



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LASSI TIAINEN
DIGITAALIHYDRAULISEN VENTTIILISTÖN OHJAUSELEKTRO-
NIIKAN SUUNNITTELU
Diplomityö

Tarkastaja: Dos. Matti Linjama
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Tek-
nisten tieteiden tiedekuntaneuvos-
ton kokouksessa 8.11.2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

TIAINEN, LASSI: Digitaalihydraulisen venttiilistön ohjauselektronikan suunnittelu

Diplomityö, 68 sivua, 7 liitesivua

Joulukuu 2013

Pääaine: Koneautomaatio

Tarkastaja: Dos. Matti Linjama

Avainsanat: Digitaalihydrauliikka, PNM, Pulse Number Modulation, ohjauselektronikka, boosteri

Tässä diplomityössä tutkitaan ja kehitetään miniatyrisoidun on/off -venttiilin ohjauselektronikkaa. Kehitystyön tavoitteena on ohjauselektronikan integrointi digitaalihydrauliseen PNM-koodattuun venttiililohkoon, joka sisältää useita samankokoisia on/off -venttiileitä. PNM-koodauksen tavoitteena on kehitys kohti ”täydellistä venttiiliä”, jonka ominaisuudet ovat kestävyuden, vasteaikojen ja ohjelmoitavuuden osalta muihin venttiiliratkaisuihin verrattuna huomattavasti parempia.

Venttiiliboosterin tarkoituksena on nopeuttaa solenoidiventtiilin avautumista ja sulkeutumista, sekä estää turha tehonkulutus ja lämmöntuotto. Jokaiselle venttiilipaketin venttiilille täytyy olla itsenäinen ohjaus, eikä tilaa piirilevylle ole paljoa, joten suunnittelu ja toteutus vaativat kompromisseja. Työssä tutkitaan mahdollisuutta myös matriisimuotoiseen toteutukseen, joka mahdollistaisi erillisten ohjausten vähentämisen radikaalisti.

Venttiilipaketin ohjauselektronikka koostuu boosterin pääte- ja etuasteista, sekä näitä ohjaavasta mikrokontrollerista. Elektronikan toteutukseen on useita eri tapoja, joilla kaikilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Yksinkertainen piiri voi vaatia monimutkaisen ohjauksen tai päinvastoin. Lisäksi valmiit kaupalliset komponenttikokonaisuudet saattavat helpottaa jonkun ratkaisun toteutusta. Työssä simuloidaan erilaisten boosteripiirien ominaisuuksia ja vertaillaan niiden soveltuvuutta miniventtiilin ohjaukseen.

Työn ohessa kehitettiin prototyyppi uudelleenlaiselle venttiiliboosterille. Se perustuu venttiilin avaukseen kondensaattorilla, joka on ladattu täyteen puolialtotasasuunnatun vaihtojännitteen avulla. Pitovirta tuotetaan avauksen jälkeen automaattisesti saman puolialtotasasuunnauksen avulla. Boosterin ominaisuuksia mitattiin yhden miniventtiilin vasteaikojen osalta, sekä boosterin omien ominaisuuksien osalta. Vasteajat osoittautuivat vähintään yhtä hyviksi, kuin aiemmin käytetyillä venttiiliboostereilla.

Työn tulokset olivat rohkaisevia kehitetyn boosterin jatkokehitystä ajatellen. Jatko-tutkimuksen aiheena on suunnitellun kahdeksankanavaisen piirilevyn testaus ja mittaus. Myöhemmin tutkitaan mahdollisuutta vastaavan piirin integrointiin 64 venttiiliä sisältävään PNM-koodattuun venttiililohkoon.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Technology

TIAINEN, LASSI: Design of control electronics for a digital hydraulic valve package

Master of Science Thesis, 68 pages, 7 Appendix pages

December 2013

Major: Machine automation

Examiner: Dos. Matti Linjama

Keywords: Digital hydraulics, PNM, Pulse Number Modulation, control electronics, booster

This thesis contains research and development of control electronics for a miniaturized on/off -valve. The goal of the development is to integrate the control electronics on a digital hydraulic PNM-coded valve package, which comprises of multiple similar sized on/off -valves. The objective of PNM-coding is development towards a “perfect valve”, which has better qualities in robustness, speed and programmability compared to other valve solutions.

The purpose of a valve booster is to hasten the opening and closing of the valve and to prevent unnecessary power consumption and heat generation. There has to be an independent control for every valve of the considered valve package and there is not much space for the circuit board. Therefore one has to make some compromises in the design and implementation of the control electronics. This thesis contains also research about a control electronic system in a form of a matrix, which would radically reduce the amount of independent control lines.

The control electronics of a valve package comprises of power and control stages of the booster and a microcontroller which controls these. There are several ways to implement the control electronics and all of them have their good and bad qualities. A simple circuit might need a complicated control or vice versa. In addition, some ready-made commercial components can make it easier to implement some of the solutions. There are simulations and comparison of different booster circuits in this thesis, considering their suitability for the control of the miniaturized valve.

A prototype of a novel valve booster was developed along with this thesis. It is based on a capacitor which is used to open the valve. The capacitor is charged full with a half-wave rectified alternating voltage. After the valve is open, the holding current is produced automatically with the same circuit. The qualities of the booster circuit and response times of one miniaturized valve were measured using the prototype. The response times were at least as good as with previously used booster circuits.

The results were promising considering the future development of the control electronics. Future research is based on the testing and measurements of a designed eight channel circuit board and integration of a similar type circuit board on a PNM-coded valve package including 64 valves.

ALKUSANAT

Tämä on Tampereen Teknillisen Yliopiston hydraulikan ja automatiikan laitokselle tehty diplomityö. Työ on tehty osana FIMECC:n (Finnish Metals and Engineering Competence Cluster) EFFIMA-ohjelmaan sisältyvää (Energy and Life Cycle Cost Efficient Machines) DiHy-projektia.

Haluan kiittää ohjaajiani Miika Paloniittyä ja Markku Luomarantaa, sekä työni tarkastajaa Matti Linjamaa osaavasta ohjauksesta ja kannustuksesta kohti uusia, mielenkiintoisia ratkaisuja. Kiitokset kuuluvat myös muille IHA:lla toimiville tutkijoille, jotka ovat auttaneet ja antaneet ideoita työn edetessä. Tuesta ja kannustuksesta kiitän puolisoani Annua, sekä perhettäni ja ystäviäni.

Tampereella, 5. joulukuuta 2013

Lassi Tiainen

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Venttiilit digitaalihydrauliikassa.....	2
2.1	DFCU ja venttiilikoodaukset	2
2.1.1	PNM-koodaus vs. binäärikoodaus.....	3
2.1.2	Miniatyrisointi.....	9
2.2	Miniventtiili ja PNM-koodattu venttiililohko.....	11
2.2.1	Miniventtiili.....	11
2.2.2	Venttiililohko ja laminointitekniikka.....	13
3	Venttiilin ohjauselektronikka.....	16
3.1	Venttiilin sähköiset ominaisuudet	17
3.1.1	Venttiilin avaus.....	18
3.1.2	Venttiilin avaus kondensaattorilla	20
3.1.3	Venttiilin pito	21
3.1.4	Venttiilin sulkku	22
3.1.5	Back-EMF	24
3.2	Käytettäviä boostereita	25
3.2.1	IHA-kone -boosteri.....	25
3.2.2	28-kanavainen boosterikortti.....	26
3.2.3	Muut boosterit	27
4	Ohjauselektronikan suunnittelu ja simulointi	29
4.1	Yleisimpien boosteripiirien esittely ja simulointi	30
4.1.1	Avaus kondensaattorin läpi ja pito vastuksella	30
4.1.2	Yksi kytkin PWM-ohjattuna	31
4.1.3	Kaksi kytkintä PWM-ohjattuna.....	33
4.1.4	Kaksi jännitetasoa.....	34
4.2	Pääteasteen ohjaus ja erikoiskomponentit	36
4.2.1	MOSFET kytkimenä.....	37
4.2.2	Erikoiskomponentit	38
4.3	Matriisiboosteri	39
4.3.1	LCD-matriisit	41
4.3.2	Matriisiboosterin simulointi.....	43
4.4	AC-boosteri.....	46
4.4.1	Simulointitulokset.....	47
4.4.2	Toteutus ja piirilevy.....	51
4.5	Tehon- ja energiankulutus eri boostereilla.....	54
5	Mittaustulokset.....	56
5.1	Venttiilin sulkumittaukset.....	56
5.2	AC-boosterin mittaustulokset	57
5.2.1	Mittausjärjestelyt	58
5.2.2	Venttiilin vasteajat.....	59

5.2.3	Rajataajuusmittaukset	61
6	Yhteenveto ja jatkotutkimus	64
6.1	Yhteenveto digitaalihydraulisen venttiilistön ohjauselektroniikasta.....	64
6.2	Jatkotutkimusaiheet	65
	Lähteet.....	67
	Liite 1: IHA-kone -boosterin piirikaavio	70
	Liite 2: AC-boosterin mittaustulokset.....	71

TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

μ	[H/m]	Permeabiliteetti
τ	[s]	Aikavakio
Φ	[T]	Magneettivuo
ω	[rad]	Kulmataajuus
A	[m ²]	Pinta-ala
a	[m/s ²]	Kiihtyvyys
B	[T]	Magneettivuon tiheys
C	[F]	Kondensaattorin kapasitanssi
d_h	[m]	Solenoidiventtiilin virtauskanavan halkaisija
d_s	[m]	Solenoidiventtiilin solenoidin halkaisija
E_C	[J]	Kondensaattorin energia
E_L	[J]	Kelan energia
F_s	[N]	Solenoidin tuottama sähkömagneettinen voima
f	[Hz]	Taajuus
g	[m]	Solenoidiventtiilin ilmavälin korkeus
I	[A]	Virta
L	[H]	Induktanssi
l	[m]	Kelan pituus
M_x	[-]	Matriisin rivinumero
m	[kg]	Massa
N	[-]	DFCU:n venttiilien lukumäärä
N_y	[-]	Matriisin sarakenumero
N_i	[-]	Kierrosten määrä kelassa
p_{in}	[Pa]	Venttiilin sisäänmenoportin paine
p_{out}	[Pa]	Venttiilin ulostuloportin paine
Q_N	[m ³ /s]	Venttiilin nominaalitulavuusvirta
R	[Ω]	Resistanssi
U	[V]	Jännite
U_{in}	[V]	Sisäänmenojännite
U_0	[V]	Jännite alkutilanteessa
U_{out}	[V]	Ulostulojännite
X_C	[Ω]	Kondensaattorin reaktanssi
Back-EMF		Sähkömotorisesta voimasta aiheutuva ilmiö, jota voidaan käyttää hyväksi venttiilin vasteaikojen arvioimisessa
Boosteri		Venttiilin toimintaa nopeuttava ja tehonkulutusta vähentävä ohjauselektronikka
DFCU		Digital Flow Control Unit, Digitaalihydraulinen venttiiliyksikkö

PCM	Pulse Code Modulation, venttiilikoodaus, jossa ulostulo määräytyy eriarvoisten komponenttien summana
PNM	Pulse Number Modulation, venttiilikoodaus, jossa ulostulo määräytyy samanarvoisten komponenttien summana
PWM	Pulse Width Modulation, signaali, jonka ulostulo määräytyy kaksiarvoisen komponentin arvojen suhteesta ajan funktiona
SPI	Serial Peripheral Interface, synkronoitu sarjaväylä, jota käytetään laitteiden välisessä kommunikaatiossa

1 JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia ja edelleen kehittää ohjauselektroniikkaa miniatyrisoidulle on/off -venttiilille, joka on kehitetty yhteistyönä Tampereen Teknillisen Yliopiston Hydrauliikan ja automatiikan, sekä Sähkömagnetiikan laitosten toimesta. Työn tuloksena syntyneitä ohjauselektroniikkaa on tarkoitus soveltaa digitaalihydraulisen PNM-koodatun venttiilistön ohjaukseen.

PNM-koodauksen on tutkittu olevan teoriassa hyvä tapa digitaalihydraulisen venttiilistön toteutukseen ja sen on todettu olevan mahdollinen tie kohti ”täydellistä venttiiliä” [1]. PNM-koodatussa venttiilistössä jokainen on/off -venttiili on samankoinen, jolloin auki olevien venttiilien lukumäärä määrää ulostulon. PNM-koodaus ratkaisee useita ongelmia, jotka on havaittu aiemmin käytetyn binäärikoodauksen kohdalla. Toteutuksen ongelmana on kuitenkin venttiilien lukumäärä, joka nousee tarkkaa säätöä tarvittaessa jopa useisiin kymmeneen venttiilistön ohjausreunaan kohti. Kehitetty miniventtiili ja PNM-koodausta varten kehitetty laminoitu venttiililohko ovat mahdollistaneet uudenlaisen venttiilistön fyysisen toteutuksen samassa koossa, kuin läpäisyltään vastaava proportionaaliventtiili, mutta edelleen ongelmana on ollut venttiilistön ohjauselektroniikan toteutus [1; 2].

Digitaalihydrauliikan haastavissa sovelluksissa tarvitaan nopeita venttiileitä, joiden toteutus vaatii fyysisen rakenteen lisäksi niille soveltuvaa ohjauselektroniikkaa. Venttiilin kelan virta on saatava nousemaan nopeasti tarvittavaan avausvirtaan asti, jonka jälkeen virta on laskettava pieneen pitovirtaan tehonkulutuksen ja lämmöntuoton estämiseksi. Nopeaa sulkeutumista varten pitovirta ja jäännösmagnetismi on purettava nopeasti ja hallitusti. Kaikki nämä vaiheet on pystyttävä tekemään jokaiselle venttiilille itsenäisesti. Lisäksi ohjauselektroniikka täytyy saada integroitua toteutettavaan venttiilipakettiin, jotta ylimääräisiä johdotuksia ei tarvita käyttöjännitteen ja ohjaussignaalin lisäksi.

Tässä työssä tutkitaan, simuloidaan ja kehitetään mahdollisia ratkaisuja PNM-koodatun venttiilistön ohjauselektroniikan toteuttamiseksi, sekä piirikaavioiden osalta, että valmiiden kaupallisten komponenttikokonaisuuksien osalta. Työn ohella kehitetyn AC-boosterin prototyypin ominaisuuksia mitataan ja tutkitaan sen soveltuvuutta mini-venttiilin ohjaukseen.

2 VENTTIILIT DIGITAALIHYDRAULIIKASSA

Digitaalihydrauliikka tarkoittaa hydraulista järjestelmää, joka sisältää diskreettiarvoisia komponentteja, joiden älykkäällä ohjauksella ohjataan järjestelmän ulostuloa. Järjestelmän diskreettiarvoisia komponentteja voidaan verrata esimerkiksi digitaalisen kameran tai näytön pikseleihin tai mikroprosessorin transistoreihin. Yksittäinen diskreettiarvoisen komponentti ei ole välttämättä kovinkaan tehokas ja monipuolinen, mutta digitaalisten järjestelmien hyöty onkin komponenttien määrässä ja älykkäässä käyttötavassa. Diskreetti komponentti voi olla esimerkiksi hydraulipumppu, -moottori, -sylinteri tai hydraulinen kapasitanssi, mutta tässä työssä keskitytään hydrauliventtiileihin. Digitaalitekniologia hydraulijärjestelmissä voidaan jakaa järjestelmiin jotka perustuvat on/off -tekniikkaan, rinnankytkentätekniikkaan ja hakkuritekniikkaan. On/off -tekniikassa järjestelmällä on vain kaksi ulostuloa, päällä tai pois päältä. Rinnankytkentätekniikassa kytketään kaksi tai useampi on/off -venttiili rinnakkain, jolloin järjestelmän ulostulo perustuu komponenttien ulostulojen kombinaatioihin, joiden määrä riippuu komponenttien määrästä. Järjestelmän ulostulo pitää diskreetin arvonsa, kun se on kerran vaihdettu eikä jatkuvaa ohjausta tarvita vakioulostulolla. Hakkuritekniikassa komponenttia avataan ja suljetaan nopealla taajuudella, jolloin ulostulo määräytyy esimerkiksi pulssinleveysmodulaation (PWM) pulssisuhteen mukaan [3; 4].

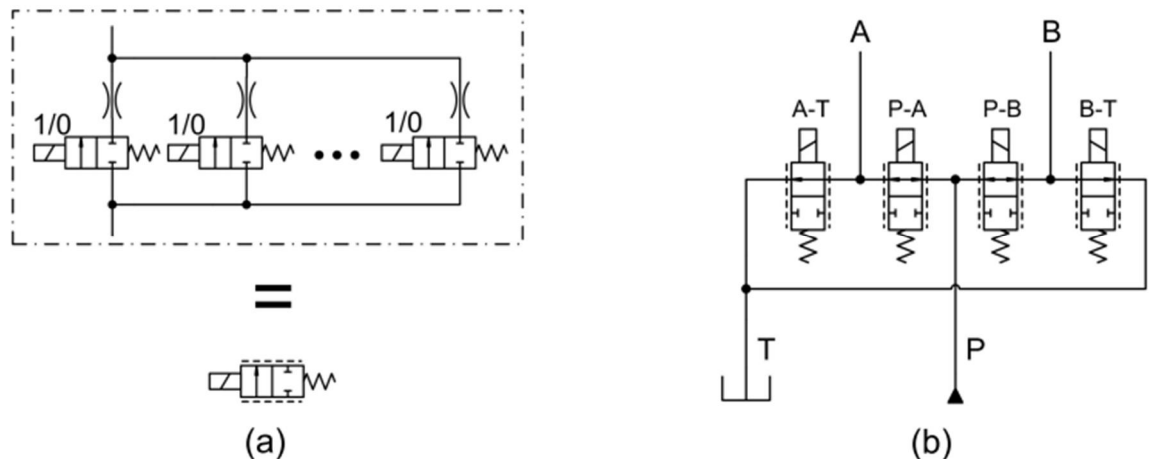
Digitaalihydrauliikan suurimpiin etuihin kuuluu, että yksinkertaisilla komponenteilla saadaan aikaan älykäs järjestelmä. Komponenttien yksinkertaisuuden vuoksi ne ovat robusteja ja luotettavia. Nopeiden venttiilien ansiosta järjestelmän suorituskyky ja vasteaika on kokonaisuudessaan parempi. Älykkäällä ohjauksella pyritään saavuttamaan järjestelmän paras mahdollinen suorituskyky ja energiatehokkuus. Digitaalihydrauliikalla voidaankin saavuttaa useita kymmeniä prosentteja pienemmät häviöt verrattuna perinteiseen proportionaali- tai servojärjestelmään. Lisäksi samaa digitaalihydraulista venttiilistöä voidaan käyttää useaan eri venttiilitoimintoon, kun taas perinteisiä analogisia venttiileitä tarvitaan erilaisia jokaiseen käyttötarkoitukseen. Pelkästään ohjelmoinnilla saadaan toteutettua suunta-venttiilin lisäksi paineenrajoitus-, paineenalennus- ja virranjakoventtiili sekä useita muita analogisesti monimutkaisiakin venttiileitä [3; 5; 6].

2.1 DFCU ja venttiilikoodaukset

Rinnankytketyistä kaksiasentoisista on/off -venttiileistä koostuvaa venttiilipakettia kutsutaan digitaaliseksi tilavuusvirran säätöyksiköksi (DFCU: Digital Flow Control Unit). DFCU on digitaalihydrauliikan peruskomponentti. Venttiilien määrä ja niiden keskinäinen koko riippuu käytetystä koodaustavasta. PCM-koodauksessa (Pulse Code Modulation) käytetään N -määrää rinnankytkettyjä on/off -venttiileitä, joiden nominaalitulavuus-

virrat ovat suhteessa toisiinsa binäärisen sarjan [1 2 4 8 16 32 jne.] $\times Q_N$ mukaisesti, missä Q_N on pienimmän venttiilin nominaalitulavuusvirta. Toinen mahdollinen koodaustapa on PNM-koodaus (Pulse Number Modulation), jossa kaikki venttiilit ovat keskenään samanlaisia ja johon tässä työssä keskitytään. Lisäksi on mahdollista käyttää näiden yhdistelmiä, jolloin voidaan saavuttaa lähes sama toiminnallisuus, kuin PNM-koodauksella, mutta pienemmällä määrällä venttiileitä. Kaikilla koodaustavoilla DFCU:n ulostuleva tilavuusvirta staattisessa tilassa on auki olevien venttiilien tilavuusvirtojen summa. [1; 7]

Kuvassa 2.1 (a) ylhäällä on DFCU:n periaatekuva, jossa näkyy rinnankytketyt on/off -venttiilit ja niiden kanssa sarjassa olevat kuristukset. Alhaalla on DFCU:n yksinkertaistettu piirrossymboli, jossa venttiilin ylä- ja alapuolella olevat katkoviivat kuvaavat diskreettiä säädettävyyttä. Yhdellä DFCU:lla voidaan tehdä yhden virtausreunan säätö, joten esimerkiksi nelitieventtiilin toteuttamiseksi tarvitaan neljä DFCU:ta. Kuvassa 2.1 (b) on toteutus nelitieventtiilistä neljällä DFCU:lla.



Kuva 2.1 DFCU:n periaatekuva ja piirrossymboli (a) Digitaalihudraulinen nelitieventtiili (b) [1]

Virtausreunojen erillisellä ohjauksella pystytään säätämään toimilaitteen nopeutta tai painetta, jolloin saadaan toteutettua helposti esimerkiksi energiaa säästäviä differentiaalikytkentöjä ja energian takaisinottoa mahdollistavia ajomoodeja. Virtausreunojen välisillä pienillä oikosulkuvirtauksilla saadaan parannettua resoluutiota eli saadaan lisää erikokoisia tilavuusvirtaustuloja. Kuudella kaksisuuntaisella DFCU:lla pystytään toteuttamaan kaikki perinteisten venttiilien keskiasennot [1; 4; 6].

2.1.1 PNM-koodaus vs. binäärikoodaus

Erilaisten ulostulojen määrä binäärikoodatussa DFCU:ssa on sama, kuin kaikkien mahdollisten tilakombinaatioiden määrä eli 2^N . Resoluutio kasvaa eksponentiaalisesti venttiilien määrän mukaisesti, mikä mahdollistaa teoriassa tarkan säädön jo pienelläkin venttiilimäärällä. Binäärikoodattu DFCU voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä samankokoisia venttiileitä ja kuristamalla niitä sopivasti. Tyypillisesti rinnankytkettyjen venttiilien määrä on viiden ja yhdeksän välillä. Hyvän servoventtiilin säädettävyyden

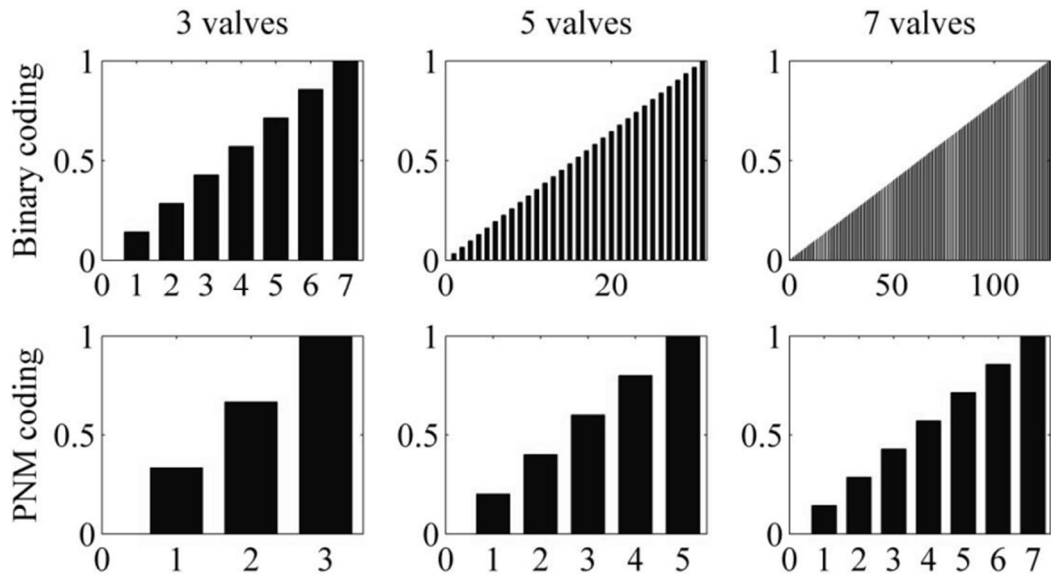
saavuttamiseksi tarvitaan noin 200 erilaista tilavuusvirtaustuloa, mikä tarkoittaa binäärikoodauksella kahdeksaa venttiiliä [7].

Binäärikoodauksen hyvänä puolena on hyvä resoluutio jo pienellä venttiilimäärällä ja ideaalisilla venttiileillä se toimiikin erinomaisesti. Ideaalisessa binäärikoodatussa DFCU:ssa jokaisen venttiilin tilavuusvirta noudattaa turbulenttisen kuristuksen yhtälöä ja virtauskertoimet ovat sellaiset, että seuraavan venttiilin läpäisy on aina kaksinkertainen edelliseen verrattuna. Lisäksi venttiilien dynaamisten ominaisuuksien eli esimerkiksi avaus- ja sulkuaikojen tulisi olla samanlaisia. Todellisuudessa venttiileitä ja kuristuksia on vain tiettyjä kokoja eivätkä virtauskertoimet noudata eri venttiileillä samaa kaavaa. Epäideaaliset venttiilien ominaisuudet, kuten virtauskertoimien epävarmuudet ja vaihtelevat avaus- sekä sulkuviiveet aiheuttavat ongelmia. Varsinkin huonoissa tilanvaihdossa, eli tilanteissa, joissa DFCU:n venttiileitä avataan ja suljetaan samanaikaisesti, syntyy paineiskuja. Pahimmillaan huonossa tilanvaihdossa ja sopivilla viiveiden vaihteluilla kaikki DFCU:n venttiilit saattavat olla hetkellisesti auki tai kiinni [6; 8].

Binäärikoodattu DFCU on vikasietoinen, koska yhden venttiilin jumiutuminen ei välttämättä estä laitteen käyttöä. Kuitenkin esimerkiksi suurimman venttiilin vikaantuminen laskee suorituskykyä jo huomattavasti. Esitetyt binäärikoodaukseen liittyvät ongelmat on kuitenkin mahdollista osittain välttää tai ainakin niiden vaikutusta voidaan vähentää hyvällä suunnittelulla ja sopivalla säädöllä [1; 6].

Binäärikoodauksen periaatteeseen verrattuna toinen ääripää on PNM-koodaus (Pulse Number Modulation). Siinä käytetään rinnankytkentäteknikkaa, jossa kaikki venttiilit ovat keskenään samanlaisia. Tällöin ulostulojen määrä on $N+1$, missä N on venttiilien määrä. Tämä tarkoittaa että suuren resoluution aikaansaamiseksi tarvitaan suuri määrä venttiileitä. Esimerkiksi 31:1 resoluutioon tarvitaan binäärikoodattuna vain viisi venttiiliä, kun PNM-koodauksella tarvitaan 31 venttiiliä [1; 6].

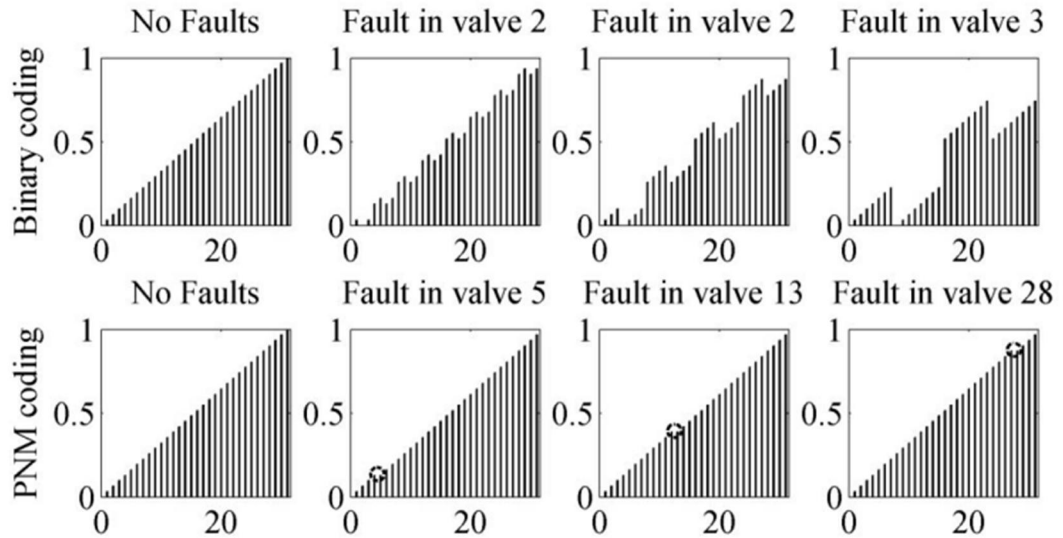
Kuvassa 2.2 on vertailu binäärikoodatun (ylhäällä) ja PNM-koodatun (alhaalla) DFCU:n suhteellisista avauksista kolmella, viidellä ja seitsemällä venttiilillä. Kuvasta nähdään selvästi, kuinka binäärikoodatun DFCU:n resoluutio on huomattavasti parempi jo pienelläkin venttiilimäärällä. PNM-koodauksessa on kuitenkin monia hyviä ominaisuuksia verrattuna PCM-koodaukseen, joten suurta venttiilimäärää ei kannata pitää esteenä sen kehitykselle.



Kuva 2.2 Binäärikoodatun ja PNM-koodatun DFCU:n suhteelliset avaukset eri venttiilimäärillä [3]

Ohjauksen kannalta PNM-koodaus on yksinkertainen, koska venttiilejä ei tarvitse koskaan avata ja sulkea samanaikaisesti. Venttiileitä avataan, kun tarvitaan enemmän tilavuusvirtaa ja suljetaan, kun tilavuusvirtaa on vähennettävä. PNM-koodauksessa ei siis esiinny huonoja tilanvaihtoja ja tästä syystä välttyään niistä johtuvista paineiskuista, joita PCM-koodauksessa on hankala välttää. PNM-koodattu DFCU on myös vikasietoisempi kuin PCM-koodattu, koska venttiilien vikaantuminen vaikuttaa ainoastaan DFCU:n maksimitilavuusvirtaan eikä sen askelkokoan. Venttiilien nominaalitulavuusvirtojen ei myöskään tarvitse olla keskenään yhtä tarkkoja, kuin PCM-koodatussa DFCU:ssa.

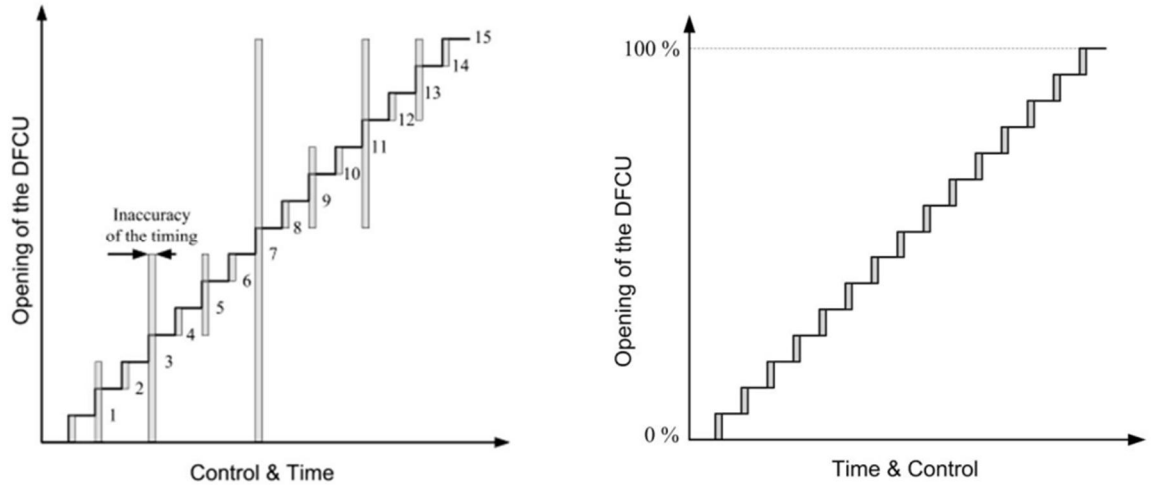
Kuvassa 2.3 on vertailu binäärikoodatun (ylhäällä) ja PNM-koodatun (alhaalla) DFCU:n venttiilien vikaantumisesta tilanteesta, jossa vikaantunut venttiili ei aukea ollenkaan. Kuvasta nähdään, että mitä suurempi venttiili vikaantuu binäärikoodatussa DFCU:ssa, sitä pahempi on vian vaikutus DFCU:n toimintaan. PNM-koodatussa DFCU:ssa taas minkä tahansa venttiilin vikaantumisen vaikutus on lähes olematon, eikä useampikaan vika näin ollen tee huomattavaa vahinkoa.



Kuva 2.3 Venttiilivikojen vaikutus binäärikoodatussa ja PNM-koodatussa DFCU:ssa [3]

Pahempi tilanne on vika, jossa venttiili jumiutuu auki, jolloin sen läpi on jatkuva virtaus. Varsinkin suuren venttiilin jumiutuessa auki binäärikoodatussa DFCU:ssa, järjestelmä on mitä luultavimmin epästabiili. PNM-koodatussa DFCU:ssa vastaava vika aiheuttaa vain pienen vuodon, joka pystytään mahdollisesti kompensoimaan toisella ohjausreunalla. Vaikka binäärikoodattu DFCU onkin vikasietoinen verrattuna esimerkiksi proportionaali- tai servoventtiiliin, niin PNM-koodausta käytettäessä vikasietoisuus on täysin ylivoimaista. Voidaan myös todeta että mitä suurempi määrä venttiileitä DFCU:ssa on, sitä suurempi on sen suhteellinen vikasietoisuus.

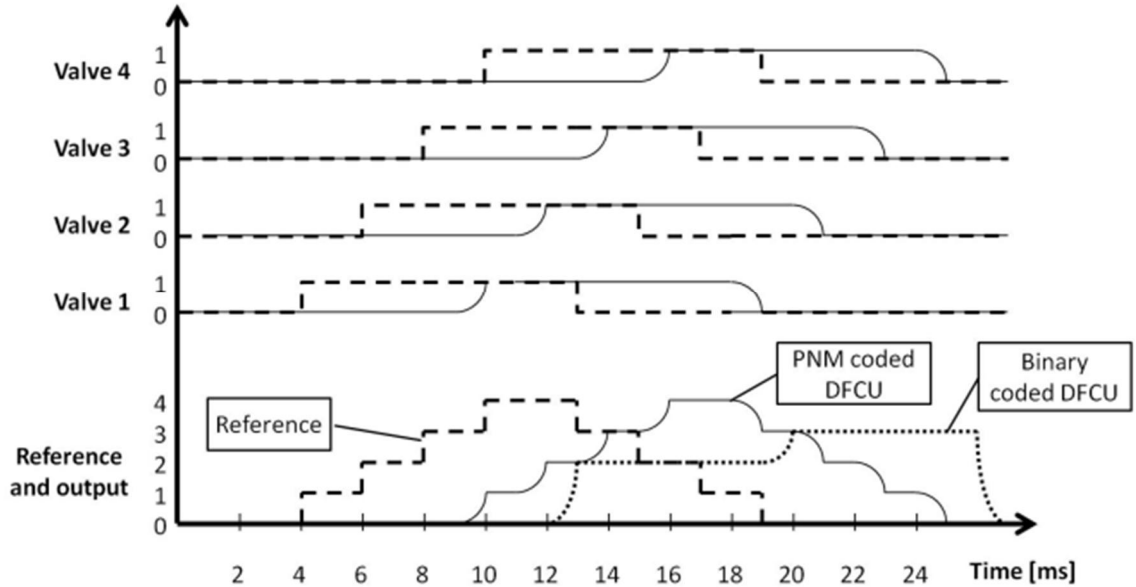
Avausaikojen epävarmuudesta johtuvat paineiskut ovat todellinen ongelma binäärikoodatussa DFCU:ssa. Näitä epävarmoja tilanvaihtoja pyritään välttämään sakkofunktioilla ja mahdollisimman identtiset vasteajat omaavilla venttiileillä. Kuvassa 2.4 on esitetty askelkokojen epävarmuudet 4-bittisellä binäärikoodatulla DFCU:lla (vasemmalla) ja 15-bittisellä PNM-koodatulla DFCU:lla (oikealla). Kaaviot kuvaavat tilojen epävarmuutta tilanvaihdon aikana. Hankalin tilanne PCM-koodauksessa on tilojen seitsemän ja kahdeksan välillä, kun kolme pienintä venttiiliä täytyy sulkea ja neljäs eli suurin venttiili avata tai päinvastoin. Tällöin DFCU saattaa olla hetkellisesti jopa täysin kiinni tai täysin auki, mikäli venttiilien viiveet sattuvat pahimmalla mahdollisella tavalla. PNM-koodatulla DFCU:lla tätä ongelmaa ei synny lainkaan, koska venttiileitä avataan ja suljetaan ainoastaan eri aikoina, ei koskaan samanaikaisesti. Oikeanpuoleisesta kuvaajasta nähdäänkin, että vastaavaa askelkoon epävarmuutta ei esiinny.



