

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Petteri Mustonen

**AKTIIVISTEN MAGNEETTILAAKEREIDEN
OHJAUSLAITTEISTON VAATIMUSMÄÄRITTELY JA
TOTEUTUS**

Tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen
 Tutkijaopettaja Tuomo Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Petteri Mustonen

Aktiivisten magneettilaakereiden ohjauslaitteiston vaatimusmäärittely ja toteutus

2015

Diplomityö

72 sivua, 17 kuvaa, 16 taulukkoa ja 2 liitettä.

Tarkastajat: Professori Olli Pyrhönen
 Tutkijaopettaja Tuomo Lindh

Hakusanat: magneettilaakeri, tehoelektronikka, säätöjärjestelmä, PLC, kenttäväylä

Aktiivinen magneettilaakeri on järjestelmä joka mahdollistaa pyörivän kappaleen, esimerkiksi sähkökoneen roottorin, leijuttamisen magneettikentässä ilman fyysistä kontaktia vastakappaleiden välillä. Tekniikalla on joitain merkittäviä etuja muihin laakerointijärjestelmiin verrattuna erityisesti suurnopeuksisissa tai puhdastiloissa käytettävissä sähkökäytöissä. Magneettilaakereiden yleistymistä nopeuttaisi ja niiden hintaa laskisi mikäli laakereiden säätöön ja tehonsyöttöön voitaisiin käyttää standardeja teollisuusautomaatiolaitteita erityisesti tätä käyttötarkoitusta varten kehitettyjen laitteiden sijaan.

Tässä työssä luodaan menetelmä määrittää vähimmäisvaatimukset aktiivisen magneettilaakerin säätöalgoritmien suorittamiseen käytetyille säätöjärjestelmälle ja anturoinnille sekä laakerin toimintaan tarvittavalle tehoelektronikalle. Näiden vaatimusten perusteella luodaan katsaus soveltuviin laitteisiin ja kootaan esimerkkikokoonpanot kahdelle erilaiselle magneettilaakeroitavalle kohteelle. Lisäksi työssä esitellään LUT:ssa vuosina 2014-2015 kehitetty magneettilaakerin tehölähdeprototyyppi ja selvitetään edellytykset käyttää laitetta laakerijärjestelmän osana.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Program in Electrical Engineering

Petteri Mustonen

Requirements and implementation of control hardware for an Active Magnetic Bearing

2015

Master's Thesis

72 pages, 17 figures, 16 tables, and 2 appendices.

Examiners: Professor Olli Pyrhönen
 Associate Professor Tuomo Lindh

Keywords: magnetic bearing, power electronics, control system, PLC, fieldbus

Active magnetic bearing is a bearing system that levitates a rotating shaft with electromagnetic actuators without mechanical contact between counterparts. Compared to other bearing systems, it has significant benefits especially in applications that require high rotational speed or specially clean conditions. The downside is that systems usually require usage of expensive proprietary controllers and power electronics. It would be beneficial if the control and the supply of power could be accomplished with standard industrial automation devices.

In this work a method to approximate the minimal requirements for control hardware, sensors and power electronics is introduced. With these requirements, suitable devices to build two different magnetic bearing applications are selected and evaluated. In addition, a magnetic bearing power supply prototype designed and built in LUT is introduced and the suitability of the power supply as a part of magnetic bearing system is evaluated.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston säätö- ja digitaalitekniikan laboratorion magneettilaakeritutkimuksen osana vuoden 2015 aikana.

Haluan kiittää työn tarkastajia Olli Pyrhöstä ja Tuomo Lindhiä mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja arvokkaista neuvoista sen kirjoittamisen aikana. Tämä on ollut opettavainen kokemus. Lisäksi suuri kiitos työhuoneen väelle ja koko tutkimusryhmälle kärsivällisyydestä vastailta kysymyksiini itselleni uuden aiheen äärellä.

Lisäksi suuri kiitos perheelleni ja kaikille ystäväilleni saamastani kannustuksesta ja tuesta.

Kongens Lyngby, Tanska, 25. lokakuuta 2015

Petteri Mustonen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	10
1.2	Työn rakenne	11
2	MAGNEETTILAAKERIJÄRJESTELMÄT	12
2.1	Magneettilaakerijärjestelmän komponentit	12
2.1.1	Paikkasäätö	15
2.1.2	Paikanmittaus	19
2.1.3	Teholähde ja virtasäätö	20
2.2	Laakerielektroniikan vaatimusmäärittely	23
2.2.1	Alikriittinen järjestelmä	24
2.2.2	Ylikriittinen järjestelmä	26
3	LAAKERIELEKTRONIIKKA	28
3.1	Säätöjärjestelmä	28
3.1.1	PLC-laitteet	30
3.1.2	PC-pohjaiset ratkaisut	32
3.1.3	Modulaariset sulautetut ohjaimet	35
3.2	Tiedonsiirto	37
3.2.1	CAN-väylä	39
3.2.2	EtherCAT	41
3.2.3	Hajautetut A/D-muuntimet	42
3.3	Paikka-anturit	43
3.3.1	Induktiiviset anturit	44
3.3.2	Pyörrevirta-anturit	45
3.3.3	Kapasitiiviset anturit	47
3.4	Teholähteet	48
4	MAGNEETTILAAKERIN TEHOLÄHDEPROTOTYYPPI	51
4.1	Rakenne	51
4.1.1	Intelligent Power Module	52
4.1.2	Sulautettu ohjelmisto	54
4.2	Laitteen suorituskyvyn arviointi	54
4.3	Kehitysehdotukset	56
4.4	Vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen	58
5	ESITYS MAGNEETTILAAKERIJÄRJESTELMÄN RAKENTEEKSI	61

6 YHTEENVETO**65****LÄHTEET****67****LIITTEET**

Liite 1: Esimerkki säätöjärjestelmän tilamallista

Liite 2: Teholähdeprototyypin kytkentäkaaviot ja toiminta

MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinnät

A	pinta-ala
b	sananpituus
f	taaajuus
F	voima
I	virta
k, K	kerroin, alaindeksi määrittelee
l	etäisyys
L	induktanssi
m	massa
n	lukumäärä
N	käämikierrosten lukumäärä
s	Laplace-muuttuja
t	aika
U	jännite
μ	Permeabiliteetti
τ	aikavakio
ϕ	kulma
ω	kulmanopeus
Ω	Pyörimisnopeus

Alaindeksit

b	bias
BW	kaistanleveys
DC	tasavirta
FLOP	liukulukuoperaatio
c	ohjaus
ch	kanava
g	ilmaväli
i	tulo
max	suurin
n	tilamuuttuja
o	lähtö
pp	peak to peak
s	näytteistys-

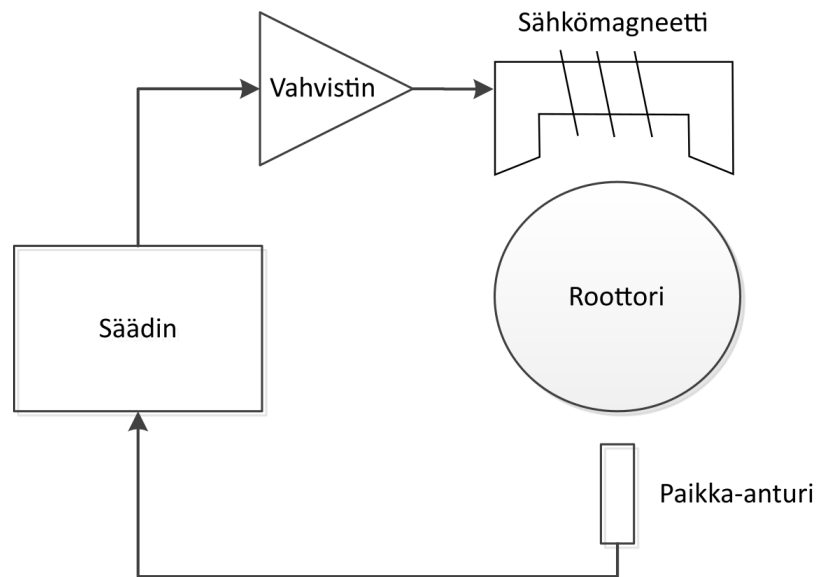
x	koordinaattiakseli x
y	koordinaattiakseli y

Lyhenteet

A/D	Analogia/Digitaali
AMB	Active Magnetic Bearing
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CAN	Controller Area Network
CEN	European Committee for Standardization
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
DSP	Digital Signal Processor
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
I/O	Input/Output
IP	Internet Protocol
IPM	Integrated Power Module
ISO	International Organization of Standardization
LSB	Least Significant Bit
LUT	Lappeenranta University of Technology
OSI	Open Systems Interconnection
PID	Säädintyyppi, Proportional-Integral-Derivative
PLC	Programmable Logic Controller
PWM	Pulse Width Modulation
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
TCP	Transmission Control Protocol
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto

1 JOHDANTO

Magneettilaakereiden avulla on mahdollista kannatella ferromagneettista kappaletta, esimerkiksi sähkökoneen roottoria magneettikentässä ilman fyysistä kontaktia vastakappaleiden välillä. Pelkkien kestopagneettien avulla haluttua lopputulosta ei kuitenkaan voida saavuttaa sillä jo varhain 1800-luvulla esitetyn Earnshaw'n teoreeman mukaan stabiili ferromagneettisen kappaleen levitaatio muuttumattomassa magneettikentässä ei ole mahdollista (Earnshaw 1842). Kun otetaan huomioon lisäksi roottorin pyörimisliikkeestä, epätasapainosta ja värähtelystä aiheutuvat voimat, on selvää että stabiilin järjestelmän toteuttamiseen tarvitaan jatkuvaa paikanseurantaa ja magneettikenttien säätöä mittaustulosten perusteella. Tällaista kuvassa 1.1 esitettyä takaisin-kytketyllä säädöllä varustettua sähkömagneetteihin perustuvaa järjestelmää kutsutaan aktiiviseksi magneettilaakeriksi (AMB, Active Magnetic Bearing).



Kuva 1.1. Yksinkertaistettu periaatekuva yhden vapausasteen aktiivisesta magneettilaakerista.

Eräs magneettilaakereiden suurimmista eduista perinteisiin mekaanisiin laakeriratkaisuihin kuten liukulaakereihin tai vierintälaakereihin verrattuna on fyysisestä kontaktista aiheutuvan kitkan puuttuminen. Tämän ansiosta laakerin häviöt ja mekaaninen kuluminen ovat hyvin pieniä ja laakerit ovat käytännössä huoltovapaita. Muihin kosketuksettomiin laakereihin kuten neste- ja kaasulaakereihin verrattuna niiden etuna on myös mahdollisuus vaikuttaa pyörivän kappaleen dynamiikkaan, esimerkiksi jäykkyyteen ja vaimennukseen. Nämä tekijät yhdessä mahdollistavat suurempien pyörimisnopeuksien käytön kuin perinteisillä laakereilla olisi luotettavasti mahdollista. Toisaal-

ta magneettilaakereissa ei ole tarvetta myöskään voiteluaineille tai muille väliaineille joten niitä hyödynnetään suurnopeustekniikan lisäksi laajalti myös puhdastiloissa ja lääketieteellisissä laitteissa. (ISO 2012; Schweitzer ja Maslen 2009)

Merkittävistä eduista huolimatta magneettilaakerijärjestelmilläkin on omat huonot puolensa. Hankintakustannukset ovat suuret sillä järjestelmät suunnitellaan yleensä yksitellen jokaiseen sovelluskohteeseen ja laakerijärjestelmien mekatronisen luonteen takia suunnittelu vaatii tietoja monilta insinööritieteen aloilta. (Schweitzer ja Maslen 2009) Maagneettilaakereiden standardoinnin taso on pitkään ollut alhainen ja vasta viime vuosina markkinoille on tullut joitain standardikokoisia suurnopeusmoottoriin integroituja magneettilaakereita. Magneettilaakereita käsittelevä ISO 14839-4-standardi listaa huonoina puolina verrattuna mekaaniseen kontaktiin perustuviin laakereihin lisäksi heikomman kuormitettavuuden, monimutkaisen säätöjärjestelmän ja tarpeen käyttää häiriöiden varalta joka tapauksessa mekaanisia turvalaakereita. (ISO 2012)

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Kuvan 1.1 mukaisesti aktiivinen magneettilaakerijärjestelmä vaatii varsinaisten magneettikäämien lisäksi lukuisia oheiskomponentteja: ainakin laakeroitavan kappaleen paikkaa mittaavia paikka-antureita, käämeille virtaa syöttäviä teholähteitä sekä ohjauslogiikan, joka suorittaa tarvittavia säätöalgoritmeja. Markkinoilla olevat järjestelmät ovat perinteisesti olleet kalliita, yhtä spesifistä käyttötarkoitusta varten räätälöityjä laitteistoja. Näiltä komponenteilta ei kuitenkaan vaadita mitään niin erityistä tekniikkaa tai toiminnallisuutta, etteikö kokonaisen magneettilaakerijärjestelmän rakentaminen olisi mahdollista käyttäen kaupallisia teollisuusautomaatiolaitteita.

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa on tutkittu suurnopeustekniikkaa ja magneettilaakerijärjestelmiä useissa hankkeissa 1990-luvulta lähtien. Tämän työn tarkoituksena on magneettilaakeritekniikan kaupallistamishankkeeseen liittyen määrittää vähimmäisvaatimukset magneettilaakerin ohjausjärjestelmälle eri sovelluskohteissa ja luoda katsaus markkinoilla oleviin soveltuviin osakomponentteihin. Tämän perusteella suunnitellaan ja toteutetaan toimiva ja kilpailukykyinen magneettilaakereiden ohjausjärjestelmä valmiin komponentein.

1.2 Työn rakenne

Työn kappaleessa 2 tutustutaan magneettilaakereiden komponentteihin ja yleisiin ominaisuuksiin sekä esitetään menetelmä laakerielektroniikan mitoittamiselle. Tätä menetelmää sovelletaan käytäntöön mitoittamalla laakerielektroniikka muutamaa eri käyttökohteeseen. Kappaleessa 3 tehdään katsaus markkinoilla oleviin laakerielektroniikkaksi soveltuviin laitteisiin. Lopputuloksena kappaleessa 5 esitetään erilaisia mahdollisia laitekombinaatioita kappaleen 2.2 case-esimerkkien toteuttamiseen. Lisäksi kappaleessa 4 luodaan katsaus LUT:ssa kesällä 2014 kehitettyä teholähdeprototyyppiä, kehitetään sitä edelleen ja tutkitaan mahdollisuuksia hyödyntää laitetta laakerielektroniikan osana.

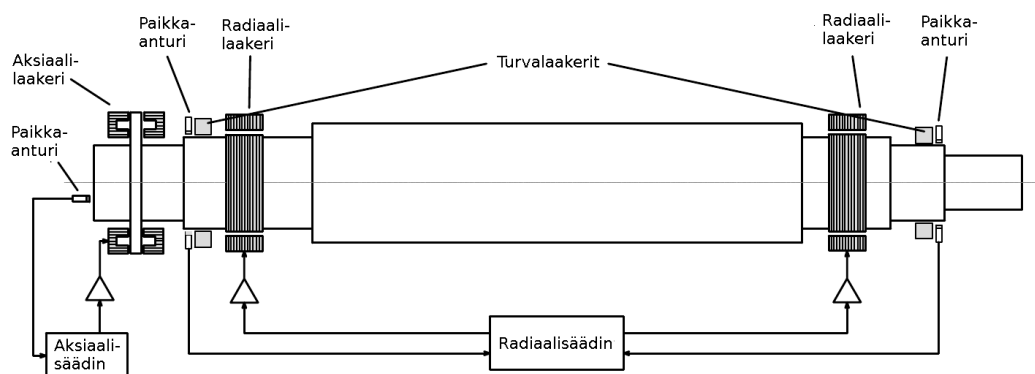
2 MAGNEETTILAAKERIJÄRJESTELMÄT

Tässä luvussa esitetään aktiivisen magneettilaakerin toiminnan peruseriaatteet ja laakerijärjestelmän toteuttamiseen vaadittavan laakerielektronikan komponentit. Lisäksi luodaan karkea ja yksinkertainen tapa arvioida niille asetettavia minimivaatimuksia järjestelmän mekaanisten ja magneettisten ominaisuuksien perusteella.

Termillä *laakerielektronikka* tarkoitetaan tässä työssä laakerijärjestelmän mittaukseen, ohjaukseen ja tehonsyöttöön käytettyjä komponentteja. Se on myös tämän työn painopiste, säätötekniikkaa ja aktuaattoreihin liittyvää sähkömagnetismia käsitellään vain ymmärtämisen kannalta välttämättömin osin.

2.1 Magneettilaakerijärjestelmän komponentit

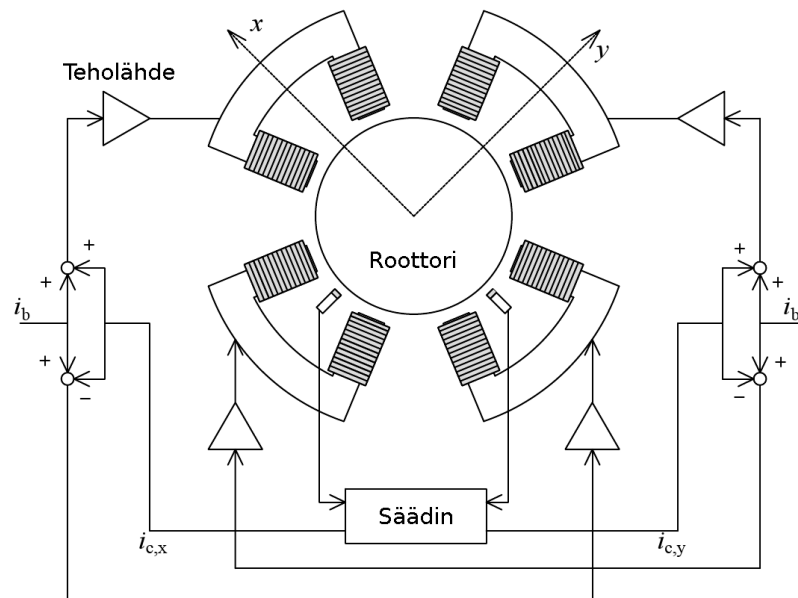
Aktiivinen magneettilaakerointi on mekatroninen järjestelmä, joka jakautuu löyhästi mekaaniseen, sähköiseen ja säätötekniiseen osajärjestelmään. Mekaaninen osajärjestelmä koostuu roottorista, magneettilaakereiden staattoreista, aksiaalilevystä ja turvalaakereista. Sähköiseen osajärjestelmään kuuluvat magneettikäämit ja näiden virransyöttöön käytettävät tehollähteet. Paikka-antureista ja säätöalgoritmien suorittamiseen tarvittavasta tietotekniikasta ja elektronikasta koostuva säätötekniinen osajärjestelmä sitoo koko järjestelmän yhteen. Järjestelmän periaatekuva josta eri komponentit käyvät ilmi on esitetty kuvassa 2.1. (Jastrzebski 2007)



Kuva 2.1. 5 vapausasteen magneettilaakerijärjestelmän periaatekuva. (Hynynen 2011)

Laakerien määrä ja asettelu riippuvat sovelluskohteesta, mutta tässä työssä tarkastellaan ainoastaan kuvan 2.1 mukaista yleisintä kokoonpanoa jossa hieman perinteisten

laakerointijärjestelmien tavoin on radiaaliset laakerit kannattelemassa akselia sen päistä ja lisäksi yksi aksiaalilaakeri rajoittamassa roottorin aksiaalista liikettä. Yksittäisellä sähkömagneetilla voidaan tuottaa ainoastaan vetovoimaa, joten yhden kokonaisen vapausasteen saavuttamiseksi magneetit kytketään pareiksi toistensa vastapuolille. Yhteen radiaalilaakeriin tarvitaan kuvan 2.2 mukaisesti kaksi tällaista paria, jolloin roottorin sijaintia pystytään ohjaamaan kahdessa eri vapausasteessa eli xy-tasossa. Aksiaalilaakeri tuottaa ainoastaan akselin kanssa yhdensuuntaista voimaa, joten siihen riittää yksi magneettipari. Kokoonpanolla voidaan siis säätää viittä eri vapausastetta, joten roottorin asentoa pitää seurata 5 paikanmittauksella, yksittäisiä sähkömagneetteja on 10. (Lantto 1999; Schweitzer ja Maslen 2009)



Kuva 2.2. Radiaalisen magneettilaakerin periaatekuva. (Hynynen 2011)

Sähkömagnetismin teorioiden mukaisesti laakerin roottoriin aiheuttama voima riippuu ilmavälissä vallitsevasta vuontiheydestä käämeissä kulkevan virran funktiona. Esimerkiksi koordinaatiston x-suunnassa voiman voidaan approksimoida olevan

$$F_b = \frac{\mu_0 (N i_u)^2}{(l_g - k_p x)^2} A_p k_p - \frac{\mu_0 (N i_d)^2}{(l_g + k_p x)^2} A_p k_p \quad (2.1)$$

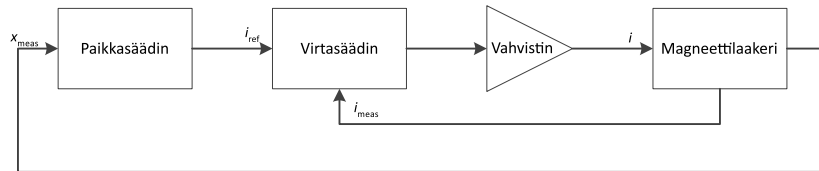
missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, N navan käämikierrosten lukumäärä, i_u ja i_d käämien virrat, l_g ilmaväli, k_p napakerroin, x roottorin paikka laakerin keskipisteen suhteen x-suunnassa ja A_p magneetin yhden navan poikkipinta-ala. Napakerroin riippuu laakerin vierekkäisten staattorihampaiden välisestä kulmasta α yhtälön $k_p = \cos \alpha$ mukaisesti, 8-napaiselle staattorille se on 0,924. (Antila 1998)

Yhtälön (2.1) mukainen virran ja magneettien tuottaman voiman suhde on kuitenkin hyvin epälineaarinen. Lineaarisiin malleihin perustuvien säätötekniikan työkalujen käytön mahdollistamiseksi toimilaite yleensä linearisoidaan haluttuun toimintapisteeseen biasointi- eli esimagnetointivirralla i_{bias} kuvan 2.2 mukaisesti. Biasointivirta johdetaan vastakkaisilla puolilla roottoria sijaitseviin sähkömagneetteihin ja halutun suuntaisen voimavaikutus saadaan tämän jälkeen aikaan johtamalla ohjausvirta i_c vastakkaissuuntaisena vastakkaisiin käämeihin. Kun vielä roottorin sijainnista aiheutuva epälineaarisuus oletetaan olemattomaksi eli ilmaväli huomattavasti roottorin siirtymiä pidemmäksi muodostuu laakerin tuottamaksi kokonaisvoimaksi

$$F_b = \frac{4\mu_0 i_{bias} N^2 A_p k_p}{l_g^2} i_c + \frac{4\mu_0 i_{bias}^2 N^2 A_p k_p^2}{l_g^3} x = K_i i_c + K_s x \quad (2.2)$$

missä kerrointa K_i kutsutaan laakerin virtajäykkyyskerroimeksi ja kerrointa K_s laakerin paikkajäykkyyskerroimeksi. Nämä yhtälöt ovat luonnollisesti vain approksimaatioita, esimerkiksi raudan magneettisen kyllästymisen vaikutusta ei ole otettu huomioon. Tarkempi mallinnus on mahdollista käyttäen numeerisia menetelmiä kuten elementtimenetelmää (FEM) tai reluktanssiverkkomenetelmää. (Antila 1998; Larjo 2006)

Säätöteknisesti magneettilaakerijärjestelmät tyypillisesti jaetaan kuvan 2.3 mukaisesti kahteen sisäkkäiseen säätösilmukkaan: ulomman silmukan muodostavaan paikkasäätöön ja sisemmän silmukan muodostavaan virtasäätöön. Paikkasäätimessä tulona on paikka-anturin arvo ja lähtönä virran ohjearvo ja säädön tavoitteena saada roottori pyörimään hallittus rataaa pitkin. Virtasäädin vastaavasti pyrkii säätämään kunkin käämin virran oloarvon paikkasäätimeltä saadun ohjearvon mukaiseksi virtamittauksen perusteella.



