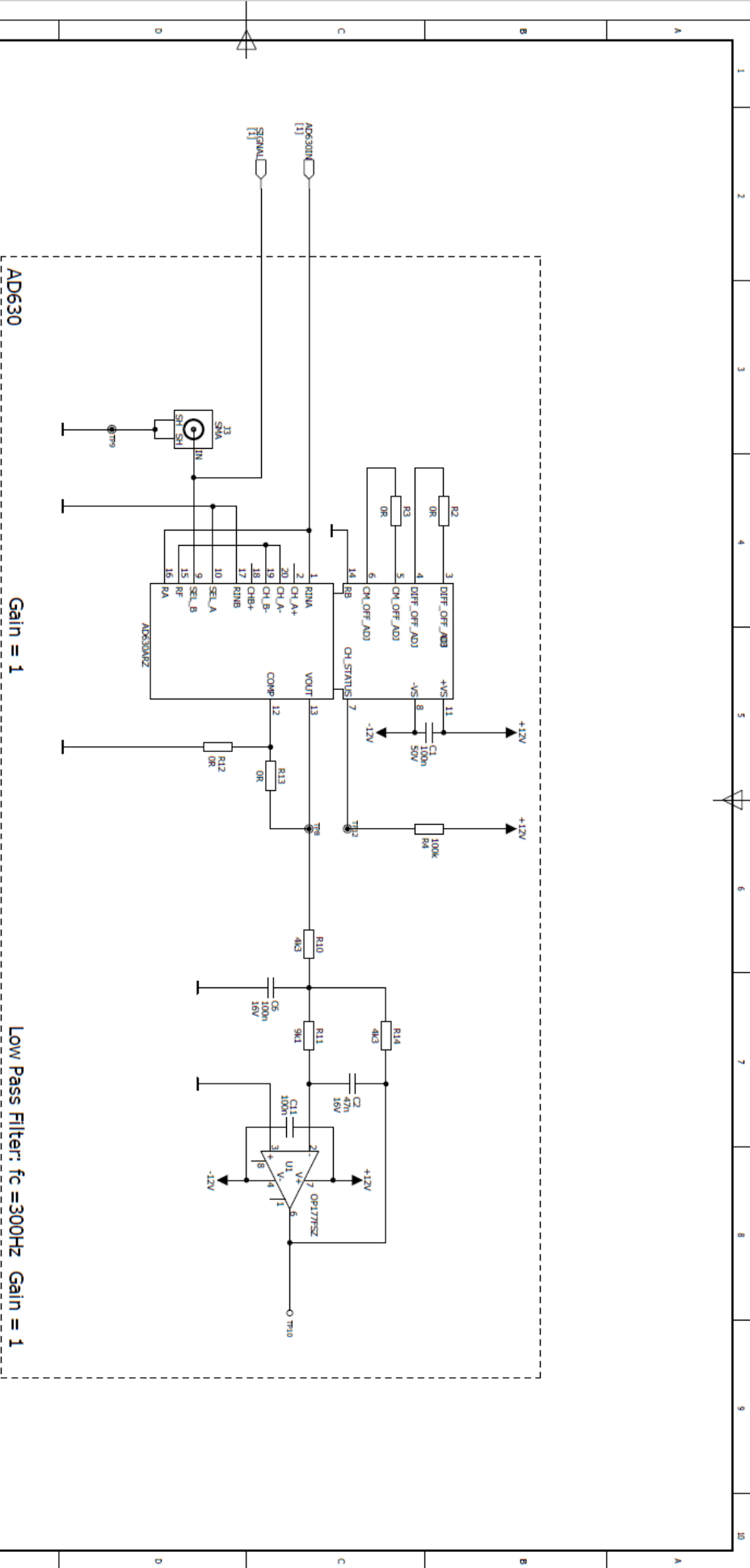
Työn lopputuloksena oli toimiva ja annetut spesifikaatiot täyttävä prototyyppi mittausjärjestelmästä, jota voidaan käyttää useassa eri kapasitiivista mittausta hyödyntävässä sovelluksessa.

Järjestelmää voidaan kehittää lisäämällä siihen mikro-ohjain, jonka avulla järjestelmään saataisiin lisättyä tarvittavia ominaisuuksia. Mikro-ohjaimella saataisiin totutettua mittasignaalin generointi, mittausalueen skaalaus sekä kalibrointi. Samalla järjestelyllä vaihelukittu vahvistus ja suodatus olisi mahdollista tehdä digitaalisesti, jolloin mikro-ohjain korvaisi kalliin analogisen mikropiirin.

Lähteet

- 1 Larry K. Baxter. Capacitive Sensors: Design and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press; 1997
- 2 Walteneus Dargie. Principles and Applications of Ubiquitous Sensing. John Wiley & Sons, incorporated; 2017
- 3 Capacitive Sensors Offer Numerous Advantages. Haettu osoitteesta <https://www.electronicdesign.com/technologies/boards/article/21774178/capacitive-sensors-offer-numerous-advantages>
- 4 Dawid Wang. FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications. Dallas, TX, USA: Texas Instruments; 2014
- 5 Development and Experimental Comparison of Low-Cost, Reliable Capacitive Touch Sensing Boards. Haettu osoitteesta <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5134445/>
- 6 A design methodology for low-cost, high-performance capacitive sensors. Delft University Press, Netherlands; 1997
- 7 Williams Charles. Introductions to Sensors. Haettu osoitteesta <http://newton.ex.ac.uk/teaching/CDHW/Sensors/#Capacitance>
- 8 How to measure capacitance. Haettu osoitteesta <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/digital-multimeters/how-to-measure-capacitance>
- 9 Schering Bridge Measurement of Capacitance using Schering Bridge. Haettu osoitteesta <https://www.electrical4u.com/schering-bridge-measurement-of-capacitance-using-schering-bridge/>
- 10 Eskonen Tommi. Suurjännitekaapelin kapasitanssin mittaus. Tampereen Ammattikorkeakoulu; 2014
- 11 Smolik W, Kryszyn J, Olszewski T, Szabatin R. Methods of small capacitance measurement in electrical capacitance tomography. Warsaw University of Technology; 2017

- 12 Wang T, Erhman B. Compensate Transimpedance Amplifiers Intuitively. Dallas, TX, USA: Texas Instruments; 2015
- 13 Transimpedance Amplifier - Current to Voltage Converter. Haettu osoitteesta <https://circuitdigest.com/tutorial/transimpedance-amplifier-design-working-and-applications>
- 14 Miten tulkita oikein mittalaitteiden suorituskykyä ja teknisiä tietoja. Haettu osoitteesta <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Understanding-Accuracy-Specifications-Technical-note.pdf>



NOTE: Actual component values may differ from those indicated in the schematic. See parts list for exact values.

Name		Date		Appr		Date		Appr	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Scale		Scale		Scale		Scale		Scale	
1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
Customer		Customer		Customer		Customer		Customer	
Optimätyö		Optimätyö		Optimätyö		Optimätyö		Optimätyö	
AD630		AD630		AD630		AD630		AD630	
Title		Title		Title		Title		Title	
Capacitive Measuring Circuit		Capacitive Measuring Circuit		Capacitive Measuring Circuit		Capacitive Measuring Circuit		Capacitive Measuring Circuit	
Rev. No		Rev. No		Rev. No		Rev. No		Rev. No	
000		000		000		000		000	
Sheet		Sheet		Sheet		Sheet		Sheet	
of 2		of 2		of 2		of 2		of 2	