

Rauli Lauhanen

LINEAARIREGULAATTORIT

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Yliopistonlehtori Erja Sipilä
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Rauli Lauhanen: Lineaariregulaattorit
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikka, TkK
Toukokuu 2021

Jännitteen reguloinnilla tarkoitetaan sitä, että saatavilla olevasta sähköstä tehdään vakaampaa ja puhtaampaa tasajännitettä. Lineaariregulaattori on eräs tapa tuottaa laadukasta sähköä erilaisiin tarpeisiin.

Sähkölaitteet tarvitsevat toimiakseen riittävän hyvää sähköä. Väärä käyttöjännite voi hajottaa laitteen tai tuoda sen toimintaan virheitä. Esimerkiksi mittalaitteen mittaavan lohkon käyttöjännitteen puhtaus määrittelee käytännössä koko laitteen mittaustarkkuuden.

Moni mieltää lineaariregulaattoreiden olevan väistyvää ja vanhentunutta tekniikkaa, joita uudemmat hakkuriregulaattorit ovat vauhdilla syrjäyttämässä. Tässä on kuitenkin perspektiiviharha, koska hakkurien yleistyminen ja menestys ei ole mitenkään lineaariregulaattorien käytettävyydestä ja hyödyllisyydestä pois. Lineaariregulaattorit ovat nyt ja tulevaisuudessa tärkeitä komponentteja analogisia signaaleja käsiteltäessä tai kun jännitelähteeltä vaaditaan yksinkertaisuutta, luotettavuutta tai pientä kohinaa.

Puolijohdetekniikka kehittyi jatkuvasti ja tämä kehitys on auttanut myös lineaariregulaattoreita. Digitaalitekniikan yleistyminen on lisännyt tarpeita ja mahdollisuuksia kehittää lineaariregulaattoreita, joita voi ohjata ja valvoa digitaalisesti. Voisi sanoa, että lineaariregulaattori on tällä vuosikymmenellä saanut älyn.

Tässä työssä kerrotaan, mitä regulointi on ja mitä lineaariregulaattori tekee. Työssä käsitellään lineaariregulaattoriin liittyviä ominaisuuksia hyvän suorituskyvyn ja etenkin pienen kohinan aikaansaamiseksi. Lisäksi kerrotaan lineaariregulaattorin valintaan ja käyttöön liittyviä yleisiä asioita.

Työ sivuaa myös lineaariregulaattoriin liittyvää säätöteoriaa, koska takaisinkytkettynä järjestelmänä sen toiminnalliset ominaisuudet selittyvät hyvin klassisen säätöteorian avulla.

Avainsanat: Lineaariregulaattori, Lineaariregulaattorin kohina, Lineaariregulaattorin valintaperusteet

ALKUSANAT

Kirjoittaja on radioamatöörilaitteita tehdessään ja niitä mitatessaan huomannut, että kytkennän saaman käyttösähkön laadulla on merkittävä rooli kytkennän laadukkaassa toiminnassa. Tämän takia lineaariregulaattoreihin perehtyminen akateemisena tutkimuskohteena kiinnosti. Lisäksi tiesin, että joutuisin kertaamaan säätöteoriaa lineaariregulaattorin syvimmän olemuksen ymmärtämiseksi. Se oli minulle mieluinen haaste.

Työtä tehdessä minulle selvisi, millainen aarreaitta tiedonjanoiselle komponenttien laatuvalmistajien application notet ovat. Laatuvalmistajiin luen menneessä tai nykyisissä muodoissaan ainakin Texas Instrumentsin, Analog Devicesin ja Linear Technologiesin.

Haluan kiittää Erja Sipilää kannustavasta ja jaksavasta asenteesta, sekä äitiäni, Heikkiä ja Tuulaa patistamisestaan ja Marianne ja ruustinnaa kypsään ajatteluun rohkaisemisesta.

Huittisissa 25.05.2021

Rauli Lauhanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LINEAARIREGULAATTORI	4
2.1 Lineaariregulaattorin toimintaperiaate	5
2.2 Lineaariregulaattorin lohkojen esittely	6
3. LINEAARIREGULAATTORIN LOHKOT	7
3.1 Referenssilohko	7
3.2 Erovahvistin	9
3.3 PE, Pass element	9
3.4 Muita lineaariregulaattoreissa esiintyviä lohkoja	12
4. LINEAARIREGULAATTORITYYPIT	15
4.1 Sarjaregulaattori	15
4.2 Shunttiregulaattori	15
4.3 Wenzelin Finesse-regulaattori	16
4.4 Hybridi-regulaattorit	18
5. LINEAARIREGULAATTORI TAKAISINKYTKETTYNÄ JÄRJESTELMÄNÄ	19
5.1 Navat ja nollat Bode-diagrammissa	19
5.2 NPN-PE -regulaattorin bode-diagrammin tulkinta	20
5.3 LDO-regulaattorin bode-diagrammin tulkinta	21
6. KOHINA REGULAATTORISSA	23
6.1 Regulaattorin kohinan merkitys	23
6.2 Kohinan merkintätavat datasheeteissä	24
6.3 Lämpökohina eli terminen kohina	24
6.4 $1/f$ eli vaaleanpunainen kohina	25
6.5 Raekohina	27
6.6 Ulkoinen kohina	27
7. YHTEENVETO	29
LÄHTEET	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

β	Beta. Transistorin kantavirran virranvahvistuskerroin.
BJT	<i>Bipolar junction transistor</i> . Bipolaaritransistori. Eräs virtavahvistintyyppi.
CC	<i>Common collector</i> . Emitteriseuraaja, yhteiskollektorikytkentä. Eräs vahvistintopologia, jolle on ominaista suuri virtavahvistus ja pieni lähtöimpedanssi.
CE	<i>Common emitter</i> . Yhteisemitterikytkentä. Vahvistin-topologia, jolle on ominaista verrattain iso lähtöimpedanssi.
Darlington	Tavallista BJT-transistoria suurempaan virtavahvistukseen kykenevä transistoritopologia, jossa on suurempi kynnysjännite.
EA	<i>Error amplifier</i> . Erovahvistin. Differentiaalivahvistin, joka vertaa regulaattorin ulostulojännitettä referenssijännitteeseen ja antaa PE:lle ohjauksen.
EMC	<i>Electromagnetic compatibility</i> . Sähkömagneettinen yhteensopi- vuus. Pyrkimys siihen, että sähkölaite ei häiritse muita tai häiriinny itse.
ESR	<i>Effective series resistance</i> . Komponentin sarjaresistanssi.
FET	<i>Field effect transistor</i> . Kanavatransistori. Eräs jännitevahvistintyyppi.
IC	<i>Integrated Circuit</i> . Mikropiiri. Elektroniikan komponentti, jossa monimutkaisempi toiminnallisuus on yhden piirin sisällä.
JFET	<i>Junction FET</i> . Liitoskanavatransistori. Eräs jännitevahvistintyyppi.
LDO	<i>Low-dropout</i> . Matalan jännite-eron regulaattori. Yleistyvin lineaari-regulaattorityyppi, jossa jännite-ero sisäänmenon ja ulostulon välillä on erityisen pieni.
PE	<i>Pass element</i> . Päästöelementti. Säädetty vastus, joka kontrolloi ulostulovirtaa. Yleensä tehotransistori.
PMOS	<i>P-channel metal oxide semiconductor</i> . P-kanavainen eristehilakanavatransistori.
PLL	<i>Phase locked loop</i> . Vaihelukittu silmukka. Eräs oskillaattorityyppi.
PSRR	<i>Power supply rejection ratio</i> . Hurinajännitevaimennussuhde.
SMPS	<i>Switched mode power supply</i> . Hakkuri. Eräs teholähde, jonka toiminta perustuu kelan läpi menevän virran katkomiseen.
VCO	<i>Voltage controlled oscillator</i> . Jänniteohjattu oskillaattori.
V_{REF}	<i>Reference voltage</i> . Referenssijännite. Mahdollisimman vakaaksi tehty jännite regulaattorin sisällä.

1. JOHDANTO

Sähkölaitteen saaman käyttöjännitteen laadulla on merkitystä laitteen suorituskyvyllä ja toiminnalla [1, s.1]. Esimerkiksi taskulampun polttimon hehkulanka saattaa palaa, jos 4,5 voltin patterille tarkoitetun polttimon laittaa 6 voltin taskulamppuun. Toisaalta 6 voltin hehkulamppu on himmeä 4,5 voltin jännitteellä.

Tämä kandidaatintyö käsittelee vakaan ja kohinattoman sähkön tärkeyttä sekä keinoista saada sitä aikaan. Koska lineaariregulaattori on usein yksi avainkomponenteista sähkölaitteen toiminnassa, sen liityntää ja suhdetta myös itse sähkölaitteeseen käsitellään. Yksi tutkimuskysymys oli eri sovellusten lineaariregulaattoreille asettamien vaatimusten erittely.

Lineaariregulaattori on elektroniikan kytkentä tai komponentti, joka jalostaa saamansa raakasähkön vakaammaksi jännitteeksi, vaikka kuorma, sisäänmenojännite ja ympäristön lämpötila vaihtelevat [2, s.1]. Kannettavien laitteiden yleistymisen on luonut tarpeen energiatehokkaille regulaattoreille [2, s.1]. Usein laitteen sisällä on vielä sähköisesti erilaisia lohkoja, joiden laatuvaatimukset sähkölle voivat vaihdella keskenään. Tällöin esimerkiksi verkkosähköllä toimivien laitteiden muuntajasta saatu tasajännite muutetaan vielä siirrettäväksi sopivilla jännitteillä piirilevytasolla laitteen eri lohkoille [3, s.535].

Vääränlainen käyttöjännite voi hajottaa laitteen tai aiheuttaa virheitä ja epätarkkuutta laitteen halutussa toiminnassa. Esimerkiksi oskillaattorin saama liian kohinainen käyttöjännite aiheuttaa usein myös oskillaattorista ulostulevaan signaaliin kohinaa [1, s.1]. Tämä voi ilmetä koko oskillaattorin jälkeisen signaaliketjun alentuneena suorituskykynä.

Yleensä lineaariregulaattorin vaihtoehtona tai jopa vastakohtana nähdään hakkuriregulaattori (*switched mode power supply*, SMPS). Myös se on sisään tulevaa jännitettä haluttuun jännitteeseen säätävä takaisinkytketty säätöjärjestelmä, mutta toimii erilaisella periaatteella kuin lineaariregulaattori. Siinä, missä lineaariregulaattori ainoastaan pienentää saamaansa jännitettä alemmaksi, hakkuri voi tarvittaessa myös nostaa ulostulojännitettään. Lisäksi hakkurilla voi tehdä positiivisesta sähköstä negatiivista sekä myös eristää sisääntulon sähköisesti ulostulosta. [3, s.535] Hakkurissa ulostulojännite luodaan katkomalla korkealla taajuudella sisääntulosta kelan magneettikenttään tulevaa, varastoitunutta sähköenergiaa [3, s.537].

Hakkurien yleistyminen ja menestys monella rintamalla on luonut kuvan siitä, että lineaariregulaattorit olisivat jotenkin vanhanaikaisia tai rajoittuneita. On silti väärin sanoa, että hakkurit olisivat vähentäneet lineaariregulaattorien merkittävyyttä, koska lineaariregulaattorissa on kuitenkin kiistämättömät etunsa, joita ovat:

- Yksinkertaisempi rakenne ja yksinkertaisempi toteutus suunnittelu- ja piirilevytasolla. Yksinkertaisimmassa lineaariregulaattorissa on vain kolme terminaalialue: jännite sisään (Vin), maa (GND) ja jännite ulos (Vout). Itse regulaattorin lisäksi tarvitaan yleensä vain kondensaattori sisään- ja ulostuloon. [4, s.2] Tämä alentaa myös kustannuksia.
- Hakkuria parempi ulostulevan sähköön vakavuus ja pienempi kohina ilman monimutkaisia lisäsuodatuksia. Lisäksi transientinkesto eli reagointinopeus kuormituksen nopeille vaihteluille on hakkureita parempi [4, s.4]. Erityisen pienikohinaista sähköä tarvitsevia analogisia radiotaajuisia kytkentöjä syötetään yleensä lineaariregulaattorilla. [5, s.4]
- Pienempi ympäristön häirintä verrattuna hakkurin emissioihin [4, s.4], ellei lämmöntuottoa suurilla Vin/Vout -suhteilla lasketa emissioksi.
- Luotettavuus. Erityisen matalan jännite-eron vaativia regulaattoreita (*Low-drop-out*, LDO) lukuun ottamatta lineaariregulaattori on hyvin toimintavarma komponentti. LDO-regulaattorienkin stabiilisuusongelmat liittyvät usein puutteellisesti mitoitettuihin ulostulokondensaattoreihin. [5, s.3] [6, s.18]
- Tilanteissa, jossa sisään- ja ulostulon jännite-ero on pieni tai virrat ovat hyvin pieniä, hakkurit omaavat huomoman hyötysuhteen [4, s.4].

