



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

JÄNNITETTÄ NOSTAVAN HAKKURIN KÄYTTÖ AKKU- KÄYTTÖISESSÄ AUDIOLAITTEESSA

Step-up switched-mode power supply for a battery operated audio device

Tuomo Heiskanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Tuomo Heiskanen

Jännitettä nostavan hakkurin käyttö akkukäyttöisessä audiolaitteessa

2014

Kandidaatintyö.

23 s.

Tarkastaja: DI Joonas Talvitie

Audiovahvistimet pohjautuvat yhä useammin D-luokan vahvistimiin niiden korkean hyötysuhteen takia. Tämä mahdollistaa pidemmän käyttöajan tai vastaavasti tehon lisäämisen kannettavissa audiolaitteissa. Kuitenkin, jotta akkukäyttöisestä audiolaitteesta saataisiin suurempaa tehoa, se vaatii yleensä korkeamman jännitteen kuin yksittäisen akun lähtöjännite on. Korkeampi jännite voidaan saavuttaa lisäämällä akkuja tai käyttämällä jännitettä nostavaa hakkuria. Hakkureissa syntyy kuitenkin kytkennästä johtuvaa värettä, mille D-luokan vahvistimet ovat alttiita.

Tässä työssä tutkitaan boost- ja Čuk-hakkurin soveltuvuutta jännitteen nostoon akkukäyttöisessä audiolaitteessa. Käytännön sovelluksena toimii Porsas, josta halutaan saada 500 W teho. Työssä tutkitaan audiolaitteen asettamia ehtoja jännitelähteelle sekä hakkurien mitoittamista ehtojen mukaisesti. Työn tutkimustapana on kirjallisuustutkimus ja simulointi.

Audiolaitteen jännitelähteeltä vaatima teho vaihtelee suuresti. Tämä tulee ottaa huomioon hakkurin komponenttien mitoituksessa. Lisäksi hakkurin lähtöjännitteen väre pyritään minimoimaan, koska sillä on suuri vaikutus vahvistimen toimintaan. Tulovirran väreen minimoinnilla on pidentävä vaikutus akun purkusykliin.

Hakkurien laskennalliset komponenttien arvot sekä simuloinnit osoittavat, että hakkurit olisivat myös mahdollista tehdä käytännössä. Simulointien perusteella boost-hakkurin komponenttien arvot ovat pienempiä kuin Čuk-hakkurin. Boost-hakkurille löytyy myös valmiita ohjainpiirejä enemmän. Toisaalta Čuk-hakkurilla on mahdollista tehdä myös energiansäästötila. Hakkurien ohjaus ja jäähdytys vaatisivat jatkotutkimusta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

Degree Programme in Electrical Engineering

Tuomo Heiskanen

Step-up switched-mode power supply for a battery operated audio device

2014

Bachelor's Thesis.

23 p.

Examiner: M.Sc.(Tech) Joonas Talvitie

Audio amplifiers are based on class D amplifiers in increasing numbers because of their high efficiency. Class D amplifiers allow longer usage time as well as making more powerful portable audio devices. In order to get more power from an audio device, it usually demands greater voltage than a single battery can supply. This can be accomplished by using a step-up switched-mode power supply (SMPS). However, the added power supply noise can cause unwanted behavior in the class D amplifiers.

In this Bachelor's Thesis, suitability of boost and Čuk converters to voltage conversion in a battery operated audio device is studied. The device under study is an audio device called Porsas from which 500 W power is desired. The suitability of the converter is based on the requirements that an audio device sets. In this thesis, the ways of research are literary research and simulation.

The power that an audio device draws from the power supply changes widely which has to be taken in to consideration when selecting SMPS component values. SMPS output voltage ripple has great behavioral effects on the amplifier so it should be minimized. Input current ripple should be minimized as well for better usage time.

The calculated component values and simulations of SMPS confirm that both boost and Čuk converters are possible to make in practice. Based on the simulation, boost converter's component values are smaller than Čuk converter's. There are also more ready-made controller circuits for boost converter. On the other hand, an audio device can be used in energy saving mode if Čuk converter are used. Design of SMPS control and cooling requires more research.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	5
1. Johdanto	6
2. Jänniteregulaattorit.....	7
3. Hakkurin käyttö audiosovelluksessa.....	8
4. Hakkurin toiminta	11
4.1 Boost-hakkurin toiminta	11
4.2 Čuk-hakkurin toiminta.....	12
4.3 Hakkurin ohjaus.....	13
5. Hakkurin mitoitus.....	14
5.1 Boost-hakkurin mitoitus	14
5.2 Čuk-hakkurin mitoitus	15
6. Käytännön sovellus	17
6.1 Komponenttien mitoitus	17
6.2 Simulointi.....	18
7. Johtopäätökset.....	21
Lähteet	22

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinnät

C	Kondensaattori, kapasitanssi
E	Jännitelähde
D	Diodi, pulssisuhde
I	Virta
L	Kela, induktanssi
Q	Kytkintransistori
R	Resistiivinen kuorma
t	Aika
T	Jaksonaika
U	Jännite
Δi	Virran väre
Δu	Jännitteen väre

Alaindeksit

in	Hakkureiden tulopuoli
out	Hakkureiden lähtöpuoli

Lyhenteet

CCM	Jatkuvan johtamisen tila, Continuous Conduction Mode	
DCM	Epäjatkuvan johtamisen tila, Discontinuous Conduction Mode	
MOSFET	Metallioksidikanavatransistori, Metal-Oxide-Semiconductor Transistor	Field-Effect
SMPS	Hakkuri, Switched-Mode Power Supply	
THD	Harmoninen kokonaissärö, Total Harmonic Distortion	

1. JOHDANTO

Audiovahvistimet pohjautuvat yhä useammin D-luokan vahvistimiin niiden korkean hyötysuhteen takia. Varsinkin kannettavissa audiolaitteissa D-luokan vahvistimilla saavutetaan pidempi käyttöaika ja pienempi jäähtymisen tarve kuin perinteisillä A-, B- ja AB-luokan vahvistimilla. (Putzeys, 2003)

Akkukäyttöisessä audiolaitteessa D-luokan vahvistimella on mahdollista tuottaa myös suurempi teho samalla käyttöajalla kuin A-, B- ja AB-luokan vahvistimilla. Suurempi teho voidaan saavuttaa pienentämällä kaiuttimien ominaisimpedanssia tai nostamalla jännitettä (Berkhout, et al., 2013). Kaiuttimien ominaisimpedanssi on yleensä välillä 2-8 Ω (Mendenhall, 2005) ja yksittäisen akun lähtöjännite ei riitä suuren tehon tuottamiseen. Tällöin tehoa voidaan lisätä nostamalla jännitettä kytkemällä akkuja sarjaan tai elektroniikan avulla käyttämällä jännitettä nostavaa hakkuria. Kun käytössä on rajalliset tilat, on jännitettä nostava hakkuri kokonsa ja keveytensä takia vaihtoehto jännitetason nostoon lisäakun sijaan. D-luokan vahvistimet ovat kuitenkin alttiita häiriöille, jotka johtuvat pääosin jännitelähteen väreestä tai vahvistimen ajoitusvirheistä (Putzeys, 2003). Jännitelähteen suunnittelulla on siis suuri merkitys äänen laatuun.

