

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Elektroniikkasuunnittelu

2017

Jukka Vuoti

# FOTODIODIVAHVISTIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikan koulutusohjelma | Elektroniikkasuunnittelu

2017 | 27

Ohjaajat: Lehtori Henry Gylen ja TKT Pasi Manninen

Jukka Vuoti

## FOTODIODIVAHVISTIMEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Valonmittaukseen ja optikkaan erikoistunut yritys SSL Resource Oy tarvitsi uuden laitteen valonmittauksia varten. Yritys päätti valmistaa oman mittalaitteensa ja tämä opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona kyseiselle yritykselle. Tarkoituksena oli täten suunnitella ja toteuttaa fotodiodivahvistin. Tavoitteena oli laite, joka pystyy mittaamaan valovoimakkuutta 1 mlx – 100 klx alueella. Vahvistimen taajuuskaistan tuli olla noin 1 kHz.

Vahvistimessa käytettiin useita erisuuruisia vahvistuksia, ja jokaisesta tehtiin simulaatiot. Simulaatioiden perusteella toteutettiin prototyyppi. Prototyypin toimintaa mitattiin vertaamalla sitä aiemmin yrityksen käytössä olleeseen kalibroituun mittalaitteeseen. Prototyypin pohjalta valmistettiin lopullinen vahvistin.

Valmis vahvistin täytti vaatimukset osittain. Vaadittu 1 kHz taajuuskaista saavutettiin jokaisella vahvistusasteella. Valovoimakkuuden mittausalueeksi saatiin 1 mlx – 60 klx. Saavutettu mittausalue todettiin riittäväksi ja päätettiin hyväksyä.

ASIASANAT:

Fotodiodi, fotodiodivahvistin, valonmittaus, fotometri

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronic design

2017 | 27

Instructors: Senior lecturer Henry Gylen and D.Sc.(Tech.) Pasi Manninen

Jukka Vuoti

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PHOTODIODE AMPLIFIER

SSL Resource Ltd. is a company specialized in light measurement and optics. The company needed a new measurement device for their light measurement purposes. They decided to build their own device and this thesis was commissioned by the company in order to design and implement a photodiode amplifier. Objective was a device which could measure illuminances ranging from 1 mlx to 100 klx. Bandwidth of the amplifier should be around 1 kHz.

The amplifier was designed with several different gains and they were all simulated. Simulation results gave a basis for a prototype. The prototype amplifier's operation was verified by comparing it to a calibrated measuring device which the company was using at the time. The prototype provided a foundation for the final amplifier.

The final amplifier met assigned requirements partially. Required bandwidth of 1 kHz was accomplished by every gain. The photodiode amplifier could measure illuminances ranging from 1 mlx to 60 klx. This dynamic range was found to be sufficient and decided to be approved.

### KEYWORDS:

Photodiode, photodiode amplifier, light measurement, photometer

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2 FOTODIODIVAHVISTIN</b>	<b>7</b>
2.1 Fotodiodin toiminta	7
2.2 Fotodiodin sijaiskytkentä	8
2.3 Vahvistin	10
<b>3 SUUNNITTELU JA TOTEUTUS</b>	<b>13</b>
3.1 Kytkenäkaavio	13
3.2 Komponenttien arvojen määrittäminen	14
3.3 Simulaatiot	15
3.4 Vahvistimen toiminta ja lopullinen fotodiodivahvistin	24
<b>4 YHTEENVETO</b>	<b>26</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>27</b>

## KUVAT

Kuva 1. Fotodiodin sijaiskytkentä. [1]	8
Kuva 2. Yksinkertaistettu kytkentä sekä fotodiodin ominaiskäyrä. [1]	10
Kuva 3. Texas Instrumentsin transimpedanssivahvistin sekä fotodiodin sijaiskytkentä. [2]	11
Kuva 4. Texas Instrumentsin kohinavahvistus Bode-käyrä vasemmalla ja useita takaisinkytkentävasteita risteää avoimen silmukan vahvistuskäyrän kanssa. [2]	12
Kuva 5. Fotodiodivahvistimen kytkentäkaavio.	13
Kuva 6. Simulaatioissa käytetty kytkentä.	15
Kuva 7. $R_F = 39 \Omega$ , $C_F = 2,7 \text{ nF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	16
Kuva 8. $R_F = 39 \Omega$ , $C_F = 2,7 \text{ nF}$ , $V_{\text{out}} = 1,8 \text{ V}$ .	16
Kuva 9. $R_F = 39 \Omega$ , $C_F = 2,7 \text{ nF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	17
Kuva 10. $R_F = 39 \Omega$ , $C_F = 2,7 \text{ nF}$ , $V_{\text{out}} = 1,8 \text{ V}$ .	18
Kuva 11. $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 150 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	18
Kuva 12. $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 150 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 3 \text{ V}$ .	19
Kuva 13. $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 150 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	19
Kuva 14. $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 150 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 3 \text{ V}$ .	20
Kuva 15. $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 15 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	20
Kuva 16. $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 15 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 3 \text{ V}$ .	21
Kuva 17. $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 15 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	21
Kuva 18. $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ , $C_F = 15 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 3 \text{ V}$ .	22
Kuva 19. $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ , $C_F = 1,5 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	22

Kuva 20. $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ , $C_F = 1,5 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 3 \text{ V}$ .	23
Kuva 21. $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ , $C_F = 1,5 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 30 \text{ mV}$ .	23
Kuva 22. $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ , $C_F = 1,5 \text{ pF}$ , $V_{\text{out}} = 3 \text{ V}$ .	24
Kuva 23. Fotodiodin alumiinipidike.	25
Kuva 24. Valmis mittari.	25

## TAULUKOT

Taulukko 1. Takaisinkytkentäkondensaattorin  $C_F$  komponenttiarvot eri vahvistuksilla. 15

# 1 JOHDANTO

Valaisinvalmistajat sekä -suunnittelijat tarvitsevat valonjakomittauksia valmistaessaan valaisimia. Mahdollisimman laadukkaiden valaisimien tuottamiseksi tarvitaan tietoa valaisimen valonjaon ominaisuuksista. Esimerkiksi valaistusvoimakkuuden tasaisuus on tärkeää, jotta valo jakautuu haluttuihin kohteisiin ilman hämääriä alueita. Tässä auttavat valonmittauksiin erikoistuneet yritykset, jotka omien mittalaitteidensa avulla pystyvät tarjoamaan tietoa valaisimien toiminnasta. Esimerkki tällaisesta mittalaitteesta on fotometri, joka mittaa mm. valonvoimakkuutta.

SSL Resource Oy on yritys, joka tarjoaa palveluita valonmittauksiin ja optiikkaan. Yritys tarvitsi uuden laitteen valonmittauksia varten. Yrityksellä oli jo käytössään monen eri yrityksen valmistamia fotometrejä, mutta näiden laitteiden käyttö aiheutti paljon kustannuksia ja niissä oli ominaisuudellisia puutteita. Tästä syystä yritys päätti valmistaa oman mittalaitteensa. Tämä opinnäytetyö toteutettiin toimeksiantona kyseiselle yritykselle. Opinnäytetyö keskittyy mittalaitteeseen tarvittavan vahvistimen suunnitteluun ja toteutukseen.

Tämän opinnäytetyön seuraava luku käsittelee valonmittaukseen vaadittavien komponenttien, eli fotodiodin ja sen sijaiskytkennän sekä vahvistimen teoriaa. Kolmannessa luvussa kuvataan fotodiodivahvistimen suunnitteluun liittyvät työvaiheet, eli kytkentäkaavion suunnittelu, komponenttiarvojen määrittäminen sekä näiden pohjalta tehdyt simulaatiot. Kolmannen luvun lopussa esitellään valmis fotodiodivahvistin ja kuvataan sen lopullista toimintaa.

## 2 FOTODIODIVAHVISTIN

Fotodiodi on puolijohde, joka muuttaa valon sähköiseen muotoon. Puolijohderajapinnat muuttavat valokvantin eli fotonin energian sähköiseksi signaaliksi vapauttamalla ja kiihdyttämällä virrankuljettajia puolijohdeessa. Kaikki puolijohderajapinnat toimivat tällä tavoin, ja tämä muodostaa fotodiodin perustan. Fotodiodi käyttäytyy siis samalla tavoin kuin tavallinen diodi sillä poikkeuksella, että se tuottaa sisäisen virran valon vaikutuksesta. [1]

Fotodiodi pystyy itsenäisesti tuottamaan jänniteulostulon. Tuotettu jännite on kuitenkin hyvin epälineaarinen sekä taajuudeltaan rajattu. Diodin toimintaa voidaan kuitenkin dramaattisesti tehostaa ottamalla ulostuleva signaali sähkövirtana jännitteen sijaan. Tämä virta voidaan myöhemmin muuttaa takaisin jännitteeksi virta-jännitemuuntimen avulla. Tällä tavoin diodi voidaan eristää signaalijännitteeltä ja saadaan aikaan yksinkertainen fotodiodivahvistin. [1]

### 2.1 Fotodiodin toiminta

Puolijohdemateriaaliin kohdistuva valo tuottaa sähkövirran vapauttamalla elektroni-aukopareja. Fotonit lisäävät puolijohde-atomien energiaa siirtäen nämä elektroni-aukoparit niiden sähköä johtaviin tiloihin. Tämän jälkeen nämä yksittäiset kuljettajat pystyvät mahdollisesti edesauttamaan virran kulkua. Suurimman osan sähkövirrasta tuottavat kuljettajat, jotka on vapautettu puolijohde-rajapinnan tyhjennysalueella. Tämä johtuu tyhjennysalueella olevasta sähkökentästä. Tyhjennysalue koostuu positiivisista ja negatiivisista ioneista, jotka ylläpitävät jännite-eroa rajapinnassa. Muodostunut sähkökenttä kiihdyttää kuljettajia rajapinnasta pois päin. Tämä kasvattaa kuljettajien johtavuutta sekä ehkäisee niiden yhdistymistä. Tyhjennysalueen kokoa voidaan kasvattaa estosuuntaisella biasoinnilla. Tyhjennysalueen ulkopuolella vapautuneet kuljettajat joko hajaantuvat puolijohdemateriaalissa kunnes päätyvät tyhjennysalueelle tai yhdistyvät. Tyhjennysalueelle päätyneet kuljettajat kokevat sähkökentän aiheuttaman kiihtymisen kohti diodin terminaleja. [1]

