

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma

Topi Toosi

Prosessianturien ikääntymisen havaitseminen kohinamittauksen avulla

Diplomityö
Espoo, 16. toukokuuta 2016

Valvoja: Professori Juha Karhunen, Aalto-yliopisto
Ohjaajat: Dosentti Miki Sirola, Aalto-yliopisto
Filosofian tohtori Jarkko Laukkanen, Teollisuuden Voima Oyj

Tekijä:	Topi Toosi		
Työn nimi:	Prosessianturien ikääntymisen havaitseminen kohinamittauksen avulla		
Päiväys:	16. toukokuuta 2016	Sivumäärä:	62
Pääaine:	Laskennallinen tiede	Koodi:	IL3001
Valvoja:	Professori Juha Karhunen		
Ohjaajat:	Dosentti Miki Sirola Filosofian tohtori Jarkko Laukkanen		
<p>Tässä diplomityössä tutkitaan menetelmiä prosessiantureiden ikääntymiseen liittyvän vikaantumisen havaitsemiseksi anturin kohinasignaalista. Tutkimuksen kohteena ovat ydinvoimalaitosyksiköiden Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 pinnankorkeuden ja paineen mittaukseen käytetyt paine-ero- ja painelähtimet. Työssä esitellään kirjallisuudesta löytyviä menetelmiä vikaantumiseen liittyvien indikaattoreiden: anturin kalibraation ja vasteajan muutosten sekä signaalin resonanssiipiikkien muutosten tunnistamiseksi anturin signaalin tehospektristä.</p> <p>Lisäksi työssä esitellään menetelmä anturit yksilöivien sormenjälkien muodostamiseksi spektristä pääkomponenttianalyysin avulla. Seuraamalla näiden sormenjälkien muutoksia sekä eroja samaa suuretta mittaavien rinnakkaisten anturien välillä voidaan tunnistaa merkkejä anturien vikaantumisesta. Kokeellisissa mittauksissa menetelmällä pystytään muodostamaan stabiileja sormenjälkiä pintamittauksen paine-erolähtetimestä. Sormenjälkimenetelmän ja spektrin muutosten avulla löydetään merkkejä mahdollisesta vikaantumisesta yhdessä Olkiluoto 2:n hienopinnan mittaukseen käytettävässä anturissa.</p>			
Asiasanat:	ikääntyminen, kohina-analyysi, kohinamittaus, paineanturi, paine-erolähtetin, painelähtetin, vian tunnistus, vikaantuminen, ydinvoimalaitos		
Kieli:	suomi		

Author:	Topi Toosi	
Title:	Detection of the Aging of Process Sensors from Signal Noise	
Date:	May 16, 2016	Pages: 62
Major:	Computational Science	Code: IL3001
Supervisor:	Professor Juha Karhunen	
Advisors:	Docent Miki Sirola Jarkko Laukkanen Ph.D.	
<p>The topic of this thesis is the methods used for detection of aging related faults in the signal noise of process sensors. The subject of the research is the pressure and differential pressure transmitters used for pressure and water level measurements at the Olkiluoto 1 and Olkiluoto 2 nuclear power plants. Known methods for detecting the primary indicators for sensor faults - changes in the calibration and the response time and changes in the resonance peaks - from the signal spectrum are presented.</p> <p>Additionally a new method for fingerprinting the sensors by the PCA of the signal spectra is presented. Sensor fault detection is possible by inspecting changes over time in these fingerprints and comparing fingerprints of the redundant sensors. Empirical measurements confirm that the method is capable of forming stable fingerprints from the signal spectra of the differential pressure sensors. By using fingerprinting method and inspecting the signal spectra one possible faulty water level sensor at Olkiluoto 2 plant is detected.</p>		
Keywords:	aging, differential pressure transmitter, fault detection, fault diagnosis, noise analysis, noise measurement, nuclear power plant, pressure sensor, pressure transmitter	
Language:	Finnish	

Kiitokset

Haluan kiittää valvojaani Juha Karhusta sekä ohjaajiani Miki Sirolaa ja Jarkko Laukkasta erinomaisesta ohjauksesta. Lisäksi haluan esittää kiitokset Teollisuuden Voima Oyj:lle työn mahdollistamisesta ja kiinnostavasta tutkimusaiheesta sekä Mark van Heeswijkille arvokkaista metodologisista neuvoista. Haluan myös kiittää oikolukijoina toimineita Risto Järvistä ja Marjatta Kempaista, arvostan suuresti heidän panostaan, sillä raakatekstini ei ollut niitä kaikkein siisteimpiä. Lisäksi haluan vielä kiittää Teknillistä korkeakoulua laadukkaasta opetuksesta, joka osaltaan on ollut perustana tämän diplomityön synnylle. Lopuksi haluan antaa erityiskiitokset avopuolisolleni Emilia Hjelmille viisaista neuvoista ja tärkeästä tuesta vaikeina hetkinä.

Helsinki, 16. toukokuuta 2016

Topi Toosi

Lyhenteet

ICA	<i>Independent Component Analysis</i> , riippumattomien komponenttien analyysi
LDA	<i>Linear Discriminant Analysis</i> , lineaarinen diskriminanttianalyysi
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i> , USA:n ydinturvallisuusviranomainen
OL1	Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 1
OL2	Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 2
OL x - y	Laitosyksikön Olkiluoto x osajärjestelmän y anturi
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> , pääkomponenttianalyysi

Sisältö

Lyhenteet	5
1 Johdanto	8
2 Taustaa	10
2.1 Pinnankorkeuden ja paineen mittaaminen	11
2.2 Anturit	13
3 Kirjallisuuskatsaus	14
3.1 Paineanturien tekniikka	14
3.1.1 Anturien epätarkkuus	14
3.1.2 Paineanturien ikääntymiseen vaikuttavat tekijät	16
3.1.3 Paineanturien vikaantuminen	17
3.1.4 Impulssiputkien ongelmat	19
3.2 Kohinamittaukset ja vikaantumisen ennustaminen	21
3.2.1 Anturin vasteajan arvioiminen kohinamittauksen avulla	21
3.2.2 Vikaantumisen merkkien havaitseminen kohinaspektristä	23
3.3 Anturien vikaantumisen reaaliaikainen havaitseminen	23
4 Tutkimusmenetelmät	26
4.1 Tehokertymäspektri	27
4.2 Pääkomponenttianalyysi	27
4.3 Kalibraation muutosten havaitseminen	29
4.4 Vasteajan muutosten havaitseminen ja matemaattisten mallien sovittaminen tehospektriin	29
4.5 Lineaarinen diskriminanttianalyysi	30
4.6 Riippumattomien komponenttien analyysi (ICA)	32
5 Toteutus	35
5.1 Tehospektri	35
5.2 Pääkomponenttianalyysi	36

5.3	Kalibraation muutosten havaitseminen	37
6	Tulokset	38
6.1	Pääkomponenttianalyysi ja tehospektrit	38
6.1.1	Hienopinta-anturit	38
6.1.2	Karkeapinta-anturit	42
6.1.3	Hienopaineanturit	45
6.1.4	Karkeapaineanturit	48
6.2	Kalibraation muutokset	51
7	Johtopäätökset ja suositukset	54
7.1	Pääkomponenttianalyysi ja tehospektrit	54
7.2	Kalibraation muutokset	55
7.3	Poikkeavat anturit	55
7.4	Menetelmien soveltaminen muihin anturityyppeihin	57
7.5	Suosituksset	57

Luku 1

Johdanto

Tässä diplomityössä tutkitaan menetelmiä prosessiantureiden vikaantumisen havaitsemiseen ja ennakoimiseen antureiden vastesignaalien sisältämän kohinan ominaisuuksien ja sen muutosten perusteella. Tarkemmin sanoen työssä tarkastellaan ydinvoimalaitosyksiköissä Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 paineen ja paine-eron mittaukseen käytettäviä prosessiantureita. Laitosyksiköistä Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 käytetään tästä eteenpäin lyhenteitä OL1 ja OL2.

Työssä tarkasteltavia kriittisten valvontajärjestelmien antureita on käytössä neljä rinnakkaista yksilöä mittaamaan kutakin suuretta. Kahden rinnakkaisen anturin vikaantuminen samalla kertaa voi johtaa laitoksen alasaajoon. Yhdenkin anturin vikaantuminen laitoksen käytön aikana johtaa korjaaviin toimenpiteisiin. Olisi edullisempaa tunnistaa vikaantuvat anturit etukäteen, jolloin niitä voitaisiin uusida hallitusti esimerkiksi vuosittaisten huolto- ja kunnossapitojen aikana. Anturien signaalien kohinan mahdollisesti sisältämät merkit alkavasta vikaantumisesta tarjoaisivat edullisen tavan tähän vikojen ennakointiin.

Paine- ja paine-eroantureita käytetään laitosyksiköissä OL1 ja OL2 sekä paineen, pinnankorkeuden että virtauksen mittaamiseen. Tässä tutkittavien paineen- ja pinnanmittausjärjestelmien antureista valtaosa on pysynyt käytössä laitosyksiköiden valmistumisesta lähtien, vaikka muutamia onkin jouduttu uusimaan. Niiden käyttöaika on siis jo ylittänyt 30 vuotta. On odotettavissa, että niitä joudutaan uusimaan lähitulevaisuudessa enenevässä määrin.

Luvussa 2 esitellään lyhyesti tutkimuksen kohteena oleva laitosyksiköiden OL1 ja OL2 paineen- ja pinnanmittausjärjestelmä ja siihen kuuluvat olennaiset komponentit kuten anturien impulssiputket. Impulssiputkien ikääntyminen ja niihin liittyvät ongelmat on otettu työn käsittelyn piiriin, sillä näiden häiriötilanteiden korjaaminen laitoksen käytön aikana voi olla haastavaa ja ne voivat vaikuttaa varsinaisten anturien virhetilanteiden havaitsemiseen.

Sen sijaan signaalien välitys antureilta eteenpäin laitoksen prosessitietojärjestelmässä on jätetty käsittelyn ulkopuolelle. Tämä osa mittausjärjestelmää on täysin saavutettavissa myös laitoksen käytön aikana.

Luvussa 3 perehdytään kirjallisuudessa esitettyihin menetelmiin anturien vikaantumisen havaitsemiseksi sekä käydään läpi anturien virhelähtettä, ikääntymiseen vaikuttavia tekijöitä ja vikaantumisen tapoja. Luvun tarkoituksena on vastata kysymykseen, millä tavoin mittalaitteen ikääntyminen näkyy sen vastesignaalissa ja tämän signaalin ominaisuuksissa.

Luvussa 4 esitellään tutkimuksessa käytettävät tutkimusmenetelmät, joilla pyritään löytämään tutkittavien anturien signaalidatasta merkkejä vikaantumiseen tai ikääntymiseen liittyvistä indikaattoreista. Lisäksi esitellään eräitä muita mahdollisia menetelmiä tällaisten indikaattorien havaitsemiseksi ja käsitellään syitä sille, miksi kyseisiä menetelmiä ei sovelleta tässä tutkimuksessa.

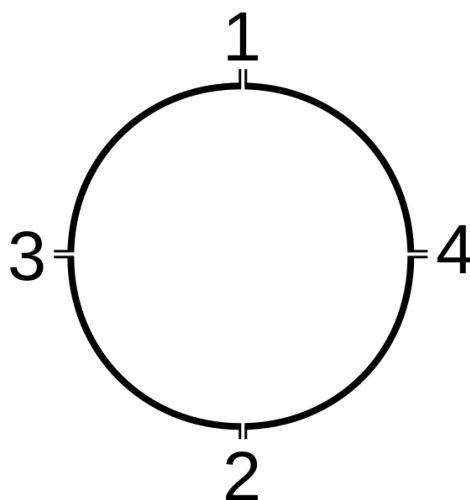
Luvussa 5 käydään läpi sovellettavien menetelmien toteutuksen käytännön yksityiskohdat ja kuvataan työtä varten kehitetyn datan esikäsittely- ja visualisointiohjelmiston toiminnallisuutta. Luvussa 6 puolestaan raportoidaan tutkimuksen tulokset ja löydökset. Luvussa 7 tulkitaan näitä tuloksia ja arvioidaan käytettyjen menetelmien soveltuvuutta kyseiseen tutkimusaiheeseen. Lisäksi pohditaan käytettyjen menetelmien soveltamista toisen tyyppiin antureihin ja esitetään suosituksia tutkimuksen jatkosta.

Luku 2

Taustaa

Tässä luvussa esitellään Olkiluodon kiehutusvesireaktoreilla OL1 ja OL2 käytössä oleva pinnankorkeuden- ja paineenmittausjärjestelmä ja sen komponentit. Ydinvoimalaitoksissa käytetään paineantureita paineen mittauksen lisäksi myös mittaamaan nesteen ja höyryn virtausta sekä nestepintojen korkeutta. Virtausta ja pintojen korkeutta mitataan paine-erojen avulla [1]. Tässä työssä tutkitaan Olkiluodon laitosyksiköiden OL1 ja OL2 reaktoripaineastian paineen ja vedenpinnan korkeuden mittaukseen käytettäviä antureita. Tutkittavat anturit mittaavat neljää eri suuretta: hienopainetta, karkeapainetta, hienopintaa ja karkeapintaa.

Varsinaiset paine- ja paine-erolähettimet on sijoitettu reaktorin suojarakennuksen ulkopuolelle ja painesignaalit johdetaan niille reaktoripaineastian impulssiputkia pitkin [2]. Mittalaitteiden sijoittaminen reaktorin paineastian ulkopuolelle suojelee niitä prosessin äärimmäisen epäedullisilta olosuhteilta [2] ja vähentää riskiä ylimääräisten kappaleiden joutumiselle prosessiin. Jokaista suuretta mittaa neljä erillistä redundanttia anturia, jotka sijaitsevat neljässä erillisessä osajärjestelmässä eli subissa [2]. Normaaleissa käyttöolosuhteissa kolmen osajärjestelmän anturit riittävät laitoksen turvalliseen käyttöön, joten yksittäisen anturin vikaantuminen ei vielä johda reaktorin sammuttamiseen [2]. Tässä työssä yksittäisiin antureihin viitataan laitoksen ja osajärjestelmän numeron perusteella, esimerkiksi hienopaineanturi OL2-1 tarkoittaa laitoksen OL2 osajärjestelmän numero 1 hienopaineen anturia. Eri osajärjestelmien sijaintia toisiinsa nähden on havainnollistettu kuvassa 2.1.



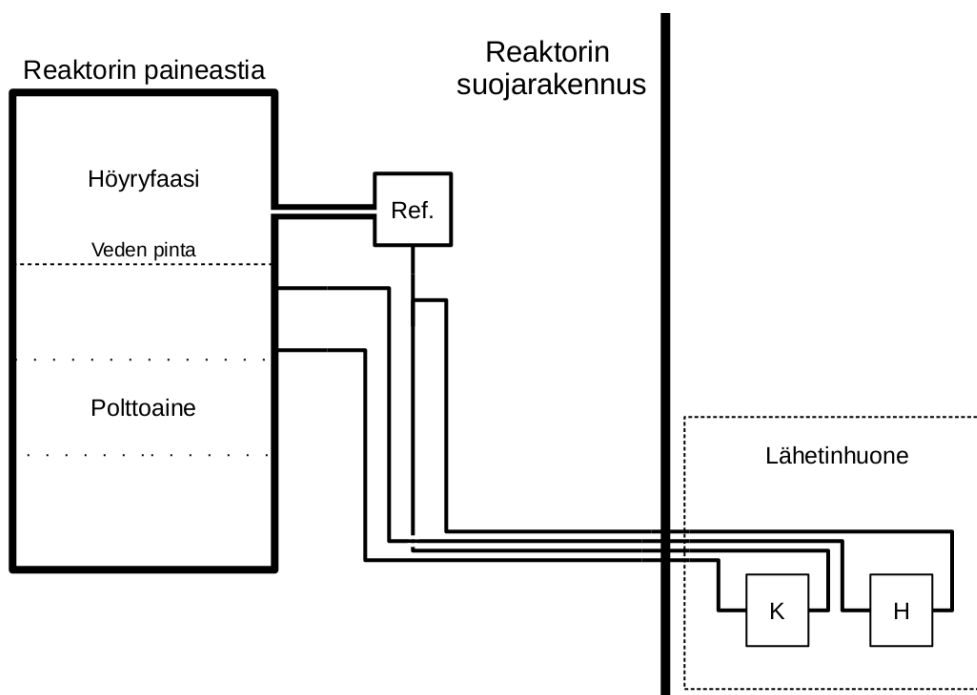
Kuva 2.1: Kaaviokuva reaktorin paineastian horisontaalisesta poikkileikkauksesta. Kuvassa esitetään eri osajärjestelmien referenssiastioiden sijainti suhteessa paineastiaan. Eri osajärjestelmien referenssiastioita on merkitty numeroilla 1-4.

2.1 Pinnankorkeuden ja paineen mittaaminen

Reaktoripaineastian vedenpinnan korkeutta mitataan paine-erojen avulla. Tässä työssä käsitellään kahta erillistä pinnankorkeutta kuvaavaa suuretta: hienopintaa ja karkeapintaa. Näiden eroina ovat mittauksen resoluutio ja mitattavan alueen suuruus [2]. Koska mittaukset tapahtuvat paine-erojen avulla, määrittää impulssiputkien yhteiden eli liityntöjen sijainti reaktoripaineastiassa pinnankorkeuden mittausalueiden rajat.

Yhden osajärjestelmän pinnanmittauksen impulssiputkistoa on havainnollistettu kuvassa 2.2. Kummankin suureen - hieno- ja karkeapinnan - pluspuolen impulssiputket haarautuvat samasta referenssiputkesta. Pluspuolella tarkoitetaan tässä kunkin anturin ylempää impulssiputkea. Referenssiputki on yhteydessä niin sanottuun referenssiastiaan, joka on suoraan yhteydessä reaktorin höyrytilaan reaktorin vesifaasin pinnan yläpuolelle [2]. Eristämättömään referenssiastiaan lauhtuu jatkuvasti kylläisestä prosessihöyrystä vettä niin, että vedenpinta ei pääse laskemaan. Vastaavasti ylimääräinen vesi valuu takaisin prosessiin ylivuodon kautta. Vesipatsaan vakiokorkeus on mitaustarkkuuden kannalta oleellinen, sillä paine-eromittaukset on kalibroitu vesipatsaan tietyn korkeuden, tiheyden ja lämpötilan mukaan [2].

Miinuspuolen impulssiputket puolestaan yhdistyvät reaktoripaineastiaan reaktorin vesifaasin pinnan alapuolella. Hienopaineen yhteet sijaitsevat paineastiassa karkeapaineen yhteitä korkeammalla [2], joten hienopaineen mitausalue on karkeapainetta pienempi. Impulssiputket on kallistettu koko matkaltaan vähintään suhteessa 1 : 10, millä pyritään minimoimaan mahdollisten kaasukuplien jäämistä putkiin - ylimääräinen kaasu vapautuu reaktoriastiaan [2]. Pieniä määriä kaasukuplia saattaa kuitenkin jäädä putkiin esimerkiksi läpivientien ja venttiilien kohdalle [2].