Kirjallisuudessa audiokäyttöön soveltuvien hakkureiden käyttöä on tutkittu vähän. Saatavilla olevat tutkimukset keskittyvät lähinnä hakkurien säätöön (Lin, et al., 2011; Oliveira, et al., 2011; Ogawa, et al., 2008) ja vahvistimen suunnitteluun niin, että se ei ole herkkä jännitelähteen väreelle (Ge & Chang, 2008; Lam, et al., 2013). Lisäksi akkukäyttöisiä audiolaitteita tutkivissa tutkimuksissa keskitytään pääasiassa pienitehoisiin laitteisiin.

Tässä työssä perehdytään kuitenkin ei-erotetun jännitettä nostavan hakkurin käyttöön D-luokan vahvistimen jännitelähteenä akkukäyttöisessä audiolaitteessa. Käytännön esimerkkinä toimii kannettava audiolaitte Porsas (Talvitie, et al., 2011), jonka D-luokan vahvistimen tuottamaa tehoa halutaan lisätä 500 W nostamalla akun jännitettä hakkurilla. Kaiuttimien ominaisimpedanssi on laitteessa jo määritelty, joten tehoa ei voida lisätä kaiuttimien ominaisimpedanssia muuttamalla. Tutkittavina hakkureina ovat boost- ja Čuk-hakkurit. Vahvistimen herkkyyttä jännitelähteen väreelle sekä ajoitusvirheitä voidaan parantaa myös erilaisilla pulssimodulaatioilla, takaisinkytkennöillä ja komponentti-valinnoilla, mutta tässä työssä ei perehdytä vahvistimen suunnitteluun. Työssä ei oteta myöskään kantaa hakkurin ohjaukseen, jolla on merkitystä varsinkin kuorman muutoksista johtuvien transienttipiikkien redusoinnissa. Työssä tavoitteena on boost- ja Čuk-hakkurin mitoitus Porsaaseen sopivaksi.

2. JÄNNITEREGULAATTORIT

Jänniteregulaattorit voidaan jakaa lineaari- ja hakkuriregulaattoreihin. Perinteisesti akkukäyttöisissä audiosovelluksissa on käytetty lineaariregulaattoreita, koska ne mahdollistavat tasaisen jännitteen tuottamisen ja eivät aiheuta audioalueen häiriötä. Ne eivät sisällä kytkimiä ja näin ollen niistä ei synny kytkentäilmiöistä johtuvia häiriöitä. Lineaarisilla regulaattoreilla ei kuitenkaan pysty nostamaan jännitettä. Tällöin, jos tarvitaan akun lähtöjännitettä suurempi jännite, joudutaan käyttämään muita jänniteregulaattoreita. Lisäksi lineaariregulaattoreilla on yleensä heikko hyötysuhde, joka aiheutuu sen yli vaikuttavasta jännitteestä ja läpi kulkevasta virrasta. Mitä suurempi virta tai jännitteen alenema on, sitä suurempi on myös hukateho. Hukateho aiheuttaa regulaattorin lämpiämistä, mikä voi aiheuttaa ongelmia jäähdytyksen kanssa. Tästä syystä lineaariregulaattorit eivät sovellu yleensä akkukäyttöisiin laitteisiin. (Reiman, 2002)

Hakkurit ovat perusrakenteeltaan kytkimestä, diodista, kelasta ja kondensaattorista koostuvia jänniteregulaattoreita. Hakkurin toiminta perustuu kelan virran pätkimiseen suurella taajuudella. Kytkennästä syntyy kuitenkin jännitteeseen väreitä, mikä voi, korkeasta taajuudesta huolimatta, näkyä audiotaajuuksilla alemmina harmonisina taajuuksina. Koska D-luokan vahvistimen kaiuttimille tuleva jännite on verrannollinen jännitelähteen jännitteeseen, pienikin väre jännitteessä moduloituu lähtöön (Putzeys, 2003). Hakkureilla voidaan kuitenkin nostaa jännitettä ja niiden hyötysuhde voi olla jopa yli 96 %:a riippuen teholuokasta (Reiman, 2002).

Hakkurit voidaan jakaa ei-erotettuihin ja erotettuihin hakkureihin. Yleisimmät hakkurit, jännitettä nostava boost-hakkuri ja jännitettä laskeva buck-hakkuri, ovat ei-erotettuja hakkureita. Vaikka hakkurin toteutustekniikoita on useita, ovat useimmat hakkurit muunneltavissa peruskytkennöistä. Esimerkiksi sekä jännitettä laskeva että nostava Čuk-hakkuri saadaan boost- ja buck-hakkurien kombinaationa. Erotettu hakkuri saadaan lisäämällä ei-erotettuun hakkuriin muuntaja.

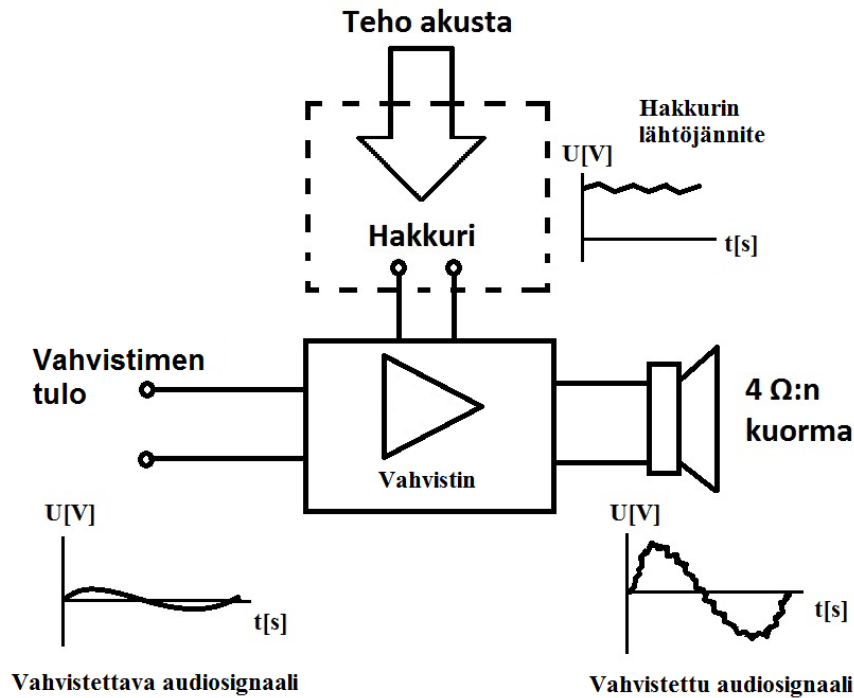
Akkukäyttöisessä laitteessa ei vaadita sähköistä erotusta kuorman ja lähteen välille, joten käytetään ei-erotettuja hakkureita. Ei-erotetut hakkurit ovat myös pienempiä kuin muuntajalla varustetut vastaavat erotetut hakkurit. Tässä työssä tutkitaan yleisimmän jännitettä nostavan hakkurin, boost-hakkurin, käyttöä jänniteregulaattorina akkukäyttöisessä audiolaitteessa. Čuk-hakkuri valittiin toiseksi tarkasteltavaksi topologiaksi sen lupaavien ominaisuuksien kuten jatkuvan tulovirran ja lähtöjännitteen pienen väreiden takia (Erickson & Maksimovic, 2001).