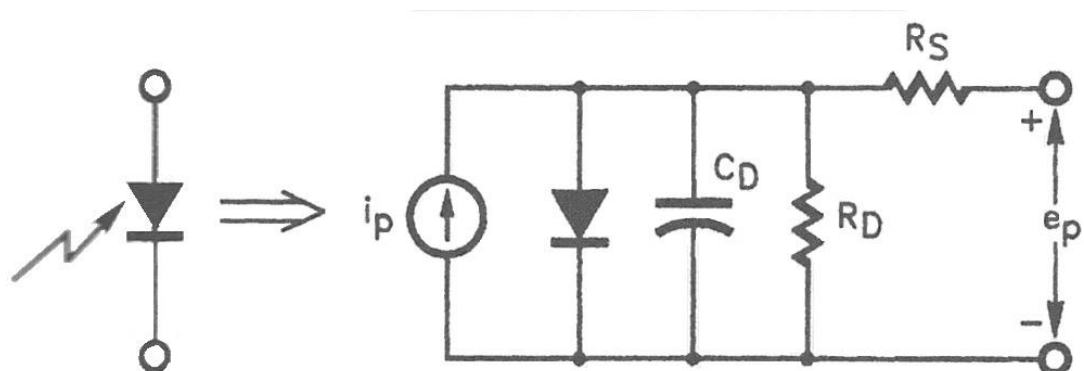
Fotodiodin rakenteella on suuri merkitys diodin toiminnan tehokkuudessa. Puolijohdemateriaalin kevyellä seostamisella voidaan kasvattaa tyhjennysaluetta. Seostamisella

tarkoitetaan epäpuhtauksien lisäämistä. Tämä kasvattaa atomien määrää puolijohdemateriaalissa, joilla on mahdollisesti vapaita elektroneja tai aukkoja johtavuusvyön läheisyydessä. Tällä korkean energiatason johtavuusvyöllä atomit ionisoituvat helpommin, ja ionisoituneena ne tukevat tyhjennysaluetta. [1]

Rajapinnan syvyys ja koko vaikuttavat tyhjennysalueen sijaintiin sekä aallonpituuksiin, jotka tuottavat diodissa tehokkaan vasteen. Fotonit tuottavat varauksenkuljettajia eri syvyyksillä niiden aallonpituuden mukaan. Matalilla rajapinnoilla pystytään tehokkaasti muuntamaan lyhyet aallonpituudet, mutta suuremmat aallonpituudet vaativat aina vain paksumpia tyhjennysalueita. [1]

## 2.2 Fotodiodin sijaiskytkentä

Kuvassa 1 on esitettyä fotodiodin sijaiskytkentä. Sijaiskytkentä koostuu erillisistä komponenteista, joiden avulla voidaan analysoida fotodiodin toimintaa eri sovelluksissa. Kytkennässä fotodiodi on korvattu virtalähteellä, ja sen yhteyteen on lisätty parasiittisia komponentteja. Virtalähde  $i_p$  kuvaa fotodiodin signaalia ja diodi jänniteolosuhteita myötäsuuntaan biasoidussa tilassa. Vastus  $R_D$  kuvaa fotodiodin pimeäresistanssia. Pimeäresistanssi tarkoittaa jännitebiasoimattoman diodin resistanssia. Monissa sovelluksissa tämä suuri resistanssi voidaan jättää huomioimatta sen vähäisen vaikutuksen vuoksi. Usein huomioimatta voidaan jättää myös erittäin pieni vastus  $R_S$ , joka kuvaa puolijohdemateriaalin aiheuttamaa resistanssia. Hajakapasitanssilla  $C_D$  on kuitenkin todella suuri vaikutus useimmissa fotodiodisovelluksissa, sillä se vaikuttaa signaalin stabiiliuteen, taajuuskaistaan sekä kohinaan. [1]



Kuva 1. Fotodiodin sijaiskytkentä. [1]

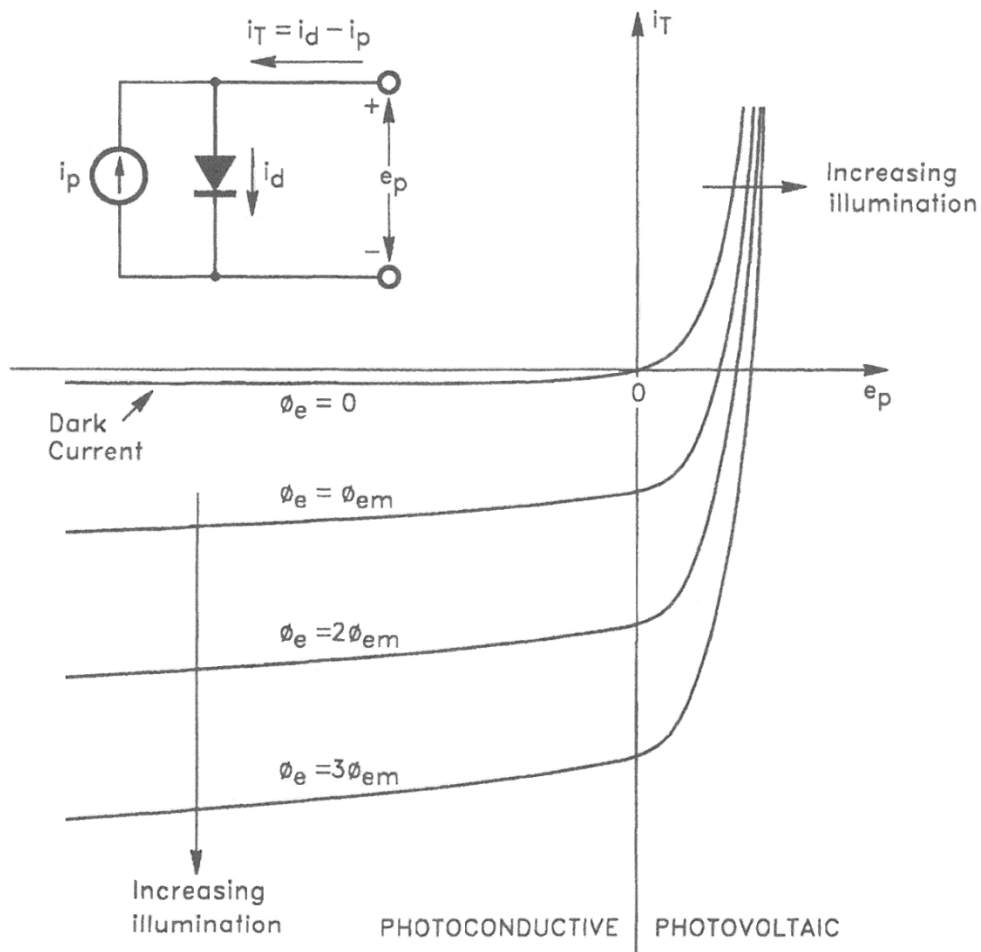


$C_D$  kuvaa fotodiodiin varastoituneen varauksen toimintaa. Kapasitanssi vaihtelee fotodiodin aktiivisen alueen koon, sekä diodin yli olevan jännitteen mukaan. Mitä suurempi aktiivisen alueen koko on, sitä suuremmaksi kasvaa puolijohteen rajapinnan tilavuus ja varaus. Täten kasvaa myös hajakapasitanssi  $C_D$ . Diodin estosuuntaisella jännitebiasoinilla puolijohteen rajapinnan tyhjennysalueen koko suurenee. Näin ollen kondensaattorin napojen efektiivinen etäisyys kasvaa ja kapasitanssi pienenee, mitä kuvaa kaava:

$$C_D = \frac{C_{D0}}{\sqrt{1+V_R/\phi_B}} \quad (1)$$

$C_{D0}$  on fotodiodin kapasitanssi ilman jännitebiasointia, ja  $\phi_B$  on puolijohteen rajapinnan sisäänrakennettu jännite. Diodin estosuuntaisen biasointijännitteen  $V_R$ :n ja rajapinnan sisäänrakennetun jännitteen suhteesta johtuen voidaan diodin kapasitanssia laskea sen alkuperäisestä  $C_{D0}$ -arvosta estosuuntaista jännitettä kasvattamalla. [1]

Signaalidiodin ominaiskäyrä saadaan aikaan pyyhkäisemällä jännitettä komponentin yli ja mittaamalla sen läpi kulkeva virta. Fotodiodin ominaiskäyrä on samanlainen, sillä erolla, että se lisää yhden muuttujan sisäisesti tuotetun virran ansiosta. Kuva 2 havainnollistaa tätä eroa. Yksinkertaistetussa kytkennässä kuvassa 2 on vain kuvan 1 (kts. yllä) diodi ja virtalähde, sillä muut komponentit eivät tuota merkityksellistä vaikutusta ominaiskäyrään. Testijännite  $e_p$  tuottaa virran  $i_T = i_d - i_p$ . Diodin läpi kulkeva virta  $i_d$  erottaa mitatun virran  $i_T$ :n fotodiodin tuottamasta virrasta  $i_p$ . [1]



Kuva 2. Yksinkertaistettu kytkentä sekä fotodiodin ominaiskäyrä. [1]

