



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

# **ANALOGISTEN EROTUSVAHVISTIMIEN NYKYTILAN KARTOITUS**

## **Present state survey of analog isolation amplifiers**

Heikki Järvisalo

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Heikki Järvisalo

**Analogisten erotusvahvistimien nykytilan kartoitus**

2011

Kandidaatintyö.

21 sivua, 6 kuvaa ja 6 taulukkoa

Tarkastaja: professori Pertti Silventoinen

Erotusvahvistin on instrumentointivahvistin, jonka tulo ja lähtö ovat galvaanisesti erotettu toisistaan. Erotusvahvistimia käytetään galvaanisista erotusta vaativissa sovelluksissa, muun muassa sairaalalaitteissa. Teollisuudessa on olemassa sovelluksia, joihin tarvittaisiin analogisia erotusvahvistimia, mutta ei tiedetä onko analogisilla erotusvahvistimilla riittävän hyvät komponenttiarvot.

Tässä työssä selvitetään analogisten erotusvahvistimien tämänhetkisiä ominaisuuksia, hintoja ja komponenttiarvoja neljältä eri valmistajalta.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Degree Programme in Electrical Engineering

Heikki Järvisalo

### **Present state survey of analog isolation amplifiers**

2011

Bachelor's Thesis.  
21 pages, 6 figures and 6 tables

Examiner: professor Pertti Silventoinen

An isolation amplifier is an instrumentation amplifier, whose input and output are galvanically isolated from each other. Isolation amplifiers are used in applications that need galvanic isolation, for example hospital equipment. Industry has applications which need isolation amplifiers, but it is not known are analog isolation amplifiers' component characteristics good enough.

In this thesis analog isolation amplifiers' attributes, prices and component characteristics from four different manufacturers are reviewed.

## SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet .....	5
1. Johdanto .....	6
2. Erotusvahvistimien keskeisiä ominaisuuksia .....	6
2.1 Common mode rejection ratio.....	6
2.2 Erotus- ja modulointimenetelmät .....	7
2.2.1 Induktiivinen erotus.....	7
2.2.2 Amplitudimodulaatio .....	8
2.2.3 Kapasitiivinen erotus .....	9
2.2.4 Pulssisuhdemodulaatio.....	9
2.2.5 Optinen erotus.....	10
2.2.6 $\Sigma\Delta$ -modulaatio .....	11
3. Erotusvahvistimille tyypillisiä käyttökohteita.....	12
4. Vertailu.....	12
4.1 Analog Devices .....	13
4.2 Intronics.....	15
4.3 Texas Instruments.....	17
4.4 Avago Technologies.....	18
4.5 Valmistajien välinen vertailu .....	20
5. Johtopäätökset.....	21
6. Yhteenveto.....	22
Lähteet .....	23

**KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET**

AM	Amplitudimodulaatio
CMRR	Common mode rejection ratio, yhteismuotoisten häiriöiden vaimennussuhde
ECG	Electrocardiography, sydänsähkökäyrä
EEG	Electroencephalography, aivosähkökäyrä
LED	Light Emitting Diode, valodiodi
PWM	Pulsewidth modulation, pulssisuhdemodulaatio
Slew rate	Seurantanopeus
SCR	Silicon-Controlled Rectifier, silikoniohjattu tasasuuntaaja

<i>A</i>	Amplitudi
<i>D</i>	Pulssisuhde
<i>G</i>	Vahvistus
<i>f</i>	Taajuus
<i>t</i>	Aika
<i>T</i>	Jaksonaika
<i>τ</i>	Aika, jonka funktio on aktiivisena
$\Sigma\Delta$	Sigma-delta-modulaatio

**Alaindeksit**

c	Kantoaalto
CM	Common mode, yhteismuotoinen
DM	Differential mode, eromuotoinen
p-p	Peak-to-peak, huipusta huippuun arvo
RMS	Root-Mean-Square, tehollisarvo

## 1. JOHDANTO

Galvaanisen erotuksen tarve on suuri muun muassa elektronisissa sairaalapotilaita tarkkailevissa sovelluksissa kuten aivosähkökäyrässä, EEG, tai teollisuuden sovelluksissa, joissa häiriöjännitteet ovat jopa kilovolttien luokkaa. Tämä erotus toteutetaan erotusvahvistimilla. Erotusvahvistimet on instrumentointivahvistimia, joiden tulot ja lähdöt ovat galvaanisesti erotettu toisistaan. [1]

Tämän työn tarkoituksena on lyhyesti esitellä erotusvahvistimille keskeisiä ominaisuuksia, erilaisten erotus- ja modulointimenetelmien toimintaperiaatteet, sekä kartoittaa kaupallisten erotusvahvistimien tyypillisiä käyttökohteita, hintoja ja komponenttiarvoja. Työssä tarkastellaan analogisia erotusvahvistimia neljältä eri valmistajalta, jotka ovat Analog Devices, Intronic Inc., Avago Technologies sekä Texas Instruments.

## 2. EROTUSVAHVISTIMIEN KESKEISIÄ OMINAISUUKSIA

Erotusvahvistimien keskeisimpiä ominaisuuksia ovat Common mode rejection ratio, CMRR, erotusmenetelmä sekä modulointimenetelmä. Yleisesti käytetään kolmea erilaista erotusmenetelmää, modulointimenetelmiä sen sijaan on huomattavasti enemmän. Tässä työssä perehdytään tarkastelun alla olevien valmistajien käyttämiin kolmeen modulointimenetelmään, jotka ovat amplitudimodulaatio, pulssisuhdemodulaatio sekä  $\Sigma\Delta$ -modulaatio.

### 2.1 Common mode rejection ratio

CMRR kuvaa erotusvahvistimen kykyä vaimentaa yhteismuotoisia häiriöitä. Korkea CMRR, yli 90dB [2], on erityisen tärkeä sovelluksissa, joissa hyötysignaalit ovat millivolttien luokkaa ja häiriöjännitteet voivat olla jopa tuhansia voltteja, sekä sovelluksissa, joissa signaali täytyy kuljettaa tuhansien volttien jännite-eron yli. Tämän takia CMRR on yksi tärkeimmistä erotusvahvistimien ominaisuuksista. CMRR on taajuusriippuvainen, joten CMRR:n yhteydessä on mainittava myös millä taajuudella arvo pätee. CMRR saadaan laskettua yhtälöllä

$$CMRR = 20 \log \left( \frac{G_{DM}}{G_{CM}} \right), \quad (2.1)$$

missä  $G_{DM}$  on eromuotoinen vahvistus ja  $G_{CM}$  yhteismuotoinen vahvistus. Koska CMRR lasketaan kymmenkantaisen logaritmin avulla, se esitetään desibeleissä. [3]

