

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

Jukka Kortelainen

SÄHKÖISEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄN
KAUKODIAGNOSTIIKKA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 10.10.1996.

Työn valvoja Matti Märd

Työn ohjaaja Jukka Kortelainen

TKK Sähkö- ja
tietoliikennetekniikan kirjasto
Otakaari 5 A
02150 ESPOO

20112

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty ABB Industry Oy:n Marine divisioonassa. Työn valvojana on toiminut professori Matti Mård, jolle kiitokset hänen työtäni kohtaan osoittamastaan mielenkiinnosta. DI Juha Koukkaria kiitän toimimisesta työni ohjaajana ja lukuisista työn aikana käydyistä rakentavista keskusteluista. Keksintösäätiön kannatusyhdistykselle esitän kiitokseni saamastani taloudellisesta tuesta.

Kiitän myös diagnostiikkatiimiä saamistani neuvoista. Haluan myös kiittää Marine divisioonan muita työntekijöitä viihtyisän ja haasteellisen työilmapiirin luomisesta.

Helsingissä 10.10.1996



Jukka Kortelainen

Tekijä:	Jukka Kortelainen		
Työn nimi:	Sähköisen propulsiojärjestelmän kaukodiagnostiikka		
Päivämäärä:	10.10.1996	Sivumäärä:	84
Osasto:	Sähkötekniikan osasto		
Professori:	S-81 Sähkökäyttö ja tehoelektroniikka		
Työn valvoja:	Professori Matti Mård		
Työn ohjaaja:	DI Juha Koukkari		
<p>Kaukodiagnostiikka mahdollistaa osittaisen vikojen ennustamisen ja syntyneiden vikojen tarkan analysoinnin ja nopean korjaamisen. Kaukodiagnostiikassa analysointi tehdään eri paikassa kuin mittaus. Tiedot siirretään satelliittin tai puhelinlinjojen kautta maa-asemalle.</p> <p>Tässä työssä perehdyttiin kunnonvalvonnan teoreettiseen perustaan ja tutkittiin eri toteutusmahdollisuuksia laakereiden kunnonvalvontaan ja releiden vikadiagnostiikkaan. Tulosten perusteella valittiin sopiva laitteisto ohjelmistoinen sekä laakereiden että releiden osalta liitettäväksi sähköisen propulsiojärjestelmän kaukodiagnostiikkajärjestelmään. Järjestelmiä valittaessa on otettava huomioon laivojen vaikeat toimintolosuhteet. Samalla on koko ajan pidettävä mielessä kaukodiagnostiikan tuomat lisävaatimukset.</p> <p>Laakereiden kunnonvalvontaan oli tarjolla useita teknisesti erilaisia kaupallisia vaihtoehtoja. Eri vaihtoehtoja vertailtiin keskenään ja sopivin valittiin osaksi kaukodiagnostiikkaa. Valinnassa kiinnitettiin huomiota ennenkaikkea valvontamahdollisuuksien monipuolisuuteen, järjestelmän laajennusmahdollisuuksiin sekä vikaantumisen ennustustarkkuuteen.</p> <p>Suojareleiden vikadiagnostiikkaa tarkasteltiin eri lähtökohdista. Työssä keskityttiin vain yhden valmistajan laitteistoon ja etsittiin testauslaitteiston avulla paras mahdollinen järjestelmä koko verkon suojausten valvontaan. Testauksessa ja valinnassa kiinnitettiin huomiota erityisesti eri ohjelmien ominaisuuksiin ja toimintaan kuormitetussa tietokoneessa. Muita tärkeitä asioita olivat tiedonsiirto ja eri suojauskohteiden vaatiman valvonnan laajuuden määrittäminen.</p> <p>Avainsanat: Kaukodiagnostiikka, kunnonvalvonta, relesuojaus</p>			

Author:	Jukka Kortelainen		
Name of the thesis:	Remote Diagnostics of Electric Propulsion System		
Date:	10.10.1996	Number of pages:	84
Faculty:	Electrical Engineering		
Professorship:	S-81 Electric Drives and Power Electronics		
Supervisor:	Professor Matti Mård		
Instructor:	Juha Koukkari, M. Sc. (El. Eng.)		
<p>Remote diagnostics makes it possible to predict the time of occurrence of the most common faults of electric propulsion system. However, if there is a fault, it is quickly analysed and repaired by means of remote diagnostics. In remote diagnostics the measuring is carried out onboard the ship but the analysis is made at a separate location. The information is transferred through satellite or telephone lines.</p> <p>In this thesis the theory of condition monitoring was studied. Research was also made concerning the possibility to use condition monitoring with bearings and relay protection. According to the results the proper equipment for condition monitoring of bearings and fault diagnostics of relays were chosen. When choosing the equipment, the difficult conditions in ships have to be taken into account. At the same time the extra demands of the remote diagnostics have to be considered.</p> <p>There were many commercial options available for condition monitoring of bearings. Different alternatives were compared and the best system was chosen. The most important reasons in choosing the equipment were the versatility of monitoring possibilities, expansion possibilities and accuracy of prediction of faults.</p> <p>The diagnostics of protective relays was considered in different angle of view. The equipment of only one manufacturer was concentrated on. The equipment consist of many options and the most effective system was chosen to monitor the protective relays. When choosing the final equipment the attention was drawn to monitoring programs, data transfer and defining the amount and accuracy of information needed.</p> <p>Keywords: remote diagnostics, condition monitoring, relay protection</p>			

Sisällysluettelo

Alkulause.....	I
Tiivistelmä.....	II
Abstract	III
Sisällysluettelo	IV
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	VII
1 JOHDANTO	1
2 SÄHKÖINEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄ.....	2
2.1 Propulsiojärjestelmä.....	2
2.1.1 Generaattorit.....	3
2.1.2 Moottorit	3
2.1.3 Taajuusmuuttajat	4
2.2 Vikaantuminen	6
2.2.1 Pyörivät koneet.....	6
2.2.2 Elektroniikka	7
3 DIAGNOSTIIKKA	9
3.1 Kunnonvalvonta	10
3.1.1 Kunnonvalvonnan periaate.....	10
3.1.2 Järjestelmän kustannustehokkuus	13
3.1.3 Saavutettavat edut	14
3.1.4 Toimintatason valinta.....	15
3.1.5 Kohteiden valinta	16
3.1.6 Menetelmän valinta.....	17
3.2 Vikadiagnostiikka	17
3.3 Kaukodiagnostiikka.....	19
3.3.1 Laitteisto.....	19
3.3.2 Tiedon siirto	20
3.3.3 Suojaus	21
4 LAAKEREIDEN KUNNONVALVONTA	23
4.1 Laakerityypit	23
4.1.1 Vierintälaakerit.....	24
4.1.2 Liukulaakerit	25
4.2 Anturit	25
4.2.1 Siirtymäanturi.....	26
4.2.2 Nopeusanturi	27

4.2.3 Kiihtyvyyssanturi.....	28
4.3 Valvontatavat	28
4.3.1 Värähtelyn kokonaistason mittaus	29
4.3.2 Taajuusanalyysi.....	29
4.3.3 Iskusysäysmenetelmä.....	32
4.3.4 Verhokäyräanalyysi.....	33
4.3.5 Ratakäyrän mittaus.....	34
4.3.6 Akustinen emissio	35
4.3.7 Värähtelyn tilastollinen analyysi eli kurtosis	35
4.3.8 Muut valvontatavat.....	36
4.4 Mittaustulosten käsittely jatkuvatoimisessa kunnonvalvontajärjestelmässä. 37	
4.4.1 Mittaus- ja valvontayksikkö	37
4.4.2 Keskuslaitteisto	38
5 SÄHKÖVERKON VIKADIAGNOSTIIKKA.....	39
5.1 Sähköverkon suojaus.....	39
5.2 Vikatyypit.....	40
5.3 Releet.....	42
5.3.1 Moottorinsuojarele	42
5.3.2 Generaattorinsuoja	43
5.3.3 Differentiaalirele	43
5.3.4 Muuntajasuojarele eli ylivirta- ja maasulkurele	44
5.3.5 Kiskostosuoja	45
5.4 Relesuojauksen diagnostiikka	45
5.4.1 Mittaustoiminnot	46
5.4.2 Suojareleiden tiedonsiirto.....	46
5.4.3 Häiriöiden selvitys	48
5.4.4 Tietojen hyödynnettävyys	49
5.4.5 Suojareleiden itsekoestus	49
6 VALVONTAJÄRJESTELMIEN VALINTA	51
6.1 Laakereiden valvontalaitteisto.....	51
6.1.1 Vaatimukset laitteistolle.....	51
6.1.2 Azipod-yksikkö	52
6.1.3 Kaupalliset valvontalaitteistot	53
6.1.4 SKF-laitteisto	54
6.1.5 SPM-laitteisto.....	56
6.1.6 Laitteistojen vertailu ja valinta.....	57
6.1.7 Tiedonsiirto	59
6.1.8 Laakereiden lopullinen kunnonvalvontalaitteisto.	61
6.2 Relediagnostiikka.....	62
6.2.1 Vaatimukset laitteistolle.....	62
6.2.2 Vaihtoehdot diagnostiikan toteuttamiselle.....	63
6.2.3 Vaihtoehtojen testaus ja vertailu	65
6.2.4 Valinta ja toteutus	68
6.3 Liittyminen muuhun diagnostiikkaan	69

7 JATKOKEHITYSMAHDOLLISUUDET	71
7.1 Tekniikan kehityksen tuomat mahdollisuudet	71
7.2 Taajuusmuuttajien diagnostiikka	73
8 YHTEENVETO	74
VIITELUETTELO	76
LIITE 1: Oikosulkuvirran laskeminen	80

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

<i>AV</i>	käytettävyys
<i>c</i>	jännitekerroin
<i>D</i>	halkaisija
<i>dB</i>	desibelinen iskuarvo
<i>f</i>	taajuus
<i>I</i>	virta
<i>K</i>	Kurtosis-arvo
<i>L</i>	induktanssi
<i>N</i>	näytteiden määrä
<i>n</i>	kuulien lukumäärä
<i>O</i>	tuotannon keskimääräinen jalostusarvo päivässä
<i>R</i>	resistanssi
<i>S</i>	vuosittainen säästö
<i>T</i>	jakson aika
<i>t</i>	aika
<i>U</i>	jännite
<i>V</i>	seisokkipäivien määrä vuodessa
<i>X</i>	reaktanssi
<i>x</i>	poikkeama
<i>Z</i>	impedanssi

Kreikkalaiset aakkoset

α	Jännitteen vaihekulma
Δ	vaihtelu
δ	varianssin neliöjuuri
φ	jännitteen ja virran perusaaltojen välinen vaihesiirtokulma
κ	sysäyskerroin
λ	vikatiheys
θ	kosketuskulma
ω	kulmanopeus

Alaindeksit

a,b,c	vaiheet
c	äänimatto
esym	epäsymmetrinen
K	myötäverkko
k	jako-
m	maksimi
N	normalisoitu

n	nimellinen
p	pidike
s	sysäys
r	rulla/kuula
sk	sisäkehä
sym	symmetrinen
uk	ulkokehä
0	alkuarvo

Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri, monikansallinen sähkötekniikan yritys
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier-muunnos
MDT	Mean Down Time, kokonaishukka-aika
MTBF	Mean Time Between Failure, keskimääräinen aika vikojen välillä
MTTR	Mean Time To Repair, keskimääräinen korjausaika
MWT	Mean Waiting Time, odotukseen kuluva aika
NP	Neutral Point, kolmitasoinvertterin keskipiste
NPC	Neutral Point Clamped (inverter), keskipistepakotettu (invertteri)
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulointi
SPM	Shock Pulse Method, iskusysäysmenetelmä

1 JOHDANTO

Laivan sähköinen propulsiojärjestelmä on laaja ja monipuolinen kokonaisuus. Järjestelmän pääosat ovat generaattorit, moottorit, muuntajat, kuristimet, taajuusmuuttajat sekä säätöjärjestelmä.

Kiristynyt kilpailu markkinoilla vaatii, että laivat toimivat keskeytyksettä mahdollisimman vähäisellä henkilökunnalla. Laivan käyttökustannusten on oltava pienet ja kalliiden käyttökeskeytyksien lukumäärä ja kesto on minimoitava. Suuntana on, että hitaasti kehittyvät viat on pystyttävä ennustamaan, jotta kuluneet osat voidaan vaihtaa normaalien tarkastusten yhteydessä. Lisäksi mahdollisten vikatilanteiden tapahtuessa korjauksen on oltava nopeaa ja ammattitaitoista.

Vastaus markkinoiden vaatimukseen on kaukodiagnostiikka. Diagnostiikka täydessä laajuudessaan kattaa kaikki laivan sähköisen propulsiojärjestelmän tärkeimmät komponentit ja mahdollistaa komponenttien vikaennusteiden teon sekä nopean korjauksen, jolla laivan käyttökeskeytykset minimoituvat.

Tämän työn tavoitteena on toteuttaa laakereiden kunnonvalvonta sekä sähköverkon suojauksen valvonta osana kaukodiagnostiikkaa. Työn alussa tutustutaan valvonnan teoriaan ja käydään läpi eri vaihtoehtoja diagnostiikan toteuttamiselle. Käyttökelpoisimmat vaihtoehdot otetaan lähempään tarkasteluun ja lopuksi sopivin laitteisto valitaan osaksi laivan kaukodiagnostiikkajärjestelmää.

Luvussa 2 esitellään lyhyesti sähköisen propulsiojärjestelmän eri komponentit sekä säätöjärjestelmä. Luvussa 3 käsitellään diagnostiikkaa ja sen merkitystä valvonnan apuvälineenä. Siinä käsitellään erikseen kunnonvalvontaa, vikadiagnostiikkaa ja diagnostiikan erikoistapausta kaukodiagnostiikkaa. Luvussa 4 esitetään laakereiden kunnonvalvonnan teoria eri komponenttien ja vaihtoehtojen osalta. Siinä perehdytään laakerityyppeihin, antureihin, valvontatapoihin sekä mittaustulosten käsittelyyn. Luvussa 5 käsitellään sähköverkon suojauksen periaatteita teorian ja laivan verkossa käytettyjen releiden osalta. Lisäksi käydään läpi relesuojauksen diagnostiikkaa mm. mittaus-toimintojen ja laitteiston tuoman hyödyn osalta. Luvussa käsitellään lyhyesti myös eräs vikatapaus. Luvussa 6 vertaillaan eri järjestelmiä ja valitaan laivakäyttöön sopivin kokonaisuus sekä laakerinvalvonnalle että relediagnostiikalle. Kokonaisuuden valinnassa on kiinnitettävä huomiota teknisten ominaisuuksien lisäksi mm. hintaan. Luvussa 7 tarkastellaan kaukodiagnostiikan jatkokehitysmahdollisuuksia. Luvussa käsitellään nyt valittujen laitteistojen jatkokehitysmahdollisuuksia ja uusien kohteiden liittämistä diagnostiikkajärjestelmään. Uusista kohteista erityisen kiinnostavia ovat kaksi- ja kolmitasoinverttereihin perustuvien taajuusmuuttajien diagnostiikka. Työn päättää luvun 8 yhteenveto.

2 SÄHKÖINEN PROPULSIOJÄRJESTELMÄ

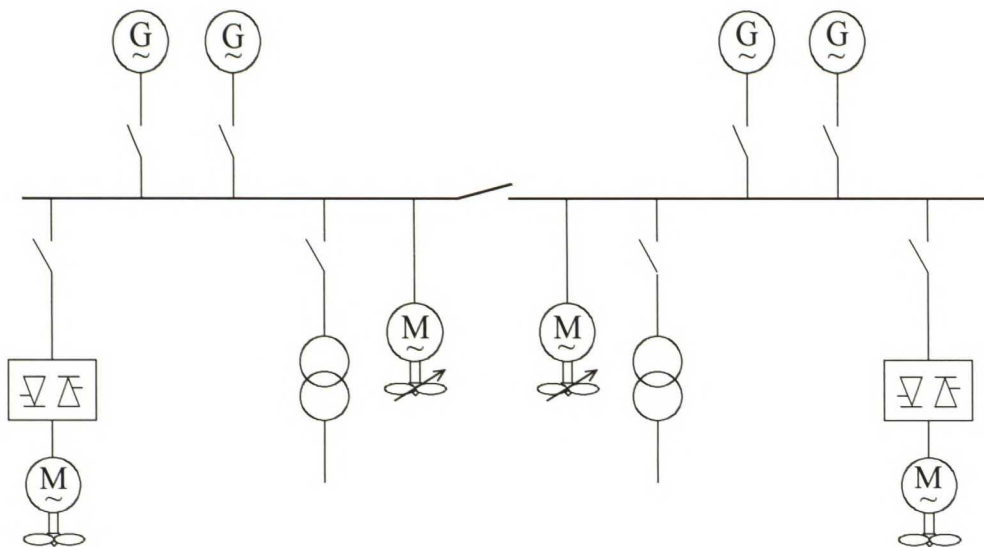
Sähköiseen propulsiojärjestelmään kuuluu kaikki se laitteisto, joka vaaditaan laivan työntövoiman aikaansaamiseen. Propulsiojärjestelmä sisältää generaattorit, potkurimoottorit, taajuusmuuttajat, laivan sähköverkon ja sen suojauksen. Luvussa 2.1 esitellään lyhyesti propulsiojärjestelmä ja sen tärkeimmät komponentit.

Vikaantumisen vaikuttaa paljon propulsiojärjestelmän suorituskykyyn käyttökeskeytyksien, turvallisuusriskien ja alentuneen käyttömukavuuden muodossa. Myös rahalliset menetykset voivat olla huomattavat. Luvussa 2.2 esitellään eri vikatyyppejä ja niiden vaikutuksia.

2.1 Propulsiojärjestelmä

Sähköistä voimansiirtoa on käytetty jo vuosikymmeniä esimerkiksi jäänmurtajien potkurikoneistoissa. Myös muissa käyttökohteissa sähkömoottorista on tullut hyvä vaihtoehto perinteiselle dieselmoottorin pyörittämälle potkurille. Sähkömoottoreiden säätöominaisuudet ovat hyvät ja niiden yhteiskäyttö on helppoa. Esimerkiksi kaapelintai putkenlaskualusten tärkein ominaisuus on paikallaan pysyminen merenkäynnistä ja tuulesta riippumatta. Tällöin tarvitaan nopeaa säätömahdollisuutta ja potkurien sujuvaa yhteiskäyttöä. Jäänmurtajissa potkuri ei saa pysähtyä, vaikka se iskee jäähän. Tämä vaatii moottorilta nopeaa vääntömomentin säätämistä ja erittäin suuria tehovaihteluita. Suurissa matkustaja-aluksissa tai erikoisaluksissa muiden kuluttajien sähköenergian tarve saattaa jopa ylittää potkurimoottoreiden tarvitseman tehon. Tällöin on edullista tuottaa sähköenergia keskitetysti kaikkiin tarkoituksiin.

Kaikkien kuluttajien tarvitsema sähköenergia tuotetaan turbo- tai dieselgeneraattoreilla laivan sähköverkkoon, johon kuluttajat on liitetty. Pääpotkurimoottorit on kytketty verkkoon taajuusmuuttajien kautta. Ohjauspotkurimoottoreita syötetään verkosta joko suoraan tai muuntajien kautta. Tällöin käytetään kääntölapapotkureita. Toinen vaihtoehto on syöttää myös ohjauspotkurimoottoreita taajuusmuuttajien kautta, jolloin kääntölapapotkureita ei välttämättä tarvita. Muut pyörivät koneet ja kuluttajat saavat sähköenergiansa jakelumuuntajien kautta. Kuvassa 2.1 on esitetty yksi ratkaisu sähköenergian jakeluun eri kuluttajille /1/.