3. HAKKURIN KÄYTTÖ AUDIOSOVELLUKSESSA

Audiovahvistimen jännitelähteenä toimiva hakkuri eroaa tyypillisestä hakkurista, kuten tietokoneen laturista, lähinnä vaadittavan tehon ja kuorman suhteen. Kun tyypilliseltä hakkurilta vaadittava teho pysyy lähes vakiona, audiokäytössä se vaihtelee suuresti, koska audiosignaalin teho vaihtelee suuresti. Audiokäyttöön tarkoitettu hakkuri toimiikin suurimaksi osaksi murto-osalla piikkitehosta. Tämä on otettava huomioon ohjausta ja komponentteja valittaessa. (Mendenhall, 2005)

Tyypillinen kiinteän kuorman hakkuri voidaan mitoittaa 110-120 % nimellisvirran tuottokyvylle. Komponentit sekä jäähdytys voidaan mitoittaa nimellisteholle. Audiokäyttöön soveltuvan hakkurin tulisi tuottaa nimellisteho siniaaltona. Toisaalta tavallinen audiosignaali on keskimääräiseltä teholtaan vain väliä $1/8$ ja $1/3$ maksimitehosta. Komponentit on mitoitettava kestämään suurin teho, jolloin komponenttien tehonkesto täytyy valita maksimitehon mukaan. Kuitenkin keskimääräinen teho voidaan ottaa huomioon mitoituksessa. Jäähdytys sekä virran ja jännitteen väreiden suodatukseseen käytetyt komponentit voidaan mitoitaa keskimääräisen tehon mukaan, koska suuremman tehon tarve on vain hetkittäistä. (Mendenhall, 2005)

Ongelmana hakkureiden käytössä ovat niiden aiheuttamat kytkentäilmiöt, jotka voivat aiheuttaa häiriöitä muissa komponenteissa. Monissa sovelluksissa kohina on nähtävissä lähdön väreenä. Lisäämällä kuorman rinnalle jännitteen suodatuskondensaattori, sen värettä voidaan vähentää paikallisesti. Ongelmana audiolaitteessa on, että kohinan voi kuulla ja se heikentää suoraan vahvistimen suunniteltua toimintaa. Hakkurista aiheutuvat häiriöt ja jännitteen epätasaisuus voivat aiheuttaa lähtöjännitteen säröytymistä ja muita äänenlaadun kannalta merkittäviä häiriöitä. (Mendenhall, 2005) Kuvassa 3.1 on esitetty kyseessä oleva audiolaitte ja sen lähtöjännitteen väreen vaikutus audiosignaaliin.



Kuva 3.1. Kuvassa esitetty akkukäyttöisen audiolaitteen rakenne. Hakkurilta tulevassa jännitteessä on värettä, mikä moduloituu vahvistettavaan signaaliin. Tällöin vahvistetussa signaalissa on värettä.

Kuvasta nähdään, että vahvistettu signaali ei vastaa enää alkuperäistä signaalia, vaan siihen on moduloitunut jännitelähteen väreestä johtuvaa kohinaa. Tätä alkuperäisen signaalin ja vahvistetun signaalin suhdetta kuvataan yleensä audiolaitteessa harmonisella kokonaissäröllä (THD), joka kuvaa harmonisten taajuuksien voimakkuutta alkuperäiseen signaaliin. Hyvässä vahvistimessa THD pyritään minimoimaan ja yleensä hifi-laadun vahvistimessa pyritään THD saamaan 0,01 %. Koska D-luokan vahvistimella jännite tulee suoraan pääteasteen MOSFET-kytkimille, vaikuttaa se signaaliin syntyvään väreeseen. (Putzeys, 2003) Lisäksi esivahvistimina toimivat operaatiovahvistimet ja epäideaaliset komponentit lisäävät kohinaa. Tästä syystä jännitelähteen väre pyritään samaan alle 0,01 prosenttiin jännitteestä.

Yleensä lähtöjännitteen väreen minimointi onnistuu kondensaattorilla, jonka arvo voi kuitenkin olla useita tuhansia mikrofaradeja. Koska kyseessä on tasavirtapiiri, on mahdollista käyttää elektrolyyttikondensaattoria, mikä helpottaa vaadittavan kapasitanssin saavuttamisessa. Kuitenkin muuttuva kuorma voi aiheuttaa ohjauksesta johtuvia suuritaajuisia transienttipiikkejä. Vaikka ne esiintyvät kytkentätaajuudella, muodostuvat ne korkeataajuisista komponenteista, ja ovat vaikeita vaimentaa. Suuritaajuiset piikit voivat demoduloitua vahvistimen komponenteissa harmonisina taajuuksina, jotka voivat olla audioalueella. Piikeillä voi olla huomattavasti suurempi merkitys äänenlaatuun kuin kytkentätaajuudesta

johtuvalla väreellä. Siksi lähtöjännitteen väreen ja transienttipiikkien suodatukseen on usein käytettävä suodatusta. (Mendenhall, 2005)

Lisäksi audiolaitteen teholahteenä toimiva akku asettaa hakkurille ehtoja. Hakkurin energiatehokkuudella on merkitystä akun käyttöikään ja siitä saatavan energian määrään. Hakkurin häviöt voidaan jakaa kytkentätaajuudesta riippuviin ja riippumattomiin häviöihin, kytkentä- ja johtumishäviöihin. Kytkentähäviöt aiheutuvat pääosin kytkintransistorin tilanmuutoksessa johtavasta tilasta johtamattomaan tilaan ja päinvastoin sekä kelan hystereesihäviöistä. Johtumishäviöt johtuvat pääosin kelan, kytkintransistorin, diodin ja kondensaattorin resistansseista.

Hakkurin häviöt kasvavat kytkentätaajuuden funktiona, koska kytkentähäviöt riippuvat suoraan kytkentätaajuudesta ja johtumishäviöt pysyvät samana taajuudesta riippumatta. Kuitenkin liian matalaa kytkentätaajuutta on vältettävä, koska se voi johtaa komponenttien soimiseen (Lenk, 1995). Komponenttien soiminen syntyy, kun kytkentäilmiöt aiheuttavat komponentissa värähtelyä, joka on ihmisen kuuloalueella. Se taas voi johtaa audiosignaalin häiriintymiseen.

