

**Kahden vapausasteen aktiivimagneettilaakerin
testilaitteiston kuvaus**

**Two degrees of freedom active magnetic bearing test
equipment documentation**

Miisa Lopperi

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Miisa Lopperi

Kahden vapausasteen aktiivimagneettilaakerin testilaitteiston kuvaus

2021

Kandidaatintyö.

39 s.

Tarkastaja: TkT Niko Nevaranta, TkT Pekko Jaatinen

Kandidaatintyön päätavoitteena on tehdä dokumentointi LUT-yliopiston tutkimuskäytössä olevalle testilaitteistolle, johon kuuluu kahden vapausasteen aktiivinen magneettilaakeri. Lisäksi työssä selvitetään aktiivisen magneettilaakerin ja sen säätölaitteiston osien toiminta yleisellä tasolla aiheeseen liittyvän kirjallisuuden pohjalta.

Aktiivimagneettilaakereissa kappaletta, esimerkiksi roottoria, leijutetaan aktiivisesti säädettyjen sähkömagneettien avulla. Roottori ja laakeri eivät kosketa toisiaan, minkä vuoksi laakerit ovat pitkäikäisiä ja tarvitsevat vähemmän huoltotoimenpiteitä mekaanisiin laakereihin verrattuna. Dokumentoitavalla laitteistolla voidaan tutkia magneettista leijutusta sähkömekaanisen systeemin avulla, jossa roottori on tuettu akselin suunnasta mekaanisesti ja radiaalisuunnassa aktiivimagneettilaakerilla. Sähkömekaanisen systeemin lisäksi testilaitteistoon kuuluu sähkömagneettien säätöön tarvittavat laitteet: paikka-anturit, AD-muuntimet, tiedonsiirtoväylä, teollisuus-PC ja tehovahvistimet. Magneettilaakerissa on mukana lisäkäämitykset, joiden jännitettä mittaamalla voidaan estimoida magneettivuon suuruutta.

Testilaitteisto koostuu pääosin kaupallisesti saatavilla olevista laitteista, jolloin suunniteltuun kuluva aika ja kustannukset ovat pienemmät. Laitteiston säätö voidaan tehdä simulointiohjelmassa lohkoakaavioina ja ladata säädön toteuttavalle teollisuus-PC:lle. Tehovahvistukseen käytetään taajuusmuuttajia. Niiden ohjausta on muokattu sellaiseksi, että yhdellä taajuusmuuttajalla voidaan antaa virtaa yhdelle sähkömagneettiparille.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Miisa Lopperi

Two degrees of freedom active magnetic bearing test equipment documentation

2021

Bachelor's Thesis.

39 p.

Examiner: TkT Niko Nevaranta, TkT Pekko Jaatinen

In this Bachelor's thesis documentation is made for the radial two degrees of freedom active magnetic bearing test equipment which is used for research at LUT university. The literature part covers functionality of active magnetic bearings and their control equipment based on the relevant literature.

Active magnetic bearing supported rotor is levitated with actively controlled electric magnets. The rotor and the bearing aren't touching each other when the bearing is operated. The bearings have long life and they need less maintenance compared to mechanical bearings. The testing equipment has a small-scale model where a rotor is supported axially with a ball bearing and radially with an active magnetic bearing. The testing equipment also includes the devices which are needed to control the electric magnets of the bearing: displacement sensors, analog-to-digital converters, communication bus, industrial PC and power amplifiers. The active magnetic bearing has search coils which can be used to estimate magnetic flux.

The testing equipment consists mainly of commercially available devices. This makes designing the device cost less and it takes less time. The controlling scheme can be created as a block diagram in a simulation program and downloaded to the industrial PC. The industrial PC executes the control program. Variable frequency drives are used as power amplifiers. Their control is modified in a way that one drive can supply current to one pair of electro-magnets.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	JOHDANTO.....	6
2.	MAGNEETTILAAKEREISTA YLEISESTI	7
2.1	Linearisointi.....	8
2.2	Paikka-anturit	11
2.2.1	Kapasitiivinen anturi	12
2.2.2	Optinen anturi.....	14
2.2.3	Sähkömagneettiset anturit	16
2.3	Tehoelektroniikka.....	19
3.	LAITTEISTON TOIMINTA JA KOMPONENTIT	23
3.1	Etäisyysensorit	25
3.2	AD-muunnin.....	25
3.3	EtherCAT	26
3.4	Teollisuus-PC	28
3.5	Taajuusmuuttajat	29
3.6	Magneettilaakeri ja roottori	30
3.7	Lisäkäämitykset.....	31
4.	YHTEENVETO	34
	Lähteet	35

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AD, A/D	Analog-to-Digital
AMB	Active Magnetic Bearing
CCD	Charge-coupled device
d	Etäisyys
DC	Direct current, tasavirta
F	Voima
I, i	Virta
IO	Input/Output
L	Induktanssi
m	Massa
n	Ylinäytteistyskerroin
N	Kelan johdinkierrosten lukumäärä
ϕ	Magneettivuo
R	Resistanssi
R_m	Reluktanssi
TcCOM	TwinCAT Common Object Model
V	Jännite
X, x	Liikesuunta, koordinaatti
XAE	eXtended Automation Engineering
XAR	eXtended Automation Runtime
Y, y	Liikesuunta, koordinaatti

Alaindeksit

bias	Biasvirta, esimagnetointivirta
c	Ohjaus
dc	Direct current
ilmaväli	Induktiivisen anturin ja mitattavan kappaleen välissä oleva alue
käämi	Kela, joka toimii sähkömagneetin napana
kohde	Kappale, jonka etäisyyttä induktiiviseen anturiin mitataan
lisäkäämi	Kela, jonka avulla voidaan estimoida magneettivuota
sydän	Induktiivisen anturin kelan sydän

1. JOHDANTO

Aktiivimagneettilaakerit ovat yleisimmin suurnopeuskoneissa käytettäviä laakereita, jotka leijuttavat roottoria jatkuvasti säädettyjen sähkömagneettien avulla. Roottorin ja laakerin välillä ei ole fyysistä kontaktia, minkä vuoksi sillä on useita etuja mekaaniseen laakeriin nähden. Esimerkiksi aktiivimagneettilaakerit eivät tarvitse voitelua ja käyttöikä on mekaanisia laakereita pidempi. Aktiivimagneettilaakereiden teollisia käyttökohteita ovat mm. erilaiset kompressorin- ja generaattorisovellukset (Chiba 2005).

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan kahden vapausasteen magneettilaakeritestilaitetta, joka on käytössä LUT-yliopiston tutkimuksessa. Työssä tehdään testilaitteistolle dokumentointi, joka kattaa yleisellä tasolla laitteiston komponentit ja niiden toimintaperiaatteen. Dokumentoinnissa käytetään apuna aiempia testilaitteistosta tehtyjä kandidaatintöitä (Gräsbeck 2018, Paajanen 2020). Ennen varsinaista dokumentointiosuutta työssä käydään läpi magneettilaakerityypit ja esitellään paikka-antureita ja tehoelektroniikan toteutuksia, joita aktiivimagneettilaakereissa voidaan käyttää. Lisäksi työssä esitellään laitteistossa olevat lisäkäämitykset sekä otetaan yleisellä tasolla kantaa siihen, miten magneettivuota voidaan estimoida laitteiston lisäkäämityksillä ja mitä lisäkäämityksen jännitteenmittaus vaatii.

Tarkasteltava testilaitteisto on pienoismalli aktiivimagneettilaakerisovelluksesta, jossa on yksi radiaalilaakeri ja roottori. Roottori on toisesta päästä kiinteästi kiinni kuulalaakerilla ja toisessa päässä on radiaalilaakerina toimiva aktiivimagneettilaakeri. Laakerin avulla roottorin liike pitää stabiloida kahteen liikesuuntaan, jolloin säädettäviä vapausasteita on kaksi. (Gräsbeck 2018) Magneettilaakerin, roottorin ja sen tuennan lisäksi laitteistoon kuuluu magneettilaakerin toimintaan tarvittavat laitteet. Pyörrevirtaan perustuvilla paikka-antureilla mitataan roottorin paikkaa. Vahvistimilla, muuntimilla ja väylillä siirretään paikkatieto teollisuus-PC:lle. Teollisuus-PC:ssä toteutetaan paikkasäätö. Paikkasäädön toteuttama virtaohje annetaan tehoelektroniikalle, joka on kytketty magneettilaakerin sähkömagneetteihin, jossa on sisempänä säätöpiirinä virtasäätö.

2. MAGNEETTILAAKEREISTA YLEISESTI

Magneettilaakerit voidaan jakaa toiminnaltaan aktiivisiin, passiivisiin ja hybrideihin magneettilaakereihin. Passiivisissa magneettilaakereissa leijutus tehdään kestopagneeteilla. Vastaavasti aktiivisissa se tehdään sähkömagneeteilla, joissa kulkevan virran suuruutta säädetään aktiivisesti tehoelektroniikan ja siihen liittyvän sulautetun älyn avulla. Hybridimagneettilaakeri on aktiivisen ja passiivisen magneettilaakerin yhdistelmä, jossa yhdistyy aktiivisen ja passiivisen magneettilaakerin ominaisuudet. Magneettilaakerityypeistä aktiiviset ovat suosituimpia teollisissa sovelluksissa. Seuraavaksi käydään läpi lyhyesti magneettilaakerityyppien toimintaperiaatteet, jonka jälkeen keskitytään työssä tarkasteltavan aktiivimagneettilaakerin toimintaan.

Passiivisella magneettilaakerilla on aktiivista yksinkertaisempi rakenne. Teoriassa se ei tarvitse ulkopuolista energiaa eikä ohjausjärjestelmää toimiakseen. Näiden laakerien tunnettuja haittoja ovat mekaanisia laakereita pienempi voima ja jäykkyys. Passiivinen magneettilaakeri ei kestä suuria kuormia, ja pieni jäykkyys aiheuttaa akselin värähtelyä. Lisäksi Earnshawin teoreeman mukaan passiiviselle magneettilaakerille tarvitaan jokin muu voima stabiloimaan ainakin yhtä vapausastetta. Voima voi olla esim. mekaaninen laakeri, diamagneettinen aine, suprajohde tai aktiivinen sähkömagneetti. Värähtelyn vaimennus voidaan tehdä esim. upottamalla laakeri nesteeseen tai laittamalla johtava kerros laakerin staattorin ja roottorin magneettien väliin. Vastaavasti jäykkyyttä voidaan kasvattaa niin sanotun Halbach array -tekniikan avulla, jossa magneettikenttää voidaan vahvistaa toisella reunalla ja lähes kumota magneettikenttä toisella reunalla vuorottelemalla magnetisaatiota magneettikappaleesta toiseen. Tällöin Earnshawin teoreeman tuomaa rajoitetta voidaan sivuttaa Halbach array -tekniikkaa käyttämällä tai esimerkiksi suprajohteiden avulla. (Pokki 2019)

Hybridilaakerissa käytetään sekä aktiivisia että passiivisia laakereita. Aktiiviset magneettilaakerit voivat kompensoida passiivisten laakereiden puutteita. Samalla saadaan passiivisten laakereiden etuja systeemiin, kuten niiden toimintavarmuus ja toimiminen ilman ulkoista energiaa. (Paajanen 2020)

Aktiivisissa magneettilaakereissa sähkömagneettien keloihin menevää virtaa säädetään aktiivisesti, jotta kohde (esim. roottori) leijuisi. Roottorin poikkeama referenssipaikasta selvitetään esimerkiksi paikka-antureiden avulla. Säädin muodostaa ohjaussignaalin mittauksen

perusteella, ja tehoelektroniikka muuntaa ohjaussignaalin keloille meneväksi ohjausvirraksi. Sähkömagneeteissa syntyy ohjausvirran perusteella sen suuriset voimat, että roottori pyrkii referenssipaikkaansa. (Schweitzer 2009)

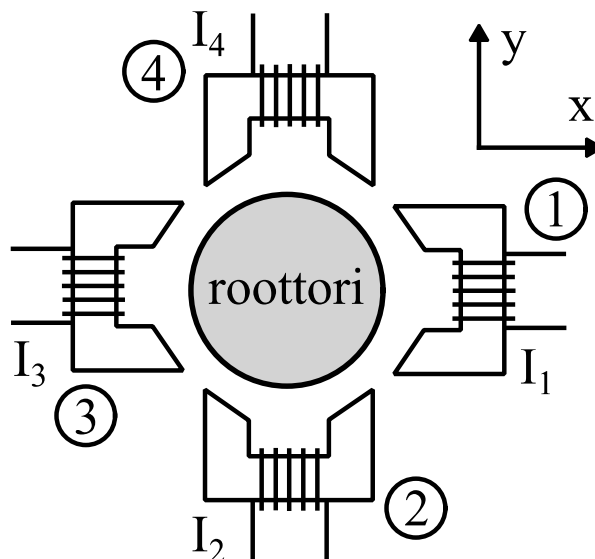
Aktiivimagneettilaakeri ja roottori eivät ole kosketuksissa toisiinsa, jolloin mekaanista kulumista ei ole, voitelua ei tarvita, huollon tarve on pieni ja ne ovat pitkäikäisiä. Laakerihäviöt ovat suurilla nopeuksilla 5–20 kertaa pienempiä kuin mekaanisissa laakereissa. (Schweitzer 2009). Toisaalta aktiiviset magneettilaakerit ovat usein kalliita ja niiden kuormankantokyky on pienempi kuin samankokoisella mekaanisella laakerilla. Lisäksi kaikkiin tilanteisiin yleisesti sopivaa aktiivimagneettilaakeria ei ole, vaan kehittäminen tehdään sovelluskohtaisesti. (Tantau 2015). Näistä huolimatta aktiivimagneettilaakerien tuomat edut puoltavat niiden käyttöä teollisissa sovelluksissa.