Akulla ja paristolla toimivien laitteiden viimeaikainen yleistyminen on lisännyt hakkurien suosiota. Puhtaasti digitaaliset kytkennät eivät yleensä kärsi huonosta käyttösähköstä niin paljon kuin analogiset laitteet [5, s.4].

Jos tarkastellaan regulaattorin hintaa, ulostulon kohinaa, jännitteen vakavuutta, transientin kestoa tai muille laitteille aiheutettuja häiriöitä, lineaariregulaattorit ovat sähköisiltä laatuominaisuuksiltaan yleensä parempia kuin hakkuri-teholähteet [4] [5]. Toisaalta parempi hyötysuhde, suuremmat virrat sekä pienempi paino ja koko ovat hakkurien merkittäviä etuja [4] nykyisten kannettavien laitteiden aikakaudella.

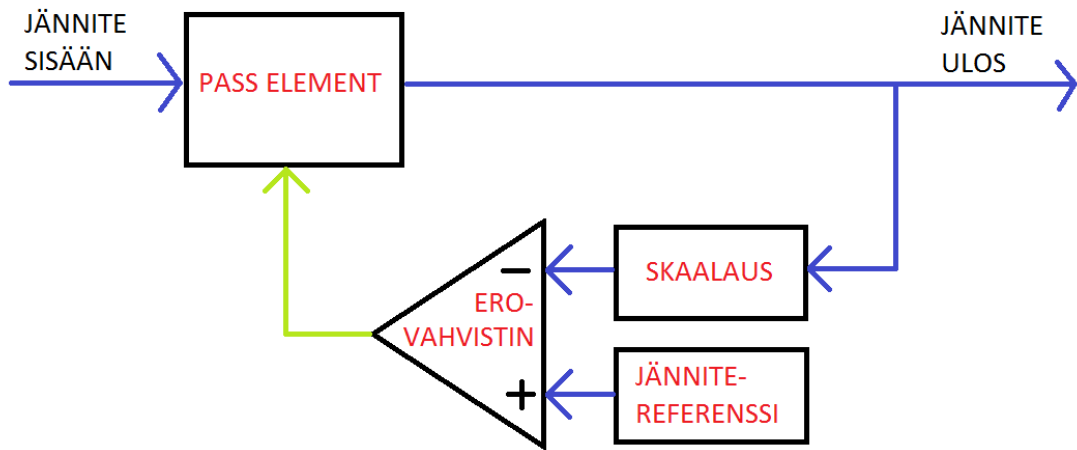
Lineaariregulaattoreiden tunnetusti huonoin puoli on niiden huono hyötysuhde ja siitä aiheutuva lämmöntuotto, koska lineaariregulaattori joutuu toimintaperiaatteensa takia muuttamaan lämmöksi sisääntulon ja ulostulon välisen jännite-eron [3, s.535].

Nykyään monen sähkölaitteen sähkönsyöttöketjussa on ensimmäisenä hakkuri, jonka tuottama sähkö toimitetaan piirilevyllä eteenpäin eri lohkoille niin, että esimerkiksi digitaalielektroniikkaa ja osaa analogielektroniikasta syötetään hakkureilla ja vakavuutta vaativa sähkö jalostetaan tästä raakasähköstä vielä lineaariregulaattoreilla. [3, s.535]

Luvussa 2 käsitellään lineaariregulaattorin ominaisuuksia ja esitellään takaisinkytketyn järjestelmän ominaisuuksia tavarankuljetushihnan avulla. Luvussa 3 esitellään lineaariregulaattorin lohkoja tarkemmin sekä kerrotaan regulaattorin mahdollisista lisäominaisuuksista. Luvun 4 aihe on lineaariregulaattorin eri topologiat ja toteutukset sähkönkulkua rajoittavan tehokomponentin eli päästöelementin (PE, *pass element*) mukaan. Luvun lopussa esitellään Wenzel-hybridiregulaattori. Luvussa 5 käsitellään lineaariregulaattorin säätötekniikkaa. Luku 6 keskittyy kohinan ilmenemiseen sekä sen vähentämiseen. Viimeisessä luvussa 7 on yhteenveto.

2. LINEAARIREGULAATTORI

Lineaariregulaattori on kuvan 2.1 mukainen takaisinkytketty säätöjärjestelmä, jossa raakasähkö johdetaan regulaattorin erovahvistimen ohjaaman sarjaresistanssin läpi sisääntulosta ulostuloon, jotta saataisiin tarpeeksi vakaa ulostulojännite vaihtelevallekin kuormalle [2, s.1].



Kuva 2.1. Lineaariregulaattorin lohkokaaavioesitys.

Kuvassa 2.1 vihreän nuolen ohjaama **PE** säätelee ulostuloon läpi päästettävää jännitettä. Ohjauksensa mukaan pass elementtiin muodostuu vaihtuva sarjaresistanssi, joka aiheuttaa jännitehäviön sen yli. **Jännitereferenssi** tai referenssijännite on piirin sisällä oleva mahdollisimman vakaa jännitelähde. **Skaalaus** suhteuttaa mitatun ulostulojännitteen jännitereferenssin kanssa vertailukelpoiseksi ja **erovahvistimen** suorittama vertailu ohjaa PE:ta. [3, s.553] [5, s.3] Säätö muodostaa silmukan, eli kyseessä on takaisinkytketty säätöjärjestelmä.

Lineaariregulaattorin olennainen ominaisuus on tuottaa vakaata sähköä sähköisille kytkennöille. Sähköinen kytkentä voi olla esimerkiksi kännykässä olevan oskillaattorin jännitelähde, yleismittarin referenssijännitepiiri tai musiikkisoittimen audiopiiri. Edellisessä luettelossa on esimerkkejä erityisen puhdasta sähköä vaativista komponenteista tai lohkoista, joille hakkurin tuottama sähkö ei sellaisenaan sopisi. Kännykän oskillaattorin ulostulotaajuus voi olla väärä tai vaihdella liikaa, jos sen saaman sähköän jännite ei ole riittävän hyvää [1, s.3]. Yleismittari näyttää väärin, jos siinä käytetyn mittaavan muuntimen referenssijännite on väärä tai vaihtelee. Audiopiirin tuottama ääni taas voi hurista, jos piirin käyttöjännite hurisee [5, s.4].

2.1 Lineaariregulaattorin toimintaperiaate

Säätö- ja prosessitekniikassa takaisinkytkentää käytetään prosessin ulostuloarvon pitämiseen halutussa pisteessä eli asetusarvossa [7, s.9]. Kun esimerkkinä käytetään kuljetushihnan nopeuden säätelyä, takaisinkytketty prosessi tarkoittaa, että prosessin ulostulo (hihnan nopeus) on kiinnitetty toivottuun asetusarvoon, jossa järjestelmä yrittää mahdollisimman hyvin sitä pitää. Hihnan nopeutta mitataan jonkinlaisella nopeusanturilla, joka antaa ulos vaikkapa jännitteen, joka on verrannollinen hihnan pyörimisnopeuteen. Takaisinkytkemätön prosessi tarkoittaisi sitä, ettei mitään nopeutta mittaavaa anturia olisi, vaan moottorin ohjaus suoraan asetettaisiin johonkin kiinteään arvoon. Silloin hihnan nopeus vaihtelisi sillä olevien esineiden kuorman vaihdellessa [7, s.9].

Hihnalle laitetaan tavaroita kuljetettavaksi. Hihnan olisi toivottavaa kulkea vakionopeudella, mutta sen nopeudella on ymmärrettävästi taipumus hidastua esimerkiksi silloin, kun tavaroita laitetaan hihnalle enemmän. Tällöin moottorin saamaa tehoa lisäämällä saadaan hihnan nopeutta nostettua. Tämä tehon lisäys tapahtuu silloin, kun hihnan mitattu nopeus on asetusarvoa pienempi. Vastaavasti hihnaa liikuttavan moottorin saamaa jännitettä vähennetään, jos järjestelmä huomaa hihnan pyörivän liian nopeasti.

Esimerkin kuljetushihnan haluttu nopeus vertautuu lineaariregulaattorin haluttuun ulostulojännitteeseen. Hihnalle asetettu lisäkuorma saa aikaan momentin hihnan nopeuden alenemiselle, kuten regulaattorinkin ulostulon jännitteellä on hetkellinen momentti alentua, kun ulostuloa kuormitetaan yhtäkkiä enemmän. Takaisinkytkentä koittaa vaikuttaa säätöjärjestelmiin niin, että ulostulo kummassakin järjestelmässä pysyisi asetusarvoon. Silloin hihnan nopeus ja regulaattorin ulostuleva jännite ovat kuormituksen vaihdellessakin mahdollisimman vakaita.

Näennäisestä yksinkertaisuudestaan huolimatta hihnan nopeuden vakiona pitämiseen liittyy monia huomioimista vaativia yksityiskohtia. Esimerkiksi hihna voi pysähtyä jumittumisen takia, jolloin säätöjärjestelmä huomaa hihnan nopeuden olevan asetusarvoa alempi, jolloin se lisää moottorille menevää tehoa. Jos hihna ei aluksi lähde liikkeelle, säätö lisää moottorin ohjaustehoa yhä suuremmaksi. Kun hihna lopulta lähtee liikkeelle, se voi liikkua aluksi hyvinkin nopeasti, koska moottorille menevä asetusarvon ja hihnan mitatun nopeuden perusteella määritelty ohjaussignaali ja sen perusteella moottorin saama teho on kasvanut nyt jo liikkuvalla hihnalle kohtuuttoman suureksi. Myös lineaariregulaattorissa huomataan samanlainen ilmiö, kun ulostulojännitteen yllättävää tippumista esimerkiksi liian suuren hetkellisen kuormittamisen takia korjataan. Tällöin tilanteen normalisoituessa ulostulojännite käy yleensä pieneksi hetkeksi asetusjännitteen yläpuolella [3, s.398].

2.2 Lineaariregulaattorin lohkojen esittely

Lineaariregulaattori on useimmiten koteloitu muiden mikropiirien (*integrated circuit*, IC) tavoin. IC on elektroniikan komponentti, jonka sisälle on integroitu monimutkaisempi kokonaisuus. Tämä säästää tilaa ja kokoonpanokustannuksia.

Lineaariregulaattori muodostuu kuvan 2.1 esittämistä lohkoista. Skaalaus tarkoittaa ulostulojännitteestä mitatun arvon sovittamista referenssijännitteen kanssa vertailukelpoiseksi, koska referenssijännite on yleensä optimointisyistä jokin muu kuin ulostulon jännite. Jos skaalattu ulostuleva jännite eroaa halutusta asetusarvosta, erovahvistimen jännitteellä ohjataan regulaattorin sisääntulosta ulostuloon kulkevaa sähkövirtaa niin, että ulostulo asettuisi oikeaksi. Tämä ohjaus tehdään yleensä transistorin sarjavastusta säätämällä. Tätä sarjavastusta kutsutaan lineaariregulaattorissa PE:ksi. [3, s.553] PE muuttaa jännite-eron lämmöksi. PE on usein tehokomponentti, koska sen tehohäviöiden aiheuttama lämmöntuotto voi olla merkittävää [3, s.554].

