



OPERAATIOVAHVISTIMEN SÄHKÖISET OMINAISUUDET JA NIIDEN KEHITYKSEN TILA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Toni Sundsten

Tarkastaja: DI Janne Jäppinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Toni Sundsten

Operaatiovahvistimen sähköiset ominaisuudet ja niiden kehityksen tila

Sähkötekniikan kandidaatintyö

30 sivua, 11 kuvaa ja 9 taulukkoa

Tarkastaja: DI Janne Jäppinen

Avainsanat: operaatiovahvistin, OPAMP, operaatiovahvistimen ominaisuudet, OPAMP kehityksen tila, operaatiovahvistimen kehitys

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan operaatiovahvistimien sähköisiä ominaisuuksia sekä niiden kehityksen tilaa. Tutkimus tehtiin vertailemalla kuutta markkinoilla olevaa operaatiovahvistinta toisiinsa. Operaatiovahvistimien valinta perustui niiden sähköisiin ominaisuuksiin. Ominaisuuksien vertailu tapahtui tutkimalla valmistajien tarjoamia datalehtiä valituille operaatiovahvistimille.

Operaatiovahvistimen sähköisten ominaisuuksien arvot muodostuvat käytössä olevien komponenttien ja piirilevyn ominaisuuksista. Ominaisuudet kehittyvät valmistustekniikan kehittymisen myötä.

Huomattavaa kehitystä on tapahtunut yhteismuodon vaimennuksessa ja siirrosjännitteessä. Yhteismuodon vaimennuksessa oli huomattavissa trendi, jossa sen numeeriset arvot kehittyvät lineaarisesti. Kuitenkin vertailtavissa operaatiovahvistimissa oli yksi, joka vaikutti olevan aikaansa edellä. Siirrosjännitteessä kehittymiseen vaikuttaa suoraan piirilevyjen laser viimeistely, jolla siirrosjännite saadaan hyvin matalaksi.

Hyvin vähän kehitystä on tapahtunut tuloimpedanssissa, ja eikä sille löytynyt suoranaista syytä valmistajien tarjoamista datalehdistä. Bias-virrassa eikä lähtöjännitteen muutosnopeudessa ollut tapahtunut huomattavaa kehitystä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Toni Sundsten

Operational amplifier electrical qualities and state of their development

Bachelor's thesis

2022

30 pages, 11 figures and 9 tables

Examiners: M.Sc. (Tech.) Janne Jäppinen

Keywords: operational amplifier, OPAMP, operational amplifier electrical qualities, OPAMP state of development, operational amplifier state of development

This bachelor's thesis is aimed at studying operational amplifiers electrical qualities and their state of development. The study is done by comparing six different operational amplifiers, which are readily available in the current market. Selection of these operational amplifiers was based on their qualities. Data acquisition for the study was gathered from datasheets given by the manufacturers.

Operational amplifiers electrical qualities are formed from used components and circuit boards qualities. These qualities can improve as the manufacturing technique improves.

Noticeable improvements are made on the CMRR and offset-voltage qualities. In CMRR one could notice a trend where the numerical values of CMRR would improve in a linear fashion. One of the six operational amplifiers, the oldest, seemed to be ahead of its time in CMRR and would break this trend. Offset-voltage improvements can be linked to laser finishing of the circuit board.

Little to no improvements could be seen in input impedance and there was no direct reason for this. Bias-current and slew rate seemed to have stayed close to same as what they had been earlier.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

f	taajuus	[Hz]
I	virta	[A]
R	resistanssi	[Ω]
T	lämpötila	[C]
t	aika	[s]
U	jännite	[V]

Alaindeksit

A_v	Avoimen silmukan jännite
U_{out}	Lähtevä jännite
U_{in}	Tuleva jännite

Lyhenteet

A	Avoimen silmukan vahvistus
B	Kytkenäkerroin
CMRR	Common mode reject ratio
G	Suljetun silmukan vahvistus
GBW	Gain-bandwidth
THD	Total harmonic distortion

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Menetelmät.....	7
3	Tulokset.....	8
3.1	Operaatiovahvistimien valinta ja käyttökohteet.....	8
3.2	Tulojännitteen vahvistus (eng. Open loop gain)	10
3.3	Tuloimpedanssi (eng. Input impedance).....	10
3.4	Bias-virta (eng. Bias-current)	11
3.5	Siirrosvirta (eng. Offset-current).....	14
3.6	Siirrosjännite (eng. Offset-voltage).....	15
3.7	Yhteismuodon vaimennus (eng. Common-mode rejection ratio, CMRR).....	17
3.9	Lähtöjännitteen muutosnopeus (eng. Slew rate).....	20
3.10	Silmukkavahvistukset (eng. Loop gain)	22
3.11	Häiriöt (eng. Total harmonic distortion THD, distortion, noise)	23
3.12	Kaistanleveys (eng. Bandwidth, Gain-Bandwidth Product GBW)	25
4	Johtopäätökset	27
	Lähteet.....	30

1 Johdanto

Operaatiovahvistimia käytetään signaalinvahvistuksesta signaalin käsittelyyn. Elektroniikan kehittyessä signaalinkäsittelyn tärkeys korostuu, kun signaalin suuruusluokka pienenee ja signaalista pitäisi pystyä analysoimaan tarkemmin muutoksia.

Operaatiovahvistin on elektroniikan peruskomponenteista valmistettu, joko integroitu tai erillisinä komponentteina toteutettu, elektroninen komponentti. Operaatiovahvistin on yksinkertainen piirin osa, jossa on kaksi korkeaimpedanssista tulokanavaa ja yksi matalaimpedanssinen lähtökanava. Toinen tulokanavista on invertoiva kanava, ja toinen on ei-invertoiva kanava. Operaatiovahvistinkytkennöissä käytetään yleensä takaisinkytkentää mahdollistamaan ja tehostamaan operaatiovahvistimen toimintaa. (Clayton & Winder, 2003)

Operaatiovahvistimia kehitetään koko ajan, ja on aiheellista tutkia, missä kohtaa kehitys on kunkin ominaisuuden kohdalla menossa. Tutkimuksen tavoitteena on kerätä operaatiovahvistimien tärkeimmät ominaisuudet ja tutkia niiden tämänhetkistä kehityksen tilaa. Tutkimuskysymyksinä kandidaatintyölle toimivat: ”Mitkä ovat oleellisimmat operaatiovahvistimen sähköiset ominaisuudet, jotka vaikuttavat sen toimintaan?” sekä ”Operaatiovahvistimen ominaisuuksien nykytilanne”. Kandidaatintyössä ei oteta kantaa operaatiovahvistimien fyysisiin ominaisuuksiin, kuten kokoon tai painoon.

2 Menetelmät

Kandidaatintyö tehdään kirjallisuuskatsauksena, jossa tutustutaan ammattikirjallisuuteen sekä operaatiovahvistimien valmistajien tarjoamiin datalehtiin.

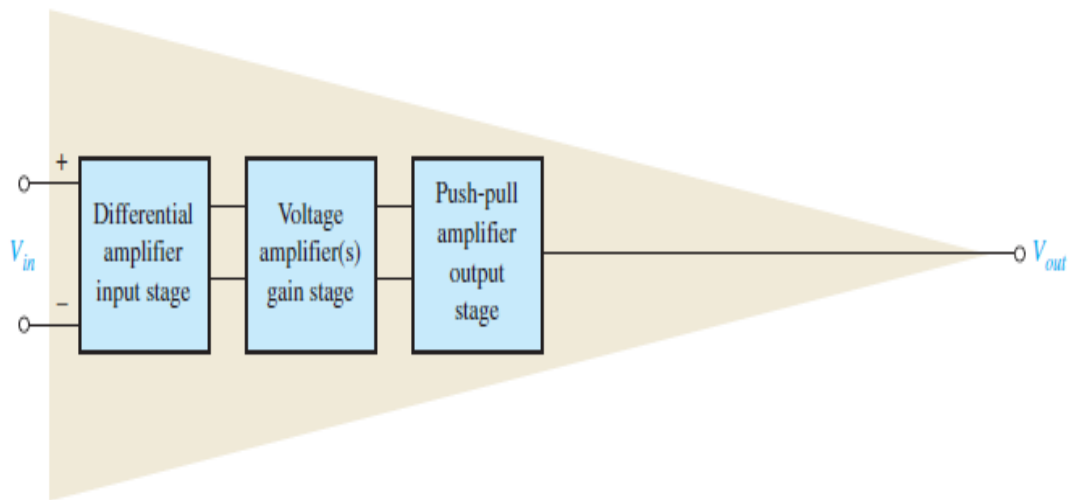
Ammattikirjallisuudesta pyritään etsimään sekä englanninkielisiä, että suomenkielisiä teoksia. Ammattikirjallisuuden pohjalta kerätään oleellimmat ja yleisimmät operaatiovahvistimien ominaisuudet sekä niiden vaikutuksia operaatiovahvistimen toimintaan.