Aktiivisissa magneettilaakereissa systeemin jäykkyyttä ja vaimennusta voidaan muokata hetkittäisiä tarpeita vastaaviksi. Roottorin toimintapaikkaa voidaan ohjata ja värähtelyitä voidaan vaimentaa. Aktiivimagneettilaakerin laitteistossa on jo normaalin toiminnan mahdollistamiseksi mukana toimilaitteita ja antureita, joilla saadaan tietoa laitteiston toiminnasta. Tietojen avulla voidaan etsiä häiriöitä ja mallintaa järjestelmän käyttäytymistä (Tantau 2015). (Schweitzer 2009)

Tutustutaan seuraavaksi aktiivisen magneettilaakerin linearisointiin, paikka-antureihin ja tehoelektroniikkaan.

2.1 Linearisointi

Kuvassa 2.1 on esitetty periaatekuva radiaalilaakerista, jossa on kaksi säädettävää vapausasetta. Roottori on ilmavälissä ja sen ympärillä on neljä sähkömagneettia. Esimerkiksi suurnopeusmoottoreiden radiaalilaakereissa tarkoituksena on stabiloida roottori ilmavälin keskelle, jolloin se leijuu eikä osu seinämiin. Roottorin stabilointi tehdään säätämällä roottorin ympärillä olevien sähkömagneettien virtoja.



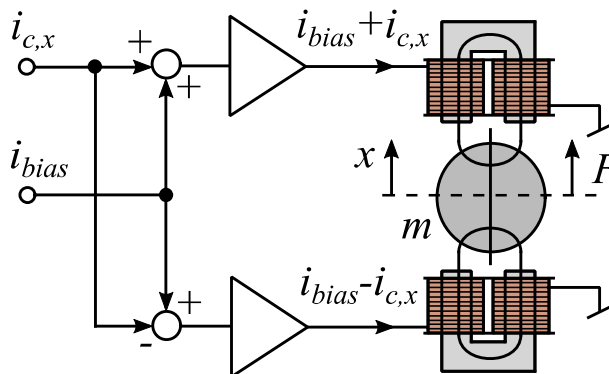
Kuva 2.1. Magneettilaakerin periaatekuva. Sähkömagneeteilla 1 ja 3 muutetaan roottorin kokemaa voimaa x-suunnassa ja magneeteilla 2 ja 4 muutetaan voimaa y-suunnassa.

Kuvan 2.1 magneettilaakeri ilman säätöä on epästabiili. Magneetin voima kappaleeseen riippuu magneetin virrasta ja ilmvälän suuruudesta: vetovoima kasvaa, kun ilmväli pienenee. Kahdeksannapaisella magneettilaakerilla on kaksi sähkömagneettiparia. Toinen pari vaikuttaa liikkeeseen x- ja toinen y-suunnassa, kuten kuvassa 2.1 on havainnollistettu. (Schweitzer 2009) Kuvan 2.1 magneettilaakerissa virtoja I_1 ja I_3 muuttamalla vaikutetaan roottorin kokemaan voimaan x-suunnassa ja virtoja I_2 ja I_4 muuttamalla y-suunnassa. (Chiba 2005).

Magneetin voima on kääntäen verrannollinen ilmvälin neliöön nähden ja suoraan verrannollinen virran neliöön nähden, jos kyllästymistä ei huomioida. Suurella virralla magneetti-piiri kyllästyy, jolloin suhteisiin tulee luonnollisesti epälinearisuutta. Yleinen säätötapa on, että voiman suhde virtaan ja paikkaan linearisoidaan toimintapisteeseen. Linearisoinnissa saatujen suorien kulmakertoimia kutsutaan paikkajäykkyydeksi (position stiffness) ja virtajäykkyydeksi (current stiffness). (Schweitzer 2009)

Vastakkain olevia sähkömagneetteja ohjataan yleensä differentiaalisesti (Schweitzer 2009). Differentiaalisessa voiman tuotossa vastakkaisilla puolilla oleville magneeteille syötetään virtaa siten, että toinen saa virran biasvirta+ohjausvirta ja toinen puoli biasvirta-ohjausvirta. Biasvirran suuruus on ohjausvirtaa suurempi, jolloin syötettävät virrat ovat positiivisia. Enemmän virtaa saava magneetti vetää roottoria puoleensa enemmän ja vähemmän virtaa

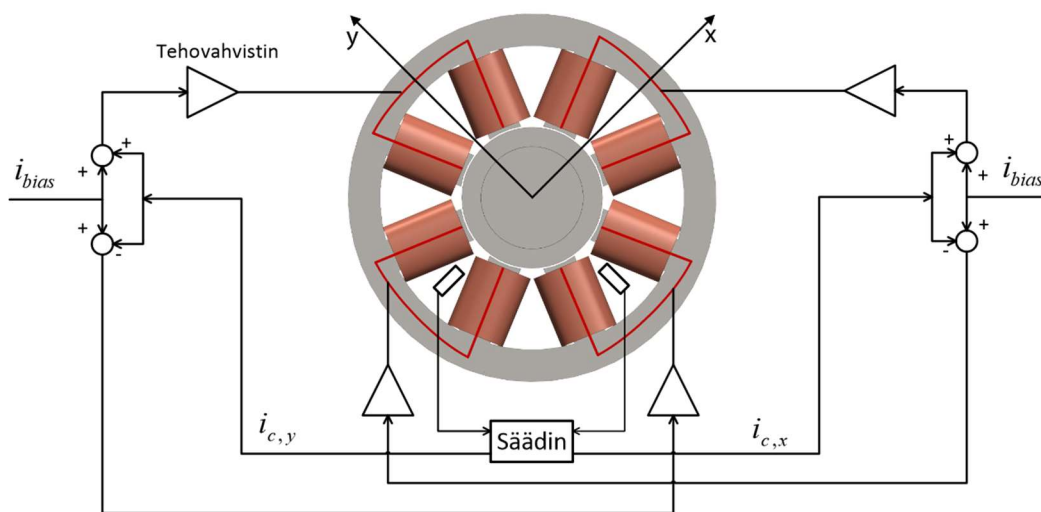
saava magneetti vetää roottoria puoleensa vähemmän. Roottoriin kohdistuva voima on vastakkaisten magneettien vetävien voimien erotus. Roottorille saadaan kohdistettua voima kumpaankin suuntaan, vaikka molemmat virrat ovat positiivisia. Jos biasvirta on vakio, niin ohjausvirta on suoraan verrannollinen saatavaan voimaan. (Chiba 2005) Kuvassa 2.2 on havainnollistettu magneettiparia, jota ohjataan differentiaalililassa ja roottorilla on vain yksi liikesuunta.



Kuva 2.2 Differentiaalinen voimantuotto, jossa i_{bias} on biasvirta, $i_{c,x}$ on ohjausvirta, m on leijutettavan kappaaleen massa ja F on voima. Kuva muokattua lähteestä (Schweitzer 2009).

Tässä työssä tarkastellaan aktiivimagneettilaakeria, jossa on kaksi vapausastetta eli kaksi säädöllä stabiloitavaa liikesuuntaa. Differentiaalililassa ohjattavia magneettipareja on yksi x- ja yksi y-suunnalle. Kuvassa 2.3 on esitetty tämän kaltaisen radiaalilaakerin rakenne periaatetasolla. Kuvan radiaalilaakerissa on kahdeksannapainen staattori, jolloin siinä on yhteensä neljä sähkömagneettia. Sähkömagneetti muodostuu staattorin kahdesta vierekkäisestä navasta, joiden käämitykset on kytketty sarjaan. Staattorin keskellä on roottori, jonka paikkaa mitataan paikka-antureilla molempien akseleiden suhteen. Säädin muodostaa paikkatietojen perusteella ohjausvirran. Akselin vastakkaisten sähkömagneettien käämien virtaohjeet saadaan ohjausvirran ja biasvirran summasta ja erotuksesta. Tehovahvistimena on esimerkiksi taajuusmuuttaja, joka muodostaa sähkömagneeteille menevät virrat. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja on luonteeltaan jännitelähde, jolloin siihen tarvitaan virtasäätö muuttamaan paikkasäädöltä saatu virtaohje jänniteohjeeksi (Sillanpää 2013). Kuvassa 2.4 on virta- ja paikkasäädön muodostama kaskadirakenne. Sähkömagneettien kokonaisvoima on sen suuruinen ja suuntainen, että se pyrkii stabiloimaan roottorin keskelle. Tarkastellaan seuraavaksi komponentteja, joilla aktiivimagneettilaakerisysteemi voidaan toteuttaa. Tarkastelu

aloitetaan käymällä läpi paikanmittauksen ratkaisut, jonka jälkeen esitellään tehoelektronikka.



Kuva 2.3 Kahdeksannapainen radiaalilaakeri. Paikka-antureilta menee tieto paikkasäätimelle ja tämä toteuttaa ohjausvirrat vastakkaisille sähkömagneeteille. Sähkömagneetit on kierretty 45 asteen suhteessa painovoimaan, jolloin roottorin paino jakautuu symmetrisesti akselien välillä. (Gräsbeck 2018)



Kuva 2.4. Sähkömagneetin säädön rakenne lohkokaaviomuodossa. Sähkömagneettia säädetään kaskadirakenteella, jossa ulompana on paikkasäätö ja sisempänä on virtasäätö. (Sillanpää 2013)

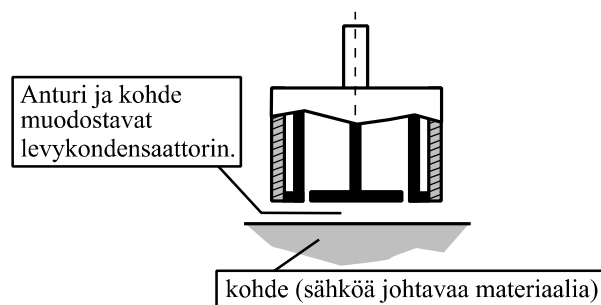
2.2 Paikka-anturit

Aktiivimagneettilaakerilla tuetun roottorisysteemin stabiloimiseen tarvitaan tieto roottorin paikasta joko mittaamalla tai estimoimalla. Kuten kuvissa 2.3 ja 2.4 havainnollistettiin, paikka-antureilla mitataan roottorin paikkaa ja saatu informaatio viedään roottorin stabiloivalle paikkasäätimelle. Säädin muuttaa käämeille menevän ohjausvirran suuruutta paikkatiedon pohjalta. Paikka-antureiden toiminta vaikuttaa merkittävästi aktiivimagneettilaakerin ohjattavuuteen ja stabiilisuuteen (Niemann 2005) (Tantau 2015). Yleisesti voidaan todeta, että paikka-anturien tyyppejä ovat kapasitiivinen, optinen ja sähkömagneettinen. Tyypillinen ratkaisu paikan mittaukseen aktiivimagneettilaakerituetuissa suurnopeusmoottoreissa on

pyörrevirta-anturi tai induktiivinen anturi. Tässä kappaleessa käydään läpi erilaisia antureita paikan mittaukseen ja tarkastellaan niiden ominaisuuksia.