### 2.3 Vahvistin

Kuvassa 3 on esitettyä Texas Instrumentsin transimpedanssivahvistin sekä fotodiodin sijaiskytkentä. Oikealla puolella oleva sijaiskytkentä eroaa vasemmanpuoleisesta transimpedanssivahvistimesta siten, että oikeanpuoleisessa kytkennässä fotodiodeja on korvattu ideaalisilla komponenteilla. Tässä mallissa fotodiodeja on asetettu operaatiovahvistimen sisääntulojen väliin. Tällä tavoin fotodiodin yli oleva jännite saadaan pidettyä lähellä 0 V:a. Tämä on hyvin tärkeää, sillä jännite aiheuttaa fotodiodin tuottamaan virtaan epälinearisuutta. [1]



Kuva 3. Texas Instrumentsin transimpedanssivahvistin sekä fotodiodin sijaiskytkentä. [2]

Vahvistimen stabiiliuden määrittää kohinasignaali, sillä pienikin kohinasignaali voi johtaa epävakaaan vahvistimen oskilloimaan. Kuvassa 3 oikeanpuolisen vahvistimen siirtofunktio on:

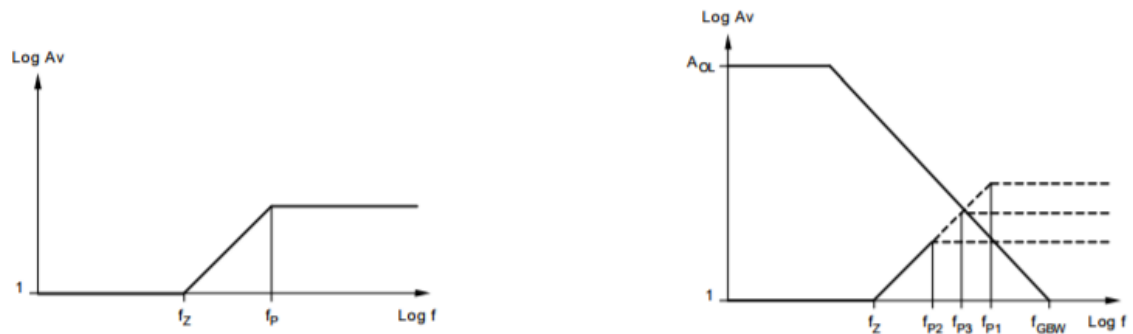
$$A_{CL}(f) = \frac{R_F + R_D}{R_D} * \frac{1 + j2\pi f \left( \frac{R_F R_D}{R_F + R_D} \right) (C_F + C_D)}{1 + j2\pi f R_F C_F} \quad (2)$$

Tämä voidaan vielä yksinkertaistaa muotoon:

$$A_{CL}(f) = \frac{R_F + R_D}{R_D} * \frac{1 + j \frac{f}{f_z}}{1 + j \frac{f}{f_p}} \quad (3)$$

Vastus  $R_D$  kuvaa diodin rinnakkaisresistanssia ja  $C_D$  sen rinnakkaiskapasitanssia.  $C_D$ :n kapasitanssiarvossa on huomioitu operaatiovahvistimen sisääntulojen yhteismuotoinen kapasitanssi  $C_{cm}$  sekä differentiaalinen kapasitanssi  $C_{diff}$ . Takaisinkytkentävästus yhdessä diodin rinnakkaisresistanssin  $R_D$  kanssa muodostavat kytkennän DC-vahvistuksen. Siirtofunktion nollataajuuden  $f_z$  muodostavat kapasitanssien  $C_D$  ja  $C_F$  summa sekä vastuksien  $R_D$  ja  $R_F$  rinnankytkentä. Siirtofunktion napataajuuden määrittää vahvistimen takaisinkytkentä. [2]

Kuvan 4 vasemman puoleisessa kuvaajassa on esitettyä nolla- ja napataajuuksien vaikutus kohinavahvistukseen. Oikean puolisessa kuvaajassa on esitettyä kolme eri takaisinkytkentäsilmukan aiheuttamaa napataajuutta, jotka risteävät vahvistimen avoimen silmukan vahvistuskäyrän kanssa. Kuvassa napataajuus  $f_{p1}$  on liian suuri, jolloin se ohittaa avoimen silmukan vahvistuskäyrän 90°:n vaihe-erolla. Tämä johtaa oskillointiin. Napataajuus  $f_{p2}$  sen sijaan sijaitsee vahvistuskäyrän sisällä ja on ehdottomasti stabiili. Stabiiliutta kasvatetaan kuitenkin transimpedanssivahvistimen kaistanleveyden kustannuksella. Optimaalinen napataajuus  $f_{p2}$  sijaitsee operaatiovahvistimen avoimen silmukan vahvistuskäyrällä. [2]



Kuva 4. Texas Instrumetsin kohinavahvistus Bode-käyrä vasemmalla ja useita takaisinkytkentävasteita risteää avoimen silmukan vahvistuskäyrän kanssa. [2]

Koska takaisinkytkentäsilmutta määrittää napataajuuden  $f_p$ , tarvitsee enää määrittää vain takaisinkytkentäkapasitanssin  $C_F$ -arvo. Tätä määrittämistä voidaan yksinkertaistaa sillä huomiolla, että kohinavahvistuksen korkean taajuuden asymptootti määritellään vain kapasitanssiarvoilla:

$$A_{CL}(f \gg f_p) = \frac{C_D + C_F}{C_F} \quad (4)$$

Tämän tulee olla yhtä suuri kuin operaatiovahvistimen avoimen silmukan vahvistus taajuudella  $f_p$ . Avoimen silmukan vahvistus saadaan jakamalla vahvistimen GBW eli gain bandwidth product (vahvistuksen ja kaistanleveyden tulo)  $f_p$ :llä. Yhdistämällä nämä kaksi kaavaa saadaan:

$$\frac{GBW}{f_p} = \frac{C_D + C_F}{C_F} \quad (5)$$

Yksinkertaisella sijoittelulla saadaan aikaan neliöllinen yhtälö jonka ainut reaalinen, positiivinen arvo on:

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBW} \left[ 1 + \sqrt{(1 + 8\pi R_F C_D GBW)} \right] \quad (6)$$

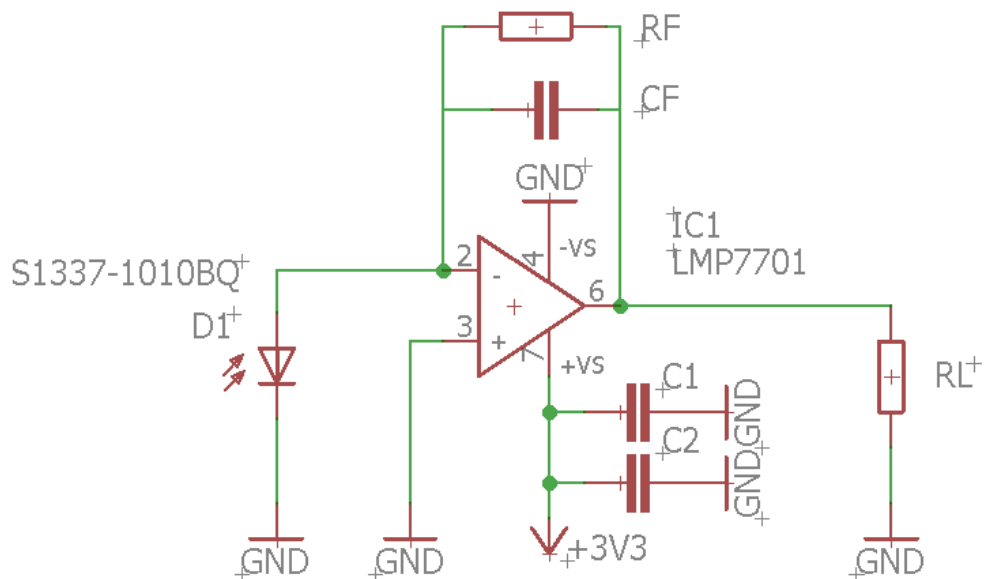
### 3 SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Tämä luku keskittyy esittelemään fotodiodivahvistimen suunnittelun vaiheita ja sen lopullista toteutusta. Aluksi kuvataan suunnittelussa käytetty kytkentäkaavio sekä esitellään määritellyt komponenttiarvot. Sen jälkeen keskitytään simulaatioihin ja kappaleen lopussa esitellään valmis fotodiodivahvistin.

#### 3.1 Kytkentäkaavio

Työ aloitettiin suunnittelemalla kytkentäkaavio. Kaavion suunnittelun pohjana käytettiin Texas Instrumentsin tarjoamaa transimpedanssivahvistinmallia, joka esiteltiin luvussa 2.3 kuvassa 3.

Suunnittelutyössä käytettiin lisensoitua EAGLE 5.11 -piirilevynsuunnitteluohjelmaa, jolla tehtiin kytkentäkaavio (kuva 5).



Kuva 5. Fotodiodivahvistimen kytkentäkaavio.