Erovahvistin suorittaa PE:n ohjauksen vertaillen kahdesta sisääntulostaan, onko ulostulon skaalattu jännite referenssijännitteen kanssa sama [3, s.553]. Sisäänmenoista toinen on silloin vastusjaolla skaalattu ulostulojännite ja toinen on referenssijännitteen arvo, joka lähes aina muodostetaan IC:n sisällä. Säädettävissä regulaattoreissa ainakin vastusjaon toinen vastus on IC:n ulkopuolella, ellei kyseessä ole viime aikoina yleistynyt digitaalisesti aseteltava regulaattori, jossa sopiva vastusarvo valitaan ulkoisella ohjauksella piirin sisällä [5, s.4]. Kiinteän ulostulojännitteen regulaattoreissa molemmat vastukset ovat integroitu IC:n sisään [3, s.556].

Näiden välttämättömien lohkojen (PE, erovahvistin ja referenssi) lisäksi lineaariregulaattorissa voi olla myös muita sovelluskohtaisia lohkoja tai ominaisuuksia haluttujen toimintojen saamiseksi. Näitä lohkoja tarkastellaan jäljempänä.

Lineaariregulaattoreita on eri tyyppisiä. Tässä kandidaatintyössä oletetaan aina, että kyseessä on positiivinen sarjaregulaattori. Positiivinen regulaattori tarkoittaa sitä, että sisään- ja ulostulojännite ovat positiivista maahan nähden. Sarjaregulaattori taas tarkoittaa sitä, että sähkö kulkee sisäänmenosta sarjaresistanssin kautta ulostuloon, sen sijaan että se johdettaisiin maahan, kuten rinnakkais- eli shunttiregulaattorissa tehdään [8, s.2.2]. Negatiivisia regulaattoreita on olemassa ja ne toimivat samalla periaatteella. On myös saatavilla saman piiriperheen regulaattoreita kummallekin polariteetille. Esimerkiksi $\mu A7812$ on +12 voltin regulaattori ja $\mu A7912$ on -12 voltin negatiivinen regulaattori. [3, s.556]

3. LINEAARIREGULAATTORIN LOHKOT

Lineaariregulaattorin toimintaperiaate on säätöteoriasta tuttu takaisinkytketty järjestelmä, jossa ulostuloa verrataan asetusarvoon eli referenssiin erovahvistimessa (EA, error amplifier) ja regulaattorin ulostulojännitettä muutetaan tämän eron perusteella kohti asetusarvoa PE:llä. [8, s.2.34] Seuraavassa käydään läpi tarkemmin lineaariregulaattorin kolme päälohkoa.

3.1 Referenssilohko

Kuvasta 2.1 nähdään, että referenssijännite tuottaa erovahvistimen ei-invertoivaan sisääntuloon jännitteen, johon invertoivaan sisääntuloon tuotua skaalattua ulostulojännitettä verrataan erovahvistimessa PE:n ohjaamiseksi [5, s.3]. Olennaisimmat vaatimukset referenssijännitteelle ovat sen tarkkuus (*accuracy*) ja vakaus (*stability*) [3, s.534]. Vakaus tarkoittaa niin vakautta regulaattorin sisäänmenojännitteen tai lämpötilan vaihdellessa, kuin myös referenssijännitteen kohinattomuutta [3, s.535].

Jännitereferenssi on jo itsessään jänniteregulaattori pienellä virranantokyvyllä [8, s.2.1]. Referenssin ominaisuudet peilautuvat melko suoraan regulaattorin suorituskykyyn. Jos referenssi on jollain tietyllä tapaa huono, niin myös lineaariregulaattorin ulostulo on silloin samalla tapaa huono [9, s.3].

Keskihintainen ja yleinen 1 ampeerin lineaariregulaattori AMS1117 aiheuttaa datasheettinsä mukaan noin 0,003 % kohinan ulostulojännitteeseen [10, s.3]. 5 voltin ulostulojännitteellä kohina on siten 150 μV . Regulaattoreiden datasheeteissä on kerrottu yleensä referenssin ominaisuudet siten, miten ne ilmentyvät ulostulossa. Yleinen tapa on kertoa vain lämpötilariippuvuus ja kohina, koska tämä tieto on tarkoituksenmukaisempaa suunnittelijalle kuin tieto itse referenssin yksityiskohtaisista ominaisuuksista. Säädetävissä regulaattoreissa kohina voidaan ilmaista em. prosenttinoitaation lisäksi myös yksiköllä " $\mu\text{V/V}$ ". Lineaarisen regulaattorin ulostulon kohinasta merkittävin osa on referenssistä peräisin [9, s.3].

Referenssille asetetut vaatimukset riippuvat sovelluksesta. Seuraavassa on esitelty esimerkkejä referenssilohkon suoraan regulaattorin ulostuloon aiheuttamista ominaisuuksista. Nämä ominaisuudet siirtyvät yleensä suoraan koko regulaattorin ulostulon ominaisuuksiin.

- Tarkkuus (*accuracy*) – esimerkki: "Regulaattorin 5 voltin referenssi on aina 4,88–5,12 voltia". [8] [1, s.4]

- Lyhyen aikavälin vakavuus (*short-term stability*) – esimerkki: ”Kohina on vähemmän kuin 1 mV_{pp}” tai ”kohina on 0.003 % ulostulosta”. [8]
- Pitkän aikavälin vakavuus (*long-term stability*) – esimerkki: ”5 voltin referenssi on 4,8–5,2 voltia vielä 10 vuoden päästä”. [8]
- Lämpötilavakavuus (*temperature stability*) – esimerkki: ”Referenssi ei muutu enempää kuin 0.1 %, vaikka laitteen käyttölämpötila vaihtelisi välillä 0–75 °C”. [8]
- Käynnistymisaika (*start-up time*) – esimerkki: ”Referenssi antaa vakaata jännitettä viimeistään 0,1 sekunnin kuluttua käyttöjännitteen kytkemisestä”. [8]

Referenssin toteutusta ei sinänsä valita erikseen, koska regulaattorin valinnalla saadaan suoraan halutun painotuksen suhteen referenssin haluttu suorituskyky. Joissain soveluksissa jännitteen pitkän aikavälin vakavuus on tärkeämpää kuin sen kohina (esim. yleismittarissa) ja joissain taas lyhyemmän aikavälin vakavuus eli vähäinen kohina on tärkeämpää (esim. oskillaattorissa). Pitkän aikavälin stabiilisuuden muuttuminen tapahtuu suurimmaksi osaksi regulaattorin ensimmäisten 1000 käyttötunnin eli n. 6 viikon aikana [11, s.6].

Referenssi toteutetaan nykyregulaattoreissa useimmiten regulaattorin piisirulla integroidulla band gap -referenssillä tai harvemmin zener-diodilla [8, s.2.4] [11, s.4]. Linear Technologiesilla on JFET:llä (*Junction field effect transistor*, liitoskanavatransistori) toteutettu erityisen vakaa band gap -tekniikan XFET™ [12, s.2]

Zener-diodi on puolijohdekomponentti, joka estosuuntaisena alkaa johtamaan niin, että jännite sen yli pysyy suhteellisen vakiona. Zener-diodeja on eri tyyppisiä, näistä referenssinä parhain ja vakain on haudattu zener-diodi eli *buried-zener* tai *sub-surface zener* [3, s.543], jossa läpilyönnin aiheuttamat vyöryläpilyönnissä kiihtyneet elektronit on siirretty kauemmas jännitteen vakavoivasta puolijohderajapinnasta [12, s.3]. Tällainen haudattu zener tarjoaa 110 ppm/K lämpötilavakavuuden. Myöhemmin esiteltävän band gapin tyyppinen vakavuus on 25–50 ppm/K. [12, s.2] Haudattu zener on kalliimpi kuin band gap -tyypin jännitereferenssi. Syy kalleudelle on se, että sen piiprosessin jälkeinen arvo heittelee 5–10 % tavoitteesta ja vaatii siten vielä trimmaamista. [11, s.5] Lisäksi haudattu zener-diodi tarvitsee enemmän virtaa kuin band gap -tyyppinen jännitereferenssi. [11, s.4].

Tavallinen zener-referenssi ei ole yhtä vakaa, kuin band gap -referenssi on [3, s.535]. Zener-referenssin tuottamat jännitteet ovat sen luonteen takia korkeampia, yleensä voltteja [8, s.2.4]. Lisäksi se kuluttaa enemmän virtaa [3, s.543]. Zener-referenssin virrankulutuksen takia pienitehoisissa regulaattoreissa tehdään yleensä n. 1,25 voltin jännitereferenssi band gap -tekniikalla, johon alaspäin skaalattua ulostulojännitettä verrataan, sen sijaan että alennettaisiin skaalaamalla zener-diodilla tehtyä suurempaa jännitettä [12].

Zener-referenssin lämpötilavakavuutta voidaan parantaa kytkemällä sen kanssa sarjaan päästösuuntainen diodi [3, s.543] tai transistorin emitteri-kanta -liitos. Molempien lämpötilakerroin on negatiivinen. Koska lämpötilakerroin on vastakkainen zeneriin verrattuna, kumoavat nämä toisensa. Tätä järjestelyä kutsutaan termillä *thermally compensated zener diode reference*. [3, s.543]

Band gap on tekniikka, jossa kahden pinta-alaltaan erikokoisen transistorin avulla luodaan kaksi lämpötilasta eri tavalla riippuvaa jännitettä, joista toisen lämpötilakerroin on positiivinen ja toisen negatiivinen [3, s.542]. Tällöin lämpötilan muuttuessa toinen jännite pienenee ja toinen kasvaa. Näistä jännitteistä toinen vähennetään skaalattuna toisesta, jolloin erotus pysyy likimain samana lämpötilan muuttuessa. Band gap -referenssi kuluttaa vähemmän tyhjäkäyntivirtaa kuin zener-referenssi, jonka virrankulutus voi olla välillä 0,6–15 mA [3, s.543].

3.2 Eroahvistin

Eroahvistin vertailee ulostuloa referenssijännitteeseen ja ohjaa vertailun perusteella PE:ta ja sitä kautta ulostuloa tarvittavaan suuntaan [6, s.2]. Yleisimmin eroahvistin on jänniteohjattu differentiaalivahvistin eli operaatiovahvistin. Kuten referenssinkin, myös eroahvistimen ominaisuudet peilautuvat suoraan regulaattorin ulostulon ominaisuuksiin.

Eroahvistimen ei-invertoivaan sisäänmenoon johdetaan regulaattorin ulostulosta yleensä vastusjakoalennettu takaisinkytkentäjännite [3, s.553]. Tämä vastusjako on ulostulojännitteeltään ei-säädettävissä regulaattoreissa sisäänrakennettu, eikä sitä voida muuttaa. Säädettävissä regulaattoreissa tämä piste on kytketty piirin kotelon ulkopuolelle regulaattorin terminaaliin.

3.3 PE, Pass element

Lineaariregulaattorin sähkön kulkua rajoittava PE määrittää regulaattorin virrankeston ja vaadittavan pienimmän jännite-eron, jolla regulaattori vielä toimii suunnitellusti [6, s.4].

Tämä vaadittu jännite-ero on olennainen seikka regulaattoria valitessa ja sen merkintätapa on V_{DO} , *dropout voltage*.

Sarjavastuksena toimivan PE-transistorin eri tyypit ovat yleisin tapa jakaa lineaariregulaattorit eri luokkiin, joita kirjallisuudesta on lähteen mukaan lueteltu yleensä kolmesta viiteen erilaista: NPN-darlington, NPN, bipolaaritransistori (*Bipolar junction transistor*, BJT) -LDO, quasi-LDO sekä P-kanavainen eristehilakanavatransistori (*P-channel metal oxide semiconductor*, PMOS). Luettelo on niiden vaatiman jännite-eron mukaan pienevässä järjestyksessä. Jakoperusteet ja nimitykset vaihtelevat, koska näkökulmat ovat eri kirjoittajille ja puolijohdevalmistajille erilaisia.