2.2.1 Kapasitiivinen anturi

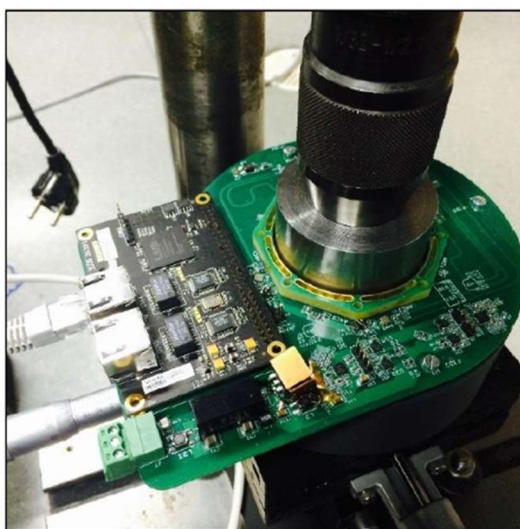
Kapasitiivisessa anturissa anturi ja roottorin pinta vastaavat kondensaattorin levyjä. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.5. Käytännössä rakenteen vuoksi anturin läpi menee vakiotaa-juista vaihtovirtaa. Mittaus perustuu siihen, että mitattava etäisyys on verrannollinen anturin jännitteen amplitudiin. (Schweitzer 2009) Kohteen materiaali ja paksuus eivät vaikuta anturin toimintaan silloin, kun kohde on johtavaa materiaalia. Anturin ja kohteen välinen materiaali on yleensä ilmaa. (Wilson 2005) Kapasitiivinen anturi on herkkä lialle, mikä asettaa rajoitteita sen käytölle tietyissä sovelluksissa. Välissä olevan ilman on oltava puhdasta eikä siinä pitäisi olla esim. pölyä tai öljyhiukkasia. Käytännössä lika anturin ja kohteen välissä muuttaisi kondensaattorin eristevakiota. (Chiba 2005, Recheis 2010)



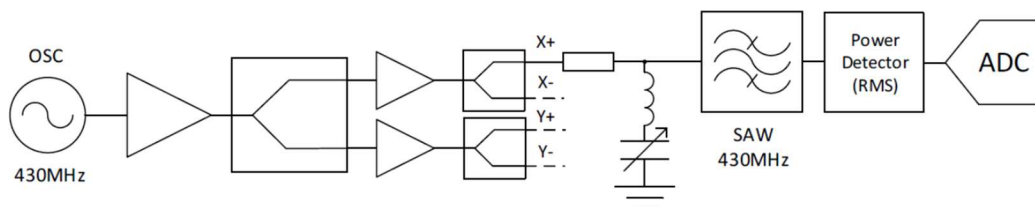
Kuva 2.5 Kapasitiivisen mittauksen periaate, jossa anturi ja mitattava kohde muodostavat levykondensaattorin. Kuva muokattua lähteestä (Schweitzer 2009).

Kapasitiivisilla antureilla on erittäin hyvä resoluutio. (Dertien 2018) Riippuen anturityypistä, se voi olla nanometriä suuruinen. Anturin mitta-alue on yleensä 10 μm ja 10 mm väliltä. Taajuusalueen suuruus on 20 kHz ylöspäin. (Wilson 2005) Kapasitiivisen anturin suojaamiseen on kiinnitettävä huomiota. Esimerkiksi suojauksella saadaan usein anturin toiminta lineaarisemmaksi. Suojaamattoman anturin reunoille syntyy helposti hajakenttiä, jotka ovat epälineaarisia etäisyyden ja kapasitanssiin nähden. Suojatussa anturissa kondensaattorin toinen pää maadoitetaan. Aktiivinen pää ympäröidään suojalla, jonka potentiaali on sama kuin aktiivisella päällä. Suojauksella sähkökentästä saadaan homogeenisempi. (Dertien 2018)

Kapasitiivinen anturi voidaan asettaa moottorin rungon sisälle, jolloin se on suojassa sateelta ja liialta. Oikeilla tiivisteillä vain kapasitiiviset levyt ovat kosketuksissa ilman kanssa. Moottorin osien voiteluun käytettävän öljyn vuotaminen likaisi anturit ja vaikuttaisi mittaustulokseen. Anturia on vaikea käsitellä jälkikäteen, moottorikehys pitäisi avata. Moottorin ulkopuolelle asetettu anturi on helpompi asentaa, mutta se on alttiina ulkopuolisille tekijöille. (Pelli 2017)



a)



b)

Kuva 2.6 a) Kapasitiivinen anturi, joka on asetettu mitattavan kohteen ympärille (akselille) ja b) yhden suunnan mittauksen periaate (Pelli 2017).

Luonnollisesti jos kapasitiivista anturia käytetään radiaalilaakerin säädössä, sen avulla pitää voida mitata liikettä x- ja y-suuntiin tarkasti ja luotettavasti. Tämän kaltaisen anturin rakennetta on havainnollistettu lähteessä (Pelli, 2017), joka on esitetty kuvassa 2.6 a). Anturi ympäröi kappaletta, jonka paikkaa halutaan mitata. Anturilla on 0,16 μm resoluutio ja ± 1 mm mitta-alue. (Pelli 2017)

Anturissa on yhteensä kahdeksan metallista levyä: kapasitiivisia levyjä on neljä ja niistä jokaisella on parina maahan kytketty levy. Resonanssipiirissä on mukana kela, jonka induktanssi on valittu kapasitanssimittausten perusteella niin, että resonanssitaajuutena on 430 MHz. SAW-kaistanpäästösuodattimella suodatetaan jännitesignaali. RF-tehomittarista saadaan ulos tasavirtaa, joka riippuu jännitesignaalin tehollisesta arvosta. Tasavirta muunnetaan A/D-muuntimella 10 MHz näytteenottotaajuudella yksibittiseksi. Eri kanavilta saatava yksibittinen data muunnetaan 16 bitin sanoiksi ja lähetetään EtherCAT-väylää pitkin tietokoneelle analysoitavaksi. Mittausalue on $-1 \dots 1$ mm jokaista akselia kohden. (Pelli 2017)

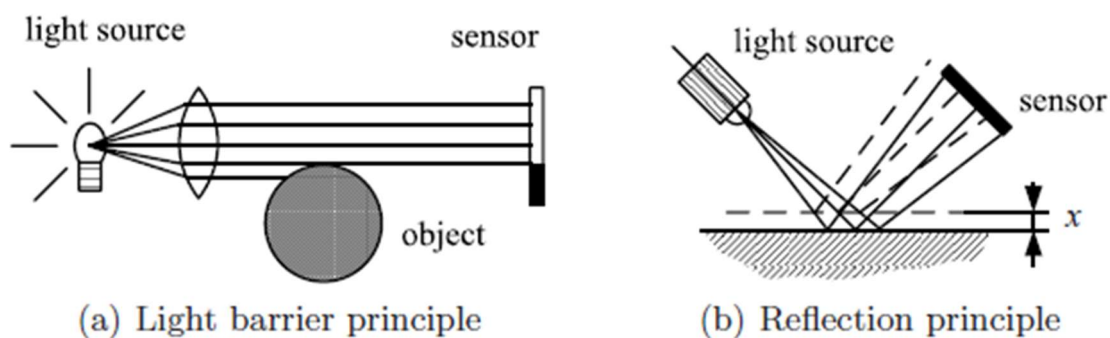
2.2.2 Optinen anturi

Ennen optisia antureita käytettiin joissakin magneettilaakerisovelluksissa enemmän, kun induktiivisia, kapasitiivisiä tai pyörrevirta-antureita ei ollut vielä saatavilla. Muut anturit ovat lineaarisuudeltaan ja herkkyydeltään optisia antureita parempia, minkä vuoksi nykyään optisia antureita käytetään vain muutamissa magneettilaakerisovelluksissa. (Tantau 2015)

Optisilla antureilla on erittäin suuri kaistanleveys ja magneettikentät eivät aiheuta niihin häiriöitä (Tantau 2015). Yleiseen käyttöön tarkoitettujen antureiden hinta on alhainen, mutta korkealaatuiseen mittaukseen tarkoitettut anturit ovat kalliita. (Niemann 2005)

Optiseen anturiin kuuluu valonlähde, valoanturi ja aine, jota pitkin valo kulkee. Anturiin sisältyviä lisälaitteita voivat olla mm. peilit ja linssit. Valon kulku anturille muuttuu, kun kappaleen paikka muuttuu anturin suhteen tai anturin osien välinen etäisyys muuttuu. (Dertien 2018) Optisten anturien käyttöä rajoittaa se, että ne ovat lialle herkkiä ja diffraktio (aallon muodon muutos) heikentää resoluutiota. (Schweitzer 2009)

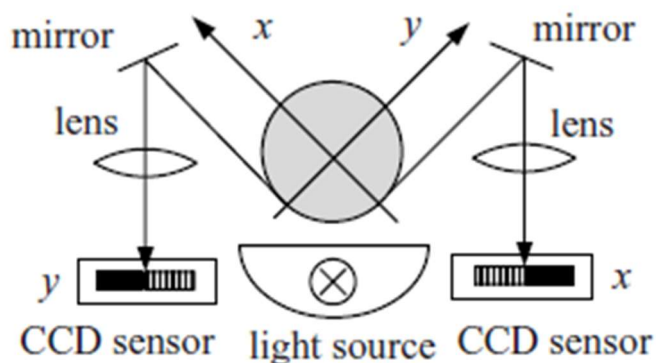
Optisen anturin voi toteuttaa monella eri tavalla. Kappale voidaan asettaa valon ja valolle herkän anturin väliin. Kappaleen paikan muuttuminen muuttaa anturille pääsevän valon määrää. (Schweitzer 2009) (Niemann 2005) Tämänkaltaista anturin rakennetta on havainnollistettu kuvassa 2.7 a). Toinen tapa toteuttaa optinen mittaus on heijastukseen perustuva tapa, jota on havainnollistettu kuvassa 2.7 b). Heijastumista hyödyntävässä menetelmässä lähde osoittaa valoa kappaleeseen. Valo heijastuu kappaleesta anturiin. Lähteen valon aallonpituus valitaan siten että se on sama kuin missä anturi on herkimmillään. Valo voi olla moduloitua, jolloin lähteestä tuleva valo saadaan erotettua ulkopuolisesta lähes täysin. (Schweitzer 2009)



Kuva 2.7 Peittävän a) ja heijastavan b) optisen anturin toiminta (Schweitzer 2009)

Kuva-antureita hyödyntävässä menetelmässä tunnistettava kappale heijastetaan x- ja y-suunnissa yksiulotteista kuvaa muodostaville kameroille (charge-coupled device eli ns. CCD-anturit). Yksiulotteinen CCD-anturi koostuu mittauskenttien muodostamasta jonosta. Kun valoa menee kennoon, niin kennoon syntyy varaus. Varauksen suuruus on suoraan verrannollinen valon intensiteetin kanssa. Varaukset vietään kennojonon päähän, jossa ne muunnetaan jännitteeksi ja digitaaliseksi signaaliksi. (Nyce 2016)

Kappaleen taustalle asetetaan valo, jolloin kappale näkyy viivakameroille mustana ja ympäristö vaaleampana. Etäisyys muodostetaan laskemalla pikselien määrä siihen asti, että päästään kuvassa tumman ja vaalean alueen rajalle. (Schweitzer 2009) CCD-tekniikkaa hyödyntävän anturin peruseriaate on esitetty kuvassa 2.8. Diffraktio heikentää CCD-tekniikkaan perustuvien antureiden resoluutiota (Tantau 2015).