Fotodiodiksi valittiin Hamamatsu S1337-1010BQ. Tavoitteena oli, että valmiilla laitteella pystyisi mittaamaan pieniäkin valotasoja. Tämän takia diodin tuli olla mahdollisimman suuri. Kyseisen diodin aktiivisen alueen koko oli 10 mm x 10 mm ja herkkyys 0,5 AW, joten se soveltui tarkoitukseen hyvin. [3]

Toinen pääkomponentti on operaatiovahvistin. Fotodiodivahvistimen toiminnan kannalta oli tärkeää, että operaatiovahvistimeen kulkevat vuotovirrat olisivat mahdollisimman pieniä. Tästä syystä valittiin Texas Instrumentsin tarkkuusoperaatiovahvistin LMP7701. Komponentin tuloapojen bias-virta on vähemmän kuin  $\pm 1$  pA ja offset-jännite vähemmän kuin  $\pm 200$   $\mu$ V. [4]

### 3.2 Komponenttien määrittäminen

Tavoitteena oli pystyä mittaamaan 1 mx – 100 kx valaistusvoimakkuuksia. Koska vaadittu dynaaminen alue oli näin suuri, jouduttiin operaatiovahvistimen takaisinkytkennässä käyttämään erisuuruisia vastuksia  $R_F$ . Näitä eri vahvistusasteita ohjattaisiin kytkimillä. Kytkimiksi valittiin Maxim Integratedin MAX4635 todella pienen vuotovirran vuoksi. Myös On-resistanssi sekä On-kapasitanssi olivat niin pieniä, että niiden vaikutus vahvistimen toimintaan oli merkityksetön. [5]

S1337-1010BQ -fotodiodin datalehdessä [3] kerrottiin diodin tuottavan 78  $\mu$ A oikosulkuvirran 100 lx valaistusvoimakkuudessa. Operaatiovahvistimen maksimi ulostulojännite oli 3,00 V, joten vahvistimen haluttiin saavuttavan 3,00 V kyseisessä valaistusvoimakkuudessa. Täten pienimmän vahvistusasteen takaisinkytkentävastuksen  $R_{F0}$  arvoksi saatiin:

$$R_{F0} = \frac{3,0 \text{ V}}{\frac{78 \mu\text{A}}{100 \text{ lx}} * 100000 \text{ lx}} \approx 39 \Omega \quad (7)$$

Operaatiovahvistimen pienimmäksi ulostulojännitteeksi haluttiin 0,03 V, joten suurimman vahvistusasteen vastuksen  $R_{F3}$  arvoksi saatiin:

$$R_{F3} = \frac{0,03 \text{ V}}{\frac{78 \mu\text{A}}{100 \text{ lx}} * 0,001 \text{ lx}} \approx 39 \text{ M}\Omega \quad (8)$$

Vahvistimen lineaarisuuden vuoksi voitiin edellä mainittujen vastusarvojen väliltä valita kaksi muuta vahvistusta kahden dekadin välein. Tämän perusteella siis  $R_{F1} = 3,9$  k $\Omega$  ja  $R_{F2} = 390$  k $\Omega$ . Takaisinkytkentävastuksien rinnalle oli kytkettävä jokaiseen erisuuruisen kondensaattori  $C_F$ , jotta vahvistin olisi stabiili. Taulukossa 1 on esitetty nämä kapasitanssiarvot laskettuna luvussa 2.3 esitettyllä kaavalla:

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBW} \left[ 1 + \sqrt{(1 + 8\pi R_F C_D GBW)} \right] \quad (6)$$

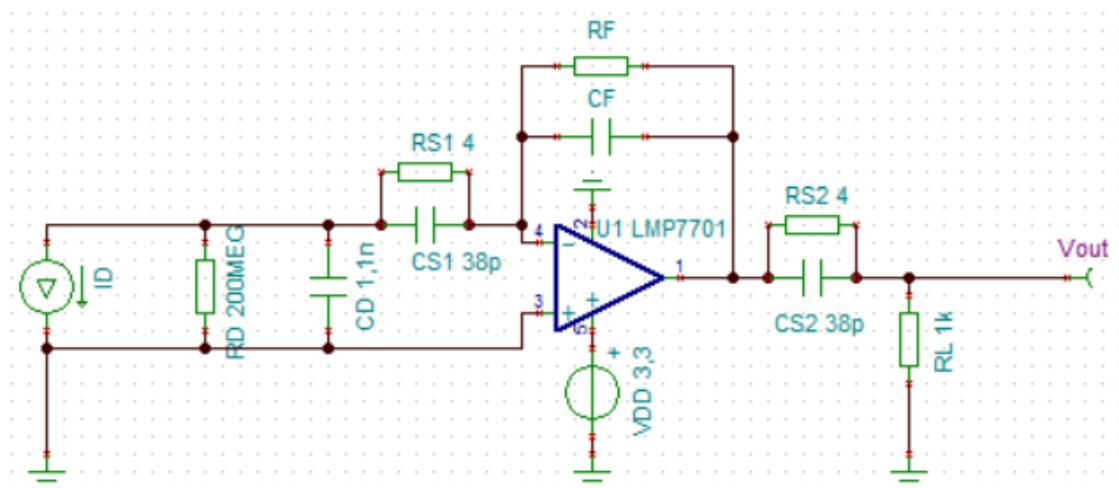
Taulukko 1. Takaisinkytkentäkondensaattorin  $C_F$  komponenttiarvot eri vahvistuksilla.

$R_F$	$C_F$	Toleranssi 5%	Komponentin arvo
39 $\Omega$	2390 pF	2510 pF	2700 pF
3,9 k $\Omega$	143 pF	150 pF	150 pF
390 k $\Omega$	13,5 pF	14,2 pF	15 pF
39 M $\Omega$	1,35 pF	1,41 pF	1,50 pF

Lopullisia komponenttiarvoja pyöristettiin ylöspäin, jotta vahvistin pysyisi ehdottomasti stabiilina.

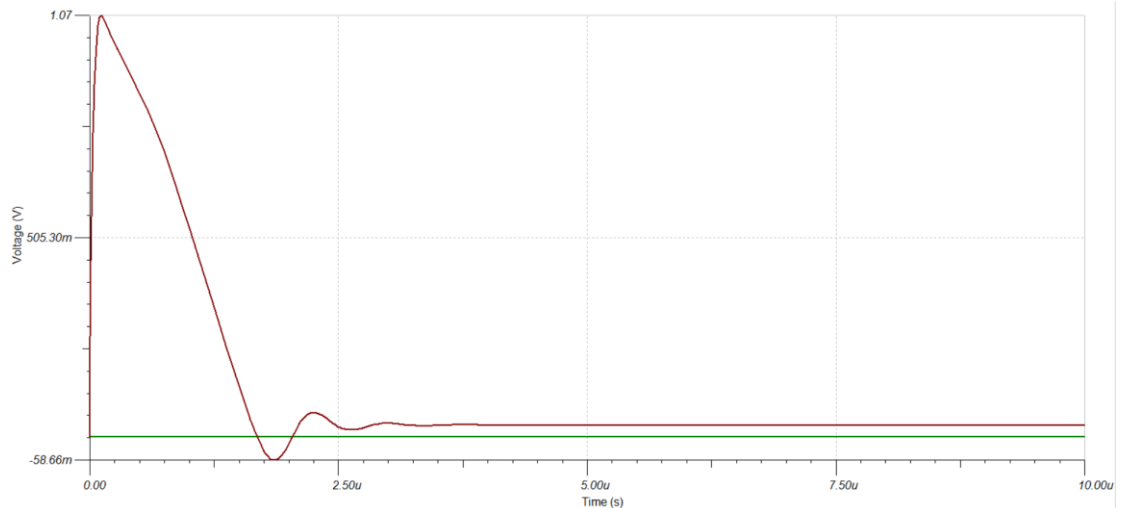
### 3.3 Simulaatiot

Simulaatiot suoritettiin käyttämällä Texas Instrumentsin TINA-TI simulaatio-ohjelmaa. Simulaatioissa käytetty kytkentä on esitetty kuvassa 6. Kytkenässä komponentit  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$ ,  $C_{S1}$ , ja  $C_{S2}$  kuvaavat kytkimiä. Jokaisesta vahvistuksesta tehtiin kaksi DC- ja kaksi AC-simulaatiota eli yhteensä 16 eri simulaatiota. Simulaatioissa muutettiin operaatiovahvistimen takaisinkytkentäkomponenttien  $R_F$ - ja  $C_F$ -arvoja. Käytetyt komponenttiarvot määritettiin luvussa 3.2. Jokaisessa simulaatioissa käyrä kuvaa kytkennän ulostulojännitettä  $V_{out}$ .



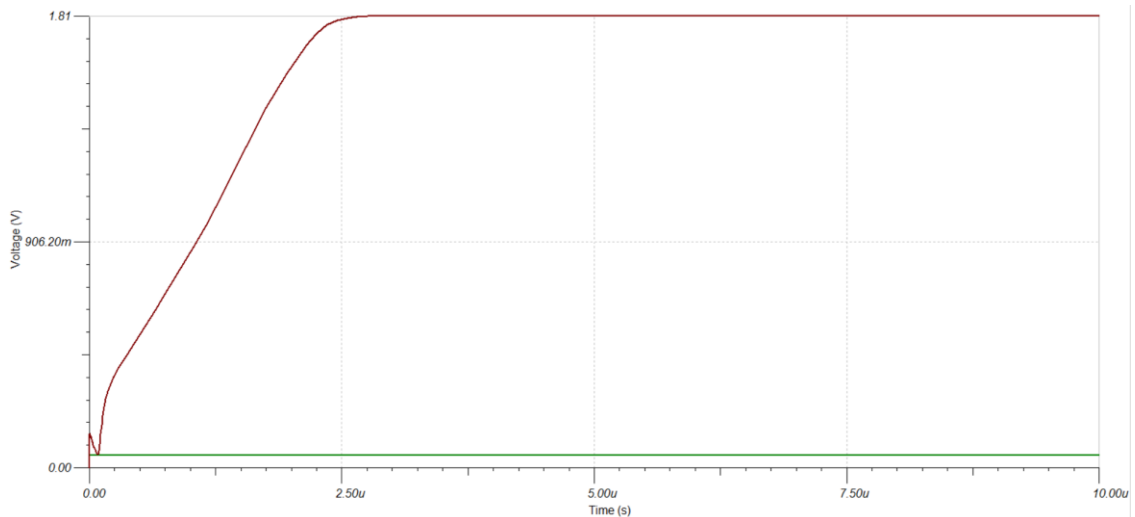
Kuva 6. Simulaatioissa käytetty kytkentä.

Kuvan 7 simulaatio on transienttiansalyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $770 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $30 \text{ mV}$ :a. Ulostulojännite on stabiili  $6 \mu\text{s}$  jälkeen.