Kuva 2.4 Askelkoon epävarmuus 4-bittisellä binäärikoodatulla ja 15-bittisellä PNM-koodatulla DFCU:lla [3]

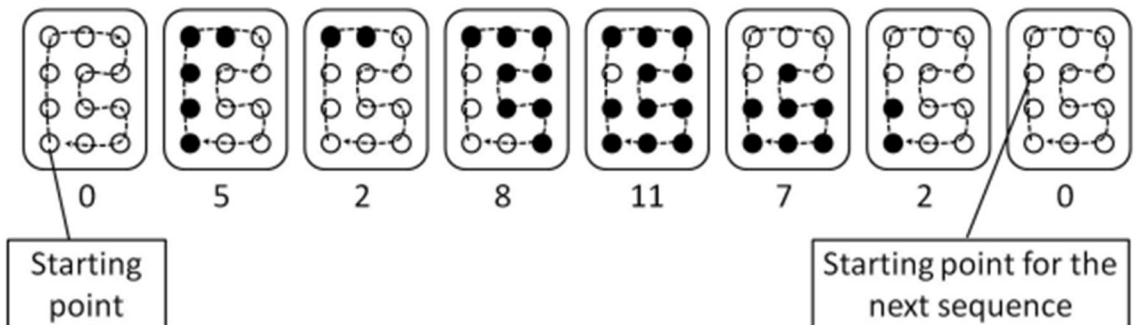
PNM-koodauksella saavutetaan parempi DFCU:n vasteaika kuin PCM-koodauksella. PCM-koodauksella venttiilejä ohjattaessa on otettava huomioon venttiilin viive, joka on maksimiarvo kaikkien DFCU:n venttiilien avaus- ja sulkuviiveistä. Seuraava ohjaukskäsky voidaan antaa vasta, kun maksimiviive tai mieluummin hieman pidempi aika on kulunut, koska on 50 % todennäköisyys, että saman venttiilin tilaa joudutaan taas vaihtamaan seuraavassa tilanvaihdossa [1]. PNM-koodatussa venttiilissä vastaavaa ongelmaa ei ole, joten ohjausreferenssiä voidaan seurata tarkasti venttiilien vasteajan jälkeen. Lisäksi PNM-koodatussa venttiilissä kaikki venttiilit ovat yhtä pieniä kuin pienin venttiili vastaavassa PCM-koodatussa venttiilissä, jolloin yksittäisen venttiilin ja koko DFCU:n maksimivasteaika jää pieneksi olettaen, että pienet venttiilit ovat nopeita.

Kuvassa 2.5 on esimerkki binäärikoodatun ja PNM-koodatun DFCU:n ramppi-vasteesta. Referenssisignaali päivittyy 2 ms välein ja ohjaussignaaleiden päivitysväli binäärikoodatussa DFCU:ssa on 7 ms. Venttiileiden viive on 5 ms ja avausaika 1 ms. PNM-koodattu DFCU seuraa referenssiä venttiileiden vasteajan jälkeen, kun taas binäärikoodattu päivittyy vasteaikojen jälkeen siihen tilaan, joka referenssisignaalilla on ollut 7 ms välein. PCM-koodattu DFCU ehtii vaihtaa tilaansa vain kolme kertaa koko ohjaus-syklin aikana.



Kuva 2.5 DFCU:n rampivaste PNM- ja binäärikoodauksella [6]

Yksi binäärikoodauksen ongelmista on myös se, että pienin venttiili on aina aktiivisimmassa käytössä muihin verrattuna. Tämä johtaa tietenkin pienimpien venttiilien nopeampaan kulumiseen. PNM-koodauksella ongelmaa ei ole, koska kaikki venttiilit ovat samankokoisia, eikä ole väliä missä järjestyksessä ne avataan. Yksi ehdotettu metodi on kuvassa 2.6 oleva matopelimäinen ohjaussekvenssi [1]. Siinä viimeksi avattua venttiiliä seuraava venttiili on aina seuraavan sekvenssin aloittava venttiili. Venttiileitä avataan sarjan päästä ja vastaavasti suljetaan häntäpästä. Tällöin kaikkia venttiileitä tullaan käyttämään tasaisesti, jolloin niiden kulutus pysyy tasaisena ja venttiilipaketin huoltoväli, sekä käyttöikä pitenevät.



Kuva 2.6 Matopelimäinen ohjaussekvenssi 12 bittisellä PNM-koodatulla DFCU:lla [6]

Yhteenvetona venttiilikoodausten vertailusta voidaan todeta, että PNM-koodauksella on erittäin mielenkiintoisia ominaisuuksia, joiden avulla voidaan välttää binäärikoodauksessa esiintyviä ongelmia. Suuresta venttiilimäärästä huolimatta PNM-koodauksen tutkimusta onkin syytä jatkaa.

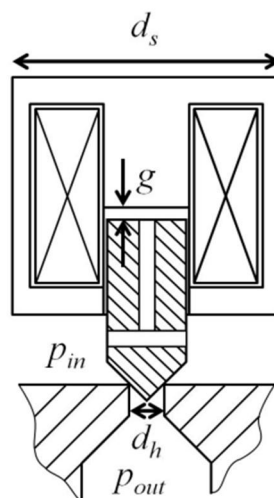
2.1.2 Miniaturisointi

PNM-koodauksen toteutus on hankalaa nykyisillä kaupallisilla venttiileillä. Hyvän resoluution omaavasta DFCU:sta tulisi suuri ja kallis. Venttiilistön ohjausenergiakin muodostuu hyvin suureksi suurilla venttiilimäärillä. Seuraavaksi esitetään, kuinka venttiilien miniaturisoinnilla päästään lähemmäs toteutettavissa olevaa PNM-koodattua venttiilistöä ja ideaalista venttiiliä. Ideaalisen venttiilin ominaisuuksia ovat muuten muassa:

- Ääretön nopeus ja stabiilius kaikissa tilanteissa
- Täydellinen toistettavuus ilman epävarmuutta
- Ääretön kestävyys
- Täydellinen ohjelmoitavuus kaikkiin sovelluksiin
- Halpa hinta
- Pieni ja integroitava paketti
- Olematon ohjausenergia

Miniaturisointi on tie kohti kaikkia näitä ominaisuuksia, kuten vastaavasti elektronii-
kankin kehityksessä on huomattu. Kun korvataan iso venttiili usealla pienellä, venttiilin ohjausenergia pienenee ja vasteaika paranee. Myös venttiilipaketin luotettavuus paranee, kun yksittäisen venttiilin merkitys vähenee. Onkin ehdotettu, että ”täydellisen venttiilin” saisi tehtyä digitaalihuyluhydraulisesti toteutetulla PNM-koodatulla venttiililohkolla, jossa on suuri määrä pieniä on/off -venttiileitä [1; 4].

Solenoidiventtiilin skaalauksessa venttiilin ominaisuudet ovat verrannollisia solenoidin halkaisijaan ja virtauskanavan halkaisijaan, kuten julkaisussa [1] on todettu. Kuvassa 2.7 näkyy yksinkertaistettu periaatekuva neulaventtiilistä, jossa d_s on solenoidin halkaisija, d_h on virtauskanavan halkaisija, g on sulkuelimen ja venttiilin rungon välinen ilmarävi, p_{in} on sisääntulopuolen paine ja p_{out} on ulostulopuolen paine. Oleellisia tarkasteltavia suureita skaalattaessa ovat venttiilin fyysisen koon lisäksi virtaustiheys, vasteaika ja avausenergia. Virtaustiheys on venttiilin hyvyysluku, joka saadaan jakamalla venttiilin virtauskanavan pinta-ala venttiilin tilavuudella.



Kuva 2.7 Yksinkertaistetun neulaventtiilin periaatekuva [1]

Seuraavat verrannollisuudet voidaan kirjoittaa venttiilin ominaisuuksien ja solenoidin, sekä virtauskanavan halkaisijoiden välille [1]:

- Venttiilin massa ja tilavuus $\sim d_s^3$
- Virtauskanavan pinta-ala ja tilavuusvirta $\sim d_h^2$
- Painevoima $\sim d_h^2$

Solenoidiventtiilin skaalaus on tehtävä siten, että solenoidi jaksaa avata venttiilin skaalauksen jälkeenkin ottamalla huomioon solenoidin tuottaman sähkömagneettisen voiman ja venttiilin neulaan kohdistuvan painevoiman skaalautuvuus. Tarkastellaan solenoidin tuottamaa sähkömagneettista voimaa kaavan

$$F_s = \frac{\mu(N_i I)^2 A}{2g^2} \quad (2.1)$$

mukaan, jossa μ on solenoidin kelan sisällä olevan väliaineen permeabiliteetti, N_i on kierrosten määrä kelassa, I on kelan virta, A on ilmavälin pinta-ala ja g on ilmavälin korkeus. Kun oletetaan kelan virrantiheyden ja solenoidin magneettisten ominaisuuksien pysyvän vakioina solenoidia skaalattaessa, voidaan todeta termin $N_i I$ olevan verrannollinen solenoidin halkaisijan neliöön d_s^2 . Myös ilmavälin pinta-ala A on verrannollinen solenoidin halkaisijan neliöön ja ilmavälin korkeus g on verrannollinen virtauskanavan halkaisijaan d_h . Kun nämä verrannollisuudet sijoitetaan kaavaan (2.1), saadaan solenoidiventtiilin mittojen verrannollisuus solenoidin tuottamaan sähkömagneettiseen voimaan kaavan

$$F_s \sim d_s^6 d_h^{-2} \quad (2.2)$$

mukaan. Esitettyjen verrannollisuuksien perusteella venttiilin skaalaus voidaan tehdä kaavan

$$d_s \sim d_h^{2/3} \quad (2.3)$$

mukaan, jonka sijoittamalla kaavaan (2.2) saadaan solenoidin voiman verrannollisuus virtauskanavan halkaisijan neliöön d_h^2 . Myös painevoima on verrannollinen samaan termiin, joten skaalattaessa tarvittava avausvoima pysyy samassa suhteessa solenoidin tuottamaan voimaan ja solenoidi jaksaa avata venttiilin [1].

Kun yhdistetään kaava (2.3) ja venttiilin massan, sekä tilavuuden verrannollisuus solenoidin halkaisijan kuutioon, saadaan massa ja tilavuus verrannolliseksi virtauskanavan neliön d_h^2 kanssa. Koska virtauskanavan halkaisija ja tilavuusvirta ovat verrannollisia samaan termiin, voidaan todeta virtaustiheyden pysyvän skaalauksen aikana vakiona. Tästä johtuen venttiilien määrällä ei ole vaikutusta venttiilipaketin tilavuuteen ja massaan, kun koko venttiilipaketin tilavuusvirran läpäisy pysyy vakiona. Myös venttiilin suhteellinen avausenergia ja vasteaika paranevat miniatyrisoinnin myötä. Sulkuaika ja avausaika ovat verrannollisia termiin $d_h^{1/2}$ ja suhteellinen avausenergia on suoraan verrannollinen virtauskanavan halkaisijaan. Yhteenvetona voidaan siis todeta miniatyrisoinnin olevan hyödyllinen keino ”täydellisen venttiilin” kehityksessä [1].

2.2 Miniventtiili ja PNM-koodattu venttiililohko

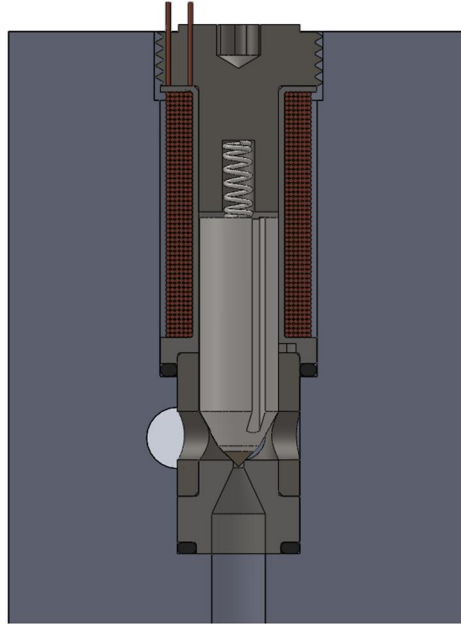
Kaupallisia on/off -venttiileitä ei ole optimoitu toimimaan digitaalihydrauliikan soveluksissa, eikä varsinkaan PNM-koodatussa venttiililohkossa. Ne ovat isoja ja hitaita, koska niiden käyttökohteetkin ovat yleisesti yksinkertaisia, kuten hydraulimoottorin käynnistys ja sammutus. Onneksi digitaalihydrauliikkaan paremmin sopivia venttiileitä on mahdollista valmistaa. Venttiilit pystytään rakentamaan paljon pienemmäksi ja kaupallisiakin venttiileitä voidaan nopeuttaa huomattavasti ohjauselektronikan avulla [9]. Tampereen teknillisen yliopiston Hydraulikan ja Automaatiikan laitoksen (IHA Intelligent Hydraulics and Automation) ja sähkömagneetiikan laitoksen (SMG) yhteistyönä on kehitetty digitaalihydrauliikkaan soveltuvia venttiileitä, joista varsinkin julkaisussa [10] esitetty miniventtiili on suunniteltu erityisesti PNM-koodattua DFCU:ta varten. Tämän työn ohella kehitetty ohjauselektronikka on suunniteltu tätä miniventtiiliä varten. IHA:lla on kehitetty muitakin pieniä ja nopeita venttiileitä, joilla on joitakin parempia ominaisuuksia kuin miniventtiilillä, mutta ne ovat huomattavasti monimutkaisempia rakenteeltaan ja siten vaikeampia ja kalliimpia valmistaa [10].

2.2.1 Miniventtiili

Miniventtiilin suunnittelun lähtökohtana oli saada aikaan pieni on/off -venttiili, joka sopii digitaalihydrauliseen PNM-koodattuun venttiilipakettiin, joka vastaa kokonsa ja läpäisynsä puolesta proportionaaliventtiiliä. Tyypillisen lohkoasenteisen proportionaaliventtiilin koko on noin 150×150×50 mm, jolloin samaan tilaan tulisi mahtua noin 32 on/off -venttiiliä per ohjausreuna, jotta päästäisiin lähelle proportionaaliventtiilin säädettävyyttä [10]. Nelireunaohjausta varten tarvittaisiin siis yhteensä 128 on/off -venttiiliä. Sopivaksi venttiilin halkaisijaksi tilavaatimusten mukaan tuli 10 mm. Ensimmäinen prototyyppi suunnitellusta miniventtiilistä on yksisuuntainen jousipalautteinen neulaventtiili, joka uudempien prototyyppien myötä päivittyi virtaukseltaan kaksisuuntaiseksi. Uusimman prototyypin nominaalitulavuusvirta on 1.4 litraa minuutissa 3.5 MPa paine-erolla venttiilin yli. Vaikka bistabiilisuudesta olisi huomattavaa hyötyä, sitä on hankala toteuttaa pienessä mittakaavassa ja venttiili monimutkaistuisi turhan paljon. Lisäksi pyrkimys helppoon ja halpaan valmistukseen kärsii, koska tarvittaisiin pienempiä toleransseja ja vaikeammin valmistettavia komponentteja.

Bistabiilisuus tarkoittaa hydrauliventtiilin osalta sitä, että venttiili pitää tilansa ilman ohjausta kummassakin päätyasennossa. Tällöin venttiilin tilanvaihto voidaan toteuttaa yksittäisellä virtapulssilla eikä pitovirtaa tarvita. Monostabiilissa venttiilissä palautusjousi palauttaa venttiilin toimielimen suljettuun asentoon, kun kelan sähkömagneettinen voima on tarpeeksi pieni. Bistabiilissa venttiilissä sitä vastoin ei ole lainkaan palautusjousta, vaan toimielin pitää tilansa kestomagneetin avulla. Kestomagneetti voi olla kiinni toimielimessä tai kahtena kappaleena venttiilin rungon eri päissä. Venttiilissä voi olla yksi tai kaksi kela, joilla toimielin saadaan vaihtamaan tilaansa. IHA:lla kehitetyt bistabiilit venttiilit ovat tarpeeksi nopeita digitaalihydrauliikan käyttöön, mutta ne ovat vielä liian suurikokoisia ja hankalia valmistaa, joten venttiilipaketin koko ja kus-

tannukset nousisivat liikaa niitä käytettäessä [11; 12]. Kuvassa 2.8 on esitetty miniventtiilin kolmannen prototyypin halkileikkaus.



Kuva 2.8 Miniventtiilin kolmannen prototyypin halkileikkaus [13]

Venttiilin kela on tilan ja osien säästämiseksi osa rakenteen kantavaa runkoa ja se on valettu epoksiin, jotta erillistä runkoa sen ympärille ei tarvittaisi. Uusimman prototyypin neula on valmistettu kobolttiraudasta sen kulutuskestävyyden ja magneettisten ominaisuuksien takia [14]. Venttiili kiinnitetään runkoon sen yläpäässä olevilla kierteillä ja kiristetään, jotta se pysyy paikoillaan. Kiristysmomentti on oltava noin 2 Nm, jotta kela ei painu kasaan ja muuta rungon ja neulan ilmväliä. Viimeisimmän prototyyppi-venttiilin ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.1

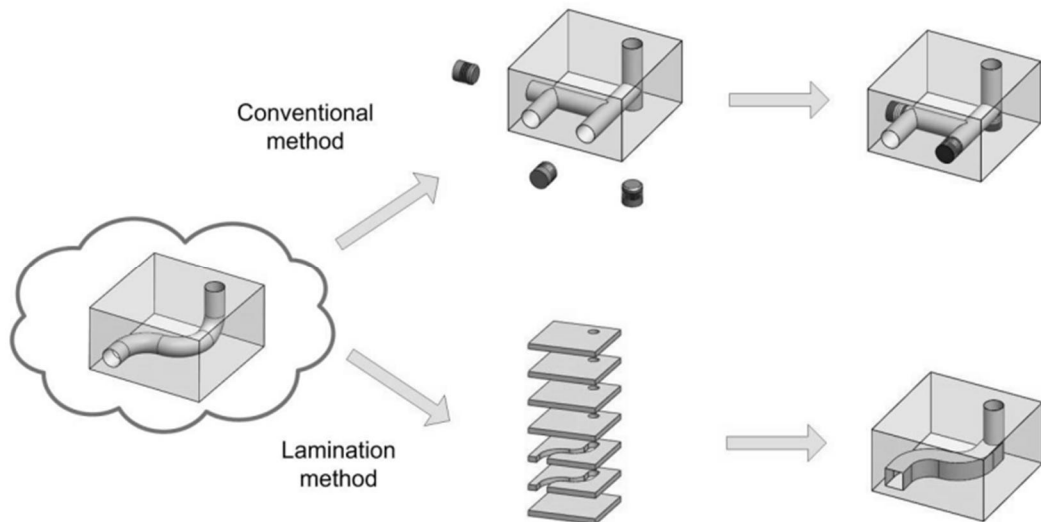
Taulukko 2.1 Miniventtiilin ominaisuudet

	<i>Arvo</i>	<i>Kommentit</i>
Halkaisija (mm)	10	
Pituus (mm)	35	
Virtausaukon halkaisija (mm)	0.7	
Ilmaväli (mm)	0.35	
Kelan resistanssi (Ω)	2.3	Huoneenlämmössä (25 °C)
Kelan induktanssi (mH)	2.5	Venttiili staattisessa tilassa sulkeutuneena
Avausaika (ms)	1-2	Riippuu ohjauselektronikasta ja paine-erosta
Sulkuaika (ms)	1-4	Riippuu ohjauselektronikasta ja paine-erosta
Minimiavausenergia (mJ)	60	Täydellä paineella (21 MPa), 2. prototyyppi
Pitovirta (mA)	300	Riippuu paine-erosta
Pitoteho (mW)	250	Riippuu paine-erosta
Nominaali tilavuusvirta (L/min)	1.4	3.5 MPa paineessa
Virtaustiheys (L/min/cm ³)	0.34	

Miniventtiilin avausaika ja sulkuaika ovat parhaassa tapauksessa noin 2 ms hyvällä ohjauselektronikalla, mutta molemmat ovat riippuvaisia myös paine-erosta venttiilin yli. Sulkuaika pitenee hieman pienellä paine-erolla ja avausaika vastaavasti lyhenee hieman. Avausenergia ja pitoteho eivät ole liian suuria suureenkään venttiilipakettiin. Miniventtiilin uusimman prototyypin voidaan siis todeta olevan hyvinkin sopiva PNM-koodatun venttiilipaketin prototyyppiin ja sen jatkokehitykseen.

2.2.2 Venttiililohko ja laminointitekniikka

Kun suuri määrä venttiileitä pitää saada mahtumaan samaan venttiililohkoon, perinteinen valmistustekniikka ei ole välttämättä toimiva. Julkaisussa [2] on esitetty laminointitekniikalla valmistettavan PNM-koodatun venttiililohkon periaate, jossa lohko kasataan useista ohuista levyistä, joihin on jo valmiiksi työstetty virtauskanavat ja venttiilien paikat. Kuvan 2.9 vasemmassa reunassa on esitys kuvitteellisesta virtauskanavasta, joka halutaan valmistaa. Kuvan yläreunassa on esitys perinteisestä venttiililohkon valmistustekniikasta, jossa virtauskanava tehdään poraamalla ja tulppaamalla. Vastaavasti alemmassa kuvassa on laminointitekniikalla valmistettu lohko, jossa useasta valmiiksi työstetystä levystä kootaan valmis venttiililohko.



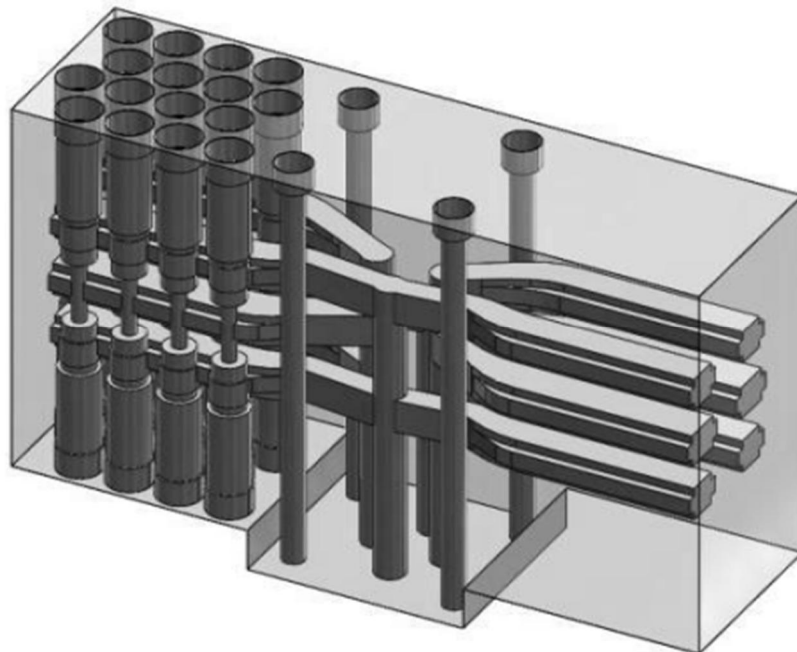
Kuva 2.9 Kuvitteellisen virtauskanavan valmistus kahdella eri tekniikalla. Perinteinen venttiililohkon valmistus (ylhäällä) ja laminointitekniikalla valmistus (alhaalla) [13]

Perinteisesti valmistettu venttiililohko PNM-koodattua DFCU:ta varten vaatisi todella paljon koneistusta, kun venttiilejä ja virtauskanavia on useita kymmeniä. Koneistus vie aikaa ja se on kallista. Lisäksi tarvittaisiin suuri määrä apuporauksia, jotka täytyisi tulppata, mikä lisää kustannuksia korkeapainekomponenttien ja asennuksen osalta. Valaminenkaan ei vaikuta sopivalta ratkaisulta, koska suunnitellussa lohkossa tarvitaan tarkkoja välyksiä ja kapeita seinämiä, joita on hankala saavuttaa valamalla. Laminointitekniikka taas antaa suunnittelulle melko vapaat kädet, kun levyt työstetään etukäteen ja juotetaan yhteen vasta tämän jälkeen. Virtauskanavat on mahdollista myös muotoilla kulkemaan lohkon sisällä halutulla tavalla, kun taas poraamalla taivutettuja

kanavia ei ole mahdollista valmistaa. Venttiilit pystytään tällöin asettelemaan tiheämmin ja virtauskanavat saadaan mahtumaan pienenkin pohjalaatan päälle [2].

Yksi suunnittelussa huomioitava asia on laminoitavien levyjen paksuuden vaikutus saavutettavaan virtauskanavien muodon tarkkuuteen. Virtauskanavien poikkileikkauksen olisi hyvä olla ympyrän muotoinen, mutta liian paksuilla levyillä niistä muodostuu kulmikkaita. Riittävä tarkkuus saavutetaan noin 2 mm paksuisilla levyillä. Levyjen tarkka asemointi vaadittuihin toleransseihin on myös vaativa tehtävä valmistuksen kannalta. Tavoitteena on, että vain venttiilien kiinnityskierteet koneistetaan juottamisen jälkeen ja mahdollisesti suunnittelemalla venttiilien kiinnitys uudestaan, voitaisiin luopua jopa jälkikoneistuksesta, jolloin lohkon puhtauskin säilyy huomattavasti parempana. Levyt voidaan juottaa kiinni toisiinsa nikkelipohjaisella materiaalilla, joka on ferromagneettista. Näin magneettiipiiri venttiilien ympärillä venttiililohkossa pysyy yhtenäisenä yhdessä levyjen ferromagneettisen raudan kanssa. Venttiilien välistä magneettista kytkeytymistä on tutkittu ja todettiin, että sen vaikutus venttiilien toimintaan haittaavasti on epätodennäköistä [15]. Mittauksissa selvitettiin laminoitun lohkon kestävyyttä ja sen todettiin olevan yhtä kestävä, kuin vastaava kiinteä lohko [2].

Kuvassa 2.10 on esitetty laminointitekniikalla valmistetun PNM-koodatun venttiililohkon suunnitelma, jossa on 16 venttiiliä kaikilla neljällä virtausreunalla. Lohko on tehty yhteensopivaksi CETOP 3 pohjalaatan kanssa, jolloin sen maksimileveys on 50 mm, kuten ISO 4401 standardi määrittelee. Tällöin 10 mm halkaisijaltaan olevia venttiileitä mahtuu neljä riviä vierekkäin. Venttiilit on asetettu lohkon ylä- ja alapuolelle, jotta lohko ei tulisi liian pitkää. Kuten kuvasta nähdään, virtauskanavat eivät voi olla täysin pyöreitä johtuen laminoitujen levyjen paksuudesta. Lohkon alapuolella on kiinnitys CETOP 3-laattaan ja sen ympärille on jätetty tilaa ohjauselektroniikkaa varten.



Kuva 2.10 Laminointitekniikalla valmistetun venttiililohkon periaatekuva. Venttiilien paikat näkyvillä vain vasemmalla puolella lohkoa. [13]

Virtausominaisuuksiltaan ja resoluutioltaan vastaavia PNM-koodattua ja PCM-koodattua venttiilistöä vertailtiin keskenään paperissa [2]. Laminointitekniikalla valmistetussa PNM-koodatussa venttiilistössä venttiileitä oli 128 kappaletta ja PCM-koodatussa venttiilistössä 24 kappaletta. Vertailussa todettiin PNM-koodatulla venttiilistöllä olevan huomattavasti parempi vasteaika, kuin PCM-koodatulla venttiilistöllä. Se on myös pienempi ja kevyempi. Verrattu PCM-koodattu venttiilistö ei ole myöskään pohjalaatta-asenteinen vaan vaatii erikoisputkituksen. Laminoitu lohko on myös sopiva massatuotantoon, koska itse levyt ovat erittäin yksinkertaisesti valmistettavia [2].

Yhteenvetona voidaan todeta, että käyttämällä miniventtiileitä, PNM-koodausta ja laminoitua venttiilipakettia saadaan aikaan kompakti digitaalinen venttiilijärjestelmä, jonka ominaisuudet ovat huomattavasti paremmat, kuin virtausominaisuuksiltaan vastaavan proportionaaliventtiilin tai PCM-koodatun venttiilijärjestelmän. Venttiilistön vasteaika täysin suljetusta tilasta kaikkien venttiilien avaukseen on yhtä pieni, kuin yksittäisen miniventtiilin vasteaika. Myös venttiilistön tehonkulutus putoaa skaalauslakien mukaisesti, kun resoluutiota kasvatetaan. Älykkäästi ohjattuna pystytään toteuttamaan usean eri analogisen venttiilin toiminnot ja saadaan robusti kokonaisuus, jossa yksittäisten venttiilien rikkoutuminen pystytään kompensoimaan. Menetelmällä ei ole havaittu olevan muita haittoja, kuin tarve suurelle määrälle venttiileitä. Näin päästään entistä lähemmäs ideaalista venttiiliä.

3 VENTTIILIN OHJauselektronikka

Perinteiset kaupalliset on/off -venttiilit ovat aivan liian hitaita käytettäväksi digitaalilihydrauliikassa sellaisenaan. Ne ovat alun perin kehitettyjä yksinkertaisiin on/off -sovelluksiin, joissa pitkä vasteaika ei haittaa [4]. Suurin syy venttiilien hitauteen on niissä käytetty solenoidin ohjauselektronikka, jota ei ole suunniteltu nopeaa tilanvaihtoa varten. Onneksi ohjauselektronikka on kuitenkin mahdollista suunnitella huomattavasti paremmaksi digitaalilihydraulikan sovelluksia varten. Osa hitaudesta voidaan laittaa myös venttiilin rakenteen piikkiin, mutta eniten pystytään vaikuttamaan järkevällä ohjauselektronikalla. Venttiiliä nopeuttavaa ohjauselektronikkaa voidaan kutsua boosteriksi [9]. Boosterin tarkoituksena on tuottaa nopeaa venttiilin avausta varten suuri avausvirta nopeasti ja laskea tämän jälkeen virran arvo pieneen pitovirtaan. Nopeaa venttiilin sulkeutumista varten boosteri purkaa venttiilin kelan pitovirran ja jäännösmagnetismin hallitusti suurella jännitteellä. Eli venttiilin nopeuttamisen lisäksi tärkeä boosterin tehtävä on myös tehonkulutuksen ja lämmöntuoton hallinta. Tässä työssä kutsutaan boosterin eri asteita etu- ja pääteasteeksi niiden toiminnan mukaan. Pääteasteeseen kuuluvat ne komponentin, joista kelan virta kulkee läpi, eli niiden tehonkesto on oltava suuri. Etuasteen tarkoituksena taas on ohjata pääteasteen komponentteja, eikä niiden tarvitse kestää suurta tehoa.

Kaupallisia venttiileitä ohjataan yleensä vakiojännitteellä, jolloin solenoidin kelassa virta nousee kelan aikavakion mukaan kohti tarvittavaa avausvirtaa. Jouta vasten auki pidettävä venttiili tarvitsee jatkuvaa pitovirtaa ja vakiojännitettä käytettäessä pitovirta on koko ajan sama kuin venttiilin avausvirta, vaikka paljon pienempikin virta riittäisi. Tämä johtaa siihen, että solenoidi suunnitellaan kestävänsä suurta pitovirtaa, jolloin siitä tulee iso ja hidas. Hidas virran nousu solenoidissa taas aiheuttaa viiveen avausignaalin ja todellisen venttiilin avautumisen välille. Vasta viiveen jälkeen venttiilin sulkuelin lähtee liikkeelle ja saavuttaa päätyasentonsa liikeajan jälkeen. Viiveen ja liikeajan summaa kutsutaan venttiilin vasteajaksi. Kaupallisten venttiilien vasteaika on tyypillisesti 20-50 ms, lisäksi se saattaa vaihdella jopa kymmeniä prosentteja [9]. Suurin osa vasteajasta on yleensä viivettä ja liikeaika on siihen verrattuna melko pieni. Digitaalilihydrauliikassa venttiilien viiveet ja varsinkin niiden vaihtelu aiheuttavat ongelmia, kuten luvussa 2.1.1 tuli esille. PNM-koodausta käytettäessä ei onneksi ole yhtä pahoja ongelmia kuin PCM-koodatussa venttiilistössä, mutta ohjauselektronikka on silti syytä suunnitella sellaiseksi, että viiveiden vaihtelu minimoituu.

Erittäin nopeita on/off -venttiileitä tarvitaan varsinkin digitaalilihydraulisessa paineenrajoituksessa, mutta myös muissa haastavissa sovelluksissa. Miniventtiili on suunniteltu mahdollisimman nopeaksi ja miniatyrisoinnin sääntöjen mukaan sen avausener-

giakin on pienempi kuin isoilla kaupallisilla venttiileillä. Silti sekään ei ole tarpeeksi nopea, jos joudutaan tyytymään perinteiseen ohjauselektroniikkaan. Nopeuttamisen lisäksi boosterin tehtävänä on pitää venttiilin tehonkulutus ja lämmöntuotto mahdollisimman pienenä. Miniventtiilin vaatiman avausvirran ja pitovirran suhde on hyvin suuri verrattuna useimpiin kaupallisiin venttiileihin, joten avausvirralla auki pidettäessä se kuluttaisi myös huomattavan paljon tehoa lämmöksi, eikä kela luultavasti kestäisi jatkuvaa suurta virtaa. Tästä syystä miniventtiili vaatii ehdottomasti boosterin, joka pystyy laskemaan avausvirran pieneksi pitovirraksi.

3.1 Venttiilin sähköiset ominaisuudet

Solenoidi on sähkömagneettinen toimilaite, jonka rakenne perustuu yksinkertaiseen johtimeen, joka on kääritty usealle kierrokselle kelaksi. Kun johtimen läpi kulkee virta, sen ympärille syntyy magneettikenttä, jonka suunta on virran suuntaisesti katsottuna myötäpäivään. Kelalle käärityissä johtimessa viereisten lenkkien magneettikentät yhdistyvät siten, että magneettikenttä on kelan sisäpuolella yhdensuuntainen. Magneettikentän suunta riippuu virran suunnasta johtimessa. Oikean käden säännön mukaan: Peukalon suunta näyttää magneettikentän suunnan, kun muut sormet asetetaan kelan ympärille virran suuntaisesti. Magneettikentän vahvuus eli magneettivuon tiheys on kelan sisällä lähes vakio ja se määräytyy kaavan

$$B = \mu \frac{N_1 I}{l} \quad (3.1)$$

mukaan, jossa μ on kelan sisällä olevan väliaineen permeabiliteetti, N_1 on kelan kierrosten määrä, I on johtimessa kulkevan virran suuruus ja l on kelan pituus. Kokonaismagneettivuon saadaan kertomalla magneettivuon tiheys kelan poikkaispinta-alalla eli kaavan

$$\Phi = BA \quad (3.2)$$

mukaan. Induktanssin määritelmä on

$$L = \frac{N_1 \Phi}{I}, \quad (3.3)$$

josta saadaan staattisessa tilassa olevan solenoidin induktanssiksi

$$L = \mu \frac{N_1^2 A}{l}. \quad (3.4)$$

Kaavasta voidaan huomata, että solenoidin induktanssi ei ole verrannollinen virran suuruuteen, vaan pelkästään solenoidin rakenteellisiin ominaisuuksiin. Dynaamisessa tilanteessa venttiilin kelan induktanssi vaihtelee kuitenkin huomattavasti venttiilin toimintajakson aikana. Venttiiliä avattaessa ja virran kasvaessa induktanssi pienenee, kun taas pienellä virralla venttiiliä auki pidettäessä se kasvaa suuremmaksi, kuin staattisessa tilanteessa [15]. Kelaan sitoutuneen kokonaisenergian voi laskea induktanssin ja virran perusteella kaavalla

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2. \quad (3.5)$$

Kun solenoidin sisälle asetetaan magnetoituvasta materiaalista koostuva kappale, kuten rautainen hydrauliventtiilin neula, virrasta syntyvä magneettikenttä pyrkii liikuttamaan neulaa suuntaan, jossa magneettivuon kulku on helpointa. Venttiilin neulaan kohdistuva sähkömagneettinen voima suuntautuu siten, että neulan ja solenoidin rungon välinen ilmaväli pyrkii mahdollisimman pieneksi, jolloin venttiili avautuu. Neulaan kohdistuvaa sähkömagneettista voimaa voidaan approksimoida kaavan (2.1) mukaan. Kaavasta nähdään, että mitä suurempi yhteinen pinta-ala neulalla ja solenoidin rungolla on ja mitä lähempänä ne ovat toisiaan, sitä suurempi voima niiden välille syntyy. Lisäksi huomataan, että mitä suurempi pinta-ala ja pienempi etäisyys, sitä pienemmällä virralla saadaan aikaan suurempi voima [16].