Kuva 2.2: Kaaviokuva yhden osajärjestelmän pinnanmittausantureiden impulssiputkiston rakenteesta ja liittymisestä reaktorin paineastiaan. Hieno- ja karkeapinnan paine-erolähtettä on merkitty kirjaimilla *H* ja *K*. Referenssiastia puolestaan tekstillä *Ref.*

Myös painetta kuvaavia suureita käsitellään kahta: hienopainetta ja karkeapainetta. Näiden mittaamiseen käytetään samanlaisia painelähtettä ja kahden suureen erona on lähtettimien kalibraatio. Painelähtettimien impulssiputket on kytketty yllä mainittuihin referenssiastioihin [2], ne mittaavat painetta nimenomaan reaktorin höyrytilassa. Kunkin osajärjestelmän hieno- ja karkeapainelähtettimien impulssiputket haarautuvat samasta referenssiputkesta. Myös paineanturien impulssiputket noudattavat koko matkaltaan 1 : 10

kallistusta. Karkeapaineen signaalit on ylipäästösuodatettu, jotta pystyttäisiin valvomaan nopeita paineen laskuja reaktoripaineastiassa [2].

2.2 Anturit

Olkiluodon laitosyksiköissä OL1 ja OL2 käytetään paineen ja paine-erojen mittaukseen Hartmann & Braunin toimittamia paine- ja paine-erolähtettämiä [2]. Lähettimet muuntavat impulssiputkien välittämät paineenmuutokset ensiksi anturielementin liikkeeksi, joka puolestaan muunnetaan induktiivisesti sähköiseksi signaaliksi [3]. Kyseisiä Olkiluodossa tällä hetkellä käytössä olevia paine- ja paine-erolähtetimille ei enää valmisteta [3].

Tutkimuksessa käsiteltävistä 32 anturista vain kuusi ei kuulu laitosyksiköiden alkuperäisiin antureihin. OL1 Karkeapinnan paine-erolähtettimet OL1-1 ja OL1-3 on uusittu vuonna 2002 ja lähetin OL1-4 vuonna 2013. OL2 antureista on puolestaan uusittu karkeapaineen lähetin OL2-3 vuonna 2002, hienopinnan lähetin OL2-4 vuonna 2001 ja karkeapinnan lähetin OL2-1 vuonna 2004 [3].

Alla on lueteltu tutkittavien anturien tuottamien vastesignaalien odotettavissa olevien mittausvirheiden suuruuden ylärajat [2]. Rajat kuvaavat odotettavissa olevan virheen ylärajaa 95% todennäköisyydellä tarkasteltaessa keskusvalvomossa sijaitsevalta osoitinkojeelta luettavaa signaalia. Tässä tutkimuksessa käytettävä mittausdata on peräisin kummankin laitosyksikön prosessitietojärjestelmistä, joten siihen voidaan soveltaa näitä samoja virherajoja. Rajat ovat:

- hienopinta - $0,10m$,
- karkeapinta - $0,13m$,
- hienopaine - $0,4bar$ ja
- karkeapaine - $1,6bar$.

Luku 3

Kirjallisuuskatsaus

Tässä luvussa perehdytään antureiden ikääntymistä ja vikaantumista käsittelevään tieteelliseen kirjallisuuteen. Kohdassa 3.1 käsitellään paine- ja paine-erolähettimien sekä paineenmittaussysteemin muiden osien kuten impulssi-putkien tekniikkaa ja ikääntymisen vaikutuksia niihin. Lisäksi käydään läpi yleisimpiä tapoja anturisytemien vikaantumiseen sekä millaisia havaittavia seurauksia vikaantumisella on niiden toimintaan ja vastesignaaleihin. Kohdassa 3.2 käsitellään menetelmiä anturien vikaantumisen arvioimiseen kohinamittausten avulla. Lopuksi, kohdassa 3.3 esitellään menetelmiä anturien vikaantumisen reaaliaikaiseen havaitsemiseen.

3.1 Paineanturien tekniikka

3.1.1 Anturien epätarkkuus

Mitatun signaalin kohinan voidaan katsoa koostuvan kahdesta osasta: itse mitattuun prosessiin liittyvästä satunnaisesta vaihtelusta sekä mittaukseen käytetyn laitteiston aiheuttamasta epävarmuudesta. Anturien ikääntymisen kannalta kiinnostavaa on nimenomaan tämä kohinan jälkimmäinen osa.

Anturien tuottaman signaalin kokonaisvirhe verrattuna ideaalisesti mitattuun arvoon juontuu monesta eri virhelähteestä. Jacob Fradenin kirjassa *Handbook of Modern Sensors* [4] listataan näitä virhelähteitä. Virheitä, jotka koskettavat kaikkia mittaustuloksia kutsutaan systemaattisiksi virheiksi. Näihin kuuluvat muun muassa anturin epätarkka siirtofunktio ja kalibraatiovirheet.

Fradenin mukaan perustavanlaatuisin virhe liittyy anturin siirtofunktioon, jolla mallinnetaan mitattavaa muuttujaa. Siirtofunktio tarkoittaa teoreettista matemaattista riippuvuutta mitatun suureen ja anturin vasteen välillä.

Käytännössä tämä riippuvuus on kuitenkin usein voimassa vain likimääräisesti ja vain rajatulla syöte- ja vasteskaalan alueella. Lineaaristen siirtofunktioiden yhteydessä puhutaan usein lineaarisuusvirheestä [4]. Yleinen lineaarisuusvirheen tyyppi on saturaatiovirhe, jota ilmenee siirtofunktion lineaarisen alueen ääripäissä [4]. Toinen käytännön siirtofunktioissa ilmenevä epätarkkuuden muoto on niin sanottu *kuollut kaista*, tietty alue syötevälillä, jolla anturin antama vaste ei muutu ollenkaan [4]. Usein kuolleella kaistalla anturin vastesignaali on nolla.

Kalibraatiovirheet johtuvat epätarkkuudesta anturin kalibrointimittauksissa [4]. Kalibrointivirhe ei ole välttämättä tasasuuri kaikissa mittausalueen kohdissa, vaan se voi vaihdella alueellisesti riippuen käytetystä kalibrointimenetelmästä ja yksittäisten kalibrointimittausten virheistä.

Satunnaisiin virhelähteisiin kuuluvat muun muassa hystereesivirheet ja toistettavuusvirheet [4]. Hystereesivirhe tarkoittaa poikkeamaa anturin vasteessa tietyllä syötteen arvolla, kun tätä syötearvoa lähestytään eri suunnista. Toistettavuusvirheiksi puolestaan kutsutaan mittauskertojen välistä vaihtelua mittaustuloksissa samoilla syötearvoilla.

Dynaamiset ajasta riippuvat virheet voivat johtua esimerkiksi viiveestä, jolla anturi kykenee reagoimaan nopeisiin syötesignaalin muutoksiin. Jos anturisysteemiin kuuluu useampia energiaa varastoivia osia, on kyse niin sanotusta korkeamman asteen dynaamisesta systeemistä, jossa voi ilmetä monimutkaisempia aikariippuvia virheitä, kuten oskillaatioita [4]. Energiaa varastoivia komponentteja ovat esimerkiksi paineanturin impulssiputkissa oleva neste, joka välittää paineenvaihtelut prosessista anturille, tai anturin sisäinen anturielementti [5].

Erityisenä epätarkkuuden muotona voidaan mainita myös rajallinen erottelukyky, jolla tarkoitetaan pienimpiä stimulaation muutoksia, joita kyseessä oleva anturi kykenee havaitsemaan [4]. Erottelukyvyn rajallisuus voi liittyä joko käytettyyn anturitekniikkaan ja materiaaleihin tai vaikkapa datan digitoinnissa käytettyyn näytetarkkuuteen.

Ympäristötekijät voivat vaikuttaa useiden yllä mainittujen virhelähteiden voimakkuuteen [4]. Paineantureihin vaikuttavia ympäristötekijöitä käsitellään kohdassa 3.1.2.

Ikääntymisen vaikutukset voidaan jakaa lyhyen ja pitkän aikavälin vaikutuksiin [4]. Näistä lyhyen aikavälin vaihtelua ja ajelehtimista mittaustuloksissa voidaan periaatteessa pitää hyvin pitkän aikavälin kohinana [4]. Pitkän aikavälin muutokset sen sijaan johtuvat peruuttamattomista muutoksista materiaalin fysikaalisissa ominaisuuksissa ja ovat siksi yksisuuntaisia [4]. Tällaisten muutosten havaitseminen on tämän työn ensisijaisia tavoitteita.

3.1.2 Paineanturien ikääntymiseen vaikuttavat tekijät

Antureiden ikääntyessä niiden toimintakyky heikkenee ja vikaantumiskasvat kasvavat. Ydinvoimalaitoksissa käytettävät paineanturit kestävät kuitenkin hyvin normaaleja käyttöolosuhteita [1]. Kuten luvussa 2 todetaan, tässä tutkimuksessa tutkittavista 32 paine- ja paine-erolähtimestä 26 on ollut käytössä laitosyksiköiden valmistumisesta asti. Ikääntymisprosessin nopeus riippuu suuresti määrin erilaisista ympäristöön ja antureiden käyttöön liittyvistä tekijöistä. Kuten tekniikalle ylipäätään on tyypillistä, myös ydinvoimaloissa käytettyjen paineantureiden vikaantuminen noudattaa ajan suhteen niin kutsuttua *kylpyammekäyrää* [6]: Vikoja esiintyy erityisen paljon vasta käyttöön otetuissa antureissa sekä antureissa, jotka ovat käyttöikänsä loppupäässä.

Nuclear Regulatory Commissionille (NRC, Yhdysvaltain ydinturvallisuusviranomaisen) tehdyssä tutkimuksessa, jossa tutkittiin ikääntymisen vaikutuksia ydinvoimaloissa käytettyihin paineantureihin [1, 7], on tunnistettu rasiustekijöitä, joilla on vaikutusta antureiden käyttöikänsä. Näihin kuuluvat lämpötila, paine, paineen vaihtelu, kosteus, värinä, säteily ja huoltotoimenpiteet.

Myös anturit prosessiin yhdistävissä impulssiputkissa voi esiintyä häiriötekijöitä, jotka heikentävät anturien toimintakykyä. Näihin kuuluvat aukkoisuus eli kaasukuplat putkissa, erilaiset tukkeumat, jäätyminen sekä vuodot [1, 7]. Vaikka kaikki näistä ongelmista eivät liity ikääntymiseen, ne vaikuttavat antureiden vikaantumisen havaitsemiseen ja niitä on siksi syytä käsitellä tässä yhteydessä.

NRC:n tutkimuksessa [1, 7] havaittiin lämpötilan olevan merkittävimpää rasiustekijöitä antureiden ikääntymiselle. Erityisen alttiita pitkäaikaiselle lämpörasitukselle olivat anturien elektroniset komponentit. Lisäksi muiden rasiustekijöiden kuten kosteuden ikäännyttävät vaikutukset pahenivat lämpötilan kasvaessa. Tyypillinen lämpötila ydinreaktorin suojarakennuksessa on noin 40 – 60 celsiusastetta. Tämä riittäisi jo merkittävästi lyhentämään antureiden käyttöikää. OL1:ssä ja OL2:ssa varsinaiset paineanturit sijaitsevat kuitenkin suojarakennuksen ulkopuolella [2] normaalin ilmastoinnin piirissä, mikä vähentää merkittävästi antureihin kohdistuvaa lämpörasitusta.

Painetta mittaaviin antureihin kohdistuu jatkuvasti pientä paineenvaihtelua, joka osaltaan aiheuttaa kulumista [1, 7]. Erityisesti toistuva jaksoittainen paineenvaihtelu rasittaa anturien mekaanisia komponentteja [1, 7]. Voimakkaat äkilliset paineen muutokset tai spesifikaatioista poikkeavat yli- tai alipaineet voivat vahingoittaa antureita. Tällaisia voi esiintyä poikkeustilanteiden kuten reaktorin pikasulun tai väärin toteutettujen huolto- ja kalibrointitoimenpiteiden yhteydessä [1, 7].

Kosteudelle paineanturit altistuvat niin mitattavan nesteen kuin ympäröivän ilman kosteudenkin kautta. Antureissa käytetyt elastomeeritiivisteet vuotavat aina jonkin verran ajan kuluessa [8]. Tutkittujen, ydinvoimaloissa käytettyjen paineantureiden sisältä on yleensä löytynyt pieniä määriä kosteutta [1]. Kosteusvauriot vaikuttavat erityisesti anturien elektroniikan toimintaan [1, 6].

Ionisoiva säteily vaikuttaa erityisesti antureiden elektroniikkaan ja orgaanisiin komponentteihin kuten tiivisteisiin. Aiempien tutkimusten perusteella reaktorin ulkopuolella sijaitseviin antureihin kohdistunut säteilykuorma ei ole ollut merkittävä tekijä näiden vikaantumisessa [1].

Huoltoseisokkien yhteydessä suoritettava testaus ja uudelleen kalibraatio ovat myös rasiustekijöitä antureille. Oikeinkin toteutetut määräaikaistestit kohdistavat antureihin voimakkaita paineenmuutoksia [1]. Myös potentiometrit, joita säätämällä antureita kalibroidaan, kuluvat hiljalleen käytössä [6, 7].

3.1.3 Paineanturien vikaantuminen

Kolme yleistä tapaa, joilla paineantureiden vikaantuminen havaitaan ovat kalibraation muutokset, vasteajan hidastuminen ja anturin toiminnan lakkaaminen. Riittävän suuri kalibraation tai vasteajan muutos ovat kumpikin riittäviä syitä anturin poistamiseen käytöstä. 90-luvun alkuun mennessä tyypillisin syy ydinvoimalan paineanturin uusimiselle oli kalibraation muuttuminen [1]. Kaksi kolmannesta havaituista vioista liittyi anturien elektroniikkaan ja noin kolmannes oli puolestaan mekaanisia ongelmia joko antureissa tai impulssiputkissa [1]. Liiketunnisteisten paineantureiden tyypillisiä vikoja, syitä ja vikojen ilmenemistapoja listataan taulukossa 3.1.

Anturien öljyvuodot ovat varsin tyypillinen ongelma ydinvoimaloiden paineantureissa [1, 7]. Öljyvuodon vaikutukset riippuvat pitkälti siitä, mikä on öljyn funktio anturissa. Mikäli öljyä käytetään varsinaisen painesignaalin välittämiseen, johtaa vuoto kalibraation menettämiseen ja anturin vasteajan pidentymiseen useamman kertaluokan verran ja lopulta anturin lopulliseen vikaantumiseen [1, 7]. Mikäli taas öljyn tehtävänä on toimia vaimentimena, joka suojaa anturia äkillisiltä paineenvaihteluilta sekä suodattaa signaalista pois korkeataajuuksista kohinaa, ovat vaikutukset varsin erilaiset. NRC:n tutkimuksessa havaittiin että vaimennusöljyn menetys ei aluksi juurikaan muuttanut useimpien tutkittujen antureiden kalibraatiota tai lineaarisuutta saati estänyt niiden toimintaa [1]. Sen sijaan tällaisten anturien vasteaika lyheni ja kohina lisääntyi öljymäärän vähentyessä [1]. Oletettavasti kuitenkin vaimennusöljyn puute johtaa ajan kuluessa anturin nopeampaan vikaantumiseen. OL1:ssä ja OL2:ssa käytettyjä paine- ja paine-erolähettämiä ei kyseisessä tutkimuksessa tutkittu, mutta koska niissäkin öljyn funktio on toimia

Vika	Mahdollisia syitä	Kalibraatio	Vasteaika	Anturin rikkoutuminen
Öljyvuoto anturissa	-valmistusvirheet -korkea paine	X	X	X
Anturinesteen vanhentuminen	-lämmön ja säteilyn aiheuttamat viskositeetin muutokset		X	
Kosteutta anturin elektroniikassa	-tiivisteiden haurastuminen lämmön ja säteilyn vuoksi	X		X
Nestevuoto impulssiputkista anturiin	-tiivisteiden pettäminen -valmistusvirheet -anturielementin murtuma	X	X	X
Anturielementin vioittuminen	-paineen vaihtelut -ylipaine -tärinä	X	X	
Elektronisten komponenttien arvojen muutokset	-lämpö -säteily -kosteus -jännitteen vaihtelut -huolto	X		
Anturielementin väsyminen	-mekaaninen väsyminen -paineen vaihtelut	X	X	
Anturin sisäiset tukokset	-normaali ikääntyminen -valmistusvirheet -huono käsittely		X	
Vaimennusvastusten säätöjen muutokset	-lämpö -säteily -tärinä		X	
Elektroniikan vikaantuminen	-normaali ikääntyminen			X

Taulukko 3.1: Esimerkkejä liiketunnisteisten paineantureiden vikaantumisen syistä ja ilmenemismuodoista [1]. Taulukon kolme viimeistä saraketta kertovat millä tavoin kyseinen vika tyypillisesti ilmenee.

vaimentimena, voidaan olettaa öljyvuodon vaikutuksien olevan saman suuntaisia.

Yleensä anturin elektroniikan eri syistä johtuva vioittuminen voidaan havaita anturin kalibraation ja lineaarisuuden muutoksina [1]. Ääritapauksissa elektroniikan sisään päässyt kosteus voi aiheuttaa oikosulun, joka estää anturin toiminnan kokonaan [1]. Oskillaatioita vaimentavien resistorien kalibraatiomuutokset voivat puolestaan näkyä mitatun vasteajan pitenemisenä tai lyhenemisenä [1]. Anturien sisäisten komponenttien toimintaa ja vikaantumista ei käsitellä tässä työssä yksityiskohtaisesti.

3.1.4 Impulssiputkien ongelmat

Impulssiputkien häiriöt voivat ilmetä niin anturin kalibraation muutoksina, vasteajan pitenemisenä kuin anturin täydellisenä toimimattomuutenaakin. Erityisen vaarallinen virhetilanne voi syntyä, mikäli tukkeutuneeseen tai jäätyneeseen impulssiputkeen yhdistetty anturi juuttuu osoittamaan jotakin normaalilta vaikuttavaa arvoa, jolloin sen vikaantumista ei välttämättä havaita [5–7, 9].