Operaatiovahvistimien valmistajien julkaisemien datalehtien avulla tutkitaan operaatiovahvistimien ominaisuuksien numeerisia arvoja. Datalehtien tulkinnessa käytettiin kriittistä analysointia, sillä datalehdet toimivat valmistajien mainosmateriaaleina. Datalehtien avulla vertaillaan muutamia operaatiovahvistimia.

Vertailussa olevat operaatiovahvistimet on valittu markkinoilla olevista vaihtoehtoista. Markkinapaikkoina käytettiin digikey.fi sekä mouser.fi -verkkokauppoja. Operaatiovahvistimet valikoituivat joko niiden hyvien tai huonojen ominaisuuksien perusteella vertailuun.

3 Tulokset

Operaatiovahvistin voidaan jakaa sisäisesti kolmeen osaan: differentiaalivahvistimen tuloon, jännitevahvistukseen sekä push-pull vahvistinlähtöön (Floyd, 2018). Jokaisella osalla on oma tehtävänsä operaatiovahvistimen kokonaistoiminnassa.



Kuva 1. Yksinkertaistettu kuva operaatiovahvistimen sisäisestä asettelusta, jossa operaatiovahvistin on jaettu kolmeen osaan. (Floyd, 2018)

Operaatiovahvistimen ensimmäisessä osassa tulosta saadaan differentiaalijännite. Toisessa osassa tapahtuu jännitteen vahvistus, ja operaatiovahvistimissa voi olla useita luokan A vahvistimia sarjaan kytkettyinä. Viimeisessä osassa käytetään yleisesti luokan B vahvistinta, jossa kaksi transistoria käsittelee signaalia ja syöttää jännitteen lähtöön.

Kuitenkaan yksittäiset ominaisuudet eivät ole käyttökohteita määrittäviä, vaan operaatiovahvistimen kokonaistoiminta määrittää sen mahdolliset käyttökohteet. Operaatiovahvistimien nykytilaa tutkivissa taulukoissa 1–10 vertaillaan eri ominaisuuksien tyypillisiä ja maksimaalisia arvoja.

3.1 Operaatiovahvistimien valinta ja käyttökohteet

Vertailuun valikoituvat operaatiovahvistimet valitaan erilaisten ominaisuuksien perusteella. Verkkokaupoista etsitään tietyssä ominaisuudessa hyvin suoriutuva operaatiovahvistin ja

otetaan se vertailuun. Vertailussa olevat operaatiovahvistimet ovat monen eri valmistajan suunnittelema. Operaatiovahvistinten käyttökohteita avataan hieman, jotta ominaisuuksien tärkeyttä voidaan analysoida myöhemmin. Kandidaatintyössä vertailut operaatiovahvistimet ovat:

- Analog Devicesin suunnittelema ADA4891 -operaatiovahvistin on vuodelta 2010. Sen datalehteä on päivitetty viimeksi 2015. Operaatiovahvistin valitaan vertailuun sen nopean lähtöjännitteen muutosnopeuden perusteella vertailuun. Sitä käytetään esimerkiksi autoteollisuudessa sekä valokuvauslaitteistossa.
- Apex Microtechnologyn APEX PB58 on julkaistu vuonna 2012 ja päivitetty vuonna 2021. Se valitaan vertailuun suuren tuloimpedanssin perusteella vertailuun. Sitä käytetään esimerkiksi ohjelmoitavissa teholähteissä.
- Burr-Brown Corporationin INA115 on vuodelta 1993 ja valitaan sen suuren tuloimpedanssin perusteella. INA115 pääasialliset käyttökohteet ovat vahvistimina sekä lääketieteellisessä käytössä.
- Linear Technologyn suunnittelema LTC6268-10F on vuodelta 2015. Vertailuun se valikoitui matalan bias-virran perusteella. Esimerkiksi sitä voidaan käyttää ADC käytöissä eli analogia-digitaalimuuntimien käytöissä.
- STMicroelectronicsin TSU1111Y on vuodelta 2021 ja päivitetty 2022. Se valitaan bias-virran perusteella vertailuun. Käyttökohteita sillä on esimerkiksi langattoman latauksen parissa.
- Texas Instrumentsilta vertailuun valikoitui kaksi operaatiovahvistinta, LM358, joka on alun perin vuodelta 1972 ja päivitetty vuonna 2019 sekä OPAx210, joka on vuodelta 2018 ja päivitetty vuonna 2021. LM358 valitaan vertailuun niin sanotuksi nol-lapisteeksi, jotta muille operaatiovahvistimille saataisiin vertailupohja. LM358 on laajasti opiskelijoiden käytössä projektitoissa. OPAx210 valitaan taas siirrosjännitteen poikkeaman yhteismuodon vaimennuksen takia. OPAx210 käyttökohteita on esimerkiksi ultraääniskannereissa sekä ammattilaistason mikrofoneissa.

3.2 Tulojännitteen vahvistus (eng. Open loop gain)

Operaatiovahvistimissa lähtöjännitteen maksimiarvoa määrittelee tulojännitteen vahvistuksen suuruus. (eng. open loop gain) (Floyd, 2018). Ideaalitapauksessa tulojännitteen vahvistus on äärettömän suuri, jolloin lähtöjännite ei ole riippuvainen tulojännitteestä, vaan teoriassa pelkästään operaatiovahvistimen käyttöjännitteistä. Lähtöjännite on maksimissaan operaatiovahvistimen käyttöjännitteen suuruinen rail-to-rail -vahvistimissa (Clayton & Winder, 2003), mutta muun tyyppiset operaatiovahvistimet tarvitsevat osan käyttöjännitteestä toimiakseen.

Todellisuudessa pyritään valmistamaan mahdollisimman korkean tulojännitteen vahvistuksen operaatiovahvistimia. Tulojännitteen vahvistus avoimella takaisinkytkennällä on yleisesti tuhansia. (Floyd, 2018)

Operaatiovahvistimien valmistajien ilmoittamissa datalehdissä ei suoraan kerrota tulojännitteen vahvistuksesta tai sen suuruudesta, koska käytännön kytkennöissä tulojännitteen ja lähtöjännitteen suhde määritellään takaisinkytkennällä.

3.3 Tuloimpedanssi (eng. Input impedance)

Operaatiovahvistimen tuloimpedanssi (eng. input impedance) voidaan määritellä kahdella eri tavalla: joko differentiaalisena impedanssina positiivisen tulon ja negatiivisen tulon välisenä impedanssina, tai yhteismuodon impedanssina. (Floyd, 2018)

Tuloimpedanssi on tärkeä ominaisuus, ja siksi se pitää huomioida operaatiovahvistin kytkennän suunnittelussa. Thomas Floydin (2018) mukaan tuloimpedanssi on tärkeä ominaisuus, sillä tuloimpedanssin ollessa liian pieni, se voi vaikuttaa tulosignaaliin. Tulosignaalin vääristymä voi syntyä, mikäli operaatiovahvistin ei ole tarpeeksi suuri kuorma operaatiovahvistinta edeltävälle piirille ja syöttävästä laitteesta muodostuukin kuorma.