## 2.2 Erotus- ja modulointimenetelmät

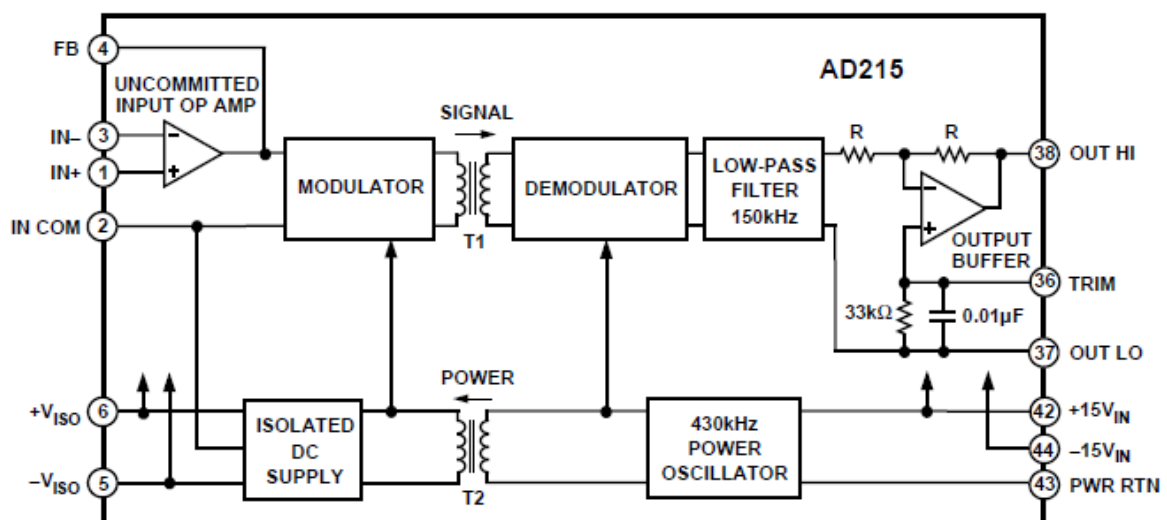
Erutusvahvistimen tulo ja lähtö ovat galvaanisesti erotettu toisistaan ja erotukseen käytetään yleisesti kolmea erilaista erotusmenetelmää; optista, induktiivista tai kapasitiivista erotusta. Galvaanisen erotuksen lisäksi signaalin vääristymistä pyritään minimoimaan moduloimalla tai A/D-muuntamalla signaali ennen kuin se ylittää erotussuojan. Erotus- ja modulointimenetelmät vaihtelevat valmistajittain, mutta jokainen valmistaja käyttää vain yhtä erotus- ja modulointimenetelmää, taulukko 2.1.

Taulukko 2.1 Tarkastelun alla olevien valmistajien erotus- ja modulointimenetelmät

Valmistaja	Erutusmenetelmä	Modulointimenetelmä
Analog Devices	Induktiivinen	Amplitudimodulaatio
Intronics	Induktiivinen	Amplitudimodulaatio
Texas Instruments	Kapasitiivinen	Pulssisuhdemodulaatio
Avago Technologies	Optinen	$\Sigma\Delta$ -modulaatio

### 2.2.1 Induktiivinen erotus

Analog Devices:n ja Intronics:n käyttämä induktiivinen erotus toteutetaan kahdella kelalla, jotka ovat eri puolilla erotussuojaa. Kelojen välissä on fyysisen signaalinsiirron estävä eristys [4]. Tulosignaali moduloidaan ja tulopuolen kelan läpi kulkema virtasignaali tuottaa muuttuvan magneettikentän, joka indusoi lähtöpuolen kelaan virtasignaalin. Tämä signaali demoduloidaan ja alipäästösuodatetaan, jolloin lähdön signaali vastaa tulon signaalia. Kuvassa 2.1 on esitetty esimerkki induktiivisesta erotusvahvistimesta.



Kuva 2.1 Analog Devices:n AD215:n toiminnallinen lohkokaavio. [5]

Induktiiviset erotusvahvistimet toimivat nopeasti, mutta ne ovat alttiita ulkoisten magneettikenttien aiheuttamille häiriöille [4]. Tämän takia EMC-suojaus on tärkeää, jotta hyötysignaaliin ei indusoituisi häiriöitä.

## 2.2.2 Amplitudimodulaatio

Analog Devices ja Intronics käyttävät amplitudimodulaatiota. Amplitudimodulaatio, AM, on analogista modulointia, jossa hyötysignaalia kerrotaan korkeataajuisella kantaalla. Matemaattisesti kantaalto voidaan esittää yhtälöllä

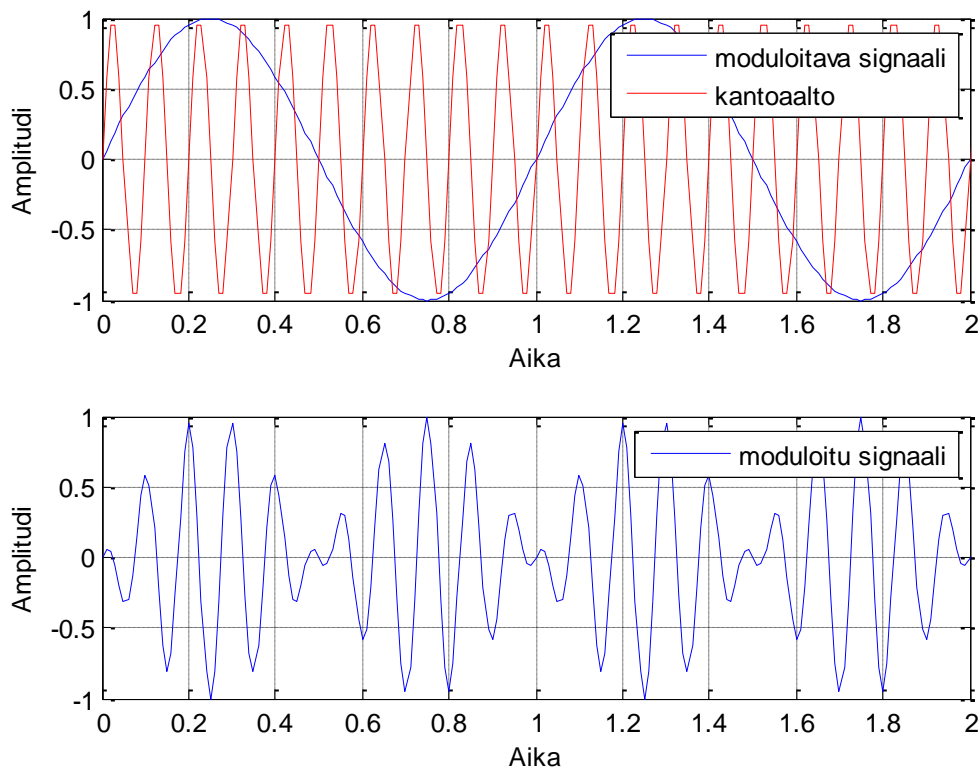
$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t), \quad (2.2)$$

missä  $A_c$  on kantaallon amplitudi,  $f_c$  kantaallon taajuus ja  $t$  aika. Kantaallon vaihesiirto moduloitavaan signaaliin nähden oletetaan yleensä nolaksi. Amplitudimoduloitu signaali voidaan esittää aikatasossa

$$s(t) = c(t)[1 + m(t)], \quad (2.3)$$

missä  $m(t)$  on moduloitava signaali. [6]

Kuvassa 2.2 on esitetty esimerkki amplitudimoduloidusta signaalista.