Kuva 2.8 CCD-tekniikkaa hyödyntävä optinen paikka-anturi (Schweitzer 2009)

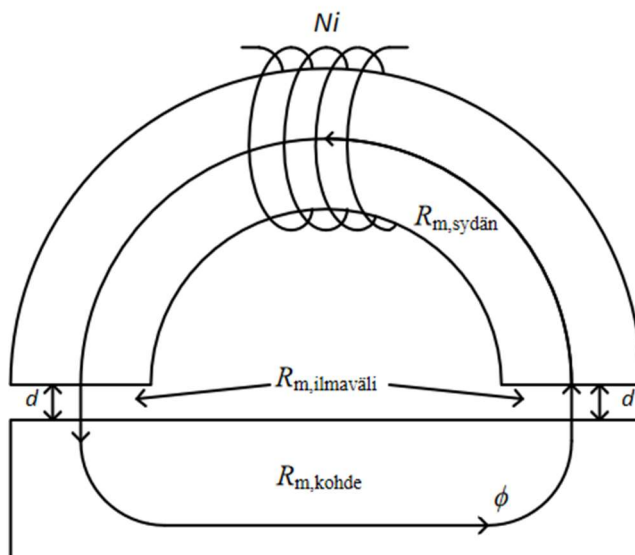
2.2.3 Sähkömagneettiset anturit

Sähkömagneettiset paikka-anturit ovat yleisin anturityyppi magneettilaakerikäytöissä. Sähkömagneettisten antureiden etuna on niiden robustisuus, helppokäyttöisyys ja toimivuus epäpuhtaissa olosuhteissa. Nämä anturit ovat tyypiltään joko induktiivisia tai pyörrevirtatyypisiä (Chiba 2005). (Filatov 2010) Sähkömagneettisissa antureissa on kela, jolle syötetään mittaustilanteessa korkeataajuisia jännitettä. Paikan mittaaminen perustuu kelan arvojen muuttumiseen, kun etäisyys kelan ja leijutettavan kappaleen välillä muuttuu. Induktiivisilla antureilla operoitaessa taajuus on 5–100 kHz. Antureiden rajataajuus on 0,1–0,2-kertainen modulointitaajuuteen verrattuna. (Schweitzer 2009). Pyörrevirta-antureita operoidaan yleensä 1–2 MHz taajuudella ja mitattavat taajuudet ovat 0–20 kHz väliltä (Schweitzer 2009).

Induktiivisessa anturissa kelan sydän, mitattava kohde ja niiden välissä olevat ilmapälit muodostavat suljetun magneettiipiirin. Kohteen paikan muuttuminen muuttaa ilmapälin pituutta, jolloin ilmapälin aiheuttama reluktanssi magneettiipiirissä muuttuu. Reluktanssin muutokset vaikuttavat kelan induktanssin suuruuteen. Anturin elektroniikka muodostaa induktanssin muutosten pohjalta ulos tulevan signaalin. Kuvassa 2.9 on esitetty induktiivisen anturin mittauseriaate. (Filatov 2010) (Tantau 2015)

Kelan sydän ja kohde ovat induktiivisissa antureissa ferromagneettista materiaalia (Schweitzer 2009). Staattorikappale ja kohteen mittausalue valmistetaan yleensä akselin suuntaisesti pinotuista sähköteräslevykerroksista, jossa kerrokset ovat toisistaan sähköisesti eristettyjä. Akselin suuntainen sähköinen eristys vähentää pyörrevirtojen aiheuttamaa häiriötä mittaus tuloksissa. (Filatov 2010)

Induktiiviset anturit eivät ole niin herkkiä magneetikenttien aiheuttamille häiriöille kuin kapasitiiviset anturit tai pyörrevirta-anturit. Anturin heikkoutena voidaan pitää raudan hystereesiä. Induktiivisten antureiden resoluutio on 1 μm -10 μm . (Tantau 2015).



Kuva 2.9. Induktiivisen anturin periaatekuva. Kelan sydän, ilmaväli ja kohde muodostavat magneettiipiirin. $R_{m,sydän}$ on anturin kelan sydämen reluktanssi, $R_{m,ilmaväli}$ on ilmavälin reluktanssi, $R_{m,kohde}$ on mitattavan kohteen reluktanssi, d on ilmavälin pituus, N on kelan johdinkierrosten lukumäärä, i on johtimessa kulkeva sähkövirta ja ϕ on magneettivuo. (Remes 2013)

Artikkelissa (Sillanpää et al. 2021) esitetään induktiivinen paikka-anturi, jossa on yhdistetty paikan mittaus radiaalisesti ja aksiaalisesti (kuva 2.10). Anturi on suunniteltu teollisuuden AMB-tuettuihin koneisiin vaihtoehtoksi pyörrevirta-antureille. Paikka-anturi asetetaan leijutettavan akselin ympärille ja se jättää akselin molemmat päät vapaiksi. Radiaalisuunnan mittaus perustuu ilmavälin muuttumiseen. Akselin suuntaista mittausta varten roottorikapale on jaettu magneettisiin ja ei-magneettisiin osiin. Referenssitilassa akselin poikkeamaa mittaavan navan hampaasta puolet on roottorin magneettista osaa vasten ja puolet on ei-magneettista osaa vasten. (kuva 2.11). Roottorin liikkuessa tämä suhde muuttuu, jolloin magneettiipiirin reluktanssi ja napaparin itseinduktanssi muuttuu. Differentiaalinen mittaus saadaan aikaan niin, että napapareja on moottorin magneettisen alueen molemmilla rajapinnoilla. (Sillanpää et al. 2021)



Kuva 2.10 Artikkelin induktiivinen paikka-anturi, jolla voidaan mitata poikkeamaa radiaalisesti ja akselin suunnassa. Staattorikappaleessa (kuva vasemmalla) on käämitettyjä napapareja kolmessa rivissä. Etu- ja takarivin napapareilla mitataan akselin suuntaista paikkaa ja keskimmäisillä mitataan paikkaa radiaalisuunnassa. Roottorissa (kuva oikealla) on ferromagneettista terästä oleva alue ja ympärillä on ei-magneettista alumiinia. (Sillanpää et al. 2021)

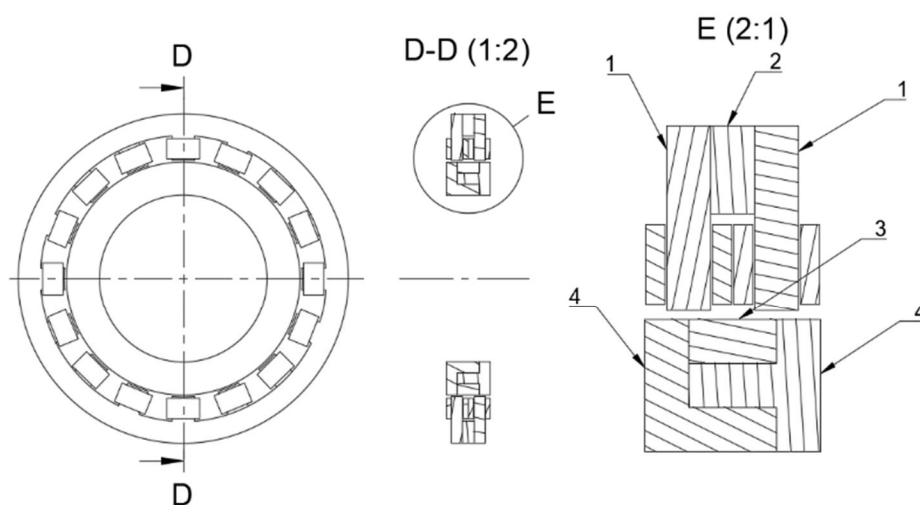


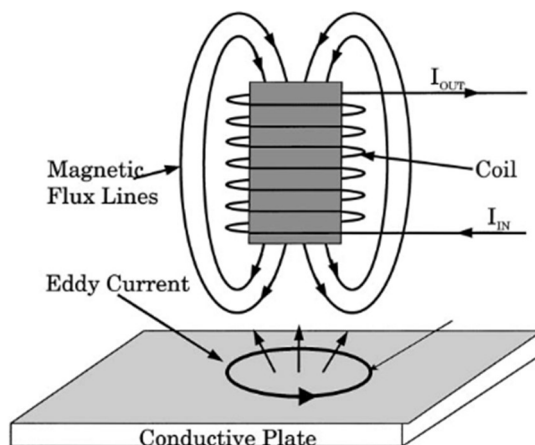
Figure 5. Cross-section of the sensor at poles corresponding to axial measurements. Numbers denote the following parts: 1—axial sensor stator stack, 2—radial sensor stator stack, 4—non-magnetic aluminium holding parts, 3—laminated rotor part.

Kuva 2.11 Artikkelin induktiivinen anturi akselin suunnasta kuvattuna. Roottorikappaleessa on magneettista materiaalia oleva alue. Referenssitilassa staattorin napojen hampaat ovat puoliksi magneettisella alueella. (Sillanpää et al. 2021)

Pyörrevirta-antureita käytetään laajasti erityisesti aktiivimagneettilaakereissa suuren resoluution, pienen koon ja lämpötilastabiiliuden vuoksi (Kirill 2011). Pyörrevirta-anturissa ke-

lalle annetaan suuritaajuista vaihtojännitettä, jolloin kelassa kulkeva virta saa aikaan muuttuvan magneettikentän. Kun johtavaa materiaalia oleva kohde viedään kelan magneettikenttään, niin kohteen pinnalle muodostuu pyörrevirtoja. Pyörrevirrat synnyttävät kappaleen pinnalle toisen magneettikentän, joka vaikuttaa päinvastaiseen suuntaan kelan kenttään nähden. Tämän seurauksena kelan magneettivuo pienenee ja sen impedanssi laskee. (Kirill 2011) (Dertien 2018)

Kohteen materiaali vaikuttaa anturin käyttäytymiseen, joten optimaalista toimintaa varten anturi pitää kalibroida oikealle materiaalille. Kohdemateriaalin epähomogeenisyydet vaikuttavat anturin tuloksiin. Jos kohteena on esimerkiksi pyörivä roottori, niin kohdemateriaalin epäpuhtaudet ja mikrohalkeamat tulkitaan paikan muuttumisena, minkä johdosta tuloksiin tulee kohinaa. (Tantau 2015). Kuvassa 2.12 on havainnollistettu pyörrevirta-anturin mittausperiaatetta.



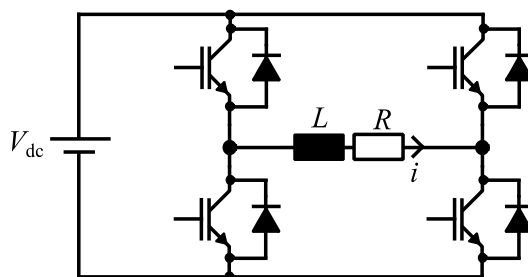
Kuva 2.12 Pyörrevirta-anturin toimintaperiaate (Sadler 2001, viitattiin lähteessä Tantau 2015)

2.3 Tehoelektroniikka

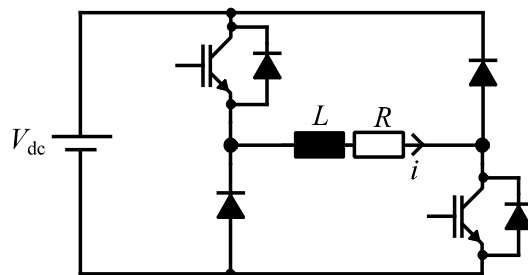
Magneettilaakerin keloihin syötettävää virtaa pitää pystyä säätämään tarpeeksi nopeasti, jotta systeemi olisi stabiili. Kelojen induktanssi ja tehoelektroniikan komponenttien virta- ja jännitearvot rajoittavat taajuutta ja amplitudia (Chiba 2005). Virran amplitudia voidaan nostaa lineaarisilla analogisilla vahvistimilla tai hakkurivahvistimilla.