Yleinen keino venttiilin toiminnan nopeuttamiseksi on korkean jännitteen käyttäminen venttiiliä avattaessa virrankasvun nopeuttamiseksi. Avautumisen jälkeen venttiilin auki pitämiseksi riittää pienempi pitovirta, kuten kaavasta (2.1) huomattiin. Venttiiliä suljettaessa taas täytyy kelan yli saada negatiivinen jännite, jotta pitovirran energia purkautuu nopeasti pois kelasta ja solenoidin magnetoituneista osista. Seuraavaksi käydään läpi näihin kolmeen eri vaiheeseen liittyvät tekijät.

3.1.1 Venttiilin avaus

Solenoidiventtiilin avaus vaatii toimielimeen kohdistuvan voiman, joka voittaa venttiiliä kiinni pitävän painevoiman ja vastajousen aiheuttaman voiman, sekä muut mekaaniset vastukset kuten kitkat. Avausvoima saadaan aikaan sähkövirralla kelan läpi (kaava 2.1), joka aiheuttaa toimielintä liikuttavan magneettisen voiman. Miniventtiilin avausvirran maksimiarvo määräytyy venttiilin yli olevan paine-eron mukaan, koska paine-ero saa aikaan venttiiliä sulkevan painevoiman. Miniventtiiliä käytetään tällä hetkellä maksimissaan 21 MPa paine-erolla, jolloin tarvittavan avausvirran maksimiarvo on noin 4.5 ampeeria [15]. Pienemmällä paine-erolla venttiili avautuu pienemmälläkin avausvirralla.

Venttiilin nopeaa avautumista hidastavat mekaaniset, sähköiset ja magneettiset ilmiöt. Mekaaniseen osaan vaikuttavat kaikki voimakomponentit, jotka kohdistuvat venttiilin neulaan Newtonin lain

$$\sum F = ma \quad (3.6)$$

mukaan, jossa m on neulan massa ja a sen kiihtyvyys. Näitä ovat neulan oma hitausmasa, jousen vastavoima, kitkavoimat ja virtaus-, sekä painevoimat. Sähköinen viive syntyy kelan induktanssista, joka hidastaa virran nousua ja sitä kautta sähkömagneettisten voimien syntyä. Magneettinen viive syntyy virran nousun aiheuttamien pyörrevirtojen synnyttämästä virranahtoilmiöstä (skin effect), joka hidastaa magneettikentän tunkeutumista solenoidin magnetoituviiin osiin [17]. Neulan hitausmassalla on melko pieni vaikutus venttiilin vasteaikaan, kunhan venttiilin mekaniikka on ylipäättään suunniteltu sopivaksi nopeaan toimintaan. Venttiilin toimielimen liikeaika on yleensä huomattavasti

pienempi, kuin viiveet ennen toimielimen liikkumista. Suurimmat viiveet aiheutuvat sähköisestä ja magneettisesta osasta, joihin voidaan vaikuttaa ohjauselektronikalla. Lisäksi venttiilin yli oleva paine-ero vaikuttaa suoraan tarvittavaan avausvoimaan ja sitä kautta tarvittavaan avausvirtaan, joten se vaikuttaa myös sähköiseen ja magneettiseen viiveeseen [9; 15].

Sähköiseen viiveeseen voidaan vaikuttaa kasvattamalla kelan virta nopeasti venttiilin avautumiseen tarvittavaan arvoon [17]. Tasajännitettä käytettäessä virran arvoa kelassa tietyllä ajanhetkellä voidaan kuvata kaavan

$$i(t) = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.7)$$

mukaan, jossa U on jännitteen arvo kelan yli, R on kelan sähköinen resistanssi ja τ on kelan aikavakio. Aikavakio muodostuu kelan induktanssin ja resistanssin suhteesta kaavan

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.8)$$

mukaan. Kaavasta (3.7) nähdään, että suurilla jännitteen arvoilla virta kasvaa nopeasti. Lisäksi induktanssin pieneneminen avautumisen aikana pienentää aikavakion arvoa, jolloin virran kasvunopeus on entistä suurempi [15]. Virran maksimiarvo käytetyllä jännitteellä määräytyy kelan yli olevan jännitteen ja kelan resistanssin perusteella Ohmin lain mukaan. Avausjännitettä ei ole syytä kasvattaa kuitenkaan loputtomiin äärettömän nopean avauksen toivossa, koska magneettivuo alkaa saturoitua magneettiipiirin materiaaleissa virran noustessa riittävän suureksi. Magneettivuon saturoituminen johtaa kelan induktanssin pienentymiseen, jolloin myös virran tuottaman voiman generoituminen hidastuu. Venttiilin materiaalivalinnoissa onkin syytä kiinnittää huomiota korkeaan saturaatiopisteeseen. Miniventtiilillä saturaatiota alkaa tapahtua noin neljän ampeerin kohdalla [18].

Magneettiseen viiveeseen voidaan vaikuttaa solenoidin esimagneetoinnilla ennen varsinaista avausta. Kelassa voidaan pitää pientä virtaa, joka ei riitä liikuttamaan venttiilin neulaa, mutta magneto solenoidin osat valmiiksi, jolloin itse avaus tapahtuu nopeammin. Samalla pienennetään sähköistä viivettä, kun virtaa kulkee jo valmiiksi kelassa [17]. Menetelmä kuluttaa tietenkin hieman tehoa, mutta se sopii varsinkin tilanteisiin joissa tiedetään tarkasti milloin seuraava venttiili tulee avata. Menetelmää voidaankin käyttää esimerkiksi dieselmoottorin ruiskuventtiilistön ohjauksessa, jossa vaaditaan myös tarkkoja ja nopeita venttiileitä, kuten digitaalihydrauliikassa. Moottorin tapauksessa seuraava solenoidi voidaan esimagnetoida ennen varsinaista venttiilin avaamista, koska moottorin kierrosluvusta tiedetään milloin seuraava venttiili täytyy avata. Digitaalihydrauliikkaan menetelmää on vaikeampi soveltaa, kun ei välttämättä voida tietää milloin seuraavan venttiilin avaus tapahtuu. Jos esimagneetoinnin tehonkulutus on suhteellisen pieni, voitaisiin ainakin muutama seuraavaksi avausvuorossa oleva venttiili esimagnetoida.

Miniventtiilin avausenergiaa on hankala arvioida kaavan (3.5) perusteella, koska induktanssi muuttuu venttiilin neulan aseman ja nopeuden, sekä kelan virran mukaan.

Avaukseen käytetty energia saadaankin helpommin määrittelemällä avausenergia venttiilin kelalle viedyksi energiaksi siihen asti kunnes venttiili avautuu. Näin avausenergia saadaan integroimalla kelalle viety teho venttiilin vasteaikaan asti kaavan

$$E = \int_{t_0}^{t_1} u(t)i(t)dt \quad (3.9)$$

mukaan, jossa u on kelan yli oleva jännite, i on kelan läpi kulkeva virta, t_0 on alkuhetki ja t_1 on ajanhetki, jolloin venttiili on täysin auki. Miniventtiilin uusimman prototyypin minimiavausenergia on noin 60 mJ, mutta turvallisinta varman avauksen kannalta on pitää rajana hieman suurempaa energiaa [15]. Mittausten perusteella on todettu, että miniventtiilin varma avaus kaikilla käytettävillä painetasoilla saavutetaan 12 V tasajännitteellä ja 2 ms pituisella avauspulssilla, jolloin kelan virta ehtii nousta yli tarvittavan 4.5 ampeerin ja tarvittava sähkömagneettinen voima ehtii generoitua [15].

3.1.2 Venttiilin avaus kondensaattorilla

Avauspulssi voidaan saada aikaan myös kondensaattorin latausta hyväksikäyttämällä. Kondensaattori voi olla valmiiksi ladattuna tarvittavaan käyttöjännitteeseen, jolloin se luovuttaa latausenergiansa suoraan kelalle. Tällöin se on kytkettävä venttiilin kelan kanssa rinnakkain. Vaihtoehtoisesti se voi olla tyhjänä kelan kanssa sarjassa, jolloin virta kulkee aluksi sen läpi lähes oikosulkumaisesti ja kasvattaa avausvirran nopeasti. Avauskondensaattorin käytön hyvänä puolena on sopivan mittainen automaattinen avauspulssi, kunhan kondensaattori on mitoitettu kelaan nähden sopivaksi. Sopivan mitoituksen voi arvioida venttiilin avausenergian perusteella, koska kela vastavasti kondensaattorin varastoiman energian voi laskea kaavan

$$E_C = \frac{1}{2} CU^2 \quad (3.10)$$

missä C on kondensaattorin kapasitanssi ja U jännite sen elektrodien välillä. Jos mitoitusta tehdään miniventtiilin minimiavausenergian mukaan, niin kaavan (3.10) perusteella saadaan kondensaattorin minimikapasitanssiksi noin 200 uF, kun käytetään 24 voltin latausjännitettä. Tämä on energiankulutuksen kannalta ideaalinen tilanne, kun ladattu kondensaattorin energia muuttuu suoraan kelan energiaksi, mutta avaus voi olla epävarma joissain tilanteissa. Hieman suurempi, eli vähintään 220 uF kondensaattori saattaisi riittää.

Kondensaattorin käytön yksi ongelma on sen lataamiseen tarvittava aika. Kondensaattorin jännite määräytyy kaavan

$$U(t) = U_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.11)$$

mukaan, jossa U_0 on jännite alkutilassa ja τ on kondensaattorin aikavakio. Aikavakio määräytyy kaavan

$$\tau = RC \quad (3.12)$$

mukaan, jossa R on kondensaattorin piirissä oleva resistanssi. Yhden aikavakion kuluttua kondensaattorin jännite on noin 63.2 % syöttöjännitteestä. Vasta noin viiden aikava-

kion jälkeen kondensaattorin jännite saavuttaa lähes käytetyn latausjännitteen [16]. PNM-koodausta ja matopelimäistä venttiilien ohjaussykliä käytettäessä kondensaattorin latausaika ei välttämättä haittaa kovin paljoa.

3.1.3 Venttiilin pito

Venttiili pysyy avautumisen jälkeen auki huomattavasti pienemmällä virralla, kuin tarvittava avausvirta. Tämä johtuu sekä venttiilin neulan ja solenoidin rungon välisen il-mavälin pienentymisestä, että venttiiliä sulkevan painevoiman vähenemisestä. Kaavan (2.1) perusteella tiedetään, että il-mavälin lyhentyessä pienempi virta aiheuttaa suuremman voiman venttiilin pitämiseksi auki. Miniventtiilissä tarvittava pitovirta riippuu sen yli olevasta paine-erosta, mutta hyväksi todettu pitovirran arvo on noin 300 mA, jolla venttiili pysyy auki kaikissa tilanteissa [15]. Tämä saadaan aikaan noin yhden voltin jännitteellä venttiilin kelan yli. Mahdollisimman pienellä pitovirralla pystytään pitämään sähkötehon kulutus minimissään. Pieni pitovirta suojaa myös kelaä kuumenemiseltä ja pidentää sen käyttöikä. Tärkein saavutettava etu mahdollisimman pienellä pitovirralla on kuitenkin venttiilin sulkeutumisen nopeuttaminen sähköisen ja magneettisen viiveen minimoimisen kautta. Yleisiä keinoja pitovirran aikaansaamiseen ovat:

- Tehon hukkaaminen lämmöksi vastuksessa tai zenerdiodissa
- Kaksi valittavissa olevaa käyttöjännitetasoa
- Pulssinleveysmodulaatio vapaakiertodiodin kanssa

Perinteisesti etenkin releissä käytetty yksinkertainen keino on sopivan jännitehäviön aikaansaaminen sarjavastuksen yli, jolloin piirin läpi kulkeva virta pienenee. Vaih-dos avaus- ja pitovaiheen välillä voidaan saada aikaan esimerkiksi kytkimellä tai sarjassa latautuvan kondensaattorin avulla. Tapa on käyttökelpoinen silloin, kun venttiilin avausvirtavaatimus ei ole kovinkaan suuri ja pitovirta ei ole siihen verrattuna pieni. Miniventtiilin kohdalla tilanne on kuitenkin päinvastainen. Avausvirran ja pitovirran suhde toisiinsa on hyvin suuri verrattuna esimerkiksi perinteisiin vakiojännitteellä käytettäviin venttiileihin tai releisiin. 12 V käyttöjännitteestä täytyisi hukata lämmöksi noin 11 V, mikä tarkoittaa 300 mA pitovirralla yli 3 W jatkuvaa häviötä pidon aikana. Yksittäisenkin venttiilin kohdalla häviö on suuri, mutta PNM-koodatussa venttiililohkossa se ker-tautuu venttiilien määrän mukaan.

Kaksi valittavissa olevaa käyttöjännitetasoa on luonteva tapa avaus- ja pitovirtojen aikaansaamiseksi. Venttiili avataan suurella jännitteellä, jonka jälkeen pienempi jännite pitää venttiilin auki. Käyttöjännitteiden tulee olla valittavissa kytkimellä jokai-selle venttiilille erikseen. Piiri vaatii vähintään kaksi kytkintä, joilla valitaan käyttöjän-nite ja yhdistetään kela valitun käyttöjännitteen ja maatason väliin. Myös pienempijän-nitteiseltä lähteeltä tarvitaan melko paljon virtaa suhteessa pieneen pitäjännitteeseen, kun useita venttiileitä pidetään auki samanaikaisesti, joten pitäjännite voisi olla järkevää tuottaa esimerkiksi hakurilla suuremmasta jännitteestä.

Pulssinleveysmodulaatio on paljon käytetty tapa pitovirran tuottamiseksi. Kyt-kintä ohjataan silloin sopivan pituisilla pulsseilla, jolloin virta kulkee kelan läpi ohjauk-

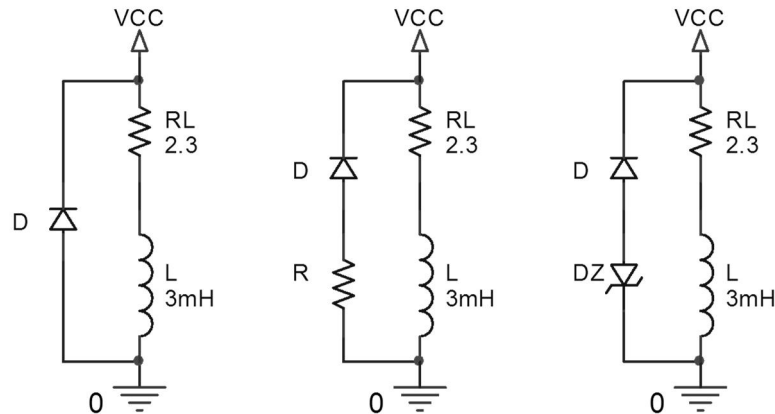
sen ollessa päällä ja vastaavasti purkautuu vapaakiertodiodin kautta ohjauksen ollessa pois päältä. Induktanssin aiheuttaman virran muutosnopeuden hitaus pitää kelan läpi kulkevan virran lähes vakiona, vaikka jännite vaihtelee käyttäjännitetason ja negatiivisen diodin kynnysjännitteen välillä. Piiri on mahdollista saada rakenteeltaan yksinkertaiseksi, mutta vaatii enemmän älykkyyttä ohjaukselta. Pitovirran tasoa voidaan säätää aktiivisesti pulssisuhteen mukaan ja usein halutaankin käyttää virran jatkuvaa mittausta, jos kelan ominaisuudet vaihtelevat suuresti esimerkiksi lämpötilan mukaan. Miniventtiilin tapauksessa riittänee kuitenkin mittauksissa kerran todennettava pulssisuhde, jota voidaan käyttää kaikilla venttiileillä. Pulssinleveysmodulaatio aiheuttaa huomattavia häiriöitä ainakin herkimpiin mittalaitteisiin, joten tarvittaessa herkissä sovelluksissa olisi hyvä käyttää mieluummin kaksijännitteistä päätettä. Lisäksi jatkuva nopea kytkeminen aiheuttaa jonkin verran kytkinhäviöitä MOSFET-kytkimessä ainakin suuremmilla käyttöjännitteillä.

3.1.4 Venttiilin sulkua

Venttiili alkaa sulkeutua, kun sulkujousen aiheuttama jousivoima yhdessä virtausvoiman sulkevan vaikutuksen kanssa voittaa venttiilin neulaan kohdistuvan sähkömagneettisen voiman ja lepokitkan. Nopeaa sulkeutumista varten kelassa kulkeva pitovirta on saatava purettua mahdollisimman nopeasti, jolloin sähkömagneettinen voimakin häviää nopeasti. Jännitettä ei voida kuitenkaan katkaista hallitsemattomasti, koska kelan induktanssi vastustaa virran muutosta, jolloin virta kelassa pyrkii jatkamaan kulkuaan. Tällöin kelan yli muodostuu negatiivinen jännite. Muodostuva jännite saattaa nousta hyvinkin suureksi jopa pienellä pitovirralla, jolloin tapahtuu luultavasti jonkin piirissä olevan komponentin rikkova läpilyönti. Virralle on siis oltava kulkureitti, jota pitkin se voi purkautua hallitusti. Komponentteja, joilla hallittu purkautuminen saadaan aikaan, ovat esimerkiksi:

- Vapaakiertodiodi
- Vastus vapaakiertodiodin kanssa sarjassa
- Zenerdiodi ja vapaakiertodiodi sarjassa
- Diodisilta maatasosta jännitelähteelle
- Transienttisuojadiodi tai varistori

Vaimentava komponentti tai komponentit voivat olla rinnakkain kelan tai sitä ohjaavan kytkimen kanssa. Kelassa kulkeva virta muuttuu kohti nollaa sitä nopeammin, mitä suurempi jännitehäviö vaimentavan komponentin yli muodostuu, kuten kaavasta (3.7) nähdään. Kuvassa 3.1 on esitetty kolme erilaista esimerkkiä venttiilin pitovirran ja magneettikenttään sitoutuneen energian purkamiseksi hallitusti.



Kuva 3.1 Venttiilin sulku erilaisilla vaimentavilla komponenteilla. Vapaakiertodiodi (vasen), diodi sarjassa vastuksen kanssa (keskellä) ja diodi sarjassa zenerdiodin kanssa (oikealla).

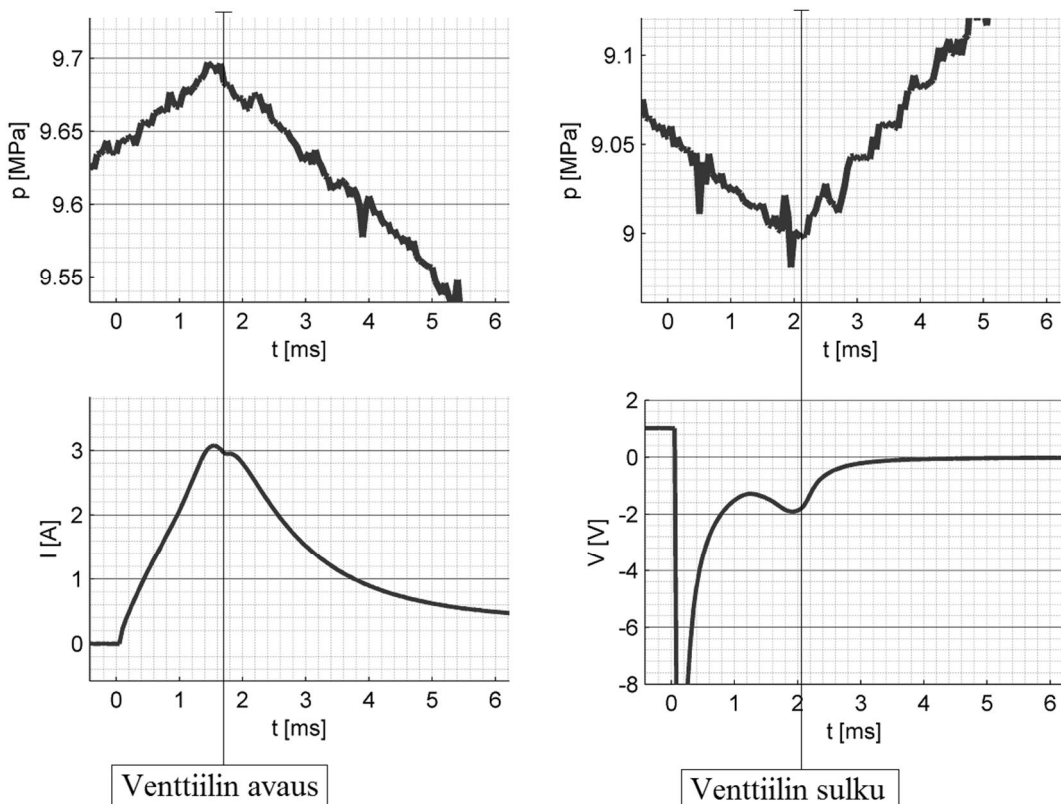
Perinteinen tapa solenoidin virran tappamiseen on kierrättää virtaa pelkän vapaakiertodiodin kautta. Virta kiertää diodin ja kelan läpi, jolloin sen energia muuttuu hitaasti lämmöksi diodin kynnyksjännitteestä ja kelan resistanssista johtuen. Digitaalihydrauliikan ja miniventtiilin tapauksessa pelkkä vapaakiertodiodi on kuitenkin liian hidaskomponentti venttiilin sulkuun. Suurempi jännitehäviö saadaan aikaan vastuksella diodin kanssa sarjassa. Jännitehäviö ja vastuksella hukattava teho on tällöin verrannollinen vastuksen läpi kulkevaan virtaan Ohmin lain mukaan, sekä diodin kynnyksjännitteeseen. Tästä johtuen virran purkautuminen hidastuu lähes eksponentiaalisesti purkamisen aikana, mikä hidastaa venttiilin sulkeutumista hieman. Parempi tapa onkin käyttää komponenttia, jonka jännitehäviö ei riipu virran arvosta, vaan pysyy lähes vakiona halutussa arvossa koko virran purkautumisen ajan. Näitä ovat zenerdiodit ja muut vastaavanlaiset puolijohteet, kuten TVS-diodit ja varistorit. Virta putoaa nolliin lähes lineaarisesti, jolloin sulkeutumisaika on nopeampi, kuin vastuksen kanssa. Myös kahden diodin ja kahden kytkimen silta on nopea ja energiatehokas ratkaisu venttiilin sulkuun. Tällaista ratkaisua simuloidaan tarkemmin luvussa 4.1.3.

Kun venttiiliä avattaessa viivettä aiheuttaa magnetoitumisviive, niin vastaavasti venttiiliä suljettaessa sitä aiheuttaa demagnetoituminen eli jäännösmagnetismi. Tämä jäännösmagnetismista johtuva viive on yleensä huomattavasti pidempi, kuin virran putoamisaika. Mittauksista ja simuloinneista arvioituna kelan virta putoaa nolliin noin 0.1 ms aikana, mutta venttiilin sulkeutuminen alkaa vasta noin 1 ms kohdalla. Viivettä pysytetään pienentämään käyttämällä mahdollisimman pientä pitovirtaa, jolloin venttiilin osat ovat ennen sulkua magnetoituneet mahdollisimman vähän. Venttiilin materiaalin magnetoitumisominaisuudet vaikuttavat sulkunopeuteen samoin kuin avautumisnopeuteenkin [19]. Myös paine-erolla ja virtauksella on huomattava vaikutus venttiilin sulkunopeuteen. Pienellä paine-erolla venttiili sulkeutuu hitaammin kuin suurella, koska paineesta aiheutuvalla virtauksella on venttiiliä sulkeva voimavaikutus. Sulkeutumista voitaisiin nopeuttaa jäykemmällä palautusjousella, mutta tällöin tarvittava avausvoima kasvaisi [15].

3.1.5 Back-EMF

Back-EMF ilmiö aiheuttaa muutoksia venttiilin kelan virta- ja jännitekäyrissä venttiilin avautumisen ja sulkeutumisen aikana, jolloin sitä voidaan käyttää hyväksi venttiilin vasteaikoja arvioitaessa mittauksista. Faradayn lain mukaan kelan sisällä liikkuva magneetoituva kappale saa aikaan magneettikentän muutoksen. Venttiilin neulan liikkeen aiheuttama magneettikentän muutos saa aikaan sitä vastustavan sähkömotorisen voiman, joka näkyy pienenä heilahduksena kelan virrassa, kun sen yli oleva jännite pyritään pitämään vakiona. Heilahdus näkyy vastaavasti kelan yli olevassa jännitteessä, jos virta pysyy vakiona. Notkahdus tai epätavallinen kulma virrassa tai jännitteessä kertoo siitä, että venttiilin neula on back-EMF ilmiön suurimmalla vaikutushetkellä osunut päätyyn. Ilmiö on suurimmillaan nopeissa liikkeissä, joten jos liikettä vastustavia voimia on paljon ja neulan liike on hidas, ilmiötä ei välttämättä havaita ollenkaan.

Tyypillisessä tilanteessa vakiojännitteellä avattavassa venttiilissä back-EMF ilmiö näkyy virran kasvunopeuden tai jopa virran arvon putoamisena avaushetkellä. Venttiiliä suljettaessa kelan yli muodostuu negatiivinen jännite ja virta putoaa nolnaan melko nopeasti. Tämän jälkeen jännite lähtee nousemaan negatiivisesta sulkuarvosta kohti nolaa. Jännitteessä näkyy notkahdus kohti negatiivista suuntaa, kun neula osuu päätyyn ja sulkee venttiilin. Kuvassa 3.2 on esitetty venttiilin avaushetken paine- ja virtakäyrät, sekä sulkuhetken paine- ja jännitekäyrät, joiden lisäksi niihin on merkitty pysyviivalla venttiilin arvioidut avautumis- ja sulkeutumishetket.



Kuva 3.2 Back-EMF ilmiö venttiilin avaus- ja sulkuhetkellä

Kuvasta voidaan havaita, kuinka venttiilin avautuessa noin 1.7 ms ajanhetkellä, paine lähtee laskuun. Samalla hetkellä kelan virtakäyrässä näkyy back-EMF ilmiön aiheuttama epätavallinen notkahdus. Venttiilin sulkuhetkellä noin 2.1 ms ajanhetkellä paine taas lähtee nousuun. Samalla hetkellä kelan jännitekäyrän epätavallinen notkahdus lähtee takaisin kohti nollaa. Tämä on osoitus back-EMF ilmiön mahdollisuudesta venttiilin vasteaikojen tarkasteluun. Yleensä jännitekäyrässä näkyvä ilmiö sulkuhetkellä on huomattavasti selvemmin havaittavissa, kuin virtakäyrässä näkyvä ilmiö avautumishetkellä.

3.2 Käytettäviä boostereita

Digitaalihydrauliikassa ja vastaavissa nopeita venttiileitä vaativissa sovelluksissa, kuten dieselmoottorien ruiskuventtiilien ohjauksessa on käytetty tähän mennessä useita erilaisia boosteritoteutuksia. IHA:lla on kehitetty yksinkertaisten mittausprototyyppien lisäksi kahdenlaisia boostereita. Niitä kutsutaan IHA-kone -boosteriksi ja 28-kanavaiseksi boosterikortiksi. Kummankin päätteen toiminta perustuu kahden kytkimen piiriin, jossa pitovirta tehdään käyttämällä PWM-ohjausta.

3.2.1 IHA-kone -boosteri

IHA-kone -boosteri on modulaarinen piiri, eli yhdellä piirilevykortilla on ohjaus ja pääteaste yhtä venttiiliä kohti (Kuva 3.3). Piiri on noin 4×4 cm pinta-alaltaan. Piirit kytetään yhteiseen emolevyyn, jossa on tarvittavat sisäänmeno- ja ulostuloportit, sekä liityntä ulkoiselle CAN-ohjaimelle. Emolevyllä on myös jänniteregulointi pienempää ohjausjännitettä varten. Boosterin päätteen ohjaus perustuu pääosin Texas Instrumentsin DRV103 -piiriin, joka on tarkoitettu solenoidin päätteen alapuoliseksi kytkimeksi [20]. Tässä tapauksessa piiriä käytetään tuottamaan ohjaus- ja PWM-signaali erilliselle MOSFET-kytkimelle, koska venttiilin avausvirtavaatimus on niin suuri, ettei DRV103 kestä sitä.

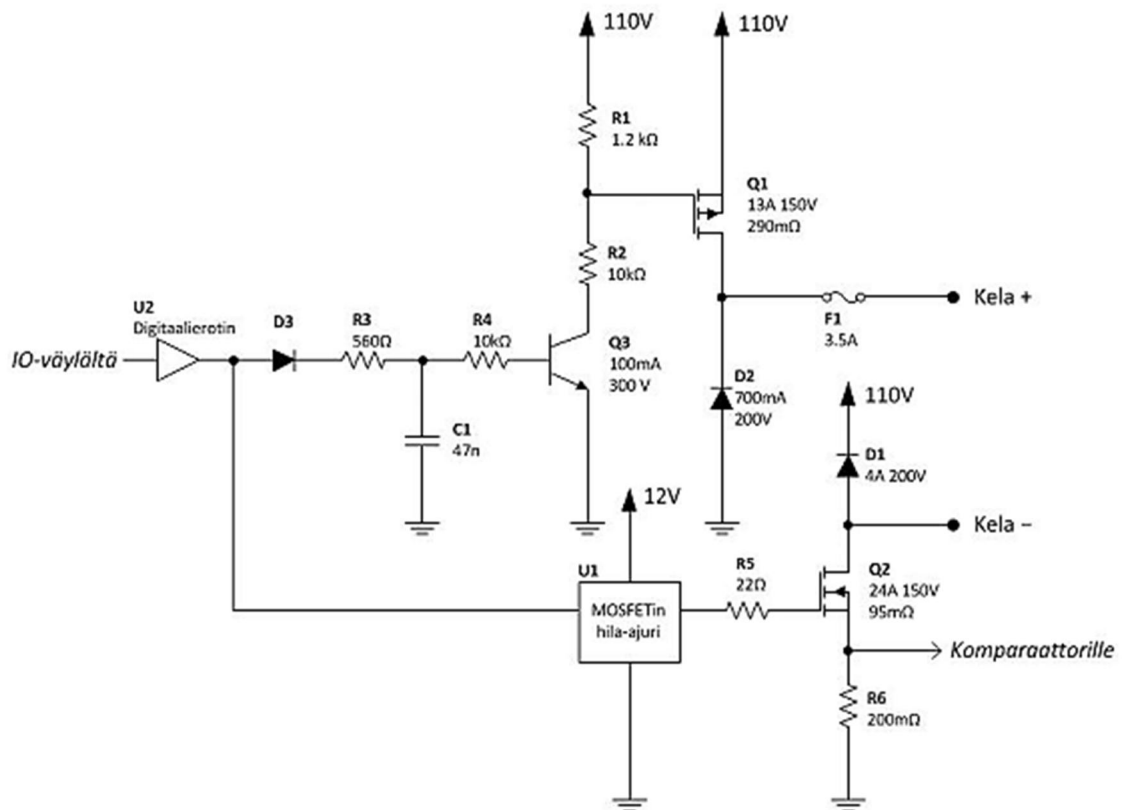


Kuva 3.3 IHA-kone -boosterin yksittäinen päätepiiri

IHA-kone -boosterin piirikaavio on esitetty liitteissä kuvassa L1.1. DRV103 -piirin tuottamaa avauspulssin pituutta ja PWM-signaalin pulssisuhdetta säädetään ulkoisilla komponenteilla. Avausaika säädetään piiriin kytkettävällä kondensaattorilla ja pulssisuhde säätövastuksella. Ohjaus tapahtuu viemällä sisäänmenosignaali optoerottimelle, jonka läpi erillinen ohjausjännite pääsee DRV103 -piirille ja venttiilin kelan alapuoliselle kytkimelle. Alempaa kytkintä pidetään auki koko ohjauksen ajan ja ylempi ohjautuu DRV103 -piirin mukaan. PWM-signaalin off-jaksolla kelan positiivinen puoli vetää virtaa maasta vapaakiertodiodin läpi ja venttiiliä suljettaessa kelan negatiivinen puoli on yhdistetty toisen diodin läpi jännitelähteelle. IHA-kone -boosteria on käytetty pääasiassa PCM-koodatun venttiilijärjestelmän ohjaukseen. Sitä on käytetty myös mini-venttiilin testimittauksissa, mutta PNM-koodattuun venttiilipakettiin se on aivan liian suuri ja monimutkainen.

3.2.2 28-kanavainen boosterikortti

28-kanavainen boosterikortti on tarkoitettu ohjaamaan 28:aa venttiiliä PCM-koodatussa venttiilijärjestelmässä. Kortilla on kaikki pääteasteet yhdellä piirilevyllä toisin kuin IHA-kone -boosterissa. Sen toiminta perustuu kahteen rinnakkaisväylällä toisiinsa kytkettyyn Freescale 56F8323 -mikrokontrolleriin, joista toinen tekee tarvittavan laskennan ja toinen huolehtii ohjaus- ja mittaussignaaleista. Ohjaus perustuu kiikkulogiikkaan, jossa kontrolleri vie kahdeksan ohjaussignaalia ja enable-signaalin yhdelle kiikkupiirille kerrallaan ja jatkaa näin seuraavien rinnakkaisten kiikkupiirien läpi, kunnes kaikkien venttiilien ohjaukset on saatu vietyä eteenpäin. Kiikkupiirit pitävät ohjauksen päällä seuraavaan päivitykseen asti. Lisäksi samalla tavalla otetaan vastaan virtamittaussignaaleita keloilta, jonka jälkeen aloitetaan uusi ohjaussykli. Mikrokontrollerien nopeus riittää tuottamaan kaikille venttiileille tarvittavan suuruisen PWM-taajuuden pitovirtaa varten vaikka ohjaukset ja mittaukset suoritetaankin sarjamaisesti. Kiikkupiireiltä ohjaus kulkee digitaali-erottimen läpi venttiilin pääteasteelle (Kuva 3.4), jossa alempaa kytkintä ohjataan erillisen hila-ajurin avulla. Ylempää kytkintä ohjataan npn-transistorin ja ylösvetovastuksen kautta alipäästösuodatettuna, jolloin PWM-signaalin aikana ylempi kytkin pysyy koko ajan auki vaikka alemman kytkimen tila vaihtelee. Diodi D1 toimii vapaakiertodiodina PWM-signaalin off-jaksolla ja venttiiliä suljettaessa muodostuu diodisilta maasta jännitelähteelle diodien D1 ja D2 kautta, jolloin sulkujännite on hieman yli lähdejännitteen suuruinen. Virtamittauksen tarkoituksena on automatisoida venttiilin ohjaus, jolloin mikrokontrolleri laskee sopivan avauspulssin pituuden ja PWM-pulssisuhteen. Kortilla on CAN-liityntä, jonka kautta ohjaus tuodaan ulkoiselta tietokoneelta, mutta myös kortin omilla mikrokontrollereilla pystytään laskemaan kevyitä mallipohjaisia säätäjiä tarvittaessa.



Kuva 3.4 28-kanavaisen boosterikortin yksittäinen päätteaste [21]

PNM-koodatuille miniventtiileille 28-kanavainen boosterikortti on aivan liian suuri ja tarpeettoman monimutkainen. Lisäksi se on mitoitettu jopa 140 V DC-käyttöjännitettä varten. Pääteen toimintaperiaate sen sijaan voisi olla aivan sopiva myös PNM-koodaukseen, koska alipäästösuoituksella voidaan vähentää ohjausten määrää, vaikka komponentteja tarvitaankin muutama lisää. Myös kiikkujen kautta vaihteittain tehty ohjaus voisi olla järkevää PNM-koodauksessa, koska mikrokontrollerin ulostulot eivät riitä suurelle määrälle ohjauksia kerrallaan.