Vertailun kohteena olevista operaatiovahvistimista vain muutamalle on ilmoitettu tuloimpedanssin arvo. Pienimmän tuloimpedanssin operaatiovahvistin APEX PB58 on suunniteltu korkeajännitteisiä mittauksia varten ja vastaavasti suurimman arvon operaatiovahvistin INA115 on suunniteltu lääketieteelliseen instrumentointiin, vahvistimiin ja datan

hankkimiseen. Vertailuun valittujen operaatiovahvistimien tuloimpedanssien arvot löytyvät taulukosta 1.

Taulukko 1: Vertailussa olevien operaatiovahvistimien tuloimpedansseja

Operaatiovahvistin	Tuloimpedanssin tyypillinen arvo [Ω]
INA115	$10 \cdot 10^9$
OPAx210	$400 \cdot 10^3$
Apex PB58	$50 \cdot 10^3$
LM358	Ei ilmoitettu
ADA4891	Ei ilmoitettu
TSU111IY	Ei ilmoitettu

Operaatiovahvistin valitaan käyttökohteen perusteella siten, että tarkkuutta vaativiin tehtäviin ja tehtäviin, joissa operaatiovahvistinta käytetään puskurointiin, tarvitaan suurempi tuloimpedanssi.

Mikäli valmistaja ei ole ilmoittanut arvoa, voi se johtua monistakin syistä. Datalehdet ovat sekä tietolähteitä suunnittelijoille, että mainosvälineitä valmistajille. Esimerkiksi kaikissa tapauksissa valmistaja ei välttämättä ilmoita jotakin arvoa operaatiovahvistimille, mikäli valmistajalla on paremmin suoriutuva operaatiovahvistin kyseisessä kategoriassa. Esimerkkinä operaatiovahvistin LM358, jolle ei ole ilmoitettu tuloimpedanssia, mutta saman valmistajan operaatiovahvistin OPAx210:lle on ilmoitettu tuloimpedanssi.

TSU111IY tapauksessa suunniteltuja käyttökohteita ovat esimerkiksi akkujen langattoman latauksen apupiirit sekä akkujen ohjauslaitteistot missä se herättää prosessorin, kun akku latautuu tai purkautuu. Näitä käyttökohteita varten tuloimpedanssin merkitys on pienempi, kuin muilla ominaisuuksilla.

3.4 Bias-virta (eng. Bias-current)

Bias-virta (eng. Bias-current) on operaatiovahvistimen tulossa esiintyvä virta. Suuri bias-virta voi madaltaa tuloimpedanssia sekä kuormittaa tulosignaalin lähdeä. Tuloissa esiintyvä virta ei kuitenkaan voi olla 0, sillä operaatiovahvistin tarvitsee virtaa tulossa toimiakseen.

Ron Manicinin teoksessa *Op Amps For Everyone* kuvaillaan bias-virran laskemista sekä sen vaikutuksen minimointiin käytettäviä menetelmiä, esimerkiksi piirisuunnittelua.

Operaatiovahvistimissa matalimmat bias-virran arvot ovat muutamien femtoampeerien suuruisia. Esimerkiksi LTC6268-10 operaatiovahvistimessa tyypillinen bias-virta on $\pm 3 \cdot 10^{-15}$ A ja maksimi bias-virran suuruus $\pm 20 \cdot 10^{-15}$ A, kun käyttölämpötila on 125°C. ADA4891 operaatiovahvistimen bias-virran tyypillinen arvo on $\pm 65 \cdot 10^{-12}$ A. Taulukosta 2 voidaan nähdä bias-virran tyypillisiä ja maksimi arvoja eri operaatiovahvistimille.

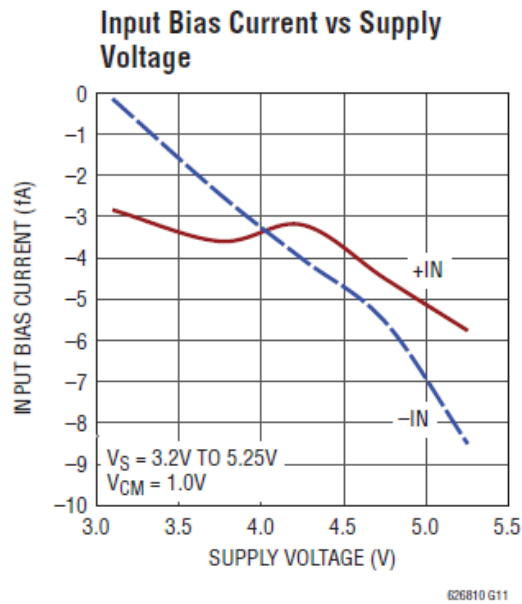
Taulukko 2: Bias-virtojen tyypilliset ja maksimi arvot

Operaatiovahvistin	Tyypillinen arvo [A]	Maksimi arvo [A]
LTC6268-10	$3 \cdot 10^{-15}$	$900 \cdot 10^{-15}$
TSU111IY	$1 \cdot 10^{-12}$	$10 \cdot 10^{-12}$
OPAx210	$300 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-9}$
INA115	$500 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-9}$
LM358	$20 \cdot 10^{-9}$	$500 \cdot 10^{-9}$
ADA4891	$65 \cdot 10^{-9}$	$65 \cdot 10^{-9}$

Taulukosta 2 nähdään, että esimerkkeinä olleilla operaatiovahvistimilla on kaikilla matala bias-virta, mutta kokoluokkaeroja on kuitenkin havaittavissa. Parhaimman arvon omaavan LTC6268-10F ja huonoimman arvon omaavan ADA4891 välillä on 10^6 erotus, joka on huomattava.

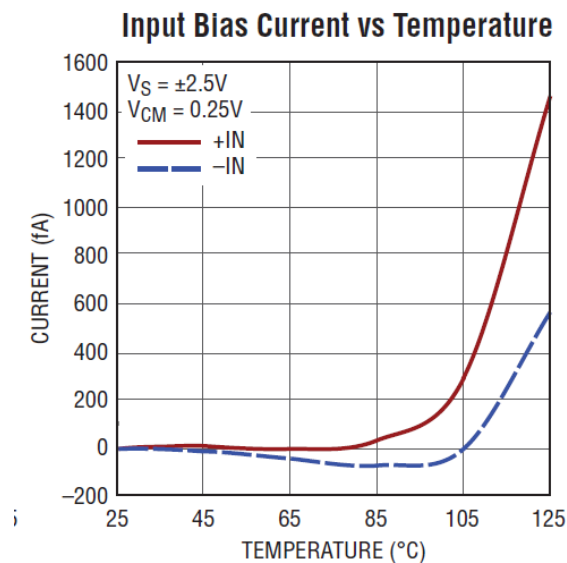
LTC6268-10F on suunniteltu anturivahvistimeksi tai korkean nopeuden transimpedanssi vahvistimeksi, joka toimii muuntajana virran ja jännitteen välillä. Käyttökohteiden takia LTC6268-10F:lla on tarpeellista olla sekä matala bias-virta että kapasitanssi. Käyttöjännitteen sekä lämpötilan vaikutus ADA4891 bias-virtaan on hyvin pientä, sillä sen maksimiarvo on sama kuin tyypillinen arvo.

Kuvasta 2 voidaan tulkita LTC6268-10F käyttöjännitteen vaikutusta sen bias-virran arvoon. Kuvasta huomataan myös, että bias-virran arvo ei välttämättä ole sama tulojen välillä, vaan toisessa tulossa bias-virran arvo voi olla huomattavastikin suurempi.



Kuva 2. LTC6268-10F -operaatiovahvistimen datalehdän kuvaaja 11, bias-virran suhde käyttöjännitteeseen. (Linear Technology, 2015)

LTC6268-10F käyttöjännite on valittavissa 3,2–5,25 V. Tuloissa esiintyvä bias-virran arvo on sama, kun käyttöjännite on 4 V ja bias-virran arvo on tällöin n. -3,1 fA. Kuvasta 2 nähdään myös miten invertoivan tulon bias-virran arvon muutos on lähes lineaarinen, mutta ei-invertoivan tulon bias-virran muutos ei ole lineaarinen.