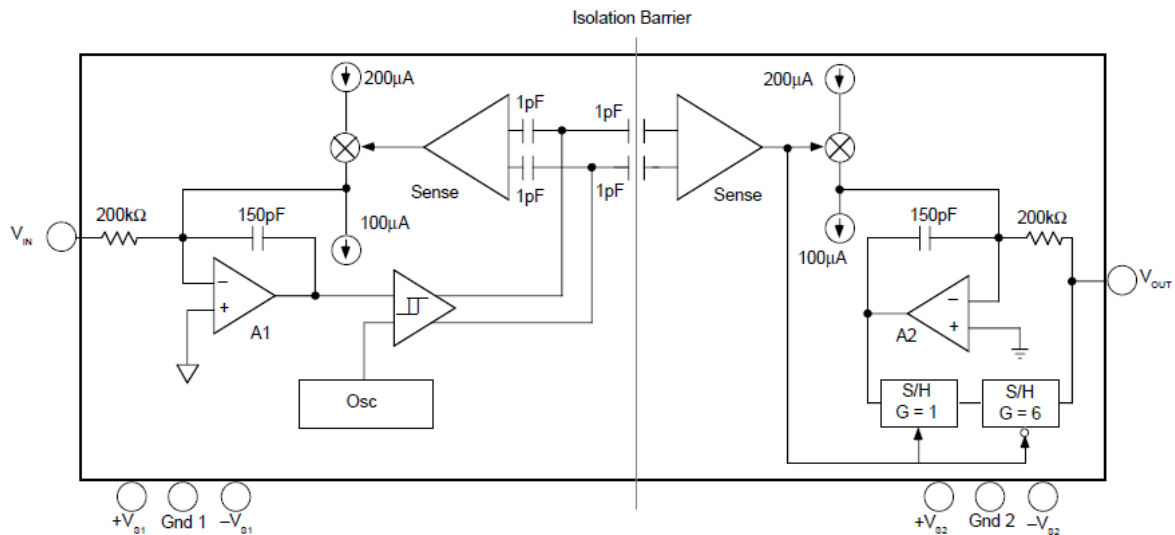
Kuva 2.2 Amplitudimoduloidun sinisignaalin kaksi jaksoa.

Kuva tukee yhtälöissä (2.2) ja (2.3) esitettyä amplitudimodulaation matemaattista mallia, jossa moduloitu signaali on moduloitavan signaalin ja kantaallon tulon ja kantaallon summa.



### 2.2.3 Kapasitiivinen erotus

Texas Instruments:n käyttämä kapasitiivinen erotus perustuu kahteen eri puolilla erotussuojaa olevaan kondensaattorilevyyn ja niiden välillä vaihtelevaan sähkökenttään. Tulosignaali moduloidaan, jonka jälkeen kondensaattorilevyt kuljettavat signaalin lähtöpuolelle erotussuojan ylitse. Tämä signaali demoduloidaan, jolloin lähdön signaali vastaa tulosignaalia. Kuvassa 2.3 on esimerkki kapasitiivisesta erotusvahvistimesta.



Kuva 2.3 Texas Instruments:n ISO124:n toiminnallinen lohkokkaavio. [7]

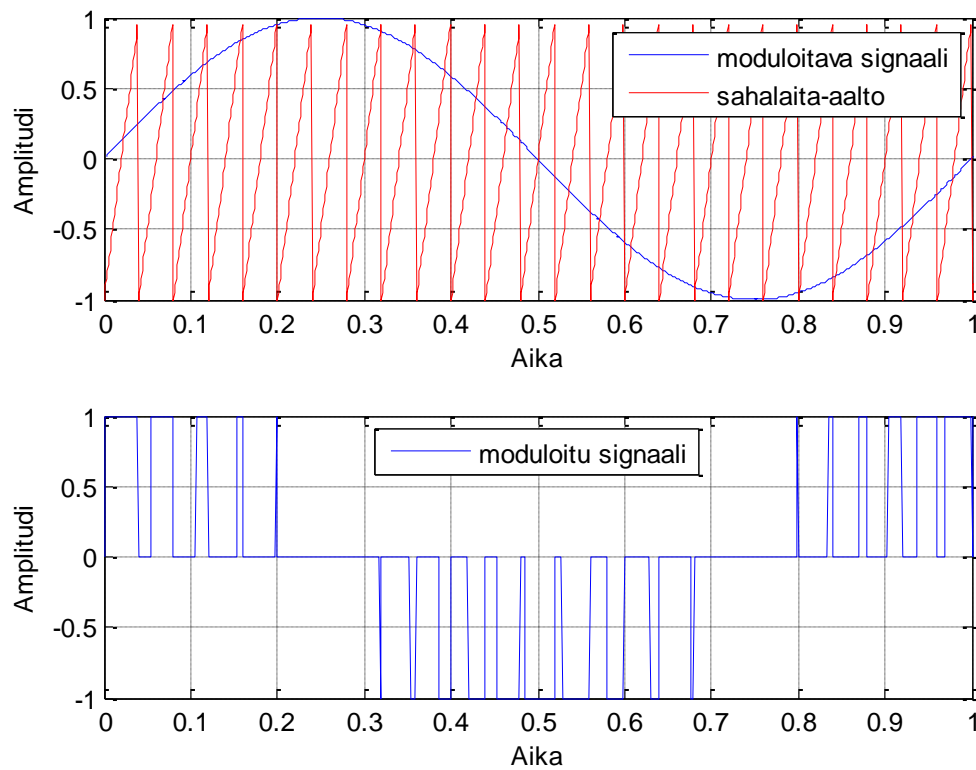
Kapasitiivisen erotustavan vahvuuksia ovat nopea tiedonsiirto ja immuuteetti magneettisille häiriöille, mutta heikkoutena on alttius sähköisille häiriöille. EMC-suojauksella voidaan estää ulkoisten kenttien häiriöt, joten siihen täytyy kiinnittää huomiota käytettäessä kapasitiivista erotusvahvistinta. [4]

### 2.2.4 Pulssisuhdemodulaatio

Texas Instruments käyttää pulssisuhdemodulaatiota. Pulssisuhdemodulaatiossa, PWM, kuorman jännitettä säädetään pulssisuhdetta muuntelemalla siten, että modulointisignaalin arvo on lähtösignaalin yhden jakson keskiarvo. Pulssisuhdetta kuvataan yhtälöllä

$$D = \frac{\tau}{T}, \quad (2.4)$$

missä  $\tau$  on aika, jonka funktio on aktiivinen ja  $T$  on funktion jaksonaika. [8] Yleisesti funktiona käytetään joko kolmioaaltoa tai sahalaita-aaltoa ja pulssisuhde kuvataan prosenteissa. Kuvassa 2.4 on esitetty esimerkki pulssisuhdemoduloidusta sinisignaalista.

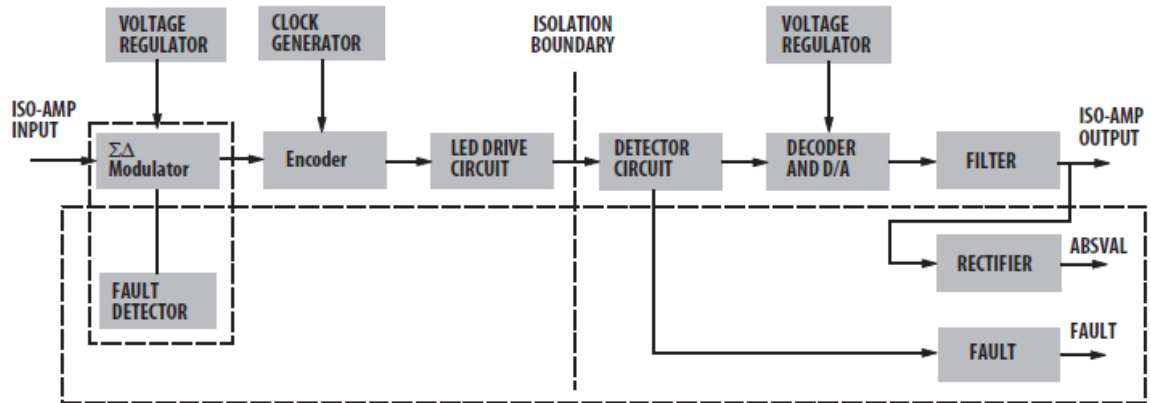


Kuva 2.4 Pulssisuhdemoduloidun sinisignaalin yksi jakso.