Kuva 2.1 Esimerkki sähköisen propulsiojärjestelmän pääpiirikaaviosta

Aiemmin suuritehoiset moottorikäytöt olivat tasasähkökäyttöjä /2/. Tehoelektroniikan kehittyessä sekä tehovaatimusten edelleen kasvaessa taajuusmuuttajilla ohjatut vaihtosähkömoottorit ovat yleistyneet. Suuritehoiset laivakäytöt toteutetaan yleensä tahtimoottoreilla, joiden pyörimisnopeutta ohjataan syklokonverttereilla. Syklokonvertterin toimintaa ohjataan säätäjillä, joiden toiminta perustuu vektorisäätöön.

2.1.1 Generaattorit

Laivassa on tyypillisesti neljästä kuuteen generaattoria, joita pyörittävät dieselmoottorit. Generaattorit ovat yleensä tahtikoneita. Laakereina generaattoreilla käytetään liuku-laakereita. Generaattorit mitoitetaan 3–16 MVA :lle. Kulloisenkin kuormitustilanteen mukaisesti automatiikka kytkee verkkoon tarvittavan määrän generaattoreita ja tasaa diesel-kuormituksen.

Generaattorit syöttävät tehon päätauluun, joka on jaettu kiskokatkaisijalla kahteen osaan. Kuluttajat on jaettu tasaisesti katkaisijan molemmille puolille. Tällöin vian sattuessa sähköverkossa toinen puoli jää toimintakuntoon ja laiva on yhä ajokelpoinen. Päätaulun jännite on 660 V–11 kV ja taajuus joko 50 tai 60 Hz.

2.1.2 Moottorit

Propulsiojärjestelmään kuuluu pääpotkurimoottorit ja ohjauspotkurimoottorit. Potkurimoottorit ovat epätahti- tai tahtikoneita, joiden nimellistehot ovat tyypillisesti noin 0,5–22 MW. Ohjauspotkurimoottorit ovat yleensä epätahtikoneita, joiden nimellistehot ovat noin 200 kW–2 MW. Moottoreita syötetään taajuusmuuttajilla 0...60 Hz:n taajuudella. Laakerointi on hoidettu liuku- tai vierintälaakereilla.

Tahtimoottorit ovat hitaasti pyöriviä koneita ja niissä on avonaparoottorit, joissa roottorin napakäämit on sijoitettu irroitettavan navan napavarren päälle. Navan magneettivuo saadaan sinimäiseksi muotoilemalla koneen napakenkä sopivaksi. Tahtikonetta syötetään syklokonverterilla, jolloin moottorin syöttötaajuus on 0... 20 Hz.

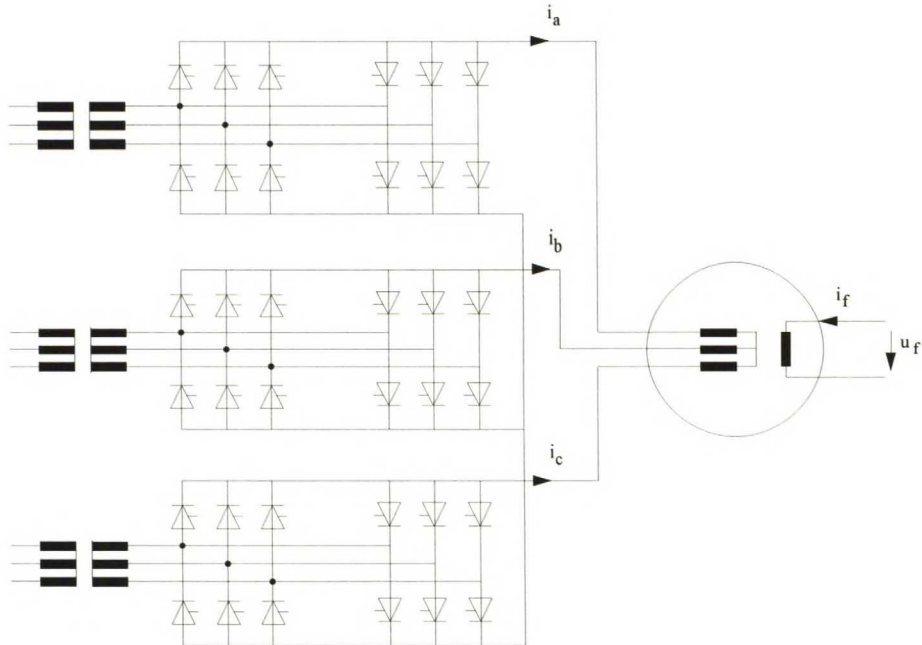
Epätahtimoottorit ovat nopeasti pyöriviä koneita, joiden syöttötaajuus on 0... 60 Hz. Epätahtikoneet ovat pelkästään staattorisyoitöisiä sähkömoottoreita ja poikkeavat tässä muista sähkömoottoreista. Ne ovat hinnaltaan edullisia ja niiden huoltotarve on vähäinen. Staattorin syöttölähteenä käytetään yleisesti joko virta- tai jännitevälipiirillä varustettua taajuusmuuttajaa. Potkurimoottoreina olevien epätahtikoneiden syötössä yleisin on kolmitasoinverterti.

Potkurimoottorit sijaitsevat normaalisti laivan sisällä, mutta uusimmissa sovelluksissa on käytetty myös Azipod-rakennetta, jossa potkurimoottori on sijoitettu laivan ulkopuolelle umpinaisen, erillisen yksikön sisään. Yksikkö kääntyy akselinsa ympäri täydet 360 astetta, joten laivan ohjattavuus paranee huomattavasti. Muita Azipodilla saavutettavia etuja ovat vähentyneet äänet ja värähtelyt laivan sisällä sekä vähentynyt polttoaineentarve. Laivan sisälle vapautuu enemmän tilaa lastille ja ylläpitokustannukset pienenevät. Moottorin laakereiksi on valittu Azipodissa vierintälaakerit, joita on helpompi valvoa kuin liukulaakereita.

2.1.3 Taajuusmuuttajat

Potkurimoottoreita ja ohjauspotkurimoottoreita syötetään taajuusmuuttajilla. Tahtimoottoreita syötetään syklokonverterilla ja epätahtimoottoreita tasajännitevälipiirillä varustetuilla taajuusmuuttajilla.

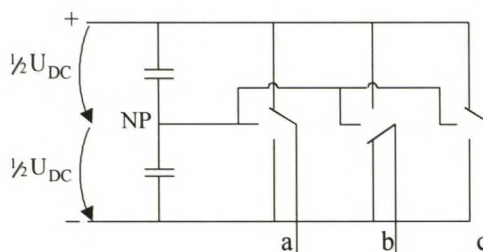
Syklokonverterin toimintaperiaate on kehitetty jo 1930-luvulla, mutta ohjaustekniikan elektroniikan kehittyminen on tehnyt säätöominaisuuksiltaan hyvän käytön kehittämisen mahdolliseksi vasta 1980-luvulla /3/. Viitteessä /4/ on esitetty kuvan 2.2 syöttömuuntajilla varustettu 6-pulssinen syklokonverteri, kun kuormituksena on tahtimoottori. KytKentä on yleinen laivakäytöissä. Yksi syklokonverterivaihe koostuu tavallisesti kahdesta vastarinnan kytketystä kuusipulssisesta tyristorisillasta. Syklokonverterivaiheiden a, b ja c syötöt on erotettu galvaanisesti toisistaan syöttömuuntajalla, jolloin syklokonverteri on voitu kytkeä tähteen. Ilman syöttömuuttajaa verkko olisi oikosulussa siltojen negatiivisten kiskojen kautta. Myös moottori on tähdessä ja tähtipiste on ilmassa. KytKentä estää nollavirran esiintymisen vaihevirroissa i_a , i_b ja i_c /5/.



Kuva 2.2 Syöttömuuntajilla varustettu syklokonvertteri ja tahtimoottori

Tasajännitevälipiirillä varustettu taajuusmuuttaja sisältää kolme erillistä osaa, joita ovat tasasuuntaaja, välipiiri ja vaihtosuuntaaja. Tasasuuntaaja on yksinkertaisimmillaan tavallinen diodisilta, joka syöttää tasoituskuristimen kautta tasajännitevälipiirin kondensaattoriparistoa. Kondensaattoriparisto yhdessä kuristimen kanssa muodostaa alipäästösuodattimen, jonka avulla diodisillan antamaa sykkivää tasajännitettä pyritään tasoittamaan. Käyttämällä suurta kondensaattoria välipiirissä saadaan tasajännitteestä jäykkä suure. Vaihtosuuntaajan tehtävänä on luoda välipiirin vakiojännitteestä amplitudiltaan ja taajuudeltaan halutun suuruinen vaihtojännite, jolla syötetään oikosulkumoottorin staattoria. Jännitteen ja taajuuden muuttaminen tapahtuu lähtöjännitteen pulssikuviota muuttamalla. Tätä pulssikuvion muuttamista kutsutaan pulssinleveys- eli PWM-moduloinniksi (Pulse Width Modulation).

Vaihtosuuntausosa voidaan toteuttaa kaksi- tai kolmitasoisena. Kuvassa 2.3 on esitetty kolmitasoinvertterin kytkinmalli.



Kuva 2.3 Kolmitasoinvertterin kytkinmalli

Kolmitasoinvertterillä saavutetaan parempi vaihtojännitteen käyrämuoto kuin kaksitasoinvertterillä. Syynä tähän on useamman jännitetason käyttö. Kuvan 2.3 kytkentää kutsutaan myös NPC-kytkennäksi (Neutral Point Clamped). Kytkennässä piste NP (Neutral Point) jakaa plus- ja miinuskiskon jännitteen kahteen yhtä suureen osaan. Samalla vaihtosuuntaajan tehoa voidaan nostaa.

2.2 Vikaantuminen

Propulsiojärjestelmissä olevien sähköisten tai sähkömekaanisten komponenttien vikaantuminen saattaa aiheuttaa vaaratilanteen laivan ohjattavuuden kärsiessä tai epämukavuutta esimerkiksi ilmastoinnin pettäessä. Laivakäyttöön tarkoitetut laitteet ovat erityisolosuhteisiin suunniteltuja, mikä ei kuitenkaan estä niiden vikaantumista. Tärinöiden ja kosteuden takia olosuhteet ovat erittäin hankalat.

Suurin osa laivojen propulsiojärjestelmän vioista ilmenee säätöelektronikassa tai mekaanisissa komponenteissa. Luvussa käsitellään vikaantumista erikseen pyöriville koneille ja elektronikalle, koska niiden vikaantumiset poikkeavat toisistaan huomattavasti.

2.2.1 Pyörivät koneet

Pyörivien koneiden viat voidaan jakaa hitaasti ja nopeasti kehittyviin. Yleisesti vian kehittymisnopeus mekaanisissa osissa riippuu koneen pyörimisnopeudesta. Hitaasti pyörivissä koneissa vikaantuminen tapahtuu hitaasti ja aiheuttaa vain harvoin odottamattomia tilanteita. Nopeasti pyörivissä koneissa vikaantuminen voi tapahtua hyvinkin nopeasti ilman, että siitä saadaan minkäänlaista ennakkovaroitusta. On myös vikoja, jotka eivät riipu pyörimisnopeudesta. Tällainen on esimerkiksi eristysten vanheneminen /6/.

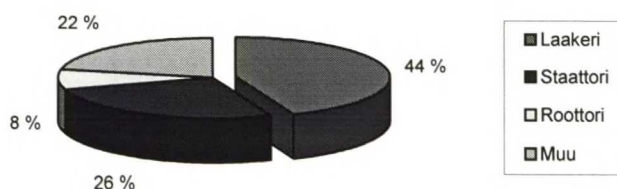
Sähkökoneiden vikaantuminen näkyy usein ensimmäisenä laakerin värähtelytason kasvamisena. Ihanteellisissa olosuhteissa oikein asennettu ja voideltu laakeri kestää vuosikymmeniä. Laakerin metalliosien väsymisen vuoksi laakerilla on kuitenkin rajallinen elinikä, jonka pituus riippuu useista tekijöistä.

Koneen roottorin tai kuormituksen epätasapaino aiheuttaa värähtelyjä koko koneeseen samoin kuin epäkeskeinen tai vääntynyt roottori. Linjausvirhe, jossa moottorin ja kuormituksen akselit ovat väärässä kulmassa toisiinsa nähden tai yhdensuuntaiset, mutta epäkeskeisesti kohdistetut, aiheuttaa suuren osan laakerivioista. Luonnollinen resonansivärähtely ja mekaanisesti huono kiinnitys aiheuttavat koko käytön hyppimistä. Laakerin voitelun tai voiteluaineen huonontuminen sekä voiteluaineen ahtautuminen laakerin ilmavälissä aiheuttavat myös värähtelyä. Lisäksi hydrauliset ja aerodynaamiset

voimat, kuten turbulenssi ja kavitaatio aiheuttavat suuria voimia koneen akselille, josta ne edelleen välittyvät laakereille /7/.

Vauriot näkyvät eri tavalla liuku- ja vierintälaakereissa. Liukulaakerivaurion kehittymisaika on hyvin lyhyt ja saattaa olla, että muutoksia värähtelytasossa havaitaan vain tänä aikana. Vaurion syntymisen jälkeen värähtelytasot voivat palata lähes ennalleen. Vierintälaakereissa sen sijaan vikaantuminen aiheuttaa jatkuvaa värähtelytason kasvamista, jota on helppo seurata /7/. Laakereita käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.

Sähkömoottoreiden vikaantumista on tutkittu useassa suuressa tutkimuksessa /8/,/9/. Niissä tutkittiin sähkömoottoreiden luotettavuutta ja vikaantumisen syitä. Vaurioiden aiheuttajat on eritelty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4 Yleisimmät moottorivika-tyypit

Kuten havaitaan, valtaosa vioista oli laakereiden aiheuttamia. Tutkimusten mukaan kolme yleisintä vaurion ilmenemistapaa olivat

mekaaninen rikkoutuminen	(37%)
ylikuumentuminen	(15%)
muu eristyksen pettäminen	(12%)

ja vikojen syntyyn vaikuttivat eniten

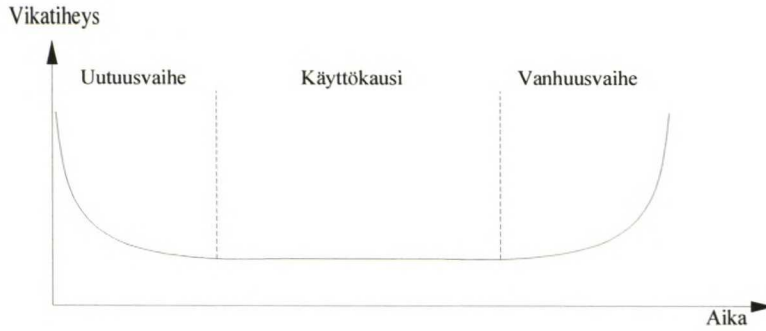
normaali iän aiheuttama kuluminen	(24%)
tärinä	(18%)
huono voitelu	(17%)

Suurin osa moottorien vioista havaitaan käytön aikana puutteellisten toimenpiteiden seurauksena, jolloin ne aiheuttavat ennakoimattoman pysähtymisen.

2.2.2 Elektroniikka

Normaalisti elektroniikan komponenttien vikaantumista mallinnetaan ns. ammekäyrällä /10/. Sen mukaan laitteen vikatiheys on suurin käyttöönottohetkellä, kun laatu- ja

valmistusviat tulevat ilmi. Uutuusvaihe päättyy kun vikatiheys on vakiintunut alhaiselle tasolle. Uutuusvaiheen jälkeen on laitteen normaali käyttökausi, jolloin vikatiheys on vakio. Laitteen alkaessa vanhentua vikatiheys alkaa jälleen kasvaa. Laitteiden käyttöikä ja vanhenemisen alkamiseen voidaan vaikuttaa oikeilla käyttöolosuhteilla ja oikein suunnitellulla huollolla. Ammekäyrä on esitetty kuvassa 2.5. Täytyy muistaa, että laitetta käytetään yleensä myös uutuusvaiheen ja vanhuusvaiheen aikana.



Kuva 2.5 Vikatiheyttä kuvaava ammekäyrä

Propulsiojärjestelmissä elektroniikka käsittää etupäässä säätö- ja ohjauselektroniikkaa. Näiden vikaantuessa ei vikaa yleensä pystytä paikallistamaan komponenttitasolle. Korjausvaiheessa vioittunut kortti korvataan kokonaan uudella ja mahdollista vikaantumista tutkitaan myöhemmin.

3 DIAGNOSTIIKKA

Nykyinen suuntaus teollisuudessa on tuotannon ja voittojen lisääminen ja samalla yksikön henkilöiden tai henkilötuntien vähentäminen. Tällaisiin tavoitteisiin tähdätessä myös koneiden vioista johtuvat käyttökeskeytykset on minimoitava. Diagnostiikka on välttämätön apuväline, kun halutaan valvoa kohteita ja pystyä ennustamaan tarpeelliset korjaukset ja niiden ajankohta sekä korjausten vaatima aika. Toisaalta diagnostiikan avulla saadaan tarkkaa tietoa nopeasti kehittyvien vikojen tapahtuessa, jolloin käyttökeskeytysten vaatima aika minimoituu nopeiden korjausten ansiosta /11/.

Diagnostiikan ja erityisesti kunnonvalvonnan käyttö propulsiojärjestelmissä on vielä varsin uutta, vaikka joihinkin yksittäisiin laitteisiin valvontaa on kehitetty. Syynä tähän on mm. laivojen vaikeat olosuhteet, jotka asettavat käytettävälle tekniikalle erityisen suuria vaatimuksia. Mittaustietoa käsiteltäessä esimerkiksi tiedonsiirron suojaus on häiriöllisessä ympäristössä oltava huippuluokkaa. Koska riittävän varman mittaustietojärjestelmän rakentaminen on ollut niin kallista, tähän mennessä on käytetty osittain ylimitoitettuja komponentteja vaurioiden välttämiseksi. Periaatteena ylimitoitettujen komponenttien käytössä on, että ne kestävät niin kauan, että hajoaminen ja siitä seuraava käyttökeskeytys ei aiheuta keskimääräisesti kovin suurta kuluja. Mukana on kuitenkin aina turvallisuusriski. Turvallisuus, tulevat standardit ja se, että diagnostiikka säästää kustannuksia pitkällä aikavälillä, on johtanut diagnostiikan nopeaan kehittämistarpeeseen myös laivaympäristössä.

Propulsiojärjestelmä sisältää lukuisia mekaanisia ja sähköisiä prosesseja. Monimutkaisten järjestelmien tehokas ja turvallinen toiminta ja ylläpito vaatii työkaluja, jotka antavat käyttäjälle selkeän käsityksen osien ja koko järjestelmän kunnosta /12/. Tämä luo tarpeen tehokkaalle tiedon keruulle ja tiedon käsittelylle, varsinkin kun mitattavaa ja käsiteltävää tietoa on laivoilla paljon, mutta henkilökuntaa yhä vähemmän. Tämän vuoksi automaattiset mittaustoiminnot ovat saamassa yhä enemmän kannatusta. Näin mittaustoiminta ei rasita enää miehistön kapasiteettia. Tiedon analysointi ja tehtävät johtopäätökset ovat yhtä suuri osa diagnostiikkaa kuin itse tiedon keräys. Kapasiteetin vähyyden ja osittain tiedon puutteen vuoksi on tiedon käsittelyn tapahduttava suurelta osin laivan ulkopuolella, asiantuntijoiden luona. Tämä luo tarpeen diagnostiikan erikoissovellukselle kaukodiagnostiikalle. Siinä mittaus tapahtuu laivalla ja tieto siirretään puhelinlinjoja tai satelliittia käyttäen maa-asemalle, missä asiantuntijat tekevät analyysin kerätyistä tiedoista.

Diagnostiikkalaitteiston valinta ei ole aina tekninen tehtävä. Ratkaisut riippuvat myös yrityksen kunnonvalvontapolitiikasta, joka on läheisesti riippuvainen rahasta. Tällöin

arvioidaan kohteen todellinen tärkeys järjestelmän kannalta. Yleensä tämä vaikeuttaa päätöksentekoa ja joudutaan tekemään kompromisseja laadun ja hinnan välillä.