Impulssiputkien tukkeutuminen niiden ikääntyessä on tyypillinen ongelma ydinvoimaloissa. Tukokset voivat muodostua muun muassa putkiin kerääntyvästä lietteestä, boorista, magneetiitista tai muista aineista [1, 6, 7, 9]. Tyypillisesti tukokset muodostuvat putkissa mutkien tai venttiilien läheisyyteen. Tukoksia voidaan puhdistaa esimerkiksi painepuhalluksella tai typen avulla ja ääritilanteissa jopa aukiporaamalla [6]. Impulssiputkien tukkeutumista voidaan myös tehokkaasti vähentää täyssuolanpoistetun vesikemian avulla. Tämä lähestymistapa on käytössä esimerkiksi Olkiluodon ydinvoimaloissa [3]. Impulssiputkien vähäiset tukkeumat voivat aiheuttaa anturien vasteajan hidastumista. Riittävän suuriksi kerääntyneet tukokset voivat myös muuttaa anturin vasteen arvoa [1, 5]. Esimerkiksi paine-erolähettimen pluspuolen impulssiputken tukkeuma voi nostaa anturin vastetta suuremmaksi kuin mihin se on kalibroitu. Impulssiputkien ikääntymiseen liittyviin ongelmiin kuuluvat myös putkien vuodot, joita esiintyy erityisesti venttiileissä ja liitoksissa [1]. Myös vuodot voivat aiheuttaa sekä anturien vasteen että vasteajan muutoksia [1, 2, 5].

Toinen impulssiputkiin liittyvä ilmiö, joka voi merkittävästi vaikuttaa anturin toimintaan on aukkoisuus. Sinänsä kaasu impulssiputkissa ei itsessään välttämättä ole ongelma - OL1:n ja OL2:n paineanturit on kalibroitu toimimaan nimenomaan tilanteessa, jossa referenssiputkien yläpää on kaasufaasissa kun taas impulssiputkien alapäässä on nestettä normaalin ilmastoinnin lämpötilassa. Sen sijaan kaasu väärässä osassa impulssiputkia on häiriötilanne, joka voi muuttaa anturin vastetta [1, 5, 10], vasteen lineaarisuutta [5, 10]

ja hidastaa anturin vasteaikaa [1, 5]. Kohdassa 2.1 kuvatut impulssiputkien kallistukset ovat pääosin riittäneet estämään liiallisen aukkoisuuden OL1:n ja OL2:n paineanturien impulssiputkissa, käytännössä ongelmia on aiheutunut lähinnä huoltotoimenpiteiden yhteydessä putkiin mahdollisesti jääneistä kaasukuplista [2]. Kiehumusvesireaktoreiden referenssiputkissa esiintyy kuitenkin erityinen aukkoisuuteen liittyvä ongelma [1]: Normaalissa käyttöpainessa valtaosa putkissa esiintyvistä kaasuista liukenee putkien nesteeseen. Kun paine laskee alle 32 baarin, nämä kaasut alkavat erottua nesteestä ja muodostavat aukkoisuutta, mikä voi aiheuttaa ongelmia pinnanmittauksen tarkkuudelle laitoksen alasajon aikana.

Ydinvoimalan paineanturien vasteen tehospektrissä voidaan tyypillisesti havaita useita kohinapiikkejä eri taajuuksilla. Osa on seurausta impulssiputkien resonanssitaajuuksiin liittyvästä *urkupilli*-ilmiöstä, jonka aiheuttamat resonanssit näkyvät OL1:n ja OL2:n anturien spektrissä taajuuksien $5\text{Hz} - 10\text{Hz}$ välisellä alueella [11] sekä näiden moninkertoina. Toisaalta osa näistä piikeistä voi liittyä esimerkiksi reaktorin säätöjärjestelmien tai komponenttien [9] ominaistajuuksiin, veden kiehumiseen reaktorissa tai vaikkapa sähköverkon kohinaan, joka vaikuttaa anturin sähkönsyöttöön [12]. Sekä tukokset, vuodot että aukkoisuus aiheuttavat muutoksia näissä kohinapiikeissä. Anturin tehospektriä tarkkailemalla on siis mahdollista löytää merkkejä impulssiputkien häiriöistä ja heikentyneestä kunnosta.

Tyypillisesti tukokset aiheuttavat spektrissä korkeiden taajuuksien vaimenemista, johon liittyy myös korkeiden taajuuksien resonanssiipiikkien häviäminen [1, 5, 12]. Resonanssiipiikit myös liikkuvat kohti matalampia taajuuksia [5, 12]. Anturin vasteaikaan liittyvä rajataajuus, joka selitetään kohdassa 3.2.1, siirtyy myös kohti matalampia taajuuksia [1, 5, 12]. Impulssiputkien vuotoihin liittyy sekä spektrin yleinen vaimeneminen kaikilla taajuuksilla että resonanssiipiikkien madaltuminen [5]. Aukkoisuus puolestaan ilmenee spektrissä sekä resonanssiipiikkien että vasteaikaan liittyvän rajataajuuden liikkumisena kohti matalampia taajuuksia [1, 5, 10]. Lisäksi osa resonanssiipiikeistä voi vahvistua ja erityisesti korkeamman taajuuden resonanssit voivat vaimentua [1, 5, 10].

Impulssiputkiin liittyen on vielä syytä mainita eräs poikkeuksellinen ilmiö, jota esiintyy, kun kaksi anturia jakavat saman impulssiputken [1]. Tällaisessa tilanteessa on mahdollista, että molempien anturien vasteaika määrytyy antureista joustavamman - eli usein hitaamman - mukaan. Ilmiö on havaittavissa myös anturien signaalien spektreissä, joista vähemmän joustavan anturin spektri alkaa muistuttaa joustavamman spektriä [1]. Olkiluodon kiehumusvesireaktoreilla jaettuina impulssiputkia on muun muassa pinnanmittauksen antureilla. Kunkin osajärjestelmän hieno- ja karkeapinnan paine-

erolähettimet jakavat osittain pluspuolen impulssiputkensa, jotka molemmat haarautuvat samasta referenssiputkesta, kuten kohdassa 2.1 on kuvattu.

3.2 Kohinamittaukset ja vikaantumisen ennustaminen

Suuri osa tunnetuista menetelmistä, joilla voidaan tutkia paineanturien kuntoa niiden signaalin kohinan perusteella, keskittyy mittaamaan anturin vasteaikaa. Näitä menetelmiä käsitellään kohdassa 3.2.1. Muita menetelmiä vikaantuneiden antureiden tai impulssiputkien tunnistamiseksi käsitellään kohdassa 3.2.2.

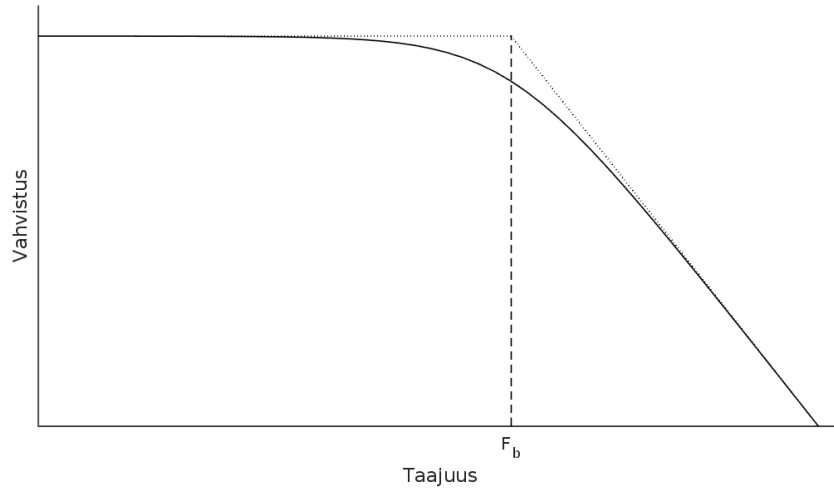
3.2.1 Anturin vasteajan arvioiminen kohinamittauksen avulla

Irti kytkettyjen paineantureiden vasteaikaa on perinteisesti mitattu kolmen eri suureen avulla. Ensimmäinen näistä on niin sanottu aikavakio, joka voidaan määrittää antamalla anturille syötteenä askelfunktio ja mittaamalla aika, joka anturin vasteelta kuluu saavuttaa 63,2% voimakkuus lopullisesta arvostaan [7]. Toista menetelmää vasteajan mittaamiseksi kutsutaan *ramp-pitestiksi* [7]. Siinä sekä testattavalle anturille että nopealle verrokkianturille annetaan syötteenä lineaarisesti kasvava tai vähenevä *ramppifunktio* (*ramp function*) ja mitataan näiden antureiden vasteiden aikaero lineaarisen kasvun aikana.

Kolmas menetelmä on nimeltään taajuustesti [7], jossa sekä testattavalle anturille että verrokkianturille annetaan syötteenä sinimuotoista painetta, jonka taajuus muuttuu, pyyhkäisten koko taajuusalueen yli. Antureiden vasteen tehospektrien avulla voidaan piirtää Bode-diagrammi systeemin itseisarvovasteesta. Yksinkertaistaen voidaan anturin toimintaa approksimoida ensimmäisen asteen dynaamisella systeemillä, jolla on vain yksi energiaa varastoiva komponentti. Tällöin Bode-diagrammin itseisarvovaste on vakio aina tietylle rajataajuudelle asti, jonka jälkeen se laskee logaritmisesti korkeammilla taajuuksilla. Tämä rajataajuus vastaa pienintä mahdollista vasteaikaa, jolla systeemi kykenee reagoimaan muuttuvaan syötteeseen [7]. Esimerkki rajataajuuden määrittelemisestä lineaarisen ensimmäisen asteen systeemin itseisarvovasteen Bode-diagrammista on esitetty kuvassa 3.1.

Ideaalille ensimmäisen asteen systeemille näiden kolmen menetelmän tulokset ovat keskenään identtisiä [7]. Laboratoriokokeissa kaikki kolme me-

netelmää ovat antaneet samankaltaisia tuloksia paineantureiden vasteajalle [7].



Kuva 3.1: Esimerkki lineaarisen ensimmäisen asteen systeemin itseisarvovasteen Bode-diagrammista. Logaritmiset x- ja y-asteikot. Kuvassa esitetään myös vasteaikaa vastaava rajataajuus F_b sekä sen määrittelyminen visuaalisesti kahden sovitetun suoran leikkauspisteestä.

Menetelmä anturin vasteajan määrittämiseen sen kohinan perusteella on periaatteeltaan hyvin samankaltainen kuin taajuustesti. Yleensä voidaan olettaa anturin normaalin syötteen sisältämän satunnaisvaihtelun koostuvan tasaisesta normaalijakautuneesta valkoisesta kohinasta. Tällöin kun anturin vastetta tarkastellaan tarpeeksi pitkältä ajanjaksolta, voidaan anturin siirtofunktion itseisarvovastetta approksimoida vasteen tehospektrillä [7]. Aina tämä ei pidä paikkaansa, esimerkiksi reaktoripaineastian paineenmittauksen signaalissa on usein liian vähän kohinaa tämän menetelmän käyttöön [1].

Paineantureiden dynaamisia ominaisuuksia tutkittaessa tehospektri generoidaan yleensä signaalista joko Fourier-muunnoksen tai autoregressiivisen aikasarja-analyysin avulla [6, 13]. Jälkimmäisen menetelmän ongelmana on, ettei signaaliin sisältyvää hidasta prosessikohinaa voida suodattaa pois [6]. Taajuustestin tapaan anturin vasteaikaa voidaan arvioida sovittamalla tehospektriin jokin matemaattinen malli, jonka ominaisuuksista vasteajalle voidaan laskea arvio. Yksinkertaisimmillaan tämä malli voi olla samanlainen ensimmäisen asteen malli kuin taajuustestissäkin [7]. Eri anturityypeille ja niihin liittyville impulssiputkille on kuitenkin kehitetty myös tarkempia korkeamman asteen malleja. Näillä voidaan pelkän vasteajan lisäksi tutkia

anturisysteemin muita dynaamisia ominaisuuksia [5, 10, 12, 14]. Vasteaikaa voidaan arvioida spektristä myös neuroverkkojen avulla [15].

3.2.2 Vikaantumisen merkkien havaitseminen kohinaspektristä

Tyypillisesti yllä kuvattujen antureiden kohinaspektreihin sovitettujen mallien perusteella voidaan havaita erityisesti antureiden impulssiputkiin liittyviä poikkeustilanteita, kuten alkavia tukoksia [5, 12], aukkoisuutta [5, 10] ja vuotoja [5]. Kohina-analyysimenetelmän ongelmana on, että signaalien spektrit sisältävät runsaasti häiriöitä, kuten on kuvattu kohdassa 3.1.4. Lisäksi eri paineanturityyppien tehospektrit poikkeavat merkittävästi toisistaan [9]. Samoin kahden samantyyppisen anturin spektrit voivat poiketa toisistaan huomattavastikin riippuen siitä, millaista prosessia ja suuretta niillä mitataan. Mallien sovittaminen spektriin ei ole suoraviivaista ja mallien antamien tulosten analysointi vaatii tulkintaa sekä tietoa anturien ja impulssiputkien rakenteesta [10].

Mikäli halutaan etsiä anturin kohinaspektristä merkkejä varsinaisen anturin sisäisen rakenteen vikaantumisesta, olisi jokaista anturityyppiä ja mahdollisesti myös anturien eri sijoituskohteita tarkasteltava erikseen. Rosemountin valmistamien paineanturien signaalien tehospektrien avulla on pyritty erottamaan eri tavoilla vikaantuneita ja ehjiä antureita toisistaan [16]. Spektrimalli on generoitu anturin aikasarjadatasta autokovarianssifunktion avulla. Spektrin Rosemount-anturille tyypillisiä piirteitä on käytetty tunnuslukuina, joiden avulla vikaantuneiden ja ehjien antureiden signaaleja on eroteltu toisistaan. Näitä piirteitä ovat vasteajan rajataajuuteen liittyvän spektrihuipun sijainti, huipun leveys tietyllä korkeudella, taajuus jolla signaali on vaimentunut $3dB$ ja pudotuksen jyrkkyys tällä taajuudella. Eri virhetyyppien tunnistamiseen tarvitaan eri tunnuslukuja [16]. Rosemount-paineantureille tyypillinen öljyvuoto-ongelma on myös pystytty tunnistamaan pelkästään anturin signaalin jakauman tilastollisten tunnuslukujen, kuten varianssin, vinouden ja jakauman neljännen momentin perusteella [1].

3.3 Anturien vikaantumisen reaaliaikainen havaitseminen

Tässä luvussa käsitellään ydinvoimatutkimuksen piirissä sovellettuja menetelmiä anturien vikaantumisen reaaliaikaiseen havaitsemiseen. Yksinkertaisin lähestymistapa anturien erilaisten vikatilanteiden reaaliaikaiseen havaitsemi-

seen on käyttää useampaa rinnakkaista anturia, jolloin yksittäisen anturin vikaantuminen voidaan havaita eroavista mittaustuloksista. Käytännössä kuitenkin jokaiselle ydinvoimalan usealle sadalle paineanturille voi olla vaikeaa toteuttaa tällaista fyysistä redundanssia.

Eräs hyvin laajasti tutkittu lähestymistapa anturien reaaliaikaisen vikaantumisen havaitsemiseen on niin sanotun analyttisen redundanssin hyödyntäminen. Tällä tarkoitetaan prosessiin liittyvien eri suureiden keskinäisiä riippuvuuksia [17]. Nämä riippuvuudet voivat olla staattisia tai dynaamisia [17]. Esimerkiksi kiehutusvesireaktorin höyryn ulostulovirtauksen volyyminla on tietyllä viiveellä vahva korrelaatio laitoksen sähköntuottoon. Näin ollen anturin vikaantumiseen liittyvät poikkeamat mittaustuloksissa voidaan havaita vertaamalla mittaustuloksia prosessin muiden suureiden muutoksiin. Analyttisen redundanssin hyödyntäminen edellyttää sopivaa matemaattista mallia mitatusta prosessista [17, 18]. Tämä voi perustua esimerkiksi mitatun prosessin riittävän tarkkaan fysikaaliseen mallintamiseen. Toisaalta mitattujen suureiden keskinäiset riippuvuudet voidaan myös päätellä mittaustuloksista käyttäen koneoppimismenetelmiä, kuten neuroverkkoja [18], Bayes-verkkoja [19] tai tukivektorikoneita [20].

Haldenin tutkimusreaktorilla on tutkittu prosessisuureiden keskinäisten riippuvuuksien mallintamista keinotekoisilla neuroverkoilla (*artificial neural networks*) [18], joita opetetaan prosessidatan avulla. Menetelmässä jokaista laitoksen erillistä operatiivista tilaa vastaa oma neuroverkkonsa. Kunkin verkon tarkoitus on tuottaa estimaatti prosessin sen hetkisestä tilasta edeltävien havaintojen perusteella. Järjestelmä tunnistaa poikkeavat tilat vertaamalla kyseistä estimaattia havaittuihin arvoihin. Käytetyt neuroverkot ovat rakenteeltaan eteenpäin kytkettyjä monikerroksisia perseptroniverkkoja [21], jotka sisältävät kaksi piilokerrosta. Ne on opetettu vastavirta-algoritmilla [21] ja niiden aktivaatiofunktiona käytetään hyperbolista tangenttifunktiota [21].

Menetelmän etuihin kuuluu, ettei etukäteen määriteltyä matemaattista mallia tarvita [18]. Neuroverkot ovat myös implisiittisesti epälineaarisia ja kykenevät mallintamaan epälineaarisia ilmiöitä [18], joiden mallintaminen on ollut perinteisesti ongelmallista lineaarisilla etukäteen määritellyillä malleilla [17]. Lisäksi neuroverkot ovat vähemmän herkkiä kohinalle kuin analyttiset mallit [18]. Neuroverkoilla on kuitenkin ongelmia useamman yhtäaikaisen virheen havaitsemisessa ja yleisen kaikkia mahdollisia erikoistilanteita käsittelevän neuroverkon opettaminen vaatii epäkäytännöllisen suuren määrän opetusdataa [18].

Argonne National Laboratory -tutkimuskeskuksessa on kehitetty anturivirheiden reaaliaikaiseen havaitsemiseen Multivariate State Estimation Technique -menetelmää [20]. Menetelmässä havaitaan anturivirheitä vertaamalla prosessin eri komponenteille estimoituja arvoja todellisiin havaintoihin käyt-

täen Sequential Probability Ratio Test -algoritmia [22], jolla voidaan tunnistaa mahdolliset virhetilanteet halutulla todennäköisyydellä.