Pulssisuhdemodulaation toimintaperiaate näkyy kuvasta 2.4. Moduloitu signaali on modulointavan signaalin, tässä tapauksessa sinisignaali, maksimi- tai minimiamplitudin suuruinen, kun sahalaite-aallon amplitudin itseisarvo on suurempi kuin sinisignaalin amplitudin itseisarvo. Vastaavasti sahalaite-aallon amplitudin itseisarvon ollessa pienempi kuin sinisignaalin amplitudin itseisarvo, moduloidun signaalin suuruus on 0.

### 2.2.5 Optinen erotus

Avago Technologies:n käyttämässä optisessa erotuksessa käytetään eri puolilla erotussuojaa olevia LED:ia ja fotodiodia. Tulon signaali A/D-muunnetaan  $\Sigma\Delta$ -modulaatiolla, jonka jälkeen tulopuolen LED tuottaa valoa, kun sen yli vaikuttaa sille ominaista kynnysjännitettä suurempi jännite. Fotodiodi vastaanottaa LED:n tuottaman valon ja muuntaa sen takaisin jännitesignaalksi, joka D/A-muunnetaan, jolloin lähdöstä saadaan tulosignaali. Kuvassa 2.5 on esimerkki optisesta erotusvahvistimesta.

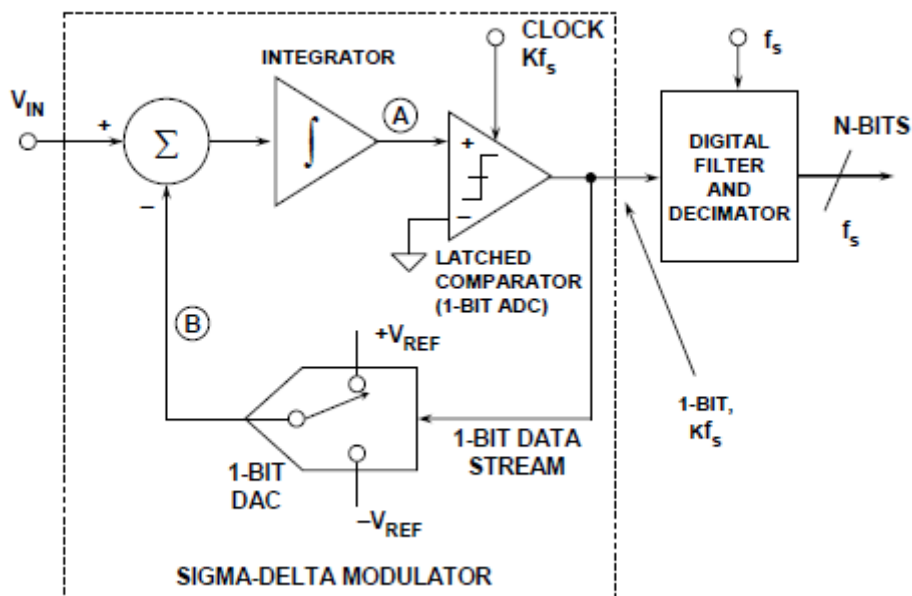


Kuva 2.5 Avago Technologies:n HCPL-7800:n lohkokkaavio. [9]

Optisten erotusvahvistimien heikkous on hidas siirtonopeus, johon vaikuttavat LED:n kytkeytymisnopeus ja LED:n kuluminen. Optisten erotusvahvistimien vahvuuksia sen sijaan ovat niiden immuuteetti sähköisille ja magneettisille häiriöille [4]. Tämän takia EMC-suojaus ei vaadi niin suurta huomiota kuin kapasitiivista tai induktiivista erotusvahvistinta käytettäessä.

## 2.2.6 $\Sigma\Delta$ -modulaatio

Avago Technologies käyttää  $\Sigma\Delta$ -modulaatiota. 1. asteen  $\Sigma\Delta$ -modulaattori koostuu komparaattorista, kytkimestä, summaimesta, integraattorista, jännitereferenssistä sekä digitaalipiiristä, joka toimii alipäästösuodattimena, kuva 2.6.



Kuva 2.6 1. asteen  $\Sigma\Delta$ -modulaattorin lohkokkaavio. [10]

$\Sigma\Delta$ -modulaattori toimii seuraavalla tavalla: tulon tasajännite kulkee integraattorin läpi komparaattorille, jonka lähtö takaisinkytketään kytkimen läpi summaimelle. Negatiivinen takaisinkytkentä pakottaa kytkimen lähdön yhtä suureksi kuin koko systeemin tulojännite. Komparaattorin lähdön bittien arvot määräävät kytkimen lähdön; kun tulosignaali lähestyy positiivista jännitereferenssiä, tilan 1 bittien määrä bittijonossa kasvaa. Vastaavasti tulosignaalin lähestyessä negatiivista jännitereferenssiä, tilan 0 bittien määrä bittijonossa kasvaa. [10]

### 3. EROTUSVAHVISTIMILLE TYYPILLISIÄ KÄYTTÖKOhteITA

Erotusvahvistimille tyypillisiä käyttökohteita löytyy pääsääntöisesti lääketieteestä ja teollisuudesta. Tyypillisiä lääketieteen sovelluksia ovat sikiöiden sydämenlyöntien tarkkailu, monikanavainen ECG-tallennus ja lääketieteelliset mittaukset. Vastaavasti teollisuuden käyttökohteita ovat teollisuusympäristöjen maapiirien poistaminen, erilaisten prosessien säätö, datankeruujärjestelmien korkeajännitesuojaus, prosessisignaalien eristys, SCR-moottorisäätö, eristetyt termoparisovellukset, prosessien instrumentointi, pienien jännitesignaalien (millivolttien luokkaa) vahvistus ja eristys, jännitteen ja virran mittaaminen vaihtovirta- ja servomoottorikäytössä, tuuliturbiinien invertterisovellukset ja korkeajännitteinen instrumentointivahvistin. [5], [7], [9], [11]-[23]

Suurin osa erotusvahvistimille tyypillisistä käyttökohteista sijoittuu teollisuusympäristöihin. Muitakin käyttökohteita tietenkin on, esimerkiksi ihmisten elintoimintoja tarkkailevissa sairaalalaitteissa, muun muassa EEG:ssä, erotusvahvistin on elintärkeä komponentti sen tarjoaman galvaanisen erotuksen ansiosta.