Tässä luvussa käydään läpi diagnostiikan osa-alueet. Hitaasti kehittyvillä vioilla diagnostiikka on kunnonvalvontaa, jolloin viat pyritään ennustamaan. Nopeasti kehittyvät, monimutkaisten järjestelmien viat analysoidaan vikadiagnostiikan avulla. Tavoite on rakentaa kokonaisuus, joka sisältää sekä kunnonvalvontaa että vikadiagnostiikkaa. Oma kappale on lisäksi kaukodiagnostiikalle, jossa selvitetään kaukodiagnostiikan periaatteet ja esitellään nykyinen käytössä oleva laitteisto tiedon siirtoa varten.

3.1 Kunnonvalvonta

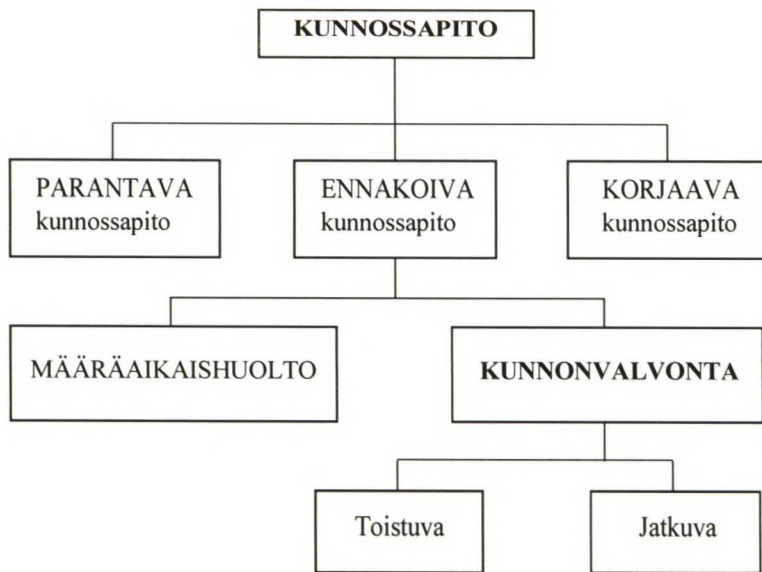
Kunnonvalvonta täyttää täydellisenä toteutuessaan kunnossapitäjän unelman. Laitteet huolletaan tarpeen vaatiessa muiden seisokkien yhteydessä, jolloin yllättäviä vikaantumisia ei esiinny ja käytettävyys lähenee sataa prosenttia. Käyttökelpoista laitteistoa suunniteltaessa tulee pitää mielessä, että tavoitteena on kokonaiskustannusten aleneminen. Sopiva järjestelmä valitaan käyttökohteesta riippuen. Luonnollisesti järjestelmän toiminnan kannalta tärkeimmät kohdat on syytä varustaa kattavilla kunnonvalvontavälineillä.

Kunnonvalvonta on kehitetty erityisesti asteittaisen kunnan huononemisen ilmaisuun. Se perustuu mittauksiin, joiden tarkoituksena on antaa tietoa koneen kunnosta ja siinä tapahtuvista muutoksista. Tavoitteena on havaita koneen alkava vioittuminen niin aikaisin, että oikein käyttö- ja huoltotoimenpitein voitaisiin estää koneen lopullinen vaurioituminen. Lisäksi tavoitteena on saada tietoa koneen huollon tarpeesta, jotta huoltotoimenpiteet voidaan suorittaa oikeaan aikaan ja oikeille kohteille /13/.

Kunnonvalvonnassa kiinnostaa erityisesti siitä saatavat edut. Ne esitetään omana lukuna. Samoin käsitellään kunnonvalvonnan periaate, järjestelmän käyttövarmuus sekä järjestelmän valintaan vaikuttavat seikat.

3.1.1 Kunnonvalvonnan periaate

Kunnonvalvonta on osa kunnossapitoa, jonka tavoitteena on laitteiden mahdollisimman korkea laatu ja käytettävyys /14/. Molemmat tavoitteet käsittävät asioita, joilla hankitaan, ylläpidetään ja parannetaan käyttövarmuutta. Onnistuessaan kunnossapito näkyy matalana kokonaiskustannustasona. Kunnossapidon strategioiden jako on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1 Kunnossapitotoiminnan jako /13/

Parantava kunnossapito kohdistuu laitteiston rakenteeseen. Sillä tarkoitetaan ratkaisuja, joilla helpotetaan laitteiston tarkkailua, huollon suorittamista tai laitteiston toimintaolosuhteiden parantamista, kuten esimerkiksi vanhenemista nopeuttavien tekijöiden poistamista tai lieventämistä. Parantavalla kunnossapidolla voidaan pienentää laitteen vikaväliä (MTBF), koska laitteen toimintaolosuhteet paranevat.

Korjaava kunnossapito käsittää vikaantuneen laitteen vian etsimisen ja korjaamisen. Tapa on passiivinen kunnossapitotapa, sillä laitteen annetaan käydä kunnes se vaurioituu. Korjaavaa kunnossapittoa voidaan käyttää, kun on olemassa varajärjestelmät. Tuotannon menetykset eivät ole suuria, kun prosessia voidaan jatkaa varalaitteilla. Vaurion jälkeen kone tai sen osa korjataan hyväksyttävään kuntoon. Laitteen korjaus on tapauksesta riippuen joko tilapäinen tai lopullinen. Tilapäisen korjauksen tarkoitus on siirtää varsinainen korjaus edullisempaan ajankohtaan, kuten päiväsaikaan tai seuraavaan suunniteltuun seisokkiin. Korjaava kunnossapito voi tulla kalliiksi johtuen tuotantomenetyksistä, yllättävien vaurioiden aiheuttamista seurannaisvaurioista sekä henkilövahingoista /15/.

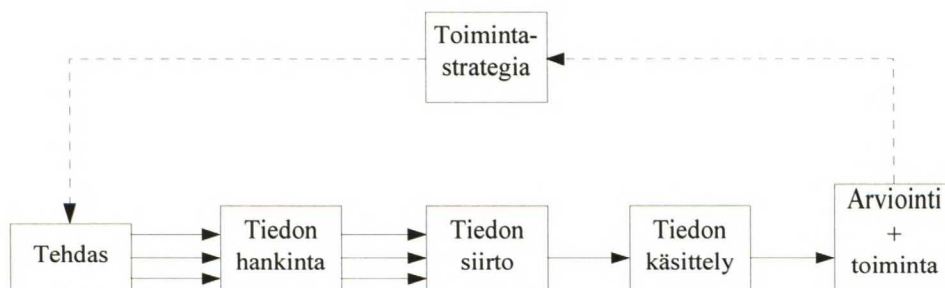
Ennakoivalla kunnossapidolla tarkoitetaan kunnossapitotyötä, joka tehdään ennalta laaditun ohjelman mukaisesti. Tavoite on estää kunnossapidettävän kohteen viat kokonaan. Ennakoiva kunnossapito toteutetaan joko määräaikaishuollolla tai kunnonvalvonnalla.

Määräaikaishuollossa kone tai sen komponentti pyritään pitämään toimintakunnossa ennalta arvioiduin välein suoritetuilla kunnossapitotoimenpiteillä ja tarkastuksilla. Määräaikaishuoltoa käytetään yleisesti, kun laitevaurio aiheuttaa suuria tuotannonmenetykskustannuksia. Tällaisen toiminnan pulmana on väliaikojen oikea mitoittaminen. Eri konekomponenttien kestoviikat vaihtelevat kuormitustilanteista yms. johtuen runsaastikin. Jos toimenpiteiden väli valitaan liian lyhyeksi, laitetta huolletaan tarpeettomasti, mikä

aiheuttaa kunnossapito- ja seisokkikustannusten nousua sekä mahdollisista inhimillisistä virheistä aiheutuvia seurannaisvaurioita lisäkustannuksineen. Toimenpiteiden välin ollessa liian pitkä ollaan lähes korjaavaa kunnossapitoa vastaavassa tilanteessa. Määräaikaishuollossa huoltoväli on vakio. Tätä käytetään yleisesti laivan huollossa, mutta on kohteita joiden vikaantumisen tai eliniän hajonta on hyvin suuri. Sopivan vaihtovälin määrittäminen on vaikeaa ja laitteen turhassa purkamisessa on aina vikautumisriski /16/.

Kunnonvalvonnassa pyritään ennustamaan hetki, jolloin laite tulee toimintakyvyttömäksi. Tämä edellyttää laitteen kunnan mittaamista jollakin tavoin. Määräaikaishuoltoon verrattuna turhaa työtä ei tehdä, koska huoltotoimet käynnistetään vasta vaurion oireiden ilmestyttyä. Käytössä kunnonvalvonnan elementtejä ja kilpailuvaltteja ovat jatkuvat kunnonvalvontamittaukset, nopea huollon saatavuus, varaosien nopea toimitus ja asennus sekä valmius oikeiden toimenpiteiden suorittamiseen tarvittaessa. Parhaimmillaan tilanne on sellainen, että yllättäviä vikatilanteita ei pääse syntymään ja huollot sekä korjaustoimenpiteet suoritetaan suunnitelmallisesti yhtä aikaa muiden seisokkien kanssa. Kunnonvalvonta voidaan toteuttaa jatkuvana valvontana tai toistuvina mittauksina /16/.

Kunnonvalvonta sisältää tiedon hankintaa, tiedon siirtoa, tiedon käsittelyä sekä arviointia kuvan 3.2 esittämässä järjestyksessä /17/. Tehtävät sisältävät erilaisia asioita riippuen siitä, käytetäänkö automaattista vai manuaalista valvontaa.



Kuva 3.2 Kunnonvalvontatehtävät

Tietoa hankitaan automaattisessa tiedonkeruujärjestelmässä jatkuvasti. Tietokone ohjaa mittaus toimintoja ja tietää kiinteiden mittalaitteiden sijainnin ja tarkoituksen, jotta tiedon lähde voidaan paikallistaa. Manuaalisessa järjestelmässä tiedot kerätään tietyin väliajoin liikuteltavalla mittalaitteella. Tulokset kirjataan muistiin myöhempää käsittelyä varten. Hankitun tiedon tallentaminen on tärkeää, sillä kunnonvalvonnassa mitaustietojen vertailu aikaisempiin arvoihin kertoo jo yksinään hyvin paljon.

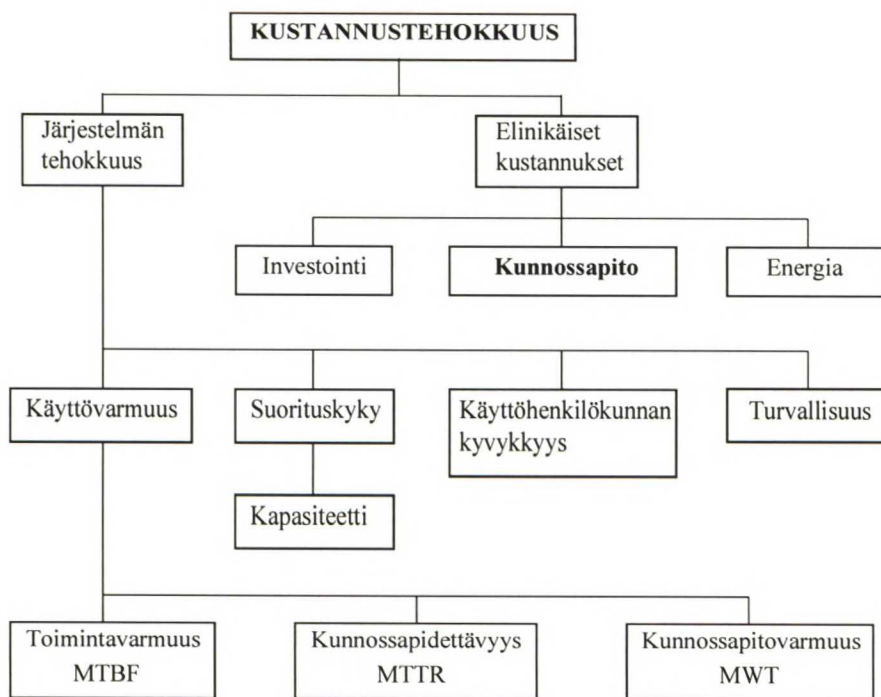
Tieto siirretään joko automaattisesti tai manuaalisesti. On tärkeää huolehtia, että viestin sanoma ei muutu siirron aikana häiriöistä tai tiedonsiirtokatkoksista johtuen.

Tiedon käsittely on tässä yhteydessä laaja käsite. Se tarkoittaa tarpeen vaatiessa hankitun tiedon jatkokäsittelyä tietokoneella, mutta se pitää sisällään myös mittaus-tietojen analysointia.

Arviointi ja toiminta on johtopäätösten tekemistä ja se johtaa tarvittaessa palautteeseen ja seurauksiin, jotka näkyvät jopa toimintatapojen tai -strategian muuttumisena.

3.1.2 Järjestelmän kustannustehokkuus

Järjestelmän kustannustehokkuuden rakentuminen on esitetty kuvassa 3.3. Elinikäiset kustannukset vaikuttavat laitteen hankintapäätökseen ja laitetoimittajan valintaan. Näistä huolehditaan taloushallinnon kanssa tehtyjen selvitysten perusteella. Järjestelmän tehokkuus muodostuu kuvan 3.3 mukaisesti neljästä seikasta, joista laitteen suorituskyky ja turvallisuus muotoutuvat jo suunnittelupöydällä. Käyttöhenkilökunnan kyvykkyyteen voi toimittaja vaikuttaa uutta laitetta koskevalla koulutuksella.



Kuva 3.3 Kustannustehokkuuden rakentuminen /13/

Käyttövarmuuden mittasuure on käytettävyyys AV kaavan (3.1) mukaan. Käytettävyyys on todennäköisyys, jolla laiteyksikkö mielivaltaisella hetkellä on annetun aikavälin vähintään tietyssä valmiudessa tai tietyssä toimintakunnossa annetuissa käyttö- ja ympäristöolosuhteissa.

Toimintavarmuutta voidaan mitata aikakäsitteellä MTBF (Mean Time Between Failures), joka on keskimääräinen aika vikojen välillä. MTBF on laitteelle ominainen

suure, mutta siihen vaikuttavat myös käyntiympäristö, käyttäjä ja jossain määrin myös kunnossapitotoimenpiteet. MTBF:n käänteisarvo on vikatiheys λ . Toimintavarmuuteen vaikuttavat mm. itse konstruktio, varakoneet, kunnossapito ja käyttäjän osaaminen.

Kunnossapidettävyyden mittana on MTTR (Mean Time To Repair) eli keskimääräinen korjausaika. Tähän luetaan vain kunnossapitotoimenpiteiden vaatima seisonta-aika. Varaosien ja muiden resurssien odotukseen kuluva aika ei lueta mukaan, jolloin MTTR on pääasiassa laitteelle ominainen suure. Kunnossapidettävyyteen vaikuttavat vikojen havaittavuus, rakenteen sopivuus ja laitteiston korjattavuus.

Kunnossapitovarmuus on kunnossapito-organisaation toimintavalmiutta kuvastava aikakäsite MWT (Mean Waiting Time). MWT tarkoittaa resurssien odottamiseen kuluva aika. Kunnossapitovarmuuteen vaikuttavat kunnossapitoresurssit, kunnossapitohenkilöstön kyvyt, diagnostiikkalaitteisto, korjausvälineistö, varaosahuolto, tekniset dokumentit sekä hallinto /18/.

Viasta johtuva kokonaishukka-aika MDT (Mean Down Time) on MWT:n ja MTTR:n summa $MDT = MWT + MTTR$. Laitteiston käytettävyys AV lasketaan /18/

$$AV = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (3.1)$$

3.1.3 Saavutettavat edut

Oikein suunnitellulla ja organisoidulla kunnonvalvonnalla voidaan saavuttaa seuraavia etuja /19/:

1. Koneen tai laitoksen käyttöhyötysuhde kasvaa ja kunnossapitokustannukset vähenvät, kun yllättävät seisokit voidaan estää havaitsemalla koneen vikautuminen riittävän aikaisin ja korjaukseen käytettävä aika voidaan minimoida suunnitelmoidulla huoltotoiminnalla.
2. Mittaavan toiminnan antama hälytysaika parantaa turvallisuutta, kun yllättävät pysäytykset voidaan estää. Turvallisuusnäkökohdat korostuvat erityisesti liikennevälineissä kuten laivoissa, joista erityisen tärkeitä ovat esimerkiksi vaarallisia aineita käsittelevät laitteet kuten tankkerit ja korkeapainelaitteet.
3. Käyttövarmuus kasvaa ja tuotannon laatu paranee niillä koneilla, joiden kuormitusta ja nopeutta voidaan säätää koneen kunnon mukaan.
4. Takuuajan lopussa tai korjausten jälkeen suoritettut mittaukset ja vertailu uutena saatuihin arvoihin ovat objektiivisia tuloksia arvioitaessa toimitusten onnistuneisuutta.

Luonnollisestikin onnistuneet tulokset kunnonvalvonnasta tulevat vasta, kun käyttöhenkilökunta on tottunut uuden valvontalaitteiston käyttöön. Kokemusta tarvitaan myös vaurioiden kehittymisen arvioinnissa ja sitä kautta luotettavien tulosten saannissa.

3.1.4 Toimintatason valinta

Toimintatasolla tarkoitetaan sitä laajuutta, millä laitoksen koneita valvotaan /18/. Laajimmillaan valvotaan koko laitoksen kaikkia koneita jatkuvatoimisella kunnonvalvontajärjestelmällä. Yleisimmin diagnostiikassa käytetään jatkuvatoimisia järjestelmiä, joilla valvotaan vain laitoksen avainkoneita, joiden merkitys tuotannolle on suurin. Yksinkertaisin järjestelmä kattaa vain kriittisimmät avainkoneet ja valvonta voi tapahtua jaksottaisesti esimerkiksi kannettavilla laitteilla /19/.

Oikean toimintatason valinta edellyttää kunnonvalvontajärjestelmän taloudellisen kannattavuuden arvioimista. Kokeellisten tutkimusten mukaan /18/ on havaittu, että kunnonvalvonnan avulla voidaan estää noin 75% yllättävistä seisokeista. Siten vuosittainen säästö S , joka saavutetaan pienentyneenä tuotannon menetyksenä, on

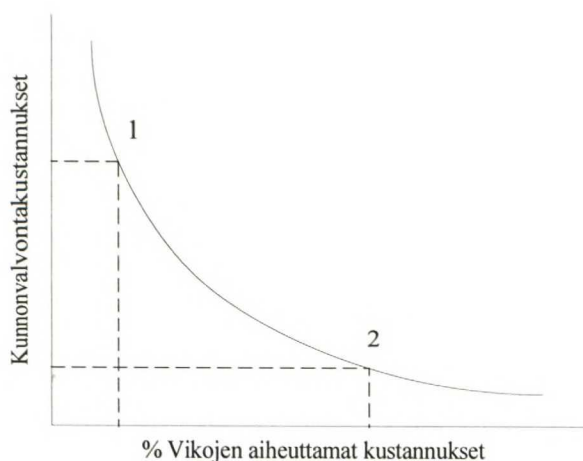
$$S = V \cdot O \cdot 75\% \quad (3.2)$$

missä V = yllättävien seisokkipäivien määrä vuodessa.

O = tuotannon keskimääräinen jalostusarvo päivässä

Kaava (3.2) on kehitetty teollisuuteen, missä valmistetaan yhtä tuotetta tai tuotteita ja seisokit näkyvät suoraan vähentyneinä tuotteiden määränä. Laivaympäristö on hieman erilainen, mutta sovellettuna voi kaavaa (3.2) käyttää myös laivoihin. Tuotannon keskimääräinen jalostusarvo tosin vaihtelee laivatyyppistä riippuen. Matkustajalaivalla tai rahtilaivalla voi yllättävän vian takia koko matka peruuntua ja menetetty tuotto on suoraan matkasta saatava korvaus. Peruuntuneesta risteilystä annetaan usein korvaukseksi liput toiselle risteilylle. Yllättävien vikojen aiheuttamat ylimääräiset viiveet aiheuttavat myös huomattavia kustannuksia. Samoin jäänmurtajan vikaantuminen talvella aiheuttaa ylimääräisiä viiveitä satamissa, mistä taas on seurauksena huomattavia menetyksiä kolmansille osapuolille mm. myöhästymissakkojen muodossa. Vuosittaiseen säästöön on laskettava myös säästyneet korjauskustannukset. Kaava (3.2) ei ota huomioon onnettomuudesta aiheutuneita menetyksiä, kuten laivan tai ihmishenkien menetys. Laivojen tapauksessa ei korjaus aina onnistu paikan päällä, vaan pahimmissa tapauksessa laiva joudutaan hinaamaan telakalle. Tällöin mukaan lasketaan vielä hinauksesta ja telakoinnista aiheutuvat ylimääräiset kulut.