Laguna Verden ydinvoimalassa on puolestaan tutkittu laitoksen tilan reaaliaikaista seurantaan kohinan mittauksiin perustuvalla järjestelmällä [23]. Menetelmässä signaalin tehospektristä poimitaan arvoja eri taajuuksilta ja näitä arvoja verrataan järjestelmään tallennettuihin referenssihahmoihin. Mikäli uusi havainto on samankaltainen jonkun referenssin kanssa, se muuttaa ja vahvistaa tätä. Järjestelmään tallennetut referenssihahmot siis muuttuvat ajan kuluessa. Kaikista referenssihahmoista poikkeavat havainnot indikoivat jonkinlaista poikkeustilannetta seuratussa järjestelmässä. Menetelmä on laskennallisesti kevyt ja sen avulla on historiallisesta datasta vuosien 2001–2004 ajalta kyetty tunnistamaan kaksi suihkupumpun suuttimen osittaista tukeumaa, datantallennuskortin vikaantuminen sekä virtausanturin virheellinen kalibraatio.

Kaiken kaikkiaan anturien vikaantumista havaitsevia menetelmiä on tutkittu paineanturien lisäksi muunkin tyyppisten anturien, kuten neutronitunnistimien ja lämpötila-anturien, vikaantumisen reaaliaikaiseen havaitsemiseen ja ennakoimiseen [9]. Onkin esitetty erityyppisten anturien ja niiden vikaantumista eri tavoin tunnistavien järjestelmien yhdistämistä automatisoiduksi koko laitoksen tilaa valvovaksi ja ongelmia ennakoivaksi järjestelmäksi [9].

Luku 4

Tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa käydään läpi työssä käytettävät tutkimusmenetelmät. Tarkoituksena on etsiä tutkimusdatasta merkkejä antureiden ikääntymisestä ja mahdollisesta vikaantumisesta sekä validoida menetelmiä tällaisten merkkien havaitsemiseen. Pääpaino on signaalien kohinan analyysissä taajuusavaruudessa spektriä tutkimalla.

Käytettävissä oleva mittausdata rajoittuu laitosyksiköiden OL1 ja OL2 yhden käyttöjakson ajalle, eikä yksikään tutkittavista antureista ole tietävästi vikaantunut tänä aikana. Näin ollen ohjatut koneoppimismenetelmät, kuten luokittelu ehjien ja vikaantuneiden antureiden välillä, eivät tule kysymykseen. Antureiden luokittelu iän perusteella ei myöskään ole mahdollista, sillä uusitut anturit eivät ole samaa mallia alkuperäisten kanssa [3] ja, kuten luvussa 2 mainitaan, ylipäätään valtaosaa kummankaan laitosyksikön antureista ei ole vielä koskaan uusittu.

Käytettävät menetelmät keskittyvät luvussa 3 esitettyjen anturien ja impulssiputkien vikaantumiseen liittyvien indikaattoreiden, kuten vasteajan ja resonanssipeikkien muutosten havaitsemiseen spektristä sekä näiden piirteiden tutkimiseen ohjaamattoman koneoppimisen menetelmän, pääkomponenttianalyysin [21], avulla. Lisäksi tässä luvussa käsitellään myös anturien kalibraation muutosten tutkimista.

Lopuksi esitellään kaksi tutkimusalueen kannalta kiinnostavaa menetelmää, joita ei sovelleta tässä työssä: lineaarinen diskriminanttianalyysi [24] sekä riippumattomien komponenttien analyysi [25]. Näistä ensimmäinen on ohjatun oppimisen menetelmä, joka soveltuisi spektrien analysoimiseen käytettäessä pidemmältä aikaväliltä kerättyä dataa, jossa olisi mukana näyttettä todennetusti vikaantuneista antureista. Jälkimmäinen puolestaan on pääkomponenttianalyysin kaltainen ohjaamattoman oppimisen menetelmä, joka voisi hyödyntää suurempaa määrää informaatiota tutkittavasta datasta.

4.1 Tehokertymäspektri

Tehokertymäspektrillä tai tehospektrillä tarkoitetaan signaalin $X[n]$ autokorrelaatiofunktion $\phi_{XX}[l]$ diskreettiä Fourier-muunnosta [26]

$$\Phi_{XX}(e^{j\omega}) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \phi_{XX}[l]e^{-j\omega l}, \text{ missä } |\omega| < \pi \quad (4.1)$$

Sen avulla voidaan tutkia, kuinka paljon tehoa signaalissa esiintyy eri taajuuksilla. Tässä työssä anturien kohinaa tutkitaan visuaalisesti tehospektrien avulla. Visuaalisella tarkastelulla pyritään erityisesti löytämään spektristä viitteitä vasteajan muutoksista sekä häiriöistä impulssiputkissa, joita on kuvattu kohdassa 3.1.4. Lisäksi kiinnitetään huomiota muihin mahdollisesti löytyviin poikkeamiin. Spektrejä vertaillaan niin saman laitosyksikön rinnakkaisten anturien, eri laitosyksiköiden toisiaan vastaavien anturien kuin myös samojen anturien eri aikoina otettujen näytteidenkin välillä.

Yllä mainittuja piirteitä, joihin kiinnitetään tarkempaa huomiota, ovat tehospektreissä esiintyvien resonanssipiikkien sijainti, korkeus ja muoto. Eriytyisesti keskitytään ensimmäisten, matalimpien taajuuksien, resonanssipiikkien ominaisuuksiin. Lisäksi kohinan suhteelliset osuudet eri taajuuksilla ja kohinan yleinen vaimeneminen siirryttäessä kohti korkeampia taajuuksia ovat kiinnostavia. Eriytyisesti pyritään havaitsemaan, esiintyykö spektreissä $3Hz$ alueella äkkinäistä kulmamaista pudotusta, joka voisi viitata anturin ennakoituun nopeimpaan vasteaikaan [11] liittyvään rajataajuuteen.

4.2 Pääkomponenttianalyysi

Pääkomponenttianalyysi (*Principal Component Analysis*, PCA) [21, 24], on datajoukon lineaarinen koordinaatiston vaihto. Sen tarkoituksena on valita uudet ortogonaaliset koordinaattiakselit siten, että ensimmäinen koordinaattiakseli on tutkitun datajoukon suurimman varianssin suuntainen. Seuraavat akselit ovat kukin vuorollaan suurimman jäljellä olevan varianssin suuntaisia, kun aiempien valittujen akselien suuntaisia datajoukon komponentteja ei huomioida. Pääkomponenttianalyysin muunnosmatriisi \mathbf{W} voidaan laskea origoon keskitetyn datamatriisin kovarianssimatriisin $\mathbf{\Sigma}$ avulla [21, 24]

$$\mathbf{\Sigma}\mathbf{W} = \mathbf{\Lambda}\mathbf{W} \quad (4.2)$$

Missä $\mathbf{\Lambda}$ on diagonaalimatriisi, jonka diagonaalialkiot ovat kovarianssimatriisin ominaisarvot λ_i järjestettynä suurimmasta ominaisarvosta pienimpään.

Muunnosmatriisin sarakkeet \mathbf{w}_i ovat siis kovarianssimatriisin ominaisvektoreita. Varsinainen koordinaatiston muunnos alkuperäisen koordinaatiston pisteestä \mathbf{x} pääkomponenttiavaruuden pisteeseen \mathbf{z} on

$$\mathbf{z} = \mathbf{W}^T \mathbf{x} \quad (4.3)$$

Pääkomponenttianalyysin avulla voidaan madaltaa tutkitun datajoukon ulottuvuuksien lukumäärää säilyttäen samalla mahdollisimman paljon datan informaation sisällöstä. Korkeaulotteisen datan analysointi on käytännössä mahdotonta tyypillisillä laskennallisilla menetelmillä [21, 24]. Ongelma tunnetaan nimellä dimensionaalisuuden kirous (*the curse of dimensionality*) [27] ja siihen liittyvät haasteet ovat sekä teoreettisia että laskennallisia [21, 24]. Usein on kuitenkin tyypillistä, että muutama ensimmäinen pääkomponentti sisältää valtaosan tutkittavan datan varianssista. Näitä valittuja komponentteja analysoimalla voidaan tällöin tehdä approksimaatioita koko datan luonteesta.

Tässä työssä anturien kohinan tehospektrejä tarkastellaan pääkomponenttianalyysin avulla. Tarkoituksena on muodostaa kunkin anturin tehospektrille eräänlainen *sormenjälki* sen tärkeimmistä pääkomponenteista. Hypoteesina on, että normaaliolosuhteissa tämä sormenjälki pysyisi samanlaisena eri aikoina otetuissa näytteissä. Sormenjälkiä tutkimalla pyritään vertailemaan ja havainnollistamaan eri anturien spektrien samankaltaisuutta ja eroja sekä näiden muutoksia ajan kuluessa. Olkiluodon molempien yksiköiden antureita tarkastellaan samalla kertaa, sillä joitakin yksityiskohtia lukuun ottamatta laitosyksiköiden sisäinen rakenne sekä niissä käytetyt paine- ja paine-eroanturit ovat keskenään yhteneväisiä [2].

Lisäksi tarkastellaan erikseen eri taajuuksien kontribuutioita havaittuihin pääkomponentteihin. Tällä tavoin havaitaan, mitkä spektrin taajuudet sisältävät eniten vaihtelua eri anturien ja eri ajanhetkien välillä. Näitä eri antureiden spektreissä poikkeavia taajuuksia voidaan myös suoraan vertailla merkkeihin vasteajan muutoksista ja impulssiputkien ongelmista.

Pääkomponenttianalyysin käytössä merkittävänä ongelmana on datan sisältämä epäkiinnostava kohina. Eri spektrinäytteiden välillä on eroja, jotka liittyvät niin eri antureiden impulssiputkiston välisiin eroavaisuuksiin kuin myös prosessin dynaamiseen luonteeseen. Antureiden ikääntymiseen viittaavat erot pitäisi pystyä erottelemaan tämän muun vaihtelun seasta. Tässä nousee esille ymmärrys tutkittavasta prosessista ja esimerkiksi analysoitavan spektrialueen rajoittaminen epätoivottua kohinaa sisältävien taajuuksien karsimiseksi tulee kysymykseen.

Pääkomponenttianalyysin muihin rajoituksiin kuuluu muunnoksen lineaarisuus. Eri näytteiden väliset epälineaariset riippuvuudet jäävät muunnok-

sessä piiloon. Esimerkiksi kahden tehospektrin samankaltainen muoto tietyllä taajuusalueella ei välttämättä johda niiden samankaltaisuuteen pääkomponenttiavaruudessa, jos näiden spektrien voimakkuudet kyseisellä alueella eroavat toisistaan. Epälineaarinen menetelmä, kuten neuroverkko voisi kuitenkin tunnistaa tällaisen samankaltaisuuden. Lisäksi käsiteltäessä vain ensimmäisiä pääkomponentteja osa datajoukon varianssista jää luonnollisesti huomiotta.

4.3 Kalibraation muutosten havaitseminen

Kalibraation muutoksia tutkittaessa haasteena on erottaa toisistaan pitkän aikavälin hidas kohina sekä pysyvät yksisuuntaiset kalibraation muutokset, jotka indikoivat anturin rakenteen pysyvää fysikaalista muutosta, kuten kohdassa 3.1.1 on todettu. Muutoksia tulisi tutkia pitkällä aikavälillä useiden huoltoseisokkien välisten käyttöjaksojen ajalta, jotta nähtäisiin onko samoissa antureissa tapahtunut toistuvia samansuuntaisia kalibraation muutoksia. Kalibraation muutoksia voidaan tutkia myös hitaammasta datasta, sillä pitkän aikavälin keskiarvojen laskemiseen ei tarvita korkeaa näytteenottotaajuutta.

Tässä työssä käytössä oleva data rajoittuu yhden käyttöjakson ajalle. Tarkoituksena onkin lähinnä tutkia millaista vaihtelua eri anturityyppien kalibraatioissa esiintyy tänä aikana. Tätä tietoa voidaan käyttää hyödyksi suunniteltaessa pidemmän aikavälin tutkimuksen yksityiskohtia, kuten näytteenottoväliä tai näytteiden pituutta ja näytteenottotaajuutta.

4.4 Vasteajan muutosten havaitseminen ja matemaattisten mallien sovittaminen tehospektriin

Menetelmiä vasteajan muutosten havaitsemiseen laitoksen ollessa käytössä on kuvattu kohdassa 3.2.1. Tyypillisesti anturisignaalin joko mitattuun tai aikasarjasta generoituun tehospektriin sovitetaan matemaattinen malli, jonka parametreista anturin vasteaika voidaan arvioida. Vasteajan mittaamisen lisäksi mitatun signaalin spektriin sovitettavilla malleilla voidaan tutkia muun muassa anturin lineaarisuutta, sekä tunnistaa erilaisia anturisyysjärjestelmien vikaantumistyyppisiä, kuten impulssiputkien vuotoja ja tukkeutumista. Kuten kohdassa 3.2 todetaan, kirjallisuudessa on esitetty useita kompleksisuudeltaan vaihtelevia malleja anturien spektrien kuvaamiseksi. Yksinker-

taiset ensimmäisen asteen mallit soveltuvat lähinnä vasteajan mittaamiseen. Monimutkaisempien mallien avulla voidaan tunnistaa erilaisia anturisyys-
teemin vikaantumistyyppisiä, kuten impulssiputkien vuotoja ja tukkeutumista. Ongelmaksi tällaisessa lähestymistavassa nousee usein sopivan mallin löytäminen. Tähän ei ole olemassa mitään suoraviivaista menetelmää, vaan mallin valinta ja sovitukset kunkin anturin spektriin vaatii sekä asiantuntemusta anturin toiminnasta että kokeellista mittaamista pienimmän sovitustavheen löytämiseksi.

Anturien signaaleihin sovitettavilla matemaattisilla malleilla on siis kaksi pääasiallista sovelluskohdetta. Ensimmäinen osana automaattista järjestelmää, jolla voitaisiin tunnistaa anturin alkava vikaantuminen. Toiseksi vikaantuneen anturisyys-
teemin vian tyypin määrittämisessä. Ensimmäinen näistä tapauksista vaatisi pitkäjänteistä ja tarkkaa ennakkosuunnittelua, jossa malli pitäisi sovittaa erikseen jokaiseen seurattavaan anturiin. Toisaalta mikäli anturin vasteajassa tapahtuu merkittäviä muutoksia, voidaan nämä muutokset aiheuttaneet ilmiöt havaita kyseisen anturin spektristä myös muulla tavoin, esimerkiksi pääkomponenttiallyysin avulla muodostettujen spektrisormenjälkien muutoksina. Jälkimmäinen sovelluskohde ei ole Olkiluodon voimallaitoksessa kovin ajankohtainen, sillä esimerkiksi ongelmat impulssiputkien kanssa ovat hyvän vesikemian vuoksi olleet vuosien kuluessa hyvin harvinaisia. Tässä työssä ei sovelleta anturien vasteajan mittaamiseen liittyviä menetelmiä.

4.5 Lineaarinen diskriminanttiallyysi

Lineaarinen diskriminanttiallyysi (*Linear Discriminant Analysis*, LDA) [24] on ohjatun oppimisen menetelmä, joka muistuttaa pääkomponenttiallyyysiä. Pääkomponenttiallyysin tapaan kyseessä on lineaarinen koordinaatiston vaihto. Kuitenkin siinä missä pääkomponenttiallyysin tarkoituksena on valita uudet koordinaattiakselit siten, että näytteiden välinen vaihtelu maksimoituu, on LDA:n tarkoituksena maksimoida ennalta tunnettujen luokkien väliset erot samalla kun luokkien sisäinen vaihtelu minimoidaan [24].

Kuten pääkomponenttiallyysikin, myös LDA:n muunnosmatriisi voidaan laskea ominaisvektoreiden avulla [24]. Kun pääkomponenttiallyyysissä käytetään koko datajoukon kovarianssimatriisin ominaisvektoreita, LDA perustuu niin sanottujen hajontamatriisien käsitteeseen. Yksittäiseen pisteeseen liittyvä hajonta saadaan kertomalla kyseisen pisteen \mathbf{x} ja koko datajoukon keskiarvon \mathbf{m} välinen erotusvektori $\mathbf{x} - \mathbf{m}$ omalla transpoosillaan. Yhden luokan C_i sisäinen hajontamatriisi \mathbf{S}_i on luokan yksittäisten pisteiden hajontojen summa

$$\mathbf{S}_i = \sum_t (\mathbf{x}^t - \mathbf{m}_i)(\mathbf{x}^t - \mathbf{m}_i)^T \quad (4.4)$$

Missä $\mathbf{x}^t \in C_i$ ja \mathbf{m}_i on luokan C_i kaikkien pisteiden keskiarvo. Kaikkien luokkien yhteenlaskettu sisäisten hajontojen matriisi \mathbf{S}_W on puolestaan

$$\mathbf{S}_W = \sum_{i=1}^k \mathbf{S}_i \quad (4.5)$$

Missä k on luokkien lukumäärä. Vastaavasti luokkien välinen hajontamatriisi lasketaan kaavalla

$$\mathbf{S}_B = \sum_{i=1}^k N_i (\mathbf{m}_i - \mathbf{m})(\mathbf{m}_i - \mathbf{m})^T \quad (4.6)$$

Missä N_i on kuhunkin luokkaan C_i kuuluvien alkioiden lukumäärä. LDA:n muunnosmatriisi \mathbf{W} voidaan laskea matriisin $\mathbf{S}_W^{-1}\mathbf{S}_B$ ominaisvektoreiden ja ominaisarvojen avulla vastaavaan tapaan kuin pääkomponenttianalyysin muunnosmatriisi lauseessa 4.2

$$(\mathbf{S}_W^{-1}\mathbf{S}_B)\mathbf{W} = \mathbf{\Lambda}\mathbf{W} \quad (4.7)$$

Tässä $\mathbf{\Lambda}$ on diagonaalimatriisi, jonka diagonaalialkiot ovat matriisin $\mathbf{S}_W^{-1}\mathbf{S}_B$ ominaisarvot λ_i järjestettynä suurimmasta ominaisarvosta pienimpään ja muunnosmatriisin sarakkeet \mathbf{w}_i ovat matriisin $\mathbf{S}_W^{-1}\mathbf{S}_B$ ominaisvektoreita. Samoin varsinainen LDA-muunnos uuteen koordinaatistoon lasketaan muunnosmatriisin \mathbf{W} avulla kuten lauseessa 4.3.

Tehospektrejä analysoitaessa voidaan LDA:n avulla arvioida taajuuksia, joilla eri luokkien näytteet eroavat lineaarisesti eniten toisistaan. Nämä ovat ne taajuuskomponentit, jotka vaikuttavat eniten LDA:n muunnosmatriisiin. Lisäksi, mikäli tutkittavana olisi suuri lukumäärä näytteitä, LDA soveltuisi automaattisen luokittelun esiaskeleeksi. LDA-muunnoksen laskeminen on nopeaa ja sen tuottama data soveltuu hyvin luokkien välisten lineaaristen erojen havaitsemiseen.