Kuva 3. LTC6268-10F-operaatiovahvistimen bias-virran suhde lämpötilaan. (Linear Technology, 2015)

Kuvasta 3 nähdään miten ei-invertoivan tulo reagoi aggressiivisemmin lämpötilan kasvuun 85°C jälkeen. Ei-invertoivan tulon bias-virran maksimi arvo näyttäisi olevan hieman yli 1400 fA, kun taas invertoivan tulon bias-virran maksimi olisi noin 550 fA. Datalehden ilmoittama maksimi bias-virralla LTC6268-10F kohdalla oli 900 fA, mikä olisi invertoivan ja ei-invertoivan tulon bias-virtojen keskiarvo. Kuvista 2 ja 3 voidaan tulkita myös, että lämpötilalla on suurempi vaikutus bias-virran arvoon kuin käyttöjännitteellä.

3.5 Siirrosvirta (eng. Offset-current)

Siirrosvirta (eng. offset-current) on tulovirtojen välinen ero, ja ideaalitalanteessa ero olisi 0. Siirrosvirta voi aiheuttaa häiriövirtaa lähdössä. (Floyd, 2018) Käytännössä siirrosvirta on pientä, mikä oli aikaisemmin esimerkiksi LM324 tapauksessa 1970-luvulla suurempi ongelma. Samaa trendiä voidaan huomata taulukosta 3, jossa 1990-luvun operaatiovahvistimen INA115 siirrosvirta on huomattavasti suurempi, kuin 2010 luvulla valmistetun LTC6268-10F. Siirrosvirran suuruus on riippuvainen lämpötilasta ja se ilmaistaan yleisesti 25°C lämpötilassa.

Siirrosvirran arvojen vaihtelua selittää operaatiovahvistimessa käytettävien transistorien ominaisuudet sekä transistorien vaatimukset. Taulukossa 3 esitetään siirrosvirran arvoja. Taulukosta nähdään, että siirrosvirrat ovat hyvin pieniä, ja maksimi arvot ovat 5–70 kertaiset tyypillisiin arvoihin nähden.

Taulukko 3: Siirrosvirran tyypilliset ja maksimi arvot

Operaatiovahvistin	Tyypillinen arvo [A]	Maksimi arvo [A]
LTC6268-10	$6 \cdot 10^{-15}$	$40 \cdot 10^{-15}$
TSU111IY	$10 \cdot 10^{-12}$	$50 \cdot 10^{-12}$
OPAx210	$100 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-9}$
INA115	$500 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-9}$
LM358	$2 \cdot 10^{-9}$	$150 \cdot 10^{-9}$

Maksimi-arvojen eroa tyypillisiin arvoihin selittää siirrosvirran poikkeama (eng. offset-current drift), jota kuvataan siirtymänä mikroampeeria celsiusastetta kohden.

Vertailussa olleista operaatiovahvistimista vain yhdelle oli esitetty siirrosvirran poikkeaman arvo. INA115 -operaatiovahvistimessa poikkeama pysyy samana koko käyttölämpötila alueen läpi. Tämä voi johtua merkintätavasta, tai koska siirtymä ei olisi ollut lineaarinen. Muissa operaatiovahvistimissa siirrosvirran arvoissa on lämpötila-alueet, joille on ilmoitettu joko tyypillinen ja maksimi, tai vain maksimiarvo.

3.6 Siirrosjännite (eng. Offset-voltage)

Tulon siirrosjännite (eng. offset-voltage) on tuloon tarvittava jännite, että lähtö olisi 0. Siirrosjännitteen sopivalla suunnittelulla voidaan korjata operaatiovahvistimen sisäisiä epäideaalisuuksia. Tulosten siirrosjännite voidaan saada lähelle nollaa, jopa muutama mikrovoltteihin tulopiiriin laserviimeistelyllä.

Tulon siirrosjännite kasvaa operaatiovahvistimen piirin vanhetessa, ja se voidaan ilmaista yksikössä mikrovoltteja kuukaudessa. (Mancini, 2009) Siirrosjännite muuttuu myös lämpötilan mukaan, ja tätä kutsutaan tulosten siirrosjännitteen siirtymäksi (eng. Offset-voltage drift). (Floyd, 2018)

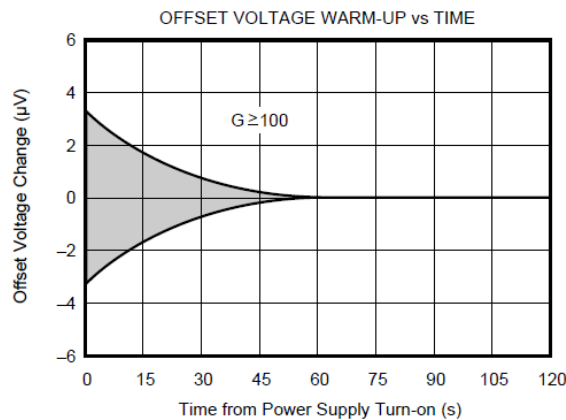
Siirrosjännitteen arvoja on esitetty taulukossa 4. Siirrosjännitteen arvoista nähdään, että maksimiarvot ovat 3–7 kertaa niin suuria kuin tyypilliset arvot. Maksimiarvot muodostuvat käyttölämpötila-alueen ja siirrosjännitteen poikkeaman mukaan.

Taulukko 4: Siirrosjännitteen arvoja

Operaatiovahvistin	Tyypillinen arvo [V]	Maksimi arvo [V]
OPAx210	$5 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^{-6}$
INA115	$25 \cdot 10^{-6}$	$125 \cdot 10^{-6}$
TSU1111Y	$125 \cdot 10^{-6}$	$400 \cdot 10^{-6}$
LTC6268-10	$200 \cdot 10^{-6}$	$700 \cdot 10^{-6}$
ADA4891	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$
LM358	$3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$

Pienimmän ja toiseksi pienimmän operaatiovahvistimen välillä oli numeerisesti eroa vain 20 mikrovoltteja, mutta prosentuaalisesti siirrosjännite on pudonnut viidennekseen.

Siirrosjännite voi olla suurempi heti operaatiovahvistimen käynnistyessä ja pienentyä muutamien kymmenien sekuntien aikana. Tätä ilmiötä kutsutaan lämpenemisaikaksi. Tämän ilmiön voi nähdä kuvasta 4, jossa on INA115 -operaatiovahvistimen siirrosjännitteen lämpenemisaikakuvaaja.



Kuva 4: INA115 siirrosjännitteen lämpenemisaika kuvaaja, missä G kuvastaa suljetun silmukan vahvistuksen arvoa. (Burr-Brown Corporation, 2022)

Datalehdissä on ilmoitettu sekä tyypillinen, että maksimi arvo siirrosjännitteen poikkeaman suuruudelle. Siirrosjännitteen poikkeaman arvoja on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Siirrosjännitteen poikkeaman suuruus lämpötilan mukaan.

Operaatiovahvistin	Tyypillinen arvo [$\frac{\mu V}{^{\circ}C}$]	Maksimi arvo [$\frac{\mu V}{^{\circ}C}$]
OPAx210	0,1	0,5
INA115	0,25	1
TSU1111Y	Ei ilmoitettu	2,5
LTC6268-10	4	Ei ilmoitettu
ADA4891	6	Ei ilmoitettu
LM358	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu

Valmistajat ovat ilmoittaneet lähes kaikille operaatiovahvistimille datalehdissä ainakin jonkinlaisen poikkeaman lämpötilan suhteen. Poikkeuksena tälle on LM358, jolle ei ole ilmoitettu minkäänlaista poikkeamaa. Arvo saattaa olla epäedullinen operaatiovahvistimelle, jolloin valmistaja ei ole halunnut ilmoittaa sitä.

TSU111IY kohdalla valmistaja ei ole ilmoittanut tyypillistä arvoa poikkeamalle, vaan suoraan maksimiarvon. Poikkeama on lämpötilariippuvainen, mutta lämpötilan suuruus voi vaikuttaa siirtymän suuruuteen. Maksimimaalista arvoa voidaan pitää tällaisissa tilanteissa tyypillisenä arvona.