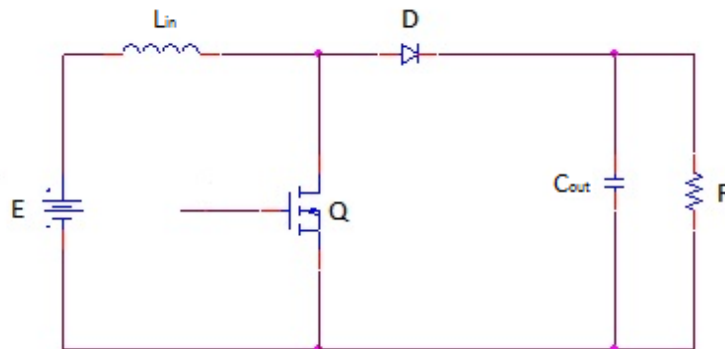
Myös tulovirran väreellä on vaikutusta hakkurin häviöihin sekä akusta saatavan energian määrään. Jännitettä nostavissa hakkureissa tulovirta on mahdollista saada jatkuvaksi ja sen väre minimoitua. Yleensä virran väre pyritään mitoittamaan noin 20-40 % kelan virrasta (Reiman, 2002).

4. HAKKURIN TOIMINTA

Jotta hakkurin soveltuvuutta audiolaitteessa voidaan ymmärtää, on tunnettava hakkurin perustoiminta. Tässä kappaleessa käydään läpi tutkittavien hakkurien toiminnot sekä hakkurin ohjauksen perustyyppit.

4.1 Boost-hakkurin toiminta

Boost-hakkuri on yksinkertaisin jännitettä nostava hakkuri, jonka toiminnalla voidaan selittää myös muiden hakkureiden toimintaa. Boost-hakkurin periaatteellinen kuva ilman kytken ohjausta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1 Boost-hakkurin kytkentä. E on jännitelähde, L_{in} kela, D diodi, C_{out} kondensaattori, Q kytkintransistori, jonka kantaan tulee ohjaussignaali ja R on kuorma.

Kun kytkin Q on johtavassa tilassa, jännitelähteen jännite kytkeytyy kelan L_{in} yli. Jännitelähteen tulovirta kulkee kelan läpi synnyttäen magneettikentän, johon varattu energia kasvaa kun kytkintä pidetään johtavassa tilassa. Samalla diodin D yli on estosuuntainen jännite ja kondensaattori C_{out} syöttää virtaa kuormalle. Kondensaattori purkautuu ja lähtöjännite alkaa pudota. Ennen kuin kytkin kytketään johtamattomaksi, kelan virta kasvaa lineaarisesti maksimiarvoonsa ja kondensaattorin jännite laskee minimiarvoonsa. (Lenk, 1995)

Kun kytkin kytketään johtamattomaksi, magneettikenttä purkautuu, ja kelaan varastoitunut energia purkautuu virtana kelan läpi samaan suuntaan kuin latausvirta. Koska kytkin on auki, virta kulkee diodin läpi kuormalle ja lataa kondensaattoria. Kun kytkimen sulkemis- ja aukaisusyklin aika on huomattavasti kuorman ja kondensaattorin muodostaman RC-piirin aikavakiota pienempi, syntyy kuormalle jatkuva tasajännite. Ennen kuin kytkin kytketään taas johtavaksi, kelan virta laskee lineaarisesti minimiarvoonsa ja kondensaattorin jännite kasvaa maksimiarvoonsa. (Lenk, 1995)

Tulojännitettä suurempi lähtöjännite on mahdollinen, koska nopea virran muutos kelassa aiheuttaa suuren jännitteen. Kun kytkin on auki, kelan jännite nousee hetkessä yli diodin kynnysjännitteen ja lisääntyy sitten jännitelähteen jännitteeseen. Boost-hakkurissa lähtöjännitteen ja tulojännitteen suhde saadaan yhtälöllä

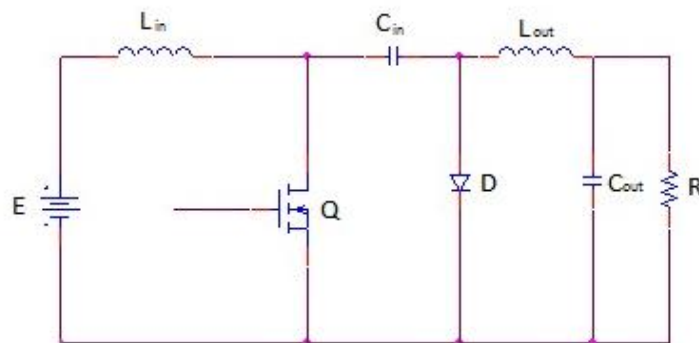
$$\frac{U_{out}}{E} = \frac{1}{1-D} \quad , \quad (4.1)$$

missä D on pulssisuhde, eli kytkimen johtamisajan suhde jaksonaikaan. (Fisher, 1991)

Riippuen kelan induktanssista ja kytkentätaajuudesta kelan koko energia voidaan siirtää kondensaattorille, jolloin kyseessä on epäjatkuva johtamistila (DCM). Tällöin kelan virta laskee jokaisella kytkentäjaksolla nolnaan. Jos kelan virta ei laske nolnaan, on kyseessä jatkuva johtamistila (CCM). (Reiman, 2002) Audiosovelluksessa epäjatkovaa johtamismoodia pitää välttää pienillä kuorman virroilla, koska silloin kytkimen johtamisaikana ohjaus ei pysty tuottamaan tarpeeksi pientä kelan virtaa. Tästä seuraa, että ohjaus jättää johtamistilan yli yhden tai useamman syklin aikana. Tämä aiheuttaa kytkentätaajuutta alempia taajuuksia, jotka voivat häiritä audiosignaalia. (Lenk, 1995)

4.2 Čuk-hakkurin toiminta

Čuk-hakkuri on boost-hakkurista johdettu hakkuri. Siinä on kaksi kelaa ja kondensaattoria. Se käyttää kondensaattoria energiavarastona toisin kuin muut hakkurit. Čuk-hakkurin kytkentä ilman kytkimen ohjausta on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Čuk-hakkuri kytkentä. E on jännitelähde, L_{in} tulopuolen kela, Q kytkintransistori, jonka kantaan tulee ohjaussignaali, C_{in} energiavarastona toimiva kondensaattori, D diodi, L_{out} on lähtöpuolen kela, C_{out} on lähtöpuolen kondensaattori ja R on kuorma.