3.2.3 Muut boosterit

IHA:lla on testi- ja mittauskäytössä myös Metso Oyj:n suunnittelema kaksijänniteboosteri, jossa avausjännite on 48 V ja pitojännite 12 V. Avausajan pituus määräytyy ohjausjännitteen mukaan välille 1.9 - 9.4 ms, kun ohjausjännite on 2.5 - 5 V. Yhdessä boosterikortissa on ulostulot 12 venttiilille. Paperikoneteollisuudessa halutaan välttää kaikenlaisia häiriösignaaleja, jolloin kahden käyttöjännitteen käyttö on perusteltua PWM-ohjauksen sijaan. Ohjaus onnistuu suorilla ulostuloilla dSpace-mittaustietokoneelta tai CAN-väylällä erillisten CAN-moduulien läpi. Tämäkin ratkaisu on mitoitukseltaan aivan liian suuri miniventtiiliä varten, mutta ohjausjännitteeseen perustuva automaattinen avausajan pituuden valinta on mielenkiintoinen ominaisuus PNM-koodausta varten, koska se vähentää ohjaussignaalien määrää.

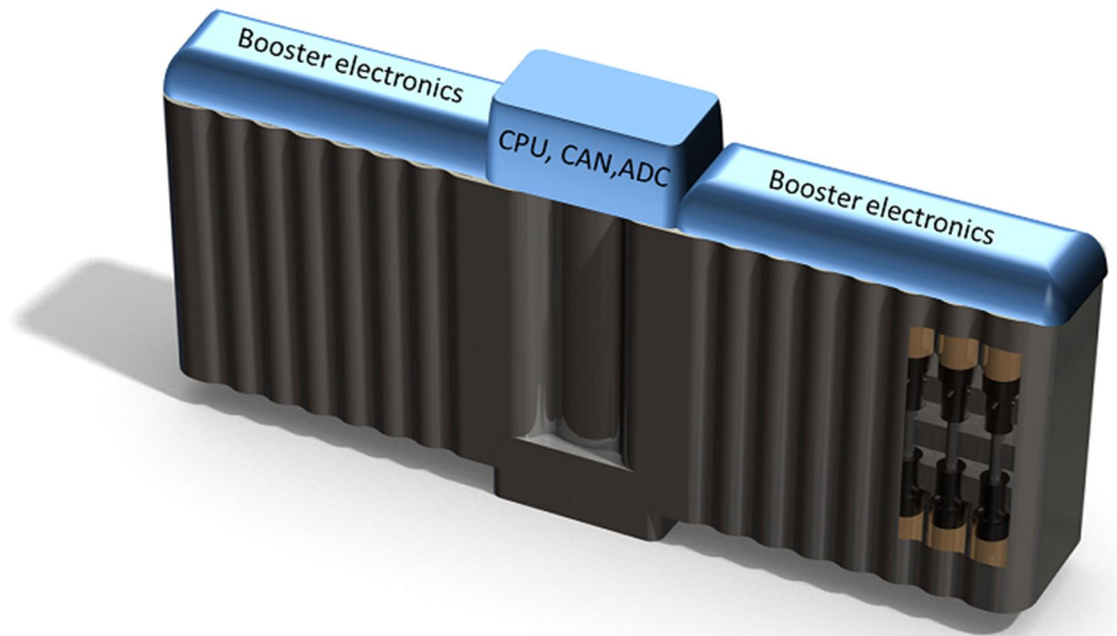
Muulla käytettävistä boostereista esimerkkinä voidaan esittää autoteollisuuden käyttämiä ratkaisuja. Autoteollisuudessa sähköinen venttiiliohjaus on lisääntynyt me-

kaanisen nokka-akseliohjauksen sijaan. Sähköisellä ohjauksella pystytään lisäämään moottorin tehoa ja säästämään polttoainetta sekoitussuhteen ja ruiskutuksen lisääntyneen tarkkuuden, sekä ohjelmoinnin avulla. Ajoitustarkkuus on alle millisekunnin luokkaa, kuten digitaalihydrauliikassakin, joten vastaavaa ohjauselektronikan soveltamista tarvitaan. Yleisimmät päätteet ovat PWM-käyttöisiä kahden tai kolmen kytkimen piirejä, kun tarvitaan avaus- ja pitovirtaa, sekä nopeaa sulkua [22; 23]. Kolmen kytkimen piirissä etuna on avausvirran rajoitus PWM-ohjauksella, jolloin saturaation jälkeinen piikkivirta ei rasita venttiilin kela- tai muita komponentteja. Huono puoli on yksi aktiivinen komponentti lisää, joka vaatii ohjauksen. Auton moottoreissakin tilavaatimukset ovat tiukkoja, mutta pienemmän venttiilimäärän takia boosteritoteutukset ovat PNM-koodattuun venttiilipakettiin tarpeettoman monimutkaisia ja isoja.

Yhteenvetona voidaan todeta, että suunniteltuun PNM-koodattuun venttiililohkoon sopivaa boosteria ei löydy valmiina, vaikka osa käytetyistä periaatteista onkin sovellettavissa miniventtiilin ohjausta varten. Tästä johtuen täytyy suunnitella uudenlainen boosteriratkaisu juuri halutunlaista venttiililohkoa varten halutuilla ominaisuuksilla.

4 OHJAUSELEKTRONIIKAN SUUNNITTELU JA SIMULOINTI

Esitellylle PNM-venttiililohkolle sopivan ohjauselektronikan suunnittelu on kompromisseja ja tasapainottelua eri ominaisuuksien ja tilavaatimusten kanssa. Kokonaisuudessaan järjestelmän tulee olla yksinkertainen, pieni, integroitava ja lisäksi halpa. Ohjauselektronikka koostuu pääteasteista, etuasteista ja älykkäästä ohjaimesta sekä johdotuksista näiden välillä, joiden kaikkien pitäisi mahtua venttiililohkon päälle. Tavoitteena on, että muita venttiililohkon ulkopuolelta tuotavia johdotuksia ei tarvita, kuin käyttöjännite ja ohjaussignaali esimerkiksi CAN-väylällä. Järjestelmässä tulee olla mahdollisimman vähän johdotuksia ja yksittäisen pääteasteen tulee mahtua keskimäärin noin 12×12 mm pinta-alalle. Kuvassa 4.1 on tavoite, johon venttiilipaketin ohjauselektronikan integroinnissa pyritään. Boosterit pyritään asettelemaan suoraan venttiilien päälle kiinteillä kontakteilla ilman johdotuksia ja ohjausyksikkö näiden keskelle venttiililohkon päälle. Lisäksi on tutkittava järjestelmän energiankulutusta yhden päätteen osalta ja kokonaisuudessaan. Pienetkin häviöt ja ylimääräinen energiankäyttö kertautuvat verrattain suuriksi, kun venttiileitä on useita kymmeniä.



Kuva 4.1 Venttiilipaketin ohjauselektronikan integroinnin tavoite [24]

Valmiita komponenttikokonaisuuksia pyritään käyttämään hyväksi, kuten samaan pakettiin pakattuja moninkertaisia komponentteja ja kuormakytкимиä, jotka sisältävät esimerkiksi jonkinlaisen etuasteen ja induktiivisen kuorman sulkukomponentin.

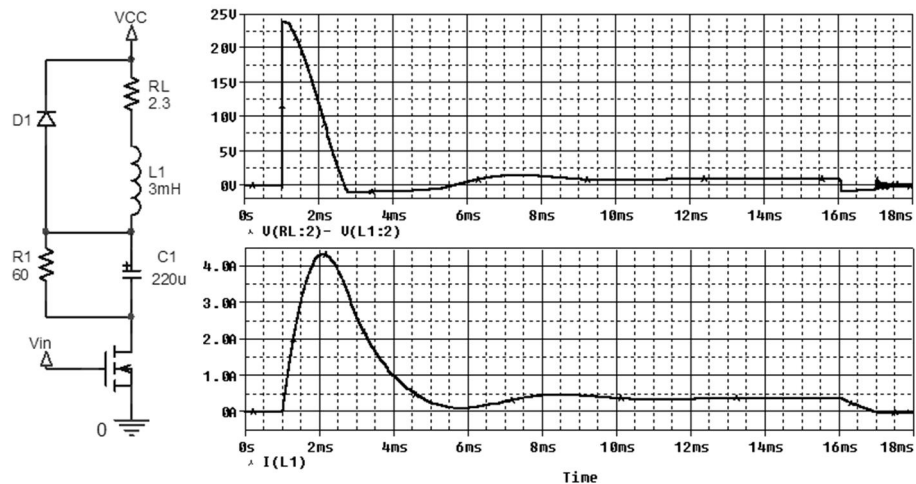
Varsinkin autoteollisuudessa on kehitetty monipuolisia moottorinohjauskomponentteja, joiden ohjaus onnistuu suoraan mikrokontrollerin sarjaväylältä. Pelkästään erikoiskomponenttien varaan ei kuitenkaan kannata välttämättä laskea, koska hinnat saattavat olla verrattain kalliita ja osa komponenteista voi poistua markkinoilta enneaikaisesti. Mini-venttiiliä suunniteltaessa sen avausvirta pyrittiin saamaan mahdollisimman pieneksi, kuitenkin toimintanopeus ja fyysinen koko etusijalla [15]. Tästä huolimatta virtavaatimus on melko suuri suunniteltavan elektroniikan kokoon nähden ja teholähteen maksimivirranantokyvyn kannalta. Järkevällä ohjauksella olisi ehkä mahdollista välttää suurin osa tilanteista, jolloin täyttää avausvirtaa tarvitaan samanaikaisesti kaikille venttiileille. Virtavaatimus on myös liian suuri suurimmalle osalle markkinoilla olevista valmiista solenoidinohjauskomponenteista.

4.1 Yleisimpien boosteripiirien esittely ja simulointi

Hydrauliventtiilin boosteria suunniteltaessa ensimmäinen ja tärkein tehtävä on sopivan pääteasteen suunnittelu. Samanlaisen tai lähes samanlaisen lopputuloksen venttiilin virtakäyrän kannalta voi saada aikaan usealla eri tavalla. Fyysisesti yksinkertainen pääteaste saattaa vaatia monimutkaisen etuasteen tai päinvastaisesti monimutkaisempi ja enemmän komponentteja sisältävä toteutus saattaa säästää lopulta tilaa yksinkertaisen ohjauksen ansiosta. Käydään kuitenkin läpi yleisimmät boosteripiirit ja niiden simulointitulokset, ennen kuin paneudutaan erikoiskomponenttien tarjontaan. Myöhemmissä kappaleissa esitellään tavallisesta poikkeavia boosteriratkaisuja. Kaikissa simuloinneissa kelan induktanssina on käytetty 3.5 mH arvoa, joka on arvio induktanssin keskiarvosta ohjaussyklin aikana. Simuloinnit on tehty OrCAD Capture -ohjelmistolla.

4.1.1 Avaus kondensaattorin läpi ja pito vastuksella

Jos tehonkulutuksesta ei tarvitsisi huolehtia, yksinkertainen vaihtoehto ohjausteknisesti on vastuksen ja kondensaattorin rinnankytkentä, joka on sarjassa venttiilin kelan kanssa. Tällöin korkea avausvirta kulkee tyhjän kondensaattorin läpi ja pitää kelan yli korkean jännitteen kunnes kondensaattori on latautunut täyteen. Tämän jälkeen pienempi pitovirta kulkee vain vastuksen läpi. Venttiilin sulkemisen jälkeen täytyy odottaa, että kondensaattori on tyhjentynyt vastuksen läpi ennen kuin venttiili voidaan avata uudestaan. Kuvassa 4.2 on esitetty kyseisen piirin piirikaavio ja simulointitulokset yhden venttiiliavauksen osalta. Kuvassa ylempi käyrä on jännite venttiilin kelan yli ja alempi virta sen läpi.



Kuva 4.2 Venttiilin avaus kondensaattorilla ja pito vastuksen läpi. Kelan yli oleva jännite (ylhäällä) ja siitä aiheutuva virta kelan läpi (alhaalla)

Simuloinnissa käytettiin 24 V käyttöjännitettä, jotta kondensaattorin energialataus olisi riittävä venttiilin avausta varten. Jännite kelan yli on MOSFET:in avaamisen jälkeen täydessä käyttöjännitteessä, jolloin kelan virta kasvaa nopeasti tarvittavaan 4.5 ampeeriin. Kondensaattorin täytyessä jännite kelan yli alkaa laskea ja virran kulku hidastuu. Lopulta kondensaattori on täyttynyt jännitteeseen, joka vastaa vastuksen $R1$ jännitehäviötä samalla virtamäärällä, joka sillä hetkellä kulkee kelan läpi. Tämän jälkeen virta kulkee kondensaattorin sijasta vastuksen läpi, jolloin saadaan aikaan pitovirta. Simuloinnissa käytetyllä 60 Ω vastuksella pitovirta asettuu noin 300 mA arvoon. Kun ohjaus katkaistaan, kelan pitovirta kiertää vapaakiertodiodin kautta hitaasti lämmöksi ja kondensaattorin $C1$ lataus alkaa purkautua lämmöksi vastuksen $R1$ läpi kondensaattorin aikavakion mukaan. Kondensaattorin purkautumisessa seuraavaa avausta varten kestää noin 40-50 ms.

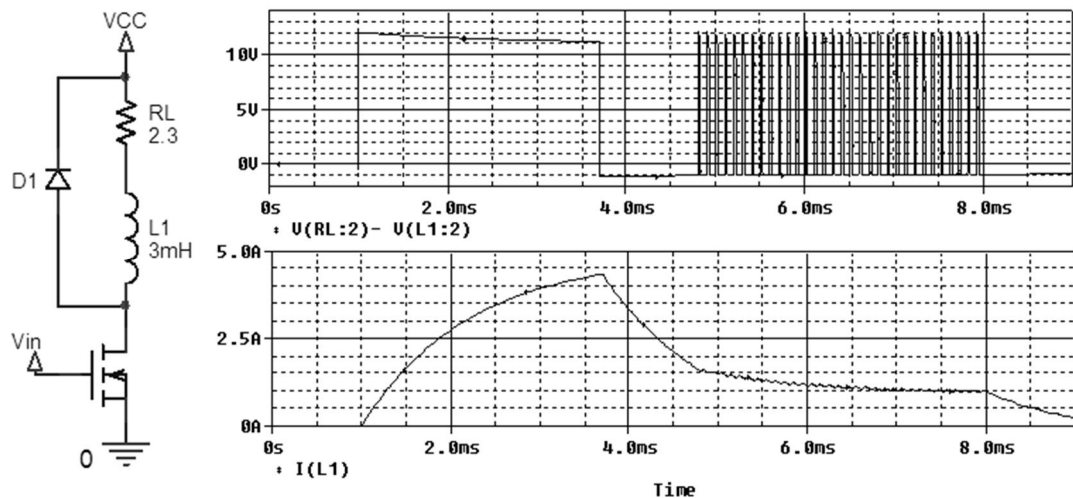
Tämä sopii vain erittäin alkeellisiin sovelluksiin, kun halutaan käyttää sekä avaus-, että pitovirtaa, mutta vain yksinkertaista on/off -ohjausta. Piirissä ei voida myöskään käyttää zenerdiodia nopeaa sulkua varten, koska kela ja kondensaattori oskilloivat keskenään avausvirran jälkeen, jolloin kelan virta menee negatiiviseksi. Vapaakiertodiodin kanssa oskilloinnin aikana kelan jännite käy vain diodin kynnyksjännitteen verran negatiivisena, mikä johtaa kelan virran putoamiseen hieman pitovirran alle, mutta ei luultavasti ehdi sulkea venttiiliä. Miniventtiilin tapauksessa vastuksen tehonkulutus on pitovirran aikana yli 8 W, kun käytetään 24 V jännitelähdettä, joten sovellus ei ole käytännössä järkevää. Kuten luvussa 3.1.3 todettiin, menetelmä on käyttökelpoinen vain venttiilisovelluksissa, joissa avausvirta on pieni ja pitovirta ei ole liian pieni verrattuna avausvirtaan.

4.1.2 Yksi kytkin PWM-ohjattuna

PWM-ohjaus on yleisesti käytetty tapa pitovirran tuottoon. Se on ohjauksen ja kytkimen vasteaikojen kannalta vaativa, mutta teho ei kulu lämmöksi, kuten vastuksessa. PWM-

ohjatut boosterit voidaan jakaa pääasiassa yksi tai kaksi kytkintä sisältäviin piireihin, joskin suurempikin määrä on mahdollista monipuolisempien ominaisuuksien kannalta.

Yhden kytkimen tapauksessa kytkin voi olla kuormaan nähden sijoitettu joko käyttöjännitteen tai maatasen puolelle. Kelan kannalta kytkimen paikalla ei ole juurikaan merkitystä, mutta kytkimen ohjaus on erilaista eri tapauksissa, kuten myöhemmin kappaleessa 4.2.1 kerrotaan. Asialla olisi ratkaiseva merkitys, jos venttiililohko voitaisiin maadoittaa, jolloin yläpuolisen kytkimen tapauksessa venttiilin kelalta tarvittaisiin vain yksi kaapeli kahden sijaan. Yleinen yhden kytkimen piiri on alapuolisella kytkimellä varustettu piiri, jossa on kelan rinnalla vapaakiertodiodeja. Piiri ja sen simulointitulokset on esitetty kuvassa 4.3, jossa ylemmässä kuvaajassa on kelan jännite ja alemmassa sen virta. Piiri on simuloitu 12 V käyttöjännitteellä. Avausvirta tehdään hieman alle kahden millisekunnin ohjauspulssilla, jolloin kelan jännite pysyy lähes käyttöjännitteen tasolla ja virta nousee nopeasti avausvirtaan. Tämän jälkeen katkaistaan ohjaus ja odotetaan, että kelan virta laskee pitovirran tasolle. Pitovirtaa varten kytkintä ohjataan sopivalla PWM-signaalin pulssisuhteella, jolloin virta pysyy halutulla tasolla. Kuvaajista nähdään, kuinka jännitteen taso vaihtelee käyttöjännitteen amplitudilla, mutta kelan virta pysyy lähes vakiona induktanssista johtuen. PWM-ohjauksen off-jaksolla pitovirta kiertää vapaakiertodiodin läpi, jolloin osa siitä muuttuu lämmöksi diodin kynnysjännitteestä johtuen. Venttiilin sulkua tapahtuu katkaisemalla ohjaus, jolloin pitovirta muuttuu hitaasti lämmöksi vapaakiertodiodissa. Piiri on hyvin yksinkertainen, mutta nopeaa venttiilin sulkua ei saada tehtyä.



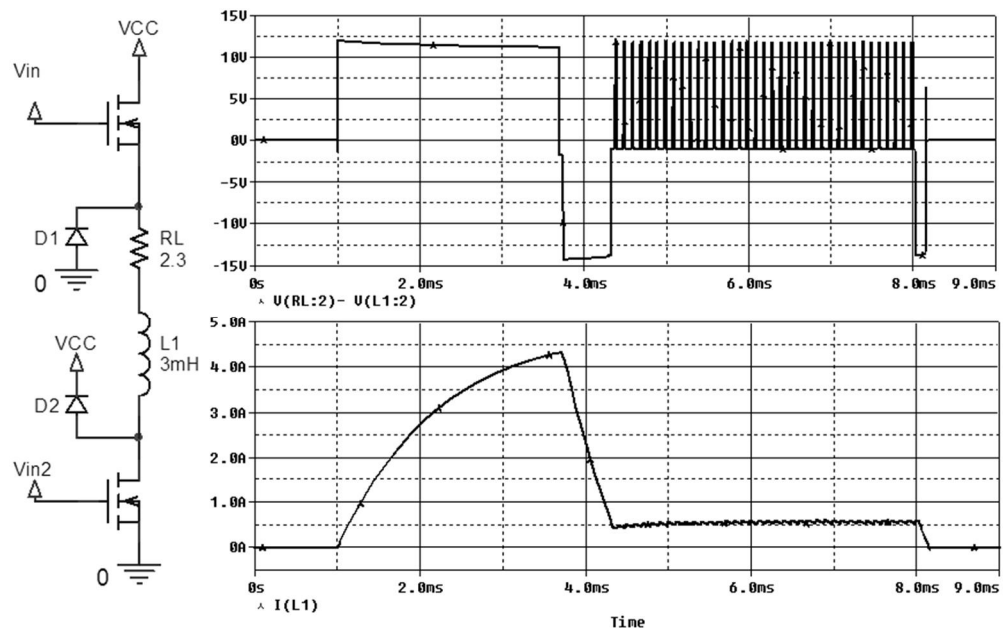
Kuva 4.3 Pitovirran tuotto PWM-ohjauksella. Kelan yli oleva jännite (ylhällä) ja siitä aiheutuva virta kelan läpi (alhaalla)

Yksi tapa nopeampaan sulkuaan yhden kytkimen piirissä on käyttää vapaakiertodiodin tilalla zenerdiodia, jolla on vain muutaman voltin kynnysjännite. Tällöin ohjauksen pulssisuhte täytyy olla hieman suurempi, koska pitovirran aikana virtaa kuluu enemmän lämmöksi. Zenerdiodi kuluttaa kuitenkin tässä tapauksessa turhaan tehoa lämmöksi, eikä sen käyttö ole välttämättä järkevää ainakaan useita venttiileitä sisältävässä PNM-koodatussa venttiilipaketissa. Tehonkulutus muodostuu pulssisuhteen ja zenerdiodin kynnysjännitteen muodostamasta keskimääräisestä jännitteestä zenerdiodin

yli ja virrasta sen läpi. Zenerdiodilla, jonka kynnyksjännite on noin 5 V, simuloitu tehonkulutus pitovirran aikana on noin yksi watti, mikä on lähes nelinkertainen venttiilin pitotehoon verrattuna.

4.1.3 Kaksi kytkintä PWM-ohjattuna

Kahden kytkimen piiri on ominaisuuksiltaan monipuolisempi, kuin yhden ja sillä myös nopea sulku onnistuu helposti. Kytkimet sijoitetaan kuorman ylä- ja alapuolelle, kuten kuvan 4.4 piirissä. Pääteasteen rakenne on vastaavanlainen diodisillalla varustettu piiri, kuin 28-kanavaisessa boosterikortissa. Avausvirta saadaan aikaan ohjaamalla molemmat kytkimet johtavaan tilaan. Avauspulssin jälkeen ohjaus voidaan poistaa molemmilta kytkimiltä, jolloin kelan virta laskee nopeasti pitovirran tasolle. Diodeista D1 ja D2 muodostuva diodisilta ohjaa virran maasta jännitelähteelle, jolloin venttiilin yli oleva jännite on negatiivisena käyttöjännitteen ja diodien kynnyksjännitteen arvossa. Pitovirran aikana alemmaa kytkintä ohjataan PWM-signaalilla, kun taas ylempi kytkin pidetään jatkuvasti johtavassa tilassa, jolloin diodi D2 toimii vapaakiertodiodina PWM-signaalin off-jaksolla. Venttiiliä suljettaessa kelan jännite muodostuu taas diodisillan avulla negatiiviseksi, jolloin venttiili sulkeutuu nopeasti.

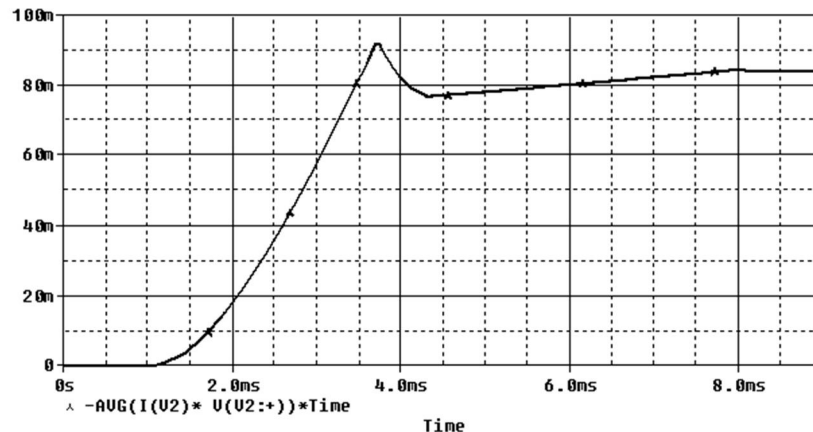


Kuva 4.4 Kahden kytkimen piiri PWM-ohjauksella ja kahden diodin sillalla. Kelan yli oleva jännite (ylhäällä) ja siitä aiheutuva virta kelan läpi (alhaalla)

Kytkimiä voidaan ohjata pitovirran aikana myös päinvastoin, mutta MOSFET-kytkimiä käytettäessä yläpuolisen N-kanavaisen MOSFET:in nopea kytkeminen on hankalampaa, kuin alapuolisen ja P-kanavaisella MOSFET:illa taas on huomattavasti suuremmat kytkentähäviöt ja resistanssi, kuten kappaleessa 4.2.1 kerrotaan. Pienemmillä häviöillä ja mahdollisesti yksinkertaisemmalla ohjauksella päästään ohjaamalla alemmaa kytkintä PWM-signaalilla.

Piirissä käytetty diodisilta ohjaa virran takaisin jännitelähteelle, kun ohjaus katkaistaan. Tällöin osa käytetystä energiasta saadaan takaisin talteen olettaen, että jännite-

lähde osaa ottaa energian vastaan. Kuvassa 4.5 on esitetty edellisen simuloinnin energiankulutus jännitelähteen osalta.



Kuva 4.5 Jännitelähteen energiankulutus kahden kytkimen ja diodisillan piirissä. Diodisillan ansiosta osa avausenergiasta saadaan talteen takaisin jännitelähteelle.

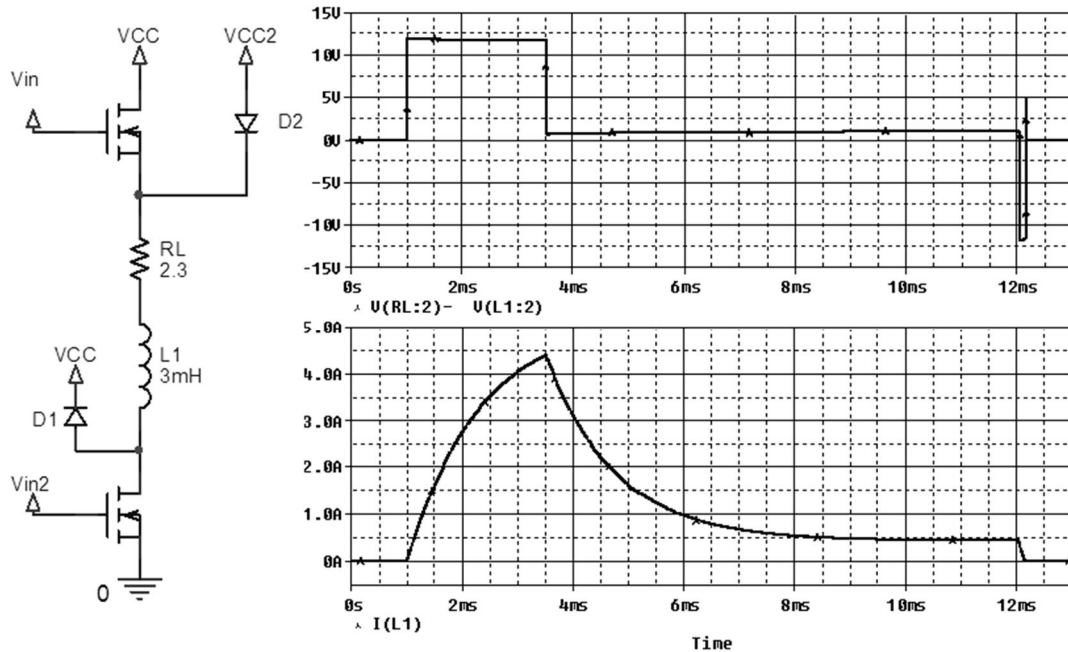
Simulointituloksista nähdään, kuinka jännitelähteen energiankulutus kasvaa noin 92 mJ arvoon avauspulssin aikana. Avaamisen jälkeen kulutus laskee noin 77 mJ arvoon, kun diodisilta syöttää virtaa jännitelähteelle. Venttiilin avaamiseen käytetystä energiasta saatiin siis tässä tapauksessa talteen noin 15 mJ eli noin 16 % käytetystä energiasta. Pitovirran aikana energiankulutus lähtee hitaasti nousuun. Venttiiliä suljettaessa pitovirran energiasta saadaan taas osa talteen, mutta määrä on niin pieni, ettei sitä juuri huomaa.

Kaksikytkiminen PWM-ohjattu boosteri on varteenotettava vaihtoehto PNM-koodatun venttiilistön boosteriksi, mutta sen ongelmana on kaksi erillistä ohjausta vaativaa kytkintä. Kytkimet ja ohjaukset vievät tilaa piirilevyiltä, minkä lisäksi ohjaavan mikrokontrollerin tai vastaavan laitteen ulostulot eivät helposti riitä ohjaamaan tarvittavan montaa venttiiliä. Ohjauksia voidaan säästää tekemällä toisen kytkimen ohjaus alipäästösuodatuksen kautta, kuten 28-boosterikortissa, mutta siihen tarvitaan useita lisäkomponentteja.

4.1.4 Kaksi jännitetasoa

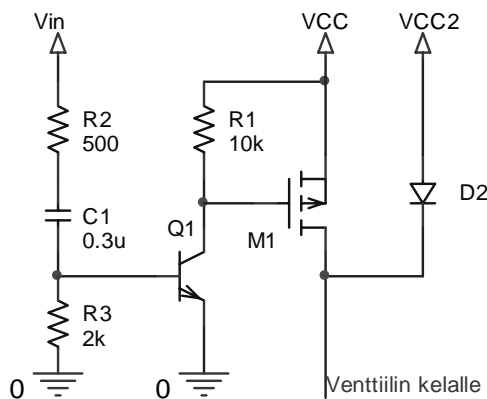
Kahden jännitetason boosterissa on hyvänä puolena ohjauksen yksinkertaisuus verrattuna PWM-ohjaukseen, mutta myös siihen tarvitaan kaksi kytkintä. Molemmat kytkimet voidaan sijoittaa jännitelähteiden puolelle tai kuorman ylä- ja alapuolelle, kuten kuvan 4.6 simuloitussa piirissä. Tällöin pitojännitteen puolella tulee olla vastadiodi, jottei virta pääse kulkemaan suuremman jännitteen puolelta pienemmälle. Avausvirran aikana virta kulkee suuremmalta käyttöjännitteeltä molempien kytkimien läpi. Pitovaiheessa vain alemmaa kytkintä täytyy pitää johtavassa tilassa. Myös kaksijännitteisessä piirissä on mahdollista käyttää diodisiltaa nopeaan sulkuun, jolloin osa avausvirran energiasta saadaan talteen suurempijännitteiselle jännitelähteelle. Tätä varten täytyy ohjaus kytkeä avausvirran jälkeen hetkeksi pois molemmilta kytkimiltä, kuten kaksikytkimisessä PWM-ohjatussa piirissä. Tässä simulointitilanteessa näin ei ole kuitenkaan tehty, joten

virta laskee hitaasti avausvirran jälkeen pitovirran tasolle. Simuloinnissa on käytetty 12 V avausjännitettä ja 2 V jännitettä pitovirtaa varten.



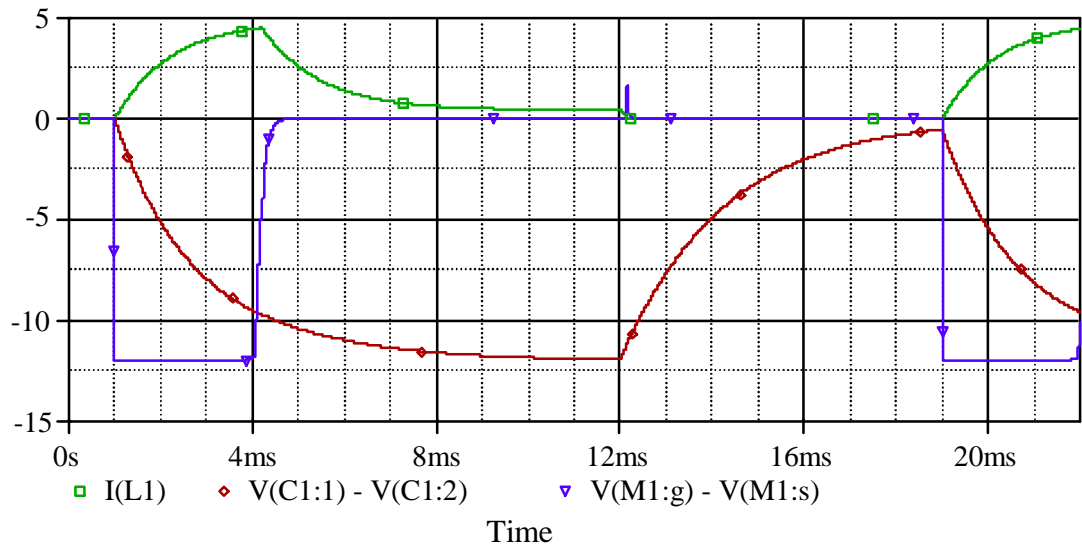
Kuva 4.6 Kaksijännitteinen piiri simuloituna. Kelan yli oleva jännite (ylhäällä) ja siitä aiheutuva virta kelan läpi (alhaalla)

Kytkimien ohjaus voidaan toteuttaa erillisinä ohjauksina tai automaattisesti ajastettuna RC-piirillä, kuten kuvassa 4.7 on esitetty. Tällöin ohjausjännitteestä V_{in} syntyvä ohjausvirta kulkee kondensaattorin C1 läpi, joka täytyessään estää virran kulun npn-transistorille Q1. Transistorin johtaessa P-kanavaisen MOSFET:in M1 hila yhdistyy maajännitteeseen ja sen kanava menee johtavaan tilaan. Kondensaattorin C1 kapasitanssin ja vastuksen R2 resistanssin arvoilla tai ohjausjännitettä V_{in} säätämällä voidaan toteuttaa halutun pituinen avauspulssi. Kondensaattori tyhjenee ohjauksen poistumisen jälkeen vastuksen R3 kautta. Valinta on siis tehtävä ohjauksen määrän tai komponenttien määrän välillä, kuten kahden kytkimen PWM-ohjatun boosterin alipäästösuodattavan etuasteen kohdalla.



Kuva 4.7 Avausvirran ajoitus RC-piirillä (vasen puoli) ja pitovirran tuotto pienemmällä jännitteellä (oikea puoli)

Kuvassa 4.8 on esitetty esiohjaukseen käytetyn RC-piirin simulointitulokset kelan virran (vihreä), kondensaattorin C1 jännitteen (punainen) ja MOSFET:in M1 hila-lähde -jännitteen (sininen) osalta. Kuvaajista nähdään, että avauspulssin aikana kondensaattori alkaa latautua kohti ohjausjännitettä, joka on tässä simuloinnissa 12 voltia. Kun kondensaattori on latautunut noin 10 V jännitteeseen, virta sen läpi on niin pieni, että npn-transistori ei enää pysy johtavassa tilassa, jolloin myös MOSFET sulkeutuu ja venttiilin avausvaihe on ohi. Venttiilin sulkemisen jälkeen kondensaattori alkaa tyhjäntyä vastuksen R3 läpi, jolloin vastuksen resistanssista riippuen kestää muutamia millisekunteja ennen kuin uusi edellisen pituinen avauspulssi voidaan suorittaa.



Kuva 4.8 Avauspulssin ajoitus RC-piirillä. Kelan virta (vihreä), kondensaattorin C1 jännite (punainen) ja MOSFET:in M1 hila-lähde -jännite (sininen)

Piirin ongelmana on suuri määrä komponentteja, jotka voivat tosin olla hyvinkin pieniä, koska niiden tehonkeston ei tarvitse olla suuri. Piirin mitoitus olisi myös hienosäädettävä kokeilemalla, koska eri transistorien ominaisuudet vaihtelevat tarvittavan ohjausvirran osalta. Toisaalta käytetyllä ohjausjännitteellä voidaan myös vaikuttaa avauspulssin pituuteen, joten lopullisen mitoituksenkaan ei tarvitsisi olla aivan tarkka.

Yhteenvedona voidaan todeta, että lähes samanlainen venttiilin kelan virtakäyrä saadaan aikaan usealla eri toteutuksella ja erilaisia toteutusvaihtoehtoja on tässä esitettyjen peruspiirien lisäksi olemassa. Erilaisten ratkaisujen järjestyksen PNK-koodatussa venttiililohkossa riippuukin hyvin suurelta osin myös piirin komponenttien ja ohjauksen toteutuksesta, kuten seuraavassa kappaleessa tulee ilmi.