3.7 Yhteismuodon vaimennus (eng. Common-mode rejection ratio, CMRR)

Yhteismuodollinen vaimennussuhde tarkoittaa operaatiovahvistimen kykyä olla vahvistamatta samaan aikaan molemmissa tuloissa olevaa samassa vaiheessa olevaa signaalia. Yhteismuodon vaimennussuhde on käytännössä operaatiovahvistimen avoimen silmukan vahvistuksen suhde yhteismuotoisen signaalin vahvistukseen. (Floyd, 2018)

Yleinen taajuusalue, jota halutaan vaimentaa, on 50–60 Hz (Mancini, 2009). Tämä alue on verkkovirran taajuusalue, ja suurin osa käyttökohteista sijaitsee tällä verkkovirran taajuusalueella, kohdemaasta riippuen.

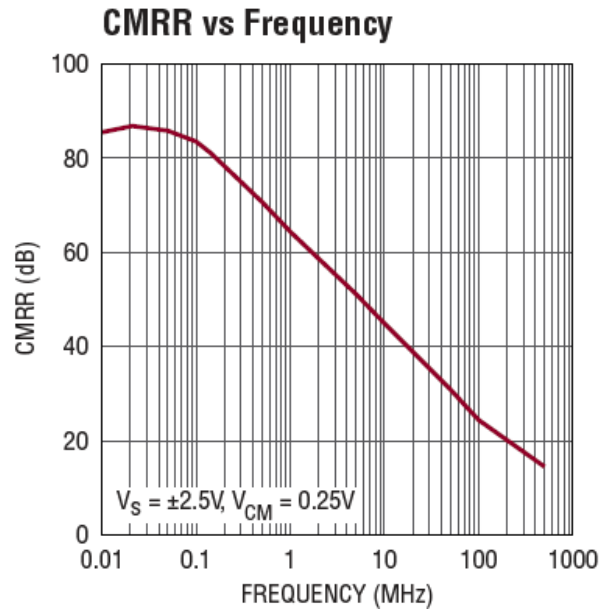
Operaatiovahvistimien datalehdissä on tyypillisesti esitettyä minimiarvo sekä tyypillinen arvo yhteismuodon vaimennuksen suuruudelle. Taulukossa 6 on esitettyä yhteismuodon vaimennuksen minimi ja tyypillisiä arvoja.

Taulukko 6: Yhteismuodon vaimennuksen suuruuksia

Operaatiovahvistin	Minimiarvo [dB]	Tyypillinen arvo [dB]
OPAx210	120	120
INA115	75	110
TSU111IY	71	99
ADA4891	Ei ilmoitettu	87
LTC6268-10	52	85
LM358	65	80

Valmistajien ilmoittamista datalehdistä voidaan nähdä, että suurimmassa osassa operaatiovahvistimista yhteismuodon vaimennus pienenee taajuuden noustessa. Esimerkiksi LTC6268-10 yhteismuodon vaimennus alkaa laskemaan jo noin 90 kHz kohdalla, kuten nähdään kuvaajasta 5, jossa yhteismuodon vaimennus on esitetty taajuuden funktiona.

Yhteismuodon vaimennuksen heikkeneminen taajuuden suhteen ei ole lineaarinen muutos, vaan eksponentiaalinen, joka nähdään kuvaajan x-suuntaisesta logaritmisesta asteikosta.



Kuva 5: LTC6268-10F -operaatiovahvistimen yhteismuodon vaimennuksen suhde taajuuteen. (Linear Technology, 2015)

Taulukon 6 perusteella voidaan sanoa, että yhteismuodon vaimennuksen kohdalla kehitystä on tapahtunut. Vuoden 1993 INA115 on kuitenkin ollut aikaansa edellä, sillä sen yhteismuodon vaimennuksen numeerinen arvo on lähellä vuonna 2021 päivitettyä OPA2210.

3.8 Lähtöimpedanssi (eng. Output impedance)

Lähtöimpedanssi on operaatiovahvistimen lähdössä näkyvä impedanssi. Suuri lähtöimpedanssi voi aiheuttaa operaatiovahvistimen olemisen kuormana loppupiirille, ja tämä on ei-toivottu vaikutus. Lähtöimpedanssi koostuu push-pull vahvistimen impedanssista, joka on yleisesti matala.

Lähtöimpedanssin suuruus operaatiovahvistimissa muuttuu taajuuden mukaan. Suurilla taajuuksilla myös lähtöimpedanssin arvo kasvaa. Taulukosta 7 nähdään valmistajien ilmoittamat tyypilliset lähtöimpedanssien arvot sekä maksimi arvot suurilla taajuuksilla.

Taulukko 7: Lähtöimpedanssin arvoja

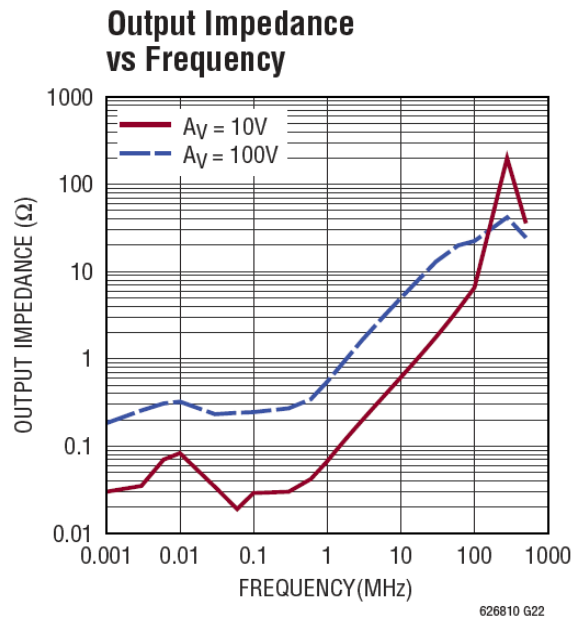
Operaatiovahvistin	Tyypillinen arvo [Ω]	Maksimi arvo [Ω]
ADA4891	0.1	100
LTC6268-10	0.1	900
OPAx210	2	1000
TSU111IY	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu
INA115	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu
LM358	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu

Muutamille operaatiovahvistimille valmistajat eivät olleet ilmoittaneet mitään lähtöimpedanssin arvoa. Tämä voi johtua arvojen epäedullisuudesta operaatiovahvistimen kokonaiskuvaa kohtaan, tai käyttökohteessa lähtöimpedanssilla ei ole suurta merkitystä.

INA115 tapauksessa lähtöimpedanssilla on pienempi vaikutus, sillä tutkittava kytkentä on kytkettynä tulopuolelle. INA115 datalehdessä esimerkiksi annetussa sydänsähkökäyrävahvistinkytkennässä tulo on kytkettynä henkilöön.

Ilmoitetuista arvoista nähdään, että tyypilliset arvot ovat parhaimmillaan hyvin lähellä toisiaan, pienin ilmoitettu tyypillinen arvo oli 0,1 Ω ja suurin ilmoitettu tyypillinen arvo oli 2 Ω . Suurilla taajuuksilla eroja alkaa näkymään, sillä pienin ilmoitettu arvo oli 100 Ω ja suurin 1000 Ω .

Kuva 6 esittää LTC6268-10F -operaatiovahvistimen lähtöimpedanssin muutosta taajuuteen. Lähtöimpedanssin muutoksen kuvaajan y-akseli on logaritminen ja muutos on lineaarista, lähtöimpedanssin muutos on eksponentiaalinen.



Kuva 6. LTC6268-10F -operaatiovahvistimen lähtöimpedanssi suhteessa taajuuteen (Linear Technology, 2015)

Kuvassa 6 A_v on operaatiovahvistimen avoimen silmukan jännite. Kuvasta 6 voidaan tulkitä, että LTC6268-10F -operaatiovahvistimella pienellä jännitteen arvolla ja pienellä taajuudella lähtöimpedanssi on parhaillaan alle $0,02 \Omega$. Suurimmillaan lähtöimpedanssi on pienellä jännitteellä ja suurella taajuudella noin 200Ω . Kuvasta nähdään myös suuremman jännitteen käyttäytyminen, jolla muutos on kokonaisuudessaan pienempi, ja minimiarvo on korkeampi.