LDA:n lähtöoletuksiin kuuluu, että analysoitavat luokat ovat normaali-jakautuneita ja että niillä on yhtä suuret kovarianssit [24]. Nämä oletukset eivät käytännössä suinkaan aina toteudu. LDA:n tuloksiin tulisikin suhtautua suuntaa antavina arvioina ja tulkita niitä kohdassa 3.1 esitettyjen tunnettujen vikaantumisen tunnusmerkkien valossa. Varsinkaan jälkimmäinen oletus ei useinkaan toteudu tutkittaessa vikaantuneiden ja ehjien anturien spektrinäytteitä, koska ehjiä näytteitä voidaan olettaa olevan paljon enemmän kuin

vikaantuneita. Tällaisessa tapauksessa luokkien lukumääriä tulisi tasata hylkäämällä satunnaisesti osa näytteistä, jotka kuuluvat suurempaan luokkaan ja toistamalla analyysiä useita kertoja.

Lisäksi LDA:ta koskevat yleisesti samat ongelmat kuin pääkomponenttianalyysiäkin liittyen muunnoksen lineaarisuuteen ja vähäisempiin suuntavektoreihin sisältyvän vaihtelun huomiotta jäämiseen. Jälkimmäinen näistä tuskin nousee ongelmaksi antureiden spektrejä analysoitaessa, sillä LDA-muunnos tuottaa aina vähemmän ulottuvuuksia kuin aineistossa on luokkia [24]. Kahden luokan LDA tuottaa yksiulotteisen avaruuden. Näin ollen mahdollisten suuntavektoreiden lukumäärä jää väistämättä pieneksi. Epälineaaraisesti erottuvien luokkien ongelmaan voitaisiin soveltaa vaikkapa neuroverkkoja [28] tai kohdassa 3.2 kuvattuja spektreihin sovitettavia matemaattisia malleja.

4.6 Riippumattomien komponenttien analyysi (ICA)

Riippumattomien komponenttien analyysiksi (*Independent Component Analysis*, ICA) [25] kutsutaan joukkoa menetelmiä, jotka pyrkivät erottamaan datasta tilastollisesti riippumattomia komponentteja. ICA:n perusoletuksia ovat, että eroteltavien komponenttien \mathbf{s} jakaumat poikkeavat normaalijakaumasta ja että toisistaan poikkeavia havaintoja \mathbf{x} , joista näitä komponentteja etsitään, on enemmän kuin yksi. ICA-menetelmät muodostavat itsenäisiä komponentteja havaintojen lineaarikombinaatioina siten, että näiden komponenttien jakaumat poikkeavat normaalijakaumasta mahdollisimman suuremäärin [25]. Eli tarkoituksena on etsiä mahdollisimman hyvää estimaattia muunnosmatriisille \mathbf{B} sitten, että komponenttien \mathbf{s} ero normaalijakaumaan maksimituu

$$\mathbf{s} = \mathbf{B}\mathbf{x} \quad (4.8)$$

ICA:ssa käytetään esikäsittelyaskeleena tutkittavan datan *valkoistamista*, jolla tarkoitetaan havaintojen keskinäisten korrelaatioiden poistamista [25]. Esimerkiksi kohdassa 4.2 kuvattu pääkomponenttianalyysi soveltuu tällaiseksi esikäsittelymenetelmäksi [25]. Merkitään valkoistettua datajoukkoa \mathbf{z} :lla, jolloin voidaan muotoilla etsittävä muunnos muotoon

$$\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{z} \quad (4.9)$$

Poikkeavuutta normaalijakaumasta voidaan mitata monella eri suureella [25]. Eräs tällainen suure on huipukkuus (*kurtosis*), joka voidaan laskea satunnaismuuttujan x toisen ja neljännen keskusmomentin avulla [25]

$$kurt(x) = E\{x^4\} - 3[E\{x^2\}]^2 \quad (4.10)$$

Käyttäen huipukkuutta mitattavana suureena voidaan yksittäistä riippumattonta komponenttia vastaava muunnosvektori \mathbf{w} laskea esimerkiksi gradientin suuntaan etenevällä iteratiivisella algoritmilla [25].

Iteraatioaskeleen ensimmäisessä vaiheessa, joka on esitetty lauseessa 4.11, lasketaan \mathbf{w} :n muutoksen $\Delta\mathbf{w}$:n suunta. Kyseisessä lauseessa *sign* tarkoittaa etumerkkiä palauttavaa funktiota. Iteraatioaskeleen toisessa vaiheessa, joka on esitetty lauseessa 4.12, puolestaan skaalataan \mathbf{w} :n uusi arvo yksikköympyrälle.

$$\Delta\mathbf{w} \propto \text{sign}(kurt(\mathbf{w}^T \mathbf{z}))E\{\mathbf{z}(\mathbf{w}^T \mathbf{z})^3\} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{w}/\|\mathbf{w}\| \quad (4.12)$$

Koska ICA hyödyntää suurempaa osaa datan sisältämästä informaatiosta kuin vaikkapa pääkomponenttianalyysi, saavutetaan sillä usein parempia tuloksia ohjaamattoman oppimisen ongelmassa, joissa esimerkiksi signaalien kohinasta pitää erottaa ennalta tuntemattomia osasignaaleja [25].

Anturien keskinäisten erojen määrittäminen ICA:n avulla on kuitenkin ongelmallista. ICA kykenee erottelemaan signaaleista vain korkeintaan yhtä monta itsenäistä komponenttia, kuin mikä on käytettävissä olevien toisistaan poikkeavien havaintosignaalien lukumäärä [25]. Neljän eri anturin tuotettiin neljään signaaliin sisältyy antureihin itseensä liittyvien neljän itsenäisen komponentin lisäksi tuntematon määrä itsenäisiä komponentteja alkuperäisestä prosessisignaalista. Tällaisessa kohinaa sisältävässä tapauksessa ICA-menetelmien avulla voidaan havaita voimakkaimmin erottuvat näistä itsenäisistä komponenteista [25]. Valitettavasti nämä parhaiten erottuvat komponentit liittyvät usein alkuperäiseen prosessiin, eivätkä itse antureihin [25].

Antureihin liittyvien itsenäisten komponenttien etsimisen sijaan ICA-menetelmiä voitaisiin käyttää signaalien esikäsittelyyn niin, että niiden avulla signaalista poistettaisiin prosessiin liittyviä komponentteja, jotka ovat kaikille antureille yhteisiä. Tällöin varsinaiset anturien väliset erot signaaleissa nousisivat paremmin esille. Tämän tutkimuksen yhteydessä on tutkittu FastICA-ohjelmiston [29] avulla ICA-menetelmien soveltamista erottamaan itsenäisiä

komponentteja paine- ja paine-eroantureiden signaaleista. Tulokset ovat epäkonsistentteja. Signaaleista löytyy eri tilanteissa yksi tai useampia komponentteja, jotka voidaan spektriensä perusteella liittää alkuperäiseen prosessiin. Toisaalta usein nämä samat komponentit sisältävät antureihin liittyviä piirteitä, kuten jostakin tietystä anturista peräisin olevia resonanssiipukkeja. Näiden ongelmien ratkaiseminen on edellytys ICA:n soveltamiseksi kuvatulla tavoin anturien vikaantumisen havaitsemiseen.

Luku 5

Toteutus

Tässä luvussa käydään läpi käytettävien tutkimusmenetelmien toteutuksen yksityiskohdat. Tutkimuksessa käsitellään erikseen jokaista tarkasteltavaa anturiyyppiä: hienopintaa, karkeapintaa, hienopainetta ja karkeapainetta. Käytettävän mittausdatan näytteenottotaajuus on 100Hz . Signaalit kerätään suoraan laitoksen prosessitietojärjestelmästä. Kyseessä on sama mittausdata, jota laitoksen valvomossa käytetään laitoksen tilan seuraamiseen.

Kaiken kaikkiaan tutkimuksessa käytetään anturien signaalidataa neljältä eri mittauskerralta: 13.5.2015, 26.5.2015, 11.11.2015 ja 29.2.2016. Kaksi ensimmäistä mittauskertaa sisältävät dataa vain laitosisyksiköltä OL1. 13.5. näytteet on otettu yksikön ylösajon aikaan. 26.5. näytteet puolestaan edustavat tasaista tehoajoa yksikön huoltoseisokkien välisen käyttöjakson alkuvaiheissa. Kaksi myöhempää mittauskertaa puolestaan sisältävät näytteitä molemmilta tutkituilta laitosisyksiköiltä ja ne edustavat tasaista tehoajoa käyttöjakson myöhäisemmissä vaiheissa.

Tätä tutkimusta varten on kehitetty Matlab-kielinen ohjelmisto, jonka avulla Olkiluodossa tuotetusta mittausdatasta voidaan muodostaa tehospektrejä ja tuottaa erilaisia visualisointeja. Lisäksi ohjelmistoa voidaan käyttää PCA- ja ICA-muunnosten laskemiseen tehospektreistä sekä datan esikäsittelyyn mahdollisia muita koneoppimismenetelmiä varten. Ohjelmisto on julkaistu [30] vapaan lähdekoodin ISC-lisenssillä [31].

5.1 Tehospektri

Tehospektrit lasketaan käyttäen P.D. Welchin esittelemää menetelmää [32]. Siinä tutkittava signaali on jaettu K erilliseksi L näytteen pituiseksi osasegmentiksi $X_k(j)$, $j = 0, 1, \dots, L - 1$, $k = 1, 2, \dots, K$. Osasegmentit suodatetaan sopivalla ikkunafunktiolla $W(j)$, $j = 0, 1, \dots, L - 1$, jotta signaalin rajalli-

sen pituuden aiheuttama taajuusvääristymä saadaan minimoitua. Jokaiselle segmentille lasketaan erillinen diskreetti Fourier-muunnos

$$a_k(n) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} X_k(j)W(j)e^{-2kijn/L} \quad (5.1)$$

Näistä muunnoksista puolestaan muodostetaan K periodogrammia

$$I_k(f_n) = \frac{L}{U} |a_k(n)|^2, \text{ missä } k = 1, 2, \dots, K \quad (5.2)$$

Missä $f_n = n/L, n = 0, 1, \dots, L/2$ ovat spektrin taajuudet suhteessa näytteenottotaajuuteen ja

$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} W^2(j) \quad (5.3)$$

Tehospektrin estimaatti muodostetaan näiden erillisten periodogrammien keskiarvona

$$\hat{P}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k(f_n) \quad (5.4)$$

Welchin menetelmän toteutuksena käytetään Matlabin Signal Processing Toolboxin *pwelch*-funktiota [33]. Yhden osasegmentin pituutena L on 2048 näytettä ja rinnakkaisten osasegmenttien välillä on päällekkäisyyttä 1945 näytteen verran. Ikkunafunktiona käytetään Matlabin toteutusta neljän termin Blackman-Harris -ikkunasta [33]. Blackman-Harris -ikkuna perustuu useiden kosinifunktioiden summalle ja sen Fourier-muunnos on puolestaan usean kardinaalisen sinifunktion summa, jossa muunnoksen sivuhuippujen korkeus on minimoitu [34]. Sivuhuippujen suhteellista osuutta pienentämällä saadaan vähennettyä ikkunafunktion aiheuttamaa taajuusvuotoa, jossa signaali heijastuu läheisille taajuuksille [26]. Käytetyn ikkunafunktion ensimmäisen sivuhuipun voimakkuuden ero suhteessa päähuipun voimakkuuteen on yli $90dB$.

5.2 Pääkomponenttianalyysi

Pääkomponenttianalyysi toteutetaan Matlab -ohjelmiston Statistics and Machine Learning Toolbox -paketista löytyvällä *pca* -funktiolla [33]. Eri taajuuksien kontribuutio lopullisiin pääkomponentteihin lasketaan *pca*-funktion tuottaman kerroinmatriisin kyseistä taajuutta vastaavan kertoimen itseisarvona.

Kunkin anturin tehospektriä yhdeltä mittauskerralta tarkastellaan erillisenä näytteenä. Koko näyteavaruus koostuu siis kummankin laitosesikön kaikkien rinnakkaisten antureiden kaikista tutkittavista näytteistä. Tarkastelussa on käytetty kaikkia tasaisen tehoajon mittauksia: 26.5, 11.11 sekä 29.2. Jokaisesta OL1:n anturista on siis kolme näytettä ja OL2:n antureista kaksi näytettä, pois lukien OL2-4 osajärjestelmän kaikki anturit, joiden tulokset puuttuvat 11.11. näytteestä tiedonsiirto-ongelmien vuoksi.

Kaiken kaikkiaan mukana on siis yhteensä 19 erillistä tehospektriä. Kustakin tehospektristä poimitaan logaritmisella asteikolla tasavälein 200 taajuutta. Koska käytetyn tehospektrin resoluutio ei kuitenkaan ole riittävä matalammilla taajuuksilla, saadaan poiminnassa 130 uniikkia taajuutta. Pääkomponenttianalyysin syötteenä on siis 19×130 -ulotteinen matriisi. Koska lähtödatassa on varsin rajallinen määrä näytteitä ja sen informaation sisältö on siksi rajoittunut, rajoitetaan tarkastelua vastaavasti vain kahteen ensimmäiseen pääkomponenttiin.

Ennen tehospektrien muodostamista kaikkien lähtösignaalien varianssi skaalataan vakioarvoon. Lisäksi spektreistä leikataan pois alle $0,5Hz$ taajuudet, jotka koostuvat lähinnä prosessin säätöjärjestelmän aiheuttamasta vaihtelusta. Myös yli $45Hz$ taajuudet poistetaan, jotta välttyttäisiin sähköverkon kohinan aiheuttamasta häiriöstä lähellä $50Hz$ taajuutta.

5.3 Kalibraation muutosten havaitseminen

Antureiden kalibraatiota tutkitaan kaikilta neljältä käytettävissä olevalta mittauskerralta. OL2:lta ei ole käytettävissä mittausdataa tarpeeksi monelta mittauskerralta, jotta kalibraation muuttumista ajan kuluessa pystyttäisiin uskottavasti tutkimaan, joten tutkimus on rajattu OL1:n antureihin. Kalibraatiota arvioidaan laskemalla kunkin anturin koko näytteen keskiarvo ja tarkastelemalla sen erotusta kaikkien kyseisen tyyppin antureiden keskiarvoon kyseiseltä mittauskerralta.

Luku 6

Tulokset

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tulokset. Kohdassa 6.1 analysoidaan anturien tehospektrejä ja niistä muodostettuja pääkomponentteja. Kohdassa 6.2 puolestaan käydään läpi anturien kalibraation muutokset tutkimuksen aikana.

6.1 Pääkomponenttianalyysi ja tehospektrit

6.1.1 Hienopinta-anturit

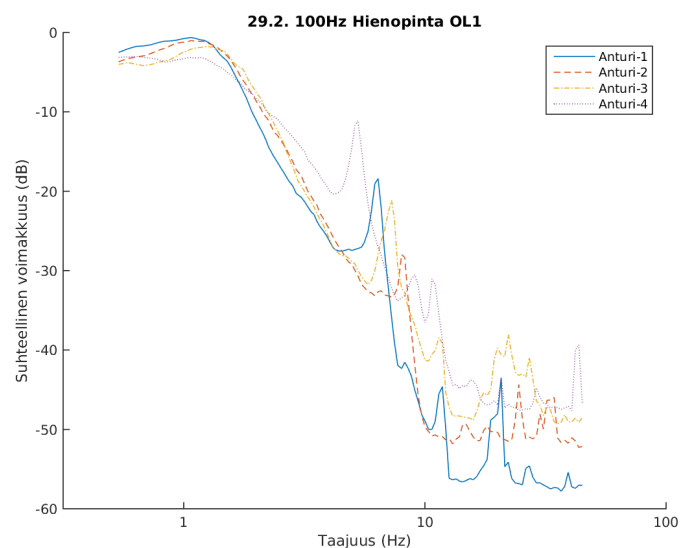
Hienopinta-anturien tehospektreistä on esimerkki laitosyksiköltä OL1 kuvassa 6.1 ja laitosyksiköltä OL2 kuvassa 6.2. Molemmat näytteet on mitattu 29.2.2016. Hienopinta-anturien pääkomponenttianalyysin kaksi ensimmäistä pääkomponenttia on visualisoitu kuvassa 6.3 ja spektrin eri taajuuksien kontribuutiot näihin kahteen pääkomponenttiin kuvassa 6.4.

Pääkomponenttiavaruudessa kunkin anturin eri mittauskertojen tehospektrit ovat keskenään suhteellisen samanlaisia. Kuitenkin anturilla OL2-1 on jonkin verran suurempaa vaihtelua eri näytteiden välillä. Lisäksi kummankin laitosyksikön toisiaan vastaavat anturit ovat spektreillään pääosin samanlaisia. Hienopinta-anturien suhteen hypoteesit saman anturin eri näytteiden spektrien samankaltaisuudesta sekä eri laitosyksiköiden toisiaan vastaavien antureiden spektrien samankaltaisuudesta näyttäisivät pääosin pitävän paikkansa. Eri antureiden spektrit ovat kuitenkin osittain limittäisiä keskenään, joten eri hienopinta-antureita ei pysty pelkästään spektrin perusteella erottamaan toisistaan.

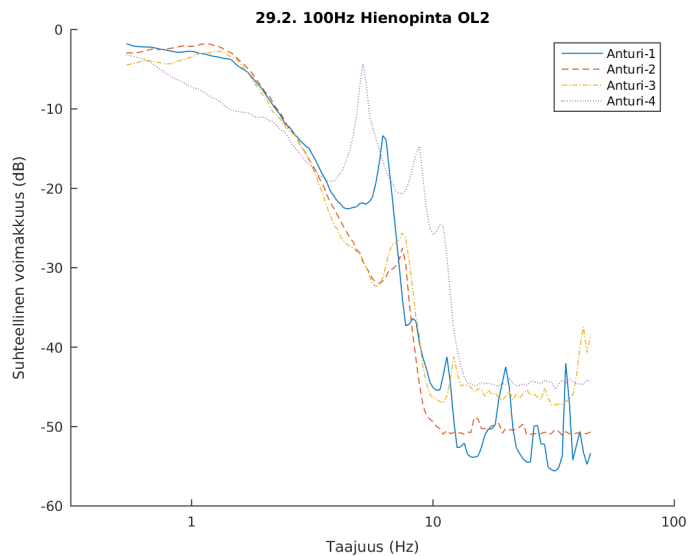
Erityisesti hienopinnan pääkomponenttianalyysissä erottuu anturin OL2-4 ainoa näyte. Se poikkeaa kaikista muista näytteistä molempien ensimmäisten pääkomponenttien osalta. Tarkasteltaessa eri taajuuksien kontribuutioi-

ta havaitaan, että merkittävimmät erot liittyvät tehospektrin 1Hz alueella olevaan kumpuun, joka on kyseisen anturin spektrissä muita matalampi ja loivempi, sekä impulssiputkiin liittyviin resonanssiipiikkeihin $5\text{Hz}–10\text{Hz}$ taajuusalueella, jotka ovat kyseisen anturin spektrissä korostuneen voimakkaita. Tämän lisäksi kyseisen anturin spektriä tarkasteltaessa havaitaan, että korkeamman taajuuden resonanssiipiikit puuttuvat siitä käytännössä kokonaan, mikä ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi sen kahteen ensimmäiseen pääkomponenttiin.