Kuva 2.3. Magneettilaakerin säädön lohkokkaavio.

Paikkasäätimenä voidaan yksinkertaisimmissa, jäykän roottorin tapauksissa käyttää akselikohtaista PID-säädintä. Suurempien pyörimisnopeuksien aiheuttaman roottorin jouston asettamat vaatimukset dynamiikan hallitsemiseen tekevät PID-säätimen käytöstä kuitenkin huomattavan monimutkaista. Tämä on johtanut erinäisten modernien säätötekniikoiden soveltamiseen käyttötarkoituksessa, tärkeimpinä LQG-säätö, μ -synteesi ja H_∞ -säätö. (Yoon, Lin ja Allaire 2013)

Sisempi säätösilmukka on yleensä säätöteknisesti huomattavasti ulompaa helpompi toteuttaa. Virtasäätimenä voidaan käyttää esimerkiksi myötäkytkenällä varustettua P-tyypin säädintä, mahdollinen jatkuvuustilan virhe voidaan kompensoida ulomassa säätösilmukassa joka tyypillisesti on integroiva (Larjo 2006). Samoin riittävän nopea epälineaarinen hystereesissäädin tarjoaa riittävän suorituskyvyn (Chiba et al. 2005). Virtasäädön sijaan sisempänä säätimenä voidaan käyttää myös paremman suorituskyvyn tarjoavia laskennallisiin malleihin perustuvia säätimiä, joissa säädettävänä suureena on esimerkiksi voima tai vuo. (Zingerli ja Kolar 2010)

2.1.1 Paikkasäätö

Magneettilaakerijärjestelmälle tyypilliset korkeat näytteistystaajuudet ja suuret rinnakkain siirrettävät ja prosessoitavat tietomäärät tekevät siitä yhä nykyäänkin vaativan kohteen sen säätämiseen käytettävälle laitteistolle. Ensimmäiset käytössä olleet magneettilaakerijärjestelmät olikin toteutettu kokonaan analogiaelektroniiikan keinoin. Digitaalisäädön kiistattomista eduista huolimatta vasta 1990-luvun kuluessa digitaalisten signaaliprosessorien laskentatehon sekä ohjelmoitavien logiikkapiirien kapasiteetin kehittyminen mahdollisti siirtymisen digitaaliseen säätöön. Nykyään käytännössä kaikki uudet magneettilaakerijärjestelmät toteutetaan kokonaan digitaalisella säädöllä joten on luonnollista, että tässäkin työssä keskitytään ainoastaan järjestelmiin joissa mittaus-signaalit muunnetaan digitaalisiksi mahdollisimman aikaisessa vaiheessa signaaliketjua ja kaikki signaalinkäsittely sekä säätötekniikka toteutetaan digitaalisesti.

Mittaus- ja ohjauselektronikalle asetettavat vaatimukset vaihtelevat huomattavasti riippuen laakeroitavan järjestelmän mekaanisista ominaisuuksista. Merkittävimmät suunnittelun lähtökohdat ovat roottorin massa ja pyörimisnopeus, jotka määrittävät magneeteilta vaadittavaa voimaa ja paikkasäätimeltä vaadittavaa kaistanleveyttä. Kaistanleveys taas edelleen määrittelee tarvittavaa laskentatehoa ja tiedonsiirtoväylien kapasiteettia. Magneeteilta vaadittava voima ja haluttu virtasäädön kaistanleveys taas asettavat vaatimukset teholähteen ominaisuuksille.

Eräs merkittävä seikka on järjestelmän yli- tai alikriittisyys: alikriittisessä järjestelmässä roottorin pyörimisnopeus on pienempi kuin sen ensimmäinen kriittinen nopeus, ylikriittisessä vastaavasti suurempi. Ylikriittisissä järjestelmissä joudutaan paikkasäätöä suunniteltaessa ja säätöjärjestelmää mitoitettaessa ottamaan huomioon roottorin joustavuus ja värähtelyt kriittisillä pyörimisnopeuksilla. Tämä paitsi tekee säätösuunnittelusta monimutkaisempaa jäykän kappaleen paikkasäätöön verrattuna, kasvattaa

se myös säädön toteuttamiseen käytettävän järjestelmän suorituskykyvaatimuksia. (Jastrzebski 2007)

Digitaalisesti säädetyn magneettilaakerijärjestelmän näytteistystaajuudesta vaikuttaa kirjallisuuden perusteella olevan monia eri mielipiteitä, joita ei kuitenkaan monesti ole perusteltu lainkaan. Schweitzer mainitsee kirjassaan, että näytteistystaajuutta ei kannata valita liian korkeaksi signaalien kohinaan liittyvien ongelmien vuoksi ja toteaa lähes kaikkien standardien magneettilaakereiden näytteistystaajuuden olevan 5 ja 10 kHz välillä. (Schweitzer ja Maslen 2009) Toisaalta myös magneettilaakereita käsittelevän ISO 14839-4-standardin mukaan 10 kHz on riittävä näytteistystaajuus käytännössä kaikille magneettilaakerisovelluksille (ISO 2012). Varsinaista perusteltua vähimmäisvaatimusta näytteistystaajuudelle ei kuitenkaan löydy vaikka se on eräs merkittävimmistä järjestelmän laskentatehovaatimusta määrittävistä tunnusluvuista.

Digitaalisen signaalinkäsittelyn periaatteiden mukaan näytteistettävästä signaalista tulisi ottaa noin 6-12 näytettä sen nousuajan aikana. Käytyjen keskustelujen (Smirnov 2015) perusteella tätä voidaan suoraan soveltaa magneettilaakerijärjestelmään siten, että laakeroidun roottorin asentoa täytyy mitata ja korjata 6-12 kertaa yhden pyörähdysajan aikana. Näin ollen pienin mahdollinen näytteistystaajuus

$$f_s = \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{60}{\Omega} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

missä Ω on pyörimisnopeus kierroksina minuutissa. Tällöin esimerkiksi 10000 kierrosta minuutissa pyörivän roottorin miniminäytteistystaajuudeksi saataisiin 1000 Hz eli miniminäytteistysaika olisi $1/f_s = 1$ ms.

Säätöalgoritmien suorittamiseen kuluvaa aikaa voidaan arvioida tarvittavien liukuluukuoperaatioiden lukumäärän perusteella. Käytettäessä lineaarista säätöä, voidaan koko säätöjärjestelmä esittää tilayhtälöinä matriisimuodossa siten, että

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_n &= \mathbf{A}_{n \times n} \mathbf{x}_{n \times 1} + \mathbf{B}_{n \times i} \mathbf{u}_{i \times 1} \\ \mathbf{y}_o &= \mathbf{C}_{o \times n} \mathbf{x}_{n \times 1} + \mathbf{D}_{o \times i} \mathbf{u}_{i \times 1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

missä n on säätimen tilamuuttujien lukumäärä, i tulojen lukumäärä ja o lähtöjen lukumäärä. Matriisiyhtälön ratkaisuun tarvittavien laskuoperaatioiden lukumäärä saadaan karkeasti yhtälön

$$n_{\text{FLOP}} = n_n + 2(n_n - 1) + n_n n_i + n_n n_o + n_o n_i \quad (2.5)$$

avulla kun oletetaan että systeemimatriisi \mathbf{A} on "bi-quad"-muodossa eli lohkodeagonaa-

linen siten, että ainoat nolasta poikkeavat elementit sijaitsevat 2×2 -lohkoina matriisiin päädiagonaalilla. (Schweitzer ja Maslen 2009; Smirnov 2015)

Tilamuuttujien lukumäärä riippuu käytetyn säätimen tyypistä ja säädöltä vaadittavasta suoritukyvyistä. Yksinkertaisimmassa tapauksessa, jossa jokaista vapausastetta säädetään erikseen PID-säätimellä lisää jokainen vapausaste tilamuuttujien lukumäärää kahdella. Neljän vapausasteen radiaalilaakerissa tilamuuttujia olisi siis 8. Ylikriittisessä järjestelmässä lisäksi jokainen taivutusmuoto lisää tilamuuttujien lukumäärää neljällä. Lisäksi tilamatriisiin voidaan sisällyttää laakerin aktuaattorimalli, jolloin tilamuuttujien lukumäärä lisääntyy yhdellä tuloa kohden.

Esimerkiksi Smirnovin väitöskirjassa käsitellyssä jäykän roottorin säädössä on käytetty radiaalilaakerille aktuaattorimallin sisältävää tilamallia, jossa on 12 tilamuuttujaa, 4 tuloa ja 8 lähtöä (Smirnov 2012). Aksiaalilaakerisäätimellä vastaavasti olisi vähintään 2 tilamuuttujaa, 1 tulo ja 2 lähtöä. Käytännössä ylikriittisen järjestelmän säätöjärjestelmän vaatimuksia määriteltessä on hyvä varautua radiaalilaakerin säädössä 20-30 ja aksiaalilaakerin säädössä 8-12 tilamuuttujaan. Esimerkki tilamatriiseista on esitetty liitteessä 1.

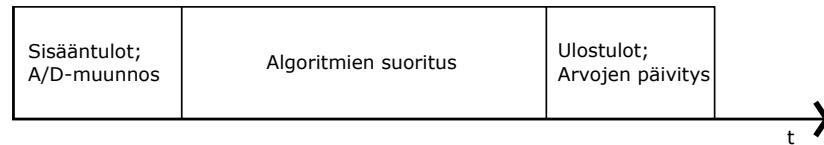
I/O-toimintaan kuluva aika riippuu pääasiassa käytettyjen tiedonsiirtoväylien suorituskyvystä, ja optimitilanteessa se on mahdollisimman lyhyt. Tuloja luettaessa ja lähtöjä päivitettäessä on muistettava myös, että sekä analogisten että digitaalisten liityntöjen päivittämiseen kuluu aina jokin äärellinen viive. Käytetyn ohjelmiston rakenteesta riippuu, voidaanko esimerkiksi tietoa siirtää rinnakkain algoritmin suorittamisen kanssa, huonoimmassa mahdollisessa tilanteessa I/O-toimintaan olisi siis käytettävissä aikaa noin näytteitysaika vähennettynä algoritmien suorittamiseen ja A/D-muunnokseen kuluvalle ajalle. Esimerkiksi paikkamittauksen lukemisessa ja virtaohjeen päivityksessä tarvittavaa todellista tiedonsiirtokapasiteettia voidaan arvioida yhtälöllä

$$BR_{\text{data}} = f_s \cdot b \cdot n_{\text{ch}} \quad (2.6)$$

missä b on käytetty sananpituus ja n_{ch} kanavien (tulojen/lähtöjen) lukumäärä. Yhtälöä käytettäessä on syytä muistaa, että käytetyistä protokollista riippuen koko tiedonsiirtomedian siirtokapasiteetti ei ole hyötydatan käytössä, osa kapasiteetista kuluu aina protokollaan liittyvän metatiedon siirtoon.

Kuvan 2.4 mukaisesti tyypillinen säätösykli koostuu edellämainitun mukaisesti algoritmien suorittamisesta, mittaustiedon lukemisesta A/D-muunnimelta ja laskettujen säätösuureiden päivittämisestä toimilaitteelle. Paikkasäätimen ja käytetyn ohjausjär-

jestelmän tulee olla niin suorituskykyinen, että se pystyy aloittamaan uuden säätösyklin suorittamisen vähintään yhtälön (2.3) mukaisella taajuudella. Toimintojen suoritusjärjestystä vaihtamalla on mahdollista vaikuttaa säätimen reaktioaikaan ja aikatason synkronointivirheeseen.



Kuva 2.4. Tyypillinen säätösykli.

Digitaalisäädön teorian näkökulmasta tarkasteltuna paras tulos säädössä saavutettaisiin, kun kaikki näytteistys, laskenta ja ulostulojen päivitys suoritettaisiin samanaikaisesti ja sykli aika olisi täysin deterministinen. Käytännössä näin ei kuitenkaan koskaan ole, vaan toiminnot suoritetaan peräkkäin ja kommunikointiin sekä laskentaan kuluva aika aiheuttavat järjestelmään viivettä. Viive taas aiheuttaa säätöjärjestelmän vaihevaran pienenemistä joka edelleen heikentää järjestelmän stabiiliutta ja suorituskykyä. Esimerkiksi Nilssonin (1998) väitöskirjassa todetaan suurimmaksi turvallisiksi säätöjärjestelmän aiheuttamaksi vaihesiirroksi $11^\circ \leq \phi \leq 34^\circ$ kun näytteistysaika on vastaavasti valittu siten, että $0.2 \leq \omega t_s \leq 0.6$ missä ω on takaisinkytketyn järjestelmän luonnollinen kulmataajuus, t_s on näytteistysaika ja viive enintään näytteistysajan pituinen. Mikäli viive joudutaan mitoittamaan näytteistysaikaa pidemmäksi, muuttuu säätöalgoritmien toteuttaminen ja analysointi hankalammaksi. (Nilsson 1998; Åström ja Wittenmark 1997)

Oletetaan tässä työssä, että viiveen aiheuttaman vaihesiirron on oltava aina alle 30° . Laplace-tasossa viive esitetään viivetermin

$$D(s) = e^{-s\tau} \Rightarrow D(j\omega) = e^{-j\omega\tau} \quad (2.7)$$

avulla, missä s on Laplace-muuttuja, τ on viiveaikavakio, j on imaginääriyksikkö ja ω on kulmataajuus. Suurinta sallittua viivettä arvioitaessa voidaan taajuutena pitää mitasignaalin kaistanleveyttä, sillä viive pienenee tästä pienempiä taajuuskomponentteja käsitellessä. Kun halutaan tarkastella viiveen aiheuttaman vaihesiirron ja viiveaikavakion suhdetta, voidaan Eulerin lauseen ja yhtälön (2.7) perusteella kirjoittaa

$$\angle = \omega\tau = 2\pi f\tau \Rightarrow \tau = \frac{\angle}{2\pi f}. \quad (2.8)$$

2.1.2 Paikanmittaus

Pääasiallisin paikanmittausantureilta vaadittava ominaisuus on kyky mitata pyörivän kappaleen etäisyyttä kontaktittomasti riittävällä kaistanleveydellä. Muita tärkeitä valinnassa huomioitavia asioita ovat riittävä mitta-alue, herkkyys ja resoluutio sekä kyky toimia sähkömagneettisesti häiriöisessä ympäristössä. (Schweitzer ja Maslen 2009)

Pienimpänä sallittuna kaistanleveytenä voidaan pitää roottorin pyörimistaajuutta. Normaalisti laakeroitavat roottorit ovat aina hieman epäkeskeisiä, eli niiden geometrinen keskipiste ja massakeskipiste ovat hieman eri paikassa. Säätoalgoritmit suunnitellaan normaalisti siten, että roottori tasapainotetaan pyörimään massakeskipisteensä ympärillä eli roottorin pinnalla oleva piste kulkee noin sinikäyrän muotoista rataa roottorin pyörimisnopeuden suuruisella perustaaajuudella. Analogisen anturin kaistanleveyden on siis oltava vähintään tämän perustaaajuuden suuruinen että roottorin kulkema rata saadaan havainnoitua vaimentumattomana. Suuremman kaistanleveyden käyttö voi tietenkin olla perusteltua, jos halutaan mitata esimerkiksi joitain roottorin perustaaajuutta korkeataajuisempia värähtelyitä.

Järkevänä maksimirajana paikka-anturien kaistanleveydelle voidaan taas pitää Nyquistin teoreeman mukaista rajataajuutta

$$f_{\text{BW}} \leq \frac{f_s}{2} \quad (2.9)$$

sillä tätä suuremmat taajuuskomponentit joudutaan digitoinnissa tapahtuvan laskostumisen välttämiseksi aina suodattamaan analogisesta signaalista pois analogisella laskostumisenestosuodattimella. Voidaan siis todeta, että paikka-anturin kaistanleveydenärkevin arvo sijoittuu välille

$$\frac{\Omega}{60} \leq f_{\text{BW}} \leq \frac{f_s}{2} \quad (2.10)$$

missä Ω on pyörimisnopeus kierroksina minuutissa, f_{BW} kaistanleveys ja f_s yhtälöllä (2.3) laskettu näytteistystaajuus.

Ilmavälin pituus pyritään magneettisten häviöiden minimoimiseksi tekemään aina mahdollisimman lyhyeksi. Kirjallisuuskatsauksen perusteella arvoa 0.5 mm voidaan pitää maksimirajana, hyvin monissa tapauksissa ilmaväliksi oli valittu juuri 0.5 mm (Chen, Le ja Nguyen 2014; Chiba et al. 2005; Schweitzer ja Maslen 2009; Smirnov 2015; Hynynen 2011). Toisaalta esimerkiksi SKF ilmoittaa markkinointimateriaalissaan valmistavansa magneettilaakereita, joiden ilmaväli on väliltä 0.5-1.0 mm (SKF AB 2015). Symmetrian vuoksi tarvittava mitta-alue joka tapauksessa on kaksinkertainen ilmaväliin

verrattuna eli

$$l_{\text{sens}} \geq 2l_g. \quad (2.11)$$

Laitteiston mekaaniset ominaisuudet toki voivat vaikuttaa vaaditun mitta-alueen suuruuteen, paikka-antureita ei välttämättä pystytä asentamaan siten että anturin kärki olisi tasan laakerin kehän tasalla. Edellä mainitun kirjallisuuskatsauksen perusteella yleistä näyttää olevan käyttää mitta-alueeltaan 2 mm antureita sovelluskohteisiin, joissa ilmaväli on noin 500 um. Mitta-alue ei merkittävästi vaikuta antureiden hintaan tai saatavuuteen joten 2 mm mitta-alueella varustettuja antureita voidaan pitää turvallisena valintana tämänkin työn anturivalinnoille.

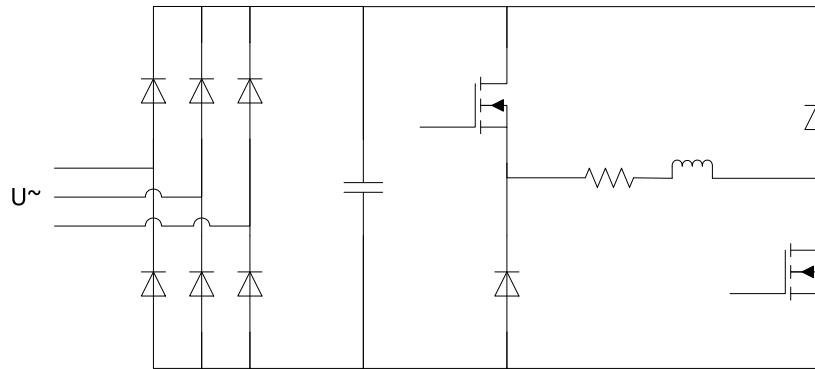
Kaikkeen mittaamiseen liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi paikanmittaus on aina ainoastaan likiarvo mitattavan suureen todellisesta arvosta. Koko mittausketju, aina mitattavasta kappaleesta anturin kautta mittaustuloksen digitointiin aiheuttaa omat epävarmuuskomponenttinsa mittaustulokseen. Pyörivän kappaleen paikanmittauksessa erityispiirteenä on kappaleen materiaalivehityksistä sekä kappaleen pinnalla olevista epäpuhtauksista aiheutuva kohina. Anturivalinnasta riippuvia, valmistajien tyypillisesti ilmoittamia tunnuslukuja taas ovat mitta-anturin erottelukyky ja lineaarisuus, lämpötilastabiilius ja pitkän aikavälin stabiilius (Micro-Epsilon 2015). Ennen digitointia mittasignaalia kuljetetaan johtimissa häiriöille alttiina virta- tai jänniteviestinä, samoin digitoinnin resoluutio on rajallinen.

Mittaustarkkuuden tarkka analysointi kaikki edellä mainitut seikat sekä käyttöolosuhteet huomioiden olisi monimutkainen ja aikaa vievä prosessi, eikä sellaisena kuulu tämän diplomityön sisältöön. Datalehtien perusteella on kuitenkin helppoa arvioida anturin erottelukyvystä ja digitoinnin resoluutiosta aiheutuvaa epävarmuutta. Esitetään vaatimuksena, että näiden tunnuslukujen perusteella lasketun mittatarkkuuden on oltava vähintään 1 % ilmavälin pituudesta.

2.1.3 Teholähde ja virtasäätö

Sähkömagneettien tehonsyöttöön käytetään lähes yksinomaan virtareferenssillä toimivia hakkuriteholähteitä. Virran käyttö referenssiarvona on luontevaa, sillä säädettäväksi haluttu suure on magneetin roottoriin aiheuttava voima, joka riippuu suoraan magneettivuon suuruudesta, jota taas voidaan kontrolloida säätämällä käämissä kulkevaa virtaa. Hakkuritekniikan käyttöä taas puoltaa niiden analogisia tehovahvistimia merkittävästi parempi hyötysuhde. (Schweitzer ja Maslen 2009)

Mahdollisia topologioita hakkuritehovahvistimen toteuttamiseen on olemassa useita, mutta magneettilaakerikäytössä eräs yleisimpiä on kuvassa 2.5 esitetty puoliksi ohjattava H-silta. Se mahdollistaa DC-välipiiriin nähden positiivisen tai negatiivisen jännitteen johtamisen kuormaan, joka edelleen mahdollistaa induktiivisen kuorman tapauksessa virran nopean kasvattamisen tai pienentämisen. Edulliseen hintaan tähtäävissä matalan virta- ja jännitetason laitteissa myös yksinkertaisen yhdestä tehokytkimestä koostuvan piirin käyttö on mahdollista. (Chiba et al. 2005)



Kuva 2.5. H-siltatopologialla toteutettu magneettilaakerin tehovahvistin.