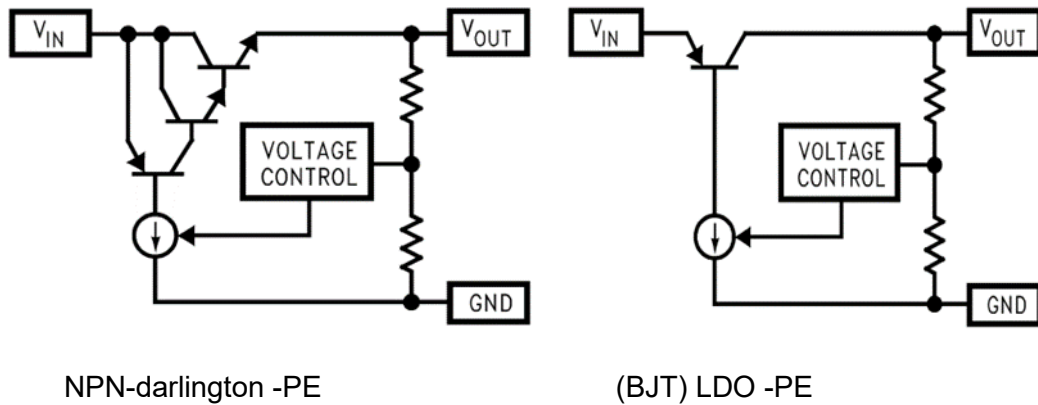
Jokaisessa PE-topologiassa on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Sovelluksesta riippuu, mitä topologiaa kannattaa käyttää [13, s.3 eteenpäin]. Verkkokäyttöisissä sähkölaitteissa voidaan hyväksyä sisääntulon ja ulostulon välinen suurikin jännite-ero (V_{DO}) sekä tästä aiheutuva suurempi lämmöntuotto, jolloin voidaan käyttää enemmän tehoa hukkaavaa PE:ta. Eri PE-tyyppejä käsitellään lisää jäljempänä, koska tyyppien erot regulaattorin perustavanlaatuisiin ominaisuuksiin ovat niin merkittäviä.

On mielekästä tulkita koko vahvistinketju erovahvistimen ensimmäisestä puskurasteesta lähtien PE-transistoriin saakka kuuluvaksi kokonaan PE:hen, koska tämä muodostaa PE:n sarjavastusta ohjaavan loogisen kokonaisuuden.

Eri PE:t sijoittuvat jatkumoon ääripäiden välille. Tarkastellaan aluksi pelkästään kahta ääripäätä PE-tyyppejä. Nämä tyypit ovat NPN-darlington -PE ja LDO-PE.

NPN-darlington -PE antaa pienelläkin erovahvistimen ohjauksella nopeasti asettuvan ja hallitun virrankäsittelykyvyn, koska kyseisen PE:n ulostuloimpedanssi on pieni [13, s.3]. Haittapuolena sillä on sen toimiakseen vaatima LDO-tyyppiä suurempi jännite-ero sisäänmenon ja ulostulon välillä, n.1,5–2,5 voltia [13, s.3]. Tästä seuraa luonnollisesti suurempi tehohäviö ja huonompi hyötysuhde.

LDO-regulaattorin PE toimii hyvin pienellä jännite-erolla, joka pienillä virroilla voi olla vain 10–20 mV [13, s.3]. Koska LDO-PE koostuu kuitenkin yhdestä transistorista, sillä on vain yhden transistorin virranvahvistuskyky β , joka tehokomponenteilla on vieläpä korostuneesti pieni. Sen takia se ei ole erovahvistimelle helppo ohjattava. LDO-regulaattori onkin regulaattorityyppinä säätötekniisesti hankalin ja värähtelyherkin. [13, s.11]. Toisaalta se on pienestä jännite-erovaatimuksestaan johtuvan pienemmän tehohäviönsä takia kaikista sopivin nykyaikaisiin kannettaviin laitteisiin. Eri regulaattorityypeistä LDO kuluttaa eniten tyhjäkäyntivirtaa [6, s.6].



Kuva 3.1 Kaksi eri PE-topologiaa, jotka edustavat kahta PE-tyyppien ääripäätä [13]

PE toimii kuvan 3.1 vasemmanpuoleisessa NPN-darlington -regulaattorissa yhteiskollektori-kytkennässä (*CC, common collector, emitteriseuraaja*). Yhteiskollektorikytkennän ulostuloimpedanssi on tunnetusti pieni. Oikeanpuolimmaisesta LDO-regulaattorin PE-transistori taas toimii yhteisemitteri-kytkennässä (*CC, common emitter*), jonka ulostuloimpedanssi on melko suuri. Suurempi ulostuloimpedanssi aiheuttaa hitautta säätösilmukkaan. Tämä hitaus aiheuttaa navan regulaattorin säätösilmukkaan jo suhteellisen matalalle taajuudelle, mikä voi aiheuttaa kuorman kompleksisista impedansseista riippuvia stabiilisuusongelmia [13, s.9]. NPN-darlington -PE:n yhteiskollektorikytkennästä johtuva pieni lähtöimpedanssi ei tällaista napaa luo. Siksi NPN-darlington -PE on stabiili jopa ilman ulostulon suodatuskondenssaattoreita [13, s.4].

NPN-darlington -PE:ssä on peräkkäin sarjassa useampi puolijohderajapinta, siinä missä LDO-PE:ssä ei ole kuin yksi jännitehäviön aiheuttava puolijohderajapinta. NPN-darlington vaatii tästä syystä isomman jännite-eron V_{DO} toimiakseen. Eräs syy käyttää LDO-regulaattoria onkin se, että jännite-ero ulostulon ja sisäänmenon välillä ei riitä NPN-darlington -regulaattorille. Etenkin akkukäytössä tällä on merkitystä, koska jännite-ero muuttuu hukkalämmöksi ja on akun rajallisesta kapasiteetista pois. Vaikka LDO-regulaattoria käytetään erityisesti silloin, kun V_{DO} on pieni, suoriutuu LDO myös suurista jännite-eroista, jos syntyneen hukkalämmön poisjohtaminen on muuten kunnossa.

Näiden kahden hyvin erilaisen PE-tyypin lisäksi on vielä muita tyyppejä, joiden voi kuvitella ominaisuuksiltaan sijoittuvan jatkumona näiden välille. NPN-PE on paljolti kuten BJT-NPN -darlington, mutta sen PE ei ole nopea darlington-transistori, vaan tavallinen BJT, jota ohjataan PNP-transistorilla [13, s.3]. Tästä seuraa, että NPN-PE:n virtavahvistus ei ole kovin suuri, eli se on hitaampi ohjattava. Tämä taas vaatii isomman kantavirran ohjauksesta, koska tehotransistoreiden β (*beta, kantavirranvahvistuskerroin*) voi olla hyvinkin pieni, luokkaa 15–20 [13, s.14]. Erovahvistimen jälkeinen puskuriaste onkin vält-

tämätön pelkän yhden liitostransistorin PE:ta ohjatessa [3, s.553]. KytKentä on silti yhteiskollektori-tyyppinen ja kuten NPN-darlington -PE, NPN-PE omaa pienen ulostuloimpedanssin ja on myös melko tunteeton kuormasta johtuvalle epästabiilisuudelle.

PMOS on jänniteohjattu komponentti, eli sen ohjauksessa ei käytännössä kulje virtaa. Sen takia se tarjoaa pienemmän tyhjäkäyntivirran kuin vastaava BJT-tyyppi. [13, s.14] Lisäksi PMOS-PE voidaan tehdä melko suurta virtaa kestäväksi. Ylimoittamalla PMOS-PE:n transistorin PE:n sarjavastus hyvin pieneksi. Silloin suurillakin virroilla regulaattori tarvitsee suhteellisen pienen jännite-eron. Tyypiltään PMOS on yhteislähdekytkennässä, joten se on hidas ja sen stabiilisuus ei ole niin hyvä kuin NPN-darlington- ja NPN-tyypissä on [13, s.14].

PNP/NPN eli quasi-LDO sijoittuu suorituskyvyssä BJT-NPN -darlingtonin ja BJT-LDO:n väliin. Siinä on peräkkäin kaksi puolijohderajapintaa ja se vaatii toimiakseen jännite-eron, joka on puolivälissä NPN-darlington -PE:ta ja BJT-LDO -PE:ta. Tämä jännite-ero on noin 1,5 voltia. [13, s.3]

3.4 Muita lineaariregulaattoreissa esiintyviä lohkoja

Regulaattorissa voi olla muitakin toiminnallisia lohkoja tarvittavien ominaisuuksien saamiseksi. Lohkoista voi olla liitetty signaali IC:n terminaaleihin, jolloin regulaattorin tila voidaan liittää osaksi laitteen toimintalogiikkaa. Jos regulaattoriin kytketyn jännitelähteen jännite voi joskus hetkellisesti nousta liian isoksi, huomattu sisääntulojännitteen ylittyminen voi ohjata regulaattorin kuorman kanssa sarjassa olevan kanavatransistorin (*field effect transistor*, FET) johtamattomaan tilaan, jolloin regulaattorin hajoamisen riski vähenee.

Mahdollisia lohkoja on esitelty seuraavassa listassa. [6, s.9–17]:

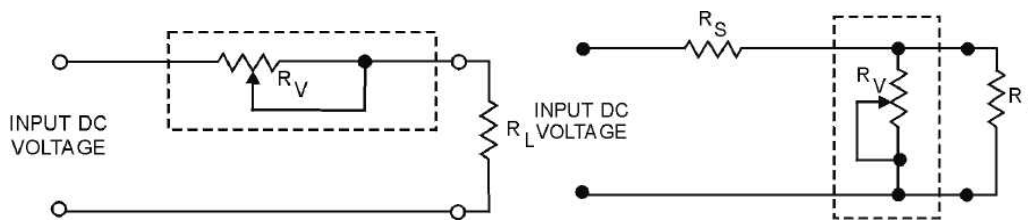
- Raportointilohko (*status*). Kertoo regulaattori-IC:n ulkopuolelle, onko regulaattorin jokin tietty parametri toiminta-alueen ulkopuolella. Se on yleensä ulostuloterminaali regulaattorin kotelossa, joka voi olla aktiivinen joko ylhäällä tai alhaalla. Terminaalin signaali aktivoituu, kun regulaattorin toiminta ei ole enää tietyn alueen sisällä, esimerkiksi kun sisäänmenon ja ulostulon jännite-ero ei ole tarpeeksi suuri. Ns. *power good* -signaali on ehkä yleisin tällainen signaali. Se kertoo ollessaan aktiivinen, että regulaattori on täysin käynnistynyt ja tarjoaa vaatimukset täyttävää sähköä. Monimutkaisemmissa laitteissa tällainen voi olla tärkeä ominaisuus koko systeemin luotettavan toiminnan takaamiseksi. Regulaattorien raportointilohkot voivat tarjota hyvinkin yksityiskohtaista tietoa erityisregulaattoreissa, jos sovelluskohde sitä vaatii.

- Lämpötilan rajoituslohko (*thermal shutdown*). Jos regulaattori kuumenee liaksi, alkaa tämä lohko rajoittamaan regulaattorin tarjoamaa virtaa tai kytkee ulostulon kokonaan pois päältä. Tämän lohkon aktivoitumisessa voi olla hystereesiä, jolloin regulaattorin pitää kylmetä perusteellisemmin, ennen kuin se alkaa taas toimittamaan sähköä [6, s.14].
- Oikosulkusuojalohko (*current limiter*). Yksinkertaisimmillaan sarjavastus PE:ssa, joka aiheuttaa jännitehäviön, kun läpimenevä virta on liian iso. Jos regulaattorissa on tämä lohko, datasheetin maksimivirtaraja tarkoittaa yleensä jännitettä, jota pienemmällä virralla tämä lohko ei aktivoitu [6, s.12]. Oikosulkutilanteessa jännite pienenee, kunnes virtaa kulkee rajoituslohkon rajan verran [6, s.13].
- Virran rajoituslohko (*current foldback*). Tarkkailee ulostulevaa virtaa ja alkaa vähentämään sekä virtaa että jännitettä, jos virta kasvaa liian isoksi esimerkiksi kuorman oikosulkutilanteissa. Tämä lohko on yleinen erityisesti suurivirtaisissa regulaattoreissa [6, s.14]. Se on parempi kuin edellinen oikosulkusuojalohko, koska regulaattorin syöttämä laite usein toimii vielä virtaa rajoittaessakin, mitä se ei tee, jos virrantulo katkaistaisiin siltä tyystin.
- Huippuvirran rajoituslohko (*load-dump*) [6, s.9]. Vaativissa käyttöympäristöissä, esimerkiksi ajoneuvoissa voi regulaattoriin sisään tuleva jännite hetkellisesti nousta liian korkeaksi. Koska lineaariregulaattori muuten muuttaisi tämän jänniteeron läpikulkevalla virralla kerrottuna lämmöksi, kytkee tämä lohko piikin ajaksi regulaattorin ulostulon pois, jolloin virta pienenee ja hetkellinen virtapiikki ei hajoja regulaattoria. Ulostulo aktivoituu uudelleen piikin mentyä ohi.
- Analyysilohko (*analysis*). Varmistaa sisään tulevan sähköän laadun tai jonkin muun seikan ennen kuin sallii regulaattorin käynnistyvän. Tämä ominaisuus on hyvin sovelluskohtainen.
- Ulostulon ohjauslohko (*on/off, shutdown, enable*). Tämän terminaalin aktivointi kytkee regulaattorin ulostulon pois korkeaimpedanssisesta tilasta, toisin sanoen kytkee kuorman syötön päälle tai pois. [6, s.9].
- Pehmytkäynnistyslohko (*soft start*). Kytkee käynnistettäessä ulostulon päälle pehmeästi ja hidastaen, niin ettei sisään tulevaa jännitelähdettä piikkikuormiteta tai ulostuloa kytketä liian nopeasti. Joskus regulaattorissa on terminaali, johon liitetyllä kondensaattorin tai vastuksen arvolla voidaan kontrolloida tämän pehmytkytkemisen nopeutta.