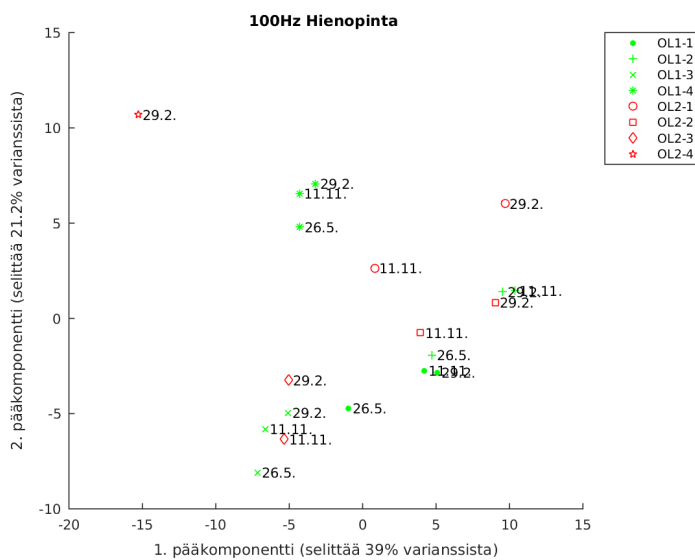
Kyseinen anturi on ainoa tutkituista hienopintaa mittaavista paine-erolähtetimestä, joka ei kuulu kummankaan laitosesyksikön alkuperäisiin lähettämiin. Se on uusittu 10.5.2001. Se ei myöskään ole täsmälleen samaa mallia kuin muut seitsemän hienopinnan paine-erolähetintä.



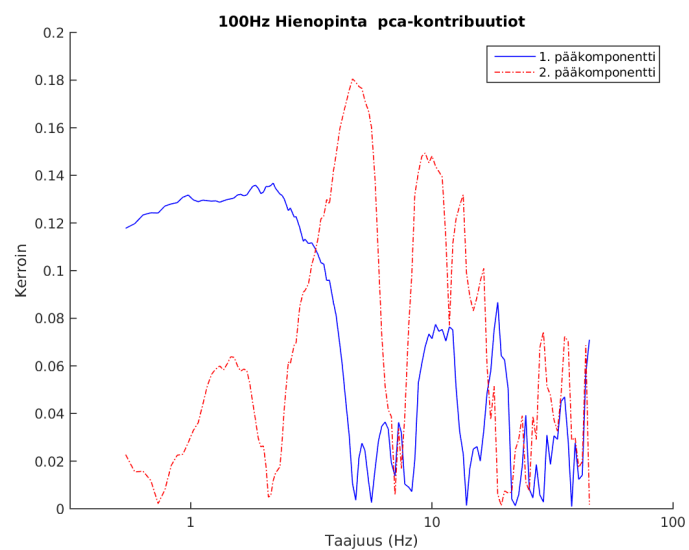
Kuva 6.1: Olkiluoto 1:n hienopinta-anturien tehospektrit 29.2.2016



Kuva 6.2: Olkiluoto 2:n hienopinta-anturien tehospektrit 29.2.2016



Kuva 6.3: Hienopinta-anturien tehospektrien kaksi ensimmäistä pääkomponenttia muodostettuna 26.5.2015, 11.11.2015 ja 29.2.2016 näytteistä



Kuva 6.4: Hienopinta-anturien tehospektrien taajuuskontribuutiot kahteen ensimmäiseen pääkomponenttiin

6.1.2 Karkeapinta-anturit

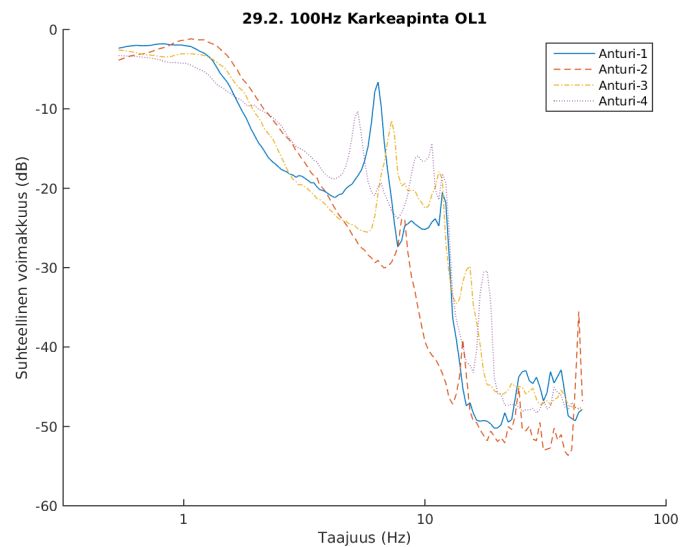
Karkeapinta-anturien tehospektreistä on esimerkki OL1:lta kuvassa 6.5 ja OL2:lta kuvassa 6.6. Molemmat näytteet on mitattu 29.2.2016. Karkeapinta-anturien pääkomponenttianalyysin kaksi ensimmäistä pääkomponenttia on visualisoitu kuvassa 6.7 ja spektrin eri taajuuksien kontribuutiot näihin pääkomponentteihin kuvassa 6.8.

Karkeapinta-antureiden pääkomponenttianalyysissä samojen anturien eri näyttekertojen spektrit ovat pääosin klusteroituneet yhteen. Lisäksi vastaavien anturien spektrit eri reaktoreilta sijaitsevat pääosin lähellä toisiaan. Kuitenkin myös karkeapinta-antureissa on eri antureiden spektrien kesken havaittavissa jonkinasteista limittyneisyyttä.

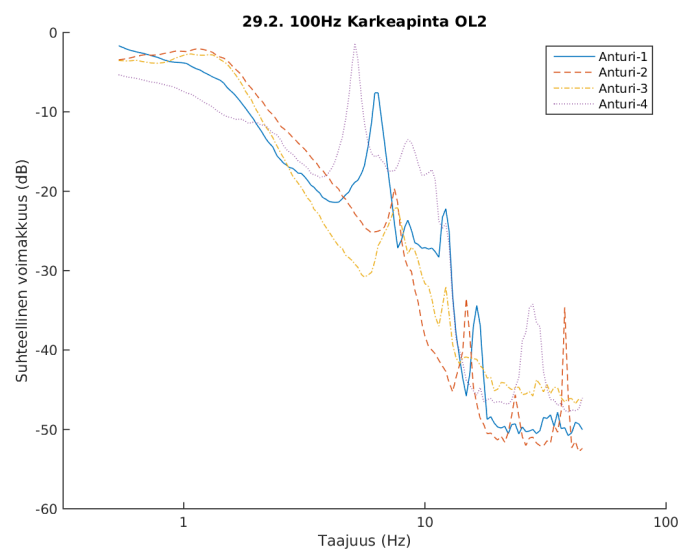
Toisaalta pääkomponenttiavaruudesta voidaan erottaa kaksi erillistä ryhmää: jäljellä olevat alkuperäiset anturit ja anturit, jotka on uusittu. Näiden kahden ryhmän spektrinäytteet eivät esiinny limittäin keskenään. Uusitut anturit ovat eri mallia kuin alkuperäiset. Anturien uusimiset ovat tapahtuneet vuosien 2002 ja 2013 välillä. Alkuperäiset anturit sijoittuvat kahden ensimmäisen pääkomponentin visualisoinnissa oikealle ja alas. Näihin kuuluvat anturit OL1-2, OL2-2 ja OL2-3. Uusitut anturit sijoittuvat yhtenäiselle vyöhykkeelle vasemmalle ja ylös. Näihin kuuluvat anturit OL1-1, OL1-3, OL1-4 ja OL2-1.

Poikkeuksena anturi OL2-4, jota ei ole uusittu, sijoittuu yksin vasempaan yläkulmaan erillään kaikista muista antureista. Tämä anturi on kuitenkin myös eri mallia kuin muut alkuperäiset karkeapinnan paine-erolähettimeet. Visuaalisessa tarkastelussa voidaan tämän anturin spektristä erottaa samantaisia poikkeavia piirteitä kuin vastaavan hienopinta-anturin spektristä, tarkemmin sanoen $1Hz$ alueen kummun madaltumista, sekä ensimmäisten resonanssiipikkien korostumista.

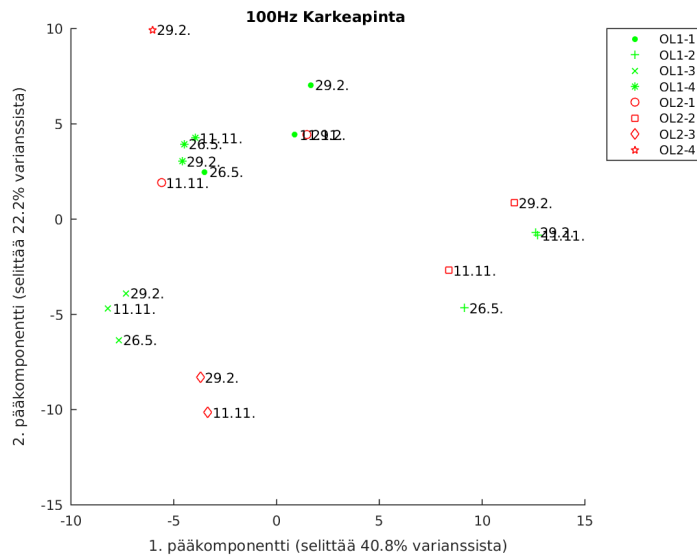
Karkeapinta-anturien ensimmäinen pääkomponentti liittyy korostuneesti matalaan alle $7Hz$ taajuusalueeseen. Vastaavasti toinen pääkomponentti koostuu pääasiassa kapeammista erillisistä taajuusalueista noin $7Hz$ ylöspäin. Nämä alueet liittyvät eri anturien spektrien resonanssiipikkeihin. Hieno- ja karkeapintojen ensimmäiset kaksi pääkomponenttia ovat melko samaan tapaan jakautuneita eri taajuusalueiden kesken.



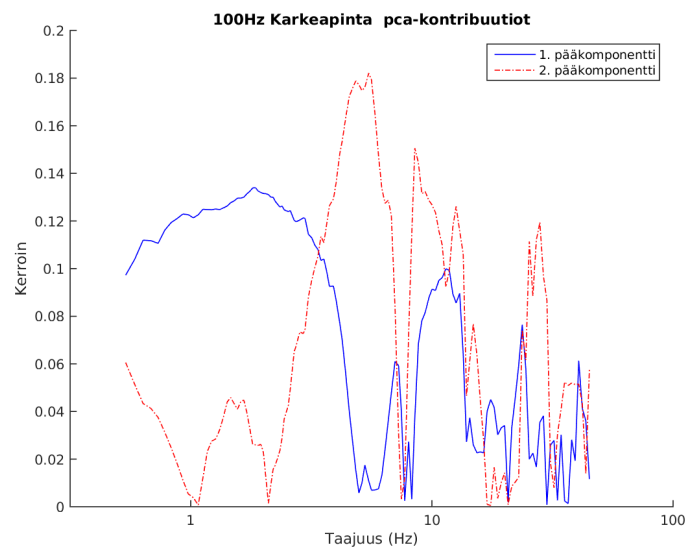
Kuva 6.5: Olkiluoto 1:n karkeapinta-anturien tehospektrit 29.2.2016



Kuva 6.6: Olkiluoto 2:n karkeapinta-anturien tehospektrit 29.2.2016



Kuva 6.7: Karkeapinta-anturien tehospektrien kaksi ensimmäistä pääkomponenttia muodostettuna 26.5.2015, 11.11.2015 ja 29.2.2016 näytteistä



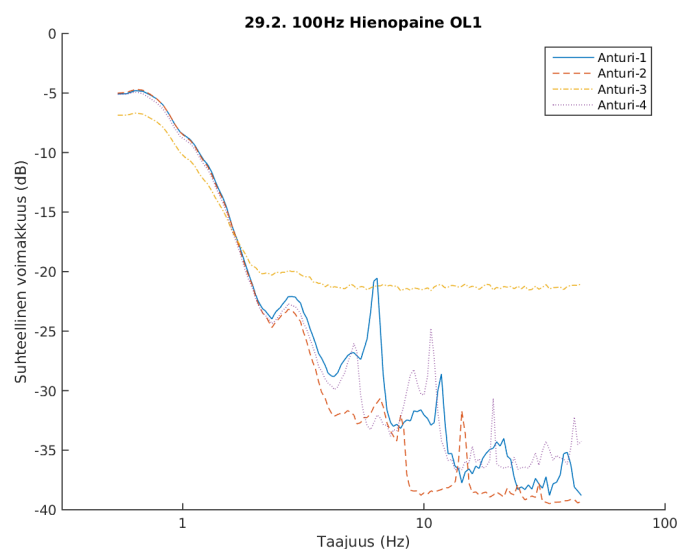
Kuva 6.8: Karkeapinta-anturien tehospektrien taajuuskontribuutiot kahteen ensimmäiseen pääkomponenttiin

6.1.3 Hienopaineanturit

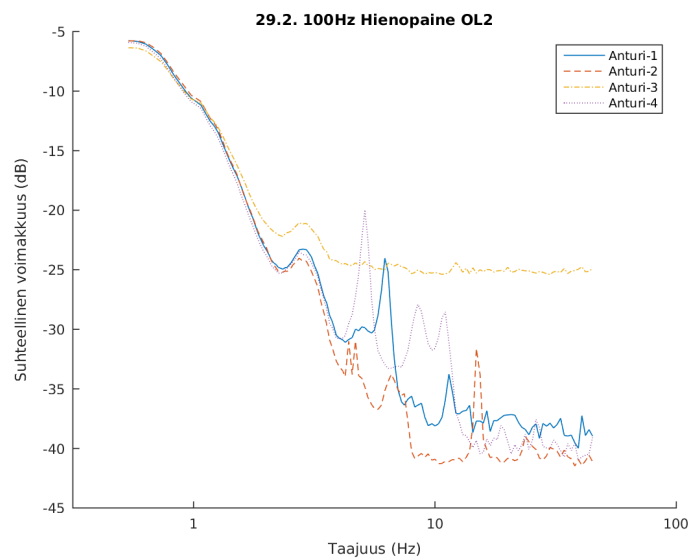
Hienopaineantureiden tehospektreistä esitetään esimerkit OL1:ltä 29.2.2016 kuvassa 6.9 ja OL2:lta 29.2.2016 kuvassa 6.10 sekä 11.11.2015 kuvassa 6.11. Hienopaineanturien pääkomponenttianalyysin kaksi ensimmäistä pääkomponenttia on visualisoitu kuvassa 6.12 ja spektrin eri taajuuksien kontribuutiot näihin kahteen pääkomponenttiin kuvassa 6.13.

Hienopaineanturien ensimmäinen pääkomponentti on poikkeuksellisen voimakas, käsittäen yli kolme neljänestä kaikista tutkittujen näytteiden välistä varianssista. Tätä pääkomponenttia dominoi kummankin laitosesikön kolmosanturin tehospektrissä korkeilla taajuuksilla esiintyvä voimakas taustakohina, joka poikkeaa merkittävästi kaikkien muiden anturien spektreistä. Vastaavasti toisessa pääkomponentissa erottuvat OL2:n näytteet ajankohdalta 11.11.2015. Kyseisissä näytteissä matalien taajuuksien signaali on merkittävästi heikompi kuin muissa näytteissä.

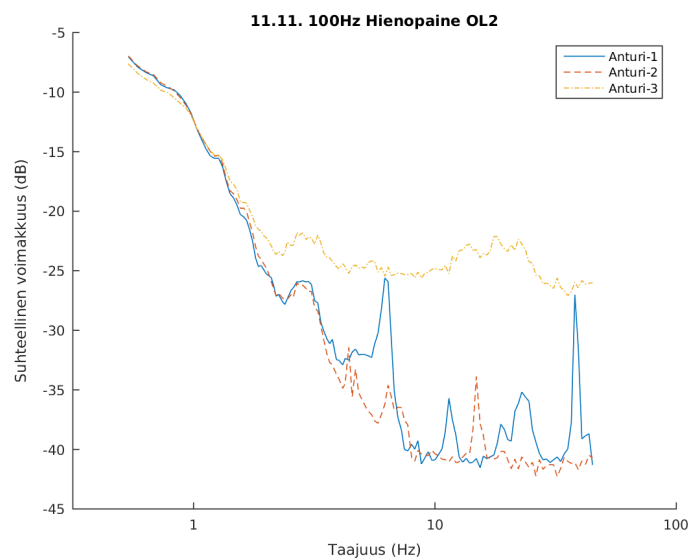
Muutoinkin hienopaineen pääkomponenttianalyysissä samojen päivämäärien näytteet tuntuivat pääosin kasaantuvan yhteen, pikemminkin kuin samojen anturien näytteet. Hienopaineen osalta hypoteesit anturien spektrien samankaltaisuudesta eri näyttekertojen välillä eivät pidä paikkaansa.