### 4. VERTAILU

Vertailun alla olevat valmistajat ovat Analog Devices, Intronic, Texas Instruments ja Avago Technologies, joilta löytyy yhteensä 18 erilaista analogista erotusvahvistinta. Vertailtavia asioita ovat kappalehinta, taajuuskaista, CMRR, vahvistus, erotusjännite, käyttöjännite, tulojännite, lähtöjännite, käyttölämpötila, slew rate, tulon ja lähdön välisen vuotovirran maksimiarvo, tulovirta, differentiaalinen tuloimpedanssi, yhteismuotoinen tuloimpedanssi sekä tulon häiriöjännite. Kaikki arvot on mitattu 25°C:n lämpötilassa. CMRR esitetään 60Hz:n taajuudella ja erotusjännite sekä vuotovirta tehollisarvoina. Tulo-, lähtö-, ja käyttöjännitteet esitetään tasajännitteinä ja maksimiarvoina. Aluksi vertaillaan jokaisen valmistajan erotusvahvistimia erikseen, jonka jälkeen valitaan jokaiselta valmistajalta yksi erotusvahvistin lopulliseen valmistajien väliseen vertailuun.

#### 4.1 Analog Devices

Analog Devices:ltä löytyy kuusi kaupallista erotusvahvistinta; AD202, AD203, AD204, AD208, AD210 ja AD215. Niiden komponenttiarvot on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Analog Devices:n erotusvahvistimien kappalehinnat ja komponenttiarvot. [5], [11]-[14], [24]

	AD202	AD203	AD204	AD208	AD210	AD215
kappalehinta	44,79€	94,84€	35,12€	72,16€	74,73€	53,07€
taajuuskaista	2kHz	10kHz	5kHz	4kHz	20kHz	120kHz
CMRR	130dB	120dB	130dB	120dB	120dB	120dB
vahvistus	1-100	1-100	1-100	1-1000	1-100	1-10
erotusjännite	1500V	1500V	1500V	1500V	2500V	1500V
käyttöjännite	±15V	±15V	±15V	±8V	±15V	±15V
tulojännite	±5V	±10V	±5V	±5V	±15V	±10V
lähtöjännite	±6,5V	±10V	±6,5V	±6,5V	±10V	±10V
käyttölämpötila	-40...85°C	-55...125°C	-40...85°C	-40...85°C	-40...85°C	-40...85°C
slew rate	-	0,5V/μs	-	0,1 V/μs	1 V/μs	6 V/μs
vuotovirta	2μA	4μA	2μA	2μA	2μA	2μA
tulovirta	30pA	30pA	30pA	10nA	30pA	300nA
differentiaalinen tuloimpedanssi	10 <sup>12</sup> Ω	10 <sup>12</sup> Ω	10 <sup>12</sup> Ω	15MΩ	10 <sup>12</sup> Ω	16MΩ
yhteismuotoinen tuloimpedanssi	2G Ω 4,5pF	2G Ω 4,5pF	2G Ω 4,5pF	2G Ω 5pF	5G Ω 5pF	2G Ω 4,5pF
tulon häiriöjännite	$\frac{50nV}{\sqrt{Hz}}$	$\frac{50nV}{\sqrt{Hz}}$	$\frac{50nV}{\sqrt{Hz}}$	1μV <sub>p-p</sub>	$\frac{18nV}{\sqrt{Hz}}$	$\frac{20nV}{\sqrt{Hz}}$

Analog Devices:n erotusvahvistimien hinnat vaihtelevat melko paljon, ja edullisin niistä on AD204 35,12€:n hinnallaan. AD215 on selkeästi paras 120kHz:n taajuuskaistallaan, AD202:n ollessa heikoin 2kHz:n taajuuskaistallaan. CMRR:n suhteen erot ovat pieniä, AD202:n ja AD204:n 130dB:n CMRR on 10dB:ä suurempi kuin muiden erotusvahvistimien vastaavat arvot. Analog Devices:n erotusvahvistimissa on säädettävät vahvistukset, AD215:n vahvistusskaala on pienin, 1-10, ja AD208:n vahvistusskaala suurin, 1-1000. Parhaaseen erotusjännitteen arvoon ylittää AD210, 2500V, muiden erotusvahvistimien erotusjännitteiden ollessa 1500V. Jokaisessa Analog Devices:n erotusvahvistimessa on kaksipuoleiset käyttö-, tulo- sekä lähtöjännitteet. AD208:ssa on pienin käyttöjännitealue, ±8V, muissa erotusvahvistimissa käyttöjännitealue on ±15V. Suurin tulojännitealue on AD210:ssa, ±10V, ja pienin AD202:ssa, AD204:ssa sekä AD208:ssa, ±5V. Lähtöjännitteiden puitteissa Analog Devices:n erotusvahvistimissa on kaksi vaihtoehtoa:

AD202:n, AD204:n ja AD208:n  $\pm 6,5V$  tai AD203:n, AD210:n ja AD215:n  $\pm 10V$ . AD203:ssa on suurin käyttölämpötilaskaala,  $-55...125^{\circ}C$ . Muiden erotusvahvistimien käyttölämpötilaskaala on  $-40...85^{\circ}C$ . AD215:ssa on paras slew rate,  $6V/\mu s$ . AD202:n ja AD204:n slew rateja ei ole mainittu. AD203:ssa on suurin tulon ja lähdön välinen vuotovirta,  $4\mu A$ , muissa erotusvahvistimissa vuotovirta on  $2\mu A$ . AD202, AD203, AD204 ja AD210 tarjoavat  $30pA$ :n tulovirran ja  $10^{12}\Omega$ :n differentiaalisen tuloimpedanssin, AD208:ssa vuotovirta on  $10nA$  ja differentiaalinen tuloimpedanssi  $15M\Omega$ , AD215:ssa vastaavat arvot ovat  $300nA$  ja  $16M\Omega$ . Suurin yhteismuotoinen tuloimpedanssi on AD210:lla,  $5G\Omega$   $5pF$ . AD208:lla se on  $2G\Omega$   $5pF$  ja muille erotusvahvistimilla  $2G\Omega$   $4,5pF$ . AD208:n tulon häiriöjännite on  $1\mu V_{p-p}$ , muiden erotusvahvistimien tulon häiriöjännitteet ovat taajuuden funktiona, joista pienin on AD210:n  $18nV$  jaettuna taajuuden neliöjuurella.

Analog Devices:n erotusvahvistimet ovat hyvin samankaltaisia, suurimmat erot ovat taajuuskaistoissa ja hinnoissa. Toki muissakin komponenttiarvoissa on eroja, mutta ne eivät ole merkittävän suuria. Valitaan AD215 edustamaan Analog Devices:ä valmistajien välisessä vertailussa sen  $120kHz$ :n taajuuskaistan ja  $6V/\mu s$  slew raten takia.

## 4.2 Intronics

Intronics:lta löytyy neljä kaupallista erotusvahvistinta, mallit 284, 286, 289 ja 290. Niiden komponenttiarvot on esitetty taulukossa 4.2, jossa tulojännite ja tulon häiriöjännite ovat tehollisarvoina ja lähtöjännitteet poikkeuksellisesti minimiarvoina.