Kuvassa 3.4 on esitetty periaatteelliset kunnonvalvontakustannukset vikojen aiheuttamien kustannusten funktiona /18/.



Kuva 3.4 Kunnonvalvontakustannukset vikakustannuksien funktiona

Kuvasta nähdään miten kohdassa 2 kunnonvalvontakustannusten ollessa pienet, viat aiheuttavat suuret kustannukset. Kohdassa 1 kunnonvalvontalaitteisto on parempi ja samalla vikakustannukset ovat vähäiset. Kohdassa 1 selvittää pienemmillä vuosittaisilla kustannuksilla /18/.

3.1.5 Kohteiden valinta

Valittaessa yksittäistä laitetta kunnonvalvonnan kohteeksi on otettava huomioon sen ylläpitävistä vaurioitumisesta aiheutuvat kustannukset, vaurioitumisesta seuraava turvallisuusriski, laitteen huollettavuus, luoksepäästävyys sekä mahdolliset aikaisemmat käyttökokemukset huollettavuudesta.

Syitä, jotka puoltavat kohteen valintaa valvonnan piiriin ovat /18/

- turvallisuusriski oleellisesti kasvaa vaurion sattuessa,
- kohde eristetty tai vaikeasti saavutettava,
- huolto mahdollista vain tiettyinä, harvoina ajankohtina,
- vaurion kehittyminen on nopeaa,
- uudet konstruktiot, joissa voi esiintyä suunnitteluvirheitä tai vastaavia ongelmia,
- käyttöhenkilöstön ei oleteta pystyvän havaitsemaan vaurion kehitystä, kalliissa tai suuren vaurion aiheuttavassa laitteessa,
- vikaantuminen pysäyttää isomman prosessin,
- standardikohde eli ei jouduta hankkimaan erikoista mittalaitteistoa vain yhteen kohteeseen.

Laivan propulsiosysteemissä lähes kaikki laitteet ovat edellä kuvatulnaisia, taloudellisia menetyksiä aiheuttavia ja hankalia korjata paikan päällä.

3.1.6 Menetelmän valinta

Oikea menetelmä koneen kunnon valvomiseksi on sellainen, joka parhaiten ilmaisee koneen kunnossa tapahtuneen muutoksen. Menetelmän on annettava riittävä hälytysaika havainnon ja vaurioitumisen välille. Lisäksi sen on eliminoitava kokeellisesta menetelmästä johtuvat satunnaiset vaihtelut perättäisten mittausravojen välillä ja siedettävä hyvin ympäristön olosuhteita kuten lämpöä, kosteutta ja sähköhäiriöitä.

Oikean mittaussuureen löytämiseksi on selvitettävä mistä ja miten kone todennäköisimmin vaurioituu. Tätä selvittäessä on otettava huomioon /20/

- koneen käyttötapa
- käyttöolosuhteet verrattuna suunnitteluparametreihin
- koneenosien tyypit kuten laakerit, tiivisteet, perustus ja kytkimet
- kytkimellä liitetyt muut koneet.

Oikeaa kunnonvalvontamenetelmää valittaessa olisi muistettava /18/, että on valittava aina yksinkertaisin ja edullisin mahdollinen vaatimukset täyttävä menetelmä. On myös otettava huomioon, että jatkuva kunnonvalvontamenetelmä on jaksottaista parempi silloin, kun todennäköisen vaurion kehityskulusta ja kehitysjasta ei ole kokemuksia.

Valinnassa vaikuttaa myös, onko valvonta teknisesti mahdollista. Alkavan vaurion on annettava itsestään jotain merkkejä. Näiden merkkien tulee olla niin selviä, että olemassa tai kehitettävissä olevat anturit, analyysimenetelmät ym. pystyvät ne havaitsemaan. Lisäksi täytyy huomioida kuinka kattava menetelmä on. Onko esimerkiksi olemassa vaurioitumismekanismia, joita tällä menetelmällä ei huomata ja mikä on niiden osuus. On myös huomioitava kuinka paljon informaatiota menetelmä antaa. Vian ilmaisuuden tulee olla riittävän tarkka ja varma /19/.

3.2 Vikadiagnostiikka

Tavoitteena on, että alkavat viat havaitaan ja niiden kehittyminen ennustetaan. Kun muutokset ovat nopeita, ennustaminen ei ole mahdollista. Diagnostiikan täytyy ottaa tämä huomioon /12/. Mekaanisilla osilla muutokset ovat yleensä hitaita, mutta sähköisellä järjestelmällä nopeita. Kun muutokset ovat nopeita, muutoksen seurauksena on vika, joka aiheuttaa useimmiten järjestelmän tai sen osan pysähtymisen. Tällöin tavoite on vian mahdollisimman nopea korjaaminen ja sitä auttaa tarkka tieto vikatapahtumasta. Paras tieto viasta saadaan seuraamalla verkon sähköisiä suureita kuten jännitettä ja virtaa. Muutokset ovat niin nopeita, että ilmiöt on saatava muistiin myöhempää tarkastelua varten. On pidettävä huoli, että valvotaan tarpeeksi useaa kohdetta, jotta vaurion tapahtuessa voidaan vikakohta ja vian syy ilmoittaa nopeasti ja varmasti.

Vikadiagnostiikassa käytetään kiinteitä mittalaitteita ja tietokoneohjattavaa jatkuvaa mittauksia, koska etukäteen ei voida tietää milloin mittaus on tehtävä. Mittaussignaalien tallennus tapahtuu automaattisesti vian ilmetessä käyttöohjelman määräämällä tavalla esimerkiksi tietokoneen kovalevyille. Ohjelmalla määrätään miten tallennus eri mittauspisteissä tapahtuu. Hyvässä valvontaohjelmassa on oltava useita eri valvonta- ja tallennusvaihtoehtoja. Esimerkiksi mittauspisteet on pystyttävä käymään läpi ja tuloksien on oltava tallennettavissa haluttuun paikkaan. Tärkein tehtävä vikadiagnostiikalla on kuitenkin tallentaa kaikkien mittauspisteiden tiedot vikahälytyksen tullessa.

Vikahälytys tapahtuu vasta, kun vika on tapahtunut ja aiheuttanut kielletyn arvon jossain järjestelmän kohdassa. Ei riitä, että mittaus tallennetaan vikatapahtumasta alkaen, sillä ilmiöt ovat useimmiten niin nopeita, että kaikki mielenkiintoinen ja analyysin kannalta arvokkain tieto olisi jo kadonnut. Niinpä vikadiagnostiikan jatkuvassa valvonnassa olevat mittauslaitteet on varustettava muistilla. Tällaisia laitteita kutsutaan usein häiriötietojen tallentimiksi. Muistin avulla saadaan signaalista talletettua myös se osa, joka aiheuttaa hälytyksen. Tallennin sisältää muistipuskurin, jonka täyttymiseen voidaan käyttöohjelmistolla vaikuttaa. Voidaan esimerkiksi valita, että hälytyksen tullessa pus-kuri täyttyy enää tietyn ajan, joka on puskurin muistista tietty prosentti. Koska ennen hälytystä tullut tieto on tärkeintä, jätetään sille tiedolle myös suurin osa muistista käyttöön. Joskus jopa 90% muistin kapasiteetista. Jokaisessa mittauspaikassa täytyy lisäksi erikseen miettiä, miten pitkältä aikaväliltä signaalista halutaan tietoa. Mitä pidempi aika halutaan tallentaa, sitä enemmän muistia tarvitaan.

Vikadiagnostiikka valvoo täydessä laajuudessaan koko laivan propulsiojärjestelmässä käytettävää sähköjärjestelmää. Tällöin valvottavana on useita erityyppisiä kohteita taajuusmuuttajista releisiin. Sähköiselle järjestelmälle on tyypillistä, että vian ilmetessä, se aiheuttaa vikoja tai hälytyksiä muualla sen mukaan, ovatko suojat toimineet vai eivät. Diagnostiikan on kyettävä selvittämään, mikä tapahtuma aloitti koko ketjun. Tätä varten diagnostiikkajärjestelmässä on oltava kello, joka synkronoi kaikki vikadiagnostiikan piiriin kuuluvat tallentimet. Vian aikana talletettujen hälytyksien ja käyrämuotojen on oltava selkeästi ajan suhteen eroteltavissa, jotta vian alkamiskohta nähdään yksiselitteisesti mittaustiedoista /21/.

Koska sähköjärjestelmässä on lukemattomia mahdollisuuksia mittauspisteiden valitsemiseksi, ei kaikkea mahdollista pystytäkään mittaamaan. On valittava mikä paikka on tärkeä vikojen alkuperän selvittämiseksi. Tämän jälkeen valitaan se laajuus ja tarkkuus, joka vaaditaan tavoitteiden toteuttamiseksi. Laitteiston valinta tapahtuu hyvin pitkälle samalla tavalla kuin kunnonvalvonnassa luvuissa 3.1.4–3.1.6 esitettiin.

Vikadiagnostiikka mahdollistaa entistä paremmin laitteiston jatkuvan kehittämisen. Se toimii korjausten ohessa myös tuotekehityksen tärkeänä tietolähteenä. Vian tullessa saadaan tarkat tiedot, joiden avulla todellista vian aiheuttajaa voidaan seuraavista tuotteista muuttaa.

3.3 Kaukodiagnostiikka

Kunnonvalvonta- ja diagnostiikkalaitteistot ovat perinteisesti suunniteltu voimalaitoksiin tai paperitehtaisiin, missä käyttöinsinöörit ja kunnossapitohenkilökunta ovat paikan päällä. Laivassa vastaava henkilökunta on paikan päällä, mutta vakavassa vikatilanteessa joudutaan usein kääntymään suunnittelun tehneiden asiantuntijoiden puoleen. Jotta diagnostiikkalaitteistosta saataisiin laivoissa sama hyöty kuin maasovelluksissa, täytyy tarvittava analysoimista vaativa tieto siirtää laivasta paikkaan, jossa tarvittava osaaminen löytyy. Tällöin puhutaan kaukodiagnostiikasta. Kaukodiagnostiikassa mitausten keräys suoritetaan mittauskohteessa ja analysointi tietoliikenneyhteyden toisessa päässä, mistä löytyy tarvittava tietokonekapasiteetti, sopivat ohjelmistot ja ennen kaikkea asiantuntemus. Analyysin valmistuttua ilmoitetaan laivalle tarvittavista toimenpiteistä tai lähetetään korjaushenkilöitä paikalle.

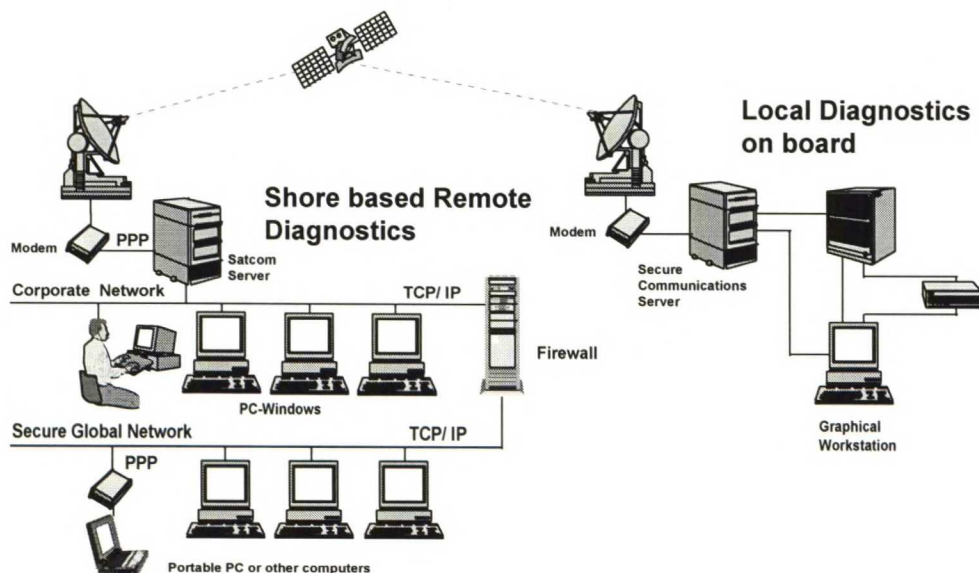
Kaukodiagnostiikka mahdollistaa tiedon siirron myös laivan suuntaan. Esimerkiksi ohjelmistoista pystytään lähettämään uudet versiot laivalle. Joitain käskyjä on myös mahdollista lähettää mittausohjelmistoille. Periaatteessa samojen yhteyksien kautta olisi mahdollista vaikka säätää laivan koko propulsiojärjestelmää, mutta suoritettavat käskyt pidetään sellaisina, että järjestelmään ulkopuolelta tunkeutuva ei pysty saamaan laivalle mitään vahinkoa aikaan.

Tässä työssä ei keskitytä kaukodiagnostiikan kehittämiseen vaan sen soveltamiseen olemassa olevalla tiedonsiirtolaitteistolla. Kun kaukodiagnostiikkaa käytetään, se täytyy ottaa huomioon diagnostiikkalaitteistoja valittaessa. Käytettävien ohjelmien ja liityntöjen on esimerkiksi oltava sellaisia, että ne soveltuvat kaukodiagnostiikalle. Erityisen tärkeitä kohtia ovat automaattinen tiedonkeruu ja tallennus. Ohjelmien on myös käynnistytävä automaattisesti tietokoneen käynnistyessä. Samoin on varmistuttava, että tieto ei vääristy siirrettäessä tietoa laivalta maa-asemalle. Luonnollisesti on myös varmistuttava, että asiattomat eivät pääse tietoon käsiksi, jotta väärinkäyttö ei ole mahdollista. Seuraavassa esitellään lyhyesti käytössä oleva tiedonsiirtolaitteisto ja käsitellään tiedon siirtoa ja suojausta omissa luvuissaan.

3.3.1 Laitteisto

Tiedonsiirtolaitteisto koostuu maa-asemalla ja laivalla olevista laitteista. Maa-aseman tietokoneilla sijaitsevat tiedon analysointiin tarvittavat ohjelmat. Maa-asemalla sijaitsee myös palvelin, jonka kautta usealla henkilöllä on mahdollisuus käsitellä tietoa. Myös maa-aseman ulkopuolelta voi palvelimen muodostamaan verkkoon liittyä, mutta silloin täytyy ohittaa monitasoinen suojausjärjestelmä, jolla estetään tietojen luvaton käyttö. Maa-aseman palvelimesta on tietoliikenneyhteys laivan palvelimeen. Käyttäjät voivat halutessaan ottaa laivalle yhteyden omilta tietokoneiltaan ja kerätä tarvittavat tiedot analysointia varten.

Yhteydenotto tapahtuu laivalla olevaan palvelimeen, joka kommunikoi laivalla sijaitsevien tiedonkeruu-tietokoneiden kanssa. Tietokoneissa sijaitsevat kunnonvalvonta- ja vikadiagnostiikkajärjestelmät. Niiden kautta voidaan tiedon keruun lisäksi tehdä tai muuttaa diagnostiikan asetuksia. Lisäksi jokainen valvontaohjelmisto tekee valvottavan kohteen mittauksesta tai hälytyksestä tiedoston koneen kovalevyille. Kuvassa 3.5 on periaatekuvaus kaukodiagnostiikassa käytettävästä laitteistosta.



Kuva 3.5 Kaukodiagnostiikkalaitteiston periaatekuvaus

Kaukodiagnostiikka on laivalla täysin erillinen järjestelmä, joka käsittää omat tietokoneet ja oman palvelimen ylläpitämän tietokoneverkon. Diagnostiikkalaitteisto ei käytä laivan yleistä tietokoneverkkoa eikä kuormita mitään muutakaan laivan järjestelmää /21/. Tehonsyöttö täytyy järjestää muista laitteista erillisenä, jotta diagnostiikka toimii myös sähkökatkosten aikana.

3.3.2 Tiedon siirto

Tällä hetkellä tietoa pystytään siirtämään laivan ja maa-aseman välillä NMT- tai GSM-puhelimen kautta tai Inmarsat B -satelliitin kautta. Satelliitilla saadaan joko digitaalinen tai analoginen yhteys. Inmarsatin kautta yhteys laivaan saadaan aina, kun laiva on normaalilla reitillään. Puhelinyhteys toimii, kun laiva on satamassa tai muuten lähellä

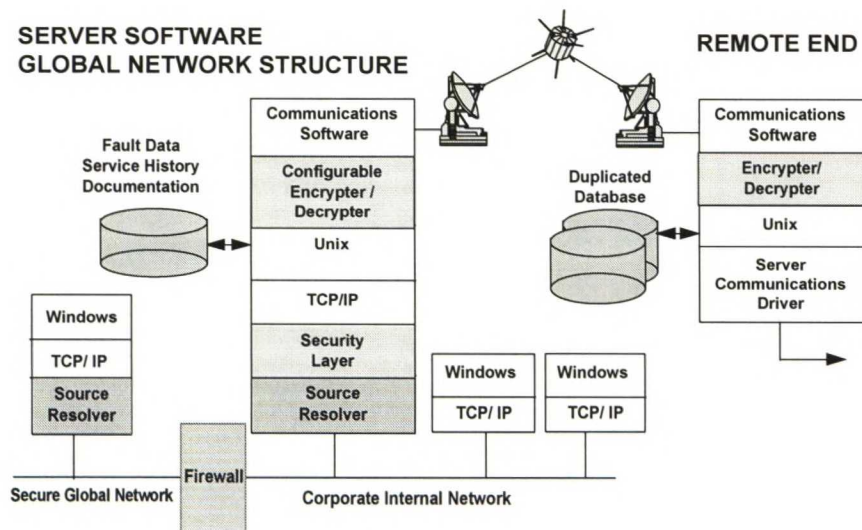
tukiasemaa. Kun laivaan halutaan ottaa yhteys, kokeillaan aina ensin puhelinlinjaa, sillä Inmarsat satelliittiyhteys on huomattavasti kalliimpi.

Satelliittiyhteys vaatii sopivat lähetys- ja vastaanottoasemat sekä maalla että laivalla. Laivalla yhteyden hoitavat omat satelliittiyhteysterminaalit, joiden kautta hoidetaan tavallinen puhelinliikenne. Maa-asemia sijaitsee ympäri maailmaa siten, että lähes kaikkialta maailman meriltä saadaan yhteys satelliitin kautta haluttuun puhelinverkkoon, jonka kautta liitytään haluttuun kohteeseen.

Tietoa siirrettäessä laivalla on yksi puhelin- tai satelliittikanava varattuna. Kuormitus ei ole kuitenkaan kovin suuri, koska online-tiedonsiirtoa ei käytetä. Vaikka tietoa kerätään laivalla jatkuvasti, tieto siirretään laivalta maa-asemalle vain, kun laivan propulsiojärjestelmässä on ongelmia ja asiantuntija-apua tarvitaan ongelmien ratkaisemiseksi. Tieto laivan ongelmista ja hälytyksistä ei siirry maa-asemalle automaattisesti. Hälytys näkyy laivalla ja laivan henkilökunta ottaa yhteyttä maa-asemalle, jolloin tietoa aletaan siirtää /21/.