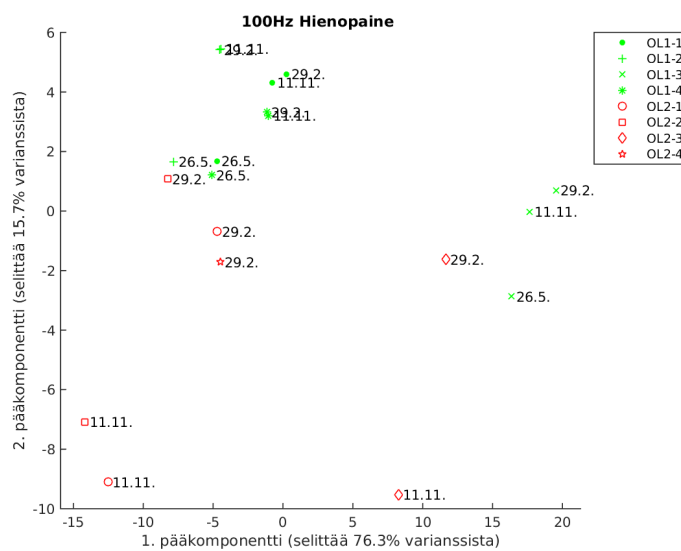
Kuva 6.9: Olkiluoto 1:n hienopaineanturien tehospektrit 29.2.2016



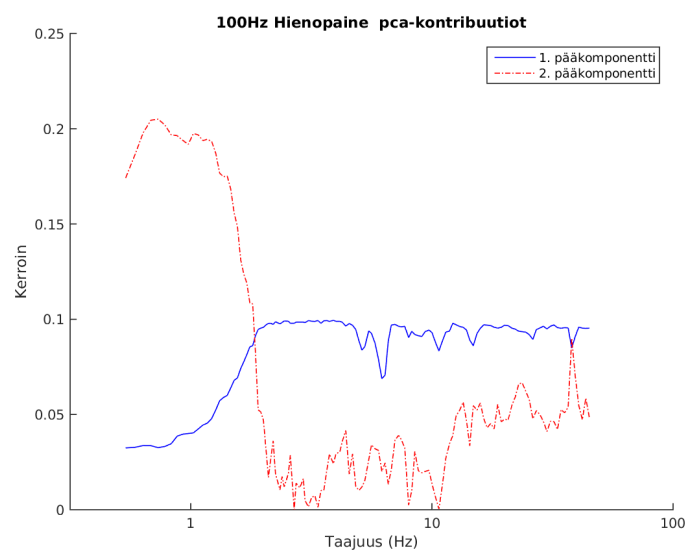
Kuva 6.10: Olkiluoto 2:n hienopaineanturien tehospektrit 29.2.2016



Kuva 6.11: Olkiluoto 2:n hienopaineanturien tehospektrit 11.11.2015



Kuva 6.12: Hienopaineanturien tehospektrien kaksi ensimmäistä pääkomponenttia muodostettuna 26.5.2015, 11.11.2015 ja 29.2.2016 näytteistä



Kuva 6.13: Hienopaineanturien tehospektrien taajuuskontribuutiot kahteen ensimmäiseen pääkomponenttiin

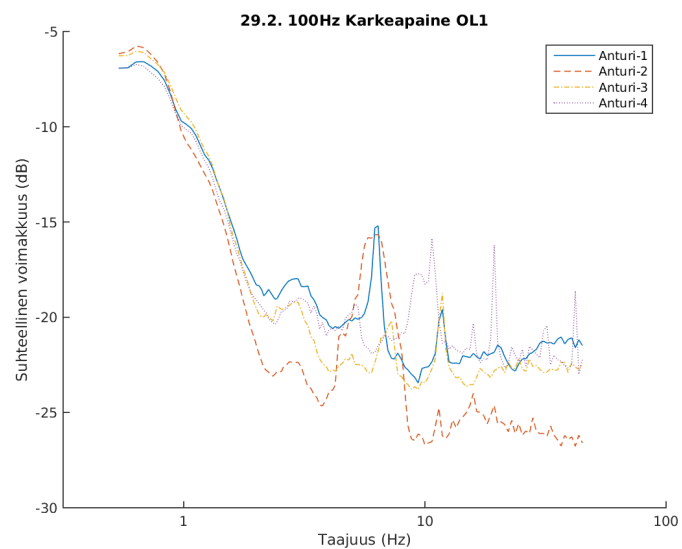
6.1.4 Karkeapaineanturit

Karkeapaineanturien tehospektreistä on esimerkki OL1:ltä kuvassa 6.14 ja OL2:lta kuvassa 6.15. Molemmat näytteet on mitattu 29.2.2016. Karkeapaineanturien pääkomponenttianalyysin kaksi ensimmäistä pääkomponenttia on visualisoitu kuvassa 6.16 ja spektrin eri taajuuksien kontribuutiot näihin pääkomponentteihin kuvassa 6.17.

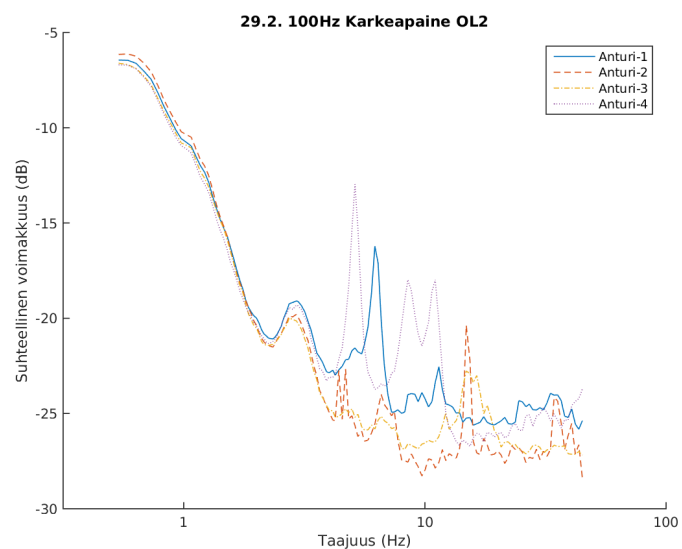
Kuten hienopaineantureidenkin kohdalla, myös karkeapaineantureiden pääkomponenttianalyysissä spektrinäytteet ryhmittyvät enemmän päivämäärien kuin antureiden mukaan. Lisäksi kummankin laitosesikön karkeapaineantureiden spektrit muodostavat pääkomponenttiavaruudessa kaksi toisistaan eroavaa ryhmää. OL2:n antureista ainoastaan anturin OL2-4 spektri sijaitsee kahden ensimmäisen pääkomponentin suhteen limittäin OL1:n antureiden spektrien kanssa.

OL2:n eri päivämäärien näytteet ovat sekoittuneet keskenään vähemmän kuin OL1:n näytteet. OL1:n antureista on havaittavissa jonkinasteista ryhmittymistä samojen antureiden eri päivämäärien spektrien kesken.

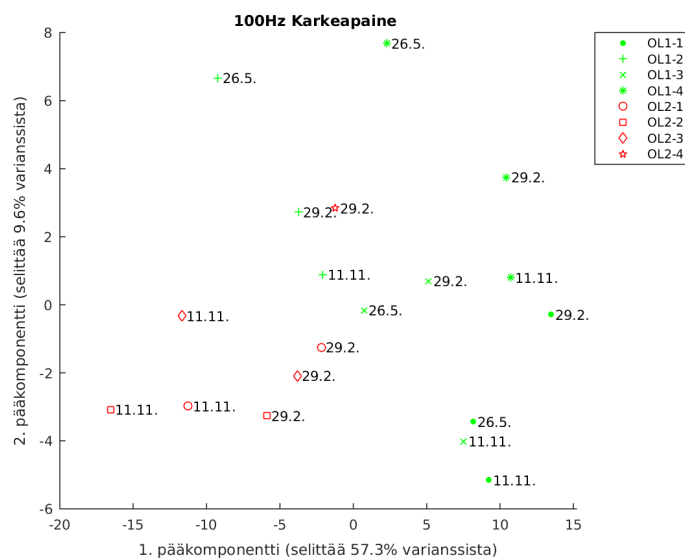
Myös karkeapaineessa ensimmäinen pääkomponentti on suhteellisen voimakas, sisältäen yli puolet kaikkien spektrien välisestä varianssista. Siitä ei kuitenkaan ole havaittavissa mitään yksittäistä selkeästi korostunutta taajuusaluetta vaan se koostuu jossakin määrin kaikkien spektrin taajuusalueiden kontribuutioista. Toinen pääkomponentti on paljon heikompi ja siihen vaikuttaa ensisijaisesti yksi spektriipiikki vajaan $10Hz$ taajuudella.



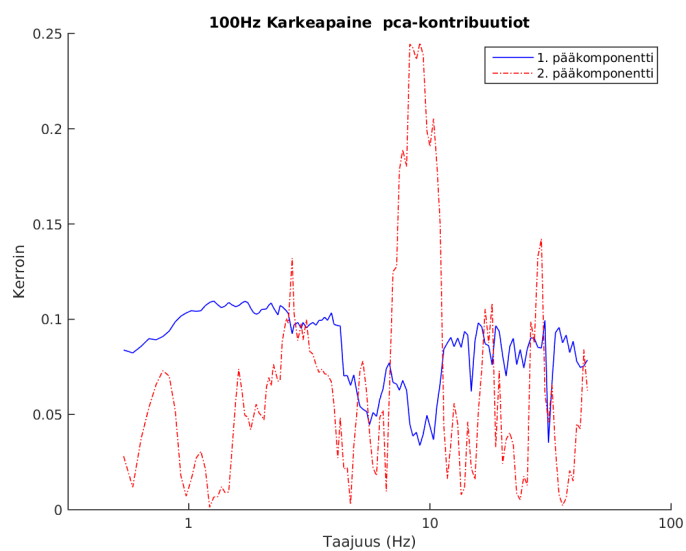
Kuva 6.14: Olkiluoto 1:n karkeapaineanturien tehospektrit 29.2.2016



Kuva 6.15: Olkiluoto 2:n karkeapaineanturien tehospektrit 29.2.2016



Kuva 6.16: Karkeapaineanturien tehospektrien kaksi ensimmäistä pääkomponenttia muodostettuna 26.5.2015, 11.11.2015 ja 29.2.2016 näytteistä



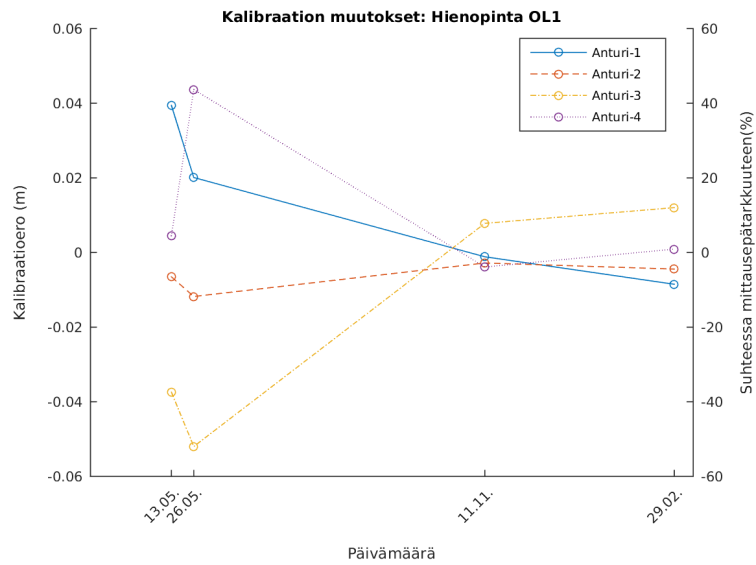
Kuva 6.17: Karkeapaineanturien tehospektrien taajuuskontribuutiot kahteen ensimmäiseen pääkomponenttiin

6.2 Kalibraation muutokset

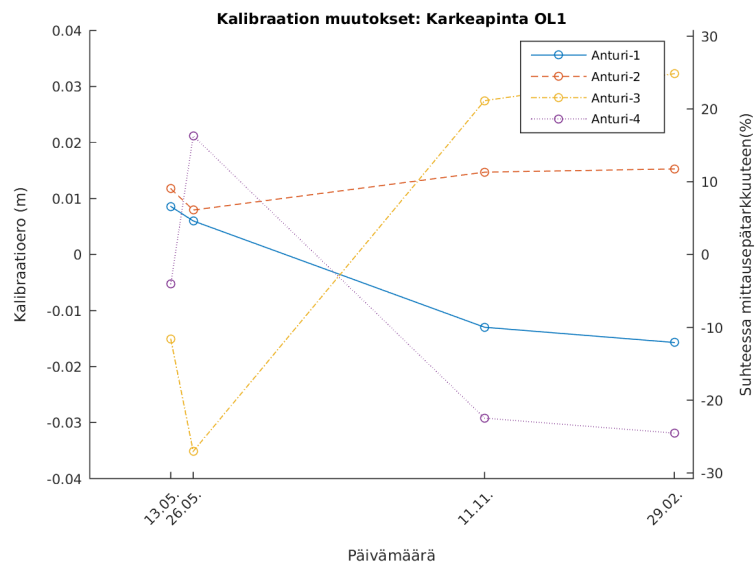
Antureiden kalibraation muutoksia tutkimusaikana on visualisoitu seuraavissa kuvissa: hienopinta - kuva 6.18, karkeapinta - kuva 6.19, hienopaine - kuva 6.20 ja karkeapaine - kuva 6.21. Kalibraatioerot on esitetty sekä mitattavina yksiköinä (metreinä pintamittauksissa, baareina painemittauksissa) että prosentiosuuksina tutkittavien anturien suurimmista odotettavissa olevista mittausrvirheistä [2].

Kaikkien tutkittujen OL1:n anturien kalibraatio on pysynyt odotettavissa olevan mittausrvirheen rajoissa koko tutkimusjakson ajan, eikä sen enempää pinta- kuin painemittauksissakaan voida havaita minkään yksittäisen anturin kohdalla kalibraation muutoksissa selkeää yhdensuuntaista trendiä, joka viittaisi anturissa tapahtuviin pysyviin muutoksiin. Pinta- ja paineanturien välillä havaitaan kuitenkin selvä ero eri mittausten keskinäisen vaihtelun määrässä. Paineanturien tulokset ovat stabiileja mittauskerrasta toiseen, eikä anturien kalibraation keskinäinen järjestys muutu kertaakaan mittausjakson aikana. Pintamittauksissa puolestaan yhden anturin eri mittauskertojen välinen vaihtelu on voimakasta, erityisesti huoltoseisokkien välisen käyttöjakson alkupuolella, jolloin reaktorin virtaus ylipäättään on voimakkaampaa [3]. Pinta-antureiden mahdollisten kalibraatiomuutosten havaitseminen jakson alkupuolella edellyttäisi enemmän tai selvästi pidempiä näytekertoja.

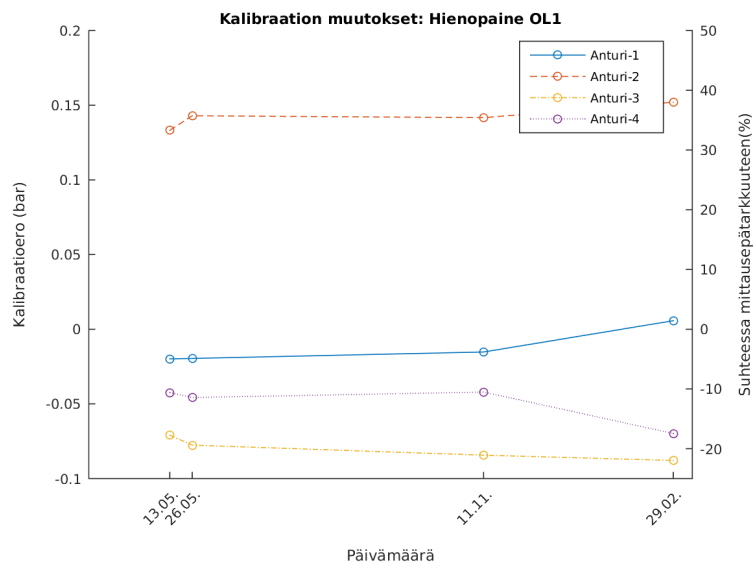
Vaikka OL2:n antureista ei olekaan käytettävissä tarpeeksi dataa koko käyttöjakson aikaisten kalibraatiomuutosten tarkasteluun, lienee silti huomionarvoista, että mittauskerralla 29.2. OL2-3:n karkeapinnan anturin kalibraation ero muiden OL2:n karkeapinta-antureiden kalibraatioiden keskiarvoon on $0,132m$, mikä ylittää suurimman odotetun mittausrvirheen, joka on $0,13m$ [2]. Samalla mittauskerralla myös OL2-3:n hienopinnan anturin kalibraation ero muiden OL2:n hienopinta-antureiden kalibraatioiden keskiarvoon on $0,090m$, joka on lähellä suurinta odotettua $0,10m$ mittausrvirhettä [2].



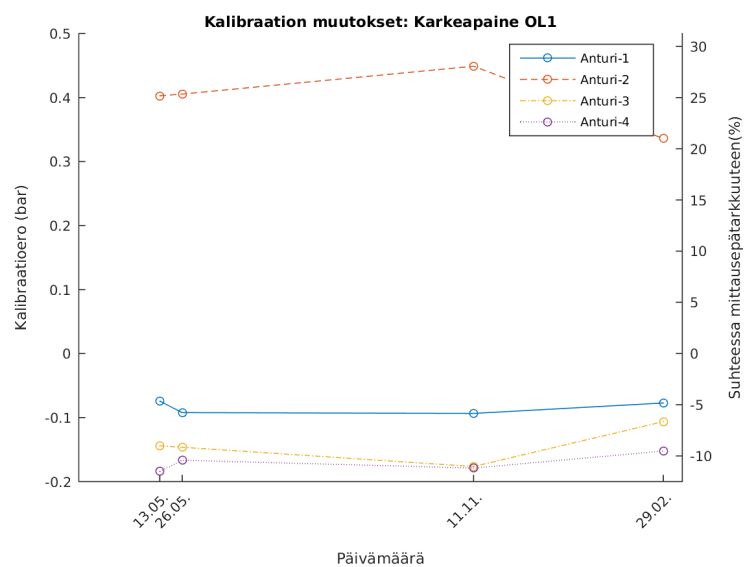
Kuva 6.18: Olkiluoto 1:n hienopinta-anturien kalibraation muutokset suhteessa keskiarvoon tutkimusjakson aikana



Kuva 6.19: Olkiluoto 1:n karkeapinta-anturien kalibraation muutokset suhteessa keskiarvoon tutkimusjakson aikana



Kuva 6.20: Olkiluoto 1:n hienopaineanturien kalibraation muutokset suhteessa keskiarvoon tutkimusjakson aikana



Kuva 6.21: Olkiluoto 1:n karkeapaineanturien kalibraation muutokset suhteessa keskiarvoon tutkimusjakson aikana

Luku 7

Johtopäätökset ja suositukset

Tässä luvussa esitetään arviot käytettyjen tutkimusmenetelmien toiminnasta. Lisäksi paneudutaan tutkimuksessa havaittuihin poikkeamiin eri antureiden signaaleissa ja pohditaan niiden merkitystä. Lisäksi pohditaan käytettyjen menetelmien soveltuvuutta muun tyyppisten anturien kuin paineanturien testaamiseen. Lopuksi esitetään suosituksia paineantureiden vikaantumisen tutkimuksen jatkosta.

7.1 Pääkomponenttianalyysi ja tehospektrit

Pintamittauksiin käytettyjen paine-erolähettimien spektreistä pystytään pääkomponenttianalyysin avulla muodostamaan antureille sormenjälkiä, jotka pysyvät pääosin samankaltaisina eri näyttekertojen välillä. Lisäksi eri reaktori-erien toisiaan vastaavien anturien spektrit muistuttavat pääosin toisiaan. Eri päivämäärien näytteiden välillä on kuitenkin jonkin verran eroja ja eri antureiden eri päivämäärien näytteet voivat sijoittua limittäin toisiinsa nähden.