- Polariteetin suojalohko (*reverse-current protection*). Suojaa silloin, kun esimerkiksi kuluttajatuotteen patterit laitetaan väärinpäin. Lohkoa ei pidä sekoittaa sisäänmenon kanssa sarjassa olevaan suojadiodiin, joka on eräs toinen tapa suojata sähkölaitteita väärältä jännitepolarisaatiolta. Suojasarjadiodi etenkin LDO-regulaattorissa olisi diodin aiheuttaman jännitehäviön takia epäkäytännöllinen. Polariteetin suojalohkossa kyseessä on usein sisääntulossa sarjassa oleva FET, joka päästää virtaa läpi vain silloin, kun sisään tuleva jännite on kytketty oikeinpäin.
- Regulaattorin käynnistymiseen liittyvä järjestely (*start-up circuitry*). Asiaan perehtymättä itse tehty regulaattoritopologia joissain sopivissa tilanteissa voi käynnistyä tilaan, jossa sen sisäiset jännitteet ovat väärinä. Esimerkiksi EA:n käyttöjännitteen pitää olla enemmän, kuin vertailemansa ulostulosta skaalattu jännite on. Jos näin ei ole, ulostulo voi olla määrittelemättömässä tilassa, koska regulaattori on kokonaan väärässä moodissa. [3, s.541] Tätä lohkoa ei usein mielletä varsinaisesti tässä listassa esitettyksi lohkoksi, mutta regulaattorissa pitää ottaa systeemitasolla tämä asia huomioon ja tarvittaessa toteuttaa se ylimääräisillä komponenteilla.

4. LINEAARIREGULAATTORITYYPIT

Lineaariregulaattorit voidaan jakaa sarjaregulaattoreihin (*series regulator*) ja shunttiregulaattoreihin (*shunt regulator*) [8, s.2.2]. Sarjaregulaattori ohjaa vastusta säätämällä tarvittavan määrän sähköä läpi laitteelle, siinä missä shunttiregulaattori ohjaa vastuksen kautta sisääntulevaa sähköä maahan, ja tästä ylijäävä sähkö johdetaan laitteelle käytettäväksi [3, s.543].



Kuva 4.1 Sarjaregulaattori ja shunttiregulaattori [14]

Molemmissa kuvan 4.1 kytkennöistä on oikealla kuormavastus, R_L , joka on regulaattorin tarjoamaa jännitettä käyttävä kuorma, sekä katkoviivalla erotettu sähköä säätelevä vastus R_V . Oikeanpuolimmaisesta sarjaregulaattorin kyseessä ollessa vastus R_V päästää sähköä kuormaan ja vasemmanpuolimmaisesta shunttiregulaattorin kyseessä ollessa se päästää sähköä maahan.

4.1 Sarjaregulaattori

Sarjaregulaattorin PE on sarjassa sisäänmenon ja ulostulon kanssa kuten kuvasta 4.1 näkyy. Regulaattorin EA säätää tämän komponentin johtavuutta. Sarjaregulaattori kuluttaa ja muuttaa sisään tulevaa sähköenergiaa lämmöksi suoraan sisääntulon ja ulostulon jännite-eron sekä regulaattorista otetun tehon tulona [11, s.3].

Kun jännitteen vakavuus on tärkeää tai kun tehoa tarvitaan paljon, sarjaregulaattorit ovat parempi valinta kuin shunttiregulaattorit [11, s.3]. Sarjaregulaattoreissa on 3 terminaalia, siinä missä shunttiregulaattorissa on vain 2 terminaalia [8, s.2.2].

4.2 Shunttiregulaattori

Shunttiregulaattori oikosulkee PE:llä saamaansa virtaa maahan, kuten kuvasta 4.1 ilmenee. Se vaatii ennen ulostuloaan sarjavastuksen, jossa regulaattorin PE:n maahan oiko-

sulkema virta saa aikaan tarvittun jännitehäviön, joka muuttuu lämmöksi [11, s.3]. Shunttiregulaattori muuttaa sitä enemmän sisään tulevaa sähköenergiaa lämmöksi, mitä vähemmän siitä otetaan tehoa, mikä on päinvastaista sarjaregulaattoriin verrattuna. Siksi shunttiregulaattoreita käytetään siellä, missä ulostulovirta on suhteellisen pieni, kuten jännitereferensseissä ja tarkkuusvirranrajoittimissa [11, s.3]. Yleinen elektroniikan kouluesimerkki, zener-diodilla toteutettu jännitelähde on topologialtaan shunttiregulaattori [3, s.538].

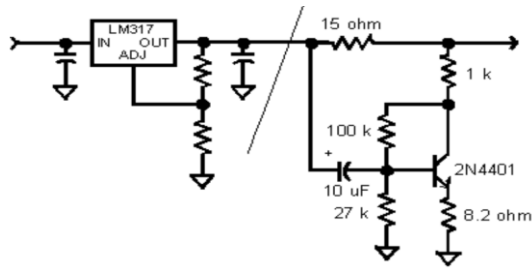
Shunttiregulaattorit soveltuvat paremmin erotettuihin virtalähteisiin tai toispuoleisiin käyttöjännitteisiin [11, s.4]. Lähteessä [15] on esitelty kolme shunttiregulaattorin sovellusta esimerkkikytkennöin ja -mitoituskuvoin. Ne ovat yhteen ulostulojännitteeseen sidotun regulaattorin ulostulojännitteen nostaminen, säädettävän regulaattorin tekeminen kiinteäjännitteisestä regulaattorista sekä sähköisesti erotetun virtalähteen isoloidun säätöjännitteen muodostaminen.

Shunttiregulaattoreita käytetään hakkureihin referenssivirta- ja referenssijännitelähteiksi. Luonteensa takia ne soveltuvat suoraan virtalähteiksi (*current source*) tai virtanieluiksi (*current drain*). Ne kestävät pääsääntöisesti suurempaa sisään tulevaa jännitettä kuin sarjaregulaattorit. [11, s.3]

4.3 Wenzelin Finesse-regulaattori

Yksi mielenkiintoinen shunttiregulaattoria käyttävä toteutus perustuu Charles Wenzelin lanseeraamaan kytkentään, jossa jollain hyvällä hyötysuhteella toimivalla regulointivallalla toteutetaan ensin karkea regulointi ja sen jälkeen shunttiregulaattorilla oikosuljetaan jäljelle jäänyt pienempi jännitevaihtelu maahan. [16].

Shunttiregulointia käytetään kytkennässä siten, että sillä oikosuljetaan perinteisen sarjaregulaattorin jälkeen regulaattorin ulostulon häiriöitä ja kohinaa maahan, sen perusteella miten huomataan sarjaregulaattorin ulostulon kohinoineen eroavan referenssistä. Shunttiosuus käyttää referenssinään aiemman regulaattorin ulostulojännitteen isolla kondensaattorilla keskiarvoitettua jännitearvoa. Toisena regulointiasteena erillisellä lineaariregulaattorilla toteutettuun topologiaan verrattuna tällä kytkennällä on se etu, että karkeaa regulointia tekevästä piiristä voidaan tehdä laajallakin jännitealueella säädettävä, koska jälkimmäisen shunttiregulaattorin ulostulojännite seuraa referenssinään kondensaattorin suodattamana karkean suodatuksen jälkeistä keskiarvoitettua jännitettä.

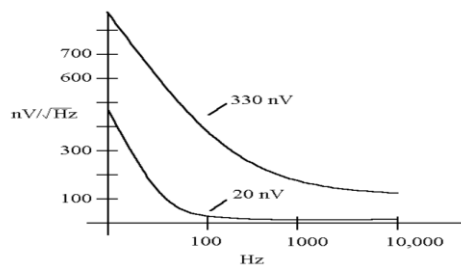


Kuva 4.2 Wenzel-kytkentä [16]

Wenzel-topologia on esitetty kuvan 4.2 kytkentäkaaviossa. Kytkentäkaavion vasemmassa reunassa on mikä tahansa perinteinen regulaattori, jonka jälkeen katkoviivalla erotettuna on varsinainen wenzel-shunttiregulaattori. Shunttiosuus suorittaa jännitteen lopullisen vakavoinnin. Sarjaregulaattori voi olla hakkuri- tai lineaariregulaattori. Kytkentä on niin nopea, että se poistaa kohinaksi luokiteltavia häiriöitä.

Käytännön toteutuksessa shunttiregulaattorin pitää olla nopea ja pieni-impedanssinen, jotta korkeampitaajuisenkin kohina oikosulkeutuisi maahan tehokkaasti. Tämä saavutetaan käyttämällä tehotransistoria PE:nä, vaikka maadoitettava kohinateho olisikin keskimääräiseltä teholtaan vain milliwatteja. Lisäksi kohinaa mittaavan ja tehotransistoria ohjaavan operaatiovahvistimen pitää olla nopea ja PE:n ohjauksen riittävän nopeaa, jotta saataisiin hyvä lopputulos.

Tämän kytkennän optimoinnissa on monia parametreja. Kohinan oikosulkeminen shunttiosassa maihin tapahtuu sarjaresistanssissa, joka joutuu johtamaan lisäksi myös kaiken läpikulkevan virran. sarjaresistanssi ei siis saisi olla liian iso, koska muuten siinä aiheutuisi liikaa tehohäviötä. Toisaalta, jos resistiivisyys on liian pieni, hyvän tuloksen saamiseksi shunttiosuuden transistorin pitää olla suhteessa tehokestoisempi. Suurempi jännitevaihtelu ensimmäisen asteen jälkeen vaatii suhteessa vielä järeämpiä komponentteja shunttiosaan. Koska shunttitransistorin pitää kyetä toimimaan tarkasti, se toimii tavallaan AB-luokassa, miksi sen läpi kulkee poistettavaan kohinaan nähden huomattavasti enemmän virtaa, joka voidaan ajatella tyhjäkäyntivirraksi.



Kuva 4.3 Wenzel-kytkennän mitattu kohinanvaimennus [16]

Kuvassa 4.3 on kytkennän laboratoriomittaus. Kohinan taso laski kytkennällä 330 nanovoltista 20 nanovolttiin kulmataajuudella 100 Hz.

4.4 Hybridi-regulaattorit

Eräs tapa saada sekä hakkurien tehokkuus että lineaariregulaattorien kohinattomuus on integroida nämä molemmat samaan komponenttiin tai kytkentään. Jos laite esimerkiksi tarvitsee yleisen 3,3 voltin käyttöjännitteen litiumioniakusta, voidaan toimia niin, että ensin akun lataustasosta riippuva 3–4,2 voltin akkujännite muutetaan hakkurilla hieman 3,3 voltin yläpuolelle, josta se tiputetaan LDO-regulaattorilla halutuksi 3,3 voltin tasajännitteeksi. Saavutettu kokonaishyötysuhde voi olla 81 %, joka koostuu LDO:n hyötysuhteesta 85 % ja hakkurin hyötysuhteesta 95 % [5, s.3]. Tällöin hakkurilla saadaan hyvä hyötysuhde ja akun jännitteen nosto, mitä lineaariregulaattorilla ei voi tehdä ja LDO-regulaattorilla taas ulostulojännitteen erinomainen puhtaus ja vakavuus, mihin hakkuri ei ilman järeää suodatusta kykene.