3.3.3 Suojaus

Kaukodiagnostiikan tietoturvan rakenne on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6 Tiedon suojauksen rakenne

Yrityksen tiekoneverkkoon pystyy liittymään myös sisäisen verkon ulkopuolisista tietokoneista. Tällöin täytyy huolehtia siitä, että kuka tahansa ei pääse käsiksi tärkeisiin

tietoihin. Käyttäjien, joilla on oikeudet tietoihin, on saatava kaikki tieto käsiinsä. Muille verkossa vieraileville annetaan lupa vain joihinkin tietoihin tai sitten minkäänlaista lupaa vierailulle ei anneta. Tahallisen tai tahattoman luvattoman käytön estämiseksi on rakennettu esteitä, joilla edellä mainitut ominaisuudet toteutetaan. Ensimmäinen este on Firewall, tuliseinä. Se karsii pois ennenkaikkea vahingossa verkkoon yrittävät. Jos käyttäjätunnus ei kuulu verkon piiriin, Firewall avaa vain tietyt palvelut ulkopuolisille käyttäjille. Palveluvalikoima riippuu annetuista käyttöoikeuksista. Firewall kone pitää kirjaa luvattomista yrityksistä, antaa hälytyksen mikäli tietotunkeutumista esiintyy ja sulkee reitin, jos tunkeutuja tekee useita perättäisiä yrityksiä.

Toinen este ulkopuolisille käyttäjille on diagnostiikka-palvelimella sijaitseva Source Resolver, lähteen tarkastaja. Tämä on ohjelmallinen tarkistus siitä, että käyttäjällä on oikea käyttöympäristö, oikea tietokone sekä oikeat ohjelmat käytössään. Diagnostiikka-palvelimen ohjelma tarkistaa, että käyttäjän ohjelmassa on oikea koodi. Käyttäjän ohjelma tarkistaa puolestaan, että verkosta löytyy oikea koodi. Lisäksi tarkistetaan onko yhteyttä ottavassa tietokoneessa luvallinen IP-osoite ja samoin tarkistetaan, että verkkosovittimen kiinteä MAC-osoite on oikea. Kun kaikki koodit ovat kunnossa, käyttäjä pääsee verkkoon.

Kolmas varmistustapa on Security Layer. Siinä jokaiselta käyttäjältä kysytään tunnusta verkkoon. Vain ne, joilla on verkon käyttöoikeudet, pystyvät käyttämään verkkoa. Tämä turvavarmistus koskee myös maa-aseamalla verkkoa käyttäviä. Tällä tasolla on turvallisuudesta huolehdittu myös toisella tavalla. Komentotulkista on poistettu turhat käskyt, joilla voisi mahdollisesti tehdä haittaa verkolle. Jäljelle jätetään vain ne käskyt, joita tarvitaan diagnostiikan työkaluina.

Lähetettäessä tietoa maa-aseamalla laivalle, kulkeutuu data palvelimelta satelliittilähetys-asemalle. Tätä ennen data koodataan siten, että ulkopuolisen on mahdotonta lukea sitä. Tätä kutsutaan kryptaukseksi eli salaukseksi. Vastaanotettaessa salattua tietoa, salakoodi avataan selväkieliseksi palvelimella ennen käyttäjille tuloa. Sama koodausmenettely tehdään myös, kun tietoa lähetetään laivalta maa-asemalle /21/.

4 LAAKEREIDEN KUNNONVALVONTA

Huomattava osa moottorin tai generaattorin voimansiirrosta tapahtuu laakereiden kautta. On tärkeää, että laakereiden kuntoa voidaan valvoa ja taata häiriötön voimansiirto estämällä yllättävät laakerivauriot. Kuntoa valvomalla kyetään laakerinvaihto ennustamaan ajoissa ja vaihto pystytään tekemään seisokin tai normaalin määräaikaishuollon yhteydessä.

Pyörivien koneiden kunnon valvontaan on useita menetelmiä. Laakereiden lämpötilan mittaaminen on eräs perinteinen ja paljon käytetty menetelmä. Se ei kuitenkaan ole nykyisiin tarpeisiin nähden riittävä, sillä lämpötilamittauksella laakerin vaurio nähdään vasta, kun laakeri on pahasti vaurioitunut. Parempi menetelmä on värähtelymittauksella valvominen, sillä kaikki koneet värähtelevät, koska täysin värähtelemättömän koneen rakentaminen on vaikeaa ja taloudellisesti kannattamatonta [11]. Värähtelyn suuruuteen vaikuttavat jonkin verran ympäristön olot, mutta ennen kaikkea koneen kunto.

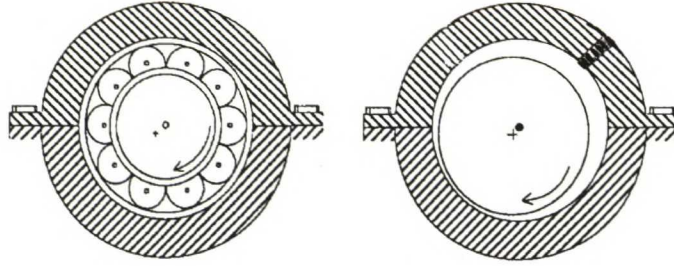
On havaittu, että laakereiden valvonta värähtelymittauksen avulla on pätevä ja luotettava tapa saada tarkkaa tietoa laakerin ja jopa koneen kunnosta. Erityisesti vierintälaakereiden yhteydessä se on ehdottomasti paras valvontatapa, mutta myös liukulaakereiden valvonta värähtelymittauksella antaa arvokasta tietoa. Liukulaakereiden valvon-
nassa on suositeltavaa käyttää värähtelymittauksen rinnalla lämpötilamittausta.

Kunnonvalvonnan lisääntyessä on erilaisia valvonta- ja mittaustapoja markkinoilla useita, joista osa poikkeaa huomattavasti toisista. Ensimmäinen valinta tehdään toimintatavan määrittämisessä. Valitaan, käytetäänkö jatkuvaa valvontaa vai tehdäänkö mittauksia säännöllisin väliajoin käsimittarilla ja merkitään tulokset taulukkoon. Kun kohde on selvillä, valitaan mittaustapa tai -tavat ja sen jälkeen valmistaja ja järjestelmä, joka sopii omaan käyttöön parhaiten niin hinnan kuin ominaisuuksien suhteen.

Tässä luvussa käydään läpi laakerin kunnonvalvontaan liittyvää teoriaa. Käsiteltäviä asioita ovat laakerityypit, anturit, valvontatavat sekä mittaustulosten käsittely. Nämä kaikki on otettava huomioon valittaessa kunnonvalvontalaitteistoa. Jotta valintaan liittyvät ongelmat kyetään ymmärtämään, näistä perusasioista on oltava riittävä tietämys.

4.1 Laakerityypit

Laakerityyppi vaikuttaa käytettävän anturin ja valvontatavan valintaan, joten laakerityypit käydään ensimmäisenä läpi. Laakereita on kahta perustyyppiä, vierintälaakereita ja liukulaakereita. Kuvassa 4.1 on esitetty vierintälaakeri ja liukulaakeri.



Kuva 4.1 Vierintälaakeri ja liukulaakeri

4.1.1 Vierintälaakerit

Vierintälaakereita ovat kaikki rulla- ja kuulalaakerit. Laivan propulsiojärjestelmässä vierintälaakereita käytetään nykyään vain erikoistapauksissa potkurimoottorin laakereina. Rakenteestaan johtuen vierintälaakerit tuottavat käytössä helposti havaittavia värähtelyjä eri taajuuksilla. Normaalityapauksessa, kun öljykerros on erittäin ohut, suhteellinen liike akselin ja kotelon välillä on pientä. Sen takia on mahdollista havaita värähtelyjä anturilla, joka on asennettu kotelon päälle tai osittain kotelon sisään.

Laakerin vaurioituessa sen vaurioitunut osa tuottaa värähtelysignaaliin taajuuskomponentin ja sen monikertoja. Nämä vikataajuudet ovat jokaiselle laakerin osalle erilaisia ja voidaan laskea laakerin sisä- ja ulkokehälle, kuulille sekä laakeriradan pitimelle /22/. Ominaisvikataajuus laakerin sisäkehälle on

$$f_{sk} = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{D_r}{D_k} \cos(\theta) \right) f_n, \quad (4.1)$$

ulkokehälle

$$f_{uk} = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{D_r}{D_k} \cos(\theta) \right) f_n, \quad (4.2)$$

kuulille

$$f_r = \frac{D_k}{2D_r} \left(1 - \left(\frac{D_r}{D_k} \cos(\theta) \right)^2 \right) f_n \quad (4.3)$$

sekä pidikkeelle

$$f_p = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{D_r}{D_k} \cos(\theta) \right) f_n \quad (4.4)$$

Kaavoissa n = kuulien tai rullien lukumäärä,
 D_k = laakerin jakohalkaisija,

- D_r = kuulan tai rullan halkaisija,
 θ = kosketuskulma,
 f_n = akselin pyörimistaajuus.

Kaavat pätevät ainoastaan sillä ehdolla, että vierintäkosketuksessa ei esiinny minkäänlaista liukumaa. Liukumalla voi olla merkitystä erityisesti korkean nopeuden omaaville laakereille ja alhaiselle kuormitustilalle. Laivoissa vierintälaakereita on pelkästään potkurimoottoreiden yhteydessä, joten liukumaongelmaa ei esiinny.

4.1.2 Liukulaakerit

Liukulaakereita käytetään yleisesti laivojen generaattoreissa ja potkurimoottoreissa. Liukulaakeri on laivakäytöissä parempi, sillä se kestää paremmin tärinää, se ei kulu yhtä nopeasti ja on helpommin huollettavissa. Liukulaakerit soveltuvat hyvin nopeille kierrosluvuille ja iskumaisille kuormille /23/.

Liukulaakereissa akselia kannatetaan nestemäisellä kalvolla, joka pumpataan korkealla paineella akselin ja laakerin kehän väliin. Nestekalvo pitää akselin irti laakerin kehältä, jolloin vierintälaakereille tyypilliset iskut puuttuvat lähes kokonaan. Kun lisäksi liukulaakerin sisäkehä on usein pehmeäköhkö materiaalia, alkavien vaurioiden aiheuttamat värähtelytaajuudet saattavat olla erittäin vaikeita havaita. Liukulaakereiden värähtelytasoon vaikuttaa myös miten tasaisena öljyn paine pystytään pitämään. Paineen muutokset vaikuttavat öljykerroksen paksuuteen ja siten akselin sijaintiin kehään nähden. Mitä ohuempi öljykerros on sitä suurempi värähtelytaso saadaan. Öljykerros ei kuitenkaan normaalitapauksessa pääse ohueksi. Niinpä liukulaakerin vaurioita ei kyetä havaitsemaan niin aikaisin kuin vierintälaakereiden vaurioita. Eri taajuuskomponenttien seurannalla sekä tärinän kokonaistason seurannalla saadaan kuitenkin riittävän aikainen tieto laakerin vaurioista. Liukulaakereissa myös akselin liikkumista laakerikehään nähden on mahdollista seurata. Mittaustiedon luotettavuutta pystytään parantamaan käyttämällä rinnakkaisena mittauksena lämpötilamittausta /23/.

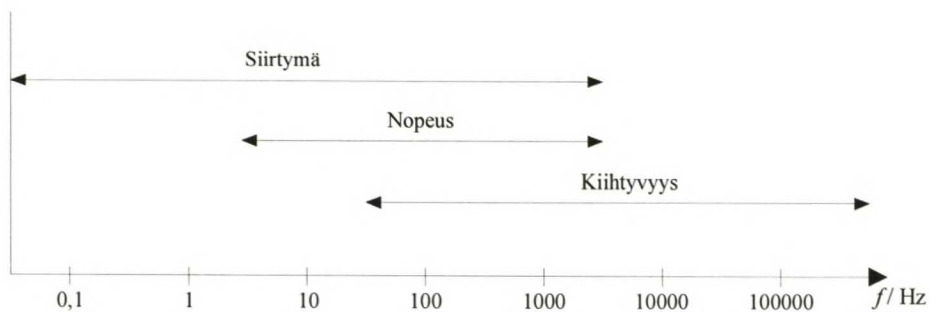
4.2 Anturit

Värähtelyn perusominaisuudet ovat taajuus, vaihekulma ja amplitudi. Taajuus on jaksollisen värähtelyn toistojen määrä aikayksikössä ja vaihekulma määrittelee värähtelyn suunnan millä tahansa hetkellä yhden jakson aikana. Amplitudi kuvaa värähtelyn suuruutta ja sitä voidaan mitata siirtymänä, nopeutena tai kiihtyvyytenä. Näiden kolmen eri mittaustavan mukaan jaetaan värähtelyanturit kolmeen eri luokkaan, siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyyssantureihin /19/.

Siirtymä eli poikkeama on matka, jonka värähtelevä osa kulkee edestakaisin yhden jakson aikana. Nopeus on poikkeaman muutos aikayksikössä. Nopeus on verrannollinen värähtelyyn sisältyvään energiaan. Kiihtyvyys on verrannollinen voimaan, joka kohdistuu värähtelijään, kun sen liikkeen suunta vaihtuu. /17/

Siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyyssarvot voidaan edelleen ilmaista huipusta huippuun arvona, keskiarvona, tai tehollisarvona.

Käytettävä amplitudinmittaus suure määräytyy käyttöolosuhteiden, laakerin tyypin sekä tarkasteltavan taajuusalueen perusteella /17/. Erilaisilla laakereilla on ominaisuuksia, jotka vaativat eri mittaussuureita. Mitattavan kohteen värähtelyn taajuusalueesta riippuen tehdään valinta antureiden suhteen siten, että pienillä taajuuksilla on suositeltavaa käyttää siirtymäantureita, suurilla taajuuksilla kiihtyvyyssantureita ja keskisuurilla taajuuksilla nopeusantureita. Anturityyppien sopivuus eri taajuusalueille määritellään kuvan 4.2 mukaan /17/.



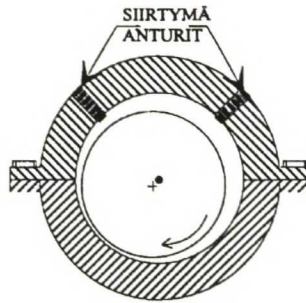
Kuva 4.2 Suositeltavat taajuusalueet eri mittaussuureille

Siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyyssmittauksessa mitataan kaikissa amplitudia ja taajuutta. Amplitudi kertoo, mikä koneen kunto on. Taajuus puolestaan ilmaisee mikä värähtelyn aiheuttaa eli missä vika on. Vertaamalla taajuutta eri osien ominaistaajuuksiin sekä pyörimisnopeuteen voidaan vikakohta paikallistaa /11/.

4.2.1 Siirtymäanturi

Siirtymäanturi mittaa laakerin ilmvälin korkeutta. Se korostaa matalia taajuuksia ja sopii näinollen hitaasti pyörivien vierintälaakereiden sekä kaikkien liukulaakereiden valvontaan. Erityisesti koneissa, joissa roottori on paljon staattoria kevyempi, värähtelyn siirtyminen koneen runkoon on vähäistä. Tällöin kannattaa käyttää siirtymäanturia /23/. Sopiva värähtelyn taajuusalue on 0–5000 Hz. Pyörrevirta-anturi on eniten käytetty siirtymäanturi. Siinä mittaus perustuu anturin käämissä syntyvään magneettikenttään, joka muodostetaan korkeataajuisella kantosignaalin avulla. Magneettikenttä indusoi pyörrevirtoja, jotka vähentävät kantosignaalin amplitudia verrattuna mitattavaan laake-

rin ilmaväliin. Kantosignaalin amplitudin vaihtelu muunnetaan edelleen matala-impedanssiseksi jänniteulostuloksi /24/. Tarkemman tuloksen saamiseksi käytetään usein yhdessä liukulaakerissa kahta siirtymäanturia asennettuna kuvan 4.3 mukaisesti 90° kulmaan toisiinsa nähden.



Kuva 4.3 Liukulaakeri kahdella siirtymäanturilla

Tämä mahdollistaa akselin ratakäyrän mittaamisen ja tarkan mittaustiedon saamisen. Vierintälaakereilla ei ratakäyrän mittausta käytetä, joten anturin käyttö kohdistuu etupäässä liukulaakereihin.

Siirtymäanturin etuna on, että siinä ei ole liikkuvia osia, joten se on erittäin kestävä. Haittana on kuitenkin kapea taajuusalue /24/.

4.2.2 Nopeusanturi

Nopeusanturi soveltuu parhaiten käytettäväksi taajuusalueella 10 Hz–1 kHz. Nopeusanturia voi käyttää hyvin yleisanturina, sillä sen taajuusalue kattaa osittain sekä siirtymäanturin että kiihtyvyyssanturin taajuusalueen. Tarkkaan mittaustulokseen pyrittäessä anturi täytyy valita kuitenkin juuri omalta taajuusalueeltaan.

Nopeusanturin mittauskäämi on elastisesti ripustettu ja sillä on hyvin matala ominaistaajuus. Kun anturi asennetaan korkealla taajuudella värähtelevälle pinnalle, jää mittauskäämi lähes liikkumattomaksi ja kestomagneetti synnyttää käämiin nopeuteensa verrannollisen vuon muutoksen ja siten jännitteen. Tätä signaalia analysoimalla voidaan värähtelyitä tarkkailla. Kestomagneetin nopeus on suoraan verrannollinen mitattavan värähtelijän nopeuteen, koska magneetti on kiinnitetty jäykästi anturin runkoon /24/.

Nopeusanturin etuina on sen soveltuvuus perusanturiksi siirtymäanturin ja kiihtyvyyssanturin väliin. Lisäksi anturin lähtösignaali on voimakas, joten häiriökestoisuus on hyvä. Haittana puolestaan on, että nopeusanturi on tehokas mittausväline vain keskitaajuusalueella ja käytännössä tämä rajoittaa käyttöä. Nopeusanturi ei myöskään sovellu alhaisiin lämpötiloihin (< -30°C).

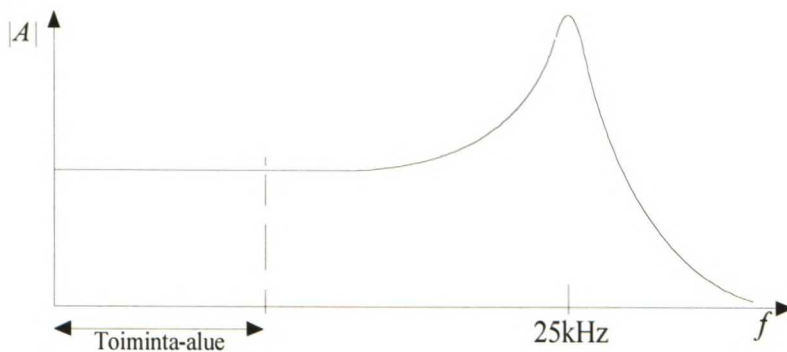
4.2.3 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturi on nykyisin yleisimmin käytetty anturi kiihtyvyyden, nopeuden sekä siirtymän mittaamiseen. Nopeus ja siirtymä saadaan integroimalla kiihtyvyydestä tietoa.

Kiihtyvyyssantureista yleisimmin käytetty on pietsosähköinen anturi. Sen toiminta perustuu liikkuvaan massaan, joka puristaa pietsosähköistä levyä. Kiihtyvyydestä aiheutuvat voimat saavat levyyn kohdistuvan puristusvoiman vaihtelevaan syklisesti, jolloin pietsosähköinen ilmiö tuottaa puristukseen ja anturin sähköiseen varaukseen verrannollisen jännitteen. Kiihtyvyyssanturin tuottama signaali on heikko, joten sitä vahvistetaan esivahvistimella /24/.

Kiihtyvyyssanturin etuja muihin antureihin nähden ovat anturin lujuus sekä käytetyn taajuusalueen laajuus. Lisäksi kiihtyvyyssanturi ei tarvitse ulkoista jännitelähdettä, joten se voi toimia vaikeissakin olosuhteissa. Kiihtyvyyssanturilla on laaja lämpötila-alue ($-250^{\circ}\text{C}\dots+450^{\circ}\text{C}$), joten se kestää myös suuret lämpötilan vaihtelut. Etuna on myös pitkäikäisyys ja luotettavuus sekä pienikokoisuus ja keveys /17/.