Kuva 7.  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

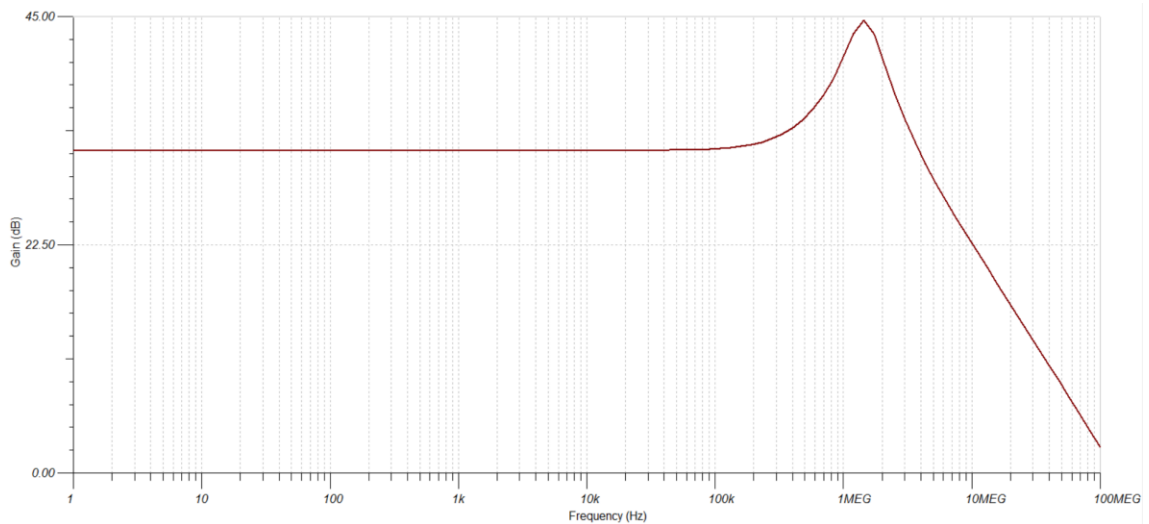
Kuvan 8 simulaatio on transienttiansalyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $49 \text{ mV}$ , koska tätä suuremmilla virroilla ulostulojännite ei enää kasvanut. Ulostulojännitteen arvo kyseisellä virralla on noin  $1,8 \text{ V}$ . Ulostulojännite on stabiili  $3 \mu\text{s}$  jälkeen.



Kuva 8.  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ ,  $V_{out} = 1,8 \text{ V}$ .

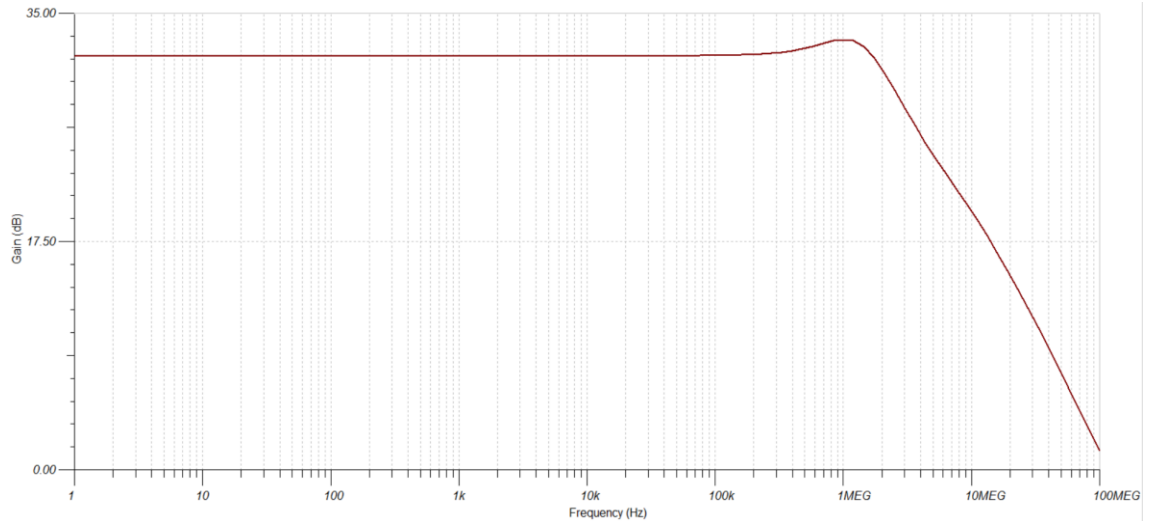


Kuvan 9 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $770 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $30 \text{ mV}$ :a. Vahvistus pysyy tasaisena  $28,4 \text{ kHz}$  taajuuteen asti, jonka jälkeen vahvistus alkaa nousta jyrkästi. Maksimivahvistus saavutetaan  $1,5 \text{ MHz}$  taajuudella. Tasaisen taajuusalueen vahvistus on  $31,8 \text{ dB}$  ja piikin maksimi on  $44,6 \text{ dB}$ . Taajuuskaista on  $5,1 \text{ MHz}$ .



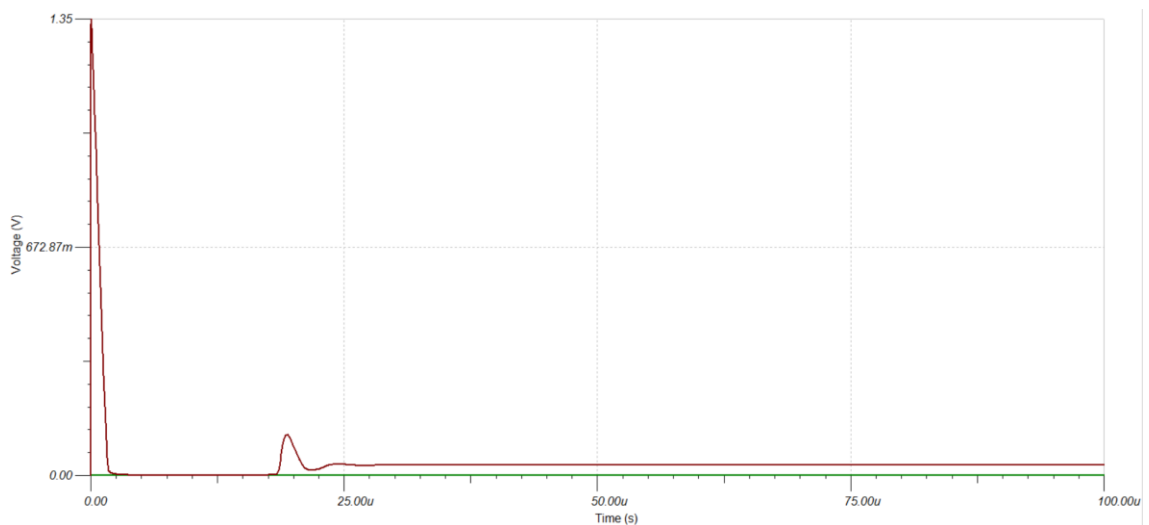
Kuva 9.  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

Kuvan 10 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $49 \text{ mA}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $1,8 \text{ V}$ :a. Edellisessä simulaatiossa nähty piikki on vaimentunut huomattavasti korkeammalla jännitteellä. Vahvistus pysyy tasaisena  $56,1 \text{ kHz}$  taajuuteen asti. Maksimivahvistus saavutetaan  $1,0 \text{ MHz}$  taajuudella. Tasaisen taajuusalueen vahvistus on  $31,7 \text{ dB}$  ja maksimivahvistus on  $33,0 \text{ dB}$ . Taajuuskaista on  $2,6 \text{ MHz}$ .



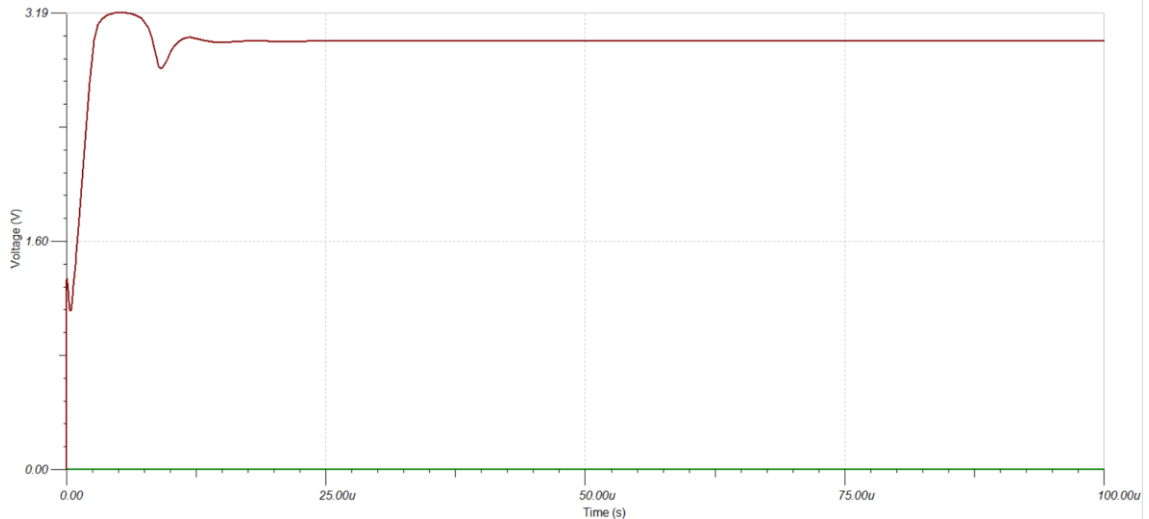
Kuva 10.  $R_F = 39 \Omega$ ,  $C_F = 2,7 \text{ nF}$ ,  $V_{out} = 1,8 \text{ V}$ .

Kuvan 11 simulaatio on transienttialyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $7,7 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $30 \text{ mV}$ :a. Ulostulojännite on stabiili  $40 \mu\text{s}$  jälkeen.