Radiaalilaakerien sähkömagneeteilta vaadittava voima riippuu pääasiassa roottorin massasta ja järjestelmän pyörimisnopeuden perusteella määräytyvästä ali- tai ylikriittisyydestä. Alikriittisessä järjestelmässä kokonaisvoiman tulisi olla 2-3 kertaa maan veto-voimasta roottoriin aiheutuvan voiman suuruinen, ylikriittisessä järjestelmässä kerroin on 3-6. Voima jakautuu tasan kahden radiaalilaakerin kesken, joten yhdeltä laakerilta vaadittava voima

$$F = \frac{1}{2} \cdot k \cdot m \cdot g \quad (2.12)$$

missä k on edellä mainittu voiman kerroin, m on roottorin massa kilogrammoina ja g on putoamiskiihtyvyys $\approx 9,81 \frac{m}{s^2}$ (Smirnov 2015)

Teholähteen teho voidaan mitoitetaan siten, että tuotetun tehon avulla saavutetaan voimalle muutosnopeus jolla voidaan kattaa koko tehoalue roottorin yhden pyörähdysen aikana (Smirnov 2015). Toisin sanoen

$$\frac{dF}{dt} \geq F\omega. \quad (2.13)$$

missä ω on roottorin kulmanopeus (Smirnov 2015). Tämän perusteella saadaan tarvittava teho johdettua yhtälöstä

$$\left| \frac{dF}{dt} \right| \leq \beta \alpha \frac{P}{l_g} \quad (2.14)$$

missä β on staattorirakenteesta riippuva vakio, tyypillisesti 2, α on biasointitaso (tyypillisesti noin 0.5), $P = UI$ on tehollisen teho ja l_g on ilmavälin pituus. (Schweitzer ja Maslen 2009)

Teholähteen jännitetasoa valittaessa täytyy huomioida jännitteen ja magneettikäänin induktanssin suhteen vaikutus virran suurimpaan mahdolliseen muutosnopeuteen ja siten virtasäädön suurimpaan mahdolliseen kaistanleveyteen. Virtasäädön kaistanleveyden tulee olla huomattavasti paikkasäädön kaistanleveyttä suurempi, esimerkiksi Lantto esittää väitöskirjassaan että tyydyttävän suorituskyvyn takaamiseksi virtasäätimen on oltava vähintään seitsemän kertaa paikkasäädintä nopeampi (Lantto 1999). Jännitteen rajoittama kaistanleveys

$$f_{bw} = \frac{\ln(9) \cdot U_{DC}}{2\pi \cdot L \cdot i_{max}} \quad (2.15)$$

missä i_{max} on suurin mahdollinen virran askelmuutos, tyypillisesti käämityksen maksimivirta vähennettynä biasointivirralla. (Jastrzebski 2007; Sillanpää 2013)

Magneettilaakerikäytössä hakkuriteholähteen kytkentätaajuuden on oltava moninkertainen virtasäädön kaistanleveyteen verrattuna (Jastrzebski 2007). Eräs tapa määrittää vähimmäiskytkentätaajuus on tarkastella kytkentätaajuuden virtaan aiheuttamaa värettä. Tavoitetasona virran väreelle voidaan pitää korkeintaan 10 % nimellisvirrasta.

Virran väreeseen saavutetaan, kun tehollisen pulssisuhde on 50 %. Kolmiportaisen PWM:n tapauksessa virran väreeseen saavutetaan

$$I_{pp} = \frac{U_{dc}}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \quad (2.16)$$

missä T on kytkentäaika. Aikavakio

$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (2.17)$$

missä L on tehollisen kuorman induktanssi ja R tehollisen kuorman resistanssi. (Maxon Motor AG 2000)

Yhtälöistä (2.16) ja (2.17) saadaan ratkaistua parametrien avulla pienin mahdollinen kytkentätaajuus $f_s = 1/T$ halutulle virran väreelle. Samoin yhtälöistä nähdään että välipiirin jännitteen kasvattaminen kasvattaa myös virran värettä, riippuvuus aikavakiosta taas on logaritminen. Esimerkiksi käytettäessä taulukon 2.1 arvoja olisi $R = 0.0991\Omega$ ja $L = 1.18\text{mH}$ jolloin aikavakio $\tau = 0.0119$. Monet teholliset toimivat esimerkiksi

30 kHz kytkentätaajuudella, tällöin kytkentäaika $T = \frac{1}{30000} = 0.033\text{ms}$.

2.2 Laakerielektroniikan vaatimusmäärittely

Tässä kappaleessa mitoitetaan kahden erilaisen magneettilaakerisovelluksen laakerielektroniikan vaatimukset kappaleessa 2 esitetyn menetelmin. Ensimmäinen tapaus on keskinopeuksinen alikriittinen teollisuusmoottori, toinen tapaus taas suurnopeuksinen, ylikriittinen sovelluskohde. Molemmat näistä ovat todellisia, magneettilaakeroituja käyttöjä. Vertailun vuoksi laskettuja arvoja vertaillaan myös ko. järjestelmien todellisten toteutusten tunnuslukuihin.

Kappaleessa 2 mainitun perusteella eri komponenteista on tarpeen tarkastella seuraavia ominaisuuksia:

Ohjausjärjestelmä

Sykli aika Säädon toteuttamiseen käytettävän laitteiston on pystyttävä suorittamaan koko säätösykli ja oltava valmis seuraavan syklin suorittamiseen lyhyemmässä ajassa kuin yhtälön (2.3) vähimmäisnäytteistystaajuutta vastaava näytteistysaika. Toisaalta, mikäli valitussa ohjaimessa on aikarajoitteita I/O-toiminnalle (esimerkiksi jos arvojen päivittäminen on mahdollista ainoastaan syklin alussa tai lopussa), ei tulojen lukemisesta ohjearvon päivittämiseen kuluva aika saa olla pidempi kuin yhtälön (2.8) mukainen suurin sallittu viive.

Laskentateho Valitun ohjausjärjestelmän on pystyttävä säätösyklin I/O-toiminnolta vapaaksi jäävänä aikana laskemaan yhtälön (2.5) mukainen määrä laskuoperaatioita.

Tulo- ja lähtökanavat Nopeat analogiset tulokanavat vähintään kaikille paikka-antureille. Lisäksi tarvitaan kunkin käyttötarpeen mukainen määrä hitaampia analogiatuloja esimerkiksi lämpötilanmittauksia varten. Riippuen valitusta järjestelmäarkkitehtuurista voidaan tarvita myös digitaali- tai analogialähtöjä esimerkiksi virtaohjeen päivitystä varten. Paikkasäätöön käytettyjen kanavien suorituskyvyn on oltava niin hyvä, että aika A/D-muunnoksen aloittamishetkestä ohjearvon päivittymishetkeen ei ylitä yhtälön (2.8) mukaista suurinta sallittua viivettä.

Kenttäväylä Mikäli kokonaisjärjestelmään kuuluu osana kenttäväylä, jolla esimerkiksi I/O-laitteita kytketään järjestelmän osaksi tulee kenttäväylän suo-

rituskyvyn olla riittävä alhaisten sykliakojen saavuttamiseksi.

Tärkein yksittäinen säädön toteuttamiseen valitun laitteiston tunnusluku on edellä mainitus perusteella selvästi sykli aika. Syklijajan sisällä tapahtuvien operaatioiden suoritusaikojen suhde voi vaihdella, kunhan kokonaisaika pysyy rajan alapuolella.

Teholähde

Teho, virta ja jännite Teholähteen suurimman jatkuvan tehon on oltava vähintään yhtälön (2.14) mukainen. Lisäksi teholähteen jännitetason on valittava siten, että kaistanleveysvaatimus täyttyy yhtälön (2.15) mukaisesti.

Kytkentätaajuus Kytkentätaajuuden on oltava huomattavasti virtasäädön kaistanleveyttä korkeampi. Vähimmäisarvo saadan laskettua spesifoidun suurimman virran väreen perusteella yhtälöä (2.16) käyttäen. Liian suuri kytkentätaajuus voi aiheuttaa ei-toivottuja häviöitä ja EMC-häiriöitä. Toteutettujen laitteistojen kytkentätaajuudet ovat yleensä 20–40 kHz välillä.

Virran väre Virran väre spesifioituna haluttuun arvoon, esimerkiksi alle 10 % virran ohjearvosta.

Kanavien lukumäärä Kaikissa tavanomaisissa sovelluskohteissa käytännössä tarve pystyä syöttämään 10 toisistaan riippumatonta virtaohjetta samanaikaisesti.

Paikka-anturit

Mitta-alue Yhtälön (2.11) mukaisesti ottaen huomioon antureiden sijoittelun tai laitteiston mekaanisen rakenteen aiheuttamat vaatimukset.

Kaistanleveys Valitaan sopiva kaistanleveys yhtälön (2.10) ja muiden kappaleessa 2.1.2 esitettyjen reunaehtojen perusteella.

Mittausketjun tarkkuus Paikanmittauksen tarkkuus vähintään 1 % mittausalueen pituudesta kappaleen 2.1.2 mukaisesti.

Lineaarisuus Mahdollisimman lineaarinen vaste paikan muutokseen olisi toivottavaa, mutta differentiaalisen paikanmittauksen vasteen linearisointi ohjelmallisesti ei ole ongelma.

2.2.1 Alikriittinen järjestelmä

Taulukossa 2.1 on esitetty erään alikriittiseen sovelluskohteeseen suunnitellun magneettilaakerijärjestelmän spesifikaatio.

Taulukko 2.1. Alikriittisen järjestelmän radiaalilaakerin spesifikaatio.

Pyörimisnopeus	15000	rpm
Resistanssi	0.0991	Ω
Induktanssi	1.18	mH
Roottorin massa	100	kg
Laakerin voima	1577	N
Ilmavälin pituus	500	μm

Taulukon ja edellä esitettyjen yhtälöiden perusteella päädytään seuraavanlaisiin laakerielektroniikan minimivaatimuksiin.

Taulukko 2.2. Vähimmäisvaatimukset alikriittisen magneettilaakerijärjestelmän ohjausjärjestelmälle.**Paikkasäädin**

Näytteistystaajuus	1500	Hz
Laskentateho	1	$\frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$
Sykli aika	0.6	ms
Analogiatulot paikkatiedolle	6	kpl
Analogiatulot lämpötilatiedolle	10	kpl

Paikka-anturit

Kaistanleveys	250	Hz
Mittausalue	2	mm
Eroittelukyky	5	μm

Teholähde

Teho	1300*	W
Jännite	150*	V
Virta	9*	A
Kanavien lukumäärä	10	kpl
KytKentätaajuus	30	kHz

*Laskettu yhtälöillä (2.13)–(2.14). Näillä arvoilla jännitteen rajaama kaistanleveys on noin 10 kHz. Vastaava järjestelmä on onnistuneesti toteutettu tehollähteellä, jonka spesifikaatiot ovat 2500 W, 210 V ja 12 A.

Taulukon minimivaatimusten perusteella huomataan, ettei alikriittisen magneettilaakeroinnin säätö ole erityisen haastava nykyaikaisille digitaalisille säätöjärjestelmille. Korkein sallittu sykli aika on suoraan seurausta näytteistystaajuudesta, näin alhaisilla taajuuksilla viive ei vielä kasva merkittäväksi rajoitteeksi. Laskentatehovaatimus on hyvin kohtuullinen. Ainoat mahdolliset haasteet vaikuttavat olevan suurimman salli-

tun sykliajan alittaminen. Lisäksi, mikäli päädytään kenttäväylän ja hajautetun I/O:n käyttöön voi näytteistystaajuuden, sykliajan ja kanavien lukumäärän perusteella määräytyvä vaadittu tiedonsiirtokapasiteetti osoittautua haasteeksi perinteisiä kenttäväyliä käytettäessä.

Paikka-antureiden minimikaistanleveyteen kannattaa suhtautua varauksella; 250 Hz riittää kyllä akselin radan seuraamiseen nimellispyörimisnopeudella, mutta mahdolliset korkeataajuisemmat häiriöt suodattuvat auttamattomasti pois. Tämän vaatimuksen todentaminen vaatisi testejä ja laboratoriomittauksia jotka eivät kuitenkaan tämän työn aiherajaukseen sisälly.

2.2.2 Ylikriittinen järjestelmä

Taulukossa 2.3 on esitetty erään ylikriittiseen sovelluskohteeseen suunnitellun magneettilaakerijärjestelmän spesifikaatio.

Taulukko 2.3. Ylikriittisen järjestelmän radiaalilaakerin spesifikaatio.

Pyörimisnopeus	60000	rpm
Resistanssi	0.316	Ω
Induktanssi	13.8	mH
Roottorin massa	60	kg
Laakerin voima	1230	N
Ilmavälin pituus	500	um

Taulukon perusteella päädytään taulukon 2.4 mukaisiin vähimmäisvaatimuksiin käytettävälle ohjaus- ja mittausjärjestelmälle. Taulukon arvoina on käytetty valmiin tuotteen spesifikaatioita, eikä arvoja ole laskettu tämän työn menetelmin ellei toisin ole mainittu.

Kappaleessa 2.2 määriteltyjen arvojen perusteella voidaan todeta, että erityisesti laakerielektroniikan nopeuteen ja laskentakapasiteettiin liittyvät vaatimukset ovat erilaiset esimerkkijärjestelmien välillä. Tämä on laitteiden spesifikaatioita tarkasteltaessa varsin luonteva tulos, ylikriittisen järjestelmän korkea pyörimisnopeus vaatii säätöjärjestelmältä todella nopeaa vastetta joka kasvattaa laskenta- ja tiedonsiirtokuormaa huomattavasti. Toisaalta taas osa tunnusluvuista on kohtalaisen muuttumattomia. Laskentatehovaatimuksien perusteella säätöön käytettävien laitteiden aritmeettinen suorituskyky ei muodosta ongelmaa vaikka tilamuuttujien lukumäärä kavaisi tässä käytettyä

Taulukko 2.4. Vähimmäisvaatimukset ylikriittisen magneettilaakerijärjestelmän ohjausjärjestelmälle.

Paikkasäädin		
Näytteistystaajuus	10000	Hz
Laskentateho	30	$\frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$
Sykli aika	0.1	ms
Analogiatulot paikkatiedolle	6	kpl
Analogiatulot lämpötilatiedolle	10	kpl
Paikka-anturit		
Kaistanleveys	1000	Hz
Mittausalue	2	mm
Eroittelukyky	5	um
Teholähde		
Teho	1800*	W
Jännite	200*	V
Virta	9*	A
Kanavien lukumäärä	10	kpl
Kytkenätaajuus	30	kHz

*Todellisen järjestelmän spesifikaatiosta. Yhtälöiden (2.13)–(2.14). perusteella päädyttäisiin noin 2000 W minimitehoon.

suuremmaksi vaan suurin haaste on nopea ja deterministinen tiedonsiirto. Korkeampi laskentateho toki helpottaa sykli aikavaatimuksen täyttymistä, sillä tällöin suurempi osuus syklijästä on käytettävissä tiedonsiirtoon.

Sekä ali- että ylikriittisessä järjestelmässä suurin sallittu sykli aika on määritelty näytteistystaajuuden perusteella, kummassakaan tapauksessa suurin sallittu viive ei ylittänyt tällä syklijällä. Laskentatehovaatimus on laskettu siten, että sykli on jaettu kolmeen yhtä pitkään osaan, antureiden lukemiselle, laskennalle ja ohjearvon päivittämiseksi on kullekin varattu 33 % syklin pituudesta.

3 LAAKERIELEKTRONIIKKA

Aktiiviset magneettilaakerit ovat nykyisin useimmiten tilauksesta rakennettavia, kunkin käyttökohteeseen erikseen räätälöitäviä laitteistoja. Kappaleen 2 vaatimusmäärittelyistä voidaan kuitenkin todeta, ettei magneettilaakeroinnin toteuttaminen vaadi mitään erityisen vaikeasti saatavaa tai suljettua teknologiaa. Tämän osion tarkoituksena on tutkia mahdollisuutta koota magneettilaakerielektroniikka käyttäen tavanomaisia teollisuusautomaatiolaitteita ja -komponentteja. Lisäksi luodaan katsaus soveltuvimpiin markkinoilla oleviin soveltuviin osakomponentteihin ja esitetään eräs mahdollinen järjestelmäratkaisu laakerijärjestelmän toteuttamiseksi.

Markkinoilla joitakin erityisesti magneettilaakereihin erikoistuneita yrityksiä kuten SKF, Mecos ja Calentix jotka valmistavat kokonaisia magneettilaakerijärjestelmiä sekä niiden osakomponentteja. Esimerkiksi Mecos valmistaa kaiken 5 vapausasteen magneettilaakerisäätöön tarvittavan älyn sekä teholähteet yksin kuoriin yhdistäviä kokonaisuuksia, joihin vain tarvitsee kytkeä saman valmistajan paikka-anturit ja aktuaattorit kiinni. Nämä laitteet kuitenkin ovat kalliita. Mikäli kuvatunkaltaisia laitteita olisi kohtuuhintaan saatavilla tai sellainen pystyttäisiin kohtuullisin kustannuksin kehittämään ja tuotteistamaan, ei teollisuusautomaatioon perustuvan magneettilaakerijärjestelmän kehittäminen olisi välttämättä perusteltua.

3.1 Säätojärjestelmä

Magneettilaakerisäätimet, kuten muutkin digitaaliset säätöjärjestelmät perustuvat säätöalgoritmien suorittamiseen jossakin sulautetussa järjestelmässä tai muussa tietokoneessa. Yleisimmät matalan tason ratkaisut ovat käyttää digitaalista signaaliprosessoria (DSP, Digital Signal Processor) tai jotakin ohjelmoitavaa logiikkapiiriä kuten FPGA:ta (Field Programmable Gate Array). FPGA:n etuna DSP:hen verrattuna pidetään yleisesti parempaa suorituskykyä useita rinnakkaisia laskutoimituksia suoritettaessa. Vastaavasti DSP:n ohjelmointi on helpompaa ja vähemmän aikaa vievää etenkin jos käytetään oheispiirejä esimerkiksi kommunikointitarkoituksiin. Toisaalta myös normaalien PC-suorittimen suorituskyvyn valtava kasvu ja standardien PC-käyttöjärjestelmien kuten Windowsin tai Linuxin päällä toimivien reaaliaikalajennosten kehittyminen on tehnyt PC-pohjaisista teollisuustietokoneista yhden mahdollisen ratkaisun nopeidenkin säätöjärjestelmien toteuttamiseen. (Jaatinen et al. 2013; Smirnov, Tolsa ja Jastrzebski 2010)

DSP- ja FPGA-piirit tarjoavat hyvän lähtökohdan prototyyppien tai uusien tuotteiden suunnitteluun ja esimerkiksi edellämainittu Mecos:n magneettilaakeriohjain perustuu kokonaisuudessaan Texas Instrumentsin DSP-piirin käyttöön. Ne ovat kuitenkin vain yksi elektroniikkakomponentti muiden joukossa ja niiden hyödyntäminen sellaisenaan edellyttäisi täysin uuden elektroniikkatuotteen suunnittelua, valmistusta, ohjelmointia ja testausta. Täysin uuden laitteen suunnittelu ja tuotteistaminen on kuitenkin niin kallista ja aikaavievää toimintaa, että magneettilaakerivalmistajan kannattaisi ensisijaisesti pyrkiä hyödyntämään tuotekehityksessään valmiita osakomponentteja. On toki olemassa myös pääasiallisesti opetus- ja prototyypinrakennuskäyttöön tarkoitettuja DSP- ja FPGA-kehitysalustoja joita voitaisiin hyödyntää ”puolivalmisteina” säätöjärjestelmän rakentamisessa. Tuotteiden luonteen ja edulliseksi halutun hinnan vuoksi niissä on kuitenkin usein erilaisia rajoitteita, esimerkiksi suorituskyvyltään tai kommunikaatiomahdollisuuksiltaan rajoittunut versio piiristä.

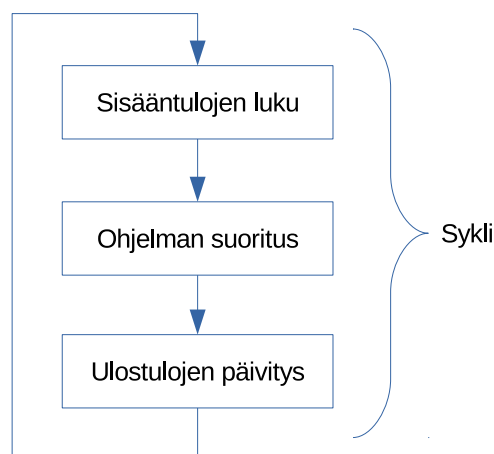
Lähes kaikki magneettilaakerisäätöön käytettäviä laitteistoja käsittelevä tieteellinen kirjallisuus tarkastelee ainoastaan yksittäisten piirien soveltuvuutta eri säätöalgoritmien toteuttamiseen. Valmiiden teollisuusautomaatiojärjestelmien soveltuvuutta magneettilaakereiden säätöön ei toistaiseksi ole selvitetty, joten on perusteltua tarkastella onko olemassa magneettilaakerisäätöön soveltuvia teollisuusautomaatio-ohjaimia tai muita pelkkää elektroniikkakomponenttia tuotteistetumpia ratkaisuja.

Markkinoilta on erotettavissa kolme erillistä tähän käyttötarkoitukseen soveltuvaa tuoteryhmää, joiden osana käytetään joko yhtä tai useampaa edellä mainituista komponenteista: PLC-järjestelmät, sulautetut ohjausjärjestelmät ja PC-pohjaiset reaaliaikajärjestelmät. PLC-järjestelmällä tässä työssä tarkoitetaan IEC-61131-standardin vaatimukset täyttäviä ohjaimia, sulautetulla ohjaimella taas vastaavaa laitetta joka ei välttämättä täytä ko. standardia. PC-pohjaiseksi järjestelmäksi lasketaan ratkaisut joiden toiminta perustuu teollisuustietokoneessa ajettavien tavallisten PC-käyttöjärjestelmien, käytännössä Linuxin tai Windowsin, reaaliaikalaajennoksiin. Osa näistä reaaliaikalaajennoksista on kokonaisia ”Soft-PLC”-järjestelmiä jotka toteuttavat IEC-61131-standardin mukaisen PLC-ohjaimen ohjelmallisesti. Teollisuustietokone tai teollisuus-PC taas on alalla vakiintunut käsite, jolla tarkoitetaan Intel x86-arkkitehtuuriin perustuvaa, automaatioon tai muuhun teollisuussovellukseen suunniteltua tietokonetta. Tuoteryhmien ero on kuitenkin viime aikoina hämärtynyt, esimerkiksi Beckhoff valmistaa laitteita jotka käyttäjälle näyttävät tavanomaiselta PLC-ohjaimelta, mutta niiden sisäinen toiminta perustuu Intel x86-suorittimeen ja Windows Embedded-käyttöjärjestelmään.

3.1.1 PLC-laitteet

PLC (Programmable Logic Controller)-laitteeksi kutsutaan teollisuusautomaatiolaitteita, jotka täyttävät IEC 61131-standardin määrittämät vaatimukset. Niiden alkuperäinen käyttökohde on ollut relepohjaisen automaation korvaaminen teollisuusautomaatiossa ja prosessien ohjauksessa mutta mikroprosessoritekniikan kehittyessä myös PLC-laitteiden aritmeettinen laskentakyky on noussut reaaliaikasaädön mahdollistavalle tasolle. Automaation lisäksi niitä sovelletaan nykyään erityisesti liikkeenohjauksessa, kuten NC-laitteissa ja vastaavissa. Ne tarjoavat varsin houkuttelevan vaihtoehdon digitaalisen säätöjärjestelmän toteuttamiselle teollisuusympäristössä: standardoidut ohjelmointikielet, modulaarisuuden suomat monipuoliset I/O-mahdollisuudet, tuki kenttäväylille, suurten valmistajien tarjoama kaupallinen tuki ja usein hintaan nähden korkea matemaattinen suorituskyky. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu laitteiden toimintaperiaatteesta, hitaista kenttäväyliä ja IEC 61131-standardin valmistajille antamasta pienestä liikkumavarasta aiheutuva rajoitus lyhimmälle mahdolliselle syklijalle.