Sähkömagneetin ohjaamiseen voidaan käyttää ns. H-silta kytkentää, joka muodostuu neljästä transistorista. Jokainen transistori on kytketty rinnakkain oman diodin kanssa, jotta sähkömagneettiin varastoitunut energia pääsee kulkemaan takaisin virtalähteeseen. Tämän kaltaisen yhtä sähkömagneettia ohjaava H-silta on esitetty kuvassa 2.13, jossa sähkömagneetti

on esitetty LR-piirinä kytkennän keskellä. Neljän transistorin H-silta voi tuottaa positiivista ja negatiivista jännitettä ja virta voi kulkea molempiin suuntiin. Biasvirtaa käyttämällä ohjaukseen tarvitaan vain yhdensuuntaista virtaa, jolloin ohjauspiiriä voidaan yksinkertaistaa. Esimerkiksi negatiivisen jännitteen tuottamiseen tarvittavat transistorit voidaan jättää pois, jolloin saadaan kuvan 2.14 muoto. (Chiba 2005)



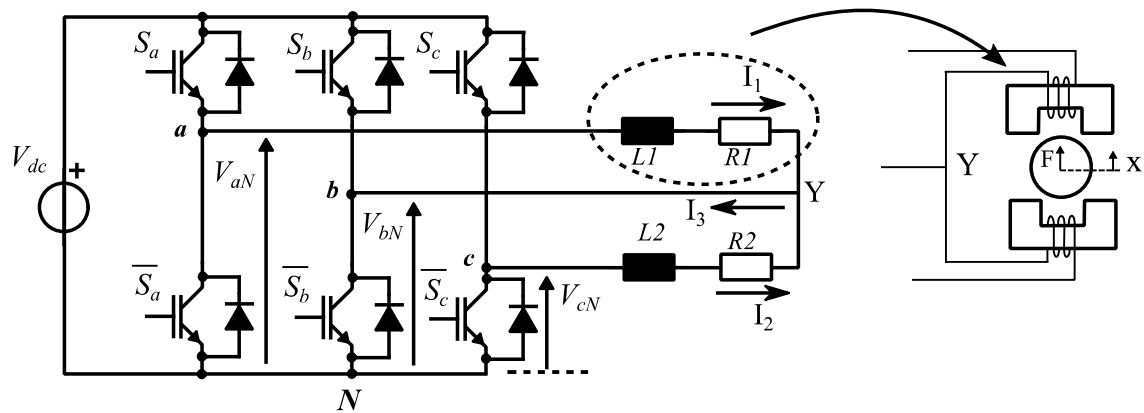
Kuva 2.13 Yhtä sähkömagneettia ohjaava H-silta, jossa käämi on kuvattu resistanssin ja induktanssin muodostamana piirinä (LR-piiri).



Kuva 2.14 Yhteen suuntaan virtaa päästävä ohjauspiiri, jolla ohjataan yhtä sähkömagneettia. Negatiivisen jännitteen tuottavat transistorit on jätetty pois. (Chiba 2005)

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltavassa testilaitteistossa käytetään sähkömagneettien ohjaamiseen kaupallisia kolmivaiheisia taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttajat ovat ABB:n valmistamia ACSM1-taajuusmuuttajia, joiden ohjauskortti on muutettu aktiivimagneettilaakerisovellukseen. Taajuusmuuttajan kahdesta kytkinhaarasta olisi mahdollista muodostaa H-silta. Tehokkaampi tapa hyödyntää taajuusmuuttajaa on kuitenkin sellainen rakenne, että käämitykset jakavat taajuusmuuttajan keskimmäisen kytkentähaaran (Sillanpää 2013). Käytännössä yhdellä taajuusmuuttajalla voidaan silloin ohjata yhtä sähkömagneettiparia. Toiselle sähkömagneetille menevä virta on biasvirran ja ohjausvirran summa ja toiselle menevä on biasvirran ja ohjausvirran erotus. Taajuusmuuttajan toimintaa muokataan sellaiseksi, että

vaiheiden virrat vastaavat tällaista toimintatapaa. Kuvassa 2.15 on havainnollistettu aktiivimagneettilaakerin yhden suunnan sähkömagneettipari, joka on kytketty ohjattavaan siltaan. (Bonfitto 2012)



Kuva 2.15 Kolmivaiheitaajuusmuuttaja muokattu aktiivimagneettilaakerisovellukseen. Yksi taajuusmuuttaja ohjaa yhtä magneettiparia. Kuva on piirretty Bonfitto et al. DS2b.9–2, DS2b.9–3 pohjalta.

Keskimmäisen kytkentähaaran jakaminen aiheuttaa sen, että magneettiparin jännitteiden valinta ei ole toisistaan riippumatonta. Keskimmäisen haaran kytkinasennot ovat sellaiset, että molemmille keloille ei pystytä antamaan samaan aikaan saman merkkistä lähtöjännitettä. Jännitepulsseja pitää aikajaksottaa tilanteissa, joissa halutaan saman merkkistä jännitettä. Aikajaksotuksessa kytkentäjakson aikana annetaan osan aikaa jännitettä yhdelle kelalle ja osan aikaa toiselle kelalle. Kelojen käytettävissä oleva keskimääräinen jännite pienenee ja laakerin voimantuoton dynamiikka heikkenee aikajaksotuksen vuoksi. Konferenssiesitelmässä (Yim, J. et al. 2002) samanmerkkisten jännitteiden rajoitetta ei pidetä merkittävänä silloin, kun kelaparilla ohjataan aktiivisen magneettilaakerin yhtä liikesuuntaa, koska roottorin leijuttamisen jälkeen jännitteet ovat enimmäkseen erimerkkisiä. Lisäksi valitsemalla riittävän suuri jännitteen taso virta saadaan muuttumaan tarvittavalla nopeudella aikajaksotuksesta huolimatta. (Sillanpää 2013)

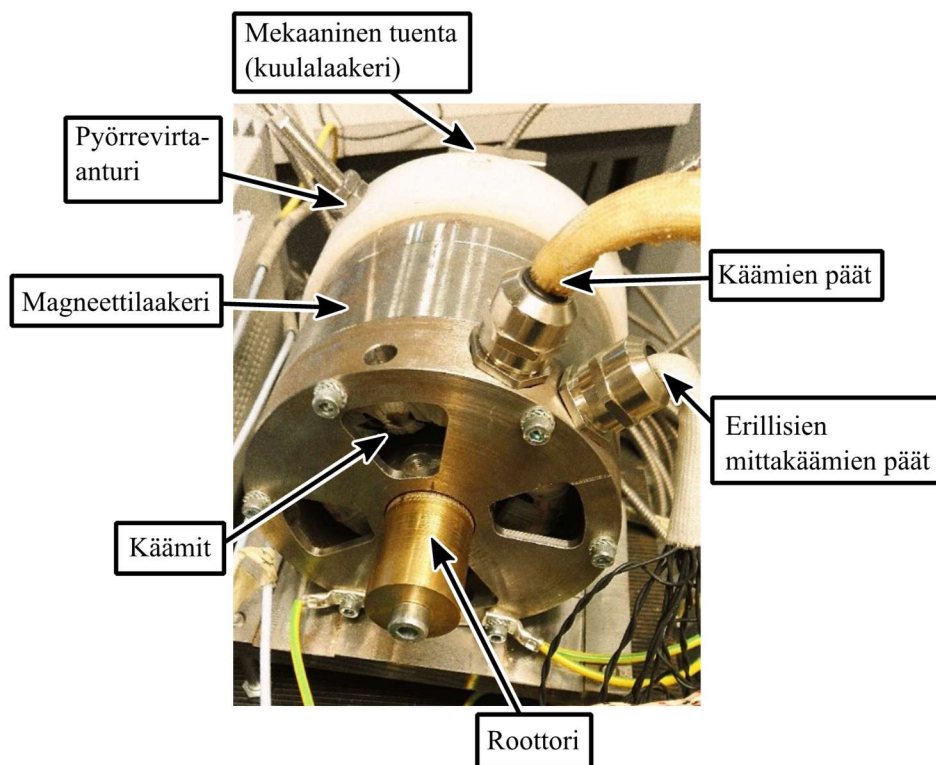
H-silta on tunnetuin hakkurivahvistin. Teollisissa sovelluksissa käytetään lähes aina hakkurivahvistimia, koska niiden häviöt ovat merkittävästi lineaarisia vahvistimia pienemmät (Schweitzer 2009). Hyötysuhde on 80–90 %. (Niemann 2005) Hakkurivahvistimissa transistorit toimivat kytkiminä ja ovat joko päällä tai pois päältä. Haluttu jännite saadaan vaihtelemalla päälle ja pois -tiloja niin että keskiarvona on haluttu jännite. Transistorien tehohäviöt ovat pienemmät, jolloin jäähdytystä ei tarvita niin paljon ja laitteistosta saadaan pienempi ja kevyempi. (Chiba 2005) Hakkurivahvistimet voivat synnyttää häiriöitä ympärillä

oleviin laitteisiin. Esimerkiksi induktiivisten ja pyörrevirta-anturien toiminta voi häiriintyä, jos niihin annetun jännitteen taajuus on lähellä magneettilaakerin hakkurivahvistimien kytkentätaajuutta (Tantau 2015).

Hakkurivahvistimelle vaihtoehtoinen vahvistustapa on lineaarinen vahvistin. Lineaarisia vahvistimia käytetään yleensä erittäin pienitehoisilla sovelluksilla tai erittäin herkissä laitteissa, joissa kytkentähäiriöiden ongelmat olisivat merkittävät toiminnan kannalta (Schweitzer 2009). Lineaarisella vahvistimella voidaan ohjata tarkasti virtaa ja jännitettä ja kohinan määrä on pieni. Linearisessa vahvistimessa transistorit eivät ole välttämättä täysin päällä tai pois päältä, jolloin ne ottavat enemmän tehoa. Transistorien viilentämiseen tarvittavat suuret jäähdytyslevyt kasvattavat vahvistimen kokoa. (Chiba) Lineaarisen vahvistuksen hyötysuhde on n. 5–10 % (Niemann 2005).

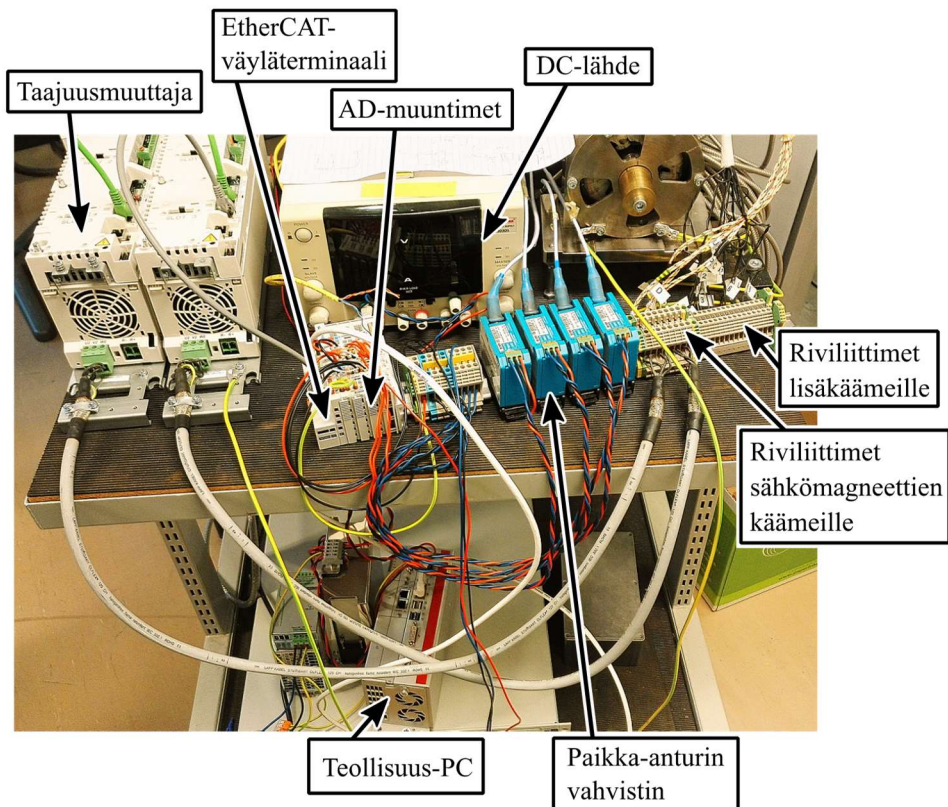
3. LAITTEISTON TOIMINTA JA KOMPONENTIT

Tässä kappaleessa esitellään kandidaatintyössä tarkasteltavan testilaitteiston toiminta ja laitteistossa käytetyt komponentit. Tässä yhteydessä on tärkeä huomauttaa, että kyseistä laitteistoa on käytetty aikaisemmissa kandidaatintöissä (Gräsbeck 2018) ja (Paajanen 2020) paikkasäätöjen tarkasteluun. Kuvassa 3.1 on esitetty valokuva testilaitteistosta, jossa on havainnollistettu laitteiston osia.