4.2 Pääteasteen ohjaus ja erikoiskomponentit

Venttiilipaketin ohjauselektronikan pääteasteiden ohjauksen toteutus on tärkeässä osassa, kun halutaan saavuttaa pieni ja tehokkaasti toimiva järjestelmä. Venttiilistöä tullaan todennäköisesti ohjaamaan normaalilla mikrokontrollerilla, jossa on rajallinen määrä ulostuloja erillisiä ohjauksia varten. Varsinkin venttiilimäärän kasvaessa tulee ongelmia ulostulojen riittämättömyyden kanssa ja johdotusten piirilevyltä viemän tilan vuoksi,

joten on syytä tutkia erilaisia ratkaisuja ohjauksen hajauttamiseen tai laajentamiseen mikrokontrollerilta eteenpäin. Lisäksi tilaa pystyttäisiin säästämään keskittämällä usean venttiilin boosterien komponentit samaan pakettiin esimerkiksi piireillä, jotka sisältävät useita kytkimiä samassa pakkauksessa. Tällöin yhdellä komponentilla voitaisiin hoitaa usean komponentin tehtävät.

4.2.1 MOSFET kytkimenä

MOSFET on erinomainen kytkinkomponentti elektroniikan sovelluksiin, joissa tarvitaan keskisuuria tehoja. MOSFET:in ohjaustapa on hieman erilainen riippuen siitä, käytetäänkö sitä lineaarisena komponenttina virran tai jännitteen säätöön vai käytetäänkö sitä on/off -kytkimenä. MOSFET:in kanava avautuu osittain tai kokonaan riippuen sen hilan ja lähteen välisestä jännitteestä. Jotta kanava aukeaisi täysin, on tämän V_{GS} jännitteen oltava useita voltteja, riippuen komponentin ominaisuuksista. N-kanavaisella MOSFET:illa jännitteen tulee olla positiivinen ja P-kanavaisella negatiivinen. Täysin avattuna virta pääsee kulkemaan lähes ilman vastusta MOSFET:in läpi; parhaiden komponenttien kanavassa on vastusta vain muutamia milliohmeja. Hila ja lähde ovat erotettuja toisistaan, jolloin jatkuvaa virtaa ei tarvita MOSFET:in auki pitämiseksi. Kanava aukeaa sitä nopeammin, mitä nopeammin V_{GS} jännite saadaan muodostettua. Hilassa esiintyvä kapasitanssi hidastaa jännitteen nousua, joten nopeaa kytkintoimintaa varten hilalle tarvitaan myös riittävä virta tarpeeksi suuren jännitteen lisäksi.

Boosterin suunnittelun kannalta on tärkeää huomioida, että tavallisen MOSFET:in kanavan avaamiseen ei yleensä riitä 3.3 V tai 5 V logiikkatason jännite ohjaavalta mikrokontrollerilta. Tai vaikka jännite riittäisi, niin mikrokontrollerin virranantokyky ei luultavasti riitä MOSFET:in hilakapasitanssin lataamiseen nopeasti ja sitä kautta MOSFET:in avaamiseen tarvittavan nopeasti. Tästä syystä tarvitaan hila-ajureita tai muita apukomponentteja ohjaavan mikrokontrollerin ja MOSFET:in hilan väliin. Hila-ajurien tarkoituksena on nostaa MOSFET:in ohjaussignaalin jännite- ja virtataso riittävän suureksi, jotta MOSFET:in kanava aukeaa varmasti ja nopeasti. Yleensä hila-ajurien sisäänmenosignaali riittää logiikkatason signaali, joka vahvistetaan piirin käyttöjännitteen tasoiseksi [25].

Ylä- ja alapuolisen MOSFET:in ohjaus täytyy hoitaa hieman eri tavoin, jolloin hila-ajuritkin on yleensä tarkoitettu ohjaamaan vain jompaakumpaa tyyppiä. Yläpuolinen kytkin voi olla P- tai N-kanavainen, mikä vaikuttaa myös ohjauksen toteutukseen. Yleisimmät hila-ajurit pystyvät ohjaamaan alapuolista N-kanavaista MOSFET:ia suoraan ilman apukomponentteja, koska lähde on yhdistetty maatasoon, jolloin hilajännite määrää V_{GS} jännitteen. Tarvittaessa voidaan hila-ajurin ja hilan väliin asettaa vastus estämään liian suuria virtapiikkejä. Yläpuolisen N-kanavaisen MOSFET:in lähde taas on yhdistetty kuorman yläpuolelle, jolloin V_{GS} jännitekin on riippuvainen kuormajännitteestä. Tarvittavan suurta V_{GS} jännitettä varten hilajännitteen täytyy siis olla kuormajännitettä suurempi. Tästä johtuen hila-ajureissa on oltava varauspumppu tai niin kutsuttu bootstrap-kondensaattori, jolla jännitteen taso saadaan nostettua tarvittavan suureksi. P-kanavaista yläpuolista MOSFET:ia varten ei välttämättä tarvita erillistä hila-ajuria vaan

tarvittava jännite saadaan aikaan maahan kytketyn npn-transistorin ja ylösvetovastuksen avulla. Npn-transistori voidaan avata logiikkasignaaleilla, jolloin se yhdistää MOSFET:in hilaan maatasoon. Koska lähde on käyttöjännitetasossa, niin V_{GS} jännite muodostuu negatiiviseksi, kuten pitääkin. Hila on yhdistetty myös ylösvetovastuksella käyttöjännitteeseen, jolloin se ei jää kellumaan ja kanava sulkeutuu varmasti. P-kanavaisen MOSFET:in kanavaresistanssi on kuitenkin suurempi, kuin N-kanavaisen rakenteellisista syistä johtuen.

On olemassa myös niin sanotusti älykkäitä kytkimiä, jotka sisältävät itsessään tarvittavan hila-ajurin, jolloin niitä voidaan käyttää suoraan logiikkasignaaleilla. Yleensä näissä komponenteissa on lisäksi valmiina zenerdiodi induktiivisen kuorman purkamista varten. Tällaiset komponentit ovatkin huomattavasti kätevämpiä miniventtiilin boosteriin, kuin tavalliset MOSFET:it ja niiden erilliset hila-ajurit.

4.2.2 Erikoiskomponentit

Riippuen pääteasteen suunnittelusta, yksi venttiili tarvitsee yhden tai kaksi ohjaussignaalia. Kaksijännitteisissä pääteasteissa ja kahden kytkimen PWM ohjatuissa pääteasteissa kahden ohjauksen vaatimus on mahdollista saada vähennettyä yhdeksi muutamalla lisäkomponentilla, kuten RC-alipäästösuodattimella. Kaksijännitteisessä tämä onnistuu edellä esitetyllä RC-piirillä kondensaattorin latausviivettä hyväksikäyttämällä. Ylimääräisille komponenteille ei ole kuitenkaan tilaa, joten tehokkaampi ratkaisu voisi olla yksittäinen monipuolinen komponentti, jolla voidaan ohjata useaa pääteastetta yhtä aikaa esimerkiksi jonkinlaisen väylän välityksellä.

Ideaalinen toteutus venttiilipaketin ohjaukselle voisi olla väylällä ohjattava yksittäinen solenoidinohjauskomponentti, jossa olisi ulostulot jokaisen venttiilin kelan ohjausta varten. Tämä komponentti voisi generoida ohjelmoitusti venttiilin tarvitsemat virtakäyrät nopeaa avausta, pitovirtaa ja sulkua varten, kun väylän kautta annetaan signaali tietylle venttiilille. Komponentti olisi siis kuin mikrokontrolleri, jolla on tarpeeksi suuri tehonkesto ja virranläpäisykyky. Valitettavasti tällaisia komponentteja ei ole olemassa ainakaan tarvittavan suuressa mittakaavassa. Esittelen tässä kappaleessa kuitenkin mahdollisia vaihtoehtoja erikoiskomponenttien osalta.

Lähimmäksi esitettyä ratkaisua periaatteeltaan saattaisi päästä Infineon TLE6288R -komponentti [26], jolla voi esitetyllä tavalla ohjata SPI-väylän kautta kolme solenoidiventtiiliä. Väylän kautta voidaan määrätä venttiilin avauspulssin pituus, maksimivirta ja pitovirta. Tässäkin komponentissa maksimivirtaraja on liian pieni miniventtiiliä varten ja minimipitovirta on liian suuri. Vastaavia solenoidikäyttöön kehitettyjä valmiita komponentteja ovat esimerkiksi IHA-kone -boosterissa käytettävä Texas Instruments DRV103 -piiri ja sen johdannaiset. Ongelmana on liian pieni virrankesto-kyky, ulkoisilla komponenteilla tehtävä avauspulssin pituuden ja pitovirran PWM-taajuuden säätö, sekä puuttuva mahdollisuus nopeaan sulkuaan. IHA-kone -boosterissakin piiriä käytetään ohjaamaan ulkoisia kytkimiä, eikä piirin sisäistä kytkintä käytetä, jolloin virtarajat eivät haittaa. Tällä tavalla fyysinen koko ja komponenttien määrä kasvaa kuitenkin aivan liian suureksi PNM-koodattua venttiilistöä varten. Huo-

mataan siis, että valmiit solenoidinohjaukseen tarkoitetut komponentit eivät ole sopivia nopeille digitaalihydrauliikkaan tarkoitetuille PNM-koodatuille venttiilistöille.

Ratkaisun ei välttämättä tarvitse olla valmiiksi ohjelmoitu solenoidinohjauskomponentti, vaan pelkällä keskitetyllä kytkinratkaisulla saadaan säästettyä tilaa ja komponentteja. Useimmat monipuoliset kytkinpaketit löytyvät autoteollisuudesta, jossa niitä käytetään esimerkiksi moottorin venttiiliohjaukseen. Useat näistä erikoiskytkimistä on suunniteltu pelkästään kuorman ylä- tai alapuolella käytettäväksi, mutta jotkut pysyvät toimimaan kummassa asemassa tahansa. Jako johtuu esitetystä puolijohdekytkinten erilaisesta toimintatavasta niiden sijaitessa eri puolilla kuormaa. Yksi esimerkki mahdollisesta kytkinratkaisusta voisi olla STMicroelectronics L9733 komponentti [27], joka sisältää kahdeksan kytkintä, jotka voivat sijaita kummalla puolella kuormaa tahansa. Kaikkia kytkimiä voidaan ohjata SPI-väylän välityksellä. Tällä komponentilla voisi siis ohjata esimerkiksi neljää venttiiliä ylä- ja alapuolisilla kytkimillä, joiden lisäksi tarvittaisiin vain yksi vapaakiertodiodi per venttiili. Ohjaus voisi olla toteutettuna PWM-ohjattuna tai kaksijännitteisenä, joskin tarvittavaa PWM-taajuutta varten SPI-väylän päivitysnopeus saattaa tulla vastaan. Koko komponentin yhteen ohjaukskäskyyn tarvitaan neljä kellojaksoa, mikä kertaantuu komponenttien määrän mukaan. Esimerkiksi 64:ää venttiiliä varten tarvittaisiin 16 komponenttia, jolloin yhteen käskyyn kuluisi jo 64 kellojaksoa. Kaksijännitteisen pääteasteen kanssa tätä ongelmaa ei ole, koska ohjausten väliset ajat ovat pidempiä. Suurin ongelma on kuitenkin virtarajat, jotka ovat tässäkin komponentissa liian pienet miniventtiilin avausvirtaa varten.

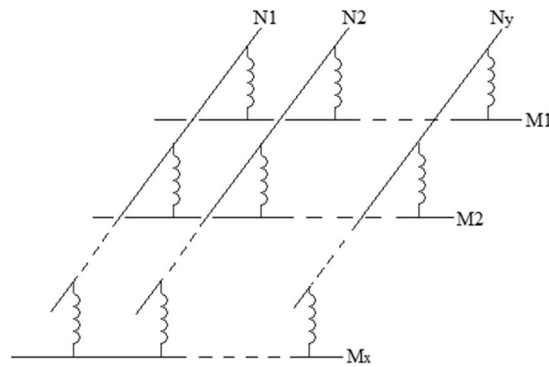
28-kanavaisessa boosterikortissa käytössä oleva kiikkulogiikka on myös käytännöllinen ohjauksia säästävä ratkaisu, mutta kiikkupiirit vievät tilaa piirilevyiltä. Vastavanlaisena I/O -laajennuspiirinä voisi käyttää mahdollisesti esimerkiksi Linear Technologyn 32-kanavaista LED (Light Emitting Diode) ohjainta. Piirillä voisi LED:ien sijaan ohjata npn-transistoreita, jotka toimisivat etuasteena kytkimien ohjaukseen [28]. Piiriä voi ohjata SPI-väylän kautta ja siinä on valmiiksi ohjelmoitu PWM-signaaligeneraattori. Ratkaisu toimisi luultavasti ainoastaan yhden yläpuolisen kytkimen sisältävän pääteasteen ohjauksessa ja toimivuutta transistorien kanssa ei ole testattu.

Ainakin yksi monikytkinkomponentti, jonka virtarajat ovat riittävät, on Infineon TLE6220GP [29], joka sisältää neljä alapuolista kytkintä ja zenerdiodit induktiivisen kuorman purkua varten. Komponentin kytkimiä voidaan ohjata SPI-väylän kautta ja useita komponentteja voidaan yhdistää sarjaan samaan väylään. Tätä komponenttia onkin suunniteltu käytettäväksi myöhemmin esitettävän AC-boosterin kanssa.

4.3 Matriisiboosteri

Kun venttiileitä alkaa olla useita kymmeniä tai jopa satoja samassa lohkoissa, niiden ohjaaminen käy yhä työläemmäksi. Perinteisillä keinoilla jokainen venttiili vaatii aktiivisen ohjauksen omaa johdintaan pitkin, jolloin ongelmia syntyy sekä mikrokontrollerin päässä, että päätepuolen piirilevyllä. Mikrokontrollerin ulostulot eivät riitä loputtomiin ja piirilevyn puolella tilaa vievät aktiiviset kytkinkomponentit, sekä kaikkien ohjausten

johdotukset. Ongelmaan voisi olla ratkaisuna matriisimuotoinen järjestely, jossa venttiilien ohjaus on jaettu $M_x \times N_y$ muotoisiin riveihin ja sarakkeisiin, jossa M_x viittaa rivinumeroon ja N_y sarakenumeroon.. Tällöin aktiivisia kytkimiä ja ohjauksia, sekä mikrokontrollerin ulostuloja tarvittaisiin ainoastaan $M_x + N_y$ määrä $M_x \times N_y$ määrälle venttiileitä. Jokaisella matriisin alkiolla on siis yksiselitteinen osoite, joka on muotoa (M_x, N_y) . Kuvassa 4.9 on esitetty yksinkertainen venttiilimatriisin periaate. Venttiilin kela on kiinni sarakejohtimen ja rivijohtimen välissä, jolloin näiden välille tuotu jännite saa aikaan virran kelassa. Kelan ympärillä voi olla muita komponentteja, kuten vähintäänkin sarjadiodi estämässä virrankulun takaisin. Käyttöjännite voi olla kiinni sarakejohtimissa, jolloin rivijohtimet on maadoitettu. Jotta järjestely olisi järkevä ja käyttökelpoinen, pitäisi venttiileiden avaus- ja sulkeutumisnopeus, sekä pitovirta saada kuitenkin toteutettua samoin kuin normaalissa käytössä. Tämä osoittautui huomattavan hankalaksi monostabiileilla venttiileillä. Varsinkin matriisimuotoisessa ohjauksessa olisi valtavasti hyötyä bistabiileista venttiileistä. Ennen kuin saadaan suunniteltua bistabiili venttiili, joka on tarpeeksi halpa, pieni ja yksinkertainen, täytyy tyytyä monostabiiliin venttiiliin.

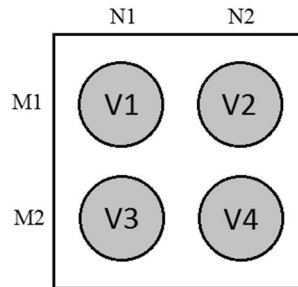


Kuva 4.9 Venttiilimatriisin periaate

Yksi lähtökohta venttiilien matriisimuotoiseen ohjaukseen on kaikkien haluttujen venttiilien ohjaaminen yhtä aikaa riveittäin ja sarakkeittain. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi virtasäätimillä, jolloin halutuille sarakkeille syötetään tarvittava määrä virtaa niille venttiileille, jotka halutaan avata tai pitää auki. Vastaavasti riveittäin otetaan vastaan se virta, joka on syötetty kyseisillä riveillä oleville venttiileille sarakkeilta. Virtasäätöä käytettäessä tarvitaan myös virranmittausta, joka on helpointa toteuttaa mittaamalla pienen sarjavastuksen jännitehäviötä, joka on verrannollinen sen läpi kulkevaan virtaan. Vastuksen on oltava resistanssiltaan hyvin pieni ja sen tehonkeston on oltava suuri, kun mitataan kokonaisen rivin tai sarakkeen läpi kulkevaa virtaa. Erillisen avaus- ja pitovirran toteuttaminen on mahdollista, kun virtasäätimillä rajoitetaan haluttujen venttiilien läpi kulkevaa virtaa.

Tässä ohjaustavassa on kuitenkin ongelmia, joiden vuoksi se voi olla mahdoton toteuttaa. Kun syötetään virtaa eri riveillä ja sarakkeilla oleville venttiileille samanaikaisesti, virrat jakautuvat helposti myös niille venttiileille, joita ei haluta avata. Yksinkertaisin esimerkki tästä on kuvassa 4.10 esitetty 2×2 kokoinen venttiilimatriisi, jossa haluttaisiin avata venttiilit V1 ja V4. Venttiiliä V1 varten olisi syötettävä virtaa sarakkeen N1 kautta ja otettava sama määrä virtaa rivin M1 kautta. Vastaavasti venttiiliä V4 varten

virta tulisi sarakkeen $N2$ kautta ja lähtisi rivin $M2$ kautta. Nyt kuitenkin huomataan, että tämä yhteinen ohjauksohjaus on täsmälleen samanlainen tilanteessa, jossa halutaan avata venttiilit $V2$ ja $V3$. Tässä tapauksessa virta jakautuu kaikkien neljän venttiilin kesken tasaisesti, jolloin yksikään venttiili ei mitään luultavimmin aukea.

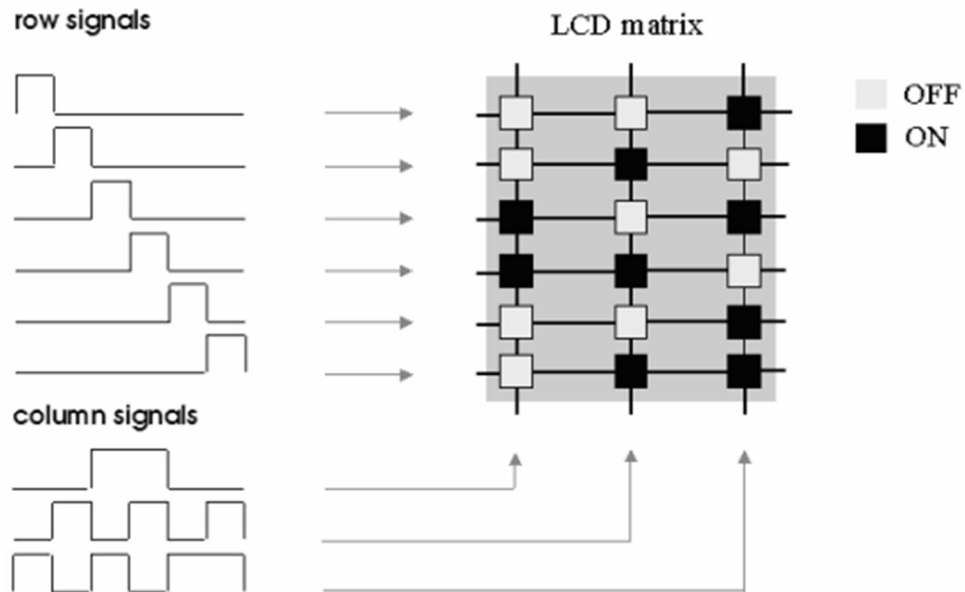


Kuva 4.10 Yksinkertainen 2x2 venttiilimatriisi

Vaikka siis jokaisen venttiilin osoite matriisissa on yksiselitteinen, ristikkäisvaikutukset tekevät useaan matriisin alkioon viittaamisen yksiselitteisesti mahdotonta. Pahimpia ristikkäisilanteita pystyttäisiin toki tiettyyn rajaan asti välttämään järkevällä ohjauksella, mutta vähänkään suuremmilla venttiilimäärillä se kävisi lähes mahdottomaksi.

4.3.1 LCD-matriisit

Toinen tapa on useista muista matriisisovelluksista tuttu multipleksaaminen, jossa kaikkia matriisin alkioita ei ohjatakaan samanaikaisesti, vaan rivi tai sarake kerrallaan. Tähän perustuu esimerkiksi nestekidenäyttöjen (LCD Liquid Crystal Display) toiminta, joissa pikseleiksi aseteltuja nestekiteitä ohjataan riveittäin ja sarakeittain. LCD-paneelin ohjauksen perusteet, on hyvä käydä läpi, jotta ymmärtää miten tietoa voitaisiin hyödyntää hydrauliventtiilien ohjauksessa. Kuvassa 4.11 on esitetty LCD-paneelissa käytettävän multipleksatun ohjausmenetelmän periaate. Rivien ohjaussignaalit on ajastettu tietylle kellotaajuudelle, jolloin vain yksi rivi on kerrallaan aktiivisena. Koko matriisin läpikäymiseen kestää siis yksittäisen rivin päivitysaika kerrottuna rivien määrällä. Kun halutaan aktivoida tietty matriisin pikseli, odotetaan että haluttu rivi on aktiivinen ja samaan aikaan aktivoidaan haluttu sarake. Passiivisessa LCD-paneelissa pikselin jännite muodostuu keskiarvoksi usean kellojakson yli, kun taas aktiivisessa TFT-paneelissa (Thin Film Transistor) haluttu jännite vietään transistorin läpi pikselille, jossa kondensaattori pitää sen lähes vakiona koko paneelin kellojakson yli [30].



Kuva 4.11 LCD-paneelin ohjaus multipleksaamalla [22]

LCD-paneelin toiminta perustuu valon kulun manipulointiin muuttamalla nestekiteiden ominaisuuksia jännitteen avulla. Kierteelle asetunut nestekidekerros suoristuu, kun sen yli vaikuttaa jännite, jolloin kiteen kummallekin puolelle asetettujen polaroitujen levyjen asennosta riippuen valo joko läpäisee levyt tai ei. Näin saadaan aikaan mustat ja läpinäkyvät pikselit, sekä näiden välimuotona harmaan eri sävyt pienemmillä jännitteillä. Ennen matriisimuotoista ohjausta nestekiteet aseteltiin segmentteihin, joissa jokaista pikseliä ohjattiin erillisillä johtimilla. Näyttöjen suurentuessa siirryttiin matriisimuotoiseen ohjaukseen, kun ei ollut enää järkevää käyttää itsenäisiä johtimia. Passiivisessa matriisiohjauksessa rivi- ja sarakejohtimet on kiinnitetty suoraan nestekiteiden vastakkaisille elektrodeille. Tämä on yksinkertainen ja halpa keino pienien näyttöjen osalta, mutta ristikkäisvaikutukset pikseleiden välillä pahenevat, mitä enemmän rivejä näyttöpaneelissa on [30]. Tästä syystä näyttö- ja televiisiteollisuuden kehityksessä siirryttiin aktiivimatriisitekniikkaan, joista yleisin sovellus on TFT-paneeli.

Aktiivisen LCD-TFT -paneelin rakenne vastaa passiivisen LCD-paneelin rakennetta peruseriaatteeltaan, mutta sen lisäksi jokaisessa pikselissä on kondensaattori ja transistori, jota ohjataan matriisimuotoisesti. Transistorin hila ja nielu on yhdistetty rivi- ja sarakejohtimiin, jolloin toista johdinta pitkin tulee transistorin avaussignaali ja toista pitkin nestekiteen ohjausjännite. Kondensaattori pitää kiteen jännitteen lähes vakiona seuraavaan kellojaksoon asti. Aktiivimatriisilla vältetään suurin osa pikseleiden välisistä ristikkäisvaikutuksista, kun kaikkien muiden paitsi aktivoitavan rivin transistorit pysyvät suljettuina, jolloin paneelin kontrasti ja harmaasävyjen säädettävyys paranee huomattavasti. Aktiivimatriisilla saavutetaankin lähes yhtä hyvät ominaisuudet, kuin ohjaamalla jokaista pikseliä itsenäisesti. Eräänlainen kompromissi passiivisen ja aktiivisen järjestelmän välillä on TFD (Thin Film Diode), jossa transistorin tilalla on kaksisuuntainen kynnysjännitteellinen diodi. Diodi on helpompi valmistaa, kuin transistori ja sen tehonkulutus on pienempi, mutta TFD-matriisin toimintakyky suurissa paneeleissa ei

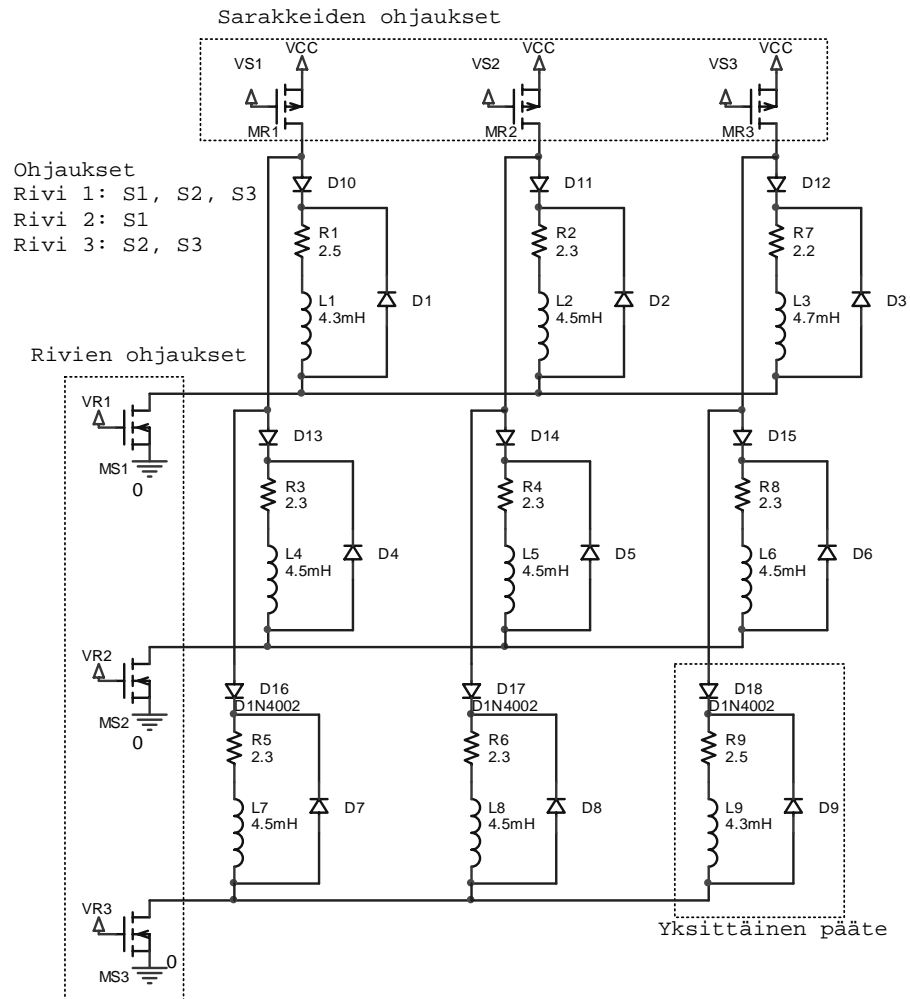
ole yhtä hyvä kuin TFT-matriisin. Myös AMOLED (Active Matrix Organic Light Emitting Diode) -tyyppisen paneelin päätteet voisivat olla matkimisen arvoisia, koska sen LED-pikselit ovat virtaohjattuja eivätkä jänniteohjattuja, kuten LCD-pikselit [30].

4.3.2 Matriisiboosterin simulointi

Näiden tietojen perusteella suunnitellun yksinkertaisen 3×3 matriisiboosterin piirikaavion simulointimalli on esitetty kuvassa 4.12. Jokaisen venttiilin päätteet koostuvat ainoastaan tasasuuntausdiodista ja vapaakiertodiodista. Tasasuuntausdiodin tehtävänä on estää kellossa kiertävän virran pääsy toisille keloille. Kun elektroniikan rakenne on näin yksinkertainen, kyseessä on ennemminkin ohjaustekninen tehtävä. Ohjaus tapahtuu riveittäin ja sarakkeittain kytkimien läpi, jotka yhdistävät päätteen sarakejohtimen puolelta käyttöjännitteeseen ja rivijohtimen puolelta maatasoon. Matriisin ohjaus toimii siis samantapaisesti, kuin LCD-paneelissa:

- Rivit käydään läpi ylhäältä alas
- Samalla avataan sarakkeita aktivoitavien venttiilien kohdalta
- Avattaville venttiileille ajetaan n. 1 ms avauspulssi +24 V jännitteellä
- Vapaakiertodiodi laskee virran melko hitaasti pitovirtaan asti
- Pitovirta lyhyemmillä pulsseilla tai alemmalla jännitteellä
- Venttiili sulkeutuu, kun sen jättää päivittämättä

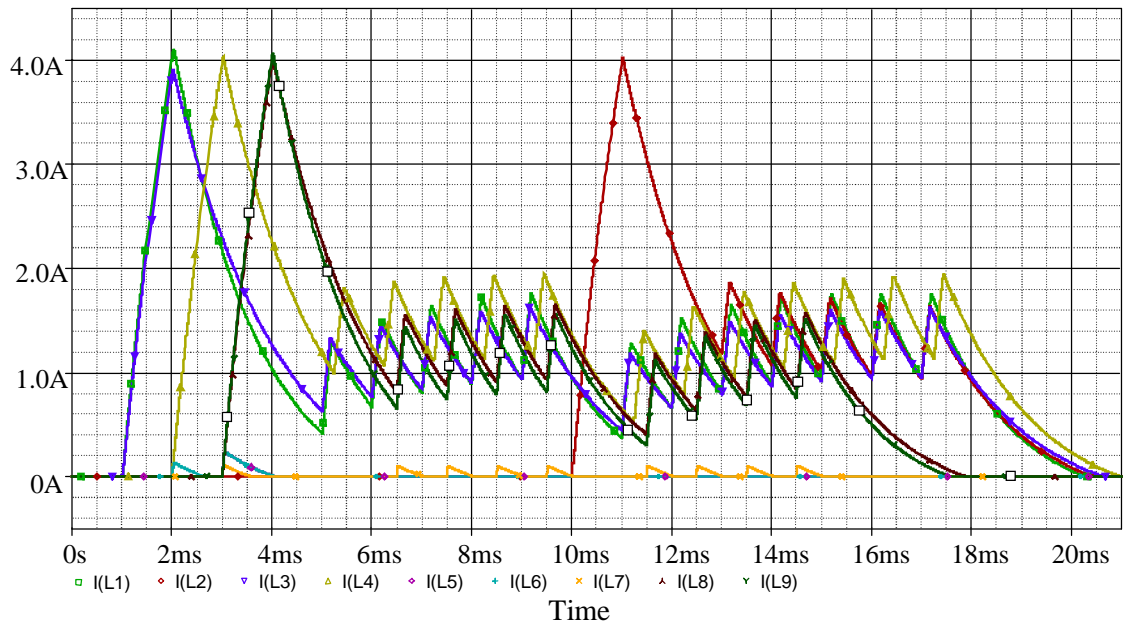
Rivien kiertonopeuden tulee olla sellainen, että venttiilit saadaan auki ja ne myös pysyvät auki seuraavaan kiertoon asti. Tämä rajoittaa käytettävien rivien määrää, koska avauspulssin pituus asettaa yksittäisen rivin kiertonopeuden minimiajan. Vapaakiertodiodin kynnysjännitteestä ja kelan resistanssista, sekä induktanssista johtuva virran puotamisnopeus taas asettaa rajoitteen sille, koska kyseinen rivi on taas päivitettävä uudelleen. Simuloinnin perusteella 24 voltin käyttöjännitteellä voisi ajaa ainakin neljää riviä tai ehkä useampaa, jos voidaan ajaa rivejä edes hieman limittäin. Limittäin ajo onnistuu, kunhan päällekkäisyys on niin pientä, ettei sellainen venttiili pääse aukeamaan, jota ei haluta auki. Suuremmalla käyttöjännitteellä, kuten 48 voltilla, voitaisiin ajaa vielä useampia rivejä simuloinnin perusteella. Simuloinneissa ei kuitenkaan oteta huomioon magneettiirin materiaalin saturoitumista tai induktanssin muutoksia avautumisen aikana ja pitovirran perusteella. Sarakkeiden määrään taas ei ole rajoituksia, joten venttiilimäärää saadaan kasvatettua niiden suuntaisesti. Neliön muotoinen matriisi olisi ohjausten määrän perusteella tietenkin pienin verrattuna yksittäisiin ohjauksiin, mutta suorakaiteellakin päästään jo huomattavasti pienempään ohjausmäärään. Lisäksi matriisin muoto ja koko määräytyisi kuitenkin venttiililohkon koon ja muodon perusteella. Suunniteltuun PNM-venttiililohkoon mahtuu sopivasti neljä venttiiliä rinnakkain, joten matriisin käyttö voisi olla mahdollista siinä.



Kuva 4.12 3x3 kokoinen matriisiohjattu boosteri

Simuloinnin perusteella matriisiohjaus toimii ainakin välttävästi. Kuvassa 4.13 on esitetty 3x3 matriisiboosterin simulointituloksia virtakäyrien osalta. Rivien päivitystaajuus on mitoitettu siten, että kolmen rivin jälkeen ehdittäisiin ajaa vielä neljättä riviä. Simuloinnin kulku on seuraavanlainen:

- Avataan seuraavat venttiilit 1 ms avauspulssissa
 - Rivi 1: V1 ja V3
 - Rivi 2: V1
 - Rivi 3: V2 ja V3
- Pidetään kyseiset venttiilit auki nopeammalla 1 kHz päivitystaajuudella
- Avataan riviltä 1, venttiili V2
- Pidetään venttiilit auki
- Suljetaan riviltä 3, venttiilit V2 ja V3
- Pidetään loput venttiilit auki
- Suljetaan kaikki venttiilit



Kuva 4.13 Matriisiboosterin venttiileiden simuloidut virtakäyrät

Simuloinnista huomataan, että venttiilit ehditään avata käytettävän syklin aikana ja pitovirta asettuu käytetyllä 1 kHz taajuudella keskimäärin 1.5 ampeeriin, joka on melko suuri pitovirta. Pitovaiheen aikana ehditään avata uusi venttiili ja muiden venttiileiden pitovirta putoaa tänä aikana noin 0.5 ampeeriin. Suljettaessa venttiileitä voidaan jättää ne vain päivittämättä, jolloin virta putoaa hitaasti pitovirrasta nolnaan. Virran putoamisessa nolnaan kestää noin 3.5 ms, josta voisi arvella kestävän vielä useita millisekunteja varsinaiseen venttiilin sulkeutumiseen magneettisesta viiveestä johtuen. Matriisiohjaus siis toimii teoriassa, mutta siinä on useita huonoja puolia ainakin tällä tavalla toteutettuna. Hyvät ja huonot ominaisuudet voisi jakaa ainakin seuraavasti:

Hyviä puolia:

- Päänteen yksinkertaisuus
 - Ei aktiivisia komponentteja yksittäisessä päänteessä
 - Passiivisiakin komponentteja todella vähän
 - Vie erittäin vähän tilaa piirilevyllä
- Ohjauksia on huomattavasti vähemmän, kuin yksittäin ohjattuna
- Sarakkeiden määrä ei ole rajoitettu

Huonoja puolia:

- Rivimäärä on rajoitettu
- Hidas venttiilin sulkua
- Ohjausteknisesti hankala toteuttaa
- Ilman virran mittausta melko epätarkkaa

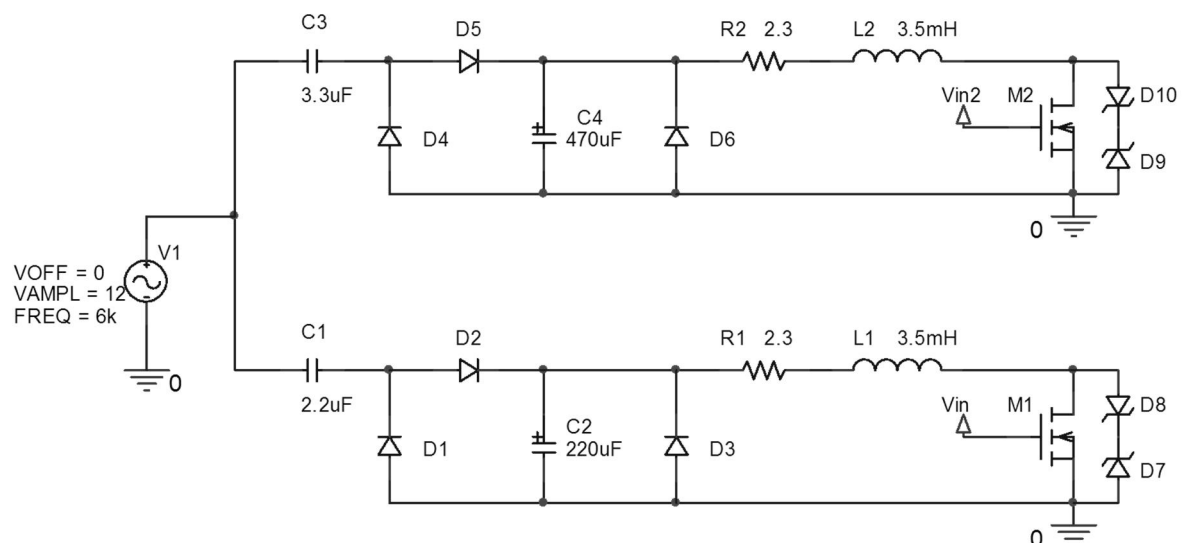
Simuloitu matriisiboosteri on passiivinen venttiilikohtaisen elektroniikan osalta, joten se on ehkä analogialtaan lähimpänä TFD-matriisia. Idealisessa tapauksessa matriisin toteutus voisi olla TFT-tyyppinen, jossa häviötön vapaakiertodiodi ja kela pitäisivät virran lähes vakiona kierron aikana, kuten TFT-pikselissä oleva kondensaattori. No-

pea sulku pitäisi silti saada toteutettua jotenkin huolimatta vapaakierrosta, mikä saattaa vaatia aktiivista ohjausta toisella kytkimellä tai käyttöjännitteen osalta. Perinteisellä tavalla toteutettu ohjaus on ainakin vielä järkevämpää ja helpompaa kuin matriisiohjaus, mutta venttiilimäärän lisääntyessä ja niiden pienentyessä edelleen olisi hyvä tutkia matriisiohjauksen mahdollisuuksia aktiivisesti.