PLC-laitteiden toiminta normaalitilassa noudattaa tarkasti kuvan 3.1 mukaista, syklistä ohjelman suoritusta josta kuitenkin voidaan poiketa keskeytyksiä käyttämällä. PLC siis ensin lukee kaikkien tulokanavien arvot muistiin, tämän jälkeen suorittaa ohjelmakoodin ja viimeisenä päivittää kaikkien lähtökanavien arvot samanaikaisesti. Useissa, jopa liikkeenohjaussovelluksiin suunnitelluissa laitteissa sykli aika on rajattu 1 millisekuntiin. Pääasiassa tähän on syynä perinteisten teollisuusautomaatiossa käytettyjen kenttäväylien hitaus, niiden päivitysajat ovat tyypillisesti 1-15 ms riippuen väylästä ja siihen kytkettyjen laitteiden lukumäärästä (Rostan, Stubbs ja Dzilno 2010).



Kuva 3.1. PLC-sykli.

Uusien nopeiden Ethernet-tekniikkaan perustuvien kenttäväylien yleistyminen on osittain poistanut kenttäväylästä aiheutuneen rajoitteen, mutta tarkasteluhetkellä (Kesäkuu 2015) ainoa nopea, alle 1 ms sykliajan PLC-laite oli vasta markkinoille tullut Omron NX-701. Erittäin nopeat, jopa 50 us sykliajat ovat edelleen pääasiassa kappaleessa 3.1.2 käsiteltyjen PC-pohjaisten PLC-järjestelmien yksinoikeus. Toinen ratkaisu hitaan tiedonsiirron kiertämiseksi ovat joidenkin laitevalmistajien tarjoamat takaisinkytkettyyn säätöön tarkoitettut erilliset PLC-laajennusmoduulit jotka voivat sisältää esimerkiksi nopean apuprosessorin ja kenttäväylästä riippumattomia nopeita I/O-liitäntöjä. Esimerkiksi Siemens Simatic FM458-1 DP Application Module on esimerkki tällaisesta modulista, joka laajentaa Simatic S7-400-sarjan ominaisuudet nopeaan säätöön soveltuvaksi alentaen lyhimmän mahdollisen sykliajan 100 mikrosekuntiin (Siemens AG 2011). Samoin laitteeseen on saatavilla nopea, suoraan PLC:n sisäisiin tiedonsiirtoväyliin kiinnittyvä kenttäväylästä riippumaton I/O-laajennusmoduli jonka analogiatulojen vasteajaksi luvataan 45 us ja digitaali-I/O:n vasteajaksi 15 us (Siemens AG 2015).

Taulukkoon 3.1 on koottu magneettilaakerikäyttöön soveltuvimmat matkkinoilla olevat PLC-laitteet tärkeimpine tunnuslukuineen. Vertailun vuoksi mukaan on otettu myös Siemens S7-1517, joka edustaa tällä hetkellä Siemensin PLC-tarjonnan huippua, sekä Berghof EC2250 joka on esimerkki pienen riippumattoman valmistajan EtherCAT-laitteesta. Ne molemmat osoittavat selvästi lähes kaikkia muitakin tehokkaita PLC-järjestelmiä vaivaavan rajoitteen: suuresta liukulukulaskentatehosta ja nopean suorituskyvyn tarjoavasta kenttäväylästä huolimatta kommunikointi ulospäin ei laitteen ohjelmointioppaiden ja datalehtien mukaan onnistu alle 1 ms sykliajalla.

Taulukko 3.1. Tärkeimmät markkinoilla olevat nopeat PLC-järjestelmät merkittävimpine ominaisuuksineen.

	Vähimmäis- sykli aika	Laskenta- nopeus	Kenttäväylä	Ohjel- mointi
Omron NX701	125 us	$312 \frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$	EtherCAT	IEC 61131-3
Siemens S7-400 ja FM458-1 DP	100 us	$20 \frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$	PROFIBUS, SIMOLINK	Step-7
Siemens S7-1517	1 ms	$83 \frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$	PROFINET	Step-7
Berghof EC2250	1 ms	Hidas	EtherCAT, CAN	IEC 61131-3

Kuten taulukosta huomataan, ainoat magneettilaakerikäyttöön järkevät vaihtoehdot ovat Omron NX701 ja Siemens S7-400 varustettuna FM458-1 DP-laajennusmodulilla.

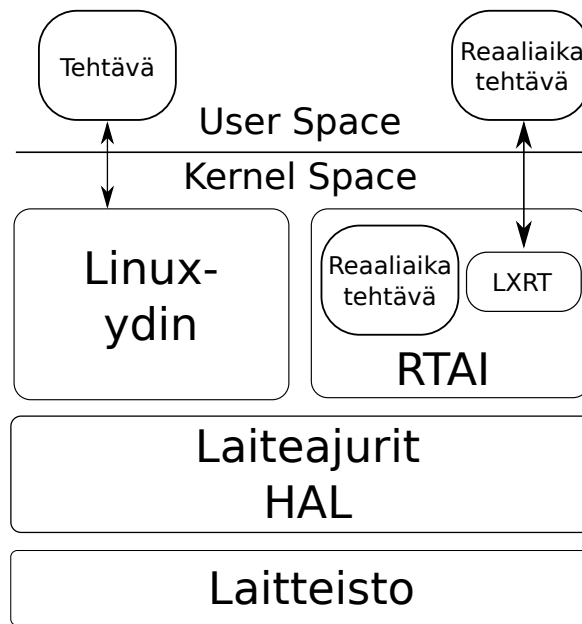
Vaikka esimerkiksi Siemens S7-1500-sarja tarjoaisikin huomattavan suuren liukulukusuorituskyvyn, muodostuvat sykli aika ja kenttäväylä ongelmallisiksi. Toisaalta, myös Siemens S7-400 kenttäväylätuki on rajoittunut Siemensin omiin PROFIBUS- ja SIMOLINK-väyliin joten esimerkiksi sen kytkeminen teholähteisiin on haastavampaa kuin avointa EtherCAT-väylää käyttävällä Omronilla. Omron NX701-laitteen ainoa heikkous on sen hinta; valmistajan mukaan se on ollut julkaisuhetkellä (Huhtikuu 2015) markkinoiden nopein PLC-laite ja valmistaja on ottanut sen hinnoittelussaan huomioon (OMRON Corporation 2015).

3.1.2 PC-pohjaiset ratkaisut

Windows, Linux tai muutkaan työpöytä- ja palvelinkäyttöön suunnitellut käyttöjärjestelmät eivät sellaisenaan ole reaaliaikaisia vaan tapahtumien vasteajat ja latenssit vaihtelevat ja voivat kasvaa hyvinkin suuriksi. Näiden käyttöjärjestelmien ohjelmoitavuus ja valtava olemassaoleva ohjelmoistovalikoima yhdistettynä PC-laitteiden suorituskykyyn tarjoaisi kuitenkin paljon uusia mahdollisuuksia myös reaaliaikavaatimuksia sisältävissä sovelluskohteissa. Useat näiden käyttöjärjestelmien päällä toimivat, käyttöjärjestelmäydintä laajentavat tai muokkavat reaaliaikalajennokset osoittavat kuitenkin reaaliaikaomaisuusien lisäämisen olevan täysin mahdollista häivyttämättä käyttöjärjestelmiin jo sisältyvää toiminnallisuutta.

Avoimen lähdekoodin ansiosta Linux-käyttöjärjestelmässä on nykyään reaaliaikaomaisuudet sisäänrakennettuina ja niiden käyttöönotto vaatii ainoastaan käyttöjärjestelmäytimen kääntämisen lähdekoodista sopivin asetuksin. Windowsissa sen sijaan vaaditaan jonkin kolmannen osapuolen tekemän reaaliaikalajennoksen käyttämistä, joiden toiminta yleensä perustuu yhden tai useamman kokonaisen prosessorin tai prosessoriytimen varaamiseen reaaliaikakäyttöön. Kuvassa 3.2 on esitetty reaaliaikasäätöön tarkoitettun RTAI-nimisen Linux-reaaliaikalajennoksen arkkitehtuuridiagrammi.

Kuvasta nähdään selvästi, kuinka reaaliaikapalvelut käyttävät samoja laiteajureita itse käyttöjärjestelmäytimen kanssa, mutta tehtävien suoritus ja aikataulutus on eriytetty. Riippun käytetystä laitteistosta reaaliaikalajennos voi joko varata yhden kokonaisen prosessoriytimen omaan käyttöönsä, tai asettua käyttöjärjestelmäytimen ja laitteiston väliin rajapinnaksi jolloin käyttöjärjestelmäydin on vain yksi reaaliaikaprocesso muiden joukossa. Samoin kuvasta näkyy sekä Linux- että Windows-laajennoksille tyypillinen ominaisuus, molemmat ratkaisut tarjoavat käyttäjälle ainoastaan matalan tason ohjelmointirajapinnat reaaliaikasovellusten luomiseen esimerkiksi C-kielellä. Ohjelmoin-



Kuva 3.2. RTAI Linux-reaaliaikalaaajennoksen arkkitehtuuri. (Koh ja Choi 2013)

ti muistuttaa tällöin hieman minkä tahansa muun aidon reaaliaikakäyttäjärjestelmän ohjelmointia.

Tavalliseen tietokonelaitteistoon ja reaaliaikaiseksi muokattuun Linux-käyttöjärjestelmään perustuvasta magneettilaakerin säädöstä on olemassa joitakin onnistuneita esimerkkejä (Humphrey, Hilton ja Allaire 1999; Alpaugh H. E. 2010). Vaikka varsinaiset käyttöjärjestelmäytimen reaaliaikatoiminnot ovatkin aktiivisesti kehitettyinä vakaita ja tarjoavat hyvät mahdollisuudet avoimeen lähdekoodiin perustuvan säätö- tai automatiojärjestelmän luomiseen, voi user space-työkalujen kuten ajureiden ja valmiiden ohjelmointirajapintojen puutteellisuus muodostua ongelmaksi. Esimerkiksi EtherLab-niminen projekti on pyrkinyt luomaan helppokäyttöisen Linuxin päällä toimivan järjestelmän sisältäen mm. käyttökelpoiset ohjelmointirajapinnat, EtherCat-masterin sekä tuen SimuLink-mallien käyttämiselle (Ingenieurgesellschaft IgH GmbH 2012). Nimekkäistä käyttäjistä, kuten Airbusista (Hagemeister et al. 2006) huolimatta ohjelmistosta ei ole ilmestynyt uusia versioita vuoden 2013 jälkeen joten sen käyttö uusissa projekteissa on kyseenalaista ainakin ilman lisäselvityksiä. Mikäli työkaluja joutuu luomaan itse, ei laskennan, I/O-toiminnan, kommunikoinnin ja käyttöliittymän yhdistäminen reaaliaikaiseksi kokonaisuudeksi ole helppoa ja vaatii syvällistä tuntemusta Linux-käyttöjärjestelmäytimen toiminnasta sekä sen ohjelmoinnista.

Reaaliaikalaaajennoksia hyödyntävä, korkeamman abstraktiotason tarjoava ratkaisu ovat Soft-PLC-järjestelmät, jotka lähes poikkeuksetta toimivat Windows-käyttöjärjestelmän päällä. Ne pyrkivät yleensä tarjoamaan erillisiä PLC-laitteita vastaavan ohjelmoi-

tavuuden ja ominaisuusvalikoiman sisältäen tuen kenttäväylälle ja IEC 61131-3-standardin mukaisille ohjelmointikielille. Tämän lisäksi eräät Soft-PLC-järjestelmät tarjoavat tuen monille muillekin ohjelmointikielille kuten C/C++:lle tai Simulink-mallien käytölle.

PC-laitteiden korkean laskentatehon ansiosta niiden suorituskyky on tyypillisesti huomattavasti tavallisia PLC-laitteita parempi. Viime aikoina ero varsinaisten sulautettuihin järjestelmiin ja PC-käyttöön suunnattujen prosessoreiden ja arkkitehtuurien välillä tosin on hämärtynyt, esimerkiksi edellisessä kappaleessa mainittu Omron NX701-PLC perustuu aivan tavanomaiseen Intel Core i7-prosessoriin. Toisaalta myös ARM-arkkitehtuurin ja sulautetun Linuxin yleistymisen on tuonut näitä kahta maailmaa lähemmäksi toisiaan. PC-pohjaisten ratkaisujen luotettavuus ei kuitenkaan välttämättä ole erillisten PLC-laitteiden tai aitojen sulautettujen järjestelmien tasolla. PC-käyttöjärjestelmät ovat jo itsessään huomattavasti monimutkaisempia kuin pelkästään automaatioon tarkoitettut reaaliaikakäyttöjärjestelmät ja varsinaisen käyttöjärjestelmän päälle tuleva reaaliaikalaajennos lisää kompleksisuutta entisestään. Samoin PC-laitteistojen monimuotoisuus ja erilaiset ajuri- ja epäyhteensopivuusongelmat voivat aiheuttaa oman hankaluutensa. Tilannetta tosin helpottaa erityisten teollisuustietokoneiden käyttäminen, joissa käyttövarmuus on ollut merkittävä suunnittelukriteeri.

Taulukossa 3.2 on esitelty magneettilaakerikäyttöön soveltuvimmat PC-pohjaiset säätöratkaisut tärkeimpine ominaisuuksineen. Soft-PLC-järjestelmien kohtuullisen alhaisen hinnan ja niiden tarjoamien merkittävien etujen kuten ohjelmoitavuuden ja kaupallisen tuen ansiosta taulukosta on jätetty pelkät reaaliaikalaajennokset pois. Samoin laskentatehoa ei ole arvioitu sen riippuessa ainoastaan tietokonelaitteistosta jolla sovelusta ajetaan.

Beckhoff on PC-pohjaisten automaatioratkaisujen markkinajohtaja, ja sen tuote on edelleen monilta osin paras kilpailijoihin verrattuna. Vahvuutena on erityisesti se, että pelkän ohjelmiston lisäksi sama yritys pystyy toimittamaan koko laitteiston sisältäen täydellisen valikoiman I/O-moduleja, kenttäväylän, tietokonelaitteiston ja käyttöliittymän luontiin tarvittavat komponentit. Lisäksi TwinCat:n ohjelmoitavuus on edelleen omaa luokkaansa tuettujen tekniikoiden ja ohjelmointikielten osalta; perinteisten automaatiokieliensä lisäksi esimerkiksi suora Simulink-mallien käyttömahdollisuus on suuri kilpailuvaltti. Soft-PLC-järjestelmien yksittäiset lisenssit ovat tyypillisesti melko edullisia, esimerkiksi CodeSys Control RTE maksaa kirjoitushetkellä noin 500 euroa. Tarvittava tietokonelaitteisto tosin kasvattaa kokonaiskustannuksia.

Taulukko 3.2. Tärkeimmät markkinoilla olevat Soft-PLC-järjestelmät merkittävimpine ominaisuuksineen. (CODESYS Support Team 2015)

	Vähimmäis- sykلياika	Kenttäväylä	Ohjelmointi
Beckhoff TwinCat 3	50 us	EtherCAT	IEC 61131-3, C, C++, .NET, Matlab, SIMU- LINK
CodeSYS Control RTE	50 us	EtherCAT	IEC 61131-3, .NET
Siemens WinAC RTX	1 ms	PROFINET, Profibus	Step-7
PhoenixCon- tact PC WORX	1 ms	INTERBUS, NET, Profibus, Modbus- TCP	IEC 61131-3

3.1.3 Modulaariset sulautetut ohjaimet

Tämä tuotekategoria sijoittuu ominaisuuksiltaan jokseenkin PLC-järjestelmien ja protoiluun tarkoitettujen DSP- ja FPGA-kehitysalustojen väliin. National Instrumentsin CompactRIO ja Siemens Simatic TDC ovat käytännössä ryhmän ainoat edustajat. Merkittävimpinä eroina PLC-laitteisiin verrattuna voidaan pitää vapaampaa, standardoimatonta ohjelmointiympäristöä sekä I/O-moduulien integrointia itse laitteeseen kenttäväylään kytketyn hajautetun I/O:n sijaan. Ohjelmointiympäristön avoimuus toisaalta myös mahdollistaa laitteiston tehokkaamman käytön, esimerkiksi CompactRIO:on sisältyvää FPGA-piiriä voidaan ohjelmoida suoraan laitteistonkuvauskielillä.

CompactRIO-järjestelmästä on olemassa kymmeniä erilaisia malleja mutta perustaltaan ne kaikki koostuvat mikroprosessorin ja uudelleenohjelmoitavaan FPGA-piirin sisältävään sulautettun ohjaimeen perustuvasta rungosta johon voidaan kytkeä erilaisia I/O-moduuleja tarpeen mukaan (National Instruments 2015b). Järjestelmän ohjelmointi tapahtuu käyttäen NI:n omaa LabVIEW-ohjelmointiympäristöä. Kaikissa laiteversioissa se mahdollistaa järjestelmän FPGA-osan ohjelmoinnin NI:n oman graafisen G-kielen lisäksi myös standardeilla VHDL- tai Verilog-laitteistokuvauskielillä. Samoin esimerkiksi olemassa olevien Simulink-mallien muuntaminen cRIO-yhteensopiviksi on mahdollista. (Kindgren 2009). Uudemmat reaaliaikaiseen NI Embedded Linux-käyttöjärjestelmään pohjautuvat laitteet tukevat lisäksi ohjelmointia C- ja C++-kielillä luoden monia erilaisia vaihtoehtoja toteuttaa säätöjärjestelmä hyödyntäen sekä FP-GAn että prosessorin ominaisuuksia. (National Instruments 2014)

Modulaarisuuden ansiosta I/O- ja kommunikaatiomahdollisuudet ovat monipuoliset. Kaikki kahdella Ethernet-portilla varustetut cRIO-laitteet tukevat EtherCAT:ia ja pystyvät toimimaan EtherCAT-verkossa sekä master- että slave-asemissa. Laajennusmoduleita on olemassa myös muihin kenttäväyliin kuten CAN-väylään liittymistä varten. Eräs mahdollinen, suorituskyvyltään molemmista tämän työn magneettilaakeritapauksista suoriutuva kokoonpano on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3. Esimerkki magneettilaakerikäyttöön soveltuvasta CompactRIO-kokoonpanosta.

Runko	NI cRIO-9065
Suoritin	ARM Cortex-A9, kaksi ydintä, 667 MHz
FPGA	Xilinx Artix-7
Ohjelmointi	LabVIEW Real-Time, C/C++
Kenttäväylä	Tuki Ethernet-pohjaisille (mm. EtherCAT)
Nopea analogiatulo	NI 9201
Muunnosaika	10 us/kanava
Resoluutio	12 bit
Kanavien lkm.	8 kpl
Tulojännite	0–10 V
Yleiskäyttöinen I/O	NI 9381
Analogiasisääntulot 0–5 V	8 kpl
Analogialähdöt 0–5 V	8 kpl
Digitaalikanavat (I/O)	4 kpl

Vaikka graafinen LabView-ohjelmointi voikin vaikuttaa houkuttelevalta vaihtoehdolta ja nopeuttaa tuotekehitysaikaa, sen myötä korkeaksi nouseva ohjelmoinnin abstraktiotaso ja monien eri tekniikoiden käyttäminen yhdessä voivat vaikeuttaa virheiden jäljitystä ja poistoa. Eri mallien suorituskyvyn riittämisestä tämän työn sovelluskoh-teisiin on myöskään vaikea sanoa mitään ilman testaamista, valmistaja ei ilmoita suoraan mitään suorituskykylukemia eikä tieteellistä tietoa cRIO-ohjaimen soveltamisesta magneettilaakerikohteeseen ole. CompactRIO-laitteiden heikkoutena voi pitää myös ohjelmistolisenssien kanssa korkeaksi nousevaa hintaa, yksittäinen kaupallisen käytön salliva LabView-lisenssi maksaa yli 10000 euroa. Lisenssin kanssa yllä olevan kokoonpanon kokonaishinnaksi muodostuisi vähittäismyyntihinnoilla noin 15000 euroa (National Instruments 2015a).

Siemens Simatic TDC taas on jo 2000-luvun alusta saakka markkinoilla ollut, Siemensin omiin tekniikoihin perustuva äärimmäistä suorituskykyä tarjoava moniprosessoriauto-

maatiojärjestelmä. Valmistajan mukaan sen käyttökohteeksi on suunniteltu esimerkiksi useiden toisistaan riippuvien moottorikäyttöjen reaaliaikaisen ja nopean säädön. Sen vähimmäissykli aika on 100 mikrosekuntia, joten magneettilaakerijärjestelmän rakentaminen sitä hyödyntäen olisi epäilemättä mahdollista. Se ei kuitenkaan olisi erityisen mielekäästä, toisaalta laitteen jo hieman vanhentuneen rakenteen, toisaalta korkean hinnan vuoksi.

3.2 Tiedonsiirto

Teollisuusautomaatiossa ja säätöjärjestelmissä käytettävät tiedonsiirtojärjestelmät noudattavat aivan samankaltaista kerrosrakennetta kuin yleiskäyttöisetkin tiedonsiirtojärjestelmät. Käyttöolosuhteiden ja reaaliaikavaatimusten johdosta käytetyt protokollat poikkeavat kuitenkin jonkin verran tietokoneiden väliseen tiedonsiirtoon käytettyjen tietoverkkojen käyttämistä protokollista. Tiedonsiirto-protokollien kerrosrakenteen ja keskinäisten suhteiden kuvaamisesta on olemassa monia erilaisia malleja, joista eräs käytetyimpiä on kuvassa 3.3 esitetty OSI (Open Systems Interconnection Reference Model)-malli.



Kuva 3.3. Tietoliikenteen OSI-malli. (Wikimedia Commons)

Teollisuusautomaatiossa käytettävää tiedonsiirtoväylää eri laitteiden välillä kutsutaan kenttäväyläksi. Erilaisia kenttäväylästandardeja on olemassa kymmeniä ja niiden ominaisuudet sekä arkkitehtuurit poikkeavat hyvin paljon toisistaan joten suora suorituskykyvertailu on vaikeaa. Karkean jaon kuitenkin voi tehdä ns. "perinteisiin" kenttäväyliin joiden koko tiedonsiirtomalli perustuu omiin protokolleihin sekä viime aikoina yleistyneisiin Ethernet-pohjaisiin kenttäväyliin joissa standardin Ethernet-protokollan ja tiedonsiirtomedian (OSI-mallin 1. ja 2. kerros) päälle on rakennettu determinis-

tisiin reaaliaikasovelluksiin soveltuvat kenttäväyläprotokollat. Ethernet-kenttäväylällä tarkoitetaan tässä ainoastaan suoraan Ethernet-protokollan päälle rakennettuja kenttäväylästandardeja, ei esimerkiksi Modbus TCP/IP:tä joka perustuu Modbus-paketin kuljettamiseen TCP/IP-kääreeseen sisällä sillä ne eivät yleensä tarjoa reaaliaikasaattoon riittävää determinismia.