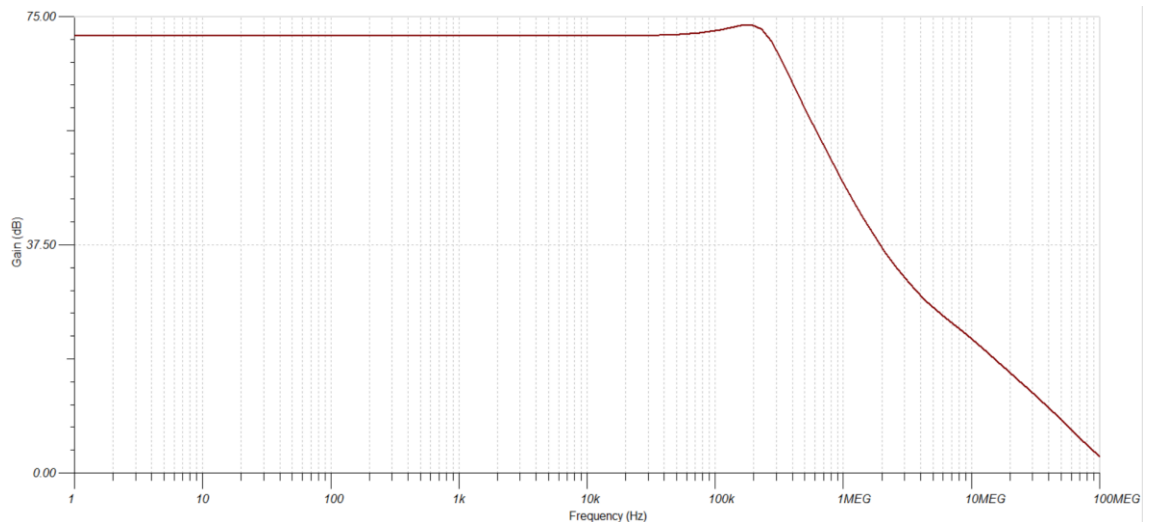
Kuva 11.  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

Kuvan 12 simulaatio on transienttialyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $770 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $3 \text{ V}$ :a. Ulostulojännite on stabiili  $25 \mu\text{s}$  jälkeen.



Kuva 12.  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 3 \text{ V}$ .

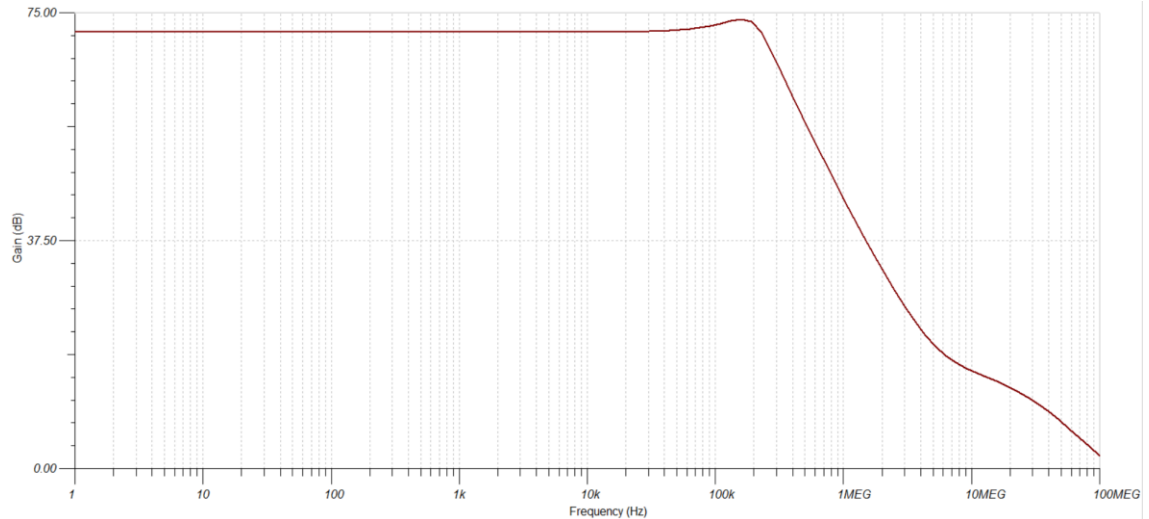
Kuvan 13 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $7,7 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $30 \text{ mV}$ :a. Vahvistus pysyy tasaisena  $12,0 \text{ kHz}$  taajuuteen asti, jonka jälkeen vahvistus alkaa vähitellen kasvaa. Maksimivahvistus saavutetaan taajuudella  $190 \text{ kHz}$ . Tasaisen taajuusalueen vahvistus on  $71,8 \text{ dB}$  ja piikin maksimi on  $73,7 \text{ dB}$ . Taajuuskaista on  $310 \text{ kHz}$ .



Kuva 13.  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

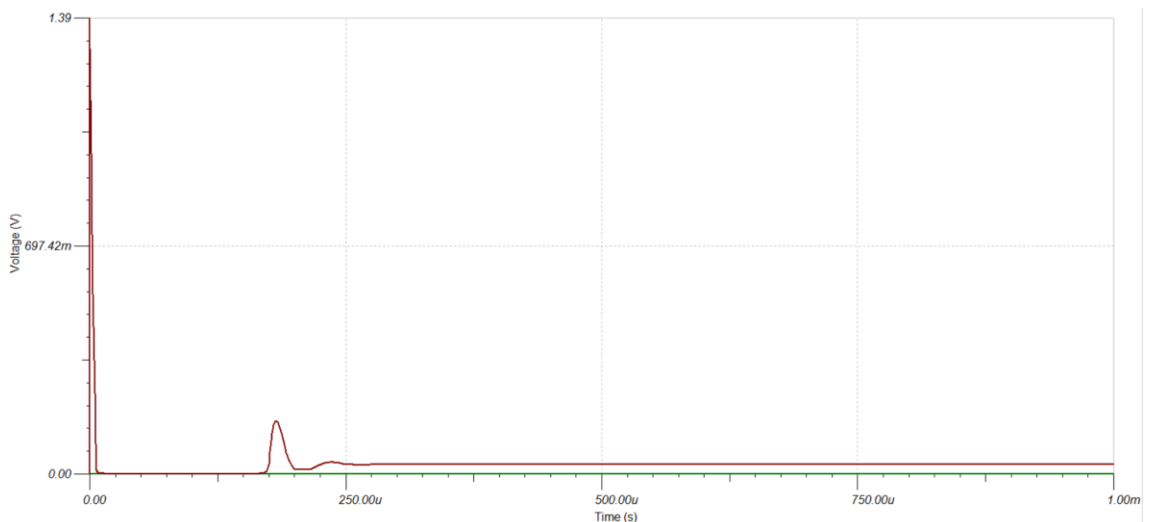
Kuvan 14 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $770 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $3 \text{ V}$ :a. Vahvistus pysyy tasaisena  $10,0 \text{ kHz}$

taajuuteen asti, jonka jälkeen vahvistus alkaa vähitellen kasvaa. Maksimivahvistus saavutetaan taajuudella 160 kHz. Tasaisen taajuusalueen vahvistus on 71,8 dB ja piikin maksimi on 74,0 dB. Taajuuskaista on 270 kHz.



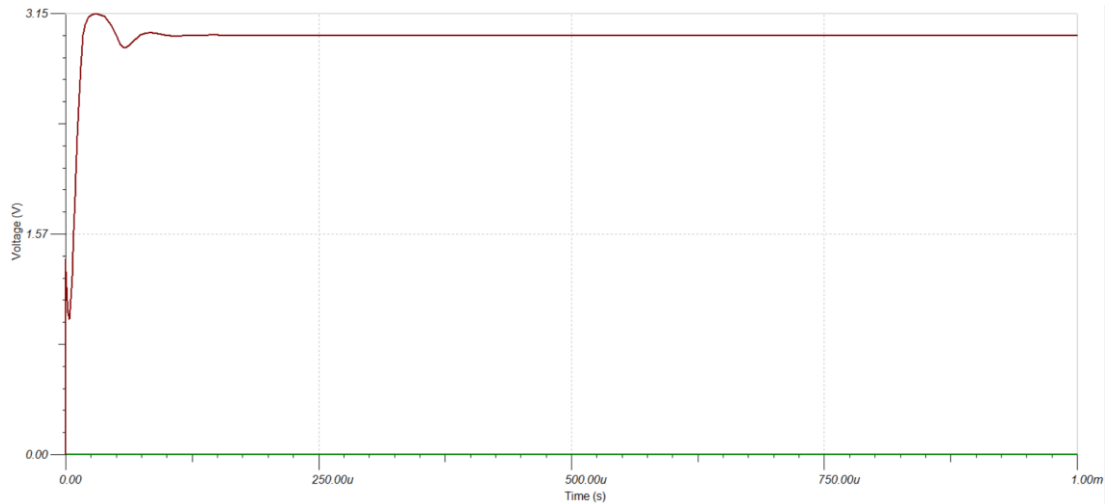
Kuva 14.  $R_F = 3,9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 150 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 3 \text{ V}$ .

Kuvan 15 simulaatio on transientianalyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin 77 nA, jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle 30 mV:a. Ulostulojännite on stabiili 350  $\mu\text{s}$  jälkeen.