3.9 Lähtöjännitteen muutosnopeus (eng. Slew rate)

Lähtöjännitteen muutosnopeudella tarkoitetaan operaatiovahvistimen kykyä muuttaa lähtöjännitteen suuruutta tulon mukaan. Se ilmoitetaan volteissa ajan funktiona. Käytännössä tämä tarkoittaa, kuinka kauan operaatiovahvistimella menee muuttaa lähtö vastaamaan tuloa. Korkeilla taajuuksilla lähtöjännitteen suuruuden rajoittavana tekijänä voi olla muutosnopeus.

Lähtöjännitteen muutosnopeuden suurentaminen voi aiheuttaa bias-virtojen kasvua. Stabiiliutta kompensoidaan yleensä operaatiovahvistimen sisäisellä kondensaattorilla, jolloin lähtöjännitteen muutosnopeus voi kärsiä. Mikäli stabiiliutta ei kompensoida sisäisellä kondensaattorilla, voidaan saada suurempi kaistanleveys sekä muutosnopeus.

Taulukossa 8 tarkastellaan valittujen operaatiovahvistimien lähtöjännitteen muutosnopeuksia. Taulukossa on esitetty vain tyypillinen arvo, sillä datalehdissä ei ollut esillä maksimi tai minimi arvoja.

Taulukko 8: Vertailussa olevien operaatiovahvistimien lähtöjännitteiden muutosnopeuksia

Operaatiovahvistin	Tyypillinen arvo [$\frac{V}{\mu s}$]
ADA4891	140
OPAx210	6,4
INA115	0,6
LM358	0,3
TSU111Y	0,003

Taulukon 8 perusteella voidaan sanoa, että erot lähtöjännitteen muutosnopeuksissa ovat suuria. ADA4891 -operaatiovahvistimella tyypillinen arvo on 53333,3-kertainen verrattuna TSU111Y lähtöjännitteen muutosnopeuteen. ADA4891:n lähtöjännitteen muutosnopeus verrattuna jännitteeseen on esitetty kuvassa 7.

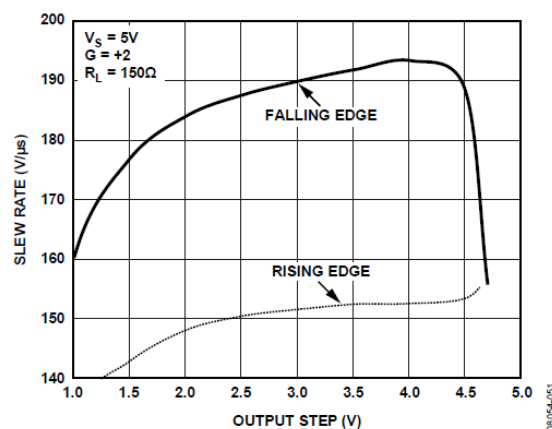


Figure 40. Slew Rate vs. Output Step

Kuva 7. ADA4891 -operaatiovahvistimen datalehden kuvaaja 40, lähtöjännitteen muutosnopeus suhteessa jännitteeseen. (Analog Devices, 2015)

Kuvasta 7 nähdään, miten ADA4891 -operaatiovahvistimen lähtöjännitteen muutosnopeus muuttuu lähtöjännitteen mukaan. Kuvasta voidaan myös nähdä, että muutoksessa nousevan reunan ja laskevan reunan nopeus on eri. Datalehdessä ilmoitettu arvo, $140 \frac{V}{\mu s}$, vaikuttaisi olevan pienin arvo, jolla operaatiovahvistin toimii.

3.10 Silmukkavahvistukset (eng. Loop gain)

Operaatiovahvistimen avoimen silmukan vahvistuksella voidaan tarkastella operaatiovahvistimen piirissä esiintyviä virheitä. Suunnitteluvaiheessa avoimen silmukan vahvistuksella voidaan ennustaa, miten piiri käyttäytyy operaatiovahvistimen kanssa. Kuvassa 8 esitetään ADA4891 -operaatiovahvistimen avoimen silmukan vahvistuksen käyttäytyminen taajuuden suhteen.

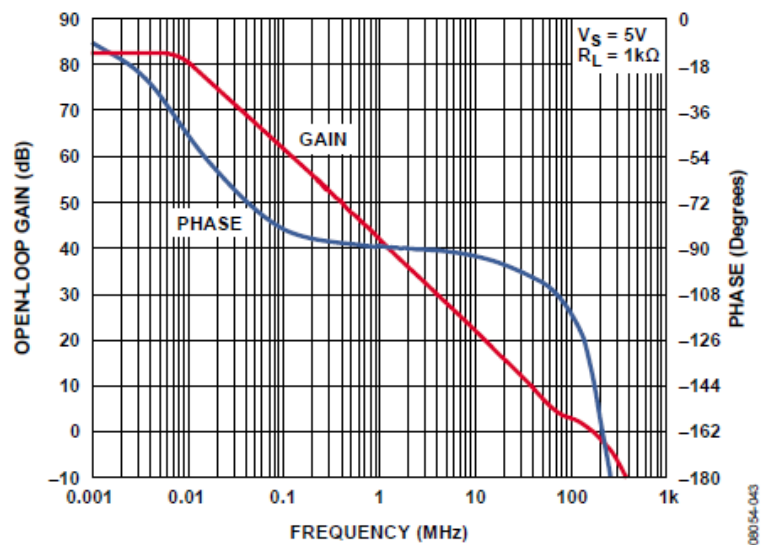


Figure 26. Open-Loop Gain and Phase vs. Frequency

Kuva 8. ADA4891 datalehden kuvaaja 26, avoimen silmukan vahvistus suhteessa taajuuteen (Analog Devices, 2015)

Avoimen silmukan vahvistus on suurimmillaan ADA4891 -operaatiovahvistimessa taajuuden ollessa pieni. Kohdassa 0.01 MHz vahvistus alkaa laskemaan 20dB aina kun taajuus kymmenkertaistuu. Vahvistuksen käyttäytyminen on logaritmista, sillä x-akseli on esitetty eksponentiaalisena ja käyttäytymistä kuvaava suora on lineaarinen suurimman osan ajasta.

Suljetun silmukan vahvistus määrittää käytännön piireissä vahvistuksen suuruuden. Suljetun silmukan vahvistus koostuu avoimen silmukan vahvistuksesta sekä kytkentäkertoimesta (Silvonen, 2018). Kytkentäkerroin on positiivinen, mikäli takaisinkytkentä on negatiiviseen tuloon. Suljetun silmukan vahvistus voidaan laskea yhtälöllä 1,

$$U_{out} = \frac{A}{1 + A * B} * U_{in} \quad (1)$$

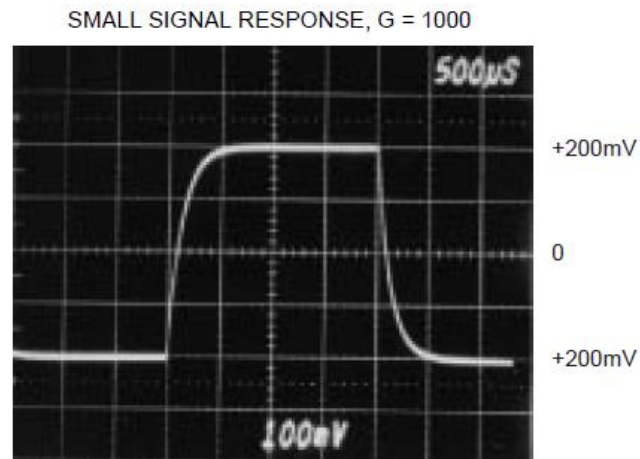
missä A on avoimen silmukan vahvistus ja B on kytkentäkerroin (Silvonen, 2018). Suurilla vahvistuksen arvoilla suljetun silmukan vahvistus on kokonaan riippuvainen kytkentäkertoimesta, mikä voidaan perustella yhtälössä 2 esitettyssä raja-arvotarkastelussa.

$$U_{out} = \frac{1}{\frac{1}{A} + B} * U_{in} \rightarrow \frac{1}{B} * u_{in} \text{ kun } A \rightarrow \infty \quad (2)$$

3.11 Häiriöt (eng. Total harmonic distortion THD, distortion, noise)

Operaatiovahvistimissa voi esiintyä häiriötä sekä komponenttien epäideaalisuuksien, että ulkopuolisten häiriölähteiden takia. Myös suunnittelulla voidaan vaikuttaa operaatiovahvistimissa esiintyvien häiriöiden määrään.