OSI-mallissa on huomattavaa että vaikka se on hyvin suosittu tiedonsiirtojärjestelmiä kuvaava malli, harva järjestelmä noudattaa sen kerrosrakennetta kirjaimellisesti. Esimerkiksi kenttäväyliä standardoivan IEC 61158-standardin mukainen kenttäväylä toteuttaa mallin kerrokset 1, 2 ja 7; muihin kerroksiin sisältyvät palvelut ovat tarpeettomia kenttäväyläkäytössä tai toteutettu muihin kerroksiin sisältyvien protokollien sisällä. Toisaalta, kerrosmallin käyttö mahdollistaa jonkin kerroksen vaihtamisen ilman että muiden kerrosten toteukseen tarvitsee tehdä muutosta, tämä ilmenee mm. EtherCAT-väylän monina eri vaihtoehtoina fyysiseksi kerrokseksi.

Kun suorituskykyä arvioidaan sykliajan näkökulmasta, on Ethernet-pohjaisten kenttäväyliä suorituskyky yleensä huomattavasti perinteisiä parempi. Perinteisten kenttäväyliä sykliajat ovat noin 1-15 ms, pääsevät lähes kaikkityypillinen EtherCAT-sykli sen sijaan vie aikaa noin 50-250 us. Paitsi, että EtherCAT on paitsi merkittävästi perinteisiä kenttäväyliä nopeampi, oli se pitkään myös nopein kaikista teollisista Ethernet-ratkaisuista. PROFINET IRT tosin pääsee nykyään lähes samaan suorituskykyyn hieinan laitteiden määrästä ja kehyskoosta riippuen. (Prytz 2008; Rostan, Stubbs ja Dzilno 2010)

Tähän työhön valittiin tarkempaan tarkasteluun perintersistä kenttäväylistä CAN-väylä sillä se on valmiiksi integroitu moniin edullisiinkin mikrokontrollereihin ja sen rakenne mahdollistaa lyhyehköt sykliajat siirrettävän tietomäärän ollessa pieni. Lisäksi käsitellään Ethernet-pohjaista EtherCAT-väylää sillä se on avoin, edullinen toteuttaa ja tällä hetkellä laitteissa laajimmin tuettu Ethernet-pohjainen kenttäväylä. Ainoastaan Profinet IRT ja SERCOS III yltyvät samankaltaiseen suorituskykyyn kuin EtherCAT, mutta niiden laitetuki ja avoimuus on EtherCATia heikompaa. Profinet IRT:n vähimmäisykli aika on myös kiinteästi rajattu 250 mikrosekuntiin.

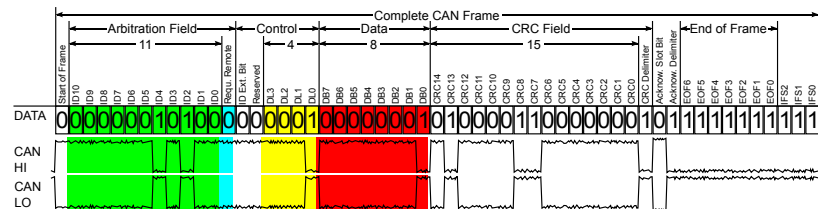
Tiedonsiirtoväyliä siirtokapasiteetti on rajallinen ja käytettävissä olevan hyötykapasiteetin on oltava vähintään yhtälön (2.6) mukainen.

3.2.1 CAN-väylä

CAN-väylä on Boschin 1980-luvulla alkuperäisesti ajoneuvokäyttöön kehittämä automaatiöväylä. Se on standardoitu ISO 11898-standardissa ja siitä on olemassa useita eri versioita. Avoimuutensa ja yhteensopivuutensa ansiosta se on ajoneuvokäytön lisäksi myös hyvin yleinen automaation kenttäväylä ja integroitu moniin halpohin mikrokontrollereihin.

CAN-standardi määrittelee sen monen isännän sarjakommunikaatiöväyläksi. Standardi määrittelee ainoastaan OSI-tiedonsiirtomallin alimmat kerrokset, fyysisen kerroksen ja siirtokerroksen. Monissa sovelluskohteissa käytetään standardin CAN:n lisäksi monesti vielä jotakin OSI-mallin 7. kerroksen toteuttavaa protokollaa. Yleisimpiä korkeamman tason teollisuusautomaatioprotokollia ovat esimerkiksi CANopen ja DeviceNet ja ne tarjoavat käyttäjälle monia raa'asta CAN-protokollasta puuttuvia ominaisuuksia kuten vuonhallinnan, laitteiden loogisen osoitteistuksen ja tuen yli yhden viestin pituisten datamäärien siirrolle.

Standardin 11-bittisellä tunnisteella varustetun CAN-kehysten rakenne on kuvan 3.4 mukainen.



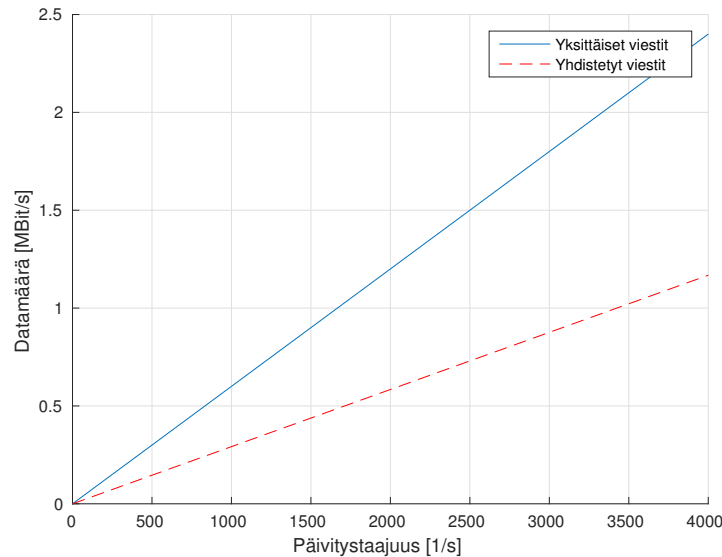
Kuva 3.4. Standardi 11-bittisellä tunnisteella varustettu CAN-kehys. (Wikimedia Commons)

Toisin sanoen CAN-kehysten vähimmäispituus on 44 bittiä, jolloin kuvaan punaisella merkitylle datalohkolle ei jää tilaa lainkaan. Datalohkon maksimipituus taas on 64 bittiä, jolloin kehysten maksimipituudeksi ilman bit stuffingia muodostuu 108 bittiä. Bit stuffing tarkoittaa virhesietoisuuden kasvattamiseksi kehykseen lisättyjä 5 saman bitin jälkeen lisättyä käänteistä bittiä. Hyvänä arvauksena stuff-bittien lukumäärälle voidaan 11-bittisen tunnisten tapauksessa pitää arvoa $3 + \text{databittien lukumäärä}$.

Vaadittava tiedonsiirtokapasiteetti olisi siis yhtälöä (2.6) mukailen

$$BR = f_s \cdot c(b_{\text{data}} + 44) \quad (3.1)$$

Esimerkiksi kappaleessa 4 käsitellyssä tehölähdeprototyypissä jokaisen teholähteen 10 kanavan referenssiarvo siirretään omassa viestissään. Databittien määrä näissä viesteissä on 16 bittiä eli 2 tavua. Siirrettävä datamäärä näytteistajuuden suhteen on piirretty kuvaan 3.5.



Kuva 3.5. Vaaditun tiedonsiirtokapasiteetin määrä CAN-väylässä kun joko kaikki virtaohjeet siirretään omia viesteinään tai mahdollisimman moni virtaohje samassa viestissä.

CAN-väylän maksimisiirtonopeus on 1 MBit/s. Kuvasta huomataan siis, että jos jokainen virtaohje siirrettäisiin omassa viestissään olisi maksiminäytteistystaajuus vain noin 1kHz vaikka siirrettävä data koostuisi ainoastaan virtaohjeista. Sen sijaan yhdistelemällä monta virtaohjetta kahdeksi 64-bittiseksi ja yhdeksi 32-bittiseksi viestiksi voitaisiin päästä yli 3 kHz taajuuteen. Tämä edellyttää sitä, että koko säätösykli olisi käytettävissä tiedonsiirtoon mikä ei tietenkään ole mahdollista. Tällöin taas tiedonsiirrostä säätöön aiheutuva viive kasvaisi merkittävästi.

Todennäköisesti kokonaisessa järjestelmässä tultaisiin samassa väylässä siirtämään muutakin dataa pelkän virtaohjeen lisäksi, joten CAN-väylä soveltuu ainoastaan hitaan alikriittisen järjestelmän tiedonsiirtoväyläksi. Tällöinkin joudutaan ohjelmistoteknisellä optimoinnilla yhdistämään useita virtaohjeita samaan CAN-viestiin. Mikäli järjestelmän monimutkaistuu joudutaan käyttämään vielä jotakin raa'an CAN-protokollan päällä toimivaa, OSI-mallin 7. kerroksen toteuttavaa protokollaa kuten CANOpenia tai DeviceNetiä heikentyy suorituskyky entisestään. Kokonaisuutena voidaan todeta, että etenkin kokonaan uusissa järjestelmissä olisi mahdollisuuksien mukaanärkevintä

käyttää esimerkiksi jotakin modernia Ethernet-pohjaista kenttäväylää CAN:n sijaan.

3.2.2 EtherCAT

EtherCAT on Ethernet-pohjainen nopea kenttäväylä, jonka suunnittelussa on pyritty välttämään muiden Ethernet-pohjaisten kenttäväylien suurimmat epäkohdat: suuri overhead, huonot reaaliaikaominaisuudet ja kenttäväyläkäyttöön soveltumaton topologia. Ethernet-tekniikka itsessään on näitä ongelmia lukuunottamatta houkutteleva vaihtoehto kenttäväyläkäyttöön. Se tarjoaa perinteisiin kenttäväylätekniikoihin verrattuna huomattavan suuret tiedonsiirtonopeudet, tekniikan yleisyyden mahdollistamat matalat kustannukset ja joustavuuden. (EtherCAT Technology Group 2014)

OSI-mallin mukaisena fyysisenä kerroksena EtherCAT käyttää lähiverkoista tuttua kuparikaapelintiin perustuvaa 100BASE-TX-standardia tai valokuituun perustuvaa 100BASE-FX-standardia. Lyhyillä välimatkoilla esimerkiksi laitteen sisäisessä kommunikaatiossa on fyysiseksi kerrokseksi tuettuna myös Beckhoffin itse kehittämä LVDS (Low Voltage Differential Signaling)-tekniikkaan perustuva E-BUS-standardi. Kerrosmallin ansoista fyysisen kerroksen vaihtaminen toiseksi ei tietneikään näy verkon muille laitteille millään tavoin. (Beckhoff Automation GmbH & Co. KG 2014)

EtherCAT-verkko on tyypillisesti linjatopologiaan (tosin muitakin vaihtoehtoja on) perustuva Master-Slave-verkko, joka koostuu yhdestä master-laitteesta ja useasta slave-laitteesta. Ainoastaan master-laite lähettää uusia EtherCAT-viestejä, slave-laitteet ainoastaan välittävät niitä verkossa eteenpäin kunnes jokaisen verkkosegmentin viimeinen slave-laite kaiuttaa viestin takaisin Master-laitteelle. Välillä olevat slave-laitteet voivat lukea tai muuttaa tietoa viestien sisällä. Paketin koosta riippumatta yhden slave-laitteen aiheuttama viive viestin kulkuun on tyypillisesti alle 500 nanosekuntia. (Prytz 2008)

Useat suorituskykyvertailut osoittavat, että EtherCAT toteuttaa nämä suunnitteluvaatimukset hyvin. Spesifikaatio lupaa alle 100 us syklijat hyvin vähäisellä, alle 1 us poikkeamalla syklien välillä. Esimerkiksi Prytz (2008) on tutkimuksessaan todennut että kun kaikki siirrettävä tieto mahtuu yhteen, enimmillään 1488 tavun mittaiseen EtherCAT-pakettiin kommunikaatiosyklin pituus vastaa melko tarkasti yhtälöä

$$T_{\text{line}}^{\text{ETC}} = T_m^f + T_p + n \cdot 1 \mu\text{s} \quad (3.2)$$

missä T_m^f on paketin prosessointiin EtherCAT-masterilta kuluva aika, T_p paketin vas-

taanottamiseen ja lähettämiseen EtherCAT-masterin verkkokortilta kuluva aika ja n EtherCAT-slavejen lukumäärä. Kunkin slaven aiheuttama viive on 100 Mbps-verkossa noin 1 mikrosekunti, 1 Gbps-verkossa vastaavasti noin 0.6 mikrosekuntia. Yhtälöä soveltaen todetaan 100 Mbps-verkossa että 16 tavun hyötykuormalla laitetta kohden EtherCAT pääsee alle 250 us sykliäikaan vielä 100 laitteen lukumäärällä. Käytettäessä yleistymässä olevaa 1 Gbps-verkkoa suorituskyky kasvaa noin kymmenkertaiseksi, sama määrä laitteita pystytään palvelemaan hieman yli 25 mikrosekunnissa. Suorituskyky on siis magneettilaakeirkäyttöön erinomainen.

Myös EtherCAT-väylän toteutuskustannukset ovat matalat kun fyysisenä mediana voidaan käyttää tavanomaisia toimistokäyttöön tarkoitettuja CAT5 tai CAT6-kaapeleita ja fyysisenä rajapintana tavallisia verkkokortteja. Markkinoilla on myös muutaman dollarin hintaisia EtherCAT Slave ASIC-piirejä joiden avulla EtherCAT-kommunikaation lisääminen itse suunniteltuihin, mikrokontrollerilla varustettuihin elektroniikkalaitteisiin on helppoa. Standardin avoimuuden ansiosta valmiita EtherCAT-kirjastoja niin slave- kuin master-laitteiden toteuttamiseen löytyy muun muassa monille eri mikrokontrollereille.

3.2.3 Hajautetut A/D-muuntimet

Paikka-anturien analogiset signaalit täytyy muuntaa digitaalseksi A/D-muuntimella ennen kuin niitä voidaan käyttää digitaalisessa säätöjärjestelmässä. A/D-muunnoksessa jatkuva-aikaiset, analogiset signaalit muutetaan diskreettiaikaisiksi kvantisoiduiksi signaaleiksi, eli niillä on aina jokin numeerisesti määritelty äärellinen tarkuus ja näytteistystaajuus. Tässä tapauksessa A/D-muuntimen on pystyttävä päivittämään säätöjärjestelmälle uusi arvo vähintään näytteistystaajuuden eli yhtälön (3.1) mukaisella taaajuudella. Varsinaisen muunnosajan on kuitenkin oltava huomattavasti tätä lyhempi, vain osa kuvan 2.4 mukaisesta, arvojen lukemiseen käytettävissä olevasta ajasta on käytössä A/D-muunnokseen ja kuten kappaleessa 2 todetaan, viiveen mittausketjussa tulisi olla mahdollisimman lyhyt.

Teollisuusautomaatiojärjestelmissä I/O toteutetaan monesti hajautettuna I/O:na joka kytkeytyy itse ohjaimen kenttäväylän välityksellä. EtherCAT on ainoa riittävän nopea kenttäväylä useimpiin magneettilaakerisovelluksiin ja Siemensin closed-loop säätöön tarkoitetuissa PLC-laitteissa on omat sisäänrakennetut A/D-muuntimet joten katsotaan taulukossa 3.4 mitä EtherCATiin kytkeytyviä nopeita A/D-muuntimia on markkinoilla. Laitteet ovat vain esimerkkejä valmistajien valikoimista, sekä Omronilla että

Beckhoffilla on samoista laitteista saatavilla myös esimerkiksi 4–20 mA virtatuloilla varustetut mallit.

Taulukko 3.4. Nopeat EtherCAT-kenttäväylään kytkeytyvät A/D-muuntimet ominaisuuksineen.

	Omron NX-AD4603	Omron NX-AD4608	Beckhoff EL3064	Beckhoff EL3104
Muunnosaika	250 us*	10 us*	625 us**	100 us**
Resoluutio	13 bit	16 bit	12 bit	16 bit
Kanavien lkm.	8	8	4	4
Tulon suodatin	-	-	1 kHz	5 kHz
Tulojännite	-10–+10 V	-10–+10 V	-10–+10 V	-10–+10 V

*) Yhden kanavan muunnosaika. **) Kaikkien kanavan muunnosaika.

Molempien valmistajien laitteet tarvitsevat lisäksi oman EtherCAT Coupler-laitteensa. Coupler-laite kytkeytyy RJ45-liittimellä itse EtherCAT-verkkoon kun taas yksittäiset I/O-modulit kytkeytyvät coupleriin käyttäen jotakin omaa, sisäistä väyläänsä. Omron NX-ECC käyttää sisäiseen kommunikointiin Omronin omaa NX bus-väylää kun taas Beckhoff EK1814 käyttää EtherCAT-standardin mukaista E-Bus-väylää. Ne eivät siis ole keskenään yhteensopivia vaan yhden valmistajan coupler-yksikköön voi kytkeä ainoastaan saman valmistajan I/O-moduleja. Standardoinnin ansiosta EtherCAT-väylässä voi kuitenkin yhdistellä monien eri valmistajien laitteita keskenään.

3.3 Paikka-anturit

Akselin paikan seuraamiseen tarvitaan paikka-anturit, jotka pystyvät määrittämään pyörivän akselin paikan kosketuksettomasti. Kosketuksettomat paikka-anturit voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri kategoriaan: kapasitiivisiin, optisiin ja sähkömagneettisiin antureihin. Sähkömagneettiset anturit vielä jakautuvat pyörrevirta-antureiksi ja induktiivisiksi antureiksi. Optiset anturit ovat usein soveltumattomia magneettilaakerikäyttöön mitta-alueensa ja likaantumisherkkyytensä vuoksi. (Chiba et al. 2005)

Magneettilaakerikäytössä selvästi yleisin anturityyppi on ollut pyörrevirta-anturit. Ne täyttävät hyvin antureille asetetut vaatimukset: käytön nopeuteen nähden riittävän laajaa taajuusvaste, riittävä tarkkuus ja matala kohinataso. Taulukossa 3.5 on lyhyehkö katsaus eri anturitekniikoiden tärkeimmistä ominaisuuksista magneettilaakerikäytössä ja tarkempi katsaus tekniikoihin ja markkinoilla oleviin anturivaihtoehtoihin tehdään

sen jälkeen omissa kappaleissaan.

Taulukko 3.5. Taulukko eri paikka-anturityyppien magneettilaakerisovelluksiin vaikuttavista ominaispiirteistä. (Lion Precision 2009; Schweitzer ja Maslen 2009)

	Induktiivinen	Pyörrevirta	Kapasitiivinen
Kaistanleveys	1–2 kHz	1–15 kHz	10–80 kHz
Resoluutio	Heikoin	Hyvä	Paras
Häiriölähteet	Ei merkittäviä	Ulkoiset magneettikentät	Herkkä epäpuhtauksille
Kohdemateriaali	Ferromagneettinen	Sähköä johtava*	Sähköä johtava
Hinta	Edullisin	Siltä väliltä	Yleensä hinnakkain

*) Vaatii erikseen kalibroinnin eri tavoin magneettisille materiaaleille.

3.3.1 Induktiiviset anturit

Induktiivinen etäisyysanturin toiminta perustuu anturin päässä olevaan käämiin johdettavaan pulssimaiseen jännitteeseen. Kun anturin pään lähelle tämän jälkeen vietään ferromagneettinen kappale kelan induktanssi muuttuu. Tämän perusteella voidaan päätellä anturin etäisyys mitattavaan kappaleeseen verrattuna. (Schweitzer ja Maslen 2009)

Induktiivisten paikka-antureiden soveltamista magneettilaakerikäyttöön on tutkittu jonkin verran. Tutkimusten mukaan käytettävissä oleva kaistanleveys riippuu suuresti anturissa käytetystä sydänmateriaalista, ja päättyy rautasydäntä käyttävillä antureilla noin 1 kHz jälkeen. Ferriittisydämeen perustuvissa antureissa raja sen sijaan tulee vastaan useissa sadoissa kilohertseissä, jopa 500 kHz kaistanleveys on mahdollinen. (Recheis et al. 2011) Artikkeleissa tutkitut anturit ovat kuitenkin olleet erityisesti käyttötarkoitusta varten yksittäiskappaleina rakennettuja laitteita, markkinoilla olevien teollisesti valmistettujen induktiivisten antureiden hyödyntämisestä järjestelmän osana ei ole löytynyt tieteellistä tietoa.

Markkinoille on viime vuosina tullut useilta eri valmistajilta edullisia induktiivisia, analogisella ulostulolla varustettuja paikka-antureita joiden kaistanleveys on yleensä enimmillään 2 kHz. Joitakin parhaiten magneettilaakerikohteeseen soveltuvia antureita on koottu taulukkoon 3.6. Valikoima on kuitenkin laaja eikä kaikkia mahdollisia vaihtoehtoja voida mitenkään käydä tässä läpi. Pääasiassa antureiden ominaisuudet

kuitenkin muistittavat melko paljon toisiaan. Taulukossa ei ole tarkasteltu myöskään sähköisiä ominaisuuksia kuten ulostulon tyyppiä sillä samoista antureista on usein sekä virta- että jänniteulostulolla varustettuja malleja.

Taulukko 3.6. Markkinoilla olevia magneettilaakerikäyttöön soveltuvia induktiivisia etäisyysantureita tärkeimpine tunnuslukuineen.

	Läpimitta	Kaistanleveys	Mittaluokka	Resoluutio	Lineaarisuusvirhe
Balluff BAW000L		1000 Hz	0.5–2 mm	-	+45 um
Contrinex DW-AS-509-M8	8 mm	1600 Hz	0–4 mm	< 1 um	-
Telemecanique XS1M12AB120	12 mm	1500 Hz	0.2–2 mm	-	-
Baumer IWRM 06	6 mm	1500 Hz	0–2 mm	< 5 um	+100 um
Baumer IWRM 08	8 mm	2000 Hz	0–2 mm	< 5 um	+100 um
Baumer IR08.D03S	8 mm	2000 Hz	0–3 mm	< 5 um	+300 um

Kaistanleveys parhailla antureilla päättyy noin 2 kHz kohdalla, joten vaatimusmäärittelyn perusteella näiden käyttö on mahdollista useissa käyttökohteissa. Induktiiviset anturit ovat yleensä pyörrevirta- ja kapasitiivisia antureita huomattavasti edullisempia, taulukon antureiden jälleenmyyntihinnat ovat noin 150–300 €/ kappale. Antureiden datalehtien arvot olivat joissain määrin puutteelliset, esimerkiksi Balluff ei ilmoita antureilleen lainkaan resoluutiota. Baumer vaikutti kaikkein soveltuvimmalta magneettilaakerikohteeseen, valmistaja mainitsee erikseen että ne on suunniteltu esimerkiksi pyörivien kappaleiden paikan ja värähtelyiden aistimiseen. Niitä on saatavilla myös linearisoituna ja niissä on muihin induktiiviseen antureihin verrattuna monipuoliset kalibrointiominaisuudet.