Kun kytkin Q on johtamattomassa tilassa kelojen L_{in} ja L_{out} virrat kulkevat diodin D läpi. C_{in} latautuu jännitelähteen ja kelan L_{in} energialla. Kelan L_{in} virta laskee, koska kondensaattori

on suuremmissa jännitteissä kuin lähteen jännite. Kela L_{out} syöttää kuormaan, joten sen virta laskee myös. (Mohan, et al., 1989)

Kun kytkin on johtavassa tilassa, kondensaattorin jännite biasoi diodin estosuuntaan. Kellojen virrat kulkevat kytkimen läpi. Koska kondensaattorin C_{in} jännite on suurempi kuin lähteen, se purkautuu kytkimen kautta siirtäen energiaa lähtöön ja kelalle L_{out} . Tästä syystä kelan L_{out} virta kasvaa. Lähde syöttää kelaa L_{in} , jonka virta kasvaa myös. Kondensaattorin C_{out} tarkoitus on tasoittaa kuorman jännitettä. (Mohan, et al., 1989)

Čuk-hakkurissa kelan L_{out} virta kulkee eri suuntaan kuin kelan L_{in} , joten hakkuri invertoi jännitteen. Tästä syystä lähtöjännite voi olla myös pienempi kuin tulojännite. Čuk-hakkurin lähtö- ja tulojännitteen suhde saadaan yhtälöllä

$$\frac{U_{out}}{E} = \frac{D}{1-D} \quad (4.2)$$

Samoin kuin boost-hakkuri Čuk-hakkuri voi toimia jatkuvassa johtamismoodissa (CCM) tai epäjatkuvassa johtamismoodissa (DCM). (Mohan, et al., 1989)

4.3 Hakkurin ohjaus

Hakkurin kytkintä ohjataan yleensä pulssileveys- tai pulssitaajuusmodulaatiolla. Kytkimen johtamisaikaa ohjataan niin, että lähtöjännite pysyy mahdollisimman tasaisena kuorman ja tulojännitteen vaihtelusta huolimatta. (Reiman, 2002)

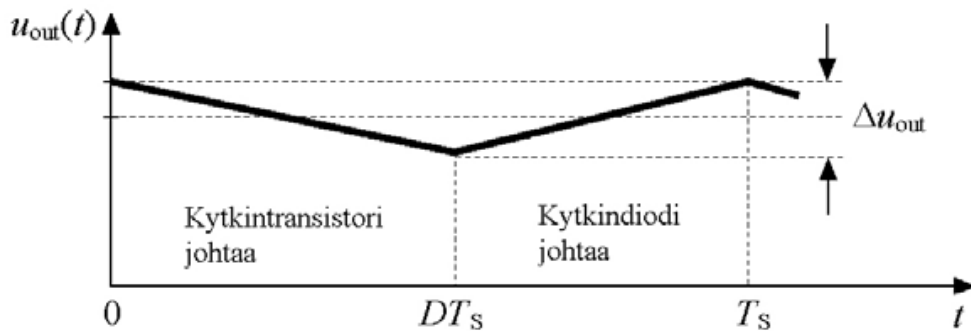
Pulssileveysmodulaatiossa kytkentätaajuus pysyy vakiotaajuusena ja pulssisuhdetta muokkaamalla ohjataan kuormalle menevää energiaa (Mohan, et al., 1989). Pulssileveysmodulaation etuna audiosovelluksessa on taajuuden pysyminen vakiona. Tällöin tarpeeksi suureksi valittu kytkentätaajuus voi estää audiotaaajuudella ilmenevän häiriön. Pulssitaajuusmodulaatiossa taas pulssisuhde pysyy vakiona ja kytkentätaajuutta muuttamalla kelaan varastoitunutta energiaa voidaan säädellä (Mohan, et al., 1989). Kytkemisestä syntyvien häiriöiden taajuudet vaihtelevat kuorman mukaan. Suurella kuormituksella kytkentätaajuus pienenee, jolloin kytkemisessä johtuvat häiriöt voivat ilmetä audiotaaajuuksilla.

5. HAKKURIN MITOITUS

Kuten edellä mainittiin audiosovelluksen hakkurin mitoituksessa pyritään mahdollisimman tasaiseen lähtöjännitteeseen, jotta audiosignaali ei häiriintyisi. Lisäksi akkukäyttöisessä sovelluksessa pyritään mahdollisuuksien mukaan mahdollisimman pieneen tulovirran väreeseen, jotta akusta saataisiin mahdollisimman paljon energiaa. Lähtöjännitteen väreeseen vaikuttaa yleisesti hakkureissa kondensaattoreiden kapasitanssi. Tulovirran väreeseen voidaan vaikuttaa kelan induktanssi. Lisäksi väreisiin vaikuttaa kytkentätaajuus ja pulssisuhde.

5.1 Boost-hakkurin mitoitus

Boost-hakkurin lähtöjännitteen väreeseen vaikuttaa lähtökondensaattori. Kytkimen johtaessa kondensaattori purkautuu ja kytkimen ollessa johtamattomassa tilassa kondensaattori latautuu. Samalla myös kondensaattorin jännite vaihtelee, mikä näkyy suoraan lähtöjännitteen vaihteluna. Kuvassa 5.1 on esitetty kondensaattorin jännite jatkuvassa johtamismoodissa.



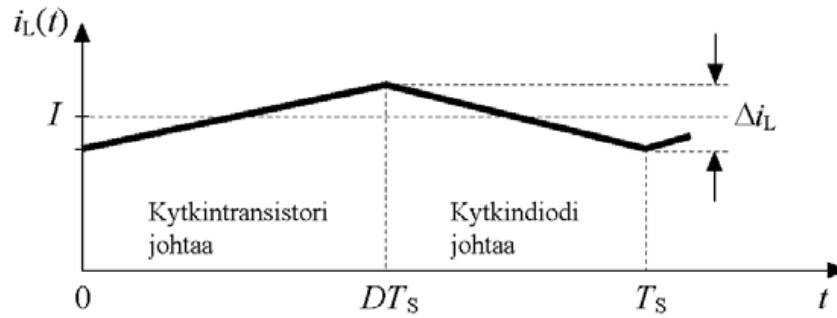
Kuva 5.1. Kondensaattorin jännitteen väre, kun kytkintransistori johtaa ja ei johda. (Reiman, 2002)

Kondensaattori mitoitetaan yhtälöllä

$$C_{out} = I_{out} \frac{DT}{\Delta u_{out}} \quad , \quad (5.1)$$

missä C_{out} on kondensaattorin kapasitanssi, I_{out} on toimintapisteen lähtövirta, D on pulssisuhde tulojännitteellä, T jaksonaika sekä Δu_{out} haluttu lähtöjännitteen väre. Lähtöjännitteen väreeseen minimoimiseksi voidaan tulopuolelle lisätä kondensaattori. Tämä kondensaattori toimii varaenergiavarastona ja tasoittaa lähtöpuolen jännitettä nopeiden muutosten aikana. Samalla se vaikuttaa ohjauksen tarkkuuteen ja näin lähtöjännitteeseen. (Reiman, 2002)

Boost-hakkurissa tulovirran väreeseen vaikuttaa kelan induktanssi. Epäjatkuvassa johtamismoodissa tulovirta vaihtelee nollan ja korkean huippuarvon välillä, kun jatkuvassa johtamismoodissa tulovirran väre on mahdollista minimoida. Tästä syystä akkukäyttöisessä laitteessa on siis parempi käyttää jatkuvassa johtamismoodissa toimivaa hakkuria. Kuvassa 5.2 on esitetty virran kelan virran käyttäytyminen jatkuvassa johtamismoodissa.