4.4 AC-boosteri

Pelkän tasajännitteen käyttäminen ei ole ainoa mahdollinen vaihtoehto, vaan vaihtojännitteenkin hyvät puolet on järkevää ottaa huomioon suunnittelussa. Vaihtojännite käytetty resistiivisissä piireissä kuten tasajännite, mutta kondensaattorien ja kelojen kanssa ilmiöt ovat tunnetusti aivan erilaisia. Kondensaattori toimii parhaimmillaan lähes oikosulkuna vaihtojännitteelle ja kela taas saattaa vastata lähes avointa piiriä. Näihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa komponenttien ominaisuuksien lisäksi vaihtojännitteen taajuudella, mikä tuo yhden hyödyllisen säätöparametrin lisää piirin suunnitteluun. Perustuen kondensaattorin virranrajoituskykyyn ilman resistiivisiä häviöitä, suunniteltiin piiri, joka lataa venttiilin avaukselle varten suuren kondensaattorin ja pitää avauksen jälkeen pitovirran lähes vakiona, sekä taajuudella säädettävänä.

Suunnitellun AC-boosterin simulointimallin piirikaavio kahdelle venttiilille on esitetty kuvassa 4.14. Piiri perustuu yksittäisen venttiilin osalta kondensaattorin C2 lataukseen avauspulssia varten ja sinimuotoisen vaihtojännitteen V1 puoliaaltotasasuuntaukseen pitovirtaa varten kondensaattorin C1 ja diodien D1 ja D2 avulla. Jokaisella positiivisella jännitteen jaksolla diodi D2 tekee puoliaaltotasasuuntauksen ja negatiivisella jaksolla diodi D1 tyhjentää kondensaattorin C1. Venttiilin nopea sulku perustuu kytkimenä toimivan MOSFET:in M1 yhteydessä oleviin D7 ja D8 zenertyyppisiin diodeihin. Diodi D3 toimii vapaakiertodiodina ja estää virran putoamisen liian alas avauspulssin jälkeen ennen pitovirran tason saavuttamista.



Kuva 4.14 AC-boosterin simulointimallin piirikaavio kahdelle venttiilille

Avauskondensaattori C2 latautuu seuraavalla tavalla MOSFET:in M1 ollessa johtamattomassa tilassa: Jännite alkaa nousta jännitelähteellä V1, josta johtuen virta alkaa kulkea hetkellisesti kondensaattorin C1 läpi kaavan

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (4.1)$$

mukaan, jossa C on kondensaattorin kapasitanssi ja dv/dt jännitteen derivaatta. Virtapulssi kulkee diodin D2 läpi jännitteellä $V_{1\text{Ampl}} - V_{D2}$ kondensaattorille C2, johon sen energia jää talteen. Kondensaattorin C2 jännite nousee jokaisella pulssilla hieman, kuten kondensaattorin energian kaava (3.10) kertoo. Lopulta hyvin usean pulssin jälkeen, kondensaattori C2 on latautunut jännitteeseen $V_{1\text{Ampl}} - V_{D2}$. Lataava virtapulssi kapenee avauskondensaattorin latautuessa, koska lataus voi tapahtua vain silloin, kun jännitelähteen jännite nousee sen hetkisen latausjännitteen yli. Kun avauskondensaattori on maksimijännitteessään, virran kulku lakkaa kokonaan lukuun ottamatta pieniä vuotovirtoja. Venttiilin avaus tapahtuu avaamalla MOSFET M1, jolloin avauskondensaattori alkaa tyhjäntyä venttiilin kelan läpi. Jännite-ero kelan yli muodostuu aluksi avauskondensaattorin latausjännitteeksi, mutta se alkaa heti laskea latauksen tyhjäntyessä. Tyhjäntymisaika ja kelan maksimivirta riippuu avauskondensaattorin energialatauksesta, eli sen latausjännitteestä ja kapasitanssista, sekä kelan induktanssista ja resistanssista.

Jatkuva pitovirta kelan läpi muodostuu, kun M1 on johtavassa tilassa ja kondensaattori C2 on tyhjäntynyt avauksen jälkeen. Pitovirran maksimiarvo saadaan kaavan

$$I = \frac{V_C}{X_C} \quad (4.2)$$

mukaan, jossa V_C on kondensaattorin C1 yli olevan jännitteen amplitudi ja X_C sen reaktanssi. Kondensaattorin reaktanssi muodostuu kaavan

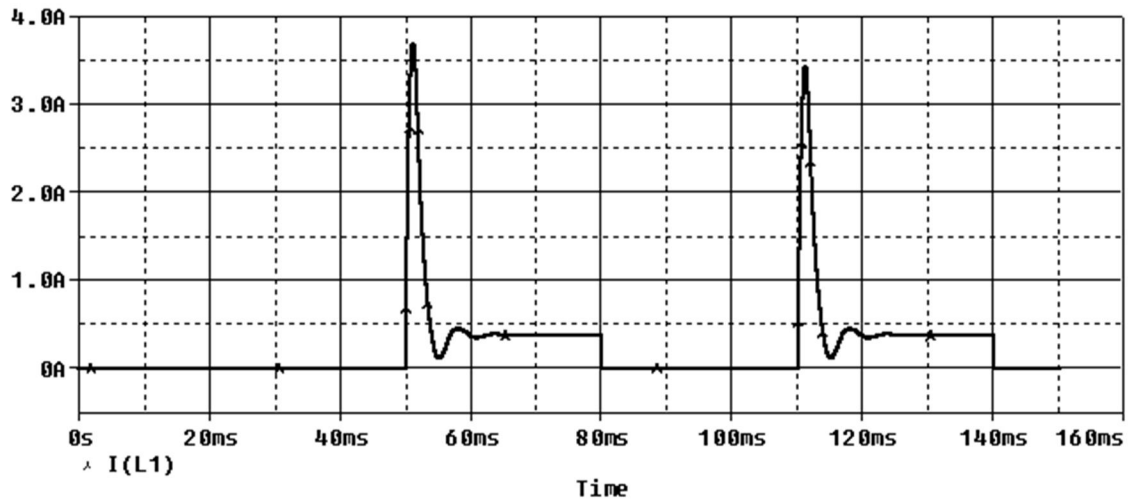
$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (4.3)$$

mukaan, jossa ω on sinimuotoisen vaihtojännitteen kulmataajuus eli $2\pi f$ taajuuden funktiona. Maksimiarvosta saadaan virran tehollisarvon approksimaatio jakamalla neliöjuuri kahdella ja edelleen puolialtotasasuuntauksesta johtuen jakamalla kahdella. Pitovirran suuruuteen voidaan vaikuttaa siis vaihtojännitteen taajuudella ja amplitudilla, sekä kondensaattorin C1 kapasitanssilla. Taajuuden muutos on helpoin tapa, koska se ei vaikuta päätteeseen muihin ominaisuuksiin, kuten avauskondensaattorin maksimilatausjännitteeseen, eikä sen vuoksi tarvitse vaihtaa komponentteja piirilevyllä. Venttiili suljetaan sulkemalla MOSFET M1, jolloin jännite kelan yli nousee nopeasti sulkudiodien kynnyksijännitteeseen ja kelan pitovirta purkautuu lämmöksi. Avauskondensaattorit alkavat latautua uudelleen vasta sulkemisen jälkeen, joten seuraavaa avausta varten on odotettava tarvittavaan lataukseen kestävä aika.

4.4.1 Simulointitulokset

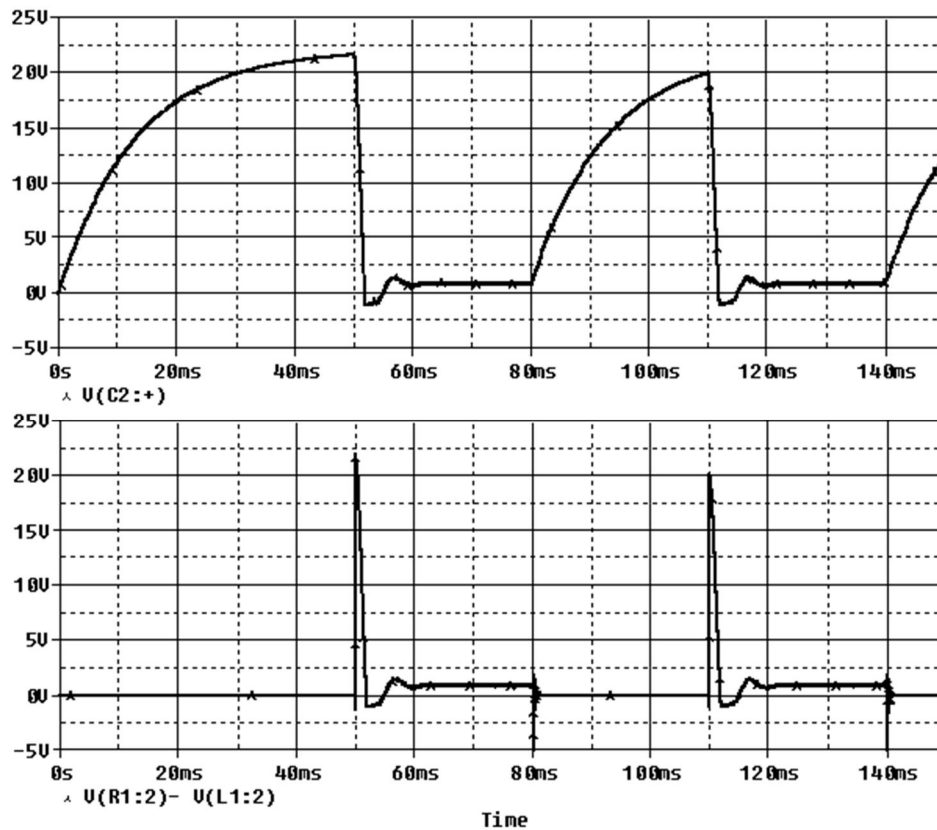
AC-boosterin yksittäisen venttiilin simuloitu virtakäyrä on esitetty kuvassa 4.15 ja jännitekäyrät avauskondensaattorin ja kelan osalta kuvassa 4.16. Simulointitilanteessa

komponenttien arvot vastaavat kuvan 4.14 alemman piirin arvoja. Venttiili avataan ensimmäisen kerran 50 ms kohdalla ja sitä pidetään auki 30 ms. Seuraava avaus tapahtuu 30 ms sulkemisen jälkeen eli ajanhetkellä 110 ms.



Kuva 4.15 AC-boosterin simuloitu virtakäyrä kahden ohjaussyklin osalta

Virtakäyrästä nähdään, kuinka avauskondensaattorin C2 varaus saa aikaan virtapiikin kelan L1 läpi. Huippuvirta on ensimmäisen avauksen osalta noin 3.7 A ja toisen avauksen osalta noin 3.4 A. Ensimmäinen virtapiikki on suurempi, koska kondensaattori on ehtinyt latautua hieman kauemmin. Kelan virta putoaa avauspiikin jälkeen hieman pitovirran alapuolelle kondensaattorin ja kelan keskinäisen oskilloinnin vaikutuksesta, mutta luultavasti venttiili ei ehdi sulkeutua, koska tällöin kelan induktanssi on tutkimuksen [15] mukaan lähes suurimmillaan, mikä hidastaa virran muutosta. Virtakäyrän muoto avaushetkellä ei ole yhtä kulmikas kuin PWM- tai kaksijänniteohjatussa päätteessä, koska avauskondensaattorin jännite laskee tasaisesti avauspulssin aikana. Pitovirta muodostuu jännitelähteen taajuuden ja amplitudin, sekä latauskondensaattorin C1 kapasitanssin mukaan. Simuloitu pitovirta asettuu noin 350 mA tasolle käytetyllä ± 12 voltin jännitteellä ja 6000 Hz taajuudella, sekä 2.2 μF kapasitanssilla. Venttiiliä suljettaessa kelan virta purkautuu nopeasti zenerdiodien D7 ja D8 läpi.



Kuva 4.16 AC-boosterin simuloitujen jännitekäyrät avauskondensaattorin C2 (ylhällä) ja kelan L1 (alhaalla) osalta

Jännitekäyristä kuvassa 4.16 nähdään, kuinka avauskondensaattorin C2 (ylhällä) latausjännite kasvaa avaussignaaliin asti ja putoaa sen jälkeen kelan jännitekäyrän (alhaalla) mukana. Jännitekäyrä putoaa hieman negatiiviseksi avauksen jälkeen, kun pitovirran tuotto ei riitä kompensoimaan virran nopeaa putoamista ja kondensaattorin, sekä kelan keskinäistä oskillointia. Vapaakiertodiodin ansiosta jännite putoaa negatiiviseksi vain diodin kynnyksjännitteen verran. Pitovirran aikana jännite pysyy lähes vakiona, eli huomattavaa rippeliä ei ole havaittavissa, vaikka piirissä käytetäänkin vaihtojännitettä. Jänniterippeli suodattuu avauskondensaattorin takia. Venttiiliä suljettaessa kelan jännite putoaa noin -40 volttiin sulkudiodien takia, mutta tämä on leikattu kuvista selvyiden vuoksi.

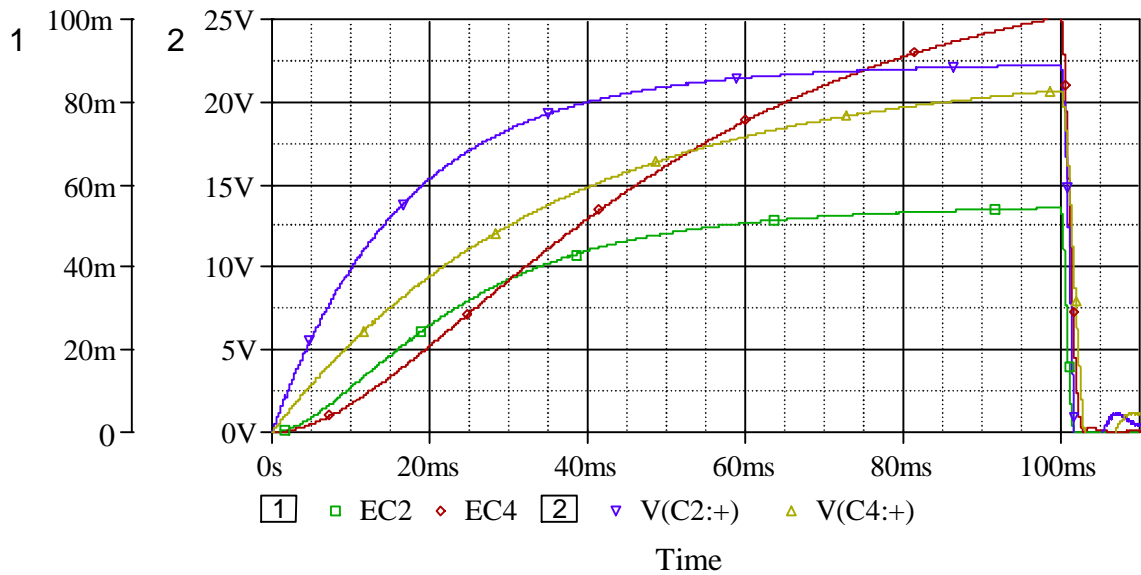
Niin käyttöjännitteen ominaisuudet, kuin jokainen komponentti päätteessä vaikuttaa kelan läpi kulkevan virtakäyrän ominaisuuksiin. Näistä tärkeimmät tekijät voidaan listata seuraavasti:

- Käyttöjännitteen suuruus
 - Suoraan verrannollinen avauskondensaattorin maksimilataukseen ja siten avauksen maksimienergiaan
 - Suoraan verrannollinen pitovirtaan ja siten avauskondensaattorin latausnopeuteen
- Käyttöjännitteen taajuus

- Suoraan verrannollinen pitovirtaan ja siten avauskondensaattorin latausnopeuteen
- Pienemmän kondensaattorin kapasitanssi
 - Suoraan verrannollinen pitovirtaan ja siten avauskondensaattorin latausnopeuteen
 - Suoraan verrannollinen maksimivirtapiikkeihin itsensä läpi
- Avauskondensaattorin kapasitanssi
 - Suoraan verrannollinen maksimiavausvirtaan ja -energiaan
 - Kääntäen verrannollinen jännitteen latautumismenoon
 - Kääntäen verrannollinen jännite- ja virtariippeliin pitovirrassa
 - Portaittain suoraan verrannollinen kondensaattorin fyysiseen kokoon
- Pitovirran suuruus
 - Suoraan verrannollinen avauskondensaattorin latausnopeuteen
 - Suoraan verrannollinen virran notkahdukseen avauksen jälkeen

Tästä ei kuitenkaan voida vetää suoria johtopäätöksiä parhaista komponenttisarjoista, koska ne eivät yksinään määrää boosterin ominaisuuksia, vaan kyse on eri arvojen suhteesta toisiinsa. Tärkein tekijä on pitovirta, joka määrää avauskondensaattorin latausnopeuden ja venttiilin sulkunopeuden. Näiden ominaisuuksien välillä on tehtävä kompromissi, kun jännitelähteen taajuuttakaan ei voida säätää aktiivisesti jokaiselle päätteelle erikseen nopean latauksen ja pienen pitovirran toivossa. Luultavasti suuri sulkunopeus on tärkeämpi ominaisuus kuin suuri latausnopeus, koska samaa venttiiliä ei tarvitse välttämättä avata heti uudestaan matopelimäistä ohjausta käytettäessä. Joitakin tällaisia tilanteita voi kuitenkin tulla, joten asiaa on tutkittava.

Kuvassa 4.17 on simulointitulokset avauskondensaattorien latausjännitteestä ja niiden energiasta tilanteessa, jossa päätteet ovat identtisiä lukuun ottamatta avauskondensaattorien kapasitanssia. Kondensaattorin C2 kapasitanssi on 220 μF ja kondensaattorin C4 kapasitanssi 470 μF . Kuvasta nähdään, että kapasitanssiltaan pienempi kondensaattori C2 lataa energiaa ja jännitettä aluksi nopeammin, kuin suurempi C4. Noin 30 ms aikana suurempi kondensaattori ottaa pienemmän kiinni energian latauksen osalta ja menee ohi. Risteämishetkellä kondensaattorien energia on noin 37 mJ, mikä ei luultavasti riitä vielä miniventtiilin avaukseen, joten on todettava, että pienempi kondensaattori on simuloinnin mukaan hitaampi ainakin miniventtiilin osalta. Suurella kondensaattorilla maksimilatausenergia on melko suuri, joten sen aiheuttama avausvirtakin on luultavasti turhan suuri. Jännitelähteen jännitettä pienentämällä voidaan kuitenkin pienentää maksimilatausta ja siten maksimivirtaa. Simuloinnissa ei oteta huomioon magneettipiirin saturoitumista ja induktanssin muutosta, joten virran nousunopeus avauksen alussa ei välttämättä pidä paikkaansa. Tästä syystä simuloinnin perusteella onkin hankala arvioida kumpi tilanne on parempi; Suuri latausjännite pienessä kondensaattorissa vai pieni latausjännite suuressa kondensaattorissa. Joka tapauksessa kondensaattorin kokonaisenergian on riitettävä avaamaan venttiili ja jännitteen on riitettävä nostamaan avausvirta riittäväksi.

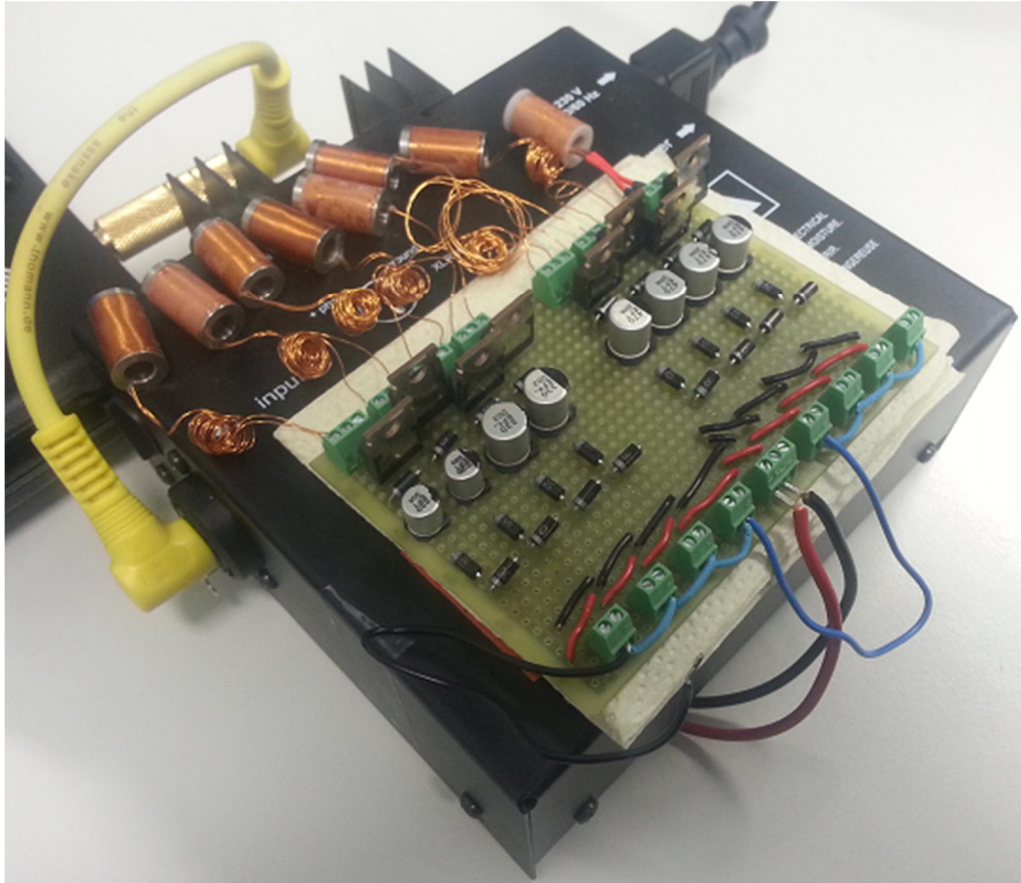


Kuva 4.17 Avauskondensaattorien C2 ja C4 simuloidut jännite- (sininen ja keltainen) ja energiakäyrät (vihreä ja punainen)

Ainakin simulointien perusteella AC-boosteri näyttää toimivan halutulla tavalla. Jos pystytään hyväksymään noin 30 - 50 ms latausaika venttiiliä kohden, niin saavutetaan rakenteeltaan ja ohjausvaatimuksiltaan yksinkertainen järjestelmä. Yksi parhaista puolista päätteessä on tarve ainoastaan yhdelle aktiivikomponentille, jonka käyttöön ei tarvita muuta, kuin on- tai off-signaali. Latauskondensaattorin tekemä virranrajoitus ei ideaalitulanteessa kuluta tehoa lämmöksi, kuten vastuksella tehtävä vastaava virranrajoitus kuvan 4.2 piirissä, jonka tehonkulutus on sietämätön. Erittäin tärkeä huomio jännitelähteen kannalta on se, että suuria avausvirtoja ei tarvitse tuottaa samanaikaisesti, vaan lähteen kuormitus jakautuu tasaisesti latausajan mukaan. Tasajännitesovelluksissahan tehonlähteen mitoitus maksimivirtojen mukaan johtaa ylisuureen lähteeseen, vaikka piikkitehoja tarvitaan luultavasti erittäin harvoin.

4.4.2 Toteutus ja piirilevy

AC-boosteri päädyttiin toteuttamaan fyysisesti mittauksia varten sen mielenkiintoisten ominaisuuksien johdosta. Järjestelmästä tehtiin yksinkertaisia prototyypipiirilevyjä ja alustava suunnitelma venttiililohkoon toteutettava piirilevystä. Pääte on niin yksinkertainen, että sen prototyypin pystyy helposti toteuttamaan reikälevylle käsin juotettuna ja ohjauksen toteutus onnistuu ruuviliittimien läpi erillisillä johtimilla. Elektroniikkakomponentteina käytetään helposti saatavissa olevia yksinkertaisia läpiladottavia komponentteja, lukuun ottamatta kondensaattoreita, jotka ovat pintaliitoskomponentteja. Jännitelähteenä käytetään lineaarista audiopäätevahvistinta, jota voidaan ohjata helposti erimuotoisilla audiosignaaleilla [31]. Kytkenä käytetään älykästä MOSFET kytkintä, jota voidaan ohjata suoraan 5 V logiikkasignaaleilla. Se myös sisältää jo valmiiksi sulkuodit induktiivisen kuorman nopeaa purkamista varten [32].



Kuva 4.18 AC-boosterin 8-kanavainen prototyyppi

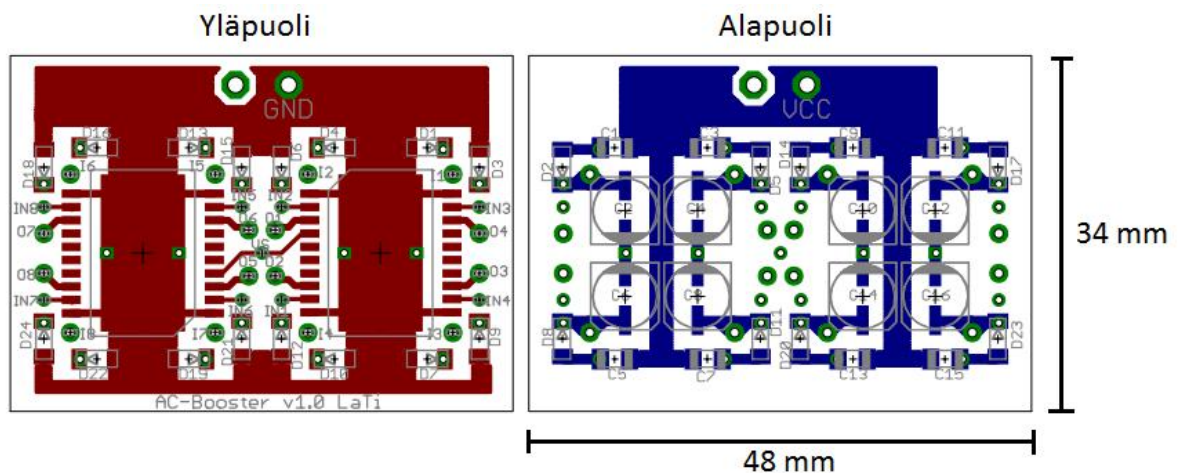
Kuvassa 4.18 on esitetty 8-kanavaisen AC-boosterin prototyyppilevy. Piirilevyn alla on audiovahvistin, joka on kytkettynä tietokoneen kuulokeliitäntään normaalilla audiokaapelilla. Audiosignaalia voidaan muokata tietokoneella taajuuden ja aaltomuodon osalta signaaligeneraattorihjelmassa ja jännitetasoa voidaan säätää tietokoneen tai vahvistimen äänenvoimakkuuden säätimillä. AC-boosterin ulostuloihin on kuvan tapaksessa kytketty kahdeksan venttiilin kelaa. Ohjauksen ja jännitelähteen sisäänmenot ovat laitteen etureunassa. Ohjaukset on tässä kuvassa kytketty sarjaan. Piirilevyllä on kytketty kapasitanssiltaan erisuuruisia avauskondensattoreita (harmaat tynnyrit), jotta voidaan mitata niiden vaikutusta boosterin ominaisuuksiin. Komponenttiluettelo on taulukon 4.1 mukainen:

Taulukko 4.1 AC-Boosterin komponenttiluettelo

Komponentti	Ominaisarvo	Jännitteenkesto	Rakenne
Latauskondensaattori	2,2 μ F	50 V	Keraaminen pintaliitos
Avauskondensaattori	220 μ F	25 V	Alumiinielektrolyytti pintaliitos
Avauskondensaattori	330 μ F	25 V	Alumiinielektrolyytti pintaliitos
Avauskondensaattori	470 μ F	25 V	Alumiinielektrolyytti pintaliitos
Tasasuuntausdiodi	700 mV / 1 A	50 V	Schottky
Vapaakiertodiodi	700 mV / 1 A	50 V	Schottky
Kytkin	35 A	47 V	Smart Power MOSFET

Käytettyjen avauskondensaattorien jännitteenkesto on 25 V, joka lienee liian pieneksi mitoitettu verrattuna käytettävään 24 V latausjännitteeseen, mutta suuremmilla jännitteenkeston arvoilla kondensaattorien fyysinen koko kasvaa. Kapasitanssiltaan 470 μF ja 330 μF olevien kondensaattoreiden halkaisija on 8 mm ja 220 μF kondensaattorin halkaisija on 6,3 mm, mikä tarkoittaa niiden piirilevyltä viemien pinta-alojen osalta huomattavaa eroa. Tätä pienempää halkaisijaa varten kondensaattorin kapasitanssia tai jännitteenkestoja olisi pienenettävä käytettävän piirin osalta sopimattomiin lukemiin, joten 6,3 mm halkaisijan oletetaan olevan tässä tapauksessa minimi.

Käytettävän piirin on mahdollista PNM-venttiililohkon päälle, joten sen toteamista varten suunniteltiin alustava piirilevy käytettäväksi 16 venttiilin testilohkossa. Kuvassa 4.19 on esitelty kahdeksaa venttiiliä ohjaava kaksipuolinen piirilevy ylä- ja alapuolelta mittoineen. 16 venttiilin lohkoissa aseteltu neljälle virtauskanavalle on $2 \times 4 + 2 \times 4$ mukainen, eli kahdeksan venttiiliä kummassakin lohkon päädyssä, jotka on jaettu edelleen kahtia kahdelle virtauskanavalle. Näin pienessä lohkoissa on mahdollista käyttää vielä erillistä johdotusta ohjamaan jokaista kanavaa erikseen, eli ohjaustietokoneelta tai mikrokontrollerilta tarvitaan 16 ulostuloa. Venttiilien kiinnitys piirilevyyn on tehty myös läpiviennillä kelajohtimia varten. Piirilevyn mitoiksi muodostuu noin 34×48 mm, mikä on riittävän pieni tässä tapauksessa.



Kuva 4.19 Alustava suunnitelma AC-boosterin piirikaaviosta kahdeksalle kanavalle

Piirilevyn suunniteltuina komponentteina käytetään pintaliitoskomponentteja kaikilta osin. Diodit ovat kynnyksjännitteeltään noin 500 mV Schottky-diodeita ja latauskondensaattorit vastaavia, kuin edellisessä prototyypissä. Avauskondensaattorit ovat kapasitanssiltaan 220 μF , joten niiden halkaisija on 6,3 mm. Suurempia kondensaattoreita olisi hankalampi saada mahtumaan piirilevylle, mutta ei mahdollista. Kytkiminä käytetään Infineon TLE6220GP piirejä, jotka sisältävät neljä alapuolista kytkintä. Niissä on myös sulkudiodit valmiina. Kytkimiä voidaan ohjata suorilla sisäänmenoilla logiikkasignaaleilla tai SPI-väylällä mikrokontrollerilta. Kytkinpiiri tarvitsee lisäksi 5 V käyttöjännitteen, mikä ei ole ongelma, koska käytettävä mikrokontrolleri tarvitsee sen myös.

Vaikuttaisi siltä, että piirilevy on mahdollista saada mahtumaan venttiililohkon päälle siten, että lohkon keskiosaan jää vielä tilaa mikrokontrollerille ja jännitteen regu-

loinnille, sekä tarvittaville liittimille. Komponentit mahtunevat myös hieman pienempään tilaan, jos levy tehdään kolme- tai nelikerroksisena ilman ohjausjohdotusten läpivientejä. Piirilevy on helposti laajennettavissa edelleen suurempiin lohkoihin, jolloin kytkinpiirien ohjaus on järkevää tehdä SPI-väylän kautta.

4.5 Tehon- ja energiankulutus eri boostereilla

Tarkastellaan erilaisten venttiiliboosterien simuloitua tehon- ja energiankulutusta yksittäisen pääteasteen ja yksittäisen miniventtiilin ohjaussyklin osalta. Piirien kokonaiskulutus koostuu venttiilin kelasta ja piirin komponenttien häviöistä, kuten diodien kynnysjännitteistä ja kytkinhäviöistä. Kelan häviöt johtuvat pääasiassa sen resistanssista, jolloin tehonkulutuksen voi laskea suoraan kaavan

$$P = RI^2 \quad (4.4)$$

mukaan, jossa R on kelan resistanssi ja I virta kelan läpi. Kelan energian- ja tehonkulutus pysyy käytetystä boosterista riippumatta samanlaisena, joten itse boosteripiirien kulutus kiinnostaa. Komponenttien tehohäviöt voidaan laskea niiden resistanssin perusteella kaavan (4.4) periaatteella tai komponentin läpi kulkevan virran ja sen yli syntyvän jännitehäviön tulona.

Simuloinnit tehtiin yhden ja kahden kytkimen PWM-ohjatuilla piireillä, kaksijännitteisillä kahden kytkimen piireillä ja AC-boosterilla. Yhden kytkimen piirissä pitoteho tehdään 5 V kynnysjännitteen omaavan zenerdiodin avulla. Kahden kytkimen piirit simuloitiin sekä diodisillan kanssa, että ilman. Kaikki simuloinnit tehtiin siten, että venttiili avattiin noin 2 ms avauspulsilla, jolloin kelan avausenergia nousi 60 mJ arvoon. Venttiiliä pidettiin auki 100 ms asti, jolloin pitoteho pidettiin 200 mW arvossa. Tällöin kelan virta nousi avausvaiheessa noin 4 ampeerin arvoon ja pitovirta oli noin 300 mA arvossa. AC-boosterin kohdalla avauskondensaattori ladattiin ensin täyteen 100 ms aikana, jonka jälkeen venttiilin avaus tehtiin vastaavasti, kuin muissa piireissä. Simulointitulokset on merkitty taulukkoon 4.2. Taulukon sarakkeisiin on merkitty käytetty boosteripiiri, piirin kuluttama kokonaisenergia suhteessa kelan ja piirin kuluttamaan kokonaisenergiaan 100 ms aikana, piirin pitoteho suhteessa kokonaispitotehoon ja mahdollisen diodisillan avulla regeneroitu energia yhden avauksen jälkeen.