Käytettäessä pietsosähköiseen kiteeseen perustuvaa kiihtyvyyssanturia, on huomattava, että anturilla on ns. luonnollinen taajuus, jonka alapuolella tutkittavien taajuuksien on oltava. Tämä rajoittaa käytettävän toiminta alueen nolasta noin kolmasosaan luonnollisesta taajuudesta /17/. Tyypillinen taajuusvaste on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4 Kiihtyvyyssanturille ominainen taajuusvaste

Uusimmissa antureissa luonnollinen taajuus voi olla huomattavasti korkeampi kuin 25 kHz.

4.3 Valvontatavat

Erilaiset laakerin vikatyypit ovat havaittavissa usealla eri valvontatavalla. Eroja tapojen välillä tulee lähinnä siinä, miten tarkasti laakerin kunto halutaan selvittää ja miten

aikaisessa vaiheessa alkavat vauriot halutaan havaita. Parhaat tulokset saadaan yhdistelemällä useita valvontatapoja ja käyttämällä kustakin menetelmästä parhaita ominaisuuksia. On hyvä muistaa, että laakerinvalvonnassa ympäristöllä on suuri vaikutus mittaustuloksiin. Laakerinvalvontajärjestelmää rakennettaessa täytyy ympäristön värähtelyt huomioida. On valittava laitteisto, jolla mittaussignaalista ei tehdä väärää diagnoosia.

Seuraavassa keskitytään ennen kaikkea menetelmiin, joissa nähdään laakerivaurio jo aikaisessa vaiheessa, jolloin pystymään ennustamaan jäljellä oleva käyttöikä laakerille.

4.3.1 Värähtelyn kokonaistason mittaus

Värähtelyn kokonaistason mittauksen tarkoituksena on määrittellä laakerin värähtelyjen suuruutta kuvaava arvo. Tällainen arvo saadaan mittaamalla värähtelyamplitudin tehollis- tai huippuarvoa koko taajuuskaistalta. Mittaus voi perustua myös määrätyn alueen mittaamiseen, jolloin seurataan tietylle ilmiölle ominaista tai jonkin normin mukaista taajuusalueita /19/.

Kokonaistasomittaus on menetelmänä yksinkertainen, halpa ja helppokäyttöinen, mutta sillä on myös puutteena, että /23/

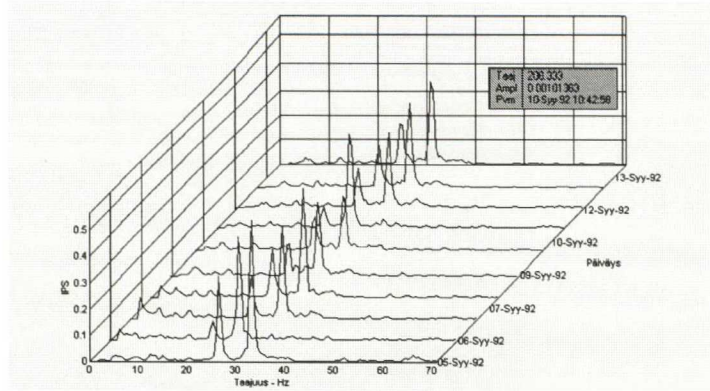
- vikadiagnoosia varten tarvitaan signaalin lisäkäsittelyä ja
- laajakaistainen mittaus ei reagoi herkästi vauriosta aiheutuvaan tietyn taajuuskomponentin kasvuun.

Värähtelyn kokonaistasomittauksen apuvälineeksi on kehitetty värähtelystandardeja, joihin saatuja mittaustuloksia voidaan verrata /24/. Laivaympäristössä ei kuitenkaan suuren perusvärähtelytason vuoksi voida näitä standardeja käyttää. Tällaisissa olosuhteissa on parempi suorittaa toistuvia mittauksia ja verrata värähtelytasoa alkuperäiseen, hyvää kuntoa vastaavaan värähtelytasoon. Kun värähtelytaso nousee alkuperäiseen verrattuna 8 desibeliä (2,5 kertaiseksi), annetaan varoitus, jolloin tiedetään, että alkava vaurio on löytynyt. Vielä ei kuitenkaan tarvitse ryhtyä välittömiin toimenpiteisiin. Kun värähtelytaso kasvaa vielä 8 desibeliä lisää, annetaan hälytys, joka aiheuttaa koneen välittömän sulkemisen ja laakerin vaihtamisen /24/. Tarkoitus on, että vikaantunut laakeri vaihdetaan ennen toista hälytystä.

4.3.2 Taajuusanalyysi

Taajuusanalyysin avulla värähtely voidaan jakaa komponentteihin, joiden voimakkuutta voidaan tarkastella erikseen. Aikatasoinen signaali on muutettu taajuustasoon. Saatua taajuusspektriä analysoimalla myös koneen vaurion syy tai syyt voidaan selvittää laskettujen laakereiden ominaisvikataajuuksien perusteella, kuten luvussa 4.1.1 on esitetty. Vaikka koneen kunnosta saadaan tietoja yksittäisten spektrien avulla, on suosi-

teltavaa verrata mitattua spektriä joko referenssispektriin tai kaikkiin aikaisemmin mitattuihin spektreihin /16/. Referenssispektri mitataan yleensä koneen käyttöönoton yhteydessä. Vertailu aikaisemmin mitattuihin spektreihin onnistuu esimerkiksi vesiputouskäyrän avulla, jossa näytölle saadaan haluttu määrä aikaisemmin mitattuja spektrejä. Tällöin tietyn taajuuskomponentin kasvaminen on selkeästi havaittavissa. Esimerkki vesiputouskuvaajasta kuvassa 4.5.



Kuva 4.5 Vesiputouskäyrä

Taajuusanalyysi perustuu Fourierin teoreemaan, jonka mukaan mikä tahansa jaksollinen funktio voidaan esittää useiden eritaajuisten sinifunktioiden summana /24/. Jaksollisen ajassa t tapahtuvan värähtelyn amplitudi voidaan esittää muodossa $x(t)$.

$$x(t) = x_0 + x_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + x_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + x_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (4.5)$$

missä

x = poikkeama

x_0 = poikkeaman staattinen komponentti

x_i = i :n harmonisen komponentin poikkeama-amplitudi

ω = perustaajuutta vastaava kulmanopeus

t = aika

φ_i = i :n harmonisen komponentin vaihekulma

Mitä enemmän kaavan (4.5) summassa on termejä, sitä tarkemmin se kuvaa todellista funktiota. Eri taajuuksia vastaavat komponentit muodostavat taajuusspektrin. Taajuuspiikkejä voidaan verrata laakerille ominaisiin vikataajuuksiin. Jos jollakin vikataajuudella on korkea piikki, kyseinen laakerin osa on silloin vaurioitunut. Taajuuskomponentin korkeudesta voidaan päätellä vaurion suuruus.

Mittaussignaalin taajuusanalysointi tehdään spektrianalyysaattorilla. On olemassa suodatimilla varustettuja analyysaattoreita, pyyhkäiseviä analyysaattoreita ja reaaliaika-analyysaattoreita. Yleisimpiä ovat reaaliaika-analyysaattorit /25/.

Toisin kuin muissa analysointireeissa, reaaliaika-analysointireeissa tarkastellaan koko tutkittavaa taajuusaluetta yhtäaikaan. Analysointi voidaan tehdä aikakompensoidulla analysointireella tai nopeaa Fourier-muunnosta (FFT) käyttävällä mikroprosessorilla. FFT-analysointiree ottaa värähtelysignaalista näytteitä, muuttaa ne digitaalisiksi, tallentaa ne ja laskee spektrin F-muunnoksen avulla /24/.

Shannonin näytteenottoeoreeman mukaan näytteenottoaajuuden on oltava vähintään kaksi kertaa suurempi kuin taajuus, joka näytteestä halutaan analysoida /24/. Suurin analysoitava taajuus f_{\max} on

$$f_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \text{näytteenottoaajuus}, \quad (4.6)$$

missä Δt on näytteiden väliin jäävä aika. Koska Δt :n suuruudelle on käytännössä rajoituksia, analyysin kaistanleveyttä on rajoitettava suodattimien avulla. Mitä pitemmältä ajalta näytteitä otetaan sitä parempi resoluutio eli erotuskyky analyysillä on. Spektrin resoluutio Δf on esitetty kaavassa (4.7). N on näytteiden määrä.

$$\Delta f = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (4.7)$$

Jotta analyysi olisi reaaliaikainen, näytteet on tallennettava puskurimuistiin ja analysoitava samanaikaisesti, kun uusia näytteitä otetaan. Analysointi saa kestää siis korkeintaan resoluution käänteisarvon määräämän ajan.

Fourier-analyysi perustuu Fourier-integraalipariin

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.8)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.9)$$

Integraalipari määrittelee aikafunktion $f(t)$ kompleksisen taajuuskomponentin jokaiselle kulmanopeudelle /24/. Samat funktiot voidaan esittää diskreetteinä

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j \frac{kn2\pi}{N}} \quad (4.10)$$

$$f(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j \frac{kn2\pi}{N}} \quad (4.11)$$

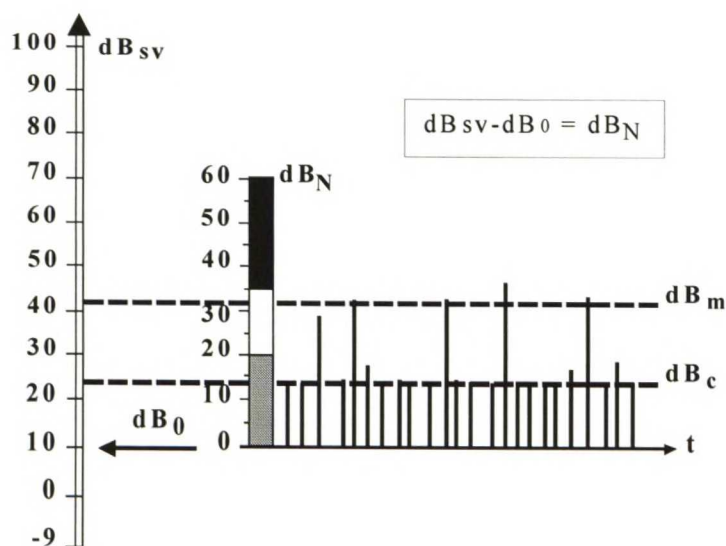
Jaksollisen F-muunnoksen avulla N-näytteisen spektrin laskemiseen tarvitaan siis N^2 kompleksista operaatiota. Nopea F-muunnos vähentää operaatioiden määrän $N \cdot \log_2 N$ kappaleeseen.

Laskettu spektri kuvaa täysin värähtelyn sisältöä sillä aikavälillä, jolla näytteet on otettu. Värähtely on kuitenkin jatkuvaa ja saattaa vaihdella ajan funktiona. Siksi spektri määritellään tavallisesti useiden kiinteällä aikavälillä tehtyjen spektrien keskiarvona tai laskemalla jatkuvasti liukuvaa keskiarvoa /25/.

4.3.3 Iskusysäysmenetelmä

Kuula- ja rullalaakerien väsyminen johtaa muutokseen vierintäradoissa sekä kuulissa ja rullissa. Nämä muutokset aiheuttavat mekaanisia iskuja. Iskusysäysmenetelmä (Shock Pulse Method) perustuu näissä mekaanisissa iskuissa esiintyvien nopeuksien epäsuoraan mittaamiseen /26/.

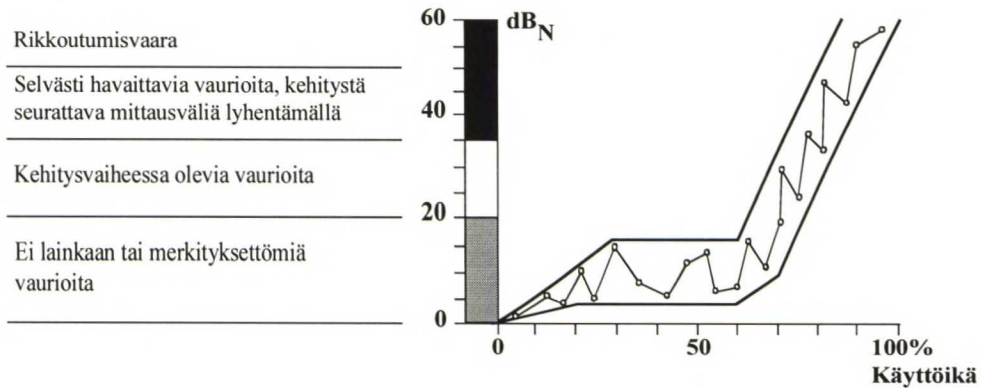
Mittaus suoritetaan kiihtyvyyssanturilla, jonka resonanssitaajuus on viritetty 32 kHz kohdalle. Iskukohdan aineeseen syntyy suuri paikallinen kiihtyvyys, joka aiheuttaa paineaallon. Paineaalto aiheuttaa edelleen mittausanturissa vaimenevan värähtelyn anturin ominaistaajuudella. Tämän värähtelyn amplitudin kasvu on suoraan verrannollinen iskunopeuteen ja se muutetaan anturissa sähköisiksi signaaleiksi. Yleensä mitataan signaalien desibelinen iskuarvo dB_{sv} , jota verrataan laakerin alkuiskuarvoon dB_0 . Alkuiskuarvo vastaa uuden, täysin oikein asennetun laakerin iskuarvoa ja se määritetään tavallisesti akselin halkaisijan ja laakerin kierrosnopeuden avulla. Erotus $dB_{sv} - dB_0 = dB_N$ (desibelisesti normalisoitu iskuarvo) osoittaa siten laakerin todellisen kunnon. Kuvassa 4.6 normalisoidun iskuarvon laskeminen on esitetty.



Kuva 4.6 Normalisoidun iskuarvon laskeminen

Kuvassa 4.6 dB_m on iskusysäyksen maksimiarvo ja dB_c on heikkojen pulssien muodostama äänimatto. Iskusysäysmenetelmän herkkyyttä laakerin kunnon muutoksille kuvaa, että laakereiden iskuarvot voivat kasvaa jopa tuhatkertaisiksi laakerin käyttöiän aikana.

Kuvassa 4.7 on esitetty laakerin iskuarvojen muutos käyttöiän aikana. Vaihtelut käyrän mittauspisteissä aiheutuvat muutoksista vaurion suuruudessa ja vaurion reunojen pyöristymisestä.



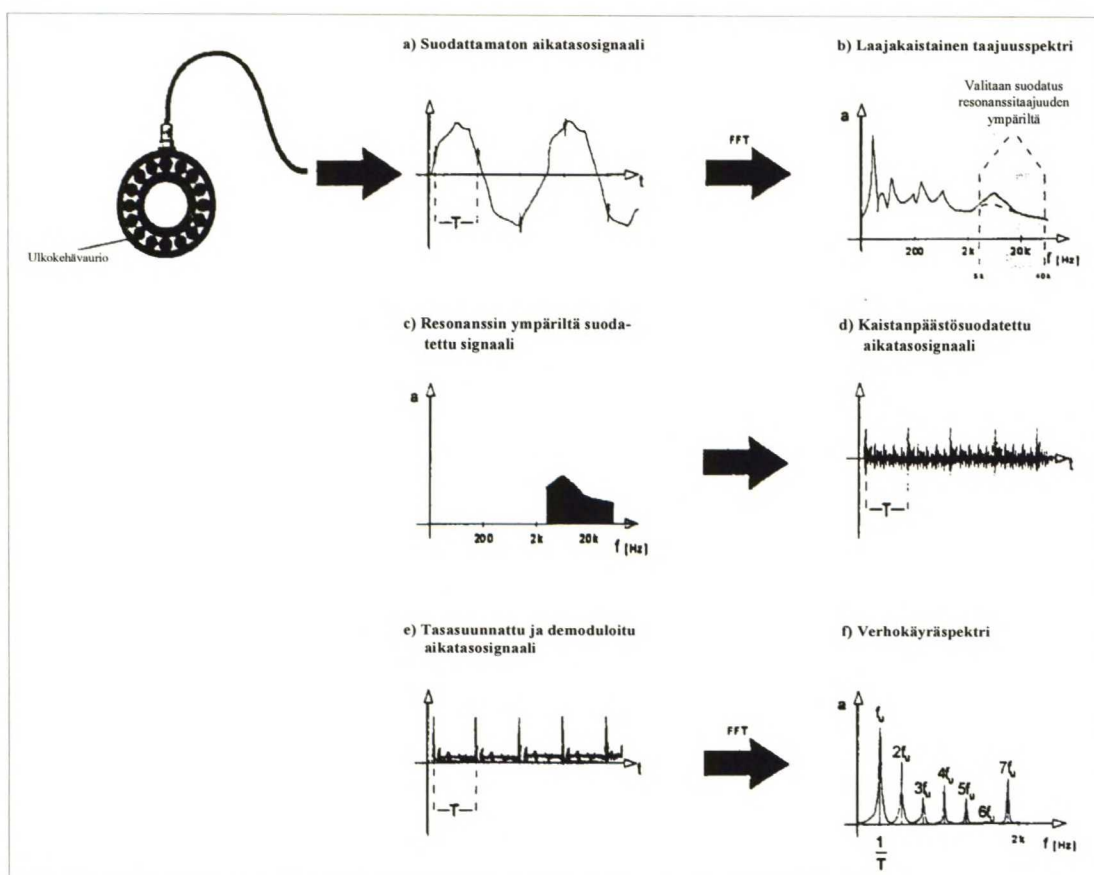
Kuva 4.7 Iskuarvojen ja laakerin kunnan välinen riippuvuus

Jatkuvatoiminen mittaus antaa hälytyksen, kun mitattu signaali ylittää asetetun hälytysrajan vähintään kymmenen kertaa sekunnissa. Tällöin muun kuin laakerivaurion aiheuttama sattumanvarainen hälytysrajan ylitys ei saa aikaan hälytystä /27/.

4.3.4 Verhokäyräanalyysi

Hitaasti pyörivissä koneissa alkava laakerivaurio saattaa näkyä taajuusspektrissä varsin myöhään. Hyödyntämällä sopivaa kaistanpäästösuodatusta ja demodulaatiotekniikkaa voidaan heikotkin impulssit erottaa voimakkaastakin taustakohinasta. Tekniikkaa kutsutaan verhokäyräanalyysiksi ja se perustuu amplitudidemodulaatioon. Verhokäyräanalyysin periaate on esitetty kuvassa 4.8.

Vaurio laakerin ulkokehässä saa aikaan pieniä impulssimaisia iskuja ajan T välein (a). Impulssien havaitseminen aikatasosignaalista on vaikeaa, mutta ne aiheuttavat kuitenkin laakerin ominaistaajuuksien heräämisen, joka ilmenee laajakaistaisena resonanssikohtina suuremmilla taajuuksilla (b). Kyseinen taajuusalue erotetaan muusta spektristä sopivalla kaistanpäästösuodattimella (c), josta muodostetaan signaalin aikataason esitys (d). Impulssien sykäystaajuuksien löytämiseksi signaali tasasuunnataan ja demoduloidaan (e), jolloin siinä näkyvät vain vaurion aiheuttamat impulssit. Signaalille tehdään vielä FFT-muunnos, jolloin jäljelle jää laakerin sykäystaajuuskomponentti kerrannaistaajuuksineen (f). Verhokäyräspektri antaa hyvän kuvan vian kehittymisestä, mutta sen arvoja ei tule käyttää absoluuttisina, vaan eri spektrejä verrataan keskenään ja seurataan arvojen suhteellisia muutoksia. Myös verhokäyrässä näkyvät laakerin vikataajuudet /6/.