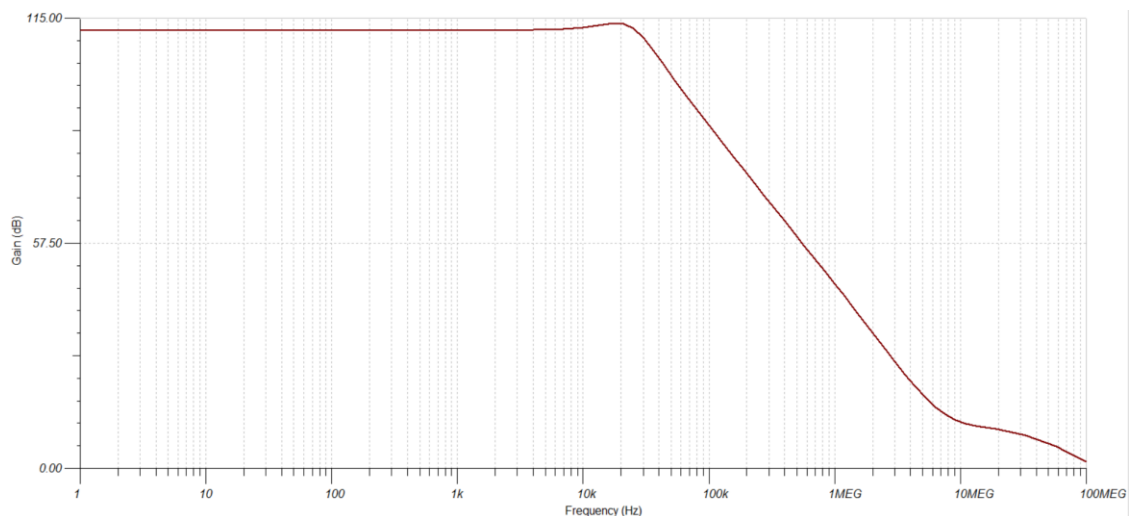
Kuva 15.  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

Kuvan 16 simulaatio on transienttiansalyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $7,7 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $3 \text{ V}$ :a. Ulostulojännite on stabiili  $150 \mu\text{s}$  jälkeen.



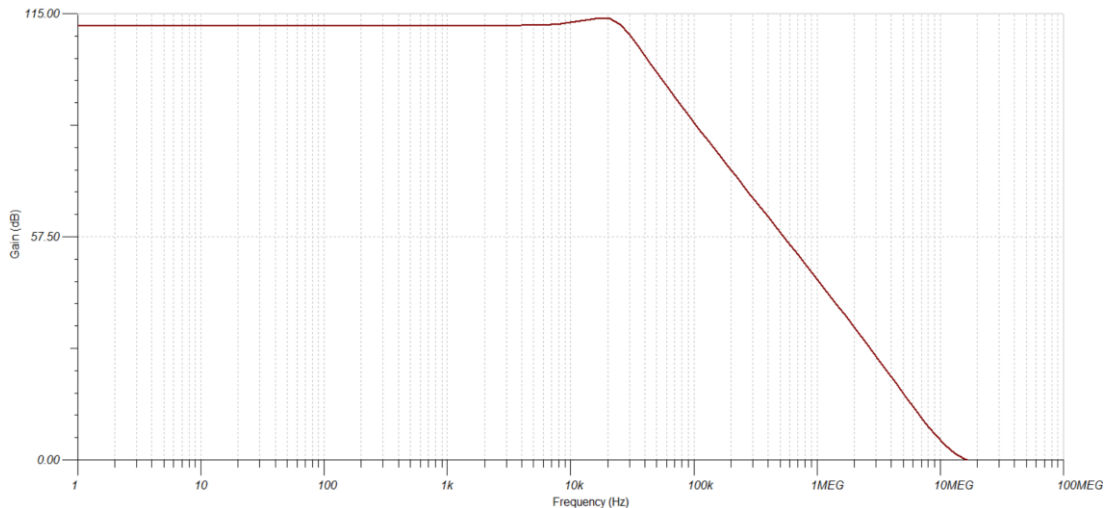
Kuva 16.  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 3 \text{ V}$ .

Kuvan 17 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $77 \text{ nA}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $30 \text{ mV}$ :a. Vahvistus pysyy tasaisena  $3,6 \text{ kHz}$  taajuuteen asti, jonka jälkeen vahvistus alkaa vähitellen kasvaa. Maksimivahvistus saavutetaan taajuudella  $18,4 \text{ kHz}$ . Tasaisen taajuusalueen vahvistus on  $111,8 \text{ dB}$  ja piikin maksimi on  $113,6 \text{ dB}$ . Taajuuskaista on  $32,1 \text{ kHz}$ .



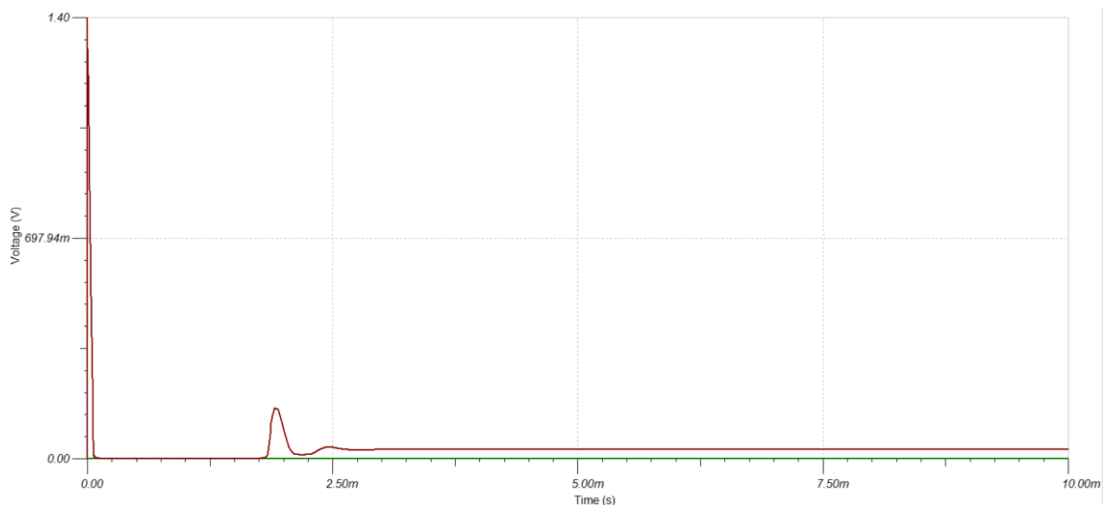
Kuva 17.  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

Kuvan 18 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $7,7 \mu\text{A}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $3 \text{ V}$ :a. Vahvistus pysyy tasaisena  $3,4 \text{ kHz}$  taajuuteen asti, jonka jälkeen vahvistus alkaa vähitellen kasvaa. Maksimivahvistus saavutetaan taajuudella  $17,5 \text{ kHz}$ . Tasaisen taajuusalueen vahvistus on  $111,8 \text{ dB}$  ja piikin maksimi on  $113,8 \text{ dB}$ . Taajuuskaista on  $31,5 \text{ kHz}$ .



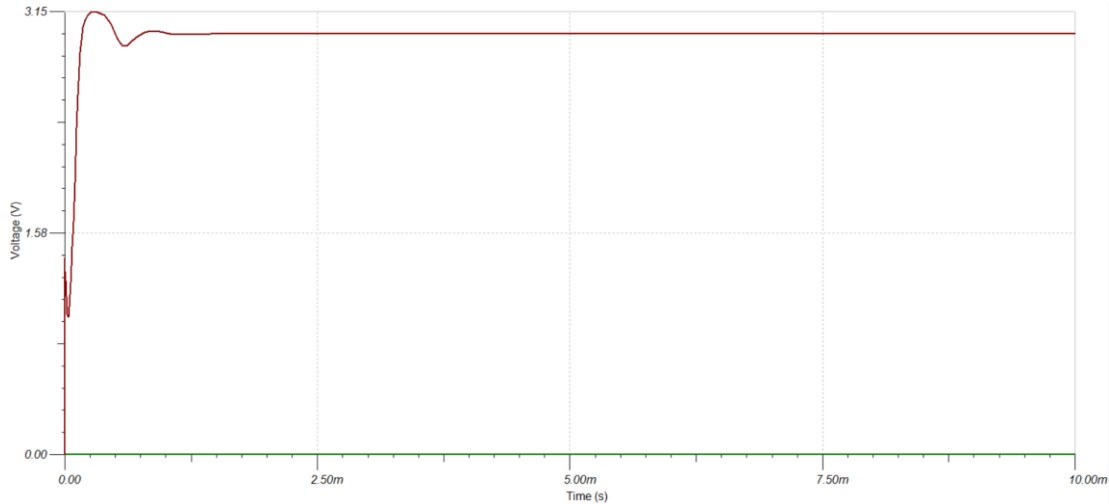
Kuva 18.  $R_F = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $C_F = 15 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 3 \text{ V}$ .

Kuvan 19 simulaatio on transientianalyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $770 \text{ pA}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $30 \text{ mV}$ :a. Ulostulojännite on stabiili  $4,2 \text{ ms}$  jälkeen.



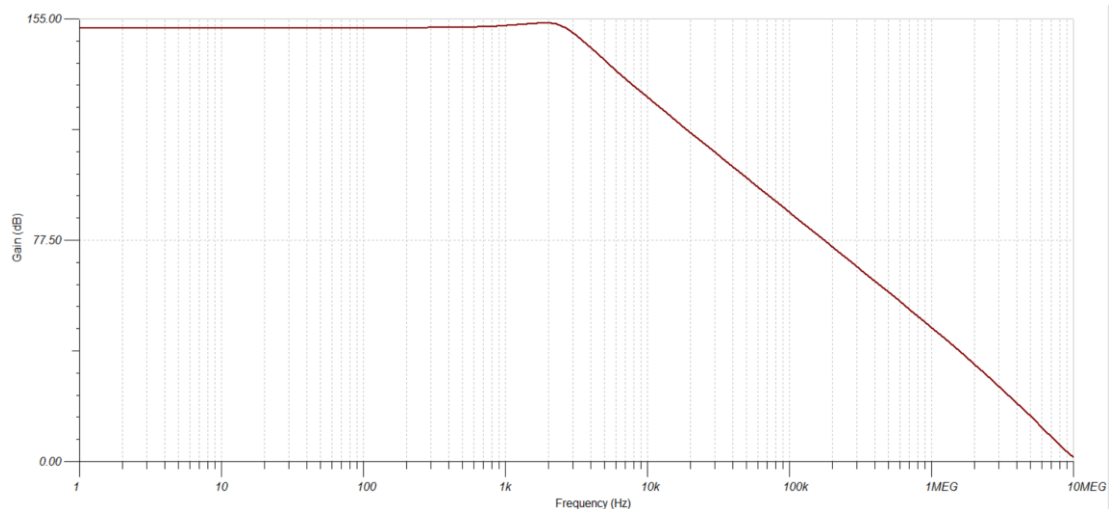
Kuva 19.  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

Kuvan 20 simulaatio on transienttiansalyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $77 \text{ nA}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $3 \text{ V}$ :a. Ulostulojännite on stabiili  $1,5 \text{ ms}$  jälkeen.