PE:nä toimiva tehokomponentti voi sijaita myös regulaattorin ulkopuolella [4, s.15] sekä hakkurissa että lineaariregulaattorissa. Lineaariregulaattorin kotelon kyky siirtää tehoviön aiheuttamaa lämpöä on rajoitettu. Siksi isoille tehoille on saatavilla erityisiä lineaariregulaattorikontrollereita, jotka on suunniteltu ohjaamaan ulkoista PE:ta. Tavallistakin lineaarista regulaattoria voi käyttää ulkoisen PE:n ohjaamiseen suuremman tehon saavuttamiseksi. Perinteisesti harrastelijoiden kotitekoiset useamman ampeerin virtalähteet ovatkin olleet esimerkiksi perinteisellä 1 ampeerin regulaattorilla LM317:lla tehtyjä kytkentöjä, joiden ulostulo ohjaa yhtä tai useampaa rinnakkain kytkettyä tehotransistoria.

Radiotaajuuksien IC:t vaativat poikkeuksellisen hyvää sähköä. Siksi niiden sisään on voitu integroida useampia LDO-regulaattoreita eri lohkoille. Esimerkiksi ADRF6820-radiopiirissä on 2 LDO-regulaattoria. [1, s.1]

5. LINEAARIREGULAATTORI TAKAISINKYTKETTYNÄ JÄRJESTELMÄNÄ

Kaikkien jänniteregulaattorien mekanismi pitää ulostulojännitettään vakiona perustuu takaisinkytkentään. [13, s.6]. Lineaariregulaattoriinkin pätevät siksi yleiset säätötekniikan mallintamistavat, joissa asioiden selityksessä käytetään termejä napa, nolla ja vaihevara [13, s.5]. Säätosilmukan sisällä PE:n, kuorman ja johdinvetojen resistanssit, induktanssit ja kapasitanssit keskinäismuodostavat napoja ja nollia ja näin voivat lisätä taipumusta värähtelyyn tietynlaisilla kuormilla. Tällaista taipumusta koitetaan tietenkin välttää. Värähtelyuhkaa vastaan voi toimia luomalla regulaattorin sisälle korjaavia ja kompensoivia nollia ja napoja [13, s.9] tai muuttamalla ulostulon kuorman impedanssia esim. sarjaresistanssilla kauemmaksi vaaralliselta alueelta. Ulostulon sarjaresistanssia kasvattamalla muodostuu nolla alemmalle taajuudelle, joka estää negatiivista vaihesiirtoa ylempillä taajuuksilla, mikä on eräs syy epästabiilisuuteen. [13, s.10]

5.1 Navat ja nollat Bode-diagrammissa

Takaisinkytketyn järjestelmän napojen ja nollien sijaintia sekä taajuuden mukaan vaihtelevaa vaihesiirtoa kuvaava Bode-diagrammi määrittelee järjestelmän stabiilisuuden [13, s.5]. Bode-diagrammin etu on intuitiivinen näkymä järjestelmän taajuuskäyttäytymiseen ja stabiilisuuteen. Siinä on kaksi käyrää, toinen vahvistukselle ja toinen vaiheelle. [13, s.5]

Asia selitetään perusteellisesti lähteessä [13]. Tiivistettynä sanotaan tässä, että napa jollain taajuudella vähentää vahvistusta taajuuden jälkeen ja nolla taas lisää vahvistusta taajuuden jälkeen [13, s.7]. Navan vaikutusta vastaa bode-diagrammin vahvistuskuvajassa (*Bode magnitude plot*) käyrän desibeliarvon pieneneminen ja nollan vaikutusta desibeliarvon kasvaminen. Bode-diagrammin vaihekuvaajassa (*Bode phase plot*) napa lisää negatiivista vaihetta ja nolla vähentää sitä. Bode-diagrammissa vaihevara on nimitys vaihesiirron määrälle sillä taajuudella kuvaajassa, jossa vahvistuskäyrä leikkaa nolla desibeliä, eli kun säätosilmukan vahvistus alittaa yhden [13, s.7]. Kun kerrotaan vielä lopuksi, että vaihevaran pitäisi olla aina vähintään -160 astetta, jotta järjestelmä olisi stabiili [13, s.7], on periaatteessa kerrottu olennainen bode-diagrammin käytöstä lineaariregulaattorin stabiilisuuden määrittelyssä.

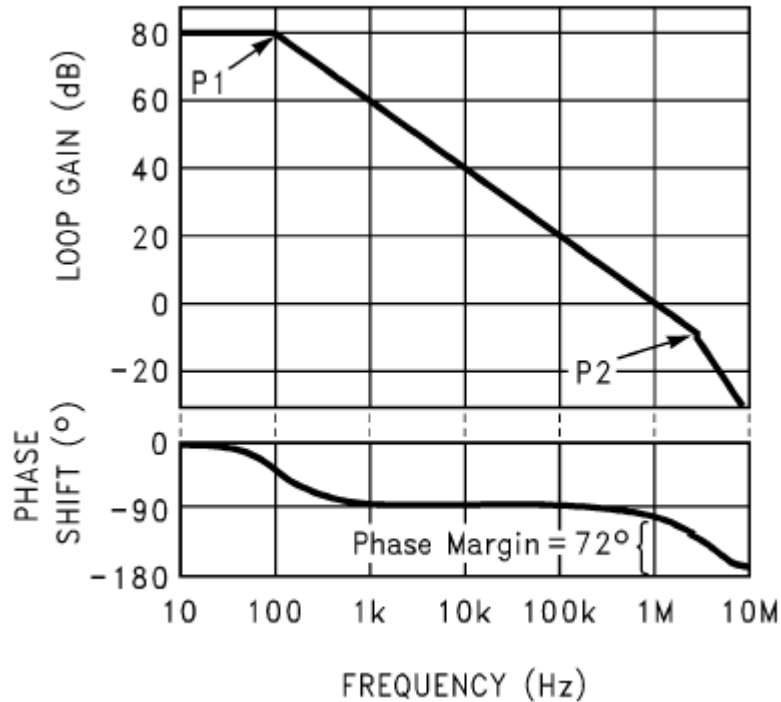
Lineaariregulaattori, jonka PE:n ulostuloimpedanssi on korkea, lisää navan suhteessa alemmille taajuuksille. Tämä napa on lisäksi vielä riippuvainen ulostulon kapasitanssista ja kuormasta [13, s.9]. Siksi melkein kaikki LDO-regulaattorit vaativat ulostulonsa kondensaattoreiden parasiittiselle sarjavastukselle eli ESR:lle (*effective series resistance*) tietyn alueen, jolla regulaattori on stabiili [13, s.11]. Matalaimpedanssisen ulostulon omaavat PE-topologiat, jotka vaativat suuremman jännite-eron sisääntulon ja ulostulon välille tarjoavat parhaan vakavuuden [13, s.9]. Etenkin pienen ESR:n omaavat pintaladottavat keraamiset kondensaattorit aiheuttavat LDO-regulaattoreille värähtelytaipumusta [13, s.13].

Lineaariregulaattorikytkennän navat voivat olla IC:n sisäisiä tai kuormasta johtuvia ulkopuolisia napoja. Sisäiset navat aiheutuvat lähinnä erovahvistimesta ja PE:stä [17, s.7]. Ulkopuolisiin napoihin vaikuttaa ulostuloon kytketty kuorma suodatuksineen, eli käytännössä kaapeloinnin ohmiset häviöt, regulaattorin ulostulokondensaattorin kapasitanssi ja sen parasiittinen sarjavastus ESR [5, s.3]. Lineaariregulaattorin nollat taas muodostuvat käytännössä regulaattorin ulkopuolella ulostulon suodatuskondensaattorin ESR:stä. [13, s.10]. Nollia lisätään tarkoituksella regulaattorikytkentään, jotta ne kumoaisivat napojen vaikutusta [13, s.8].

5.2 NPN-PE -regulaattorin bode-diagrammin tulkinta

Tarkastellaan seuraavaksi perinteisen NPN-PE -lineaariregulaattorin napoja ja nollia. Sen PE:n yhteiskollektorikytkennän ulostuloimpedanssi on pieni, mikä siirtää PE:n ja ulostulon yhdessä muodostaman navan korkeammalle taajuudelle kuin esimerkiksi suuremman ulostuloimpedanssin omaava Quasi-LDO -PE [13, s.13].

Tällainen järjestelmä vakautetaan asettamalla kompensoinnissa regulaattorin sisälle dominoiva napa alemmalle, esimerkiksi n. 100 Hz taajuudelle [13, s.8]. Tämä napa aiheuttaa vahvistuksen vähenemisen silloin heti 100 hertsistä lähtien ja samalla vaiheen siirtymisen 90 asteella negatiivisemmaksi. Kuva 5.1 näyttää dominoivan navan vaikutuksen graafisesti.



Kuva 5.1 Dominoivan navan lisäyksen vaikutus [13, s.5].

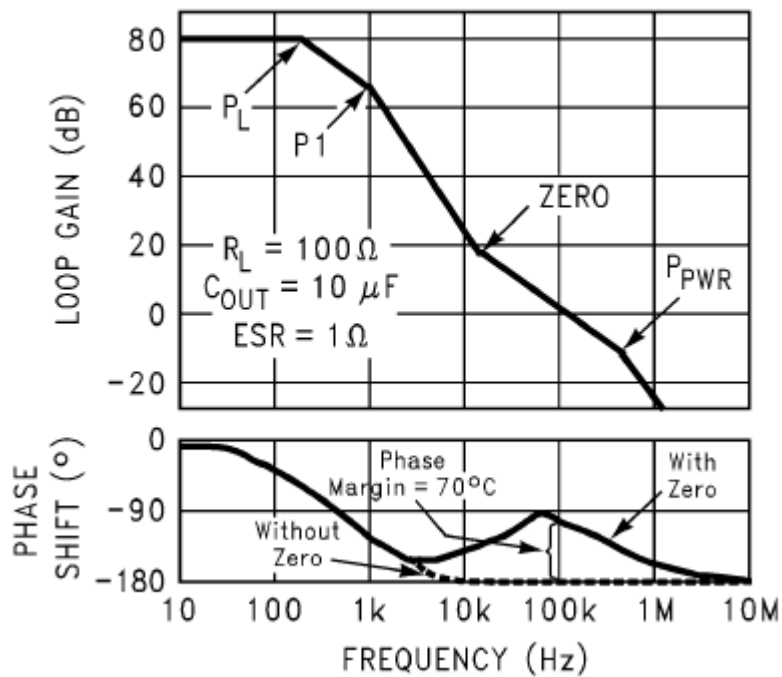
Kuvassa 5.1 nähdään, että lisätty dominoiva napa P1 aiheuttaa vahvistuksen pienene-
misen ja vaihesiirron. P2 on PE:n ja kuorman yhdessä muodostama napa. Silmukavah-
vistuksen kohdassa 0 dB vaihevara on 72 astetta eli järjestelmä on hyvin stabiili. Ilman
lisättyä napaa P1 vahvistuksen nollakohta olisi korkeammalla taajuudella, jossa vaihe-
vara olisi riittämätön.

5.3 LDO-regulaattorin bode-diagrammin tulkinta

LDO:n yhteis-emitteri -PE:n ulostuloimpedanssi on suuri. Se tarkoittaa, että edelliseen
regulaattorityyppiin verrattuna napa esiintyy alemmilla taajuuksilla. Kuorman navan taa-
juus voidaan laskea kaavasta

$$f(P_{LOAD}) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{LOAD} \cdot C_{OUT}} \quad (1)$$

Kaavassa (1) [13, s.9] $f(P_{LOAD})$ on kuorman navan taajuus (*load pole*), R_{LOAD} on kuorman
impedanssi ja C_{OUT} on ulostulossa näkyvä kapasitanssi. R_{LOAD} voi muuttua kuorman mu-
kaan, jonka takia LDO-regulaattoreissa tarvitaan NPN-PE -regulaattorin nähden erilaista
kompensointia [13, s.5].