Taulukko 4.2 Intronics:n erotusvahvistimien kappalehinnat ja komponenttiarvot. [15]-[17], [24]

	284	286	289	290
kappalehinta	292,34€	292,34€	292,34€	250,58€
taajuuskaista	1kHz	1kHz	20kHz	2,5kHz
CMRR	114dB	114dB	120dB	106dB
vahvistus	1-10	1-100	1-100	1-100
erotusjännite	2500V	2500V	2500V	1500V
käyttöjännite	±8,5V	±15V	±15V	±15V
tulojännite	240V <sub>RMS</sub>	240V <sub>RMS</sub>	120V <sub>RMS</sub>	110V <sub>RMS</sub>
lähtöjännite	±5V	±10V	±10V	±10V
käyttölämpötila	-25...85°C	-25...85°C	-15...75°C	-25...85°C
slew rate	25mV/μs	25mV/μs	140mV/μs	50mV/μs
vuotovirta	2μA	2,5μA	2μA	10μA
tulovirta	7nA	7nA	75nA	3nA
differentiaalinen tuloimpedanssi	10 <sup>8</sup> Ω 70pF	10 <sup>8</sup> Ω 150pF	10 <sup>8</sup> Ω 33pF	10 <sup>8</sup> Ω 70pF
yhteismuotoinen tuloimpedanssi	5*10 <sup>8</sup> Ω 20pF	5*10 <sup>8</sup> Ω 20pF	5*10 <sup>8</sup> Ω 20pF	5*10 <sup>8</sup> Ω 100pF
tulon häiriöjännite	10μV <sub>RMS</sub>	3μV <sub>RMS</sub>	3μV <sub>RMS</sub>	1,5μV <sub>RMS</sub>

Intronics:n erotusvahvistimet ovat hinnaltaan kalliita, malli 290 on halvin 250,58€:n hinnallaan. Intronics:n erotusvahvistimista suurimpaan taajuuskaistaan, 20kHz, yltää malli 289. 289:lla on myös suurin CMRR, 120dB. Myös Intronics:n erotusvahvistimissa on säädettävät vahvistukset; 284:ssa on pienin vahvistusskaala, 1-10, muissa malleissa vahvistusskaala on 1-100. Malleissa 284, 286 ja 289 on 2500V:n erotusjännite, sen sijaan mallissa 290 erotusjännite on 1500V. Intronics:n erotusvahvistimissa on kaksipuoleiset käyttö- ja lähtöjännitteet, malleissa 286, 289 ja 290 käyttöjännite on ±15V ja lähtöjännite ±10V. Mallissa 284 käyttöjännite on ±8,5V ja lähtöjännite ±5V. Tulojännitteet ovat tehollisarvoina, malleissa 284 ja 286 tulojännite on suuri, 240V. Käyttölämpötilan suhteen kaikki mallit ovat melko tasavertaisia, malleissa 284, 286 ja 290 käyttölämpötilaskaala on -25...85°C ja mallissa 289 -15...85°C. Mallissa 289 on suurin slew rate, 150mV/μs. Malleissa 284 ja 289 on pienimmät tulo- ja lähdön väliset vuotovirrat, niiden tehollisarvojen ollessa 2μA. Malli 290 sen sijaan tarjoaa pienimmän tulovirran, joka on 3nA. Myös malleissa 284 ja 286 on erittäin pienet tulovirrat, 7nA. Malleissa 284 ja 290 differentiaalinen tuloimpedanssi on 10<sup>8</sup>Ω 70pF, mallissa 286 10<sup>8</sup>Ω 150pF ja mallissa 289

$10^8\Omega$  33pF. Yhteismuotoinen tuloimpedanssi on malleissa 284, 286 ja 289 sama,  $5 \cdot 10^8\Omega$  20pF. Mallissa 290 se on  $5 \cdot 10^8 \Omega$  100pF. Jokaisessa Intronic:n mallissa tulon häiriöjännite on tehollisarvoltaan mikrovolttien luokkaa; malleissa 286 ja 289  $3\mu\text{V}$ , mallissa 284  $10\mu\text{V}$  ja mallissa 290  $1,5\mu\text{V}$ .

Intronic:n erotusvahvistimet ovat etenkin hinnoiltaan samanlaisia. Suurimmat erot löytyvät tulojännitteistä ja slew rateista. Valitaan malli 289 edustamaan Intronic:a valmistajien välisessä vertailussa sen 20kHz:n taajuuskaistan, 120dB:n CMRR:n ja  $140\text{mV}/\mu\text{s}$  slew raten takia.



### 4.3 Texas Instruments

Texas Instruments:lta löytyy neljä kaupallista erotusvahvistinta; ISO120, ISO121, ISO122 ja ISO124. Komponenttiarvot ja kappalehinnat on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3 Texas Instruments:n erotusvahvistimien kappalehinnat ja komponenttiarvot. [7], [18], [19], [24]

	ISO120	ISO121	ISO122	ISO124
kappalehinta	97,52€	34,49€	1,12€	0,31€
taajuuskaista	60kHz	60kHz	50kHz	50kHz
CMRR	115dB	115dB	140dB	140dB
vahvistus	1	1	1	1
erotusjännite	1500V	3500V	1500V	1500V
käyttöjännite	±18V	±18V	±18V	±18V
tulojännite	±100V	±100V	±100V	±100V
lähtöjännite	±12,5V	±12,5V	±12,5V	±12,5V
käyttölämpötila	-55...125°C	-55...125°C	-25...85°C	-25...85°C
slew rate	2V/μs	2V/μs	2V/μs	2V/μs
vuotovirta	0,5μA	0,5μA	0,5μA	0,5μA

Kappalehinnan suhteen Texas Instruments:n erotusvahvistimissa on valtavia eroja; kallein malli, ISO120, maksaa 97,52€ ja halvin malli, ISO124, 0,31€. ISO120:ssa ja ISO121:ssa on 60kHz:n taajuuskaistat, ISO122:ssa ja ISO124:ssa 50kHz. Suurin CMRR on ISO122:ssa ja ISO124:ssa, 140dB. ISO120:ssa ja ISO121:ssa CMRR on 115dB. Jokaisessa Texas Instruments:n erotusvahvistimessa vahvistus on 1. ISO121:ssa on suurin erotusjännite, 3500V, muissa malleissa erotusjännite on 1500V. Kaikissa Texas Instruments:n mallissa on samat käyttö-, tulo- ja lähtöjännitteet. Käyttöjännite on ±18V, tulojännite ±100V ja lähtöjännite ±12,5V. ISO120:ssa ja ISO121:ssa on suurin käyttölämpötilaskaala, -55...125°C. ISO122:ssa ja ISO124:ssa se on -25...85°C. Jokaisessa mallissa on sama slew rate, 2V/μs. Myös tulon ja lähdön välinen vuotovirta on kaikissa malleissa sama, 0,5μA.

Texas Instruments:n erotusvahvistimet ovat hyvin tasaväkisiä komponenttiarvojen suhteen. Hintoja lukuunottamatta mallit ISO122 ja ISO124 ovat identtisiä. Sen lisäksi mallit ISO120 ja ISO121 poikkeavat vain erotusjännitteen ja hinnan suhteen, mutta ovat muuten identtisiä. Valitaan ISO124 edustamaan Texas Instruments:a valmistajien välisessä vertailussa sen alhaisen 0,31€:n hinnan ja äärimmäisen korkean 140dB:n CMRR:n takia.