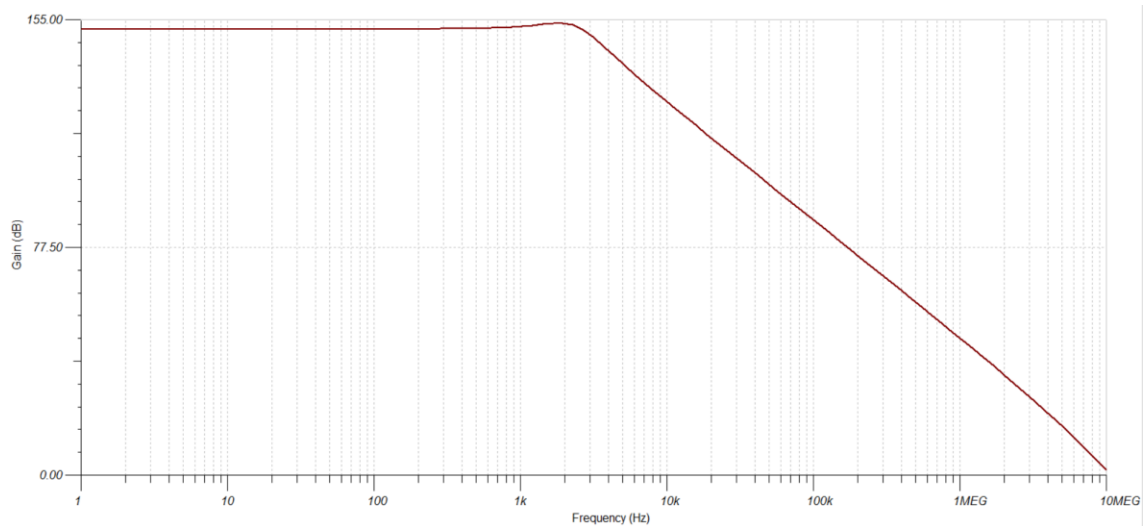
Kuva 20.  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 3 \text{ V}$ .

Kuvan 21 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $770 \text{ pA}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $30 \text{ mV}$ :a. Vahvistus pysyy tasaisena  $360 \text{ Hz}$  taajuuteen asti, jonka jälkeen vahvistus alkaa vähitellen kasvaa. Maksimivahvistus saavutetaan taajuudella  $1,90 \text{ kHz}$ . Tasaisen taajuusalueen vahvistus on  $151,8 \text{ dB}$  ja piikin maksimi on  $153,7 \text{ dB}$ . Taajuuskaista on  $3,2 \text{ kHz}$ .



Kuva 21.  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 30 \text{ mV}$ .

Kuvan 22 simulaatio on AC-analyysi, jossa käytettiin takaisinkytkentäkomponenttien arvoja  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ . Virtalähteen  $I_D$  tuottamaksi virraksi asetettiin  $77 \text{ nA}$ , jotta ulostulojännitteen  $V_{out}$  arvo saatiin lähelle  $3 \text{ V}$ :a. Vahvistus pysyy tasaisena  $150 \text{ Hz}$  taajuuteen asti, jonka jälkeen vahvistus alkaa vähitellen kasvaa. Maksimivahvistus saavutetaan taajuudella  $1,90 \text{ kHz}$ . Tasaisen taajuusalueen vahvistus on  $151,8 \text{ dB}$  ja piikin maksimi on  $153,8 \text{ dB}$ . Taajuuskaista on  $3,2 \text{ kHz}$ .



Kuva 22.  $R_F = 39 \text{ M}\Omega$ ,  $C_F = 1,5 \text{ pF}$ ,  $V_{out} = 3 \text{ V}$ .

Simulaatioista voitiin päätellä vahvistimen toimivan lähes täysin toivotulla tavalla. Kaikki vahvistusasteet olivat stabiileja ja ylittivät vaaditun taajuuskaistan. Kaikki vahvistukset toimivat myös vaaditulla alueella pienintä vahvistusta lukuun ottamatta.

### 3.4 Vahvistimen toiminta ja lopullinen fotodiodivahvistin

Simulaatioiden pohjalta valmistettiin prototyyppi. Prototyyppi juotettiin käsin reikäpiirilevylle, ja piirilevy asetettiin metallisen laatikon sisään. Fotodiodille valmistettiin alumiininen pidike, johon voitiin kiinnittää erityyppisiä suodattimia. Kyseinen alumiinipidike on esitettyä kuvassa 23. Fotodiodin tuottaman signaalin siirtämiseen vahvistimelle käytettiin suojattua parikaapelia. Suojavaippa kiinnitettiin alumiinipidikkeeseen ja maadoitettiin vahvistimen metallisen laatikon runkoon.





Kuva 23. Fotodiodin alumiinipidike.

Vahvistimen toimintaa todennettiin vertaamalla sitä aiemmin yrityksen käytössä olleeseen kalibroituun mittalaitteeseen. Tätä vertailua varten molemmat laitteet liitettiin releohjattuun kytkimeen, joka taas liitettiin fotodiodiin. Fotodiodia valaistiin useilla erityyppisillä lampuilla ja laajan mittausalueen vuoksi myös mittausetäisyyttä vaihdeltiin. Prototyyppi oli onnistunut, sillä sen ja referenssilaitteen tulokset vastasivat toisiaan 0,1 % tarkkuudella koko mittausalueella.

Onnistuneen prototyypin pohjalta teetettiin piirilevy, jonka suunnittelussa käytettiin apuna lisensoitua EAGLE 5.11 -piirinsuunnitteluohjelmaa. Teetetty piirilevy asennettiin alumiiniseen laatikkoon laitteen muiden komponenttien kanssa. Valmis mittari on esitettynä kuvassa 24.



Kuva 24. Valmis mittari.

## 4 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa fotodiodivahvistin. Tavoitteena oli laite, joka pystyy mittaamaan 1 mlx – 100 klx valovoimakkuuksia. Taajuuskaistan tuli myös olla noin 1 kHz. Fotodiodiksi valittiin Hamamatsun S1337-1010BQ ja operaatiovahvistimeksi Texas Instrumentsin LMP7701. Kytkimet olivat Maxim Integratedin MAX4635 CMOS -kytkimiä.

Piirin suunnitteluun käytettiin lisensoitua EAGLE 5.11 -piirinsuunnitteluohjelmaa. Laajan dynaamisen toiminta-alueen vuoksi jouduttiin käyttämään erisuuruisia vahvistuksia, joiden toimintaa ohjattiin kytkimillä. Eri vahvistuksien valinnan jälkeen lisättiin kondensaattorit operaatiovahvistimen takaisinkytkentäsilmutta vahvistimen stabiloimiseksi.

Laskettujen komponenttien pohjalta tehtiin simulaatiot. Simulaatioiden perusteella voitiin todeta, että vahvistimelle asetetut tavoitteet saavutettiin lähes täysin. Vahvistusasteet olivat stabiileja sekä ylittivät halutun taajuuskaistan. Vain pienin vahvistus ei toiminut vaaditulla alueella. Simulaatioiden pohjalta tehty prototyyppi varmisti tehtyjen simulaatioiden paikkansapitävyyden. Lopulliseksi mittausalueeksi muodostui 1 mlx – 60 klx ja taajuuskaistan 1 kHz vaatimus saavutettiin jokaisella vahvistusasteella.

Fotodiodin aktiivisen alueen suuren pinta-alan vuoksi suurilla valovoimakkuuksilla fotodiodin tuottama virta kasvoi korkeammaksi kuin operaatiovahvistimen maksimi ulostulovirta. Laitteen jatkokehitystä ajatellen voitaisiin joko pienentää diodin kokoa tai vaihtaa operaatiovahvistinta. Kaikkia vahvistuksia jouduttaisiin kasvattamaan, jos diodin kokoa pienennettäisiin. Operaatiovahvistinta vaihdettaessa pitäisi valita vahvistin, jonka maksimi ulostulovirta olisi suurempi kuin nykyisessä operaatiovahvistimessa. Tässä tapauksessa voitaisiin vahvistukset pitää saman suuruisina.

Molemmassa vaihtoehdoissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Jatkokehitys kannattaisi kuitenkin aloittaa hankkimalla uusi operaatiovahvistin, jonka kaikki ominaisuudet vastaisivat vanhaa vahvistinta ulostulovirtaa lukuun ottamatta. Tämä siitä syystä, että vahvistuksien kasvattaminen aiheuttaa muun muassa kohinan kasvamista ulostulojännitteessä sekä mahdollisesti taajuuskaistan rajoittumista.

## LÄHTEET

- [1] Graeme, J. 1996. *Photodiode Amplifiers: op amp solutions*. New York. McGraw-Hill.
- [2] Texas Instruments Inc. *Compensate Transimpedance Amplifiers Intuitively*. 1993. [Datalehti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/sboa055a/sboa055a.pdf>. (Luettu: 30.10.2017).
- [3] Hamamatsu Photonics K.K. *Si Photodiodes*. 2015. [Datalehti]. Saatavilla: [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1337\\_series\\_kspd1032e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1337_series_kspd1032e.pdf). (Luettu: 10.11.2017).
- [4] Texas Instruments Inc. 2005. *LMP770x Precision, CMOS Input, RRIO, Wide Supply Range Amplifiers*. [Datalehti]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp7704.pdf>. (Luettu: 10.11.2017).
- [5] Maxim Integrated Products. 2003. *Fast, Low-Voltage, Dual 4Ω SPDT CMOS Analog Switches*. [Datalehti]. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4635-MAX4636.pdf>. (Luettu: 10.11.2017).