3.3.2 Pyörrevirta-anturit

Pyörrevirta-anturit ovat yleisin magneettilaakerikäytössä oleva paikka-anturityyppi. Niiden toiminta perustuu mittapäässä olevaan käämiin johdettavaan korkeataajuiseseen vaihtojännitteeseen, jonka magneettikenttä indusoi pyörrevirtoja mittakohteena olevaan ferromagneettiseen materiaaliin. Pyörrevirrat taas aiheuttavat omat magneettikenttensä, jotka ovat vastakkaisuuntaisia anturin magneettikenttään verrattuna. Tämä saa anturin käämin impedanssin ja siten käämin virran muuttumaan. Virran ampli-

tudin ja vaiheen perusteella pystytään päättelemään kappaleen etäisyys suhteessa anturiin. Modulointitaajuudet ovat melko korkeita, tyypillisesti 1–2 MHz väliltä. Kaistanleveys on tällöin enimmillään 10–15 kHz. (Lion Precision 2009; Schweitzer ja Maslen 2009)

Taulukossa 3.7 on käsitelty markkinoilla olevat magneettilaakerikäyttöön soveltuvimmat pyörrevirta-anturit. Kustakin anturijärjestelmästä on käsitelty vain yksi, mitta-alueeltaan magneettilaakerikäyttöön sopivin anturivaihtoehto. Tämän takia resoluutio ja lineaarisuus on ilmoitettu prosentteina koko mitta-alueesta silloin kun valmistaja ne tässä muodossa on tarjonnut, samoihin laitteisiin on useimmissa tapauksissa saatavilla myös muita antureita ja mitta-alueen vaihtuessa myös nämä tunnusluvut muuttuvat.

Taulukko 3.7. Markkinoilla olevia magneettilaakerikäyttöön soveltuvia pyörrevirtapaikka-antureita tärkeimpine tunnuslukuineen.

	Kaistanleveys	Mitta-alue	Resoluutio	Lineaarisuus
Lion Precision ECA101	10000 Hz	0.35–2 mm	0.02 % FS	Epälineaarinen
Lion Precision ECL150	15000 Hz	0.35–2 mm	0.008 % FS	0.2 % FS
Kaman KD-2446	10000 Hz	0–2.54 mm	< 0.008 % FS	Epälineaarinen
Micro-Epsilon DT3001	5000 Hz	0.4–2 mm	< 4 μ m	< 28 μ m
Micro-Epsilon DT3005	5000 Hz	0.2–2 mm	1 μ m (<0.05% FS)	< 5 μ m (<0.25 % FS)
SKF CMSS 65	10000 Hz	0.2–2.3 mm	-	< 25.4 μ m

Korkeahkoa hintaa lukuunottamatta ne olisivat erittäin hyvin soveltuva anturityyppi magneettilaakerisovelluksiin, yksittäinen anturi tarvittavine vahvistimineen ja mittauselektroniikkoineen maksaa tyypillisesti noin 1000 euroa. Eräs mielenkiintoinen uusi tuote on Micro-Epsilonin DT3001, joka integroi koko mittauselektroniikan kompaktisti sensorin sisään. Sen suorituskyky on toisaalta heikompi kuin muissa, monimutkaisemmissa ja kalliimmissa pyörrevirta-antureissa mutta silti magneettilaakerikäyttöön täysin riittävä. Valmistajan mukaan se kilpaileekin lähinnä parhaimpien induktiivisten antureiden kanssa ja erityisesti kaistanleveys on huomattavasti induktiivisia antureita parempi. Sen käyttöä magneettilaakerikohteissa kannattaisi ainakin tutkia ja kokeilla, sillä muut ominaisuudet vaikuttaisivat erittäin kilpailukykyisiltä esimerkiksi magneet-

tilaakereissa laajalti käytettyyn SKF CMSS 65-anturiin verrattuna.

3.3.3 Kapasitiiviset anturit

Kapasitiiviset anturit perustuvat elektrodin kapasitanssin muuttumiseen kun se on lähellä jotakin kappaletta. Kun sensorissa olevaan elektrodiin johdetaan vakioamplitudinen vaihtovirta pystytään kapasitanssi ja siten etäisyys päättämään mittaamalla elektrodin jännitettä. Jännite on jokseenkin suoraan verrannollinen kappaleen etäisyyteen sensorista. Ne siis perustuvat sähkökenttiin sähkömagneettisten antureiden magneettikenttien sijaan.

Pyörrevirta-antureihin verrattuna ne soveltuvat erityisen hyvin pienten kappaleiden paikan tarkkaan määrittämiseen lähietäisyydellä. Erityisesit niiden resoluutio on erinomainen, jopa nanometriluokkaa. Huonona puolena on tosin herkkyys mittaushetken epäpuhtauksille, anturit reagoivat kaikkiin johtaviin materiaaleihin. Niiden kaistanleveys on tyypillisesti induktiivisten antureiden ja pyörrevirta-antureiden väliltä. Toisaalta, myös hinta on yleensä jopa pyörrevirta-antureita korkeampi.

Taulukossa 3.8 on käsitelty markkinoilla olevat magneettilaakerikäyttöön soveltuvimmat kapasitiiviset anturit. Kustakin anturijärjestelmästä on käsitelty vain yksi, mitta-alueeltaan magneettilaakerikäyttöön sopivin anturivaihtoehto. Tämän takia resoluutio ja lineaarisuus on ilmoitettu prosentteina koko mitta-alueesta, samoihin laitteisiin on useimmissa tapauksissa saatavilla myös muita antureita ja mitta-alueen vaihtuessa myös nämä tunnusluvut muuttuvat. Samoin kaistanleveys on useissa antureissa valittavissa; taulukossa on ilmoitettu kaikille antureille suurin mahdollinen kaistanleveys. Pienemmän kaistanleveyden käyttöön parantaa yleensä resoluutiota.

Taulukko 3.8. Markkinoilla olevia magneettilaakerikäyttöön soveltuvia kapasitiivisia etäisyysantureita tärkeimpine tunnuslukuineen.

	Kaistanleveys	Mitta-alue	Resoluutio	Lineaarisuus
Micro-Epsilon DT6110	1000 Hz	0–2 mm	0.01% FSO	+/-0.05% FSO
Micro-Epsilon DT6220	5000 Hz	0–2 mm	0.004% FSO	+/-0.05% FSO
Lion Precision CPA100	15000 Hz	0.25–2 mm	0.03 % FSO	Epälineaarinen
Lion Precision CPL230	15000 Hz	0.25–2 mm	0.004% FSO	0.5% FSO

Kapasitiivisten antureiden ominaisuudet siis muistuttavat melko paljon vastaavia pyörrevirta-antureita. Mikäli markkinoille ei tule jotakin erityisen edullista kapasitiivista järjestelmää, ei niiden käytölle magneettilaakerisovelluksessa pyörrevirta- tai induktiivisten anturien sijaan ole mitään perusteita. Toisaalta jos muihin tekniikoihin verrattuna korkea hinta ei ole ongelma ei mikään ominaisuus myöskään estä käyttämästä niitä.

3.4 Teholähteet

Magneettilaakerin tehonlähteen tärkeimpänä ominaisuutena voisi hieman yksinkertaistaen pitää kykyä tuottaa tarkasti halutun suuruista virtaa vaikka virtaohje tai kuorman impedanssi muuttuisi nopeastikin. Markkinoilla on hyvin niukasti suoraan magneettilaakerin tehonlähteeksi soveltuvia laitteita. Erityisesti vaatimus nopeasta vasteesta virtaohjeen muutokseen tuottaa vaikeuksia; virtaohjetta olisi käytännössä pystyttävä muuttamaan jokaisen säätösyklin jälkeen eli pahimmillaan monien kilohertsien taajuudella yhtä aikaa kaikille 10 kanavalle.

Ilman modifikaatioita magneettilaakerin tehonlähteeksi soveltuvien tuoteryhmä ovat yksinkertaiset DC servo-ohjaimet. Ohjelmistomuutoksien myötä esimerkiksi tavallisten kolmivaiheisten taajuusmuuttajien käyttö on mahdollista, aiheesta on tehty tutkimusta ks. esim (Walter et al. 2010). Yksi mahdollisuus olisi myös käyttää ohjattavia tehonlähteitä, niiden ongelma on kuitenkin se että ne ovat yleensä laboratorio- ja testauskäyttöön

suunniteltuja ja siten kalliita sekä myös liian hitaita.

Servokäytöt ovat erilaisten servomoottorien tarkkaan ajamiseen tarkoitettuja laitteita. Niissä on siten huomattava määrä magneettilaakerikäytössä täysin tarpeettomia, hintaa nostavia ominaisuuksia kuten tuki erilaisille resolveille ja muita servokäytössä epäilemättä tarpeellisia ominaisuuksia. Hyvin monet laitteet tarjoavat tämän lisäksi myös mahdollisuuden syöttää muuttuvan virtaohjeen mukaista vakiovirtaa induktiiviseen kuormaan, joka on juuri sitä mitä magneettilaakeriteholähteellä halutaan tehdä. Rakenteeltaan DC servo-ohjaimet ovat yksinkertaisimmillaan kuvan 2.5 mukaisia H-siltoja, jonka ympärille on lisätty tarvittava mittaus- ja ohjauselektroniikka. (Advanced Motion Controls 2015)

Myös servokäyttöjen integroituvuus kenttäväyliin ja automaatiojärjestelmiin on hyvällä tasolla. Esimerkiksi Advanced Motion Control Inc. valmistaa EtherCAT-väylään kytkettyviä, suoraan DIN-kiskoon kiinnitettäviä servovahvistimia. Niidenkin ainoana huonona puolena on hinta. Magneettilaakerikäyttöön riittävän tehokkaat mallit maksavat helposti yli 1000 euroa kappale, ja laitteita tarvitaan luonnollisesti kaikkiaan 10 kappaletta. Edullisempi ratkaisu olisi käyttää jotakin sellaista servokäyttöä, jolle syötetään ohjearvo esimerkiksi analogisena 0–10 V-signaalina sopivalta EtherCAT I/O-modulilta. Magneettilaakerikäytössä tällä järjestelyllä ei suorituskykykään kärsisi merkittävästi.

Taulukko 3.9. Markkinoilla olevia magneettilaakerikäyttöön soveltuvia servo-ohjaimista tärkeimpine tunnuslukuineen.

	Jatkuva teho	Vir- ta	Jännite	Kytken- taajuus	Ohjaus
AMC 20A20	1805 W	10 A	40–190 VDC	22 kHz	0–10V
AMC DPEANIU- 015S400	1700 W	7.5 A	127–373 VDC 100–240 VAC	20 kHz	EtherCAT
Elmo G-DCWHI 9/200	1450 W	9 A	12–195 W	20 kHz	EtherCAT

Ennen ainakaan monimutkaisempien ohjelmoitavien servo-ohjainten käyttö päätöstä kannattaa varmistua niiden ohjelmoitavuudesta tähän käyttötarkoitukseen. Varsinainen suunniteltu käyttö niille on varsin erilainen, ja valmistajien omat ohjelmointityökalut voivat olla varsin rajoittuneita. Muita huonoja puolia voivat olla esimerkiksi se ettei laitteen sisäinen toiminta ole täysin tiedossa, eikä sen toimintaa esimerkiksi jois-

sain virhetilanteissa voida täysin ennustaa.

Vaihtoehtojen ollessa näin rajoittuneita ja kalliita on oman tehonlähteen kehittäminen houkutteleva vaihtoehto. Toisaalta, jokin erikoistehonlähteitä valmistava yritys voisi todennäköisesti modifioida jonkin olemassaolevan tuotteen magneettilaakerikäyttöön soveltuvaksi jos laitteisto päädytään rakentamaan ja todellinen tarve tehonlähteelle ilmenee.

4 MAGNEETTILAAKERIN TEHOLÄHDEPROTOTYYPPI

Valmiiden magneettilaakerikäyttöön soveltuvien teholähteiden puuttuessa markkinoilta ja tähän asti käytettyjen ratkaisujen ollessa kalliita kehitettiin Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa heinä-elokuussa 2014 (Petteri Mustonen ja Christian Meier) prototyyppi yksinkertaisesta ja edullisesta magneettilaakerikäyttöön soveltuvasta teholähteestä. Prototyypin tarkoituksena oli toisaalta testata edullisten kolmivaiheisten älykäden tehomodulien (Intelligent Power Module, IPM) soveltuvuutta magneettilaakerikäyttöön, toisaalta tutkia teholähteen komponenttikustannuksia. Tässä osiossa luodaan myös lyhyt katsaus vaatimuksiin, joita tämänkaltaisen laitteen markkinoille saataminen vaatisi tuotevastuun, tuotehyväksyntien ja sähköturvallisuuden näkökulmista.

4.1 Rakenne

Teholähteen suunnittelun lähtökohdaksi oli saada integroitua yhdelle piirilevylle mahdollisimman monen magneettilaakerikään virtaohjaukseen tarvittava teho- ja mitauselektronikka sekä niin suorituskykyinen mikrokontrolleri, että se pystyy yksin huolehtimaan virtasäädöstä A/D-muunnoksineen ja kommunikoimaan sisään- ja ulospäin magneettilaakerikäyttöön riittävällä nopeudella mahdollisimman laajasti käytetyn tiedonsiirtoväylän välityksellä. Suunnittelussa päädyttiin käyttämään Texas Instrumentsin C2000 Piccolo-sarjaan kuuluvaa TMS320F28035-mikrokontrolleria ja tehomodulina ST Microelectronics SLLIMM integroitua kolmivaiheista tehomodulia joita on sijoitettu samalle piirilevylle 2 kappaletta mahdollistaen yhteensä 3 käämin ohjauksen kun niitä käytetään H-siltakonfiguraatiossa. Valittu mikrokontrolleri tarjoaa integroidun CAN-rajapinnan joten se oli luonnollinen valinta kommunikaatiotähtäykseksi. Liitteessä 2 on esitetty teholähteen kytkentäkaaviot tarvittavin osin.

Luettelo olennaisista komponenteista:

- ST SLLIMM STGIPL20K60 Intelligent Power Module
- LEM CAS-15-NP Current Transducer
- TI TMS320F28035 μ C
- TI ISO1050 CAN Transceiver

4.1.1 Intelligent Power Module

Älykkääksi tehomoduliksi (Intelligent Power Module, IPM) kutsutaan tehoelektronikan komponenttia, jossa on integroitu yhteen koteloon lähes kaikki kolmivaiheisen invertterin toteuttamiseen tarvittavat komponentit. Tyypillisesti IPM:t sisältävät tarvittavan määrän kytkinkomponentteja kuten IGBT-transistoreita, niiden hilaohjaimet, tarvittavat passiiviset komponentit ja mahdollisesti virran- ja lämpötilanmittauksen tarvittavine komponentteineen. IPM:n ohjaaminen on siis mahdollista suoraan esimerkiksi mikrokontrollerin tai FPGA:n logiikkatasoisilla signaaleilla ilman ulkopuolisia komponentteja.

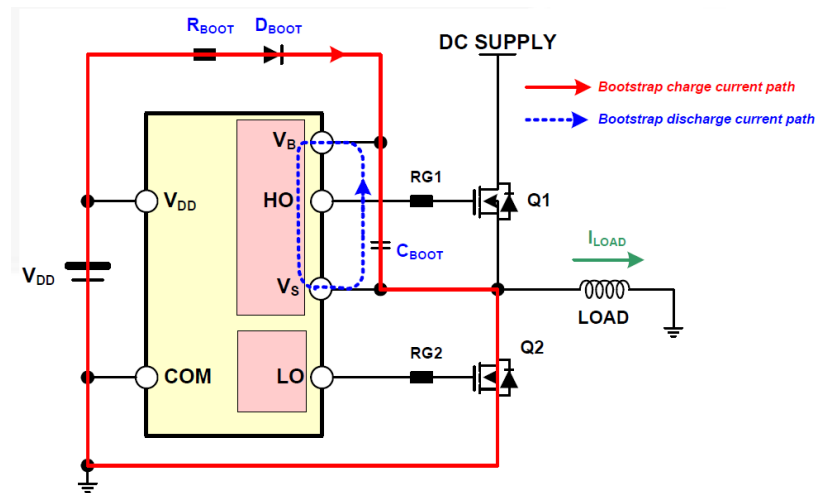
Valmiin tehomodulin käytöllä saavutetaan useita etuja erillisistä komponenteista suunniteltuihin ratkaisuihin verrattuna. Komponenttien määrän väheneminen alentaa suunnittelukustannuksia ja laitteen tilantarvetta, samoin kokonaisjärjestelmän hinta on usein alhaisempi integroitua modulia kuin erilliskomponentteja käyttäen. Integroitu rakenne vähentää suunnitteluvirheiden mahdollisuutta ja takaa pienemmät EMI-häiriöt. Moduliin sisältyvä äly mahdollistaa kehittyneet suojausominaisuudet esimerkiksi oikosulkua ja kuumenemistä vastaan.

IPM:t on lähes aina suunniteltu kolmivaihemoottorien virransyöttöön, ne siis koostuvat kolmesta puolisillasta. Magneettilaakerikäyttöön sovellettuna tämä tarkoittaa, että joko käytetään yhdestä modulista kahta puolisillaa H-siltakokoonpanoksi kytkettynä yhden magneettilaakerikäämin syöttämiseen tai vaihtoehtoisesti käytetään vastaavaa modulointitekniikkaa, kuin taajuusmuuttajaa magneettilaakerikäyttöön sovellettaessa jolloin yhdellä modulilla voidaan syöttää kahta magneettilaakerikäämiä.

Tasavirtaa IPM:llä syötettäessä on otettava huomioon puolisillan yläpuolen transistorin hilaohjetta varten tarvittavan jännitteen muodostamiseksi käytetty tekniikka. Käytännössä kaikki tehokytkimenä käytetyt IGBT-transistorit ovat N-kanavan transistoreita, jolloin niiden johtavaksi saaminen vaatii hila-emitterijännitteen nostamisen kollektori-emitterijännitettä korkeammaksi. 3-vaiheisessa invertterissä samoin kuin H-sillassa yläpuolisen transistorin emitteri on käytön aikana kytkinten asennosta riippuen vuorotellen DC-välipiirin positiivisessa tai negatiivisessa potentiaalissa. Näin ollen transistorin hilajännite on nostettava välipiirin jännitettä korkeammaksi kytkeytymisen tapahtumiseksi.

Jännitteen nostamiseen ilman eri jännitelähdettä on olemassa monia tekniikoita, joista yleisimmin käytetyt ovat ns. "bootstrap"-tekniikka ja "charge pump"-tekniikka.

Bootstrap-tekniikka on yksinkertaisempi ja halvempi toteuttaa ja useissa IPM:ssä kuten tässä teholahteessa käytetyssä ST SLLIMM:ssä on sisäänrakennettu bootstrap-diodi. Sen magneettilaakerikäytössä mahdollisesti esiin tulevana ongelmana on bootstrap-kondensaattorin varaamisen asettamat rajoitukset duty cyclelle ja yksittäisen tehokytimen päälläoloajalle. Bootstrap-periaate on esitetty kuvassa 4.1. (International Rectifier 2014)

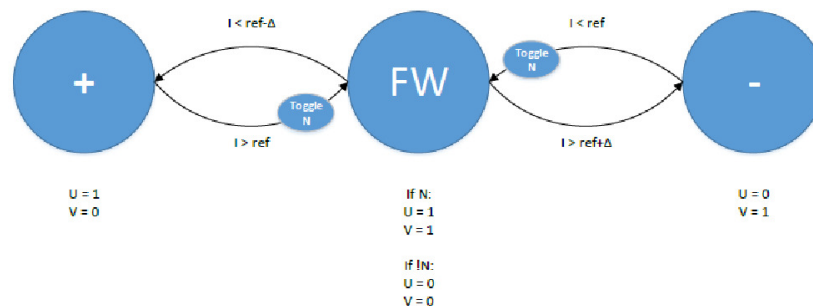


Kuva 4.1. Bootstrap-periaate. Punaisella C_{BOOT} latautumisvirran kulku kun Q2 johtaa ja Q1 ei johda, vastaavasti sinisellä purkautumisvirran kulku kun Q1 johtaa ja Q2 ei johda. (International Rectifier 2014)

Kuvasta nähdään, että riippuen transistorien Q1 ja Q2 tilasta bootstrap-kondensaattoria C_{BOOT} joko varataan tai puretaan, bootstrap-diodin D_{BOOT} biasoinnin mukaisesti. Vaikka IGBT-transistori onkin jänniteohjattu komponentti, on sekä sillä että bootstrap-diodilla aina jokin pieni vuotovirta, joka yhdistettynä kondensaattorin kapasiteetin suhteelliseen pienuuteen. Kytkin taas pysyy johtavana ainoastaan niin kauan, kun kondensaattorin varaus on niin suuri että transistorin hilajännite saadaan pidettyä riittävän suurena. Tehtyjen mittausten perusteella tämän teholahteen komponentein ongelmia tulee vasta, kun kytkentävälit ovat yli 1 sekunnin mittaisia. Käytännössä magneettilaakerille ei koskaan syötetä täyttä virtaa näin pitkiä aikoja yhtäjaksoisesti, joten ongelmaa ei muodostu. Mikäli yhtenäistä tasavirtaa kuitenkin haluttaisiin syöttää, voidaan transistoreja välillä pakottaa ohjelmallisesti päälle tai pois, kondensaattorin latautumisaika on niin lyhyt ettei merkittävää haittaa aiheudu.

4.1.2 Sulautettu ohjelmisto

Teholähteeseen ohjelmoitiin C-kieltä ja Texas Instrumentsin kehitystyökaluja käyttäen ohjelmisto, jonka perustana on kolmiportainen hystereesissäädin. Varsinainen säädin on toteutettu tilakoneena, kuvassa 4.2 on esitetty säätimen tilakonekaavio. Uusi virtareferenssi voidaan siirtää teholähteelle taustalla CAN-väylän välityksellä. Tähän tarvitsee vielä vuokaavion ohjelman suorituksesta, että voi avata asiat.



Kuva 4.2. Tilakonekaavio hystereesissäätimestä.