Kuva 5.2 LDO-regulaattorin navat ja nollat ja kompensoinnin vaikutus. [13, s.5].

Säätösilmukka aiheuttaakin joissain tapauksissa regulaattorin ulostuloon tyyppillisiä säätötekniisiä epästabiilisuuden oireita. Esimerkiksi silloin, kun kuormitus nousee nopeasti pienestä suureksi tai toisinpäin eli transientissa, ulostulossa voi ilmetä soimista (*ringing*) [8, s.2.21], eli vaimenevaa sinimäistä aaltoilua. Application note [13] kertoo kattavasti LDO-regulaattorin stabiilisuuteen vaikuttavista asioista.

Kuvassa 5.2 on erikseen lisätyllä nolalla saatu vaihevaran kasvaminen kymmenillä asteilla taajuudella 100 kHz, jossa vahvistus menee yhden alle. Ilman lisättyä nolaa tällä taajuudella vaihevara ei olisi riittävä pitämään regulaattoria varmuudella stabiilina.

6. KOHINA REGULAATTORISSA

Filosofisena alustuksena aiheeseen mainitaan erään lähteen toteamus, että lineaariregulaattoreiden ulostulossa on kahdenlaista kohinaa: sellaista, mikä täytyy ottaa huomioon ja sellaista, mitä ei tarvitse. Asia riippuu sovelluksesta. Esimerkiksi lämpötila-anturin mittaustarkkuus ei huonone niinkään korkeataajuisen kohinan läsnäolosta, vaan jännitevaihtelusta matalammilla taajuuksilla. [17, s.1]

6.1 Regulaattorin kohinan merkitys

Kohina on otettava huomioon korkeatasoisia analogisia kytkentöjä suunniteltaessa. Tässä mielessä erityisen vaikeita sovellusalueita ovat korkeilla taajuuksilla toimivat kytkennät ajoituksineen, muuntimet sekä jänniteohjatut oskillaattorit (VCO, *Voltage controlled oscillator*) ja vaihelukitut silmukat (PLL, *Phase locked loop*) [1, s.1].

Kohiseva tai muuten epävakaa teholähde voi siirtää kohinansa sitä käyttävälle laitteelle, jolloin laite ei täyty sille asetettuja vaatimuksia, kuitenkin olematta varsinaisesti rikki. Jos kytkennältä halutaan hyvin pientä kohinaa, pelkkä hyvän regulaattorin valinta ei riitä, vaan huomiota on kiinnitettävä myös eristävään kotelointiin, johdotukseen sekä komponenttien sijoitteluun [9, s.3].

Usein virtalähteen kohinaksi mielletään kaikki ulostuloon kytkettyyn ei-toivottu häiriö, vaikka varsinaisesti kohina on regulaattoripiirin sisällä esimerkiksi transistoreiden ja vastusten aikaansaamien ilmiöiden laaja yhteisnimitys. [18, s.1]

Regulaattorin ulostulon häiriöitä on kahta tyyppiä, sisäisiä ja ulkoisia [17, s.1]. Yleinen ulkoa tullut häiriö on regulaattorin sisääntulojännitteen vaihtelu. Tämän vaikutusta kuvaa hurinajännitevaimennussuhde (PSRR, *Power supply rejection ratio*) [18, s.1]. Se kertoo, paljonko sisään tulevan sähkö vaihtelu siirtyy regulaattorin ulostuloon. Se lasketaan kaavalla [18]:

$$PSRR = 20 \log \frac{Ripple_{input}}{Ripple_{output}}, \quad (2)$$

jossa osoittaja ja nimittäjä ovat jännite- tai virtavaihtelun arvot sisään- ja ulostulossa.

Kohina voi olla sisäsyntyistä tai ulkoista [17, s.1]. Merkittävin sisäsyntyisten häiriöiden lähde LDO-regulaattoreissa on jännitereferenssi [17, s.4] [18, s.6]. Silloin kun jännitereferenssi on erityisen pienijännitteinen, merkittävin syy voi olla erovahvistin [17, s.4]. Nämä häiriöt ovat tilastollisesti korreloimattomia, joten niiden yhteisvaikutus pitää laskea suurimman neliösumman menetelmällä [17, s.4].

LDO-regulaattorin kohinan pienentäminen kohdistuu edellisiin kahteen paikkaan. Referenssin kohinan pienentäminen tapahtuu kondensaattorilla, joka vakauttaa referenssin jännitteen. [17, s.5]. Tällöin muodostuu alipäästösuodin, joka suodattaa korkeampitaajuisia kohinaa pois [18, s.5]. Koska kondensaattorin täytyy latautua, isompi kondensaattori vaatii enemmän aikaa varautuakseen samaan jännitteeseen kuin referenssi, joka lisää regulaattorin käynnistysaikaa [17, s.5]. Jos tämä kondensaattori jätetään jostain syystä kytkemättä, voi kohinan määrä kasvaa jopa satakertaiseksi [17, s.6]

Erovahvistimen kohinan vaimentaminen tapahtuu vähentämällä erovahvistimen vahvistusta, joka toisaalta huonontaa regulaattorin kykyä reagoida transientteihin [18, s.5]. Tämä on kuitenkin regulaattoreihin jo tehtaalla asetettu ominaisuus, eikä voi muuttua. PE:n kohina ei merkittävästi vaikuta regulaattorin ulostulonkohinaan, koska sen kohinaa ei vahvisteta regulaattorin säätösilmukassa [18, s.5].

6.2 Kohinan merkintätavat datasheeteissä

Kohina merkitään piirien datasheeteissä lähinnä kahdella tavalla. Toinen on kokonaiskohina, jonka yksikkö on yleensä μV_{RMS} [18, s.2]. Tämä on oskilloskoopin näytöllä näkyvä nopea vaihtelu, joka tulee näkyviin oskilloskoopin sumumaisena piirtopisteenä Y-akselin vahvistusta tarpeeksi suurennettaessa.

Toinen merkintätapa on tarkempi. Siinä kerrotaan kohinatiheys taajuuden funktiona, yleensä yksikkö on $\mu V/\sqrt{Hz}$ [18, s.2].

Ensimmäisen merkintätavan etu on sen helppous eri regulaattoreita verratessa. Tällöin pitää varmistua, että mittaukset on tehty samalla tavalla ja samalle ulostulojännitteelle ja -virralle [18, s.3].

6.3 Lämpökohina eli terminen kohina

Kohinaa syntyy paitsi aktiivikomponenteissa, myös vastuksissa. Vastuksissa syntyvä kohina voidaan jakaa lämpökohinaan ja virtakohinaan [19]. Sen tehollisarvo on joka taajuudella yhtä suuri, siinä missä virtakohina pienenee taajuuden kasvaessa ja kasvaa virran kasvaessa [19]

Lämpökohina (*Thermal noise*, *Johnson noise* tai *Nyquist noise*) aiheutuu lämpöliikkeen aiheuttamasta varauksenkuljettajien satunnaisliikkeestä [3, s.343]. Toisin kuin muut kohinatyytit, se on aina olemassa komponentissa ilman sen läpikulkevaa virtaakin. Vaikka induktansseihin ja kapasitansseihin ei liitykään lämpökohinaa, sitä on silti keloissa ja kondensaattoreissa niiden sarjavastuksen eli komponentin ohmisen häviöllisyyden

(ESR) aiheuttamana. [3, s.344]. Terminen kohina on valkoista [20, s.2], eli sen spektritiheys on sama kaikilla taajuuksilla. Se on myös gaussista, eli sen hetkittäiset arvot noudattavat normaalijakaumaa. Lämpökohinan jännitteen tehollisarvo voidaan laskea kaavasta [19]:

$$V_n = \sqrt{4 * k * T * R * B} , \quad (3)$$

jossa V_n on kohinajännitteen tehollisarvo, k on Boltzmannin vakio ($1.38 * 10^{-23}$ J/K), T on lämpötila kelvineissä, R on tarkkailtavan komponentin resistanssi (Ω) ja B on kaistanleveys tarkasteltavalla taajuusalueelta (Hz).

Kaava (3) vahvistaa tutun arkihuomion, että lämpökohina kasvaa, kun T , R tai B kasvaa. Lämpökohina tulee regulaattorissa ilmi myös referenssijännitteen ja erovahvistimen kohinana, joka takaisinkytkennän ansiosta vielä kertautuu silmukkavahvistuksella.

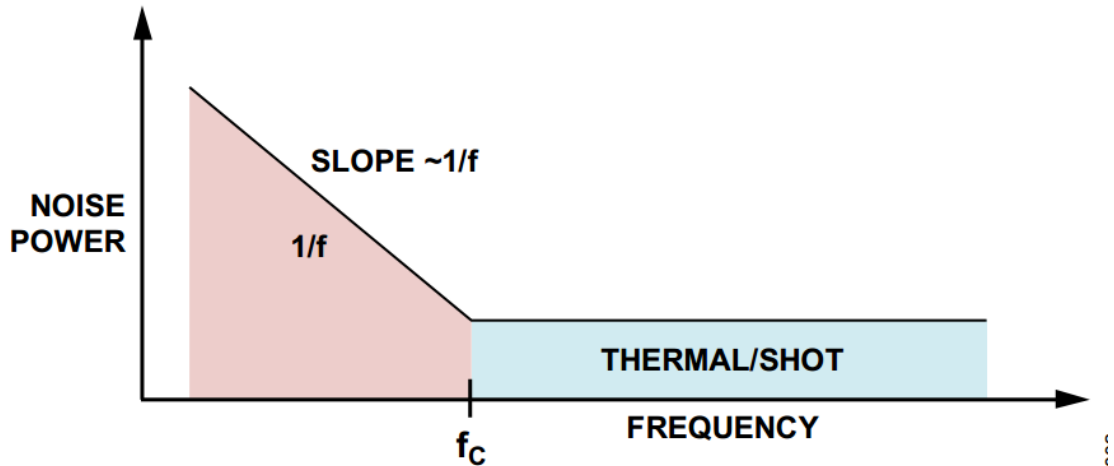
Lämpökohinaan voi vaikuttaa pitämällä regulaattoria mahdollisimman kylmänä ja pienentämällä vastuksien resistiivisyyttä [20, s.4]. Parhaiten lämpökohinaan ja kohinaan yleensä voi kuitenkin vaikuttaa itse regulaattorin valinnalla. Kohina kertautuu lineaariregulaattorin sisäisissä vahvistimissa. Silloin pienet vastusarvot ja vähäkohinaiset vastukset ovat eräs tapa vähentää kohinaa [19]. Jos piirin ulkopuolisia komponentteja joudutaan liittämään regulaattoriin, kannattaa muistaa että lämpökohinaa syntyy erityisesti vastuksissa [20, s.5]. Pienikohinaisempia vastuksia ovat ohutkalvo, metallikalvo ja lan-kavastukset. Hiili- ja paksukalvovastukset taas ovat runsaskohinaisempia. [19]

6.4 1/f eli vaaleanpunainen kohina

1/f-kohina (*pink noise*, *flicker noise*, *contact noise*) on kohinaa, jonka kohinateho on kääntäen verrannollinen taajuuteen. Siten 1–2 hertsin välillä 1/f-kohinan teho on yhtä suuri, kuin 2–4 Hz ja 4–8 Hz välillä [20, s.8]. 1/f-kohina on siten merkittävin lähellä tasajännitettä. 1/f-kohina on lähinnä komponentin koosta ja muodosta puolijohdesirulla johdettavaa. Se on riippuvainen myös itse puolijohdemateriaalista ja puolijohdevalmistusprosessista. [17 s. 3] 1/f-kohinan takana on puolijohdeiden generointi–rekombinaatio -mekanismi sekä virran kulku epähomogeenisessa materiaalisissa. [20]

Edellä mainittu lämpökohina sekä 1/f-kohina on merkittävimmät syyt lineaariregulaattorin ulostulon kohinaan [17, s.10]. 1/f-kohinan esiintymistä ajatellen epähomogeeninen materiaali voi olla myös liittimen huono kontakti. [20, s.9]

Taajuutta, jossa $1/f$ -kohina on laskenut samansuuruisiksi kuin lämpökohina (tai muu tilanteeseen olennaisesti liittyvä kohina tai kohinoiden summa), sanotaan $1/f$ -kulmataajuudeksi (*corner frequency*) tai rajataajuudeksi, silloin kun nimenomaisesti puhutaan $1/f$ -kohinan minimoimisesta [20].