#### 4.4 Avago Technologies

Avago Technologies:lta löytyy 12 erotusvahvistinta; ACPL-790B, ACPL-790A, ACPL-7900, ACPL-C78A, ACPL-C780, ACPL-C784, ACPL-C79B, ACPL-C79A, ACPL-C790, HCPL-7800A, HCPL-7800 ja HCPL-7840. Vaikka erotusvahvistimia on näin monta, todellisuudessa erilaisia erotusvahvistimia on neljä kappaletta. Keskenään täysin samanlaisia ovat: ACPL-790B, ACPL-790A, ACPL-7900, ACPL-C79B, ACPL-C79A ja ACPL-C790. Merkitään näitä erotusvahvistimia vertailussa ACPL-7900:lla. Myös ACPL-C78A, ACPL-C780 ja ACPL-C784 ovat keskenään identtisiä, merkitään näitä erotusvahvistimia ACPL-C780:lla. Vastaavasti samanlaisia malleja ovat myös HCPL-7800A ja HCPL-7800, merkitään niitä HCPL-7800:lla. Edellämainittujen neljän erilaisen erotusvahvistimen komponenttiarvot ja kappalehinnat on esitetty taulukossa 4.4.

Taulukko 4.4 Avago Technologies:n erotusvahvistimien kappalehinnat ja komponenttiarvot. [9], [20]-[24]

	ACPL-7900	ACPL-C780	HCPL-7800	HCPL-7840
kappalehinta	0,02€	0,03€	7,04€	4,14€
taajuuskaista	200kHz	100kHz	100kHz	100kHz
CMRR	76dB	76dB	76dB	76,1dB
vahvistus	8,2	8	8	8
erotusjännite	5000V	5000V	3750V	3750V
käyttöjännite	-0,5...6V	0...5,5V	0...5,5V	0...5,5V
tulojännite	±2V	±2V	±2V	±2V
lähtöjännite	-0,5...6,5V	-0,5...6V	-0,5...6V	-0,5...6V
käyttölämpötila	-40...105°C	-40...85°C	-40...85°C	-40...85°C
tulovirta	0,1µA	0,5 µA	0,5 µA	0,5 µA

Avago Technologies:n erotusvahvistimet ovat erittäin halpoja; kallein malli, HCPL-7800, maksaa 7,04€ ja halvin malli, ACPL-7900, maksaa 0,02€. ACPL-7900:ssa on suurin taajuuskaista, 200kHz. Muissa malleissa taajuuskaista on 100kHz. HCPL-7840:ssa on suurin CMRR, 76,1dB, muissa malleissa CMRR on 76dB. Vahvistuksen suhteen paras malli on ACPL-7900, 8,2. Muiden mallien vahvistus on 8. Suurin erotusjännite, 5000V, löytyy malleista ACPL-7900 ja ACPL-C780. Myös malleissa HCPL-7800 ja HCPL-7840 on suuri erotusjännite, 3750V. Avago Technologies:n erotusvahvistimissa käyttöjännitevaihtoehtoja on kaksi; -0,5...6V, malli ACPL-7900, tai 0...5,5V, mallit ACPL-C780, HCPL-7800 ja HCPL-7840. Kaikissa malleissa tulojännite on ±2V. Mallissa ACPL-7900 lähtöjännitealue on -0,5...6,5V ja malleissa ACPL-C780, HCPL-7800 ja HCPL-7840 -0,5...6V. Suurin käyttölämpötilaskaala löytyy mallista ACPL-7900, -40...105°C. Muissa

malleissa käyttölämpötilaskaala on  $-40...85^{\circ}\text{C}$ . Pienimmän tulovirran tarjoaa malli ACPL-7900;  $0,1\mu\text{A}$ . Muiden mallien tulovirta on  $0,5\mu\text{A}$ .

Avago Technologies:n erotusvahvistimet ovat komponenttiarvoiltaan hyvin tasaväkisiä. Suurimmat erot ovat erotusjännitteissä ja taajuuskaistoissa. Mallit HCPL-7800 ja HCPL-7840 ovat hintaa ja CMRR:n  $0,1\text{dB}$ :n eroa lukuunottamatta identtisiä. Kaikki ACPL-alkuiset mallit maksavat vain senttejä ja niillä on paremmat komponenttiarvot kuin kalliimmilla HCPL-alkuisilla malleilla. Valitaan ACPL-7900 edustamaan Avago Technologies:a valmistajien välisessä vertailussa sen alhaisen  $0,02\text{€}$ :n hinnan,  $200\text{kHz}$ :n taajuuskaistan ja  $0,1\mu\text{A}$ :n tulovirran takia.

#### 4.5 Valmistajien välinen vertailu

Jokaiselta valmistajalta on valittu yksi erotusvahvistin valmistajien väliseen vertailuun; Analog Devices:lta AD215, Intronic:lta 289, Texas Instruments:lta ISO124 ja Avago Technologies:lta ACPL-7900. Niiden komponenttiarvot ja kappalehinnat on esitetty taulukossa 4.5.

Taulukko 4.5 Eri valmistajien parhaiden erotusvahvistimien kappalehinnat ja komponenttiarvot. [5], [16], [7], [20], [24]

	AD215	289	ISO124	ACPL-7900
valmistaja	Analog Devices	Intronics	Texas Instruments	Avago Technologies
kappalehinta	53,07€	292,34€	0,31€	0,02€
taajuuskaista	120kHz	1kHz	50kHz	200kHz
CMRR	120dB	114dB	140dB	76dB
vahvistus	1-10	1-100	1	8,2
erotusjännite	1500V	2500V	1500V	5000V
käyttöjännite	±15V	±15V	±18V	-0,5...+6V
tulojännite	±10V	240V <sub>RMS</sub>	±100V	±2V
lähtöjännite	±10V	väh. ±10V	±12,5V	-0,5...+6,5V
käyttölämpötila	-40...85°C	-25...85°C	-55...125°C	-40...105°C
slew rate	6 V/μs	25mV/μs	2V/μs	
vuotovirta	2μA	2,5μA	0,5μA	
tulovirta	300nA	7nA		100nA
differentiaalinen tuloimpedanssi	16M Ω	10 <sup>8</sup> Ω 150pF		
yhteismuotoinen tuloimpedanssi	2GΩ 4,5pF	5*10 <sup>8</sup> Ω 20pF		
tulon häiriöjännite	$\frac{20nV}{\sqrt{Hz}}$	3μV <sub>RMS</sub>		

Hintojen suhteen valmistajien väliset erot ovat merkittäviä: kallein erotusvahvistin, Intronic:n malli 289, maksaa 292,34€ ja halvin, Avago Technologies:n ACPL-7900, maksaa 0,02€. ACPL-7900 on paras myös taajuuskaistaltaan, joka on 200kHz. 289:ssä on pienin taajuuskaista, joka on 1kHz. Suurin CMRR löytyy Texas Instruments:n ISO124:sta, 140dB, ja pienin CMRR ACPL-7900:sta, 76dB. Analog Devices:n AD215:ssä ja Intronic:n mallissa 289 on säädettävät vahvistukset, ACPL-7900:ssä kiinteä vahvistus ja ISO124:ssä vahvistusta ei ole lainkaan. Mallin 289 vahvistusalue on suurin, 1-100. ACPL-7900:ssä on ylivoimaisesti suurin erotusjännite, 5000V, joka on toiseksi suurinta,