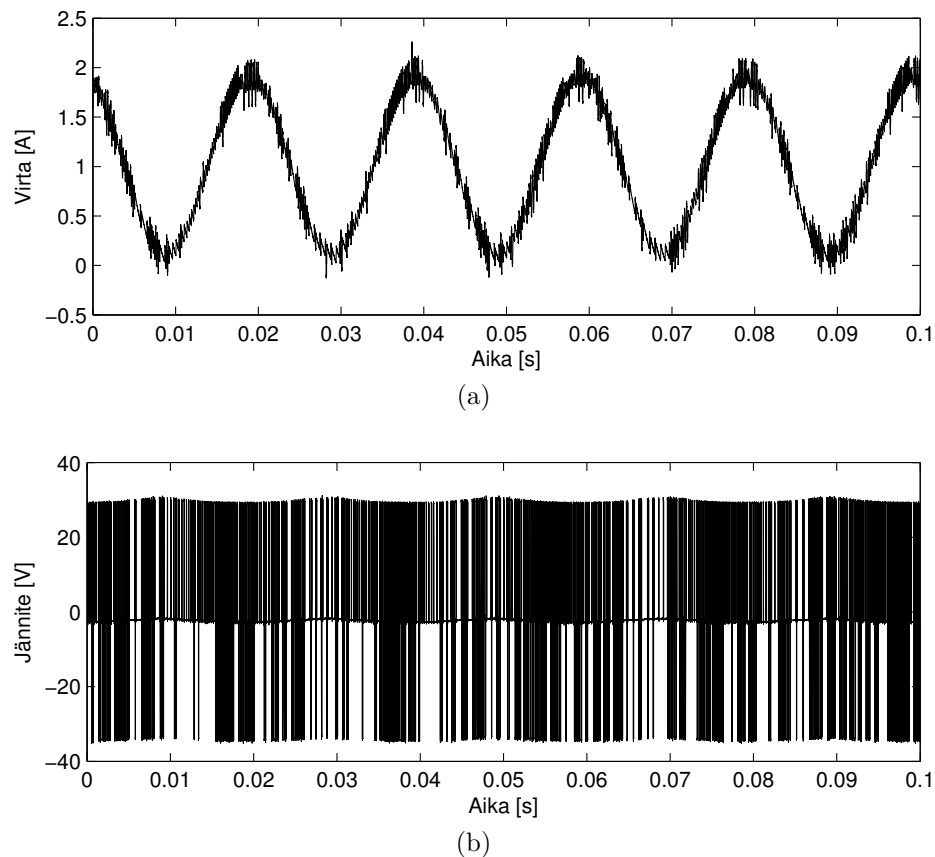
Kaaviosta nähdään säätimen kolme tilaa; + -tila, jossa H-silta syöttää positiivista jännitettä, FW eli “Free Wheeling”-tila, jossa jännitettä ei syötetä (selitä!) ja - -tila, jossa H-silta syöttää negatiivista jännitettä. FW-tilasta muihin tiloihin ei siirrytä välittömästi virtareferenssin ylittyessä tai alittuessa vaan siirtymissä on hystereesi, tästä tulee myös säätimen nimi.

4.2 Laitteen suorituskyvyn arviointi

Teholähteen toiminnan varmentamiseksi siitä mitattiin virran ja jännitteen käyrämuotoja erilaisilla herätteillä käyttäen kuormana oikosulkumoottorin staattoria, jonka $L = 6.2$ mH ja $R = 1.16$ Ω . Se siis vastaa sähköisiltä parametreiltaan jokseenkin tyypillistä magneettilaakerikäämiä. KytKentätaajuutena kaikissa testeissä oli 30 kHz ja välipiirin jännitteenä 31.2 V. KytKentätaajuus on jonkin verran IGBT-tehomodulin valmistajan ilmoittamaa suositeltua maksimiarvoa (20 kHz) suurempi. Todennäköisesti suositusarvo on annettu ainoastaan riittävän alhaisten kytKentälämpöhäviöiden takaamiseksi ja kun käytetty teho oli huomattasti nimellisarvoa pienempi toimi moduuli hyvin tälläkin kytKentätaajuudella.

CAN-väylän suorituskykyrajoitteiden vuoksi teholähteeseen ohjelmoitiin mahdollisuus

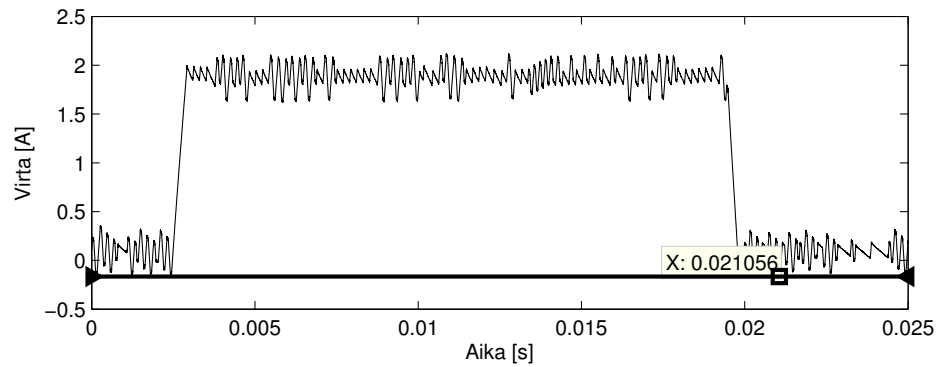
tuottaa testisignaaleja sisäisesti. Kuvassa 4.3 on piirrettynä mitatut virran ja jännitteen käyrämuodot kun virran referenssiarvona käytettiin 50 Hz sinisignaalia, kuvassa 4.4 on esitetty vastaavasti virran ja jännitteen käyrämuodot kun herätteenä on 50 Hz kanttiaalto.



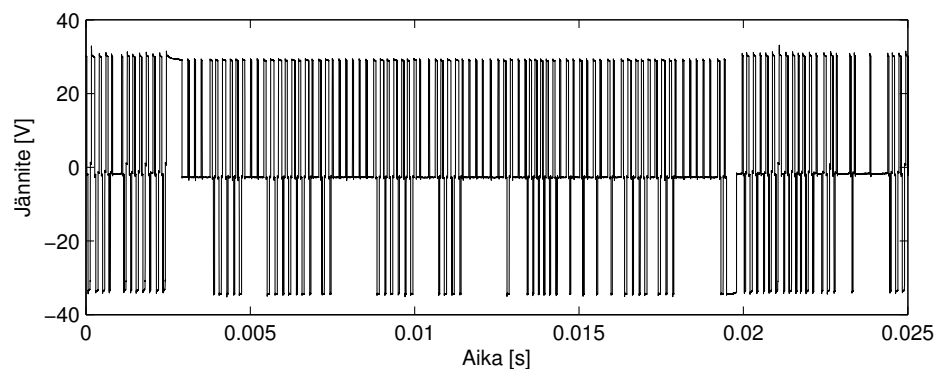
Kuva 4.3. Virran ja jännitteen käyrämuodot kun herätesignaalina on 50 Hz siniaalto.

Kuvista nähdään virran värein olevan noin 150 mA virran maksimiarvon ollessa 1.9 A, siis noin 8 %. Askelmaisessa virtamuutoksessa 0 ampeerista 2 ampeeriin on nousuaika 0.485 ms. Teholähteen dynamiikka — esimerkiksi jo edellä mainittu huomattavan suuri nousuaika — riippuu näin yksinkertaista säädintä käytettäessä tosin lähes ainoastaan kuormasta ja välipiirin jännitteestä.

Kuvassa 4.5 esitetystä FFT-analyysistä kuvan 4.3 virran käyrämuodosta nähdään että häiriöisen näköisestä virrasta huolimatta muut taajuuskomponentit kuin hallitseva perusaallon 50 Hz komponentti ovat olemattoman pieniä. Mikään ei siis estä käyttämästä laitetta magneettilaakerin teholähteenä. Etenkin vakiovirtaohjeella esiintyvää, todennäköisesti virranmittauksen huonosta toteutuksesta johtuvaa varsin suurta väreitä voidaan vielä entisestään pienentää kappaleessa 4.3 esitellyin menetelmin. Samoin



(a)



(b)

Kuva 4.4. Virran ja jännitteen käyrämuodot kun herätesignaalina on 50 Hz kanttiaalto.

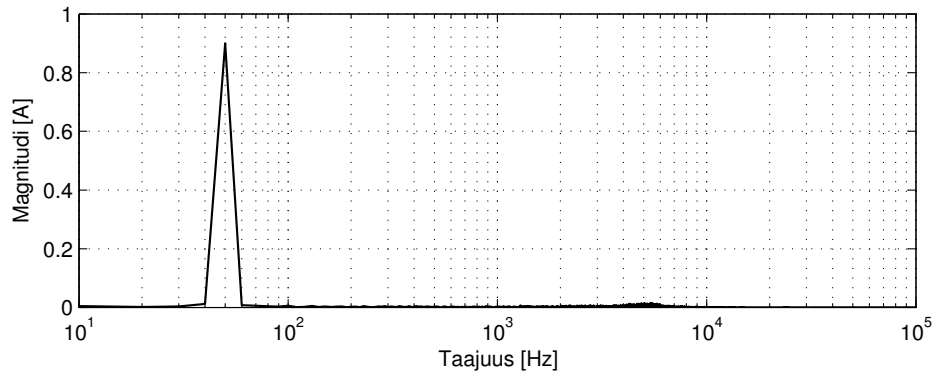
hystereesisäätimen korvaamista esimerkiksi magneettilaakeriteholähteissä yleisellä P-säätimellä kannattaa ainakin testata.

4.3 Kehitysehdotukset

Teholähde on nopeasti suunniteltu, enimmäkseen älykkään tehomodulin testaamiseen ajateltu laite. Sen testauksen ja edelleenkehityksen aikana on tullut esille useita eri kehityskohteita, jotka kannattaa ottaa huomioon mikäli sitä aiotaan joskus jatkokehittää ja käyttää todellisuudessa magneettilaakereiden tehonsyöttöön. Osa kehitysehdotuksista on laitteen suorituskykyyn, osa laitteen hintaan liittyviä. Kaikki käytetyt ratkaisut eivät olleet kummastakaan näkökulmasta optimaalisia.

Virtamittaus

Virtamittaus, erityisesti mittasignaalin analogiseen käsittelyyn käytetty elektroniikka on suunniteltu huonosti, ja osa teholähteen syöttämän virran kohinaisuudesta selittyy sillä. Teholähteen yksi “leg” virtamittauksineen näkyy liitteen



Kuva 4.5. FFT-analyysi kuvan 4.3 virran käyrämuodosta.

2 kuvassa A2.1. Eräs tehonlähteen hintaa ja mahdollisesti myös virtamittauksen laatua parantava muutos voisi olla LEM-antureihin perustuvan virtamittauksen korvaaminen shunt-vastuksilla ja SLLIMM-moduulin sisäisen operaatiovahvistimen käyttö mittaussignaalin analogiseen käsittelyyn.

Ohjelmisto ja säädin

Paremmen ohjelmiston kehittäminen. Monien rinnakkain suoritettavien prosessien ja tehonlähteeltä mahdollisesti haluttavien kommunikaatio- ja diagnostiikkao-minaisuuksien vuoksi reaaliaikakäyttöjärjestelmän käyttö olisi perusteltua mikäli suorituskyky saadaan riittävän hyväksi. Alustava versio ohjelmiston TI-RTOS versiosta on olemassa, mutta työhön käytettävissä olleen rajallisen ajan vuoksi sitä ei ehditty saamaan käyttökelpoiseksi. Samoin säätimen optimaaliseen valintaan kannattaa kiinnittää huomiota, esimerkiksi hystereesissäätimen korvaamista magneettilaakerikäytössä yleisellä P-säätimellä kannattaa testata.

Tiedonsiirto ja kommunikaatio

Kommunikaation ja virtaohjeen päivittämisen kannalta suurin ongelma on tehonlähteessä käytetty CAN-väylä, josta loppuu teho kesken nopeammassa virtasäädössä kuten yhtälöllä (2.6) voidaan osoittaa. Suorituskykyrajoitteiden vuoksi CAN kannattaa korvata EtherCAT-väylällä mikä onnistuu helpoiten valmiilla EtherCAT ASIC-piirillä. Muutos ei lisäisi laitteen komponenttikustannuksia merkittävästi ja se parantaisi huomattavasti tehonlähteen hyödynnettävyyttä erilaisten järjestelmien osana. Mikäli järjestelmä halutaan tehdä enemmän modulaariseksi, olisi komponenttien välisen kommunikaation korvaaminen LVDS-signaalointia käyttävällä EtherCAT E-Bus väylällä mahdollista. Tämä kuitenkin vaikuttaisi lähinnä laitteen fyysiseen olemukseen, kun kaikkien tehonlähdetyksiköiden välille ei tarvitsisi vetää CAT-kaapelia. Suorituskyky on identtinen ”normaalin” EtherCAT:n kanssa.

CE-merkinnän vaatimusten huomioni

Mikäli teholähdettä halutaan joskus käyttää laboratorio-olosuhteiden ulkopuolella tulee sen täyttää kappaleessa 4.4 esiteltyt vaatimuksenmukaisuusmääräykset. Helpointa määräysten täyttäminen on, kun eri direktiivien vaatimukset otetaan standardien noudattamisen avulla huomioon heti laitteen suunnitteluvaiheesta lähtien. Tämänhetkisessä toteutuksessa vaatimuksenmukaisuuteen ei ole kiinnitetty huomiota lainkaan.

4.4 Vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen

Päästäkseen markkinoille EU-alueella sähkölaitteen on oltava vaatimustenmukainen, eli täytettävä kaikkien sitä koskevien direktiivien vaatimukset ja lisäksi mahdolliset kansalliset erityisvaatimukset. Direktiivien soveltamista laitteiden suunnitteluun, arviointiin ja testaukseen on kuvattu yksityiskohtaisesti ns. eurooppalaisissa yhdenmukaistetuissa standardeissa. Niillä tarkoitetaan eurooppalaisen standardointielimen (CENELEC, CEN tai ETSI) Euroopan komission pyynnöstä vahvistamia standardeja. Kun sähkölaite suunnitellaan, valmistetaan tarkastetaan ja testataan täysin näitä standardeja noudattaen katsotaan sen täyttävän sitä koskevat olennaiset vaatimukset. Standardien käyttö on kuitenkin vapaaehtoista mikäli valmistajalla on jokin muu tapa osoittaa direktiivien olennaisten vaatimusten toteutuminen, käytännössä se on kuitenkin lähes aina hankalampaa kuin standardien noudattaminen. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2014)

Vastuu laitteen suunnittelun ja valmistuksen vaatimuksenmukaisuuden täyttymisestä on aina laitteen valmistajalla, vain joissain erikseen määritellyissä tapauksissa vaatimuksenmukaisuusarviointiin tarvitaan mukaan puolueeton ilmoitettu tarkastuslaitos. Käytännössä valmistaja laatii ja arkistoi direktiivien edellyttämät tekniset asiakirjat, varmistaa standardeja käyttäen laitteen täyttävän direktiivien vaatimukset ja todistuksena tästä laatii ja allekirjoittaa EU-vaatimustenmukaisuusvakuutuksen. Vaatimustenmukaisuusvakuutuksessa listataan laitteen täyttämät direktiivit sekä niiden tulkinnassa käytetyt standardit. Merkkinä vaatimustenmukaisuusvakuutuksen allekirjoittamisesta valmistaja kiinnittää laitteeseen CE-merkinnän sekä muut vaaditut merkinnät. Markkinoille saattamiseen ei siis vaadita mitään viranomaisen suorittamaa ennakkotarkastusta tai hyväksyntää. Yksityiskohtaisia tietoja laitteilta vaadituista merkinnöistä ja ohjeista saa Suomessa Turvallisuus- ja kemikaalivirastolta (TUKES).

Suunniteltuun, maksimissaan noin 200VDC jännitetasolla toimivaan teholähteeseen so-

velletaan seuraavia direktiivejä ja standardeja: (European Power Supply Manufacturers Association 2005; Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2014)

Pienjännitedirektiivi (LVD, low voltage directive, 2006/95/EY)

Direktiivin tarkoituksena on taata, että sähkölaitteet eivät oikein käytettyinä, asennettuina ja huolattuina vaaranna henkilöiden, kotieläinten tai omaisuuden turvallisuutta. Sitä sovelletaan kaikkiin sähkölaitteisiin, joiden syöttö- tai läh-
töjännite on välillä 50–1000VAC tai 75–1500VDC. Valmistaja on itse vastuussa direktiivin vaatimusten täyttymisestä, Kolmannen osapuolen käyttö vaatimus-
mukaisuuden varmistamisessa ei ole pakollista.

Yleiskäyttöisille, ammattilaisten lopputuotteeseen asentamaksi tarkoitetuille kom-
ponenttiteholähteille (Component Power Supply, CPS) sovelletaan standardia
**EN60950 Tietotekniikan laitteiden ja sähkökäyttöisten toimistokonei-
den turvallisuus**, lisäyksellä että laitteen asentaja on vastuussa laitteen suo-
jaukselta sähköiskua, lämpötilaa, säteilyä tai tulipaloa vastaan (European Power
Supply Manufacturers Association 2005). Ainoastaan teollisuuskäyttöön tarkoi-
tetut laitteet voivat noudattaa myös seuraavia standardeja:

- IEC/EN 60201-1 Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset
- EN 50178:1997/IEC 62103 Elektroniikkalaitteiden käyttö tehosähköasen-
nuksissa. Käytetty mm. taajuusmuuttajien hyväksynnässä ennen varsinaisia taajuusmuuttajastandardeja. Standardin mukaan “As the standard is also concerned with the design and testing of electronic equipment, the appropriate clauses within it apply in cases where no other applicable specifications exist in individual product standards.”

EMC-direktiivi 2004/108/EY (20.4.2016 alkaen 2014/30/EU)

EMC-direktiivin tarkoituksena on suojata radiotietoliikennettä, sähkö- ja tieto-
liikenneverkkoja sekä niihin liittyviä laitteita sähkömagneettisilta häiriöiltä. Di-
rektiiviä sovelletaan kaikkiin laitteisiin ja kiinteisiin asenuksiin, jotka voivat joko
aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä tai häiriintyä ympäristön sähkömagneetti-
sista häiriöistä. Myös EMC-vaatimuksenmukaisuus todetaan valmistajan omilla
tarkastuksilla sekä teknisen dokumentaation ja vaatimuksenmukaisuusvakuutus-
ten laadinnalla, kolmannen osapuolen käyttö arvioinnissa on vapaaehtoista.

EMC-vaatimuksenmukaisuutta arvioitaessa voidaan magneettilaakerin tehöläh-
teelle suoveltaa seuraavia standardeja:

- IEC/EN 61000 Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC) sarjan standardit. Näissä standardeissa määritellään yleisesti raja-arvot sähköverkkoon aiheutuille harmonisille häiriöille ja jännitteenvaihteluille sekä laitteilta vaadittava sietokyky näille häiriöille.
- IEC 61204-3 Pienjännitetehtensyöttölaitteet, tasasähkölähtö – Osa 3: EMC-tuotestandardi

RoHS-direktiivi (restriction of hazardous substances, 2011/65/EU)

RoHS-direktiivi rajoittaa eräiden ihmisen terveydelle tai ympäristölle haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Se edellyttää laitteiden valmistajaa varmistamaan CE-merkinnän saamiseksi, ettei laite sisällä direktiivissä mainittuja vaarallisia aineita määrättyä enimmäispitoisuutta enempää.

Direktiivin soveltaminen on vuonna 2019 päättyvän siirtymäajan jälkeen pakollista kaikissa sähkö- ja elektroniikkalaitteissa joitain poikkeuksia lukuunottamatta, myös teollisuuskohteissa. Esimerkiksi monien taajuusmuuttajien vaatimuksenmukaisuustodistuksissa standardi mainitaan jo tällä hetkellä. Mikäli magneettilätkän teholähde katsotaan osaksi “suurta kiinteästi asennettavaa laitteistoa”, ei direktiivin noudattaminen ole välttämätöntä mutta ennakkotietoa poikkeusten tulkinnasta ei toistaiseksi löytynyt.

5 ESITYS MAGNEETTILAAKERIJÄRJESTELMÄN RAKENTEESI

Seuraavassa erittelyssä on koottu soveltuvat laitekoonpanot kummankin esimerkkita-pauksen toteuttamiseen ja laitteiden suoritusarvoja verrattu kappaleessa 2.2 laskettui-hin vaatimuksiin. Vaikka näennäisesti kappaleessa 2.2 esiteltyjen kohteiden vaatimuk-set poikkeavatkin selvästi toisistaan, käytännössä ne joudutaan kaikki toteuttamaan hyvin samantapaisilla laitteistoilla. Sekä alikriittisen järjestelmän että ylikriittisen jär-jestelmän näytteistystaajuudet ovat niin korkeita, että niiden toteuttaminen perinteisellä, yli 1 ms PLC-järjestelmällä on mahdotonta. Tämän vuoksi käytännössä kaikissa magneettilaakerijärjestelmissä kannattaa perustana käyttää jotakin EtherCAT-väylän välityksellä kommunikoivaa järjestelmää. Paitsi että sen suorituskyky on tällä hetkellä markkinoiden huippua, avoimuuden ansiosta siihen on saatavilla monipuolinen valikoi-ma erilaisia laitteita eri valmistajilta. Samoin omien EtherCAT slave-laitteiden suunnittelu on tehty helpoksi ja edulliseksi.

Magneettilaakerikäyttöön soveltuvia, uusissa kohteissa järkeviä ohjausjärjestelmiä on tällä hetkellä käytännössä muutamia. Omron NX701 joka on perinteinen PLC-laite, Beckhoff TwinCat 3 sekä CodeSYS Control RTE jotka ovat PC-laitteiston päällä toi-mivia Soft-PLC ohjelmistoja sekä NI CompactRIO joka on sulautettu ohjain. Siemensin laajennusmodulit sekä Simatic TDC ovat jo vanhahkoja, todennäköisesti lähivuosina markkinoilta poistuvia laitteita jotka edellyttävät käytännössä valmistajan oman kent-täväylän sekä omien ohjelmistokehitysohjelmien käyttöä. Selvästi edullisinta näistä vaihtoehtoista on käyttää jompaa kumpaa Soft-PLC sovellusta jonkin riittävän luotet-tavan teollisuustietokoneen kanssa. NX701 on tällä hetkellä yksi harvoista markkinoil-la olevista nopeaan säätöön soveltuvista, EtherCAT-väylää käyttävistä PLC-laitteista. Sen 125 mikrosekunnin vähimmäissykli aika rajoittaa suurimman mahdollisen näytteis-tystaajuuden arvoon 8 kHz, joka voi olla liian alhainen joillekin kaikkein vaativimmille laakerijärjestelmille.

Induktiivisten paikka-antureiden käytöstä magneettilaakereissa on toistaiseksi vain vä-hän tietoa joten niiden soveltuvuutta ja käytännön suorituskykyä kannattaa tutkia edelleen. Kappaleessa 2 esitetyn pohdinnan ja yhtälöiden perusteella niiden tarjoa-ma noin 2 kHz kaistanleveys kuitenkin riittää monien järjestelmien toteuttamiseen. Lisäksi ne ovat huomattavasti perinteisesti magneettilaakerissa käytettyjä pyörrevirta-antureita edullisempia. Toisaalta markkinoilla on myös joitain induktiivisten anturei-den kanssa kilpailevia edullisia pyörrevirta-antureita kuten kappaleessa 3 mainittu

Micro-Epsilon DT3001 joka tarjoaa hieman induktiivisia antureita paremman suorituskyvyn.

Teholähde on kaikkein ongelmallisin komponentti. Paperilla tarkasteltuna servo-ohjainten käyttö ei välttämättä aiheuttaisi ongelmia, mutta niiden soveltuvuuden testaaminen käytännössä ei mahtunut tämän työn aihepiiriin. Mikäli niitä ei kuitenkaan haluta käyttää on joko kehitettävä omaa teholähdettä eteenpäin kuten edellisessä kappaleessa on kerrottu tai hyödyntää jotakin taajuusmuuttajaa ohjelmistomuutoksin.

Ohjain

Tarjolla olevista vaihtoehdoista suositeltavin ratkaisu molempien esimerkkitapausten ohjausjärjestelmäksi on Soft-PLC suoritusympäristön tarjoava CodeSYS Control RTE ajettuna riittävän tehokkaassa, esimerkiksi PhoenixContactin valmistamassa teollisuustietokoneessa. Kommunikointi tapahtuu EtherCAT-väylän välityksellä, I/O-moduleiksi valittiin Omron NX-AD4608 analogiatulot paikka-antureille ja Omron NX-AD4603 analogiatulot muille analogiasignaaleille. Tarvittaessa voidaan lisätä Omron NX-DA3605 analogialähdöt virtaohjeen siirtämiseksi esimerkiksi teholähteelle.