Kuva 6.1. Kulmataajuuden f_c esitys graafisesti [17]

Kuvassa 6.1 on esitetty vaaleanpunaisella alueella $1/f$ –kohina, joka on sen taajuusalueella määräävä. Sinisellä alueella taas muut kohinat ovat määräviä. Kulmataajuus f_c erottaa nämä alueet toisistaan.

$1/f$ -kohina tulee olennaiseksi lineaariregulaattorissa silloin, kun tarkastellaan regulaattorin ulostulon matalien taajuuksien kohinaa [20, s.9]. Koska $1/f$ -kohina regulaattorissa on mukana jo puolijohdetehtaalta tullessa, ei sen ilmenemiseen voi vaikuttaa kuin piirin ulkopuolella, esimerkiksi käyttämällä regulaattorin ulkopuolella metallikalvovastuksia masstavastusten sijaan [20, s.9]. Jos regulaattorissa on ulostulojännitteen takaisinkytkentäterminaali, vastusjaon vastus- ja kondensaattorivalinnoilla voi kompensoida takaisinkytkennän taajuusominaisuuksia, jotka vaikuttavat $1/f$ -kohinaan [17]. Tähän terminaaliin lisättävien komponenttien valinnan ohjeistus löytyy yleensä valmistajalla piirin datasheetistä tai valmistajan application noteista. Viitteestä [17, s.5] löytyy esimerkki laskuineen, miten $1/f$ -kohinaa voi hallita ja miten kyseinen metodi on toiminut erään lineaariregulaattorin $1/f$ -kohinan poistossa. Haudatut puolijohdeliitokset (*buried junction*), joihin kuuluvat BJT ja JFET ovat pienempiä $1/f$ -kohinaltaan kuin MOSFET:it [17, s.3]. Eräät sovellukset ovat vaativia $1/f$ -kohinan suhteen. Esimerkiksi audiokytkennät eivät yleensä käsittele alle 20 Hz taajuuksia, joilla $1/f$ -kohinaa etenkin esiintyy, jolloin $1/f$ -kohinaa ei tarvitse niissä huomioida. Toisaalta radiotekniikan sekoittimet (*frequency mixers*) siirtävät teholähteensä $1/f$ -kohinan suoraan sivunauhakohinaksi, mikä ei ole toivottavaa [18, s.4]. Eräs $1/f$ -kohinan ilmenemismuoto on operaatiovahvistimen bias-jännitetasojen ryömiminen [20, s.7].

6.5 Raekohina

Raekohina (*shot noise*, *Poisson noise*) aiheutuu varauksenkuljettajien kulkiessa potentiaalivallin yli esimerkiksi puolijohderajapinnassa. Raekohina aiheutuu varauksenkuljettajien diskreetin olemuksen eli niiden kvantittuneisuuden takia, koska sähkövirta ei liiku tasaisena virtana, vaan koostuu lukemattomista yksittäisistä varauksenkuljettajista, jotka ovat aukkoja tai elektroneja. [20, s.5]

Kuten lämpökohinakin, myös raekohina on spektriltään valkoista [20, s.2]. Raekohinan kohinavirta lasketaan kaavalla

$$I_n = \sqrt{2 * q * I * B}. \quad (4)$$

Raekohinan laskentakaavassa [20, s.11] I_n raekohinan tehollisarvo q on elektronin varaus ($1,6021773 \cdot 10^{-19}$ coulombia), I on kohinalähteen läpi kulkeva virta (A) ja B on kaistanleveys hertseissä sillä taajuusalueella, mistä on kiinnostuttu (Hz). Kaavasta (4) ilmenee, että raekohina on suoraan verrannollinen läpi kulkevaan virtaan ja taajuuden tarkkailualueen laajuuteen.

Raekohinaan ei regulaattoreissa voi yleensä vaikuttaa. Jos sitä pitää erityisesti välttää, niin virran tai taajuuskaistan pienentäminen vähentää sitä. Diodit tuottavat paljon raekohinaa. BJT-transistorit tuottavat raekohinaa enemmän kuin FET-transistorit. [20, s.11]

6.6 Ulkoinen kohina

Regulaattoriin kytkettyjä ulkopuolisia komponentteja lukuun ottamatta edellä mainittujen kohinoiden syntymekanismit ovat olleet itse regulaattorista johtuvia. Regulaattorin ulkoiset kohinalähteet ovat asioita, joihin voidaan vaikuttaa. Ulkoisista häiriölähteistä [17] mainitsee:

- Ympäristön sähkömagneettiset kentät, jotka kytkeytyvät jollain tavalla piirin herkkiin sisäosiin. [17, s.3]
- Mekaaninen liike tai värinä, joka pietsosähköisen ilmiön kautta generoi vaihtojännitteitä [17, s.4]. Tässä mielessä keraamiset monikerroskondensaattorit, joissa on dielektriteitiltään korkean arvon eristemateriaaleja ovat erityisen hankalia. Näitä ovat yleiset Z5U ja X7R [21]. Juuri näissä kondensaattorityypeissä ja etenkin Z5U-tyypissä esiintyy myös lämpötilariippuvuutta ja bias-jännitteen kasvaessa vähenevää ominaiskapasitanssia.

Tästä syystä etenkin Z5U-kondensaattoreita ei suositella kriittisten regulaattorin ulostulosuodatukseen, ellei tasajännite-biaksen vaikutusta kapasitanssiin oteta huomioon tai sillä ei ole väliä [9, s.13].

- Ulkopuolelta johtimia pitkin johtuneet häiriöt, joiden syynä on usein huono sähkömagneettisen yhteensopivuuden suunnittelu (EMC, *Electromagnetic compatibility*). Kohina, häiriöt ja transientit voivat kytkeytyä myös säteillen, kapasitiivisesti ja induktiivisesti. [17, s.3]

7. YHTEENVETO

Lineaariregulaattori on usein ainoa vaihtoehto tuottaa sähköä kohteisiin, joissa sähkön vakaus on erityisen tärkeää. Tällaisia kohteita ovat etenkin analogiset sovelluskohteet. Lineaariregulaattoreita on monia eri tyyppisiä ja näillä tyypeillä on ymmärrettävästi hyvät ja huonot puolensa. Jokaisen lineaariregulaattorin huono puoli on lämmöksi muuttuva tehohäviö. Toisaalta lineaariregulaattorit tarjoavat puhtaimman ulostulojännitteen, ovat luotettavia ja helppokäyttöisiä sekä vievät etenkin pienillä virroilla hakkureita vähemmän tilaa. Kirjoittajan mielestä lineaariregulaattoreiden implementoinnin ja käytön kanssa lähes yhtä hankalaa on parhaan regulaattorin löytäminen laajan tarjonnan seasta.

Lineaariregulaattoriin liittyvien vikojen etsintä on suhteellisen helppoa. Jos sisään tulevan sähkön luonne sekä kuorman vaatima jännite, virta ja kuorman impedanssi tunnetaan, oikean regulaattorin valinnan jälkeen voi olla melko varma, että kaikki toimii kuten pitääkin, siinä missä hakkurissa ilmenee useammin ei-toivottua käyttäytymistä. Valitettavan usein tällainen hakkurin toiminta huomataan vasta tuotannossa olevassa laitteessa. Lisäksi toimimattoman tai väärin toimivan kytkennän selvittäminen on lineaariregulaattorissa hyvin suoraviivaista, siinä missä hakkurikytkennässä vikapaikka ei usein mitenkään suoraan näy heti päälle.

Kokonaisuus on tunnetusti osiensa summaa enemmän, ja yhdistämällä muiden tekniikoiden hyviä puolia lineaariregulaattoreiden ominaisuuksiin saadaan aikaisempaa parempia laitteita. Lineaariregulaattorista saatavat edut edellyttävät sen sisäisen toteutuksen hahmottamista ja valintaperusteiden tuntemista. Kirjoittaja olettaa, että piitekniikan suorituskyvyn noustessa saadaan entistä parempia lineaarisia regulaattoreita. Myös tietokoneohjaus tulee yleistymään ja houkuttelevammaksi tavaksi säätää lineaarisia regulaattoreita.

Vanha lause kuuluu, että ”kaikki tieto on jossain kirjassa, hankalaa on ainoastaan löytää se kirja”. Puolijohdevalmistajat ovat tuottaneet suuren määrän hyvin laadukasta sovellustietoa, joka on Googlen kautta jokaisen suunnittelijan hyödyksi vapaasti saatavilla. Tarjolla oleva tieto on paitsi kollegiaalisesti hyödyllistä, myös taiteellisesti kiehtovaa luettavaa, koska se on insinöörien insinööreille kirjoittamaa.

LÄHTEET

- [1] Luu, Qui, Analog Dialogue – Power Management for Integrated RF ICs, Analog Devices Jan 2015. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-49/number-1/articles/power-management-for-integrated-rfics.pdf>
- [2] Patoaux, Jerome – Ask The Applications Engineer - 37 Low-Dropout Regulators, Analog Dialogue, Analog Devices May 2007. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-41/number-2/articles/low-dropout-regulators.pdf>
- [3] Franco, Sergio – Design With operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, 4th edition, McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-802816-8
- [4] Zhang, Henry J. – Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies, Analog Devices Oct 2013. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN140fb.pdf>
- [5] Marasco, Ken – How to Successfully Apply Low Dropout Regulators, Rev 0, Analog Devices 2010. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1072.pdf> AN-1072
- [6] Simpson, Chester – Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals, SNVA558, Texas Instruments 2011. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/snva558/snva558.pdf>
- [7] Harju, Timo; Miettinen, Arto – Sääätötekniikan koulutusmateriaali, maaliskuu 2000. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1367/pid_kirja_1-1.pdf
- [8] Jung, Walt – References and Low Dropout Linear regulators, Analog Devices. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/ptmsect2.pdf>
- [9] Williams, Jim; Owen, Todd – AN83 Performance Verification of Low Noise, Low Dropout Regulators, "Silence of the Amps". Linear Technology Corporation. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an83f.pdf>
- [10] AMS1117 datasheet, 1A Low Dropout Voltage Regulator. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
- [11] Voltage reference selection basics, Texas Instruments, Sept 2018. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <https://www.ti.com/lit/wp/slpy003a/slpy003a.pdf>
- [12] Miller, Perry; Moore, Doug – Precision voltage references, Texas Instruments, Nov 1999. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/slyt183/slyt183.pdf>
- [13] Theory of Operation and Compensation, Texas Instruments, SNVA 020B–May 2000–Revised May 2013. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/snva020b/snva020b.pdf>
- [14] Integrated Publishing, Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://electriciantraining.tpub.com/14179/css/Series-And-Shunt-Voltage-Regulators-207.htm>
- [15] Diodes Incorporated – Designing with Shunt Regulators - Fixed voltage regulators and opto isolation. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <https://www.diodes.com/assets/App-Note-Files/an60.pdf>
- [16] Wenzel, Charles – Finesse voltage regulator noise. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla <http://www.wenzel.com/documents/finesse.html>

- [17] Morita, Glenn – Noise Sources in Low Dropout (LDO) Regulators, Analog Devices, AN-1120, Jun 2011, Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1120.pdf>
- [18] LDO Noise Demystified – Application Report 412, SLAA412A, June 2009, Revised Aug 2017, Texas Instruments. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/slaa412a/slaa412a.pdf>
- [19] Resistorguide.com, resistor noise. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <http://www.resistor-guide.com/resistor-noise/>
- [20] Kärnä, Petri – Kohina mittauksissa, 2009. Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: http://electronics.physics.helsinki.fi/wp-content/uploads/2011/02/kohina_mittauksissa.pdf
- [21] Allaboutcircuits.com, Viitattu 31.3.2020. Saatavilla: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/x7r-x5r-c0g...-a-concise-guide-to-ceramic-capacitor-types/>