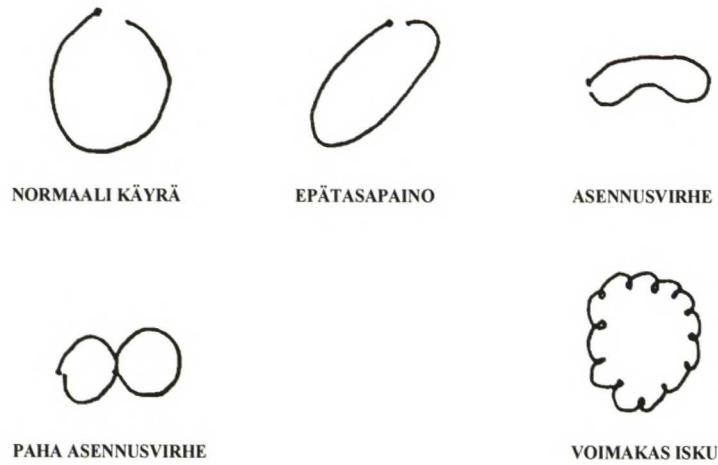


Kuva 4.8 Verhokäyräanalyysin periaate

4.3.5 Ratakäyrän mittaus

Liukulaakeroiduissa koneissa voidaan akselin liikettä mitata laakeripesän suhteen. Mittaaminen tapahtuu kosketuksettomasti siirtymäantureilla asentamalla kaksi anturia laakeripesään 90° kulmaan toisiinsa nähden kuvan 4.3 mukaan. Viemällä signaalit näistä antureista oskilloskoopille, saadaan näkyville ratakäyrä. Sen muodosta voidaan arvioida koneen kuntoa. Kuvassa 4.9 esitetään muutamia tyypillisiä akselin ratakäyriä selityksineen.

Signaali voidaan analysoida myös esimerkiksi spektrianalyysaattorilla, jolloin päästään tutkimaan värähtelyn taajuuskomponentteja. Näiden muutoksista voidaan tehdä vastavia johtopäätöksiä kuin kiihtyvyyssantureilla mitatun signaalin spektrianalyyysissa [28/].



Kuva 4.9 Eräitä akselin ratakäyriä.

4.3.6 Akustinen emissio

Akustisessa emissiomenetelmässä mitataan korkeataajuisia värähtelyä 40 kHz korkeammilla taajuuksilla, yleensä 80–120 kHz taajuudella. Akustista emissiota käytetään tavanomaisesti rakenteiden koestukseen rasituksen alaisena. Tällöin vaurioitunut kohta paikallistetaan useaan anturiin saapuvien pulssien aikaeron perusteella. Koneiden kunnan mittauksessa pulssin kulkuajan sijasta tutkitaan anturilta saatavan signaalin sisältöä, esimerkiksi tietyn tason ylittäneiden pulssien määrää tai signaalin tehollisarvoa. Menetelmän etuna on, että koneen normaalista käynnistä johtuvat värähtelyt jäävät kauaksi mittausalueen ulkopuolelle, eivätkä siten vaikuta mittaussignaaliin /28/.

Värähtely mitataan resonanssialueellaan toimivalla pietsosähköisellä anturilla, josta saadut pulssit vahvistetaan ja suodatetaan kaistanpäästösuodattimella. Saatua signaalia voidaan analysoida edelleen esimerkiksi taajuusspektrin avulla. Menetelmä on herkkä ja reagoi vaurioon jo ennen sen varsinaista syntymistä. Tähän vaikuttaa käytetty taajuusalue ja mitattavien värähtelyjen syntymekanismi. Suurimpana haittapuolena menetelmällä on värähtelyjen voimakas vaimentuminen erityisesti liitospinnoissa ja voitelukalvoissa /15/.

4.3.7 Värähtelyn tilastollinen analyysi eli kurtosis

Värähtelysignaalia voidaan tutkia myös aikatasossa ottaen siitä näytteitä sopivalla taajuuskaistalla ja aikavälillä, sekä käsittelemällä signaalia tilastollisesti. Kurtosis on signaalin “huipukkuutta” kuvaava arvo, joka saadaan kaavasta

$$K = \frac{1}{\delta^4} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^4}{N} \quad (4.12)$$

missä δ^2 = varianssi

N = näytteiden lukumäärä

\bar{x} = näytteiden keskiarvo

x_i = näyte

Kurtosis-mittauksen käyttö mittaavassa kunnossapidossa perustuu teoriaan, että kunnossa olevan laakerin lähettämän signaalin K -arvo on 3. Kun laakerin kunnossa tapahtuu muutoksia, kasvaa K -arvo nopeasti. Normaalikuntoisella laakerilla ajan mukana tapahtuvat K -arvon vaihtelut ovat teorian mukaan pieniä, ± 8 %, kun samaan aikaan esimerkiksi tehollisarvo voi vaihdella ± 50 %. Lisäksi kuormituksen, pyörimisnopeuden ja vastaavien parametrien muutokset vaikuttavat vain vähän K -arvoon. Menetelmään perustuvia mittalaitteita on rakennettu, mutta käyttökokemukset niistä ovat vielä vähäisiä /28/.

4.3.8 Muut valvontatavat

Lämpötilan mittaus on yleisesti käytössä laakereiden valvonnassa. Lämpötilaa mittaamalla ei kuitenkaan saada tietoa laakerin vaurioista ennenkuin vaurio on jo erittäin pitkällä. Kun vaurio on havaittu lämpötilamittauksella, laakerin käyttö täytyy lopettaa välittömästi, ettei laakerin vikaantumisen vuoksi muu järjestelmä hajoa. Lämpötilan mittaus on väistymässä värähtelymittausten tieltä, mutta alkuvaiheessa käytetään molempia mittaustapoja rinnakkain virhemahdollisuuksien ehkäisemiseksi.

Myös öljyanalyyseja voidaan käyttää voideltavan kohteen kunnan valvontaan. Öljyanalyyseja voidaan soveltaa helpoimmin selvästi rajattuihin kohteisiin, joissa on käytössä pienehkö öljymäärä. Tällaisia ovat esimerkiksi vaihteistot. Jatkuvat kunnonvalvontamenetelmät ovat vasta kehitymässä öljyanalyysimenetelmillä. Myöskään laakerisovelluksia ei ole juuri olemassa.

Magneettisten kulumishiukkasten koon, kokojakauman ja muodon analysointiin perustuva kulumisen seurantamenetelmä, kulumishiukkasanalyysi, on myös paljon tutkittu laakereiden kunnonvalvontamenetelmä. Tehtyjen havaintojen, kulumishiukkasten koon ja muodon, perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä koneen kulumisesta ja sen merkityksestä koneen toimintaan. Kulumishiukkasanalyysi antaa tiedon koneen kulumisesta hyvissä ajoin. Analysointimenetelmiä ovat valomikroskopia ja siihen yhdistettynä näytelevyn kuumentaminen, pyyhkäisyelektronimikroskopia ja röntgendifraktioon perustuva alkuaineiden määritysmenetelmä. Lisäksi huomiota täytyy kiinnittää myös menetelmiin, joilla hiukkaset erotellaan voiteluaineesta /28/. Kulumisen seuraaminen jatkuvatoimisesti laakerin yhteyteen asennetulla laitteistolla onnistuu, mutta vähäisen käytön vuoksi hinta on hyvin korkea. Lisäksi ohjelmistolliset ominaisuudet eivät yllä

samalle tasolle värähtelymittausohjelmistojen kanssa. Tässä yhteydessä kulumishiukkasanalyysiä ei tutkita enempää, mutta tulevaisuudessa se voi jopa korvata värähtelymittauksen. Tämä vaatii kuitenkin vielä rajua kehitystä laitteistoissa ja ohjelmistoissa.

4.4 Mittaustulosten käsittely jatkuvatoimisessa kunnonvalvontajärjestelmässä

Kunnonvalvontajärjestelmän mittaustulosten käsittelyn jakaminen eri yksiköille parantaa järjestelmän toimintavarmuutta ja tekee sen helposti laajennettavaksi. Toiminnot voidaan jakaa esimerkiksi mittaus- ja valvontayksikölle sekä keskuslaitteistolle /29/.

4.4.1 Mittaus- ja valvontayksikkö

Kukin mittaus- ja valvontayksikkö käsittää tavallisesti useita mittauskanavia, jotka vastaanottavat jatkuvaa analogista mittaussignaalia. Mittausosan tehtäväksi voidaan määrittellä mittaus- ja valintakomentojen vastaanottaminen valvontaosalta ja digitaaliseen muotoon muutetun mittaussignaalin välittäminen edelleen käsiteltäväksi. Valvontaosan tehtävänä on mittausosan toiminnan ohjaaminen ja mittaustulosten analysointi. Valvontayksikkö lukee kanavittain tiedot mittausosalta ja käsittelee mittaustuloksia. Mittaustulosten käsittelyyn sisältyy seuraavia toimintoja.

- Varoitus- ja hälytysrajavalvonta ja edelleen toimintakäskyn antaminen keskuslaitteistolle. Tavallisesti rajoihin verrataan mittaustuloksen liukuvaa keskiarvoa, jotta hetkelliset vaihtelut eivät aiheuttaisi turhia hälytyksiä.
- Tehollisarvon, huipusta huippuun arvon ja keskiarvon laskeminen värähtelysignaalista. Hälytysrajavalvonnan perustana värähtelylle on yleensä kiihtyvyyden tai nopeuden tehollisarvo.
- Muiden värähtelyanalyysien kuten FFT, kurtosis tai tahdistettu summaus tekeminen.
- Kontaktisuureiden on-off valvonta

Erilaisten analysointi- ja liikennöintiohjelmien lisäksi mittaus- ja valvontayksikön tulisi sisältää ohjelmia esimerkiksi varoitus- ja hälytysrajojen asettamiseen, laitteiston itsetestaukseen ja erilaisten asetus- ja referenssiarvojen muuttamiseen /29/.

4.4.2 Keskuslaitteisto

Keskuslaitteiston tehtäväksi jää lähinnä valvontayksikön välittämien mittaustietojen raportointi ja tallennus sekä toimiminen käyttäjän yhteytenä kunnonvalvontajärjestelmään. Keskuslaitteiston toimintoja ovat esimerkiksi

- Mittaus- ja analysointitietojen aikahistorioiden eli trendien tallentaminen kannavittain.
- Varoitusten ja hälytysten tulostaminen ja tallentaminen aikajärjestyksessä sekä tarvittaessa niiden välittäminen edelleen valvomoon.
- Halutun toiminnan valinta ja sen toteutus. Toimintoja ovat tietyn tallennetun tiedon tulostus, halutun mittausarvon tulostus, tietyn analyysin tekeminen tai asetusarvojen muuttaminen.
- Alkuperäisten toiminta-arvojen kuten sormenjälkisppektrin tallentaminen ja tulostus haluttaessa.
- Oheislaitteiden, kuten kirjoittimen tai levyaseman, ohjaus.
- Kommunikointi valvomon ja prosessitietokoneen kanssa.

Valvontayksikön ja keskuslaitteiston tehtävien erot eivät aina ole kovin suuria ja eri valmistajilla tehtävät ovat joskus hieman sekoittuneet. Käyttäjä ei tätä eroa välttämättä edes huomaa, sillä kaikki ohjaus tehdään kuitenkin tietokoneella.

5 SÄHKÖVERKON VIKADIAGNOSTIIKKA

Laivaverkko on sähkölaitos, jonka tehontuotto vastaa suurimmillaan pienten kaupunkien tehontarpeita. Verkon sähköenergia tuotetaan dieselgeneraattoreilla tai turbogeneraattoreilla. Sähkönjakeluverkon päätehtävänä on generaattoreiden kehittämän sähköenergian kokoaminen ja jakaminen siten, että kaikissa olosuhteissa turvataan laivan kulun ja turvallisuuden kannalta välttämättömien kuluttajien keskeytymätön sähkönsaanti.

Koska sähköverkon vikadiagnostiikka liittyy hyvin läheisesti verkon suojaukseen, käydään luvussa ensin läpi suojaukseen liittyviä perusasioita. Verkon mittaustiedot on tarkoitus kerätä releiden kautta, joten luvussa käydään läpi myös laivaverkon yleisimmät releet ja niiden toimintaperiaate. Lisäksi käydään läpi itse vikadiagnostiikkaa.

5.1 Sähköverkon suojaus

Sähköverkossa tapahtuvia vikatilanteita varten voimalaitokset varustetaan suojalaitteilla, joista tärkeän osan muodostavat suojareleet. Releet tarkkailevat sähköverkon tilaa ja suorittavat tarpeen vaatiessa kytkentöjä automaattisesti, luotettavasti ja nopeasti.

Relesuojaukselta edellytetään /30/, että

- toiminnan on oltava selektiivistä, jotta vian sattuessa mahdollisimman pieni osa verkosta jää pois käytöstä,
- toiminnan on tapahduttava riittävän nopeasti ja herkästi niin, että vaarat, vauriot, häiriöt ja haitat jäävät kohtuullisiksi sekä verkon stabiilisuuden tulee säilyä kaikissa olosuhteissa,
- suojaus kattaa aukottomasti koko suojattavan järjestelmän,
- sen on oltava käyttövarma ja mahdollisimman yksinkertainen,
- käytettävyyden on oltava hyvä,
- suojaus on voitava koestaa käyttöpaikalla ja
- suojauksen on oltava hankintakustannuksiltaan kohtuullinen.

Suojareleet ja niiden ohjaamat katkaisijat muodostavat suoja-alueita. Jos vierekkäiset suoja-alueet peittävät osaksi toisensa, on suojaus aukoton. Suoja on absoluuttisesti selektiivinen, kun se toimii vain omalla suoja-alueellaan tapahtuvissa vioissa. Selektiivisyys on ominaisuus, jonka avulla rele havaitsee vian suoja-alueella, muttei toimi, jos vikaa ei ole tai vika on suoja-alueen ulkopuolella. Näiden osittain vastakkaisten vaatimusten täyttäminen edellyttää, että suojareleet ja -releistykset suunnitellaan ja rakennetaan muista sähköaseman automaatiolaitteista mahdollisimman riippumattomiksi.

Järjestelmä koostuu normaalisti suojareleistä, hälytyslaitteistosta, valvontayksiköstä ja tiedonsiirtolaitteistosta. Hälytyslaitteistoa ja valvontayksikköä tarvitaan, jotta vikatilanteista saataisiin mahdollisimman nopeasti ja luotettavasti oikea kuva. Releitä on usein suuriakin määriä tarkasteltavassa kohteessa eri puolille sijoitettuina, jolloin releiden toimintatietojen keskitetty kerääminen on tarpeellista. Tapahtumien jälkianalyyysissa selkeästä ja oikea-aikaisesta raportoinnista on suurta hyötyä.

Toimivan suojauksen voi toteuttaa myös vanhoilla mekaanisilla releillä. Tällöin ei ole kuitenkaan mahdollista saada verkon suureista tietoa. Vasta uudet mikroprosessoripohjaiset releet ovat tuoneet mukanaan mahdollisuuden välittää tietoja myös käyttäjälle. Mikroprosessoripohjaiset releet ovat tehneet mahdolliseksi myös sähköverkon vikadiagnostiikan.

Mikroprosessoripohjaisen relesuojausjärjestelmän etuja ovat /31/

- suuri joustavuus,
- järjestelmien itsediagnostiikka ja omien vikojen paikallistaminen,
- vikojen analysointi jälkikäteen,
- informaation keruu mahdollista,
- kustannusten säästö ja
- suuri toimintanopeus.

Tähän mennessä, varsinkaan laivoissa, ei mikroprosessorireleiden mahdollisuuksia ole käytetty koko laajuudessaan. Toiminnan nopeus ja joustavuus ovat olleet riittävät perustelut mikroprosessorireleiden valintaan. Tietojen keruu ja vikojen analysointi jälkikäteen ovat jääneet erittäin vähälle huomiolle. Osasyynä tähän ovat olleet puutteelliset käyttöohjelmat. Toinen syy on se, että sähköverkot ovat kuitenkin olleet hyvin toimivia ja vikojen on ollut niin vähän, että ne eivät ole häirinneet liiaksi. Lisäksi tiedonsiirto on hankalissa, häiriöllisissä olosuhteissa ollut epävarmaa. Kynnys uuden tekniikan käyttöön on siis ollut korkea. Jos järjestelmästä kuitenkin halutaan karsia viat pois, on vikojen diagnosointi tarpeen. Samalla korjaustoimenpiteet nopeutuvat /31/.

Nykyisin laivoissa käytetyissä releissä on jo valmiiksi mittaustoimintoja. Toistaiseksi niitä on käytetty vain suojaukseen, mutta niitä voi käyttää myös diagnostiikan apuvälineenä. Käytettyihin releisiin saa optiotoimintona myös optisen tiedonsiirtoväylän.

5.2 Vikatyypit

Sähköverkossa tapahtuvia vikatilanteita ovat mm. oikosulut, maasulut, ylikuormitukset, ylijännitteet, alijännitteet ja johdinkatkokset /30/. Sähkölaitostekniikan laitteiden tärkeimpiä mitoitus- ja valintaperusteita nimellisvirran ja -jännitteen ohella ovat epänormaalisissa tilanteissa esiintyvät suurimmat jännitteet ja virrat. Jännitteiden osalta

ylärajaan voidaan vaikuttaa suojalaitteilla, venttiilisuojilla tai vastaavilla laitteilla. Oikosulkuvirtojen suhteen ei tällaista mahdollisuutta ole sulakkeita ja virtaa rajoittavia katkaisijoita lukuunottamatta. Yleisesti laitteet mitoitetaan ja valitaan verkossa esiintyvän suurimman oikosulkuvirran mukaan /32/.

Myös releiden valinnassa otetaan huomioon vikatilanteissa ilmenevät normaalia suuremmat virrat. Jokainen suojattava kohde varustetaan ylivirtasuojalla. Koska oikosulku on yksi yleisimpiä ylivirran aiheuttajia, käsitellään oikosulkua hieman tarkemmin. Perusteelliset, luokituslaitosten hyväksymät oikosulkulaskut löytyvät IEC:n julkaisuista 363 /33/ ja 909 /34/.

Oikosululla tarkoitetaan jännitteellisten osien välistä epänormaalia yhteyttä pienen impedanssin kautta. Oikosulkuun liittyy tavallisesti eristyksen rikkoutuminen ja virta, joka ylittää huomattavasti nimellisvirran. Oikosulku voi olla 1-, 2- tai 3-vaiheinen. 1-vaiheista oikosulkua kutsutaan yleensä maasulkuksi. Oikosulku voi aiheutua monista erisyistä /32/, joita ovat

- eristyksen vanheneminen ja mekaaninen haurastuminen,
- korjaus- ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä asetettujen maadoitusten unohtuminen paikalleen,
- ylijännitteen aiheuttama valokaari eristysvälin ylitse,
- mekaaninen vaurio, joka turmelee eristyksen,
- virheelliset käyttötoimenpiteet, kuten jännitteen kytkeminen maadoitettuun laitokseen, kuormitusvirran katkaiseminen erottimella ja virheellinen tahdistus.

Oikosulku aiheuttaa vaikutuksia /32/, jotka on otettava huomioon laitteiden mitoituksessa ja suojauksen suunnittelussa.

- Oikosulkuvirta aiheuttaa voimia virrallisten osien välille.
- Oikosulkuvirta aiheuttaa virrallisten osien lämpenemistä ja osien lämpölaajenemista.
- Oikosulkuvirta aiheuttaa jännitteitä maadoitettujen osien välillä ja häiriöjännitteitä lähellä oleviin rakenteisiin. Nämä jännitteet on rajoitettava riittävän pieniksi henkilö- ja laitevaurioiden välttämiseksi.
- Kun oikosulkuun liittyy valokaari, on henkilövaurioiden syntyminen estettävä.

Sähköverkkoa suunniteltaessa voidaan vaikuttaa oikosulkuvirran suuruuteen ja oikosulkuvirran kestoaikaan. Näiden seikkojen valinnassa on yleensä tehtävä kompromissi eri näkökohtien välillä.

Oikosulkuvirran suuruus on tunnettava laitteiden valintaa varten ja suojauksen suunnittelemiseksi. Suojauksen vuoksi on tunnettava myös virran pienin arvo ja virta eri verkkotilanteissa. Oikosulkuvirran suuruus riippuu

- verkon jännitteestä,

- verkon oikosulkutehosta,
- vian luonteesta (1-, 2- tai 3-vaiheinen vika),
- kuormituksen vaikutuksesta virtaan,
- oikosulkukohdan omasta impedanssista.