Kuva 5.2. Kelan virran käyttäytyminen, kun kytkintransistori johtaa ja ei johda. (Reiman, 2002)

Kelan induktanssi mitoitetaan yhtälöllä

$$L_{in} = U_{in} \frac{DT}{\Delta i_{in}} \quad , \quad (5.2)$$

missä L_{in} on kelan induktanssi, U_{in} on tulojännite sekä Δi_{in} haluttu tulovirran väre (Reiman, 2002).

5.2 Čuk-hakkurin mitoitus

Čuk-hakkurissa on mahdollista minimoida lähdön ja tulon virran väreet. Tulopuolen kondensaattorin C_{in} yli olevan jännitteen tulisi olla mahdollisimman tasaista. Kondensaattorin jännitteen käyttäytyminen jatkuvassa johtamismoodissa on vastaava kuin kuvassa 5.1 esitetyn boost-hakkurin tapauksessa.

Tulopuolen kondensaattori mitoitetaan yhtälöllä

$$C_{in} = I_{out} \frac{DT}{\Delta u_{out}} \quad , \quad (5.3)$$

missä C_{in} on kondensaattorin kapasitanssi, I_{out} lähtövirta, D pulssisuhde, T jaksonaika sekä Δu_{out} haluttu lähtöjännitteen väre (Erickson & Maksimovic, 2001).

Lähtöjännitteen väreeseen vaikuttaa sekä kondensaattorin C_{out} että kelan L_{out} arvo. Kela L_{out} mitoitetaan yhtälöllä

$$L_{out} = \frac{U_{in}DT}{\Delta i_{out}} , \quad (5.4)$$

missä L_{out} on kelan induktanssi, U_{in} tulojännite, D pulssisuhde, T jaksonaika sekä Δi_{out} haluttu lähtöpuolen kelan virran väre. Kelan virran käyttäytyminen on vastaava kuin kuvassa 5.2 esitetyn boost-hakkurin tapauksessa, mutta arvoltaan negatiivinen. Kondensaattori C_{out} mitoitetaan yhtälöllä

$$C_{out} = \Delta i_{out} \frac{T}{8\Delta u_{out}} , \quad (5.5)$$

missä C_{out} on kondensaattorin minimiarvo, Δi_{out} kelan L_{out} virran väre, T jaksonaika ja Δu_{out} haluttu lähtöjännitteen väre. (Erickson & Maksimovic, 2001) Lähtöpuolen kondensaattorin jännite käyttäytyy kuvan 5.1 mukaisesti kuten boost-hakkurissa, mutta väre on samalla kapasitanssin arvolla huomattavasti pienempi.

Kuten boost-hakkurissa tulovirran väreeseen vaikuttaa kelan L_{in} induktanssi. Se mitoitetaan yhtälön 5.2 mukaan ja se käyttäytyy kuvan 5.2 mukaisesti.

Mitoitusta laskiessa on huomioitava, että komponenttien epäideaalisuudet kuten kondensaattorin ja kelan sarjaresistanssit vaikuttavat väreisiin sekä hakkurin käyttäytymiseen ja aiheuttavat häviöitä. Edellä esitetyt yhtälöt antavatkin suuntaa antavan minimiarvon ja usein joudutaan valitsemaan suuremmat arvot kuin yhtälöt antavat.

6. KÄYTÄNNÖN SOVELLUS

Käytännön sovelluksena toimii Porsas, jossa on 4Ω kaiutinkuorma sekä vahvistimena toimii D-luokan kokosiltavahvistin. Porsaassa on 23 V LiPo-akku. Jännitettä tulisi nostaa 63,2 volttiin, jotta saavutettaisiin haluttu 500 W teho.

6.1 Komponenttien mitoitus

Komponenttien arvojen mitoituksessa käytetään tehona 167 W, koska maksimitehon ollessa 500 W keskimääräinen audiosignaalin teho on korkeintaan 1/3 maksimitehosta. Kuitenkin komponenttien tehonkeston tulee olla vähintään 500 W, koska keskimääräinen teho sisältää myös maksimitehopiikkejä. Kytchentäaajuudeksi valitaan 300 kHz, mikä on huomattavasti audiotäaajuuksia korkeampi. Tällöin jaksonaika on 3,33 μ s. Haluttu lähtöjännitteen väre on korkeintaan 0,01 % ja tulovirran väre korkeintaan 20 % keskimääräisen tehon arvoista. Tulovirraksi saadaan Ohmin lailla 7,26 A. Lähtövirraksi saadaan vastaavasti 2,64 A.

Boost-hakkurin pulssisuhteeksi saadaan yhtälöllä (4.1) 0,65 ja Čuk-hakkurin pulssisuhteeksi yhtälöllä (4.2) 0,74, kun huomioidaan diodin aiheuttama jännitteen alenema tulojännitteen arvossa. Boost-hakkurin komponenttien arvot saadaan laskettua yhtälöillä (5.1) ja (5.2). Vastaavasti Čuk-hakkurin komponenttien arvot lasketaan yhtälöillä (5.2- 5.5). Näin saadut arvot on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. Simuloinneissa käytettävät pulssisuhteet ja komponenttien arvot, kun lähtöjännitteen väre on 6,3 mV, tulovirta 7,26 A, lähtövirta 2,64 A ja tulovirran väre 1,45 A.

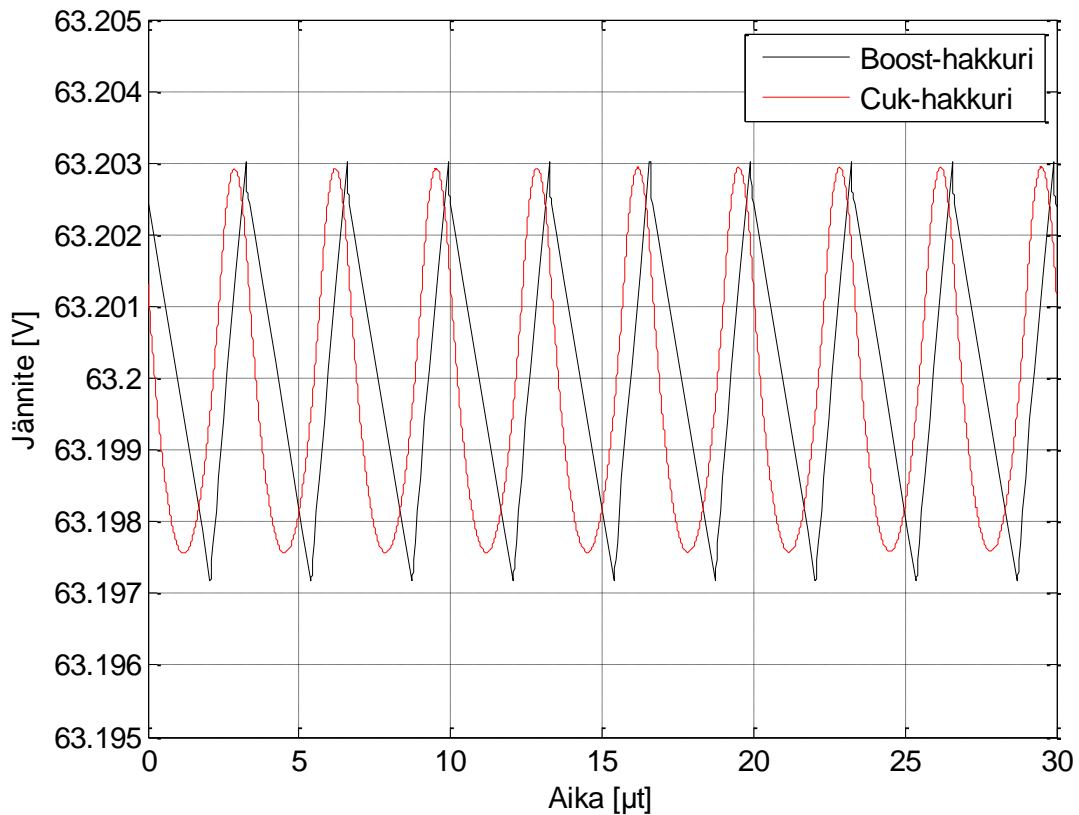
	Pulssisuhte	C_{in}	C_{out}	L_{in}	L_{out}
Boost-hakkuri	0,65		892 μ F	34 μ H	
Čuk-hakkuri	0,74	1000 μ F	35 μ F	39 μ H	100 μ H