Säröytymistä (eng. distortion) voi tapahtua muutenkin kuin harmonisesti, esimerkiksi lähtöjännitteen heittäminen tai liian alhainen lähtöjännitteen muutosnopeus voi aiheuttaa satunnaista säröä. Tällaista säröä on esimerkiksi signaalin leikkautuminen tai vääristyminen. Kuvassa 9 on esitettyä säröytymistä.



Kuva 9. INA115 -operaatiovahvistimen vaste, jossa esiintyy säröytymistä (Burr-Brown Corporation, 2022).

Kuvassa 9 INA115 -operaatiovahvistimelle on syötetty ± 15 V kantiaaltoa, jossa nousun ja laskun lopussa esiintyy säröä. Kantiaallon säröytyminen tarkoittaa tässä esimerkissä sitä, että nousussa maksimi arvo saavutetaan hitaammin kuin ilman säröä. Sama tapahtuu myös laskun aikana. Koe on tehty $+25$ °C lämpötilassa ja vahvistus on 1000-kertainen.

Harmoninen särö (eng. Total harmonic distortion, THD) ominaistajuuden monikerroilla esiintyvää toistuvaa häiriötä. ADA4891 operaatiovahvistimen harmonista säröä esitetään kuvassa 10.

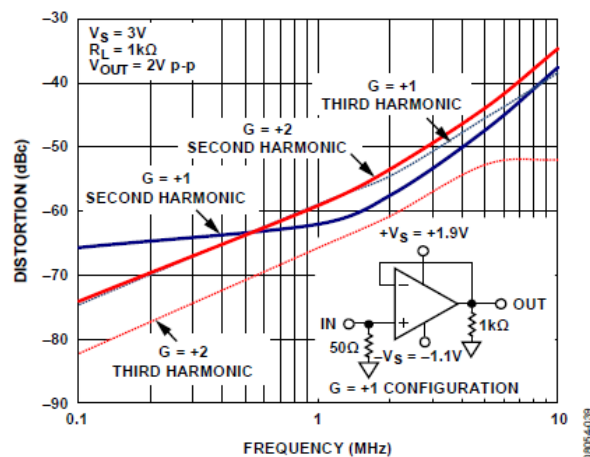


Figure 23. Harmonic Distortion (HD2, HD3) vs. Frequency, $V_S = 3$ V

Kuva 10. ADA4891-datalehden kuvaaja 23, josta voidaan huomata eri harmonisten särön muutosta taajuuden funktiona. (Analog Devices, 2015)

Kuvassa 10 esiintyvä harmonin särö esiintyy kuvan oikeassa alareunassa esitetyn piirin toiminnassa. G esittää kytkennässä olevaa vahvistusta.

Kohina (eng. noise) on operaatiovahvistimen tai ulkopuolisen häiriölähteen aiheuttamaa häiriösignaalia. Operaatiovahvistimen sisäisen kohina muodostuu komponenttien kohinasta, jota aiheuttavat esimerkiksi vastukset ja puolijohdekomponentit. Operaatiovahvistimen ulkopuolisia kohinanaiheuttajia voivat olla esimerkiksi erilaiset radiosignaalit tai korkeajännite johdot. Kuvassa 11 esitetään esimerkki kohinan suhteesta taajuuteen.

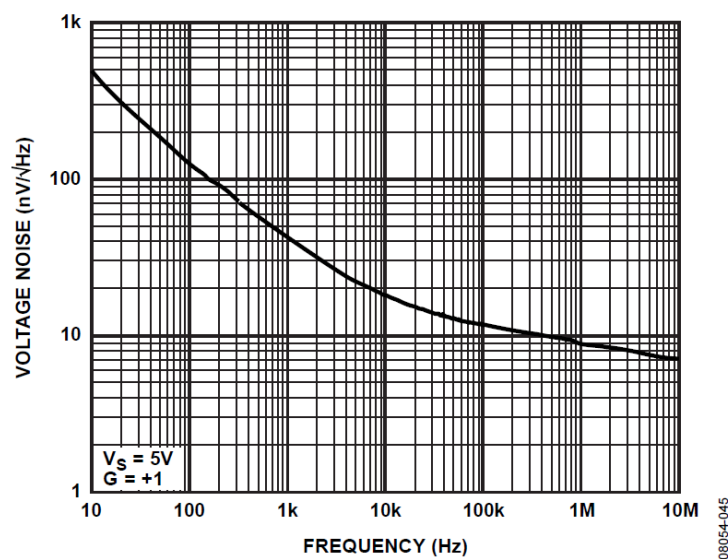


Figure 28. Input Voltage Noise vs. Frequency

Kuva 11. ADA4891 -operaatiovahvistimen datalehden kuvaaja 28, tulossa esiintyvän häiriön suhde taajuuteen. (Analog Devices, 2015)

Kuvassa 11 on logaritminen asteikko, jossa kuvataan jännitekohinaa taajuuteen verrattuna. ADA4891 -operaatiovahvistimella taajuuden noustessa kohinan määrä putoaa huomattavasti.

3.12 Kaistanleveys (eng. Bandwidth, Gain-Bandwidth Product GBW)

Kaistanleveydellä tarkoitetaan taajuusaluetta, jonka alueella operaatiovahvistinta on suunniteltu käytettävän. Operaatiovahvistimet ovat sisäisesti kompensoituja, mikä voi aiheuttaa

ongelmia kaistanleveyden kanssa, mikäli operaatiovahvistinta käytetään avoimen silmukan sijasta suljetulla silmukalla.

Vahvistus-kaistanleveys-tulo (eng. Gain-Bandwidth Product, GBW) kuvastaa vahvistuksen vaikutusta kaistanleveyteen ja se esitetään yksikössä hertsiä. Vahvistus-kaistanleveys-tulo on jännitetakaisinkytkettyjen operaatiovahvistimien ominaisuus, sillä vahvistuksella ja kaistanleveydellä on suora verrannollisuus. Virta-takaisinkytkettyihin operaatiovahvistimissa tästä ei puhuta, sillä niissä ei ole suoraa verrannollisuutta vahvistuksen ja kaistanleveyden välillä. (Mancini, 2009)

Taulukosta 9 on esitetty muutamille operaatiovahvistimille niiden valmistajan ilmoittamat kaistanleveyden ja vahvistus-kaistanleveys-tulon arvot.

Taulukko 9: Kaistanleveys sekä vahvistus-kaistanleveys-tulo arvoja

Operaatiovahvistin	Kaistanleveyden tyypillinen arvo [Hz]	Vahvistus—kaistanleveys-tulon minimi arvo [Hz]	Vahvistus—kaistanleveys-tulon tyypillinen arvo [Hz]
ADA4891	$90 \cdot 10^6 \dots 240 \cdot 10^6$	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu
LTC6268-10	$73 \cdot 10^6$	$3500 \cdot 10^6$	$4000 \cdot 10^6$
OPAx210	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu	$18 \cdot 10^6$
TSU111IY	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu	$9 \cdot 10^3$
INA115	$1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^6$	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu
LM358	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu

Taulukosta 9 nähdään, miten operaatiovahvistinten valmistajat yleisesti ilmoittavat joko kaistanleveyden tai vahvistus-kaistanleveydestulon. Poikkeuksena tälle on LTC6268-10, jolle on ilmoitettu molemmat, sekä LM358, jolle ei ole ilmoitettu kumpaakaan. ADA4891:n ja INA115:n tapauksessa valmistaja on ilmoittanut kaistanleveyden tyypillisen arvon eri vahvistuksen arvoille.