Pintamittausten suhteen pääkomponenttianalyysiä voidaan käyttää tunnistamaan muutoksia antureiden spektreissä. Suurempaa luotettavuutta varten mittauksia pitäisi kuitenkin suorittaa useammin ja pidemmältä aikaväliltä. Lisäksi poikkeamia voidaan havaita myös vertaamalla spektrejä toisen laitosesikön vastaavan anturin spektriin. Pinta-antureiden spektreistä ei kuitenkaan löydy merkkejä ikääntymiseen liittyvistä, tutkimusjakson aikana tapahtuneista, muutoksista.

Karkeapintojen pääkomponenttianalyysissä erottuvat erillisiksi ryhmikseen anturit, jotka on joskus uusittu, sekä laitosesiköiden jäljellä olevat alkuperäiset anturit. Tämä voi johtua joko anturien ikäeroista tai todennäköisemmin siitä että uusitut anturit eivät ole täysin samaa mallia kuin alkuperäiset.

Sitä vastoin painelähettimien pääkomponenttianalyysissä spektrinäytteet ryhmittyvät samojen laitosityksiköiden ja päivämäärien, eivätkä samojen antureiden mukaan. Tämä ei sinällään ole yllättävää, sillä kuten kohdassa 3.2.1 mainitaan ei painelähettimien signaaleissa välttämättä ole riittävästi satunnaisvaihtelua kohina-analyysimenetelmien soveltamiseen. Mikäli pääkomponenttianalyysin avulla haluttaisiin muodostaa paineantureista tunnistettavia sormenjälkiä, tarvittaisiin enemmän ja useammin tehtyjä mittauksia useamman huoltoseisokkien välisen käyttöjakson ajalta. Tällöin anturin spektrin muutokset ajan suhteen pääkomponenttiavaruudessa voisivat toimia yksilöivänä tunnisteena ja spektrien poikkeuksellisia arvoja voitaisiin havaita vertaamalla niitä aiempiin mittauksiin samassa vaiheessa jaksoa.

7.2 Kalibraation muutokset

Tässä tutkimuksessa ei havaittu merkkiä pysyvistä kalibraation muutoksista. Pintamittausten tuloksissa havaittiin sen sijaan voimakasta heiluntaa käyttöjakson alkupuolella. Tämän ajan kalibraatiomuutosten tutkimiseen tarvittaisiin joko useammin tehtyjä tai kestoaltaan pidempiä mittauksia.

Mahdollisten, anturien fysikaalisen rakenteen muutoksiin viittaavien, toistuvien samansuuntaisten kalibraation muutosten havaitsemiseksi kalibraatiota tulisi tutkia useiden käyttöjaksojen mittaiselta ajanjaksolta. Koska kalibraation muutosten tarkastelu ei tarvitse korkeataajuuksista dataa, voitaisiin tällaista tarkastelua tehdä olemassa olevasta pitkältä aikaväliltä tallennetusta hitaasta arkistodatasta. Koska kalibraatiota tarkastellessa tutkitaan nimenomaan anturien keskinäisiä eroja, ei eri käyttöjaksojen välisiin pitkän aikavälin kalibraatioeroihin tarvitse tässä kiinnittää huomiota.

7.3 Poikkeavat anturit

Tutkimuksessa havaittiin poikkeavia piirteitä OL1-3 ja OL2-3 hienopaineanturien spektreissä. Kummankin anturin kaikkien mittausten spektrit sisälsivät korkeataajuuksista voimakasta kohinaa, jossa ei ilmennyt merkittäviä resonanssiipiikkejä. Kyseisistä anturisysteemeistä puuttuu jokin vaimentava tekijä, joka on läsnä kaikissa muissa tutkimuksen antureissa. Epäselväksi jää liittyykö tämä ero itse antureihin, impulssiputkiin vaiko signaalien jälkikäsitteilyyn ja välittämiseen eteenpäin prosessitietojärjestelmässä. Selitystä ei löydy tutkimuksessa käytössä olevasta dokumentaatiosta eikä mittaustuloksista.

Anturien signaaleissa esiintyvä voimakas korkean taajuuden kohina voisi sopia esimerkiksi kohdassa 3.1.3 mainittuun vaimennusöljyn vuotoon. Koska ilmiö kuitenkin esiintyy nimenomaan saman osajärjestelmän anturilla molemmilla laitosyksiköissä, lienee taustalla luultavammin jokin laitosyksiköiden samankaltaiseen rakenteeseen liittyvä tekijä.

Myös OL2-4 hieno- ja karkeapinta-anturien spektreissä havaittiin poikkeamia. Hienopinta-anturin spektrissä vasteajan rajataajuuteen liittyvä kumpu ja kulma puuttuivat spektristä kokonaan, spektrin ensimmäiset resonanssi-*piikit* olivat korostuneen voimakkaita eikä korkeilla taajuuksilla esiintynyt ollenkaan resonanssi-*piikkejä*. Karkeapinta-anturin spektrissä olivat vasteajan rajataajuuden kummun puuttuminen ja ensimmäisten resonanssi-*piikkien* korostuminen myös havaittavissa lievemässä määrin, mutta siinä näkyi resonanssi-*piikki* myös korkeammilla taajuuksilla. Tämä poikkeamien samankaltaisuus voi selittyä kohdassa 3.1.4 kuvatulla ilmiöllä, jossa saman impulssi-putken jakavissa antureissa joustavamman anturin dynaamiset ominaisuudet näkyvät toisen anturin signaalissa. Kuten kohdassa 2.1 on mainittu, saman osajärjestelmän hieno- ja karkeapinnan anturit jakavat yhteisen referenssi-putken.

Mainittu OL2-4 hienopinta-anturi on uusittu vuonna 2011. Sen sijaan karkeapinta-anturi on edelleen alkuperäinen, vaikkakin eri mallia kuin muut karkeapinnan anturit. On mahdollista että havaitut spektri-*poikkeamat* liittyvät näihin mallieroihin. Spektrissä havaittavissa oleva poikkeama kyseisen hienopinta-anturin vasteajassa ja resonanssi-*piikeissä* viittaisi kuitenkin mahdolliseen ongelmaan anturiyksikössä. Hieno- ja karkeapinta-anturien jaetun impulssi-putken tukos tai liiallinen aukkoisuus sopisivat myös havaintoihin, mutta niitä on pidettävä epätodennäköisinä laitoksessa noudatetun tiukan vesikemian vuoksi. On lisäksi huomattava että kyseisen anturin signaalista on ollut tutkimuksessa käytettävissä vain yksi kunnollinen mittausta, joten tulosten vahvistaminen uudella mittauskerralla ennen vahvojen johtopäätösten tekemistä olisi suotavaa.

Lisäksi sekä OL2-3 karkeapinnan että OL2-3 hienopinnan anturien kalibrointi oli 29.2.2016 tehdyssä mittauksessa huolestuttavan poikkeava muihin saman laitosyksikön vastaaviin antureihin nähden. Tässä tutkimuksessa jäi epäselväksi onko tämä vain yhteen mittauskertaan liittyvä poikkeama vai toistuisiko ero tulevissa mittauksissa. Kyseisten anturien spektrien sormen-*jäljet*, kuvissa 6.7 ja 6.3 eivät vaikuta mitenkään poikkeuksellisilta.

7.4 Menetelmien soveltaminen muihin anturityyppeihin

Tässä tutkimuksessa käytetyn kaltaisia kohinaspektrejä voidaan muodostaa minkä tahansa anturin signaaleista. Tässä kuvattujen kohina-analyysimenetelmien soveltaminen edellyttää kuitenkin, että anturien signaaleissa on riittävästi satunnaista kohinaa, jotta anturikohtaiset poikkeavuuden pääsevät spektrissä näkyviin.

Pääkomponenttianalyysiin perustuva anturien spektrien luokittelu edellyttää luonnollisesti myös useampaa samaa suuretta mittaavaa rinnakkaista anturia, jotta antureiden keskinäisiä eroja voidaan vertailla. Lisäksi kaikkien anturityyppien signaalien spektrit eivät välttämättä sovellu yhtä hyvin käsiteltäväksi pääkomponenttianalyysin kaltaisella lineaarisella muunnoksella.

Mikäli yllä mainitut ehdot kuitenkin täyttyvät, on pääkomponenttianalyysi sovellettavissa muihin anturityyppeihin, joko suoraan muodostamaan anturikohtaisia sormenjälkiä, joiden muutoksia ajan suhteen voidaan tarkkailla, tai esikäsittelymenetelmänä klusteroinnissa mikäli dataa on käytettävissä enemmän.

Tässä tutkimuksessa on sovellettu aikaisempaa tutkimusta paine- ja paine-eroläheittäimien rakenteesta, toimintaperiaatteista ja niille tyypillisistä vikaantumistavoista sekä signaalien spektrien piirteistä. Tällainen tarkempi tuntemus tutkittavien anturien toiminnasta ja spektreistä on oleellista tässä kuvattujen menetelmien tulosten tulkitsemiseksi.

7.5 Suositukset

Työssä sovelletulla pääkomponenttimenetelmällä pystytään muodostamaan pinnankorkeutta mittaavien paine-eroläheittäimien tehospektreille sormenjälkiä, jotka pysyvät eroteltavina eri ajankohtina tehdyissä mittauksissa. Lisäksi on saatu viitteitä siitä, että näiden sormenjälkien muutoksilla voidaan tunnistaa anturien vikaantumista.

Menetelmää voidaan soveltaa missä tahansa lämpövoimalassa. Olkiluodossa tutkimusta kannattaisi jatkaa tekemällä mittauksia useamman käyttöjakson aikana. Paineen mittauksessa käytettävien paineläheittäimien suhteen mittauksia kannattaisi myös tehdä lisää ja tutkia saadaanko antureille muodostettua yksilöllisiä sormenjälkiä tutkittaessa niiden spektrejä samoissa käyttöjaksojen vaiheissa useamman jakson aikana. Lisäksi kun saadaan näytteitä vikaantuneista antureista pidemmältä aikaväliltä, voidaan pääkomponenttianalyysin rinnalla siirtyä käyttämään lineaarista diskriminanttianalyysi-

siä (LDA). Pääkomponenttianalyysin soveltuminen tähän dataan antaa viitteitä myös LDA:n soveltuvuudesta. LDA:n avulla saadaan tarkemmin määriteltyä eroavat taajuudet ehjien ja vikaantuneiden anturien välillä. Kun tunnetaan tarkemmin, miten vikaantuneet anturit eroavat ehjistä, voidaan ryhtyä pohtimaan sitä, miten vikaantuminen voidaan parhaiten ennakoida. Tätä työtä varten kehitetty datan esikäsittely- ja visualisointiohjelmisto on luovutettu Teollisuuden Voima Oyj:n käyttöön.

Lisäksi olisi suositeltavaa tutkia tarkemmin sellaisia antureita, joiden spektreistä on tässä tutkimuksessa löytynyt poikkeavia piirteitä. Näin voidaan varmistua siitä, liittyvätkö nämä havaitut poikkeavuudet todella anturien vikaantumiseen. Myös kyseisten anturien impulssiputkien kunto voisi olla syytä mahdollisuuksien mukaan varmistaa. Tällaisia antureita ovat OL2-4 hienopinnan ja karkeapinnan anturit sekä hienopaineen anturit OL1-3 ja OL2-3.

Lopuksi on syytä mainita käytännön yksityiskohta, johon olisi syytä kiinnittää huomiota, kun Olkiluodossa tulee lähivuosina ajankohtaiseksi paine- ja paine-erolähettimien uusiminen. Koska tällä hetkellä käytössä olevia lähetinmalleja ei enää valmisteta ja uudet lähettimet tulevat todennäköisesti poikkeamaan dynaamisilta ominaisuuksiltaan tällä hetkellä käytetyistä, on kiinnitettävä erityistä huomiota uusien lähettimien sijoittamiseen, sillä dynaamiselta vasteeltaan erilaisten anturien sijoittaminen samaan jaettuun impulssiputkeen voi vaikuttaa näiden anturien käytännössä toteutuvaan vasteseen.

Kirjallisuutta

- [1] Hashemian, H.M., D.W. Mitchell, R.E. Fain ja K.M. Petersen: *Long term performance and aging characteristics of nuclear plant pressure transmitters*. tekninen raportti, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA). Div. of Engineering; Analysis and Measurement Services Corp., Knoxville, TN (USA), 1993.
- [2] Laukkanen, Jarkko: *536 - OL1/OL2 - Reaktoripaineastian instrumentointi - lopullinen turvallisuusseloste*, 2014. Teollisuuden Voima Oyj.
- [3] Laukkanen, Jarkko, 2016. Palaverikeskustelut Olkiluodossa.
- [4] Fraden, Jacob: *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Springer-Verlag New York, Inc., 2004, ISBN 0-387-00750-4.
- [5] Lin, Kang ja Keith E. Holbert: *Pressure sensing line diagnostics in nuclear power plants*. Nuclear Power, sivut 97–122, 2010.
- [6] Hashemian, H.M.: *Sensor Performance and Reliability*. ISA, 2005, ISBN 978-1-55617-897-9. <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSPR00014/sensor-performance-reliability/sensor-performance-reliability>.
- [7] Hashemian, H.M., K.M. Petersen, R.E. Fain ja J.J. Gingrich: *Effect of aging on response time of nuclear plant pressure sensors*. tekninen raportti, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA). Div. of Engineering; Analysis and Measurement Services Corp., Knoxville, TN (USA), 1989.
- [8] Keenan, M.R.: *Moisture permeation into nuclear reactor pressure transmitters*. tekninen raportti, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1984.
- [9] Hashemian, H.M.: *On-line monitoring applications in nuclear power plants*. Progress in Nuclear Energy, 53(2):167 – 181, 2011,

ISSN 0149-1970. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197010001307>.

- [10] Barbero, Javier, Juan Blázquez ja Oscar Vela: *Bubbles in the sensing line of nuclear power plant pressure transmitters: the shift of spectrum resonances*. Nuclear Engineering and Design, 199(3):327 – 334, 2000, ISSN 0029-5493. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549300002363>.
- [11] Halttunen, Jouko: *Reaktorisäiliön hienopinnan mittauksen virhetarkastelua muutostilanteessa*. Teollisuuden Voima Oyj, Luottamuksellinen, 2014.
- [12] Lin, Kang ja Keith E. Holbert: *Blockage diagnostics for nuclear power plant pressure transmitter sensing lines*. Nuclear Engineering and Design, 239(2):365 – 372, 2009, ISSN 0029-5493. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549308005359>.
- [13] García-Berrocal, A., J.M. Chicharro, J. Blázquez ja M. Balbás: *Non-linear noise analysis from a capacitive pressure transmitter*. Mechanical Systems and Signal Processing, 18(1):187 – 197, 2004, ISSN 0888-3270. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327003000153>.
- [14] Blázquez, J. ja J. Ballestrín: *Pressure transmitter surveillance: The dominant real pole case*. Progress in Nuclear Energy, 29(3–4):139 – 145, 1995, ISSN 0149-1970. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0149197095000033>, The 25th Informal Meeting on Reactor Noise.
- [15] Vallejo, I. ja F. Barrio: *Neural networks applied to pressure sensor monitoring*. Progress in Nuclear Energy, 29(3–4):371 – 373, 1995, ISSN 0149-1970. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0149197095000196>, The 25th Informal Meeting on Reactor Noise.
- [16] Chicharro, J.M., A. García-Berrocal, M. Balbás ja J. Blázquez: *Pressure transmitter surveillance using quaternion numbers*. Mechanical Systems and Signal Processing, 16(6):1083 – 1091, 2002, ISSN 0888-3270. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327002914767>.
- [17] Frank, Paul M.: *Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results*. Automatica, 26(3):459–474, 1990.

- [18] Fantoni, P.F. ja A. Mazzola: *A pattern recognition-artificial neural networks based model for signal validation in nuclear power plants*. *Annals of Nuclear Energy*, 23(13):1069 – 1076, 1996, ISSN 0306-4549. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454996846615>.
- [19] Mehranbod, Nasir, Masoud Soroush, Michael Piovoso, Babatunde A. Ogunnaike *et al.*: *Probabilistic model for sensor fault detection and identification*. *AIChE Journal*, 49(7):1787–1802, 2003.
- [20] Zavaljevski, Nela ja Kenny C. Gross: *Sensor fault detection in nuclear power plants using multivariate state estimation technique and support vector machines*. *Teoksessa Third International Conference of the Yugoslav Nuclear Society*, sivut 1–8. sn, 2000.
- [21] Theodoridis, Sergios ja Konstantinos Koutroumbas: *Pattern Recognition, third edition*. Academic Press, An imprint of Elsevier, 525 B street, Suite 1900, San Diego, CA 92101-4495, USA, 2006, ISBN 0-12-369531-7.
- [22] Humenik, Keith ja Kenny C. Gross: *Sequential probability ratio tests for reactor signal validation and sensor surveillance applications*. *Nuclear Science and Engineering*, 105(4):383–390, 1990.
- [23] Ortiz-Villafuerte, Javier, Rogelio Castillo-Durán, Gustavo Alonso ja Gabriel Calleros-Micheland: *{BWR} online monitoring system based on noise analysis*. *Nuclear Engineering and Design*, 236(22):2394 – 2404, 2006, ISSN 0029-5493. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549306001452>.
- [24] Alpaydin, Ethem: *Introduction to Machine Learning (Adaptive Computation and Machine Learning)*. The MIT Press, 2004, ISBN 0262012111.
- [25] Hyvärinen, Aapo, Juha Karhunen ja Erkki Oja: *Independent Component Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 2001, ISBN 978-0-471-40540-5.
- [26] Mitra, Sanjit K.: *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, third edition*. McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020, 2006, ISBN 0-07-286546-6.
- [27] Bellman, Richard: *Dynamic Programming*. Princeton University Press, 1957.
- [28] Keyvan, Shahla: *Traditional signal pattern recognition versus artificial neural networks for nuclear plant diagnostics*. *Progress in Nuclear Energy*, 39(1):1 – 29, 2001, ISSN 0149-1970. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014919700000158X>.

- [29] Gävert, Hugo, Jarmo Hurri, Jaakko Särelä ja Aapo Hyvärinen: *Fastica for matlab 7.x and 6.x version 2.5*, 2005. <http://research.ics.aalto.fi/ica/fastica/>.
- [30] Toosi, Topi. <http://koti.kapsi.fi/topikissa/mastersthesis/olmatlab.zip>, Viitattu 5.5.2016.
- [31] *ISC License (ISC)*. <https://opensource.org/licenses/ISC>, Viitattu 27.4.2016.
- [32] Welch, Peter D.: *The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms*. IEEE Transactions on audio and electroacoustics, 15(2):70–73, 1967.
- [33] The MathWorks, Inc.: *MATLAB Release 2015a*, 2015. Natick, Massachusetts, United States.
- [34] Harris, Fredric J.: *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform*. Proceedings of the IEEE, 66(1):51–83, 1978.