Taulukosta 6.1 nähdään, että Čuk-hakkurin lähtöjännitteen väreen suodatukseen käytetty kondensaattori C_{out} on huomattavasti pienempi arvoltaan kuin boost-hakkurin vastaava. Kuitenkin Čuk-hakkurissa on energiavarastona toimiva kondensaattori C_{in} suurempi kuin boost-hakkurissa tarvittava kondensaattori C_{out} . Lisäksi Čuk-hakkurin kondensaattorin on kestettävä tulo- ja lähtöjännitteen summa sekä sen kelan L_{out} arvo on moninkertainen boost-hakkurin kelaan L_{in} verrattuna. Komponenttien laskennalliset arvot osoittavat, että komponenttien arvot ovat saatavilla tässä teholuokassa. Tällöin molemmat hakkurit ovat mahdollisia tehdä myös käytännössä.

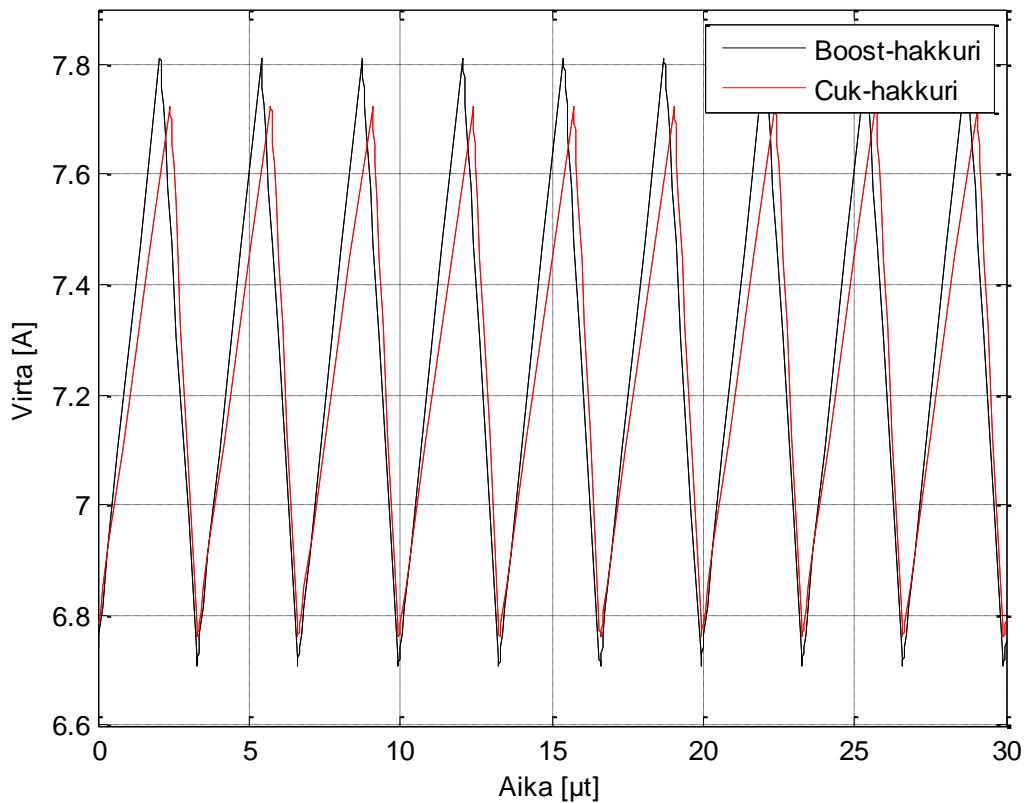
6.2 Simulointi

Simuloinnissa käytetään OrCAD-ohjelmaa. Simulointimalleina toimivat kuvien 4.1 ja 4.2 mukaiset kytkennät, joiden kytkintransistorin kannalle syötetään ideaalista kiinteällä pulssisuhteella olevaa kanttiaaltoa. Kela sekä kondensaattori ovat myös ideaaliset. Simulointimallissa on otettu huomioon diodin yli oleva jännitehäviö lähtöjännitteen alenemana.

Boost-hakkurin ja Čuk-hakkurin simuloinnissa käytetään taulukossa 6.1 esitettyjä arvoja. Kuormana toimii kaiuttimen ominaisimpedanssia vastaava resistanssi. Hakkureiden simuloituiden lähtöjännitteet on esitetty kuvassa 6.1 ja tulovirrat kuvassa 6.2.



Kuva 6.1. Kuvassa esitetty mustalla boost-hakkurin ja punaisella Čuk-hakkurin simuloitu lähtöjännitteen itseisarvo.



Kuva 6.2. Kuvassa esitetty mustalla boost-hakkurin ja punaisella Ćuk-hakkurin simuloitu tulovirta.

Simuloinnin tuloksista nähdään, että boost-hakkurin lähtöjännite on noin 63,2 V pulssisuhteella 0,65. Lähtöjännitteen väre on noin 6 mV. Tulovirran arvo on 7,2 A ja sen väre 1,1 A. Ćuk-hakkurin lähtöjännite on noin -63.2 V pulssisuhteella 0,74. Lähtöjännitteen väre on noin 5,5 mV. Tulovirran suuruus on 7,2 A ja sen väre on 0,95 A. Simuloinnin tuloksista nähdään, että boost- ja Ćuk-hakkurin lähtöjännitteen ja tulovirran väre ovat mitoituksen mukaisia.