malli 289, erotusjännitettä kaksi kertaa suurempi. ISO124:ssa on suurin käyttöjännitteen maksimiarvo,  $\pm 18V$ , ja ACPL-7900:ssa pienin,  $-0,5...6V$ . Mallissa 289 on suurin tulojännite,  $240V_{RMS}$ . Myös ISO124:ssa on suuri tulojännite,  $\pm 100V$ , sen sijaan pienin tulojännite löytyy ACPL-7900:sta,  $\pm 2V$ . ISO124:ssa on suurin lähtöjännite,  $\pm 12,5V$ , ja ACPL-7900:ssa pienin,  $-0,5...6,5V$ . Mallin 289 lähtöjännitteen maksimiarvoa ei tiedetä, mutta valmistaja lupaa vähintään  $\pm 10V$ . ISO124:ssa on laajin käyttölämpötilaskaala,  $-55...125^{\circ}C$ , ja 289:ssa suppein,  $-25...85^{\circ}C$ . AD215:ssa on selvästi suurin slew rate,  $6V/\mu s$ , ja 289:ssa pienin,  $25mV/\mu s$ . ISO124:ssa on pienin tulon ja lähdön välinen vuotovirta,  $0,5\mu A$ , ja 289:ssa suurin,  $2,5\mu A$ . Mallissa 289 on selvästi pienin tulovirta,  $7nA$ , ja AD215:ssa suurin,  $300nA$ . 289:ssa on suurempi differentiaalinen ja yhteismuotoinen tuloimpedanssi,  $10^8\Omega$   $150pF$  ja  $5 \cdot 10^8\Omega$   $20pF$ , kuin AD215:ssa,  $16M\Omega$  ja  $2G\Omega$   $4,5pF$ . AD215:ssa on pienempi tulon häiriöjännite,  $20nV$  taajuuden neliötä kohti, kuin 289:ssa,  $3\mu V_{RMS}$ .

Eri valmistajien erotusvahvistimissa on paljon eroja erotus- ja modulointimenetelmistä lähtien. Suurimmat erot löytyvät hinnoista, taajuuskaistoista, CMRR:sta, vahvistuksista, tulojännitteistä ja slew rateista. Tasaväkisiä eri valmistajien erotusvahvistimet ovat käyttö-, ja lähtöjännitteiden, käyttölämpötilojen ja vuotovirtojen suhteen.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Vaikka eri valmistajien erotusvahvistimilla on paljon eroja, ei ehdottomasti parasta erotusvahvistinta voida valita, vaan jokaisella eri erotusvahvistimella on omat vahvuutensa ja käyttökohteensa. Esimerkiksi Intronics:n 289 on taajuuskaistansa puolesta riittämätön teollisuuden sovelluksiin, mutta sairaalalaitteiden tarpeisiin  $1kHz$ :n taajuuskaista riittää hyvin. Vastaavasti Avago Technologies:n ACPL-7900 soveltuu  $200kHz$ :n taajuuskaistallaan teollisuuden sovelluksiin, mutta  $76dB$ :n CMRR:nsä takia sillä ei ole juurikaan käyttöä sairaalalaitteissa, joissa potilaan galvaaninen erotus ja korkea CMRR, yli  $90dB$ , ovat erityisen tärkeitä.

Vertailujen avulla saadaan käsitys siitä, millaisia analogisia erotusvahvistimia on olemassa ja minkä hintaisia ne ovat. Nykyiset analogiset erotusvahvistimet eivät välttämättä ole tarpeeksi hyviä kaikkiin sovelluksiin, mutta niitä sovelluksia varten on olemassa myös digitaalisia erotusvahvistimia. Digitaalisia erotusvahvistimia on huomattavasti analogisia erotusvahvistimia enemmän, esimerkiksi pelkästään Texas Instruments:lta löytyy digitaalisia erotusvahvistimia 59 erilaista. [25] Digitaalisten erotusvahvistimien käsittely ei kuitenkaan kuulu tämän kandidaatintyön aihepiiriin.

## 6. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä esiteltiin erotusvahvistimien erilaisten erotus- ja modulointimenetelmien toimintaperiaatteet sekä erotusvahvistimille erittäin tärkeä ominaisuus, CMRR. Lisäksi kartoitettiin kaupallisten analogisten erotusvahvistimien tyypillisiä käyttökohteita, hintoja ja tämänhetkisiä komponenttiarvoja. Neljältä valmistajalta löytyy kaiken kaikkiaan 18 erilaista analogista erotusvahvistinta. Niitä vertailemalla saatiin käsitys tämänhetkisten analogisten erotusvahvistimien suorituskyvyistä. Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin analogisia erotusvahvistimia, joten luonnollinen tutkimuksen jatke olisi digitaalisten erotusvahvistimien ominaisuuksien määrittäminen.

## LÄHTEET

- [1] S. C. Tang, S. Y. R. Hui, H. Chung, "A low-profile wide-band three-port isolation amplifier with coreless printed-circuit-board (PCB) transformers", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 6, s. 1180-1187, 2001
- [2] J. Sacristan, M. T. Oses, "Low noise amplifier for recording ENG signals in implantable systems", *Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and System, 2004. ISCAS '04.* vol. 4, 2004
- [3] R. Pallas-Areny, J. Webster, "Common mode rejection ratio in differential amplifiers", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, no. 4, s. 669-676, 1991
- [4] National Instruments, "Isolation technologies for reliable industrial measurements", <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3546>, muokattu 19.4.2010, viitattu 20.10.2011
- [5] Analog Devices, "120kHz bandwidth, low distortion isolation amplifier: AD215", Norwood, 1997
- [6] National Instruments, "Amplitude Modulation", <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3002>, muokattu 18.10.2008, viitattu 31.10.2011
- [7] Texas Instruments, "Precision lowest-cost isolation amplifier: ISO124", Dallas, 2010
- [8] J. Millman, A. Grabel, *Microelectronics*, 2. painos, McGraw-Hill, 1987, s. 686
- [9] Avago Technologies, "Isolation amplifier: HCPL-7800A/HCPL-7800", San Jose, 2008
- [10] W. Kester, "ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics", <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-022.pdf>, muokattu 9.2.2009, viitattu 20.10.2011
- [11] Analog Devices, "Low cost, miniature isolation amplifiers: AD202/AD204", Norwood, 2002
- [12] Analog Devices, "Rugged, military temperature range, 10kHz bandwidth isolation amplifier: AD203SN", Norwood, 2002
- [13] Analog Devices, "High precision, low offset, mV input isolation amplifier: AD208", Norwood, 2002
- [14] Analog Devices, "Precision, wide bandwidth 3-port isolation amplifier: AD210", Norwood, 2010

- [15] Intronics, "High CMV, high performance isolation amplifiers: models 284J, 286J, 281", Norwood, 2010
- [16] Intronics, "Precision, wide bandwidth, synchronized isolation amplifier: model 289", Norwood, 2010
- [17] Intronics, "Low cost, single and multichannel isolation amplifier: model 290A, 292A", Norwood, 2010
- [18] Texas Instruments, "Precision low cost isolation amplifier: ISO120, ISO121", Dallas, 2009
- [19] Texas Instruments, "Precision lowest cost isolation amplifier: ISO122", Dallas, 2011
- [20] Avago Technologies, "Precision isolation amplifiers: ACPL-790B, ACPL-790A, ACPL-7900", San Jose, 2010
- [21] Avago Technologies, "Miniature isolation amplifiers: ACPL-C78A, ACPL-C780, ACPL-C784", San Jose, 2011
- [22] Avago Technologies, "Precision miniature isolation amplifiers: ACPL-C79B, ACPL-C79A, ACPL-C790", San Jose, 2011
- [23] Avago Technologies, "Isolation amplifier: HCPL-7840", San Jose, 2011
- [24] Newark, <http://www.newark.com>, viitattu 19.10.2011
- [25] Texas Instruments, <http://www.ti.com>, viitattu 1.12.2011