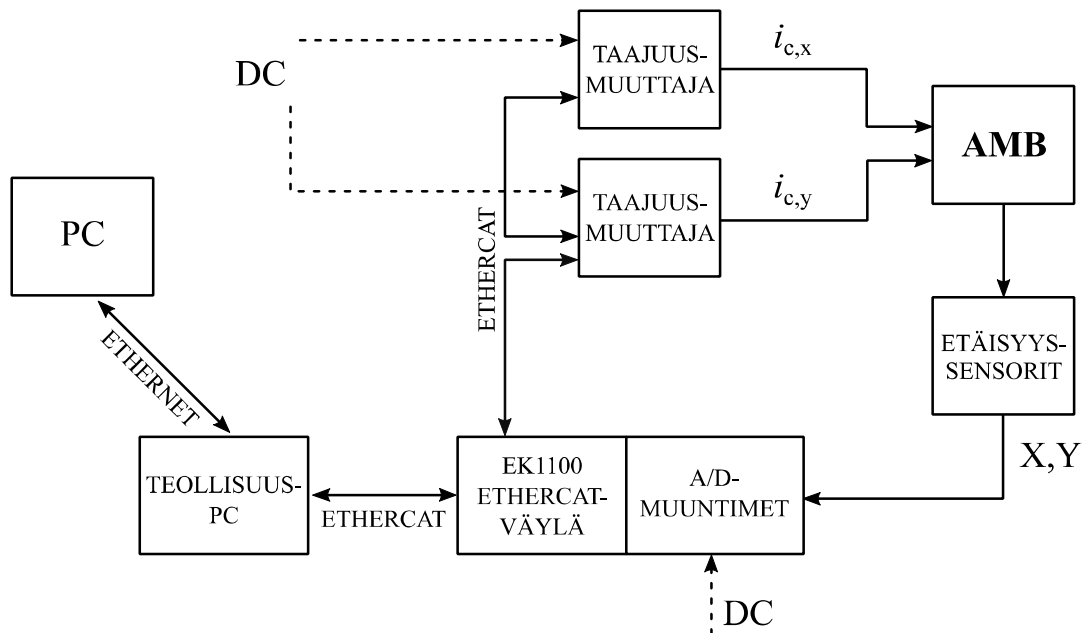


Kuva 3.1 Testilaitteistossa on roottori, jota tuetaan mekaanisesti ja aktiivimagneettilaakerilla. Laitteiston osat on merkitty kuvaan.

Kuten aikaisemmin todettiin, roottorin paikkaa mitataan etäisyysensoreilla, jotka kuvan 3.1 testilaitteistossa ovat pyörrevirta-antureita. Niistä saadaan ulos roottorin sijaintia vastaavat analogiset jännitesignaalit. Signaali muutetaan digitaalseksi AD-muuntimella. Signaalin tiedot kulkevat EtherCAT-väylän kautta teollisuus-PC:lle, joka ohjaa EtherCATin välityksellä taajuusmuuttajia. PC:llä hallitaan teollisuus-PC:n toimintoja ja ne on yhdistetty keskenään tavallisella Ethernet-väylällä. Taajuusmuuttajat ohjaavat magneettilaakerin keloille menevää virtaa. Kelat toimivat sähkömagneetteina ja vetävät roottoria puoleensa ohjauksen mukaisesti. Testilaitteiston elektroniikka ja mittausvälineet on esitetty kuvassa 3.2. Lohkokaavio laitteiston toiminnasta on esitetty kuvassa 3.3.



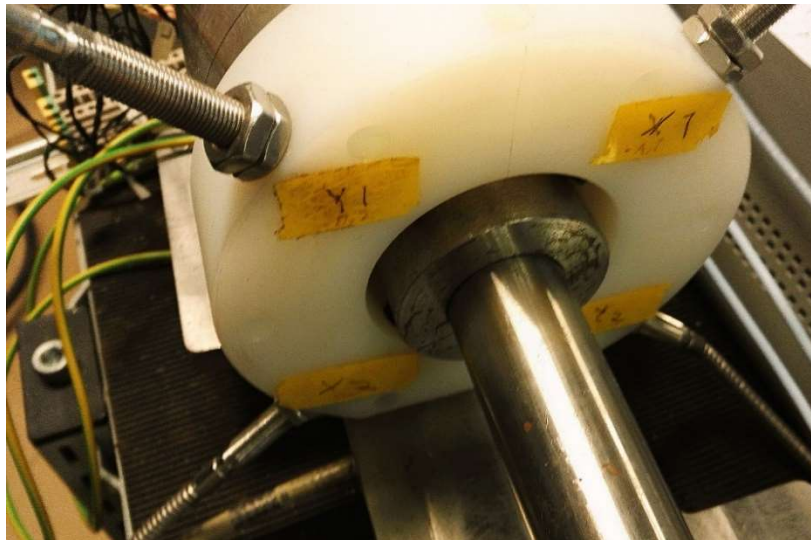
Kuva 3.2 Testilaitteiston elektronikka ja mittausvälineet.



Kuva 3.3 Kaavio laitteiston toiminnasta.

3.1 Etäisyysensensorit

Laitteiston paikanmittaus on toteutettu differentiaalisena, jolloin systeemin osana on neljä Bently Nevada 3300 XL etäisyydenmuunninta. Etäisyydenmuuntimia on kaksi kummallekin vapausasteelle ja niiden mittapääät sijaitsevat vastakkain toisiinsa nähden leijutettavan roottorin ympärillä kuvan 3.4 mukaisesti. Muunnin koostuu mittapäästä, jatkojohdosta ja etäisyysensensorista. Muunnin antaa ulos jännitettä, joka on suoraan verrannollinen mittapään ja roottorin väliseen etäisyyteen. Etäisyyden eli paikan mittaus tehdään pyörrevirtasensorien avulla. Muunnin toimii lineaarisella alueella, kun etäisyys on väliltä 0,25–2,3 mm, ja se antaa silloin ulos jännitettä väliltä -1–17 V DC. Suositeltu väli on 1,27 mm. Anturien kalibrointi on oletuksena AISI 4140 -teräkselle, mutta anturit saa kalibroituna myös muille materiaaleille.



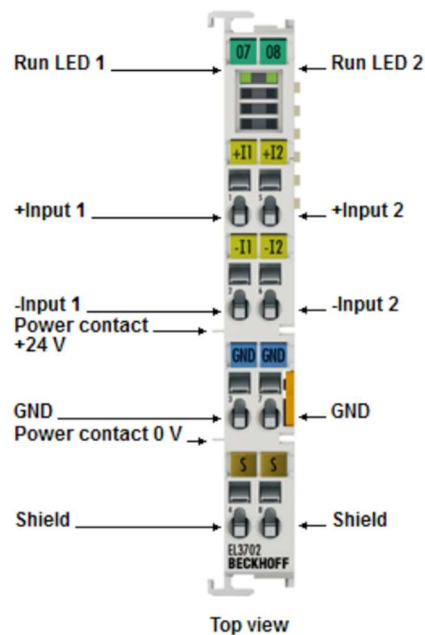
Kuva 3.4 Testilaitteiston paikka-antureiden mittapääät ovat roottorin ympärillä. Antureita on kaksi molemmille liikesuunnille. Saman liikesuunnan antureiden mittapääät ovat roottorin vastakkaisilla puolilla. Testilaitteistossa mittapäiden kohdat on merkitty tarroilla X1, X2, Y1 ja Y2.

3.2 AD-muunnin

Laitteistossa on kaksi Beckhoffin EL3702 AD-muunninkorttia, joilla etäisyysensensorien signaalit muunnetaan digitaaliseen muotoon. Ne ovat kaksikanavaisia, joten muuntimia on yhteensä neljä. Muuntimen eri portit on esitetty kuvassa 3.5. Muunnin muuttaa analogista signaalia 10 ja -10 V väliltä digitaalseksi 16 bitin resoluutiolla. EL3702-muuntimet tukevat synkronointia ja ylinäytteistystä. (Beckhoff 2021a)

Synkronoinnissa ensimmäisen synkronoitavan EtherCAT slave-laitteen aikaa jaetaan muille laitteille tietyin väliajoin, jolloin niille saadaan sama aika. Samalla ajalla toimivat laitteet voivat antaa ulostulosignaalin samaan aikaan. Synkronointimenetelmästä käytetään nimitystä distributed clocks. (Beckhoff 2021c)

Ylinäytteistyksessä muuntimen kanava ottaa ja tallentaa useamman kuin yhden näytteen EtherCAT:in kierroksen aikana. Näytteiden määrää kuvaa ylinäytteistyskerroin n , joka on kokonaisluku väliltä 1–100. AD-muuntimien miniminäytteistysaika on 10 μ s. Testilaitteiston AD-muuntimia ylinäytteistetään kertoimella $n = 5$. (Beckhoff 2021a)



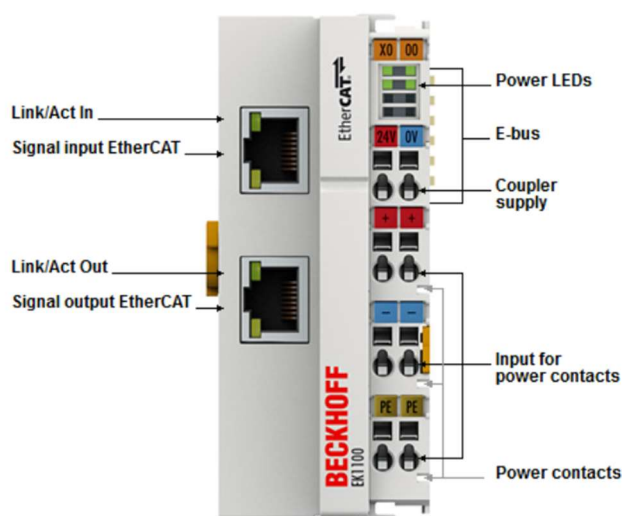
Kuva 3.5 Beckhoffin EL3702 AD-muuntimen kuva ja porttien selitykset. Testilaitteistossa on kaksi AD-muunninta, jotka muuttavat paikka-antureiden signaalin digitaalseksi. (Beckhoff 2021b)

3.3 EtherCAT

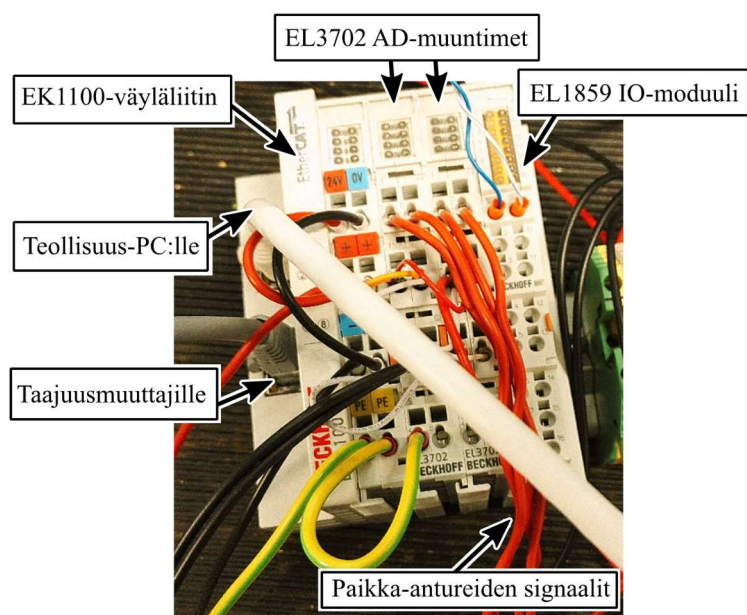
Testilaitteiston osien välinen tiedonsiirto tehdään EtherCAT-väylää pitkin. EtherCAT-väylässä master-laite lähettää telegrammin 50 μ s välein. Slave-laitteet lukevat, kirjoittavat ja lähettävät telegrammia eteenpäin (Rautalahti 2020). Osion viimeinen solmukohta havaitsee, että ulostulo ei johda enää seuraavaan sisääntuloon, jolloin se palauttaa viestin master-laitteelle paluureittiiä pitkin. Järjestelmässä on kaksisuuntainen yhteys, eli sillä voidaan lähettää ja vastaanottaa tietoa samaan aikaan. (Beckhoff 2021c)

Testilaitteistossa EK1100-väyläliittimellä yhdistetään EtherCAT-terminaalit, taajuusmuuttajat ja teollisuus-PC keskenään EtherCAT-väylään. Teollisuus-PC toimii master-laitteena.