Taulukko 4.2 Eri boosterien tehon- ja energiankulutus

Boosteripiiri	Energia [mJ]/[mJ]	Pitoteho [mW]/[mW]	Regeneraatio [mJ]
1-kytkin, PWM	138/198	1190/1390	-
2-kytkintä, PWM	45/105	170/370	-
2-kytkintä, PWM, diodisilta	25/85	170/370	14
2-jännite	40/100	140/340	-
2-jännite, diodisilta	22/82	140/340	15
AC-boosteri	55/115	280/480	-

Simulointituloksista nähdään, kuinka zenerdiodilla varustettu yhden kytkimen piiri kuluttaa ylivoimaisesti eniten tehoa pitovaiheen aikana verrattuna muihin piireihin. Pelkän piirin tehonkulutus on yli kahdeksan kertaa suurempi, kuin kaksijännitteisen piirin kulutus. Kokonaispitoteho kela mukaan luettuna on noin nelinkertainen. Muiden piirien kulutus on melko lähellä toisiaan, joskin AC-boosterilla on hieman suurempi pitoteho. AC-boosterin häviöt koostuvat pääosin diodien kynnysjännitteistä, kun latauskondensaattorin läpi tulevat virtapiikit kulkevat niiden läpi. Käytetty taajuuden ja latauskondensaattorin suhde ei vaikuta merkittävästi kulutukseen mahdollisilla taajuusalueilla. Kaksijännitteisen piirin kulutus on pienintä, koska siinä ei ole juurikaan kytkinhäviöitä, kuten PWM-ohjausta käytettäessä, vaikka pitovirta kulkeekin jatkuvasti diodin läpi. PWM-ohjatuissa ratkaisuissa kulutukseen vaikuttaa myös käytetty PWM-taajuus kytkinhäviöistä johtuen. Diodisillalla saavutettu pieni energiansäästö muodostuu tärkeäksi, jos venttiilin avauksia on runsaasti ja pitovaiheet ovat lyhyitä. Pitkät pitovaiheet kuluttavat niin paljon tehoa, että regeneraatio menettää merkityksensä.

Tehon- ja energiankulutuksissa ei siis ole ratkaisevia eroja eri boostereiden välillä lukuun ottamatta yksikytkimistä piiriä. Kunhan diodien kynnysjännitteet ovat mahdollisimman pieniä ja kytkinten ohjaus mahdollisimman nopeaa kytkinhäviöiden välttämiseksi, kaikkia vaihtoehtoja voidaan käyttää. AC-boosterin kohdalla on myös tärkeää, että käytetty jännitelähde pystyy ottamaan vastaan latauskondensaattorin ja lähteen välillä oskilloivan loistehon. Muutoin pitovaiheessa kuluu aivan liikaa tehoa hukkaan. Tärkeimmäksi valintakriteeriksi eri boosteriratkaisujen välillä voidaankin todeta fyysinen koko ja ohjauksen toteutuksen helppous, koska simuloituissa energiankulutuksissa ei ole merkittäviä eroja.

5 MITTAUSTULOKSET

Tämän työn aikana tehtiin mittauksia miniventtiilin sulkunopeuteen vaikuttavista tekijöistä elektroniikan osalta, jotta tiedettäisiin mitä ominaisuuksia suunniteltavalla boosterilla olisi oltava mahdollisimman nopeaa sulkua varten. Rakennettua AC-boosterin prototyyppiä käyttäen tehtiin mittauksia, joiden avulla voitiin todeta sen toiminta simulointituloksia vastaavaksi. Miniventtiilin vasteaikoja mitattiin AC-boosterilla, jotta voitaisiin verrata niitä aiemmin käytetyillä boostereilla saavutettuihin vasteaikoihin. Käytetyt mittausmenetelmät ja saavutetut tulokset on esitetty seuraavissa kappaleissa.

5.1 Venttiilin sulkumittaukset

Miniventtiilin sulkunopeuteen vaikuttavia tekijöitä mitattiin elektroniikan osalta. Koska kelan virta on venttiiliä suljettaessa saatava purettua mahdollisimman nopeasti, vaimentavan komponentin aiheuttama sulkujännitteen suuruus ja käytetty pitovirta vaikuttavat venttiilin sulkunopeuteen, kuten luvussa 3.1.4 on esitetty. Mittauksissa vertaillaan pelkkää vapaakiertodiodia vastuksen ja vapaakiertodiodin, sekä zenerdiodin ja vapaakiertodiodin yhdistelmiin. Käytetyn vastuksen resistanssin vaikutusta ja käytetyn zenerdiodin kynnysjännitteen vaikutusta tutkittiin. Lisäksi tehtiin yksittäinen vertaileva mittaus pienempää pitovirtaa käyttäen, jotta varmistuttiin sen vaikutuksesta sulkunopeuteen.

Mittaukset tehtiin yksittäisellä miniventtiilillä kuivana, joten paine-eron tai virtauksen vaikutusta sulkunopeuteen ei ole. Vaimentava komponentti kytkettiin kelan rinnalle suoraan kelajohtimiin kiinni. Venttiili avattiin kytkemällä jännite kelajohtimille, jonka jälkeen pitovirta säädettiin yhteen ampeeriin. Venttiili suljettiin irrottamalla käyttöjännite kelajohtimilta, jolloin pitovirta purkautui vaimentavan komponentin läpi lämmöksi. Kelan maksimisulkujännite ja back-EMF -ilmiöstä arvioitu sulkuaika luettiin oskilloskoopin ruudulta. Käytetty vapaakiertodiodi on schottkydiodi, jonka kynnysjännitteeksi on ilmoitettu noin 0.5 voltia. Mittaustulokset on merkitty taulukkoon 5.1.

Taulukko 5.1 Mittaustulokset miniventtiilin sulkunopeudesta erilaisilla vaimentavilla komponenteilla. Pitovirtana käytettiin yhtä ampeeria.

Vaimennustapa	Mitattu sulkujännite [V]	Sulkuaika [ms]
Vapaakiertodiodi	-0.4	12
Vastus 22 Ω	-10	5.0
Vastus 39 Ω	-25	4.0
Vastus 56 Ω	-29	4.0
Vastus 100 Ω	-33	4.0
Vastus 220 Ω	-70	3.7
Zener 2.7 V	-5	4.0
Zener 3.9 V	-5	4.0
Zener 5.6 V	-6.2	3.7
Zener 12 V	-13	3.7
Zener 50 V	-50	3.6
Zener 82 V	-80	3.6
Zener 5.6 V, Pitovirta 0.3 A	-6.2	1.0

Tuloksista nähdään, kuinka pelkällä vapaakiertodiodilla venttiili sulkeutuu aivan liian hitaasti. Vastuksen kanssa taas jännitehäviö kasvaa hyvin suureksi ennen kuin päästään alle 4 ms sulkunopeuteen. Tulokset vahvistavat oletuksen, jonka mukaan zenerdiodilla venttiilin demagnetointi on nopeampaa kuin vastuksella, koska se pitää jännitehäviön samansuuruisena virrasta riippumatta. Huomataan kuitenkin, että käytetyllä vaimennusjännitteellä on hyvin vähän vaikutusta sulkunopeuteen. Jo pienelläkin zenerdiodin kynnysjännitteellä venttiilin sulkuaika on 4 ms, eikä suurella jännitehäviöllä sulkunopeus ole ratkaisevasti parempi. Yksittäisestä pienemmällä pitovirralla tehdystä mittauksesta taas huomataan, kuinka ratkaiseva merkitys pitovirralla on sulkunopeuteen. Kun 5.6 V kynnysjännitteen omaavalla zenerdiodilla sulkunopeus 1 A pitovirralla on 3.7 millisekuntia, niin 300 mA pitovirralla sulkuaika on enää yksi millisekunti. Johtopäätöksenä mittauksesta voidaan todeta, että suunniteltavan boosterin demagnetointiin käytettävällä komponentilla ei ole valtavan suurta merkitystä, kunhan se ei ole pelkkä vapaakiertodiodi ja pitovirta pidetään mahdollisimman pienenä.

5.2 AC-boosterin mittaustulokset

AC-boosterilla ohjatusta venttiilistä tehtiin mittauksia yksittäisen venttiilin yksittäisistä avauksista ja venttiiliavausten taajuuden raja-arvosta eri paineilla ja eri avauskondensaattoreiden kapasitansseilla. Tärkeimpinä lähtökohtina oli testata toimiiko rakennettu piiri samalla tavalla, kuin simuloitu piiri ja avautuuko venttiili todellisuudessa kondensaattorin energialla myös täydellä paineella, sekä kuinka pitkän latausajan kondensaattori vaatii sulkeutumisen jälkeen seuraavaan avaukseen. Myös venttiilin vasteajat avautumisen ja sulkeutumisen osalta ovat kiinnostavia verrattuna muilla käytetyillä boostereilla saavutettuihin vasteaikoihin.

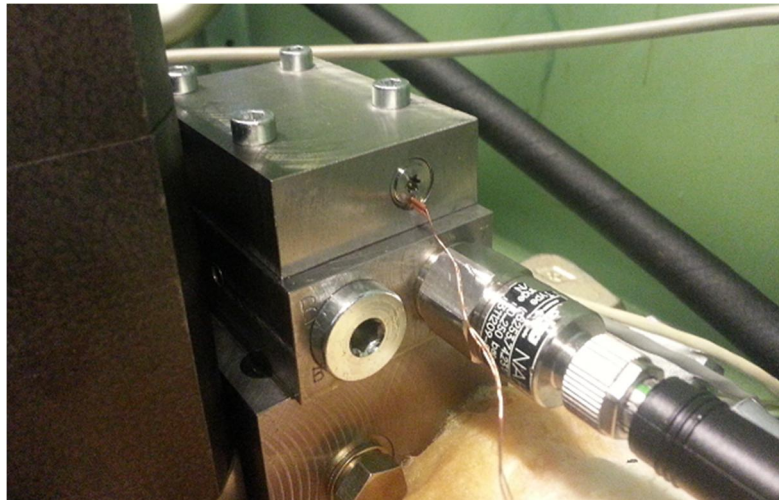
Jännitelähteenä käytetyn audiovahvistimen ja sen sisäänmenosignaaliiksi tarvittavan lähteen ominaisarvot mitattiin ensimmäisenä, jotta voitiin varmistua niiden sopivuudesta AC-boosterin tehollähteeksi mittaustarkoituksissa. Sisäänmenosignaali tuotettiin tässä tapauksessa tietokoneella Little SineGen -ohjelmalla, joka on yksinkertainen siniaaltogeneraattori. Ulostulo otettiin tietokoneen kuulokeulostulosta audiokaapelilla. Kuulokeulostulon maksimiulostulojännite on huipusta huippuun amplitudiltaan noin 1,4 voltia, kun tietokoneen äänenvoimakkuusasetukset on asetettu maksimiarvoon. Oskilloskoopilla mitattuna ulostulon aaltomuoto vastaa hyvin siniaaltogeneraattorilla tuotettua aaltoa. Audiovahvistimen jännitevahvistus on datalehden mukaan 26 dB mikä tarkoittaa, että sisäänmenosignaalista U_{in} saatava ulostulojännitteen U_{out} huipusta huippuun maksimiampplitudi olisi oltava kaavan

$$U_{out} = 10^{\frac{G_{dB}}{20}} U_{in} = 10^{\frac{26 \text{ dB}}{20}} \times 1,4 \text{ V} \approx 27,9 \text{ V} \quad (5.1)$$

mukainen. Oskilloskoopin näyttämä on noin 28 V, joten vahvistus pitää paikkansa. Tulos voi olla hieman epätarkka johtuen oskilloskoopin mitta-alueen ylittävästä jännitteen arvosta, jolloin jouduttiin käyttämään mittapään kymmenkertaista vaimennusta. Avas-kondensaattorin latausta varten jännite on kuitenkin riittävä.

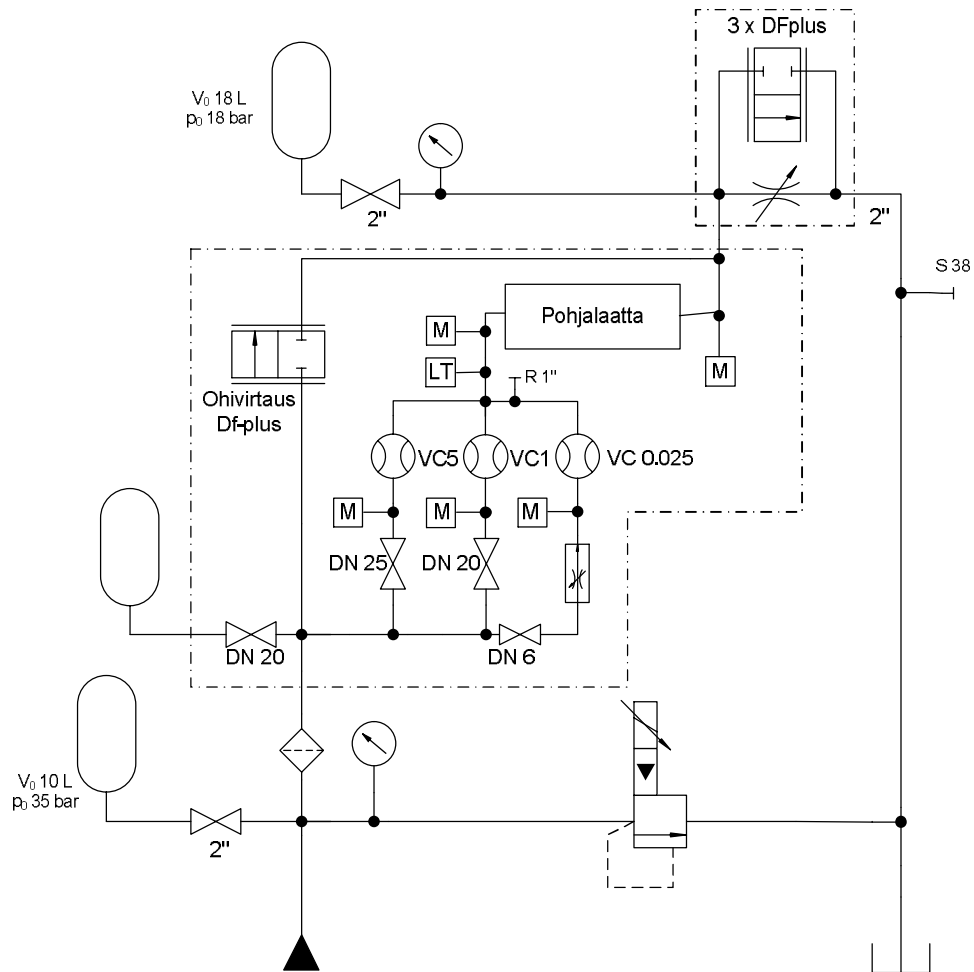
5.2.1 Mittausjärjestelyt

Venttiilimittaukset tehtiin yksittäisellä lohkoasenteisella miniventtiilillä, joka on kiinnitetty CETOP 3-pohjalaatan päälle käytettyyn hydraulijärjestelmään, kuten kuvassa 5.1 on esitetty. Kuvassa näkyy myös miniventtiilin kelajohtimet, joihin kytketään käytettävän ohjauselektronikan ulostulo.



Kuva 5.1 Yksittäinen venttiili venttiililohkossa kytkettynä mittausjärjestelmään

Käytetyn hydraulijärjestelmän hydraulikaavio on esitetty kuvassa 5.2. Hydraulijärjestelmässä mitattava venttiili sijaitsee ”Pohjalaatta” -lohkon päällä. Paineanturit sijaitsevat venttiilin kummallakin puolella merkittynä lohkoilla ”M”. Järjestelmässä on kolme läpäisyiltään ja mitta-alueeltaan erisuuruista tilavuusvirta-anturia, joista pienintä Volutronic VC 0.025 -anturia käytetään yksittäistä miniventtiiliä mitattaessa.



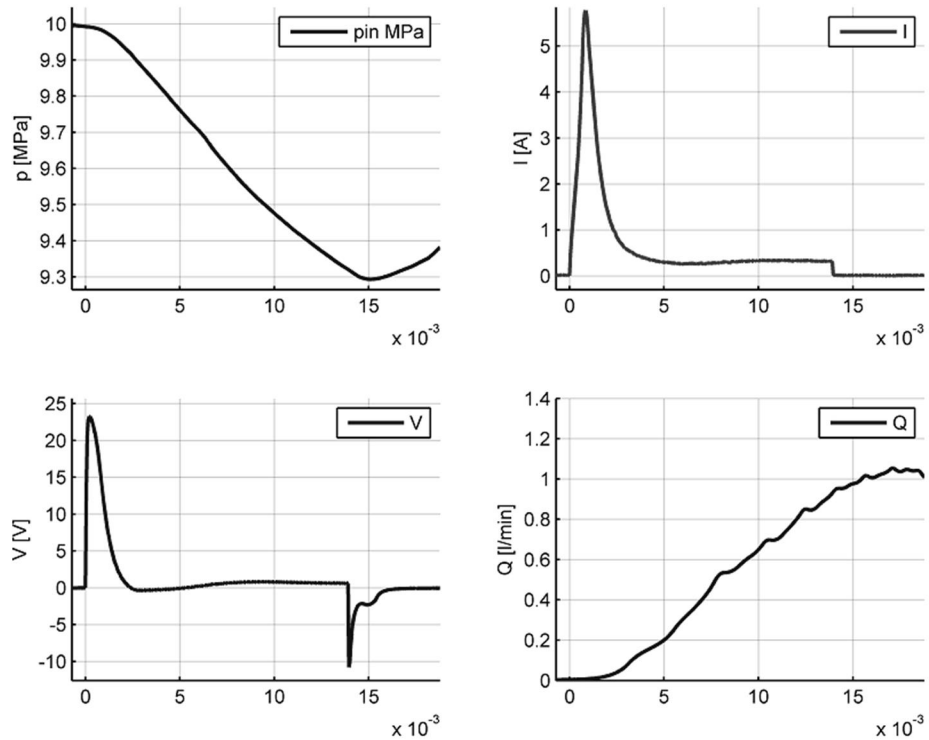
Kuva 5.2 Venttiilimittausjärjestelmän hydraulikaavio

Virtaa mitattiin Kyoritsu 8113 pihtivirtamittarilla miniventtiilin kelajohtimilta ja jännitettä LEM LV 25-P galvaanisesti erotetulla virta-jännitemuuntimella. Kaikki mittarit ja anturit on kytketty dSpace mittaustietokoneeseen. Mittaustietokoneella käytettävällä dSpace Control Desk -ohjelmistolla tehtiin käytetyt ohjausekvenssit ja mittausdatan tallennus. Mittausten aikana hydraulioöljyn lämpötila pyrittiin pitämään vakiona noin 40 °C, jotta lämpötilan vaihtelut eivät aiheuttaisi mittausvirheitä.

5.2.2 Venttiilin vasteajat

AC-boosteria käyttäen tehtiin mittauksia miniventtiilin avaus- ja sulkuajoista tilanteessa, jossa avauskondensaattori on ehtinyt latautua täyteen ja hydraulijärjestelmän ominaisuudet ovat tasoittuneet staattiseen tilaan. Mittaukset tehtiin käyttäen 10 MPa ja 21 MPa painetta mitattavan venttiilin yli, sekä kolmea kapasitanssiltaan erisuuruista avauskondensaattoria. Käytettyjen kondensaattorien kapasitanssit ovat 220 μF , 330 μF ja 470 μF . Kaikkien kondensaattorien kapasitanssien toleranssit ovat $\pm 20\%$. Kaikissa mittauksissa venttiilin pitovirta pidettiin noin 300 mA arvossa. Kuvassa 5.3 on esitetty esimerkkikuvaajat mittaustuloksista, kun järjestelmäpaine on 10 MPa ja avauskondensaattorin kapasitanssi on 220 μF . Kuvaajissa on esitetty paine venttiilin sisäänmenossa (vasen ylä), kelan virran arvo (oikea ylä), jännite kelan yli (vasen ala) ja tilavuusvirta venttiilin läpi

(oikea ala). Venttiilin avaussignaali on annettu ajan hetkellä 0 ms ja sulkusignaali ajan hetkellä 14 ms.



Kuva 5.3 Esimerkki miniventtiilin mittaustuloksista yksittäisen avauksen ja sulun aikana

Kuuden eri tilanteen mittausten tulokset on koottu yhteen taulukossa 5.2. Venttiilin vasteajat on arvioitu paineen muutosten ja back-EMF -ilmiöstä aiheutuvien virran ja jännitteen muutosten perusteella. Venttiilin avaushetkellä virrassa näkyy hyvin pieni notkahdus ja paine alkaa laskea. Venttiilin sulkuhetkellä jännitekäyrässä näkyy selkeämpi notkahdus, jonka jälkeen venttiilin arvioidaan olevan sulkeutunut. Tilavuusvirran mittauksen reagointinopeus on liian pieni, jotta siitä voitaisiin luotettavasti arvioida venttiilin vasteaikoja. Avausvirta on virran maksimiarvo, jossa kelan sähkövirta käy hetkellisesti avauksen aikana ja avausjännite vastaavasti on hetkellinen maksimijännite kelan yli venttiilin avaushetkellä. Avausjännitteen voidaan arvioida olevan muutaman voltin kymmenyksen pienempi, kuin varsinainen avauskondensaattorin latausjännite ennen avausta. Avauskondensaattorin tyhjentymisen jälkeen kelan virta käy hetkellisesti hieman käytetyn pitovirran alapuolella. Tästä syystä liian pienellä pitovirralla venttiili sulkeutuisi avauksen jälkeen vaikka pitotilanteessa vastaava pitovirta riittäisikin pitämään venttiilin auki. Mittauksissa todettiin noin 300 mA pitovirran olevan riittävä, jotta venttiili pysyy auki luotettavasti koko mittausjakson ajan.

Taulukko 5.2 Miniventtiilin vasteajat yksittäisillä avauksilla AC-boosterilla

	Avausaika [ms]	Sulku aika [ms]	Avausvirta [A]	Avausjännite [V]
470 μ F, 10 MPa	1.1	2.0	7.4	23.6
330 μ F, 10 MPa	1.2	1.6	6.5	23.4
220 μ F, 10 MPa	1.2	1.4	5.8	23.2
470 μ F, 21 MPa	1.4	1.6	7.5	23.6
330 μ F, 21 MPa	1.5	1.3	6.6	23.4
220 μ F, 21 MPa	1.6	1.3	5.9	23.3

Mittaustuloksista nähdään, kuinka paineen kasvaessa ja avauskondensaattorin kapasitanssin pienentyessä venttiilin avausaika kasvaa hieman. Sulkuajalle taas käy päinvastoin. Se lyhenee paineen kasvaessa ja avauskondensaattorin kapasitanssin pienentyessä. Maksimiavausvirta on ymmärrettävästi suurimmillaan suuren kapasitanssin omaavalla kondensaattorilla, koska kondensaattorin jännite pysyy kauemman aikaa korkeana. Maksimiavausjännite taas pysyy lähes vakiona, koska avauskondensaattorin latauksesta ei ehdi hävitä kuin murto-osa ennen kuin maksimijännite on muodostunut kelan yli. Avausajan osalta on ymmärrettävää, että se kasvaa paineen kasvaessa, koska paineella on sulkeva voimavaikutus venttiilin neulaan. Samoin avauskondensaattorin kapasitanssin vaikutus avausnopeuteen on ymmärrettävä, koska suurempi energia saa aikaan suuremman virran kautta suuremman sähkömagneettisen voiman. Sulkuajojen lyheneminen johtuu myös paineen aiheuttamasta sulkevasta voimavaikutuksesta, mutta avauskondensaattorin kapasitanssin vaikutus sulkuaikaan on vielä epäselvää.

5.2.3 Rajataajuusmittaukset

Koska AC-boosterin ominaisuuksiin kuuluu avauskondensaattorin lataus ja siihen kuluva aika, on syytä mitata kuinka pitkiä varsinaiset latausajat ovat ja miten eri parametrit vaikuttavat siihen. Tässä mittauksessa etsittiin iteratiivisesti suurin mahdollinen taajuus, jolla venttiiliä voidaan avata ja sulkea koko käytetyn mittausjakson ajan pulssisuhteen ollessa 50 %. On syytä mainita, että joissain tilanteissa rajataajuuksien lähettyvillä venttiili saattoi avautua ja sulkeutua joitakin kertoja, kunnes ei enää jaksanut aueta. Tämä tapahtui luultavasti jonkun komponentin lämpenemisen seurauksena ja ilmiö otettiin huomioon valitsemalla tarpeeksi pitkä mittausaika, sekä varmistamalla että venttiili aukeaa jokaisella kerralla. Venttiiliä avattiin hieman yli tai alle sata kertaa jokaisella mittausjaksolla riippuen saavutetusta taajuudesta. Avauksien määrän pienet eroavaisuudet eivät vaikuta mittauksiin, koska ensimmäiset ja viimeiset avaukset poistettiin kuvaajista ja loput on keskiarvotettu keskenään. Koska käytetty pitovirta vaikuttaa avauskondensaattorin latausaikaan ja venttiilin sulkuaikaan, kaikissa mittauksissa käytettiin samaa, noin 300 mA pitovirtaa, jotta latausajat ja sulkuajat olisivat verrannollisia kes-

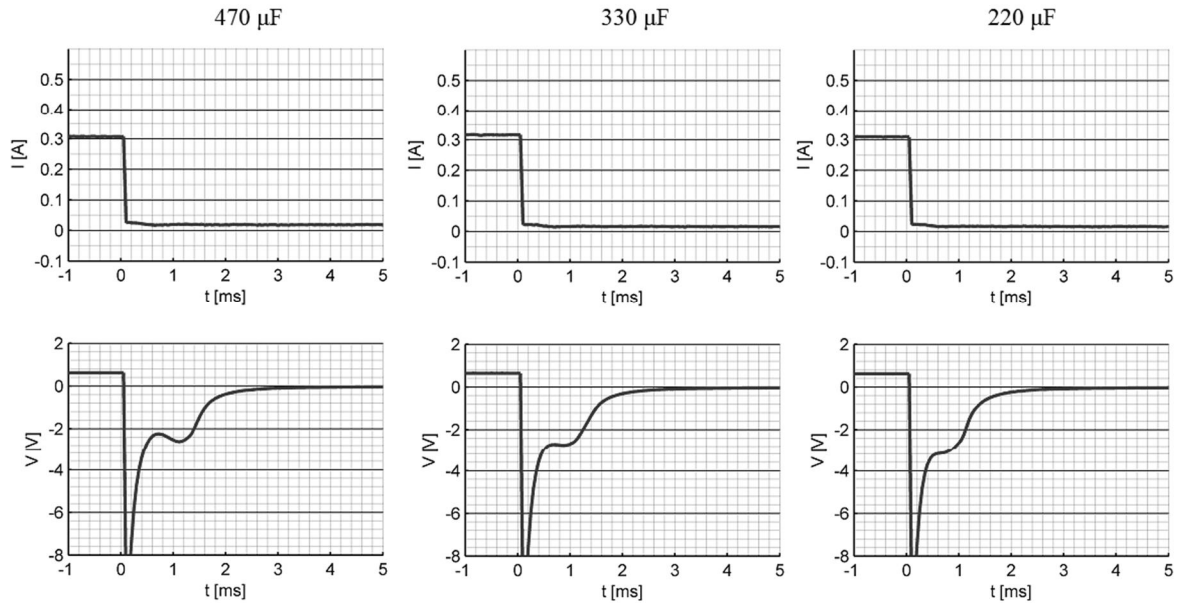
kenään. Mittauksissa käytettiin kolmea kapasitanssiltaan erisuuruista avauskondensattoria ja jokaisen ominaisuudet mitattiin kahdella eri painetasolla. Mittaustulosten vertailu on esitetty taulukossa 5.3 ja varsinaiset mittaustulokset on esitetty liitteinä olevissa kuvissa L2.1-6. Avausajat arvioitiin paineen putoamisen alkamisajasta ja back-EMF -ilmiön aiheuttamasta notkahduksesta virrassa avautumishetkellä. Sulkuajat arvioitiin paineen nousun alkamisajasta ja back-EMF -ilmiön aiheuttamasta jännitteen notkahduksesta sulkuhetkellä.

Taulukko 5.3 AC-boosterin rajataajuusmittaukset eri paineilla ja kapasitanssiltaan erisuuruuksilla avauskondensattoreilla

	Rajataajuus [Hz]	Latausaika [ms]	Avausaika [ms]	Sulku aika [ms]	Avausvirta [A]	Avausjännite [V]
470 μ F, 10 MPa	27	18	3.0	1.6	1.9	9.0
330 μ F, 10 MPa	34	15	2.6	1.5	2.0	10.5
220 μ F, 10 MPa	36	13	2.5	1.4	2.0	12.0
470 μ F, 21 MPa	11	45	2.4	1.4	4.0	15.0
330 μ F, 21 MPa	11	45	2.0	1.2	4.7	18.5
220 μ F, 21 MPa	12	42	2.0	1.1	4.5	19.5

Mittauksista huomataan selvästi, kuinka avauksien rajataajuus kasvaa kapasitanssiltaan pienemmällä avauskondensattoreilla varsinkin pienemmällä paineella. Suuremmalla paineella yhtä selvää eroa ei ole. Tämä tarkoittaa siis suoraan lyhyempää latausaikaa avauskondensattorille. Myös venttiilien vasteajat lyhenivät kapasitanssin pienentyessä ja paineen kasvaessa. Avauksen aikaiset avausvirran ja latausjännitteen maksimit kasvavat luonnollisesti paineen kasvaessa ja kapasitanssin pienentyessä.

Mittaustuloksista voidaan todeta, että kappaleessa 3.1.2 ja tarkemmin kuvassa 4.17 käsitelty kondensattorin energian latausnopeus ei olekaan tärkein ominaisuus nopean avauksen kannalta. Tärkeämpää vaikuttaakin olevan jännitteen latausnopeus avauskondensattorissa. Kapasitanssiltaan pienemmän kondensattorin jännite kasvaa nopeammin, kuin suuremman, jolloin se siirtää latautuneen energian nopeammin kelalle ja avaa venttiilin nopeammin. Venttiilin sulkuaajoissa esiintyvät erot ovat ymmärrettäviä paineen kasvun osalta, koska suurempi paine aiheuttaa suuremman neulaa sulkevan voiman, mutta avauskondensattorin kapasitanssin osalta on epäselvää miten se vaikuttaa sulkunopeuteen. Kuvassa 5.4 on esitetty kootut mittaustulokset kelan sulkeutumisen aikaisista pitovirroista ja jännitteistä, käytettäessä kapasitanssiltaan erisuuruisia avauskondensattoreita.



Kuva 5.4 Sulkuajat kapasitanssillaan erisuuruksilla avauskondensaattoreilla

Avauskondensaattorin kapasitanssin suuruudella on huomattava vaikutus venttiilin sulkeutumisnopeuteen, kuten kuvaajistakin nähdään. AC-boosterin piiriä simuloitaessa ei vastaavaa ilmiötä pystytä havaitsemaan millään tavalla. Ero voi johtua joistakin simulaattorin tekemistä oletuksista tai ideaalisuuksista, mutta luultavimmin siitä, että venttiilin magnetismin aiheuttamia ilmiöitä ei oteta huomioon.

Tehdyistä mittauksista voidaan todeta, että ne onnistuivat odotettua paremmin ja tuottivat rohkaisevia tuloksia AC-boosterin puolesta. Pienillä paineilla avauskondensaattorien minimilatausajat eivät ole kovinkaan suuria, mutta suurilla paineilla ne saattavat olla ongelmallisen pitkiä. Suurilla paineilla voisikin pitovirtaa kasvattaa hieman, jolloin latausaika lyhenisi. Tällöin tehonkulutus ja sulku-aika tosin kasvaisivat hieman, mutta nimenomaan suurilla paineilla sulkuajat ovat jo valmiiksi pieniä, joten haitta ei olisi kovinkaan suuri. Venttiilin vasteajat ovat myös parempia, kuin aiemmin käytetyillä boostereilla. Mittausten aikana huomattiin tehollähteenä käytetyn vahvistimen kuumenevan hieman. Tämän arveltiin johtuvan siitä, että lineaarinen audiovahvistin ei osaa ottaa vastaan vaihtojännitteen negatiivisella puolijaksolla palautuvaa energiaa, vaan kuluttaa sen lämmöksi. Tämä lisää piirin energiankulutusta huomattavasti, mutta paremmin soveltuva tehollähde on luultavasti mahdollista toteuttaa. Hyvä tulos on avauskondensaattorin kapasitanssin vaikutus vasteaikoihin, joka puoltaa fyysisestikin pienemmän kondensaattorin käyttöä, mikä edesauttaa piirilevyn suunnittelua.

6 YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUS

Tässä työssä tutkittiin ja kehitettiin digitaalihuylisessa PNM-koodatussa venttiilipaketissa käytettävän miniatyrisoidun on/off -venttiilin ohjauselektronikkaa. Venttiilin nopeuttamisen ja tehonkulutuksen vähentämisen periaatteita esitettiin ohjauselektronikan osalta. Ohjauselektronikan integroinnin mahdollisuutta PNM-koodattuun venttiilipakettiin tutkittiin. Boosteripiirien pääteasteita simuloitiin ja vertailtiin niiden ominaisuuksia keskenään. Huomattiin, että eri tavoilla saadaan aikaan lähes samanlaisia tuloksia venttiilin kelan virtakäyrän ja piirin tehonkulutuksen kannalta, joten tärkeimmäksi tekijäksi muodostui toteutettavan piirin fyysinen koko ja mahdollisuus sen helppoon ohjaukseen. Myös matriisimuotoista ohjauselektronikkaa tutkittiin ja simuloitiin, mutta sen todettiin olevan hankalasti ohjattava vaikka piirin fyysinen toteutus on yksinkertainen.

Työn ohella suunniteltiin ja rakennettiin prototyyppi uudeltaisesta AC-boosterista. Sen ominaisuuksia tutkittiin ja mittauksia tehtiin käyttäen yhtä miniventtiiliä. Venttiilin vasteaikojen todettiin olevan vähintään yhtä hyviä, kuin aiemmin käytetyillä ratkaisuilla ja voitiin todeta AC-boosterin olevan sopiva ratkaisu miniventtiilin ohjaukseen. Kehitetty AC-boosteri perustuu vaihtovirralla ladattavaan kondensaattoriin, jolla venttiili saadaan avattua nopeasti. Piiri tuottaa avauksen jälkeen venttiilin pitovirran ilman erillistä ohjausta. Venttiilin sulku perustuu piirissä olevan kytkimen sisään rakennettuun zenerdiodiin, joka on tarkoitettu induktiivisen kuorman purkuun. AC-boosterin haasteina ovat vielä avauskondensaattorin lataukseen kuluva aika ja jännitelähteenä käytetyn vahvistimen tehonkulutus. Hyviä puolia ovat pieni koko, helppo ohjaus ja tarve vain yhdelle aktiivikomponentille per venttiili. Käytettävältä tehollähteeltäkään ei vaadita suuria piikkitehoja, vaan se voi toimia keskitehon periaatteella.

Jatkotutkimuksen alla olevan 64 venttiiliä sisältävän PNM-koodatun venttiililohkon kehitykseen saatiin rohkaisevia tuloksia. Suunniteltu kahdeksankanavainen piirilevy on luultavasti mahdollista integroida venttiililohkon päälle pienin muutoksin ja sen ohjaus on mahdollista toteuttaa mikrokontrollerilla SPI-väylän kautta. Suunnitellun kahdeksankanavaisen piirilevyn ominaisuudet täytyy kuitenkin vielä testata ja mitata.

6.1 Yhteenveto digitaalihuylisessä venttiilistön ohjauselektronikasta

Vertaillaan vielä yhteenvetona esitettyjen boosteriratkaisujen ominaisuuksia keskenään. Vertailussa ovat yksi- ja kaksikytkimiset PWM-ohjatut piirit, sekä kaksijännitteinen piiri ja AC-boosteri. Taulukossa 6.1 on esitetty boostereiden hyviä ja huonoja puolia. Lisäksi tarkastellaan ohjauksen vaatavuustasoa ja energian-, sekä tehonkulutusta.