Seuraavassa taulukossa 5.1 verrataan laitteiston suorituskykyarvoja kappaleen 2.2 vaatimusmäärittelytaulukoon. Mikäli esimerkiksi luotettavuusseikkojen vuoksi halutaan suosia perinteistä PLC-laitetta teollisuustietokonepohjaisen ratkaisun sijaan, on taulukoon otettu vertailun vuoksi mukaan Omron NX701-laite, joka EtherCAT-yhteensopivana on suoraan vaihtokelpoinen tietokonelaitteen kanssa.

Taulukko 5.1. Vähimmäisvaatimusten ja valittujen ohjausjärjestelmien suorituskyvyn vertailu.

	Alikriittisen vaatimus	Ylikriittisen vaatimus	CodeSYS RTE-järjestelmä	Omron NX701
Laskentateho	1 $\frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$	10 $\frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$	> 1 $\frac{\text{GFLOP}}{\text{s}}$	312 $\frac{\text{MFLOP}}{\text{s}}$
Sykli aika	0.6 ms	0.1 ms	0.05 ms	0.125 ms
Nopeat analogiatulot	6 kpl	6 kpl	8 kpl, 16 bit, 10 us/kanava	
Hitaat analogiatulot	10 kpl	10 kpl	8 kpl, 13 bit, 250 us/kanava	
Analogialähdöt			4 kpl/yksikkö, 16 bit, 10 us/kanava	

Paikka-anturit

Molempien esimerkkitapausten toteuttamiseen riittävän suorituskyvyn tarjoaa Baumer IWRM08 induktiivinen paikka-anturi. Mikäli ko. induktiivinen anturi kuitenkin osoittautuu soveltumattomaksi, on seuraavana vaihtoehtona käyttää Micro-Epsilon DT3001 pyörrevirta-anturia. Laitteiden suorituskykyä vaatimusmäärittelyyn verrataan taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Valittujen paikka-antureiden ominaisuuksien vertailu vähimmäisvaatimuksiin.

	Alikriittisen vaatimus	Ylikriittisen vaatimus	Baumer IWRM08	Micro-Epsilon DT3001
Kaistanleveys	250 Hz	1000 Hz	2000 Hz	5000 Hz
Mittausalue	2 mm	2 mm	2 mm	1.6 mm
Erottelukyky	5 um	5 um	5 um	4 um

Teholähde

Kappaleessa 3.4 selvitetyin perusteella suoraan magneettilaakerikäyttöön soveltuvat teholähteet ovat vähissä. EtherCAT-väylään kytkeytyvät servo-ohjaimet ovat kalliita ja niissä on paljon magneettilaakerikäytössä tarpeettomia ominaisuuksia. Eräs vaihtoehto on käyttää EtherCAT-analogialähtöä ja analogitulolla varustettua, virtaohjetta syötävää servokäyttöä. Tästä esimerkkinä on esitetty AMC 20A20 servo-ohjain, joka ominaisuuksiltaan on soveltuva magneettilaakerikäyttöön. Vertailun vuoksi taulukossa 5.3 on esitetty myös oman teholähdeprototyypin suoritusarvot.

Taulukko 5.3. Teholähteiden ominaisuuksien vertailu vähimmäisvaatimuksiin.

	Alikriittisen vaatimus	Ylikriittisen vaatimus	AMC 20A20	Prototyyppi
Teho	1300 W	1800 W	1805 W	4000 W
Jännite	150 V	200 V	190 V	200 V
Virta	9 A	9 A	10 A	20 A
Kanavien lukumäärä	10 kpl	10 kpl	1 kpl/laite	3 kpl/laite
KytKentätaajuus	30 kHz	30 kHz	22 kHz	30 kHz
Ohjaus			0–10 V	CAN

Vaikka esimerkkitapausten vaatimukset poikkeavatkin toisistaan jonkin verran, huomataan että käytännössä ne kummatkin joudutaan toteuttamaan lähes identtisellä laitteistolla. Hieman yllättävänä havaintona voidaan myös pitää, että nopean ylikriittisen järjestelmän vaatimiin sykliakoihin yltävät tällä hetkellä varmuudella ainoastaan tietokonelaitteistoon ja Soft-PLC-ohjelmistoon perustuvat järjestelmät. Ne tarjoavat myös kaikkein parhaan ohjelmitavuuden; perinteisten IEC-61131-kielien lisäksi tunnettuina ovat monet modernit ohjelmointitekniikat. Mikäli hinta ei ole merkittävästi edullisempi ainoa perusteltu syy käyttää perinteistä PLC-järjestelmää voisi olla luotettavuusvaatimus. Toisaalta luotettavuuseroistakaan ei ole saatavilla puolueetonta tieteellistä tutkimustietoa, joten järkeviä perusteita syrjiä jotakin tuoteryhmää ainoastaan intuition perusteella ei ole olemassa.

6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli selvittää edellytykset rakentaa kokonainen aktiivisen magneettilaakeroinnin säätöjärjestelmä käyttäen ainoastaan valmiita teollisuusautomaation osakomponentteja. Selvityksen mahdollistamiseksi jouduttiin luomaan menetelmä säätöjärjestelmän vähimmäisvaatimusten ja -ominaisuuksien arviointiin ja tämä oli selvästi työn haastavin osuus. Valmista tieteellistä tai kirjallista tietoa aiheesta ei ollut, tai se oli keskenään ristiriitaista. Menetelmän perusteella määriteltiin vähimmäisvaatimukset kahden erityyppisen magneettilaakerijärjestelmän laakerielektronikalle.

Vähimmäisvaatimusten perusteella saatiin eri komponenttiryhmiä määrää rajattua järjesteliseksi ja voitiin tarkastella yksittäisiä laitteita näiden sisältä. Soveltuvien laitteiden vähäinen määrä yllätti: magneettilaakerijärjestelmä on sen nopeuden aiheuttamien suurten datamäärien takia sekä laskennallisesta että tiedonsiirrollisesta näkökulmasta todella vaativa säätötekniinen järjestelmä. Varsinkin hajautettuihin I/O-järjestelmiin käytettyjen kenttäväylien heikko suorituskyky oli merkittävä havainto. Järjestelmän toteuttaminen valmiilla osakomponenteilla todettiin mahdolliseksi vaikkakin vähäisen kilpailun ja niukan tarjonnan vuoksi laitteiden hintataso on melko korkea. Perinteisten teollisuusohjainten kehittymisestä huolimatta kaikkein nopeinta suorituskykyä tarjoavat edelleen soft-PLC-tuotteisiin perustuvat tietokonejärjestelmät.

Erityisesti oman tehonlähteen kehittäminen voisi olla perusteltu ratkaisu, ainoat löytyneet hyödynnettävissä olevat tuotteet ovat moottorikäyttöjä. Magneettilaakeritehollähde on kuitenkin pohjimmiltaan yksinkertainen DC-virtalähde, ja taajuusmuuttajat tai servokäytöt ovat tähän tarpeeseen paitsi tarpeettoman monimutkaisia, vaativat ne myös vähintään ohjelmistomuutoksia. Tämän vuoksi työssä luodaan katsaus myös aiemmin LUT:ssa kehitetyn tehollähdeprototyypin rakenteeseen ja tämänhetkiseen tilaan. Prototyypistä ei tarkastelun aikana ilmennyt tiedonsiirtoon liian hidasta CAN-väylää lukuun ottamatta mitään sellaista puutetta mikä estäisi laitteen käytön magneettilaakerijärjestelmän osana.

Työn kirjoittamisen aikana nousi esille useita mahdollisia jatkokehitys- ja testauskohteita, joita on lyhyesti listattu seuraavassa:

- Paikka-antureiden todelliset kaistanleveysvaatimukset. Erityisesti induktiivisten paikka-anturien soveltuvuus magneettilaakerikäyttöön olisi tärkeää varmentaa laboratoriotestein ja -mittauksin. Mikä on vaihevaste? Ovatko vaatimusmäärittelyssä esitetyt kaistanleveys- ja tarkkuusvaatimukset riittäviä?

- Teholähdeprototyypin edelleenkehitys kappaleessa 4 esiin nostettujen seikkojen mukaisesti. Tärkeimpinä kohteina on suorituskyvyltään puutteellisen CAN-väylän korvaaminen EtherCAT-väylällä ja laitteen testaaminen todellisen magneettilaakerijärjestelmän osana.
- DC-Servokäyttöjen teholähdekäyttöön soveltuvuuden testaaminen.
- Eri säätöjärjestelmien ohjelmoitavuuden selvittäminen. Kuinka helppoa ja luotettavaa esimerkiksi Simulink-mallien tuonti esitettyyn Codesys Control RTE-suoritusympäristöön olisi?

Seuraava ja paljon lisäarvoa tässä työssä esitetylle teoreettiselle tarkastelulle tuova askel olisi rakentaa kappaleessa 5 esitetty järjestelmä ja testata sen suorituskykyä todellisessa käyttökohteessa kiinnittäen huomiota edellä listattuihin seikkoihin. Tämän työn rajaukseen ei laboratoriomittauksia mahtunut edellä mainittua teholähdeprototyyppiä lukuun ottamatta. Tästä huolimatta työ täyttää sille alussa asetetut vaatimukset, ja vastaa asetettuihin kysymyksiin: suorituskykyisen aktiivisen magneettilaakerijärjestelmän toteuttaminen käyttäen tavallisia teollisuusautomaation osakomponentteja on mahdollista ja järkevää.

LÄHTEET

- Advanced Motion Controls (2015). *AMC 20A20 Datasheet*. URL: <http://www.a-m-c.com/download/datasheet/20a20.pdf>.
- Alpaugh H. E. Nelson H. E., Fermental H. E. (2010). "Real time digital control of an active magnetic bearing using open source software". Teoksessa: *ISMB Proceedings 2010*.
- Antila, Matti (1998). "Electromechanical Properties of Radial Active Magnetic Bearings". Tohtorinväitöskirja. Helsinki University of Technology.
- Beckhoff Automation GmbH & Co. KG (2014). *EtherCAT Communication Principles*.
- Chen, S. C., D. K. Le ja V. S. Nguyen (2014). "Inductive displacement sensors with a notch filter for an active magnetic bearing system". *Sensors (Basel)* 14.7, s. 12640–12657. DOI: 10.3390/s140712640.
- Chiba, Akira et al. (2005). *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*. Newnes.
- CODESYS Support Team (2015). Private communication.
- Earnshaw, Samuel (1842). "On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether". *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 7, s. 97–112.
- EtherCAT Technology Group (2014). *EtherCAT – the Ethernet fieldbus*.
- European Power Supply Manufacturers Association (2005). *CE Marking Guidance for Power Supplies*.
- Hagemeister, Wilhelm et al. (2006). "Zusammenwachsen von Mess- und Automatisierungstechnik am Beispiel eines Airbus-Prufstands". Teoksessa: *SPS IPC Drives Conference*.
- Humphrey, M., E. Hilton ja P. Allaire (1999). "Experiences using RT-Linux to implement a controller for a high speed magnetic bearing system". Teoksessa: *Real-Time Technology and Applications Symposium, 1999. Proceedings of the Fifth IEEE*, s. 121–130. DOI: 10.1109/RTTAS.1999.777667.
- Hynynen, Katja (2011). "Broadband excitation in the system identification of active magnetic bearing rotor systems". Tohtorinväitöskirja. Lappeenranta University of Technology.
- Ingenieurgesellschaft IgH GmbH (2012). *What is EtherLab?* URL: <http://www.etherlab.org/download/flyer.pdf>.
- International Rectifier (2014). *Application Note AN-1123: Bootstrap Network Analysis: Focusing on the Integrated Bootstrap Functionality*.

- ISO (2012). *Mechanical vibration – Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings – Part 4: Technical guidelines*. Standard 14839-4:2012. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jaatinen, P.O. et al. (2013). "Implementation of a flux-based controller for active magnetic bearing system". Teoksessa: *Industrial Informatics (INDIN), 2013 11th IEEE International Conference on*, s. 141–145. DOI: 10.1109/INDIN.2013.6622872.
- Jastrzebski, Rafal Piotr (2007). "Design and implementation of FPGA-based LQ control of active magnetic bearings". Tohtorinväitöskirja. Lappeenranta University of Technology.
- Kindgren, Olof (2009). "Executing Simulink models on FPGA in a LabVIEW environment". Tutkielma. Chalmers University of Technology.
- Koh, Jae Hwan ja Byoung Wook Choi (2013). "Real-time Performance of Real-time Mechanisms for RTAI and Xenomai in Various Running Conditions". *International Journal of Control and Automation* 6.1.
- Lantto, Erkki (1999). "Robust Control of Magnetic Bearings in Subcritical Machines". Tohtorinväitöskirja. Helsinki University of Technology.
- Larjo, Mikko (2006). "Aktiivisten magneettilaakereiden tilasäädön mallinnus ja simulointi". Tutkielma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Lion Precision (2009). *Comparing Capacitive and Eddy-Current Sensors: General Sensor TechNote LT05-0011*.
- Maxon Motor AG (2000). *PWM-Scheme and Current ripple of Switching Power Amplifiers*. URL: http://www.electromate.com/db_support/attachments/PWM%20technical%20information.pdf.
- Micro-Epsilon (2015). *Glossary of measuring principles*. URL: <http://www.micro-epsilon.com/glossar/>.
- National Instruments (2014). *White Paper: NI CompactRIO Performance Controller: Performance and Throughput Benchmarks*. National Instruments. URL: <http://www.ni.com/white-paper/52250/en/>.
- National Instruments (2015a). *NI CompactRIO Configuration Advisor*. URL: <http://ohm.ni.com/advisors/crio>.
- National Instruments (2015b). *What is NI CompactRio?* URL: <http://www.ni.com/compactrio/whatis/>.
- Nilsson, Johan (1998). "Real-Time Control Systems with Delays". Tohtorinväitöskirja. Lund institute of Technology.
- OMRON Corporation (2015). *Press release: OMRON Releases Industry's Fastest* Machine Automation Controller NX701*. URL: <http://www.omron.com/media/press/2015/04/i0401.html>.

- Prytz, G. (2008). "A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT". Teoksessa: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008*. S. 408–415. DOI: 10.1109/ETFA.2008.4638425.
- Recheis, M. et al. (2011). "Evaluation of inductive displacement sensors for a basic active magnetic bearing test rig". Teoksessa: *Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on*, s. 626–631. DOI: 10.1109/ISSE.2011.6053964.
- Rostan, M., J.E. Stubbs ja D. Dzilno (2010). "EtherCAT enabled advanced control architecture". Teoksessa: *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), 2010 IEEE/SEMI*, s. 39–44. DOI: 10.1109/ASMC.2010.5551414.
- Schweitzer, Gerhard ja Eric H. Maslen (2009). *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer.
- Siemens AG (2011). *SIMATIC Application Module FM 458-1 DP User Manual*. 04.2011.
- Siemens AG (2015). *6DD1607-0CA1 I/O Expansion module Data sheet*.
- Sillanpää, Teemu (2013). "Taajuusmuuttaja aktiivisesti säädetyn magneettilaakerin virtalähteenä". Tutkielma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- SKF AB (2015). *Active magnetic bearings: Technology and key benefits*. URL: <http://www.skf.com/group/products/magnetic-systems/technology-key-benefits/active-magnetic-bearings/index.html>.
- Smirnov, A., K. Tolsa ja R.P. Jastrzebski (2010). "Implementation of a bumpless switch in axial magnetic bearings". Teoksessa: *Industrial Embedded Systems (SIES), 2010 International Symposium on*, s. 63–68. DOI: 10.1109/SIES.2010.5551368.
- Smirnov, Alexander (2012). "AMB system for high-speed motors using automatic commissioning". Tohtorinväitöskirja. Lappeenranta University of Technology.
- Smirnov, Alexander (2015). *Notes on AMBs*. Private Communication.
- Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (2014). *Sähkölaitteiden valmistus, maahantuonti ja myynti*.
- Walter, H. et al. (2010). "Industrialization of AMB systems with standard drive technology". Teoksessa: *PCIC Europe 2010 Conference Record*, s. 1–8.
- Yoon, Se Young, Zongli Lin ja Paul E. Allaire (2013). *Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings*. Springer.
- Zingerli, C. M. ja J. W. Kolar (2010). "Novel observer based force control for active magnetic bearings". Teoksessa: *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, s. 2189–2196. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5544574.
- Åström, Karl J. ja Björn Wittenmark (1997). *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*. Prentice Hall.

Liite 1. Esimerkki säätöjärjestelmän tilamallista

Esimerkki magneettilaakerin säätöjärjestelmän tilamatriiseista (Smirnov 2012).

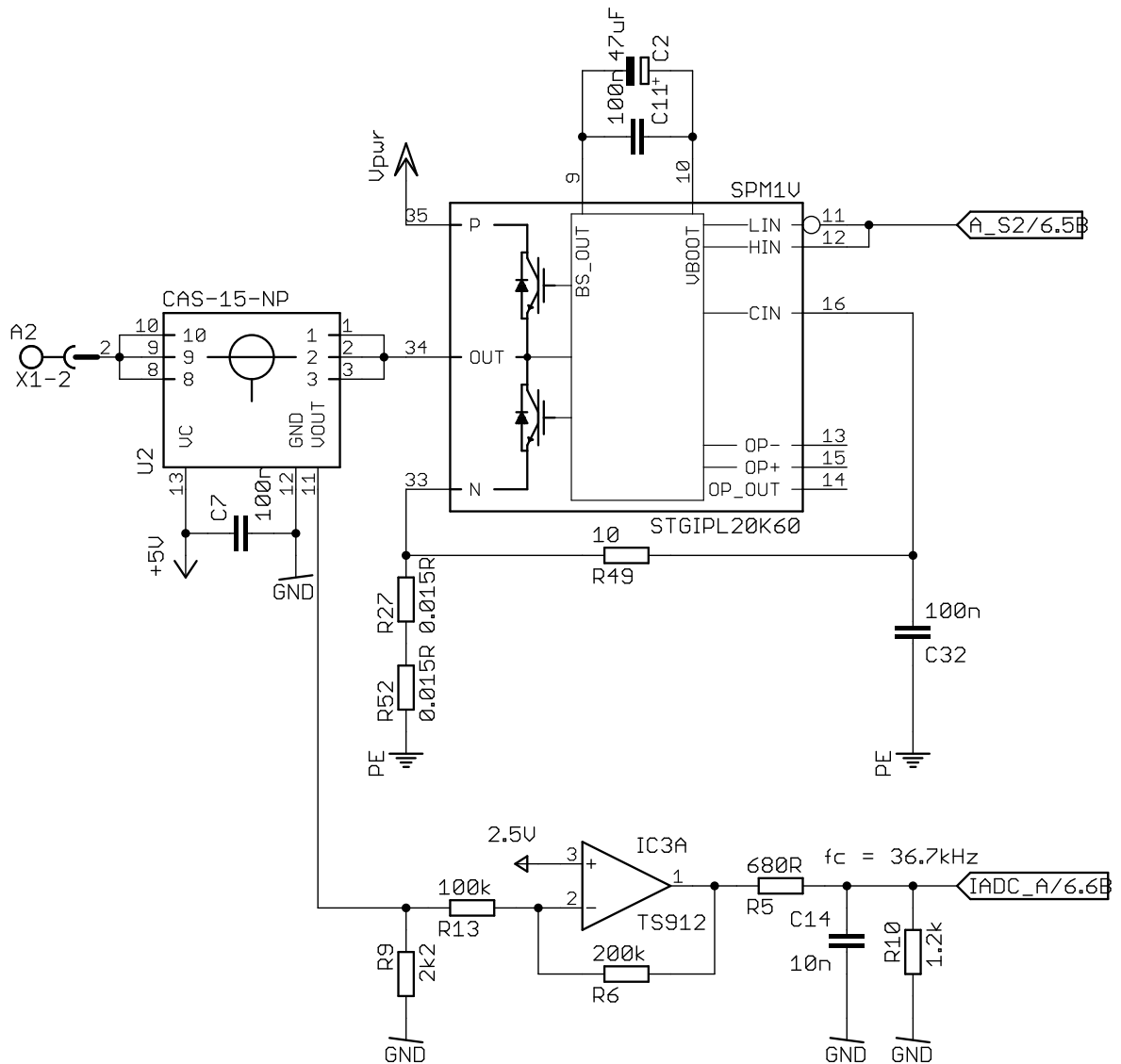
$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -6377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -6377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 121 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 121 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 121 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 121 \\ 333 & 0 & 422 & 0 & 568 & 0 & 0 & -3.72 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 333 & 0 & 422 & 0 & 568 & 3.72 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5499 & 0 & -4666 & 0 & 620 & 639 & 0 & 0 & 0 & 0 & -197 \\ -5499 & 0 & 4666 & 0 & -620 & 0 & 0 & 639 & 0 & 0 & 197 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 6377 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6377 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6377 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6377 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -0.121 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.121 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.0887 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0.0887 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{0}_{4 \times 4} \quad (1.4)$$

Liite 2. Teholähdeprototyypin kytkentäkaaviot ja toiminta



Kuva A2.1. Teholähdeprototyypin yksi kytkinpari oheiskomponentteineen ja virtamittauksineen.

Virtamittauksen nykyinen toiminta on selvitetty seuraavassa:

- Vastus R9 on täysin tarpeeton, se ainoastaan johtaa virtaa maahan. Sen ei tosin pitäisi vaikuttaa mittauksen toimintaan, sillä LEM CAS-15-NP maksimikuormaksi mainitaan 1kOhm.
- Signaalinkäsittelyä tehtäessä on mm. oletettu että mikrokontrollerin A/D-muuntimen maksimitulojännite olisi 5 V kun se todellisuudessa on 3.3 V. Tämän takia esimerkiksi virtaa 0 A vastaa jännite 2.5 V.

(jatkuu...)

Liite 2. (jatkoa)

- Vahvistimen vahvistus noudattaa tällä hetkellä yhtälöä

$$\frac{R_1 + R_f}{R_1} V_{\text{ref}} - \frac{R_f}{R_1} V_{\text{in}} \quad (2.1)$$

- Ennen vahvistinta herkkyys $0.019 \frac{\text{A}}{\text{LSB}}$.
- Vahvistimen $G = -2$ joten vahvistimen jälkeen todellinen herkkyys $0.0097 \frac{\text{A}}{\text{LSB}}$. A/D-muuntimen pitäisi siis pystyä aistimaan jopa 9.7mA muutos virrassa. Vahvistin invertoi signaalin ja skaalaa sen siten että tulon arvoa 3.75 V vastaa lähdön arvo 0 V ja vastaavasti tulon arvoa 2.1 V vastaa lähdön arvo 3.3 V. 2.5 V on 2.5 V
- Vahvistimen jälkeen on vielä alipäästösuodatin jonka rajataajuus on 36.7 kHz ja jännitteenjako, jossa skaalataan jännitettä alaspäin kertoimella 0.64.
- Siis: $0.1\text{A} = 6\text{LSB} \Rightarrow 1\text{LSB} = 16.67\text{mA}$.