Se saa paikkatiedot terminaaleilta ja lähettää virtaohjeet taajuusmuuttajille. EK1100-väyläliitin on kuvassa 3.6. Väyläliittimen vasemmalla puolella on kaksi RJ45-liitäntää, joista ylempi on yhdistetty teollisuus-PC:hen ja alempi taajuusmuuttajaan, joka on yhdistetty toiseen taajuusmuuttajaan. EK1100:n oikealle puolelle liitetään EtherCAT-terminaaleja. Näitä ovat EL3702 AD-muuntimet ja EL1859 digitaalinen IO-moduuli. EL1859-moduuliin on liitetty kytkin, jolla leijutus voidaan kytkeä päälle tai pois. Terminaalirivin viimeiset liittimet suojataan kannella (Beckhoff 2020). EK1100 muuntaa Ethernet 100BASE-TX-telegrammit terminaalien käyttämään E-bus väylän viestimuotoon (Hakamaa 2015). Testilaitteiston kytkennät ovat kuvassa 3.7.



Kuva 3.6 Testilaitteistossa käytetty EK1100 EtherCAT-väyläliitin. (Beckhoff 2020)



Kuva 3.7 Testilaitteiston EK1100 EtherCAT-väyläliitin, kaksi EL3702 AD-muunninta ja EL1859-moduuli.

3.4 Teollisuus-PC

Säätöalgoritmit tehdään ja toteutetaan teollisuus-PC:hen, joka on esitetty kuvassa 3.8. Testilaitteiston teollisuus-PC on Beckhoffin C6930, jossa on TwinCAT 3 XAR (eXtended Automation Runtime) -ohjelmisto. Ympäristö on reaaliaikainen ja siellä voidaan ladata, suorittaa tai hallita TwinCAT-moduuleja. Moduuleilla on TcCOM (TwinCAT Common Object Model) -rajapintamäärittely, jonka ansiosta ne ovat yhteensopivia keskenään, vaikka ne olisi toteutettu eri ympäristöllä tai kääntäjällä. (Beckhoff 2021d), (Lötjönen 2021)

Moduuleista kootaan projekti Visual Studioon integroidussa TwinCAT 3 XAE (eXtended Automation Engineering) -ohjelmointiympäristössä ja vietään sieltä teollisuus-PC:lle suoritettavaksi. Ohjelmointia voidaan tehdä C, C++ ja IEC 61131-3 kielillä sekä Matlabilla ja Simulinkillä. Ohjelmointiympäristössä voidaan seurata teollisuus-PC:n toimintaa reaaliaikaisesti. (Lötjönen 2021)

Testilaitteistolle voidaan tehdä säädin Simulinkissä ja kääntää se suoraan TwinCAT-yhteensopivaan TcCOM-muotoon. Simulink-mallista käännettyyn muotoon on mahdollista liittää lohkokaavio. TwinCAT 3 XAE -ohjelmointiympäristössä voidaan tarkastella lohkokaaviota ja muokata sen parametreja. (Beckhoff 2018), (Lötjönen 2021)



Kuva 3.8 Beckhoffin C6930 teollisuus-PC, jossa testilaitteiston säätöalgoritmit toteutetaan.

3.5 Taajuusmuuttajat

Laitteistossa on kaksi ABB:n ACSM1-04AS-07A0-4 taajuusmuuttajaa. Taajuusmuuttajat on esitetty kuvassa 3.9. Moottorikäytössä muuttaja ottaa kolmivaiheisena jännitettä 230/400/480/500 VAC virralla 9,8/9,8/8,4/8,4 A taajuudella 50/60 Hz. Ulostuleva jännite voi olla nollan ja sisään syötetyn jännitteen väliltä. Virtaa saadaan ulos 8/8/6,9/6,6 A ja taajuutta väliltä 0–500 Hz. Tiedot löytyvät taajuusmuuttajan kyljessä olevasta tarrasta, joka on kuvassa 3.10.

Taajuusmuuttajilla ohjataan testilaitteiston magneettipareja kappaleessa 2.3 esitetyn kuvan 2.11 mukaisesti. Taajuusmuuttajien ohjauskortit on muutettu siten, että yhdellä taajuusmuuttajalla voidaan ohjata yhtä sähkömagneettiparia. Ohjauskortilla toteutetaan virtasäätö ja pulssileveysmodulaatio. Virtasäädin muuttaa paikkasäätimeltä tulevat virtaohjeet jänniteohjeiksi. Pulssileveysmodulaattori muodostaa ohjauspulssit taajuusmuuttajan kytkimille jänniteohjeiden perusteella. Ohjauspulssit on aikajaksotettu kytkentäjaksolle silloin, kun käämien jänniteohjeet ovat samanmerkkiset. (Sillanpää 2013)



Kuva 3.9 Testilaitteistossa olevat ABB:n ACSM1-04AS-07A0-4 taajuusmuuttajat. Yksi taajuusmuuttaja antaa virtaa yhdelle sähkömagneettiparille.

ABB
ABB

ACSM1-04AS-07A0-4

ASSEMBLED IN FINLAND

ABB Oy
Hiomotie 13
00380 Helsinki
Finland

Input U1 3~ 230/400/480/500 VAC
I1 9.8/9.8/8.4/8.4 A
f1 50/60 Hz

Output U2 3~ 0...U1
I2 8/8/6.9/6.6 A
f2 0...500 Hz
Sn 5.5 kVA

FRAME
A

Air cooling
IP20
UL open type

For Installations in North America (UL / CSA)
DRIVE RATED FOR MAX 100kA SymRMS CAPABLE CIRCUITS AT 500V AC MAX
WHEN PROTECTED BY T / HRCI-T CLASS FUSE RATED (See table below) A MAX

Drive Type	[A]	Drive Type	[A]	Drive Type	[A]
02A5 , 02A7 , 03A0 , 03A6	6	11A0 , 012A , 014A	20	040A , 046A , 050A	50
03A5 , 04A0 , 04AB , 04A9	10	14A4 , 016A , 018A	25	053A , 060A , 061A	70
05A0 , 06A0	10	021A , 024A , 025A	25	067A , 073A , 078A	80
06A3 , 07A0 , 08A0 , 08A3	15	028A , 030A , 031A	35	080A , 090A , 094A	100
09A5 , 010A	15	035A , 044A	45		

USE 75°C OR HIGHER RATED WIRE FOR FIELD WIRING TERMINALS
INTERNAL MOTOR OVERLOAD PROTECTION (See Firmware manual)
MULTIPLE RATED EQUIPMENT (See Hardware manual)

Kuva 3.10 Taajuusmuuttajien kyljissä on tarrat, joista nähdään mm. laitteen malli.

3.6 Magneettilaakeri ja roottori

Roottori on toisesta päästä kiinni kuulalaakerilla ja toisesta päästä magneettilaakerilla, joka toimii radiaalilaakerina. Staattorissa on neljä sähkömagneettia, jolloin se on kahdeksannainen. Jokaisen staattorin navan ympärillä on sähkömagneetin osana toimiva käämi ja mittauksiin käytettävä lisäkäämi. Lisäkäämit ovat staattorissa urien pohjalla. Taulukossa 3.1 on magneettilaakeriin ja roottoriin liittyviä parametreja.

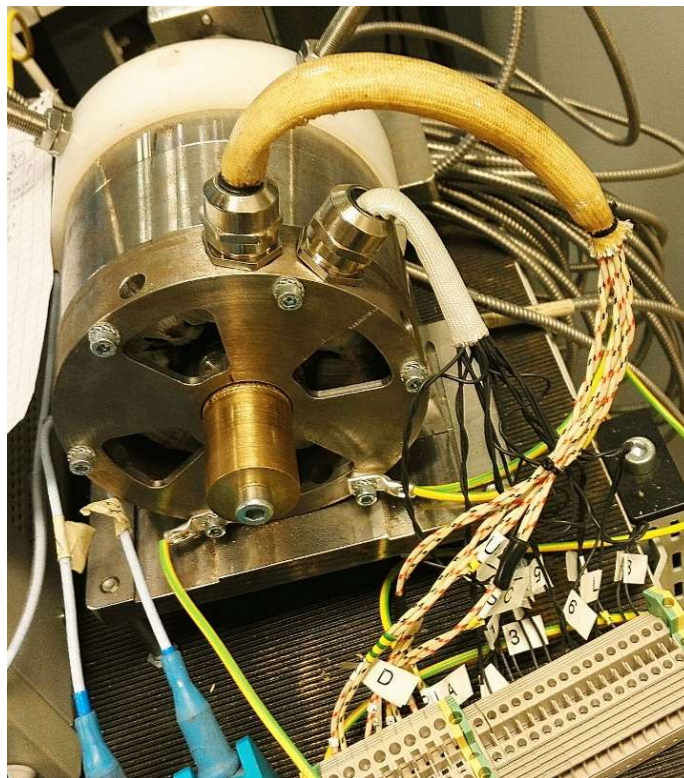
Taulukko 3.1 Testilaitteiston fyysisiä parametreja.

Selitys	Arvo
Roottorin pituus	30 [cm]
Roottorin massa	2,64 [kg]
Käämin kierrosluku	100
Käämin johtimen halkaisija	0,85 [mm]
Käämin rinnakkaisten johtimien lukumäärä	1
Käämien keskimääräinen resistanssi	2,13 [Ω]
Käämien keskimääräinen induktanssi	20 [mH]
Lisäkäämin kierrosluku	50
Lisäkäämin johtimen halkaisija	0,2 [mm]
Lisäkäämin rinnakkaisten johtimien lukumäärä	1
Magneettilaakerille kohdistuva massa	1,52 [kg]
Ilmaväli, kun roottori on keskellä laakeria	0,5 [mm]
Sähkömagneetin muodostaman magneettipiirin poikkipinta-ala	$4,41 \cdot 10^{-4}$ [m ²]

Osa taulukon 3.1 parametreista on saatu Gräsbeckin kandidaatintyöstä, jossa laitteiston fyysisten parametrien perusteella muodostettiin simulointimalli. (Gräsbeck 2018). Taulukossa on myös tietoja lisäkäämityksistä, joita tarkastellaan seuraavassa kappaleessa.

3.7 Lisäkäämitykset

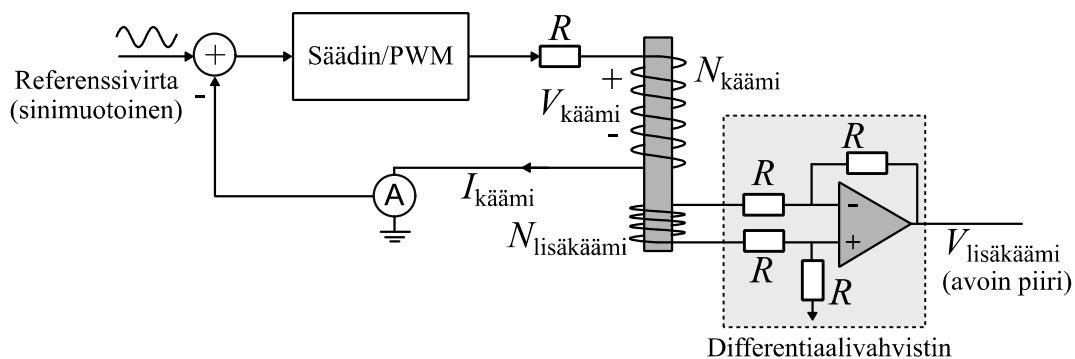
Laitteisto sisältää lisäkäämitykset (engl. search coils, measurement coils), joita voidaan käyttää paikka-anturittoman aktiivimagneettilaakerin toteuttamiseen eli käytännössä magneettivuon estimoimiseen. Aktiivimagneettilaakerin voimat voidaan määrittää virran ja paikan tai magneettivuon tiheyden avulla. Yleensä voimat lasketaan käämien virtojen ja roottorin paikan avulla, koska niiden mittaaminen on helppoa. Voimien laskeminen magneettivuon perusteella on kuitenkin tarkempi menetelmä etenkin silloin, kun voimat ovat pieniä tai sähkömagneetit ovat saturoituneita. (Wilson 2005, Schweitzer 2009) Kuvassa 3.11 laitteiston lisäkäämitysten päät on kytketty riviliittimiin mahdollista käyttöä varten. Taulukossa 3.2 on testilaitteiston lisäkäämityksiä koskevia parametreja.



Kuva 3.11 Magneettilaakerista lähtee sähkömagneettien käämien ja lisäkäämitysten johdot omiin riviliittimiinsä. Lisäkäämitysten mustat johdot menevät oikeanpuoleisiin riviliittimiin.