Simuloiduissa väreissä ei ole boost- ja Ćuk-hakkurin välillä suuria eroja, vaikka boost-hakkurissa on arvoiltaan pienempiä komponentteja ja niitä on vähemmän. Boost-hakkurilla on etuna myös, että sille on paljon valmiita ohjauspiirejä kun Ćuk-hakkurille niitä ei ole saatavilla niin paljon. Kuitenkin Ćuk-hakkurilla on mahdollista tuottaa akun jännitettä pienempi jännite muuttamalla pulssisuhdetta, jolloin myös mahdollinen energiansäästötila on toteutettavissa. Boost-hakkurin tapauksessa tätä mahdollisuutta ei ole.

Simuloinnin tulosten eroavaisuus lasketuista arvoista voi johtua kuorman mallintamisesta vakioresistanssilla. Simuloinnissa saatiin hyvin poikkeavia tuloksia riippuen kuormasta. Lopulta päädyttiin simuloimaan keskiarvotehoa ja lähtöjännitettä vastaavalla resistanssilla. Todellisuudessa lähteen näkemä kuorma kuitenkin vaihtelee suuresti vahvistuksen mu-

kaan. Simulointi ei myöskään ota huomioon ohjausta ja muuttuvasta kuormasta johtuvia transientteja. Tästä syystä voidaan olettaa, että jännitteen väre tulee kasvamaan. Tällöin hakkurien suodatuskondensaattorien arvoja tulee kasvattaa, jotta pysytään vaadittavissa rajoissa.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia hakkurien soveltuvuutta akkukäyttöiseen audiolaitteeseen. Akkukäyttöisiin audiolaitteisiin keskittyvissä tutkimuksissa perehdytään pääasiassa pienitehoisiin laitteisiin, hakkurin ohjaamiseen tai vahvistimen suunnitteluun. Tässä työssä kuitenkin perehdyttiin 500 W jännitettä nostavan hakkurin mitoitukseen lähtöjännitteen ja tulovirran kannalta, koska käytännön laite, Porsas, on jo olemassa. Tavoitteena oli myös mitoittaa Porsaaseen sopiva hakkuri ja simuloida sen toimintaa.

Tutkittaviksi hakkureiksi valittiin boost- ja Čuk-hakkuri. Hakkureiden lähtöjännitteen väre pyritään minimoimaan, koska sillä on suuri vaikutus vahvistimen toimintaan. Akun takia myös tulovirran värettä pyritään minimoimaan. Mitoituksessa käytettiin jännitteen väreen arvona 0,01 % jännitteen arvosta ja tulovirran väreenä 20 % tulovirran arvosta.

Boost-hakkurin laskennalliset arvot ja simulointi osoittavat, että hakkuri on mahdollista toteuttaa kaupallisesti saatavissa olevilla komponenteilla. Vaikka boost-hakkurissa on vähemmän komponentteja kuin Čuk-hakkurissa, on laskettujen arvojen ja simuloinnin perusteella boost-hakkuri tehtävissä pienemmillä komponenteilla. Boost-hakkurin etuna on myös, että ohjainpiirejä löytyy runsaasti valmiina. Čuk-hakkurille ohjainpiirejä on huomattavasti vähemmän. Čuk-hakkurin laskennalliset arvot ja simulointi osoittavat myös, että se on mahdollista tehdä saatavilla olevilla komponenteilla. Simuloinnin tuloksiin voi vaikuttaa kuorman mallintaminen vakioresistanssilla. Todellisuudessa komponenttien epäideaalisuudet ja muuttuva kuorma voivat kasvattaa väreitä.

Käytännön sovelluksen toteutuksessa hakkurin valinta riippuu muun muassa käytettäväsistä tilasta. Vaikka boost-hakkuri vaikuttaa simuloinnin ja komponenttien arvojen perusteella kompaktimmalta, on Čuk-hakkuri myös mahdollinen vaihtoehto toteutukseen. Čuk-hakkurin etuna on sen mahdollisuus tuottaa myös pienempää jännitettä kuin käyttöjännite, jolloin vahvistimeen olisi mahdollista tehdä esimerkiksi energiansäästötila. Boost-hakkurissa tätä mahdollisuutta ei ole.

Käytännön sovellusta varten pitäisi määritellä vaadittavat toiminnallisuudet, kuten energiansäästötilan tarve sekä hakkurille varattu tila. Myös hakkurien prototyypit tulisi rakentaa, jolloin niiden soveltuvuutta voitaisiin tutkia tarkemmin. Hakkurin ohjauksen sekä jäähdytyksen suunnittelu vaatisivat myös jatkotutkimusta.

LÄHTEET

- Berkhout, M., Dooper, L. & Krabbenborg, B., 2013. A 4Ω 2.65W Class-D Audio Amplifier With Embedded DC-DC Boost Converter, Current Sensing ADC and DSP for Adaptive Speaker Protection. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 48(12), s. 2952-2961.
- Erickson, R. W. & Maksimovic, D., 2001. *Fundamentals of Power Electronics 2nd ed.* New York: Kluwer Academic Publishers.
- Fisher, M. J., 1991. *Power Electronics*. Boston: PWS-KENT Publishing Company.
- Ge, T. & Chang, J. S., 2008. Modeling and Technique to Improve PSRR and PS-IMD in Analog PWM Class-D Amplifiers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 55(6), s. 512-516.
- Lam, C. K., Tan, M. T., Cox, S. & Yeo, K. S., 2013. Class-D Amplifier Power Stage With PWM Feedback Loop. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(8), s. 3870-3881.
- Lenk, J. D., 1995. *Simplified Design of Switching Power Supplies*. Boston: Butterworth-Heinemann.
- Lin, C. W., Hsieh, B. S. & Hsu, C. J., 2011. Sliding-Switching Power Supply Circuit for Class-D Audio Amplifier. *2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems*, s. 1-5.
- Mendenhall, E., 2005. SMPS for Audio Power Electronics. *Switching Power Magazine*. Haettu 21.2.2014 osoitteesta: <http://www.switchingpowermagazine.com/downloads/smps%20for%20audio.pdf>
- Mohan, N., Undeland, T. M. & Robbins, W. P., 1989. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. New York: John Wiley & Sons.
- Ogawa, T. et al., 2008. Compact Audio Power Supply Using Approximate 2DOF Robust Digital Control. *SICE Annual Conference*, s. 2142-2145.
- Oliveira, T., Donoso-Garcia, P., Seleme, S. & Morais, L., 2011. Passivity-Based Control of Switched-Mode Power Supply for Audio Amplification Systems. *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, s. 663-668.
- Putzeys, B., 2003. Digital Audio's Final Frontier. *IEEE Spectrum*, 40(3), s. 34-41.
- Reiman, M., 2002. *Teholähdepiirilevyn suunnitelu akkukäyttöiseen laitteeseen*, Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Talvitie, J., Toikka, J. & Summanen, A., 2011. *D-luokan vahvistin*. Haettu 21.2.2014 osoitteesta: http://asig2011.wikispaces.com/file/view/porsaan_loppuraportti_v3.pdf/287596330/porsaan_loppuraportti_v3.pdf