Taulukko 6.1 Yhteenveto erilaisten boosterien ominaisuuksista

	Hyvät puolet	Huonot puolet	Ohjaus	Energian- /tehonkulutus
1-kytkin, PWM	Yksinkertainen rakenne	Pitovirta zenerdiodilla	Melko vaativa	Suuri
2-kytkintä, PWM	Mahdollisuus diodisiltaan	Kytkimien määrä	Vaativa, Esiohjauksen kanssa helppo	Pieni
2-jännite	Mahdollisuus diodisiltaan, Ei häiriöitä kytkimestä	Kytkimien määrä, Kaksi jännitelähdettä	Melko helppo, Esiohjauksen kanssa helppo	Pieni
AC-boosteri	Melko yksinkertainen rakenne, Ei tarvetta suurille piikkitehoille	Kondensaattorin latausaika, Sopivan teholähteen toteutus epäselvää	Erittäin helppo	Melko pieni

Yhden kytkimen PWM-ohjattu pääteaste on rakenteeltaan yksinkertainen, mutta pitovirtaa varten käytettävä zenerdiodi kuluttaa tehoa lämmöksi turhan paljon. Erillisen PWM-ohjauksen toteutus jokaista venttiiliä varten on myös hankalaa, kun venttiilien määrä on suuri. Kaksikytkimisen PWM-ohjatun boosterin rakenne on monimutkaisempi, kuin yksikytkimisen ja ohjauksen toteuttaminen on vaativampaa. Esiohjauspiiriä ei luultavasti saisi mahtumaan piirilevyille, joten yhtä venttiiliä kohti tarvittaisiin kaksi ohjaussignaalia. Kaksijännitteinen boosteri ei ole rakenteeltaan yksinkertaisempi, mutta ohjaus on helpompaa ja sen pystyy toteuttamaan helposti vaikkapa SPI-väylän kautta. Kaksijännitteisen boosterin toteutus koko venttiilistölle voisi olla hyvinkin mahdollista sopivien kytkinpiirien avulla. AC-boosterin toteutuksen on todettu jo olevan mahdollista ja sen ohjaus on erittäin helppoa. Sen ominaisuudet eroavat muista perinteisemmistä ratkaisuista melko paljon, joten jatkotutkimusta on syytä tehdä.

6.2 Jatkotutkimusaiheet

Ensimmäinen jatkotutkimuksen aihe on suunnitellun kahdeksankanavaisen piirilevyn testaus ja sen ominaisuuksien mittaaminen. Siinä käytettävien Infineon TLE6220GP piirien sopivuus täytyy varmistaa miniventtiilin avausvirralle sopivaksi. Piireissä on noin 4.5 A kanavakohtainen lineaarinen virtarajoitus, jonka pitäisi riittää täydellään käytettävällä painetasolla, mutta virtarajojen vaihteluväli on mitattava eri kanavien välillä [29]. Lisäksi koko piirin virrankesto tulee selvittää, kun avataan kaikkien neljän kanavan venttiilit samanaikaisesti. Olisi hyvä rakentaa yhden TLE6220PG -piirin sisältävä testilevy, jotta päästään kytkeytymään kaikkiin sen I/O -pinneihin. Tällä piirillä pääsisi testaamaan myöhemmin käytettävää SPI-väylää ja tarkastelemaan piirin ohjauk-

sen aikaisia diagnostiikkaviestejä. Lopullinen testaus kahdeksankanavaisella piirilevyllä tehdään 16-venttiiliä sisältävällä laminoidulla venttiililohkolla.

Mittauksissa huomattiin ongelmia käytetyn lineaarisen audiovahvistimen tehonkeston ja -kulutuksen kohdalla. Vahvistin ei ilmeisesti pysty ottamaan vastaan jännitteen negatiivisella puolijaksolla purettavaa latauskondensaattorin energiaa, vaan tuottaa sen lämmöksi. Uuden teholähteen suunnittelu tai hankinta on siis tarpeen. Teholähde voisi olla esimerkiksi jonkinlainen hakkuriperiaatteella toimiva piiri, jota voisi ohjata suoraan mikrokontrollerin ulostulolla, jolloin teholähteen taajuuden ohjelmoitavuus olisi helppoa.

Miniventtiilin kehitys on edennyt jo neljänteen prototyyppiin. Ensimmäiseen prototyyppiin verrattuna kaksisuuntainen virtaus ja pieni pitoteho, sekä yksinkertainen ja kestävä rakenne ovat hienoja saavutuksia. Ohjauselektronikan kannalta ainoa hankaluuksien aiheuttaja on suuri avausvirta, joka asettaa rajoitteita käytettäville komponenteille. Avausvirran pienentäminen kelan osalta vaatisi kuitenkin induktanssin kasvattamista, mikä hidastaisi venttiiliä. Ilmavälin tai virtauskanavan pienentäminen taas pienentäisi saavutettavaa maksimitilavuusvirtaa. Käytettävää maksimipainettakaan ei haluta rajoittaa. Elektronikan toteutus on onneksi kuitenkin mahdollista suurellakin avausvirralla. Jos venttiilin miniatyrisointia viedään yhä eteenpäin, myös elektronikka on miniatyrisoitava samassa suhteessa. Venttiilin virtavaatimukset pienenevät, jolloin voidaan käyttää pienempiä komponentteja elektronikan osalta, joten ongelmaa ei pitäisi olla, kunhan venttiilin maksimiavausvirta skaalautuu vähintään samassa suhteessa, kuin elektronikka.

Tärkeä kehityksen kohde on myös venttiilien ja piirilevyjen kytkentä toisiinsa. Kun venttiileitä on useita kymmeniä, johdotusten juottaminen piirilevyille vaikeuttaa tuotantoa ja huoltoa huomattavasti. Jos piirilevyllä olisi kontaktipinnat venttiilien kontaktien kohdalla, piirilevyn voisi kiinnittää suoraan venttiililohkon päälle. Koska venttiilit kuitenkin kierretään paikoilleen, ne jäävät kiristettäessä mihin asentoon sattuu, jolloin pieniä kontaktinastoja on hankalaa käyttää. Venttiilien kiinnitystapaa tai venttiilin kantaa voisi kehittää sellaiseksi, että kontaktipinnat jäisivät aina tarkasti halutulle paikalle.

PNM-koodauksen kehityksen huipentumana rakennettava 64-venttiilinen lohko on ollut tämän työn ja muiden aiheeseen viittaavien töiden päämääränä. Suunnittelussa venttiilistössä voidaan käyttää tässä työssä kehitetyn AC-boosterin kahdeksankanavaista piirilevyä pohjaratkaisuna joillakin muutoksilla. Kytkinpiirien ohjaukseen on käytettävä SPI-väylää, jotta säästetään ohjaustietokoneen tai mikrokontrollerin ulostuloja ja tilaa piirilevyllä. Piirilevyn olisi hyvä olla kolme- tai nelikerroksinen, jotta SPI-väylän johdotukset pääsevät kulkemaan kytkinpiiriltä toiselle levyjen välissä. Tavoitteena on, että piirilevyllä olisi vietävä ainoastaan käyttöjännitteet ja SPI-väylän johdotus. jolloin säästetään ohjaustietokoneen tai mikrokontrollerin ulostuloja ja tilaa piirilevyllä. Suunnitellulla venttiilistöllä päästään testaamaan PNM-koodauksen potentiaalia ensimmäistä kertaa kunnolla.

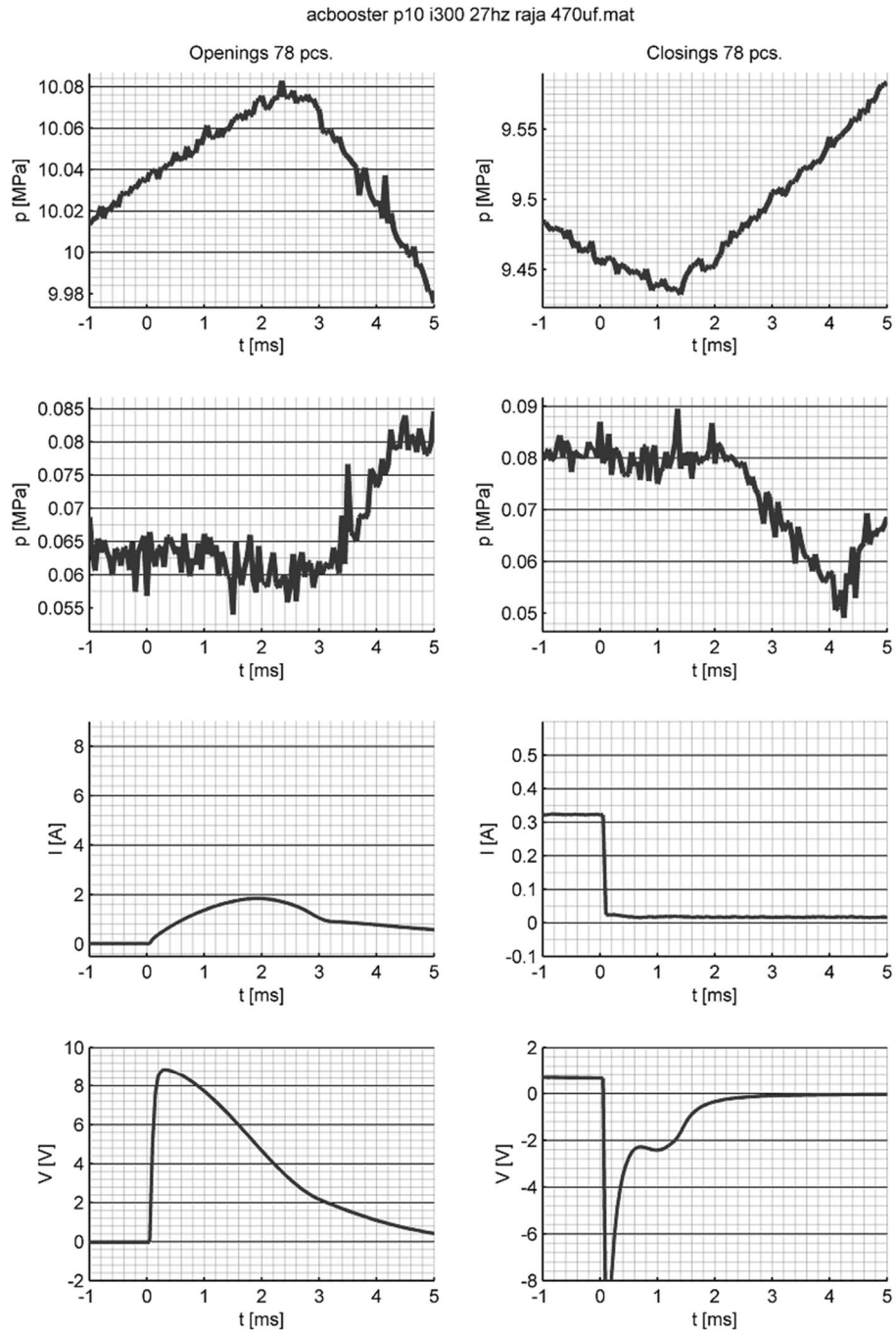
LÄHTEET

- [1] Linjama, M. Fundamentals of Digital Microhydraulics. The Eighth International Fluid Power Conference, Dresden, Germany, 2012 (2012) .
- [2] Paloniitty, M., Karvonen, M., Linjama, M. & Tiainen, T. Laminated manifold for digital hydraulics - principles, challenges and benefits. The Fifth Workshop on Digital Fluid Power, October 24 - 25, 2012, Tampere, Finland (2012) .
- [3] Linjama, M. Digital fluid power - State of the art. The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, May 18-20, 2011, Tampere, Finland (2011) .
- [4] Linjama, M. & Vilenius, M. Digital hydraulics - Towards perfect valve technology. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07, May 21-23, Tampere, Finland (2007) .
- [5] Linjama, M. Energy saving digital hydraulics. The Second Workshop on Digital Fluid Power, 12th – 13th November, 2009, Linz, Austria (2009) .
- [6] Linjama, M. IHA-2570 Digitaalihuuliikka, Luentomateriaali, Huuliikan ja Automaatiikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto. (2009) .
- [7] Linjama, M., Laamanen, A. & Vilenius, M. Is it time for digital hydraulics? The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'03, May 7-9, 2003, Tampere, Finland (2003) .
- [8] Laamanen, A., Linjama, M. & Vilenius, M. Pressure Peak Phenomenon in Digital Hydraulic systems - a Theoretical Study. Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control (PTMC 2005) September 7-9. 2005, Bath, UK. pp.91-104 (2005) .
- [9] Mikkola, J., Ahola, V., Lauttamus, T., Luomaranta, M., Linjama, M. & Vilenius, M. Improving characteristics of on/off solenoid valves. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07, May 21-23, 2007, Tampere, Finland (2007) .
- [10] Karvonen, M., Juhola, M., Ahola, V., Söderlund, L. & Linjama, M. A miniature needle valve. The Third Workshop on Digital Fluid Power, October 13 - 14, 2010, Tampere, Finland (2010) .
- [11] Uusitalo, J., Lauttamus, T., Linjama, M., Söderlund, L., Vilenius, M. & Kettunen, L. Miniaturized bistable seat valve. The Tenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'07, May 21-23, 2007, Tampere, Finland (2007) .
- [12] Uusitalo, J., Söderlund, L., Kettunen, L., Ahola, V. & Linjama, M. Novel bistable hammer valve for digital hydraulics. The Second Workshop on Digital Fluid Power, 12th – 13th November, 2009, Linz, Austria (2009) .
- [13] Paloniitty, M. Miniventtiilin kolmannen prototyypin halkileikkaus. 2013, .

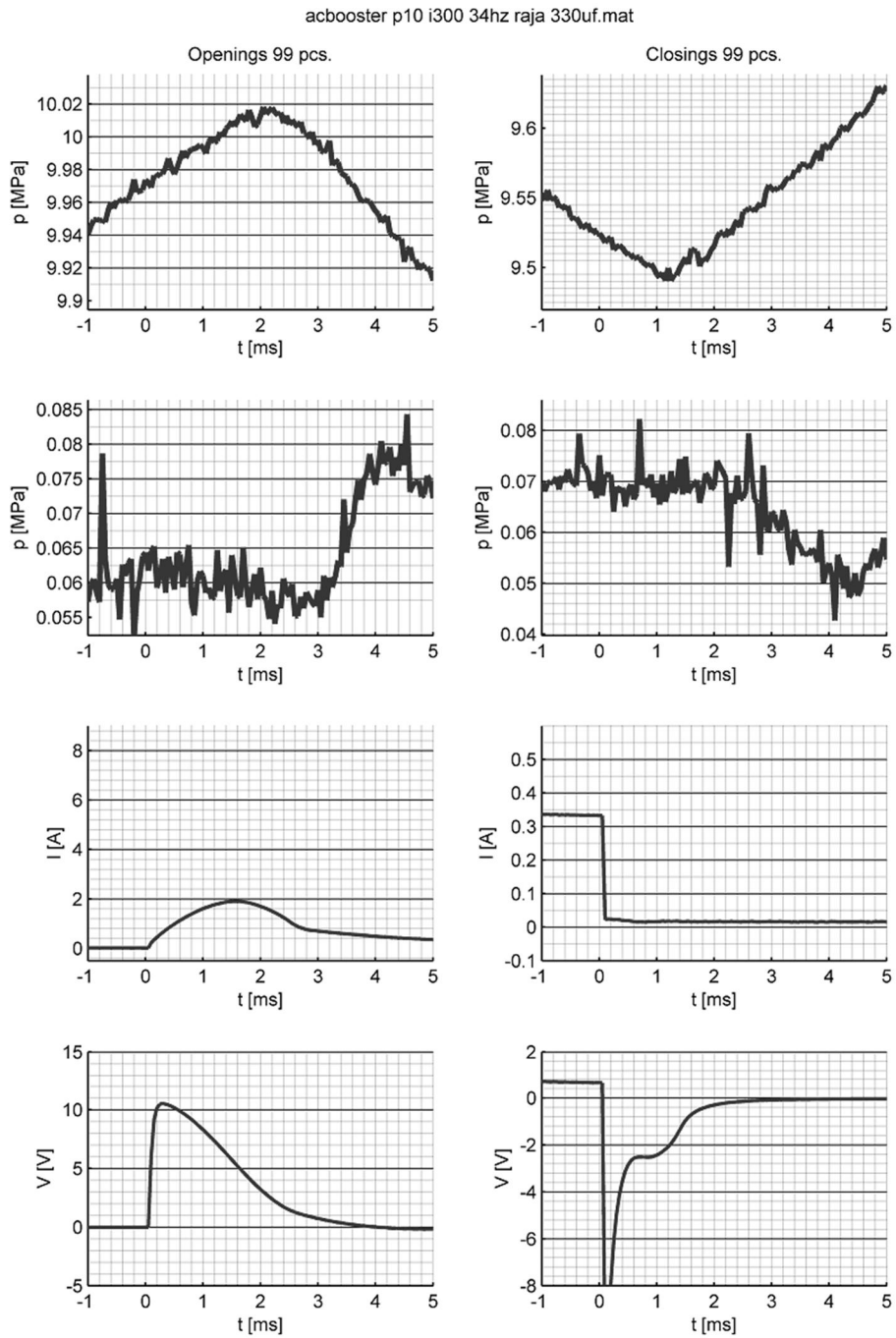
- [14] Karvonen, M., Ketonen, M., Linjama, M. & Puumala, V. Recent advancements in miniature valve development. The Fourth Workshop on Digital Fluid Power, 21st – 22nd September, 2011, Linz, Austria (2011) .
- [15] Puumala, V. Diplomityö: Nopea neulaventtiili digitaalihydrauliikkaan. Tampere (2011) .
- [16] Young, R. & Freedman, R. University physics. 11th ed. 2004, 1714 p.
- [17] Kajima, T. Development of a high-speed solenoid valve-investigation of the energizing circuits. Industrial Electronics, IEEE Transactions on 40 (1993) 4, pp. 428-435.
- [18] Kajima, T. & Kawamura, Y. Development of a high-speed solenoid valve: investigation of solenoids. Industrial Electronics, IEEE Transactions on 42 (1995) 1, pp. 1-8.
- [19] Kajima, T. Dynamic model of the plunger type solenoids at deenergizing state. Magnetics, IEEE Transactions on 31 (1995) 3, pp. 2315-2323.
- [20] Texas Instruments . PWM LOW-SIDE DRIVER (1.5A and 3A) for Solenoids, Coils, Valves, Heaters, and Lamps. 2001, [viitattu 09/2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ds/sbvs029a/sbvs029a.pdf>.
- [21] Karhu, O. 28-kanavaisen boosterikortin päätteesteen piirikaavio. 2013, .
- [22] Du Huang, Hongyuan Ding, Zhaowen Wang & Ronghua Huang Design of drive circuit for GDI injector. Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on, 2011, pp. 5821-5824.
- [23] Zhenjie Liu, Yulong Lei, Yongjun Li, Yucheng Jiao & Sihai Liu Thermal management of Diesel Engine ECU. Natural Computation (ICNC), 2011 Seventh International Conference on, 2011, pp. 2345-2348.
- [24] Linjama, M., Laamanen, A., Pentikäinen, V., Määttä, K., Korkalainen, M., Bostrom, P. & Alexeev, P. Architecture descriptions of a compact and modular digital hydraulic control solution. 2013, .
- [25] Balogh, L. . Design And Application Guide For High Speed MOSFET Gate Drive Circuits. [viitattu 10.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ml/slup169/slup169.pdf>.
- [26] Infineon Technologies AG . TLE6288R, Smart 6 Channel Peak & Hold Switch. 10/2010, [viitattu 11/2013]. Saatavissa: <http://www.infineon.com/dgdl/TLE6288R-Data+Sheet-Infineon-v25.pdf?folderId=db3a3043156fd5730116251ab6c82079&fileId=db3a30432c64a60d012ccae2ad8123bc&ack=t>.
- [27] STMicroelectronics . L9733, Octal self configuring low/high side driver. 2013, [viitattu 11/2013]. Saatavissa: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00052634.pdf>.

- [28] Linear Technology Corporation . 32-Channel 20mA LED Driver with Buck Controller. 4/2013, [viitattu 11/2013]. Saatavissa: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3746fa.pdf>.
- [29] Infineon Technologies AG . Data Sheet TLE 6220 GP, Smart Quad Low-Side Switch. 4/2007, [viitattu 11/2013]. Saatavissa: http://www.infineon.com/dgdl/TLE6220GP_V2_2.pdf?folderId=db3a30431b3e89eb011bb632994f065b&fileId=db3a30431b3e89eb011bb6330f97065c&sd=t.
- [30] Gurski, J. & Quach, L. . Display Technology Overview, Lytica white paper. [viitattu 10.6.2013]. Saatavissa: http://poli.cs.vsb.cz/edu/apps/down/disp_overview.pdf.
- [31] Thomann . Manual: Power amplifier module PM40C. [viitattu 2.10.2013]. Saatavissa: http://images.thomann.de/pics/prod/162094_manual.pdf.
- [32] International Rectifier . Datasheet: IPS01515(S) Fully protected power MOSFET switch. 13.11.2013, [viitattu 10/2013]. Saatavissa: www.irf.com/product-info/datasheets/data/ips0151.pdf.
- [33] Luomaranta, M. IHA-kone boosterin piirikaavio. 2009, .

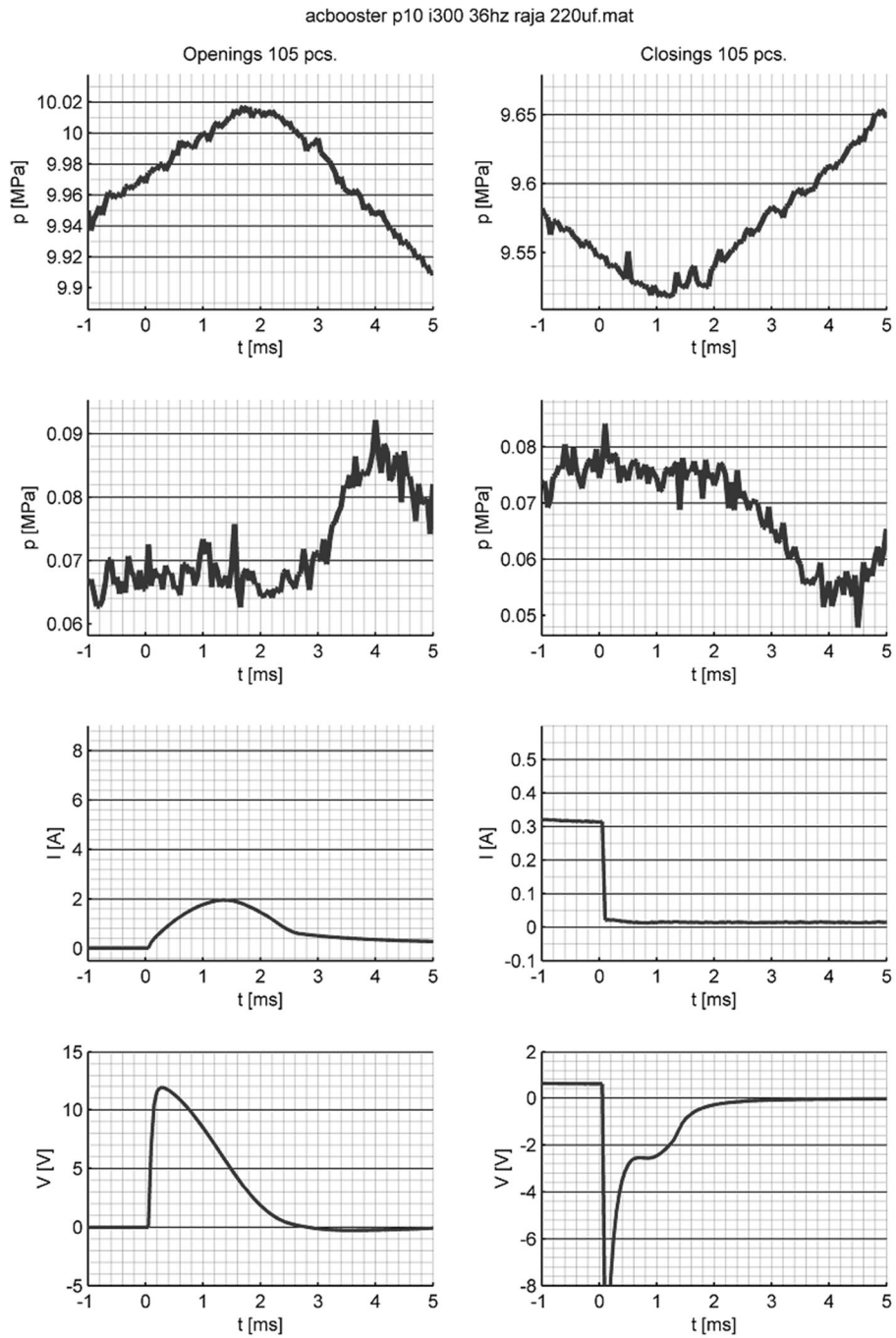
LIITE 2: AC-BOOSTERIN MITTAUSTULOKSET



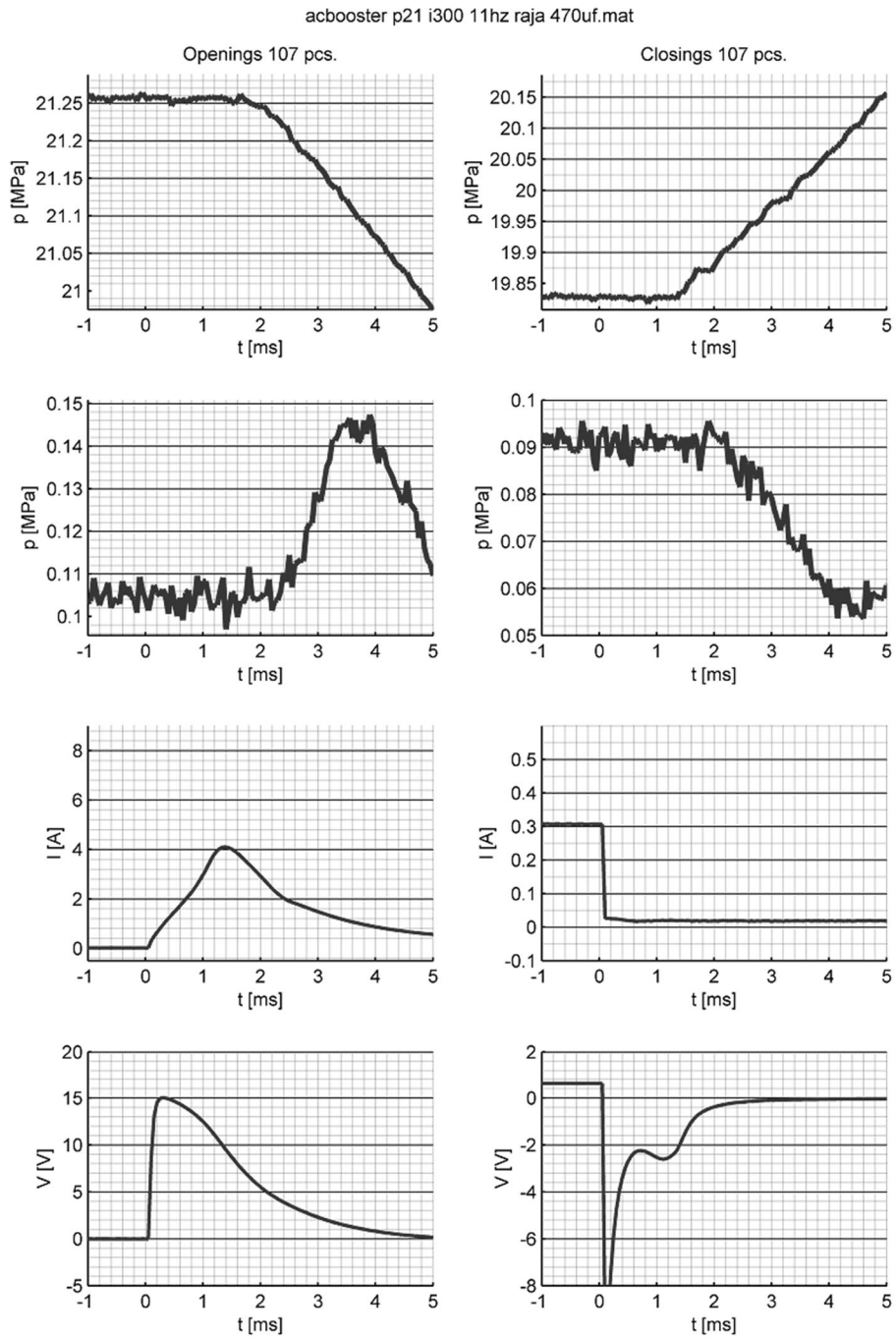
Kuva L2.1 AC-boosterin rajataajuusmittaus: Paine-ero 10 MPa, avauskondensaattori 470 μ F, rajataajuus 27 Hz, latausaika 18 ms



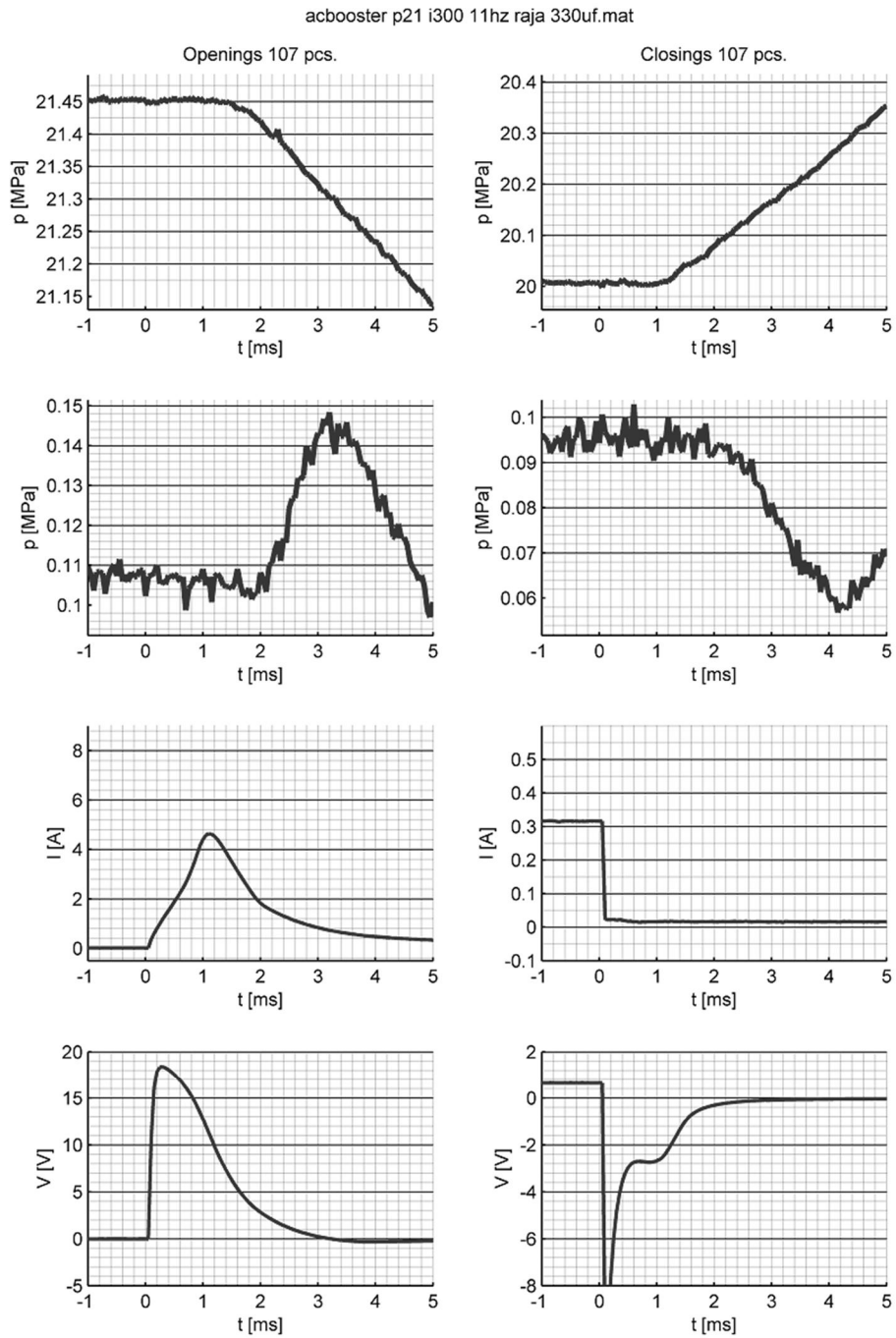
Kuva L2.2 AC-boosterin rajataajuusmittaus: Paine-ero 10 MPa, avauskondensaattori 330 μ F, rajataajuus 34 Hz, latausaika 15 ms



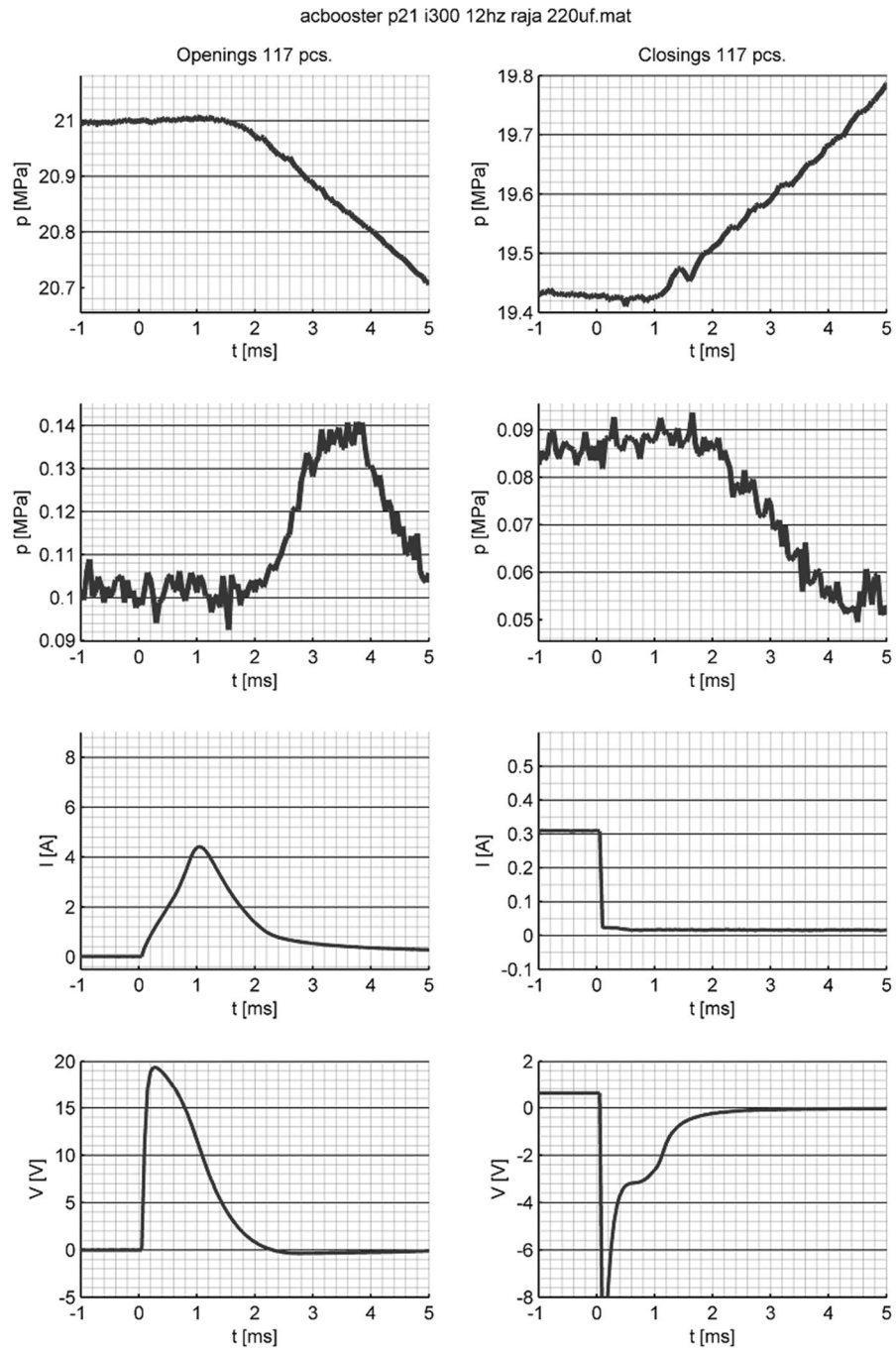
Kuva L2.3 AC-boosterin rajataajuusmittaus: Paine-ero 10 MPa, avauskondensaattori 220 μ F, rajataajuus 36 Hz, latausaika 13 ms



Kuva L2.4 AC-boosterin rajataajuusmittaus: Paine-ero 21 MPa, avauskondensaattori 470 μ F, rajataajuus 11 Hz, latausaika 45 ms



Kuva L2.5 AC-boosterin rajataajuusmittaus: Paine-ero 21 MPa, avauskondensaattori 330 μ F, rajataajuus 11 Hz, latausaika 45 ms



Kuva L2.6 AC-boosterin rajataajuusmittaus: Paine-ero 21 MPa, avauskondensaattori 220 μ F, rajataajuus 12 Hz, latausaika 42 ms