Lisäkäämitykset voivat havaita vain muuttuvan magneettivuon (Chiba 2005). Wilsonin (2005) väitöskirjassa lisäkäämitysten mittausten avulla muodostetaan hakutaulukoita, joista saadaan estimoitua magneettivuon muuttuva osa ja DC-osa virran ja paikan perusteella. Hakutaulukkoa varten tehdyissä mittauksissa roottori lukitaan tietyille etäisyyksille, laitteiston käämille syötetään sinimuotoista virtaa ja lisäkäämituksen avulla estimoidaan magneettivuota. (Wilson 2005)

Lisäkäämitys kierretään saman rautasydämen ympärille kuin magneettilaakerin sähkömagneettin käämi. Näin molempien läpi kulkee sama magneettivuon. Muuttuva magneettivuon indusoi lisäkäämiin jännitteen. Lisäkäämin piirissä on differentiaalivahvistin. Differentiaalivahvistin kasvattaa piirin resistanssin merkittävän suureksi, jolloin lisäkäämiin ei kulje virtaa ja siitä saadaan mitattua avoimen piirin jännite. Magneettivuon estimaatti saadaan integroimalla avoimen lisäkäämiin jännite ja kertomalla tulos käämin ja lisäkäämin johdinkierrosten lukumäärien suhteella. Mittaustilanne on esitetty yhdelle säätöakselin puolikkaalle kuvassa 3.12. (Wilson 2005)



Kuva 3.12 Kokoonpano hakutaulukon mittauksia varten. Sähkömagneetin käämille annetaan sinimuotoista virtaa. Lisäkäämpiirin jännitettä integroimalla saadaan magneettivuoto. $V_{\text{käämi}}$ ja $V_{\text{lisäkäämi}}$ ovat käämin ja lisäkäämin läpi menevät jännitteet. $I_{\text{käämi}}$ on käämin läpi menevä virta. Operaatiovahvistimen vuoksi lisäkäämissä menevä virta on erittäin pieni. $N_{\text{käämi}}$ ja $N_{\text{lisäkäämi}}$ ovat käämin ja lisäkäämin johdinkierrosluvut. R on resistanssi. Kuva on muokattua lähteestä (Wilson 2005).

Hall-antureilla voitaisiin havaita magneettivuon muuttuva ja vakiona pysyvä osa. Niiden käyttöä rajoittaa kuitenkin kalleus, mekaaninen herkkyys ja niiden vaatima tila. Hall-anturit pitäisi sijoittaa ilmaväliin, minkä vuoksi ilmavälin suuruutta pitäisi kasvattaa. (Chiba), (Schweitzer 2009), (Wilson 2005)

4. YHTEENVETO

Magneettilaakerit voivat olla aktiivisia, passiivisia tai niiden yhdistelmiä. Työssä käsitellään aktiivisia magneettilaakereita, joissa leijutus tehdään aktiivisesti säädetyillä sähkömagneeteilla. Paikkasäädössä sähkömagneettien voima voidaan määrittää virran ja paikan avulla, joiden suhde voimaan on linearisoitu. Roottorin paikkaa voidaan mitata kapasitiivisilla, optisilla, induktiivisilla ja pyörrevirta-antureilla. Paikkasäätimeltä saadaan virtaohje, joka muutetaan virtasäädön avulla sähkömagneettiparia syöttävän taajuusmuuttajan jänniteohjeiksi. Suhteiden linearisointia käyttävä säätötapa toimii monien sovellusten kannalta riittävän hyvin. Tarkempia tuloksia saadaan säädöllä, jossa magneeteille haluttu voima määritetään magneettivuon tiheyden avulla. Magneettivuon mittaaminen on vaikeampaa kuin virran ja paikan. Magneettivuon suuruutta voidaan estimoida esimerkiksi lisäkäämitysten avulla. Lisäkäämityksille voidaan tehdä mittauksia ja muodostaa tulosten avulla taulukko, josta magneettivuo saadaan virran ja paikan avulla.

Testilaitteisto on toteutettu kaupallisesti saatavilla olevista osista, jolloin laitteiston suunnittelu on nopeampaa ja osat ovat toimiviksi testattuja. Paikkasäätö tehdään Beckhoffin teollisuus-PC:lle, johon voidaan ladata Simulinkillä tehtyjä lohkokaavioita. Käyttäjän ei tarvitse kääntää itse lohkokaaviota välissä koodiksi. Beckhoffilta on käytössä myös väyläliitin ja mittauskortit, jolloin yhteensovitus on helpompi toteuttaa kuin jos laitteet olisivat eri valmistajalta. Paikanmittaus tehdään Bently Nevadan pyörrevirta-antureilla ja sähkömagneettien virransyöttö ABB:n taajuusmuuttajilla, joiden ohjaus on muokattu tarkoitukseen sopivaksi.

Aktiivimagneettilaakerin ja laitteiston osien kehitystyöllä kustannuksia saadaan alas ja tehokkuutta ylös. Taajuusmuuttajalla toteutetussa sähkömagneettiparin syötössä magneettia kohden tarvitaan vähemmän kytkimiä kuin h-sillassa.

Kandidaatintyössä dokumentoitiin testilaitteisto ja selvitettiin taustatiedoksi aktiivisen magneettilaakerin toiminta. Työ voisi siten toimia perehdytyksenä testilaitteistoa käyttävälle henkilölle. Aiheita on käsitelty yleisellä tasolla, minkä vuoksi työ ei kuitenkaan yksinään riitä pohjaksi laitteiston suunnittelulle ja käsittelylle, vaan aiheesta pitää etsiä lisää tietoa muualta.

LÄHTEET

Baker Hughes. 3300 XL 8mm Proximity Transducer System Datasheet. [Verkkosivu]. [Viitattu 9.8.2021]. Saatavissa: <https://www.bakerhughesds.com/sites/g/files/cozyhq596/files/2019-07/3300%20XL%208mm%20Proximity%20Transducer%20System%20Datasheet%20-%20141194.pdf>

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2018. MATLAB/Simulink, Block diagram. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.9.2021]. Saatavissa: https://infosys.beckhoff.com/content/1033/tc3_matlab_overview/63050395428616331.html

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2020. EK110x-00xx, EK15xx EtherCAT Bus Coupler. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.9.2021]. Saatavissa: https://download.beckhoff.com/download/Document/io/ethercat-terminals/ek110x_ek15xxen.pdf

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2021a. EL3702 | 2-channel analog input terminal - 10...+10 V with oversampling [Verkkosivu]. [Viitattu 12.9.2021]. Saatavissa: <https://www.beckhoff.com/EL3702/>

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2021b. EL37x2 2 channel Analog Input Terminals with oversampling. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.9.2021]. Saatavissa: <https://download.beckhoff.com/download/Document/io/ethercat-terminals/EL37x2en.pdf>

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2021c. EtherCAT – the Ethernet Fieldbus. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.9.2021]. Saatavissa: <https://www.beckhoff.com/fi-fi/products/i-o/ethercat/>

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2021d. TwinCAT 3 | Product overview, Philosophy. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.9.2021]. Saatavissa: https://infosys.beckhoff.com/content/1033/tc3_overview/4275768971.html

Bonfitto A. et al. 2012. A multi-purpose control and power electronic architecture for active magnetic actuators. Teoksessa: 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). ISBN: 9781467319713.

Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/234893942.pdf>

Chiba Akira et al. 2005. Magnetic Bearings and Bearingless Drives. Newnes. 381 s. ISBN 0-7506-5727-8 (sähköinen).

Dertien, Edwin. Regtien, Paul P. L. 2018. Sensors for Mechatronics. Elsevier. 379 s. ISBN 978-0-1281-3811-3 (sähköinen).

Filatov, A.V & Hawkins, L. A. 2010. An axial position sensor for active magnetic bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air (GT2010). Glasgow, UK. 14-18.6.2010.

Saatavissa: <https://www.calnetix.com/sites/default/files/6.pdf>

Gräsbeck Krister. 2018. Kahden vapausasteen radiaalilaakerijärjestelmän mallinnus ja säätö. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT School of Energy Systems/Sähkötekniikka. 21 s. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/149397/kandidaattintyo_grasbeck_krister.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hakamaa, Henri. 2015. Koulutuslaitteisto : Case: Beckhoff Automation Oy. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikka. 57 s. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97007/Hakamaa_Henri.pdf?sequence=1

Kirill, Rykov. 2011. Comparison and evaluation of eddy current sensors. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta/Sähkötekniikka. 60 s. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/70767/nbnfi-fe201108192242.pdf?sequence=4>

Lötjönen L. Pulkki, M. Beckhoff TwinCAT3. Johdatus Simulink-mallien käyttöönottoon Beckhoff CX5020 teollisuustietokoneella [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.8.2021]
 Saatavissa: <https://docplayer.fi/8118428-Beckhoff-twincat3-johdatus-simulink-mallien-kayttoonottoon-beckhoff-cx5020-teollisuustietokoneella-lauri-lotjonen-mikko-pulkki.html>

Niemann, André. 2005. The Analysis and Development of Sensors for Active Magnetic Bearings. Diplomityö. North-West University, The School of Electrical and Electronic engineering. 108 s. Saatavilla: <https://repository.nwu.ac.za/handle/10394/77?show=full>

Nyce, David S. 2016. Position sensors. John Wiley & Sons. 371 s. ISBN 978-1-5231-1483-2 (sähköinen)

Paajanen, Antti. 2020. Kahden vapausasteen radiaalilaakerijärjestelmän epälineaarinen mallinnus ja tilasäätö. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto, LUT School of Energy Systems/Sähkötekniikan koulutusohjelma. 33 s. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160958/Kandidaatintyo_Paajanen_Antti.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pelli, Iiro. 2017. Capacitive displacement sensor's applicability and limitations in condition monitoring systems of rotating electrical machines. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT School of Energy Systems/Sähkötekniikan koulutusohjelma. 73 s. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158410/Diplomityo_Iiro_Pelli.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pokki, Janne. 2019. Passiiviset magneettilaakerit. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto, LUT School of Energy Systems/Sähkötekniikka. 21 s. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160354/kandidaatinty%C3%B6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rautalahti, Ville. 2020. EtherCAT-kenttäväylä: Kilpailukyky kenttäväylänä. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto, Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta. 20 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/123375/RautalahtiVille.pdf?sequence=2>

Recheis, Manes, 2010. Realization of an active magnetic bearing for a flywheel energy storage. Diplomityö. University of Technology Graz, Institute of Electrical Measurement and Measurement Signal Processing. 77 s. Saatavissa: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a818c97cd0&location=browse>

Remes, Joonas. 2013. Selvitys kapasitiivisten paikanmittausanturien ominaisuuksista ja suunnitteluvaatimuksista. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energia/Sähkötekniikan koulutusohjelma. 25 s. Saatavissa:

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/93233/kandidaatintyo_valmis.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Schweitzer, Gerhard & Maslen, Eric H. (toim.) 2009. Magnetic Bearings, Theory, Design, and Application to Rotating Machinery. Springer. 535 s. ISBN 978-3-642-00497-1 (sähköinen).

Sillanpää, Teemu. 2013. Taajuusmuuttaja aktiivisesti säädetyn magneettilaakerin virtalähteenä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta/Sähkötekniikan koulutusohjelma. 68 s. Saatavissa:

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/92115/diplomityo_sillanpaa_teemu_22082013_final.pdf?sequence=2

Sillanpää, T. et al., 2021. Three-Axis Inductive Displacement Sensor Using Phase-Sensitive Digital Signal Processing for Industrial Magnetic Bearing Applications. *Actuators*, 10(6), p.115. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.3390/act10060115>

Tantau, Mathias. 2015. Active Magnetic Bearing for Ultra Precision Flexible Electronics Production System. M.Sc. Thesis. Cranfield University, School of Aerospace, Transport and Manufacturing. 175 s. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/42144164.pdf>

Wilson, Jon S. 2005. Sensor technology handbook. Elsevier. 704 s. ISBN 978-0-0805-8084-8 (sähköinen).

Yim, J. et al. 2002. A novel cost-effective scheme of power amplifier for AMB using space vector technology. Proceedings of the Eighth International Symposium on Magnetic Bearings: ISMB-8 : Mito, Japan, August 26-28, 2002.

Wilson, Brian C. D. 2004. Control Designs for Low-Loss Active Magnetic Bearings: Theory and Implementation. Väitöskirja. Georgia Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering. 327 s. Saatavissa: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/5228>