4 Johtopäätökset

Operaatiovahvistimien sähköisien ominaisuuksien tutkiminen valmistajien datalehtien avulla on suuntaa antavaa, sillä valmistajat eivät ilmoita kaikkia arvoja jokaiselle operaatiovahvistimelle.

Valmistajat suunnittelevat operaatiovahvistimet tiettyjä tehtäviä varten ja ilmoittavat ne arvot, jotka kokevat tarpeellisiksi. Esimerkiksi vertailussa oli kaksi Texas Instrumentsin operaatiovahvistinta, joista toiselle oli ilmoitettu paljon tarkemmin sen ominaisuuksien numeeriset arvot. Tiettyihin ominaisuuksiin, kuten avoimen silmukan vahvistukseen valmistajat eivät ottaneet ollenkaan kantaa datalehdissä. Tosin esimerkiksi avoimen silmukan vahvistuksen kohdalla operaatiovahvistinkytkentä voidaan suunnitella siten, että se ei vaikuta lopputulokseen.

Kehitystä on tapahtunut muutamassa ominaisuudessa, pääasiassa operaatiovahvistimien tulopuolella. Vaikka siirrosjännitteen numeeriset arvot ovatkin pysyneet samassa mikrovoltin kokoluokassa, voidaan sanoa, että ainakin pientä kehitystä on tapahtunut. Matalin siirrosjännitteen arvo oli vuonna 2021 päivitetyn Texas Instrumentsin OPA2210 -operaatiovahvistimella. Toiseksi matalin arvo oli vuoden 1993 Burr-Brownin INA115:lla. Numeerisesti ero on vain 20 mikrovoltia, mutta prosentuaalisesti siirrosjännite on pudonnut viidennekseen. OPA2210 on hyvin yleismallinen operaatiovahvistin, kun vanhempi INA115 on selvästi kohdennetumpi lääketieteelliseen käyttöön. Siirrosjännitteen arvojen tasaantumiseen vaikuttaa piirilevyjen laserviimeistely, joka mahdollistaa arvon pienemisen.

Yhteismuodon vaimennuksen kohdalla kehitystä oli tapahtunut, mutta sielläkin vuoden 1993 INA115 oli selvästi aikaansa edellä ja on hyvin lähellä vuonna päivitettyä 2021 OPA2210 -vahvistinta. Muiden vertailussa olevien operaatiovahvistimien kohdalla kehitys vaikuttaa olevan melko lineaarista siten, että 2015 operaatiovahvistimien yhteismuodon vaimennuksen arvot ovat hieman pienemmän kuin vuosien 2022 ja 2021 operaatiovahvistimien.

Suurimmassa osassa sähköisistä ominaisuuksista ei ollut havaittavissa kehitystä, vaan uusimmat operaatiovahvistimet ovat yhtä hyviä tai huonoja kyseisissä ominaisuuksissa, kuin vanhemmatkin operaatiovahvistimet.

Operaatiovahvistimen tuloimpedanssin kohdalla on huomattavissa, että parhaan tuloimpedanssin operaatiovahvistin on vuodelta 1993. Kehityskulkua voisi kuvailla melkein negatiivisuuntaiseksi. Kahdelle muulle operaatiovahvistimelle tuloimpedanssin arvo oli ilmoitettu, mutta ne eivät yltäneet lähellekään INA115:n tuloimpedanssin arvoa. Näille kahdelle 2021 vuoden operaatiovahvistimelle tuloimpedanssin arvot olivat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan, sillä molemmat olivat kilo-ohmin kertoimella. Muiden komponenttien kehitys saattaa selittää kehityskulkua, mutta suoraa vastausta on lähes mahdotonta selvittää valmistajien datalehtien perusteella. Myöskään tutkimuksessa olleiden operaatiovahvistinten määrän takia ei ole mielekästä todeta, että kehityksen olisi ollut suoranaisesti negatiivista.

Huomattavaa numeerista kehitystä ei ole tapahtunut viimeiseen seitsemään vuoteen markkinoilla oleviin operaatiovahvistimiin bias-virran, siirrosvirran, lähtöimpedanssin eikä lähtöjännitteen muutosnopeuden kannalta.

Bias-virran kohdalla matalimman arvon ilmoitti LTC6268-10F. Sillä bias-virran arvo oli muutaman femtoampeerin, kun seuraavalla arvo verrokilla oli jo pikoamperissa.

Siirrosvirralla LTC6268-10F oli taas uudempia operaatiovahvistimia huomattavasti parempi numeerisesti. Muille operaatiovahvistimille ilmoitetut siirrosvirran arvot olivat samassa pikoampeerin kokoluokassa.

Lähtöimpedanssin numeeriset arvot oli ilmoitettu kolmelle operaatiovahvistimelle. Numeerisesti vuoden 2015 operaatiovahvistimet ADA4891 sekä LTC6268-10F olivat vuoden 2021 OPA2210 -operaatiovahvistinta suuremmat, mutta jälleen hyvin pienen näyttekoon takia kehityksen kulkua on hankala arvioida.

Lähtöjännitteen muutosnopeuden numeeristen arvojen perusteella voidaan sanoa, että vuoden 2015 operaatiovahvistin pärjasi jälleen paremmin kuin uudemmat operaatiovahvistimet. Lähtöjännitteen muutosnopeuden kohdalla käyttökohde vaikuttaa varmasti numeeriseen arvoon eikä suurempi aina ole parempi. Kehitystä on siis vaikea arvioida kunnolla.

Yhteen operaatiovahvistimeen on hankala tai mahdoton saada kaikkia ominaisuuksien arvoja hyväksi, ja tämän takia suunnitellun käyttökohteen perusteella on priorisoitu tiettyä tai tiettyjä ominaisuuksia. Esimerkiksi ADA4891 -operaatiovahvistimen lähtöjännitteen muutosnopeus on selvästi suurempi kuin muilla vertailussa olleilla operaatiovahvistimilla, mutta sen muiden ominaisuuksien numeeriset arvot olivat vertailun keskiarvoa tai häntäpäätä.

LTC6268-10F:n arvoista voidaan päätellä, että bias-virran yhteydessä siirrosvirran arvon pitäminen pienenä on tarpeellista tai helppoa. Samanlailla siirrosjännitteen ja yhteismuodon vaimennuksen optimointi vaikuttaisi olevan yhdessä helpompaa, sillä OPAx210 -operaatiovahvistimissa molemmat ovat vertailun huippuja. Toisena esimerkkinä siirrosjännitteen ja yhteismuodon vaimennuksen yhteydestä voisi olla INA115, joka on sijoittunut vertailussa molemmissa ominaisuuksissa toiseksi.

Lähteet

Analog Devices, 2015. *ADA4891-1 Low Cost CMOS, High Speed, Rail-to-Rail Amplifier*. s.l.:s.n.

Burr-Brown Corporation, 2022. *INA115 Precision INSTRUMENTATION AMPLIFIER*. s.l.:s.n.

Clayton, G. & Winder, S., 2003. *Operational Amplifiers*. Teoksessa: 5th toim. s.l.:Elsevier, pp. 10-15.

Floyd, T. L., 2018. *ELECTRONIC DEVICES*. Teoksessa: 9th toim. s.l.:Pearson, pp. 603-633.

Linear Technology, 2015. *LTC6268-10F 4GHz Ultra-Low Bias Current FET Input Op Amp*, Milpitas: LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION 2015.

Mancini, R., 2009. *Op amps for everyone*. In: 3-1 - 3-6 , 9-3. Amsterdam: Elsevier.

Silvonen, K., 2018. *Elektroniikka ja sähkötekniikka*. In: s.l.:Otatieto, pp. 227 - 235.

STMicroelectronics, 2022. *Automotive grade, nanopower (920 nA), high accuracy (150 μ V) 5 V CMOS*, s.l.:s.n.

Texas Instruments, 2021. *OPAx210 2.2-nV/VHz Precision, Low-Power, 36-V Operational Amplifiers*, s.l.:s.n.

Texas Instruments, 2022. *LM358 Datasheet*, s.l.:s.n.