Liitteessä 1 käydään oikosulkuvirran laskemisen pääpiirteet lyhyesti läpi.

5.3 Releet

Releissä on yhdistettynä useita eri suojaustoimintoja. Jokainen eri suojaustoiminto on eri moduulissa ja jokainen moduuli toimii omana yksikkönään. Releet voivat toimia suojaustehtävissä itsenäisinä yksikköinä. Niihin voi halutessaan lisätä tarkempia mittaustoimintoja, jolloin verkon valvonta ja vikojen analysointi on mahdollista. Jotta mittauksien tiedot voidaan säästää myöhempää analysointia varten, edellyttää se releiltä sisäistä muistia /35/.

Suojareleelta saatavia tietoja ovat mittaussuureiden oloarvot, asetteluarvot, tilatiedot ja tapahtumatiedot. Rekisteröityjä tietoja ovat laukaisuhetken mitta-arvot, havahtuneena-oloajat ja erilaiset kumulatiiviset laskuritoiminnot kuten havahtumislaskurit, jälleenkytkentälaskurit käynnistystietolaskureineen ja katkaisijan työmäärälaskuri. Tapahtumätietona saadaan laukaisutieto, laukaisun aiheuttaja ja katkaisijan tilatietojen muutokset /31/.

Luvussa käsitellään lyhyesti käytetyt releet, niiden ominaisuudet ja käyttötarkoitus. Tässä yhteydessä keskitytään varsinaisiin suojaustoimintoihin. Myöhemmin käsitellään erikseen varsinaiset diagnostiikkaan vaikuttavat ominaisuudet, jotka useimmilla releillä ovat samanlaiset.

5.3.1 Moottorinsuojarele

Moottorinsuojarele on integroitu mikroprosessoripohjainen virtaa mittaava monitoimisuojausvaihtovirtamoottoreiden suojaukseen. Pääasiallisesti moottorinsuojarelettä käytetään keskikokoisten ja suurten kolmivaiheisten epätahti- ja tahtimoottoreiden suojaukseen. Rele soveltuu sekä kontaktori- että katkaisijaohjattujen moottorikäyttöjen suojaukseen.

Moottorinsuojarele on toisiosuojarele, joka mittaa verkon vaihevirtoja ja nollavirtaa ja joka kytketään suojattavan moottorin syötön virtamuuntajiin. Suojauskohteen syötön kolme vaihevirtaa ja nollavirta mitataan jatkuvalla näytteenottoperiaatteella. Mittauksien perustuen rele laskee suojauskohteen, useimmiten moottorin, termisen tilan, havaitsee maasulut, äkilliset kuorman katoamiset, väärät vaihejärjestykset, verkon vaihe-epäsymmetriat ja vaihekatkokset. Vikatilanteessa suojauselin havahtuu antaen

joko hälytyksen tai katkaisijan laukaisukäskyn asetellun sovelluskohtaisen toimintamallin mukaan.

Moottorinsuojareleessä on kuusi lähtörelettä, joista useimmat ovat vapaasti ohjelmoitavissa käyttäjän tarpeiden mukaan. Näiltä ohjelmoitavilta releiltä voidaan sopivalla ohjelmoinnilla saada eri suojauselinten havahtumistietoja, ylikuormituselimen ennakkohälytys ja käynnistyksen estotieto kosketintietona. Kosketintietoja käytetään esimerkiksi toisten suojausreleiden lukitsemiseen, hälytysten antoon tai moottorikäytön tai prosessin automatiikan tulotietoina /36/.

5.3.2 Generaattorinsuoja

Generaattorinsuoja sisältää generaattorin ja sitä käyttävän voimakoneen suojausfunktiot. Voimakoneen suojaukseen käytetään takatehosuojaa, joka estää generaattoria pyörimästä moottorina. Generaattorin suojana ovat jännitteenoususuoja, oikosulkusuoja sekä maasulkusuoja.

Jännitteenoususuoja on toteutettu kaksiporraisella ylijännitesuojalla. Oikosulkusuojana käytetään ylivirtasuojaa, jossa on sekä pikalaukaisu- että normaali ylivirtaporras. Maasulkusuojaus on toteutettu kaksiporraisella suunnatulla maasulkuyksiköllä.

Ylijännitesuojaus sisältää kaksi porrasta $U>$ ja $U>>$. Kun jännite ylittää portaan asetteluarvon, tämä porras havahtuu ja antaa ohjauksen lähtöreleelle. Käyttäjä saa valita arvot $U>:n$ ja $U>>:n$ raja-arvoiksi.

Takatehoporras mittaa yksivaihetehoa generaattorin ja verkon välillä vaiheiden virran sekä vaiheiden välisen pääjännitteen avulla. Pätötehon suunnan muuttuessa verkosta generaattoriin päin, takatehoyksikkö havahtuu, kun sen takatehon asetteluarvo ylittyy. Asetellun toimintahidastuksen kuluttua yksikkö antaa ohjauksen lähtöreleelle.

Kun jokin vaihevirta ylittää ylivirtayksikön normaaliportaan asetteluarvon, tämä saa aikaan ylivirtaelimen havahtumisen, jolloin vastaava aikapiiri käynnistyy. Kun aika on kulunut loppuun, yksikkö antaa ohjauksen lähtöreleelle.

Maasulkusuojaus sisältää kaksi porrasta $I\varphi>$ ja $I\varphi>>$. Kun nollajännite ylittää oman asetteluarvonsa ja $I_0\cos\varphi$ tai $I_0\sin\varphi$ $I\varphi>$ -portaan asetteluarvon (φ on nollavirran ja -jännitteen välinen vaihekulma), tämä porras havahtuu ja antaa ohjauksen lähtöreleelle /36/.

5.3.3 Differentiaalirele

Differentiaalirele on tarkoitettu kaksikämmimuuntajien ja generaattori-muuntaja -yksiköiden käämisulku-, kierrossulku-, maasulku- ja oikosulkusuojaukseen sekä generaattoreiden käämisulku- ja oikosulkusuojaukseen. Rele soveltuu myös kolmikäämmuuntajien suojaukseen.

Differentiaalirele muodostaa integroidun kokonaisuuden, joka sisältää kolme itsenäistä suojarелеmoduulia, kolmivaiheisen vakavoidun differentiaalirelemoduulin, maasulkurelemoduulin sekä yhdistetyn ylivirta- ja maasulkurelemoduulin.

Käämi- ja kierrossulkusuojaus toteutetaan differentiaalirelemoduulilla. Differentiaalirele vertailee suojauskohteeseen tulevia vaihevirtoja sieltä lähteviin vaihevirtoihin. Jos vaihevirroista lasketun erovirran arvo on yhdessä vaiheessa moduuliin asetellun vakavoidun toimintakäyrän arvoa tai aseteltua pikalaukaisurajaa suurempi, moduuli laukaisee. Erovirta voi aiheutua virtojen amplitudi- tai vaihe-erosta tai yhdistetystä amplitudi- ja vaihe-erosta.

Suojausalueella olevissa yksi- tai kaksivaiheisissa maasuluissa voi vaihevirtoja mittaavan differentiaalisojauksen herkkyys olla riittämätön, etenkin jos muuntajan tähtipiste on maadoitettu resistanssin kautta. Maasulkurelemoduulilla voidaan suojata kaksikämmimuuntajan ylä- ja alajännitepuolen käämit. Maasulkusuojaus toteuttamiseksi voidaan vapaasti valita joko numeerinen vakavoitu erovirtaperiaate, suurimpedanssiperiaate, vaihevirtojen summavirran ylivirtaperiaate tai nollavirran ylivirtaperiaate. Ylä- ja alajännitepuolen maasulkusuojaukset ovat toisistaan riippumattomia, joten alajännitepuolella voidaan käyttää eri suojausperiaatetta kuin yläjännitepuolella.

Yhdistetyn ylivirta- ja maasulkurelemoduulin ylivirtasuoja on tarkoitettu yksi-, kaksi- tai kolmivaiheiseen ylivirtasuojaukseen. Ylivirtasuoja soveltuu tehomuuntajien ja generaattoreiden oikosulkusuojaukseen.

Maasulkusuoja on tarkoitettu suuntaamattomaan maasulkusuojaukseen. Maasulkusuoja soveltuu maasulun varasuojaksi tehomuuntajille /36/.

5.3.4 Muuntajasuojarele eli ylivirta- ja maasulkurele

Yhdistetty ylivirta- ja maasulkurele on tarkoitettu käytettäväksi säteittäisten maasta erotettujen, vastuksen kautta tai impedanssin kautta maadoitettujen verkkojen selektiiviseen oikosulku- ja maasulkusuojaukseen. Suojarele muodostaa integroidun kokonaisuuden, joka käsittää sekä ylivirtasuojan että maasulkusuojan ja erittäin joustavat laukaisu- ja hälytystoiminnot. Johtolähdön suojana relettä voidaan käyttää yksi-, kaksi- tai kolmivaiheiseen oikosulkusuojaukseen ja suuntaamattomaan maasulkusuojaukseen. Ylivirta- ja maasulkurele sisältää myös katkaisijavikasuojaus.

Ylivirta- ja maasulkurele on toisioreleyhdistelmä, joka liitetään suojattavan lähdön virtamuuntajiin. Kolmivaiheinen ylivirtasuoja ja suuntaamaton maasulkusuoja mittaavat jatkuvasti suojattavan lähdön vaihevirtoja ja nollavirtaa. Vikatapauksessa suoja käynnistää ulkoiset jälleenkytkentätoiminnot tai ohjaa katkaisijaa, riippuen valitusta suojaustavasta.

Laukaisuyksikön ohjelmoinnilla saadaan ylivirtasuojan ja suuntaamattoman maasulkusuojan havahtumisista kosketintiedot, joita voidaan käyttää edelleen esimerkiksi muiden saman suojauskohteen suojauskohteiden lukitussignaaleina /36/.

5.3.5 Kiskostosuoja eli kiskostojännitteiden valvoja

Kiskostojännitteiden valvoja on tarkoitettu kiskoston nollajännitteen sekä pääjännitteiden valvontaan ja rekisteröintiin. Rele muodostaa integroidun suojauskokonaisuuden, joka sisältää kolme mittaavaa pistoyksikköä. Kiskoston nollajännitettä mittaa kaksiporainen ylijännitereleyksikkö. Pääjännitteitä valvoo kolmivaiheinen yli- ja alijännitereleyksikkö. Lisäksi relepakettiin voidaan asentaa häiriötietojen tallennin, joka tallentaa releen mittaamat jännitteet sekä suojausyksiköiden havahtumiset.

Kun kiskoston nollajännite ylittää nollajänniteyksikön alemman portaan asetteluarvon, tämä saa aikaan ylijännite-elimen havahtumisen ja tietyn ajan kuluttua ohjauskäskyn antamisen. Vastaavasti toimii nollajänniteyksikön ylempi porras.

Kun jokin jännitereleyksikön mittaamista jännitteistä ylittää ylijänniteportaan asetteluarvon, ylijännite-elin havahtuu ja suorittaa asetellun toimintaviiveen kuluttua laukaisun. Jos yksikin jänniteyksikön mittaama jännite alittaa alijänniteportaan asetteluarvon, käynnistyy alijännite-elimen aikapiiri.

Jälleenkytkentöjen aikana tapahtuvien turhien toimintojen välttämiseksi yli- ja alijänniteyksikön alijänniteportaan havahtuminen ja laukaisu on mahdollista estää asetuksia vaihtamalla.

Häiriötietojen tallennin tallentaa häiriötilanteessa nollajännitteen ja pääjännitteiden käyrämuodot sekä suojausyksiköiden havahtumiset ja ulkoisen tulosignaalin tilan. Yksikölle voidaan ennalta asettaa ehdot, joilla tallennus aloitetaan. Signaalien tallennus voidaan liipaista mitattavan jännitteen ylittäessä tai alittaessa asetellun rajan tai jonkin havahtumissignaalin tai ulkoisen tulosignaalin nousevalta reunalta /36/.

5.4 Relesuojauksen diagnostiikka

Suojauskohteita käytetään sähköverkkojen vikojen suojaukseen ja eristykseen. Vikojen tapahtuessa releiden tehtävä on pitää muun verkon vauriot pieninä. Keskeytykset ovat kuitenkin aina ikäviä ja aiheuttavat yleensä tehohäviöitä ja samalla tulon menetyksiä. Jotta näiltä vältyttäisiin, vikojen syyt on selvitettävä. Tähän tarvitaan yksityiskohtaista tietoa vikatilanteesta. Pelkkä mittaustieto ei vielä riitä, vaan tarvitaan myös ohjelmisto, jonka avulla kaikki kerätty tieto hallitaan ja jolla vikatilanteita voidaan analysoida.

Oikeita päätöksiä tehdessä tarvitaan tarkkaa, luotettavaa ja tarpeeksi yksityiskohtaista tietoa. Tietoa keräävän laitteiston on oltava helpokäyttöinen. Sellaisenkin, joka ei ole

asiantuntija, täytyy pystyä käyttämään ohjelmaa. Diagnostiikka voidaan toteuttaa joko automaattisella tai manuaalisella tiedonkeruulla. Vähimmäisvaatimuksena on, että jos automaatiota ei ole, käyttöhenkilökunnan on vähintäänkin osattava kerätä tarvittava tieto releiltä siten, että se on tallessa laivan valvontatietokoneen muistissa. Tiedonsiirtoyhteydet mahdollistavat tämän jälkeen tiedon keräämisen laivan tietokoneelta maasemalle. Ensisijaisesti kaukodiagnostiikka pyritään varustamaan automaattisella tiedonkeruulla.

Turhan tiedon keräämistä ja siirtämistä pitää välttää. Lisäksi tieto on pyrittävä käsittelemään niin aikaisessa vaiheessa kuin mahdollista. Tällöin vältetään tarpeettoman suurilta ja kalliilta järjestelmiltä. Jos tiedetään verkon herkimmät kohdat, voidaan valvontaa keskittää, jolloin saavutetaan säästöjä. Säästöjä suunniteltaessa täytyy kuitenkin muistaa, että valvonta ei saa häiritä suojaustoimintoja /37/.

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin releiden diagnostiikkaa, kuten esimerkiksi mittausten tarkkuuteen ja analysointiin liittyviä asioita mittaustoimintojen ja tiedonsiirron osalta. Lisäksi käydään läpi häiriöiden selvitystä sekä tietojen hyödynnettävyyttä. Releiden itsekoestusta tarkastellaan myös lyhyesti.

5.4.1 Mittaustoiminnot

Eristysvikoja valvovat suojaustoiminnot ovat tyypillisesti nopeita ja edellyttävät mittaukselta laajaa mittausaluetta. Mitattavat vikasuureet saattavat olla monikymmenkertaisia normaalitilanteen arvoihin verrattuna. Toisaalta taas mittauksen tarkkuudelle ei aseteta kovin suuria vaatimuksia. Tällaisia suojaa ovat ylivirtareleet pikalaukaisuportaineen, impedanssireleet ja erovirtareleet.

Käyttöä valvovat toiminnot taas edellyttävät mittaukselta suurta tarkkuutta suppealla mittausalueella. Luonteeltaan käyttöä valvovat toiminnot ovat hitaita. Tällaisia suojaa ovat esimerkiksi ylikuormitussuojat ja kiskojännitteen valvojat.

Diagnostisista lähtökohdista katsottuna on selvää, että joissain tapauksissa tarvitaan tarkempaa mittaustietoa. Erityisesti vikatilanteissa käyrämuotojen esiinsaanti on erittäin tarpeellista. Tällöin tarvitaan välttämättä erillisiä mittalaitteita, joista yksi esimerkki on häiriötietojen tallennin /38/.

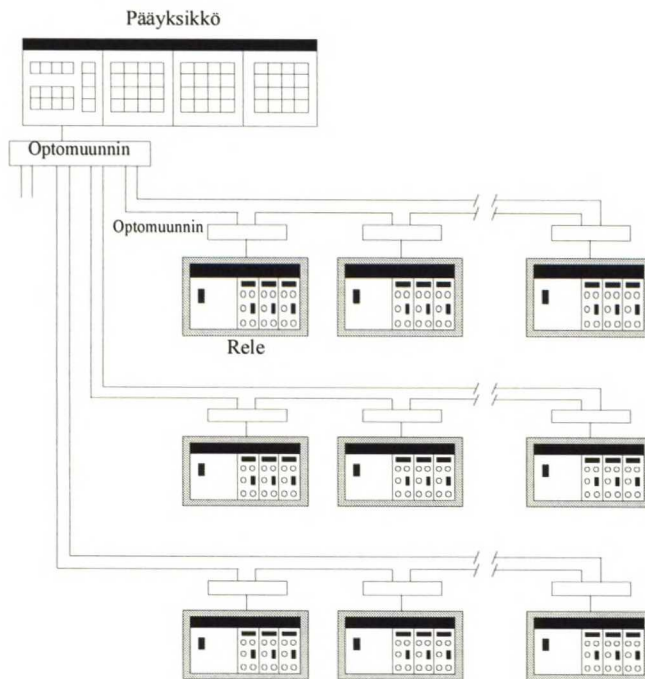
5.4.2 Suojareleiden tiedonsiirto

Proessoripohjaiset suojareleet ovat tehneet mahdolliseksi tietojen siirron sarjamuodossa suojareleiltä valvontayksikölle. On mahdollista hyödyntää suojareleen mittaamia signaaleja siirtämällä ne suoraan suojareleelta kaukokäyttöön, eikä tällöin tarvita erikseen mitta-arvonmuuntimia, vaan voidaan hyödyntää samaa mittamuuntajan sydäntä

sekä mittaukseen että suojaukseen. Tällöin on syytä varautua tarkkuusluokaltaan tavallista tarkempiin mittamuuntajiin.

Katkaisijakennokohtaiset toisiopaketit on kytketty useimmiten läpikytkevällä sarjaväylällä asematason isäntäkoneeseen. Läpikytkentä tarkoittaa sarjaväylän yhteydessä sitä, että sanoma kulkee jokaisen paketin läpi, eikä haarautu kunkin kytkettävän laitteen kohdalla T-haaroittimella kuten esimerkiksi koaksiaalikaapeliväylien yhteydessä on tapana. Tavanomaisin tapa toteuttaa sähköaseman sarjaväylä on käyttää valokaapelia, jonka etuja ovat alhainen vaimennus, suuri siirtokapasiteetti, tunteettomuus sähkömagneettisille häiriöille, mahdollisuus galvaaniseen erotukseen lähetys- ja vastaanottopään välillä, pieni koko ja keveys. Valokaapelilla ei myöskään ole ylikuulumista ja sala-kuuntelu on erittäin vaikeaa.

Käytettäessä läpikytkevää sarjaväylärakennetta on ymmärrettävää, että mitä useampi laite sarjaväylään on liitetty, sitä suurempi on todennäköisyys, että ketju katkeaa. Yhdenkin modulin jännitteiden katoaminen katkaisee väylän toiminnan. Sarjaväylän toteuttaminen kestävämmäksi yksittäisen tehollähteen, sarjaväylämodulin tai kaapelin vioittumiselle saadaan jakamalla se pienempiin osiin.



Kuva 5.1 Sarjaväylän jakaminen useaan silmukkaan

Kuten kuvassa 5.1 esitetään, asematason isäntäyksikön yhteydessä voidaan käyttää usean sarjaväylämodulin yksikköä, jolloin sarjaväylät voidaan jakaa fyysisesti useaan toisistaan fyysisesti riippumattomaan osalenkkiin. Tällä tekniikalla on helppo toteuttaa ratkaisut, joissa pyritään vain muutaman relepaketin liitântään yhtä silmukkaa kohden. Silmukkamäärä riippuu järjestelmän koosta ja halutusta vikaantumisriskin tasosta. Hinta

on verrannollinen silmukoiden määrään. Kun vikaantumisriski on tarpeiden mukaisella tasolla, koko integroidusta järjestelmästä saadaan rakennettua luotettava kokonaisuus rikkomatta kuitenkaan suojauksen itsenäistä roolia.

Liitettäessä väylä ylemmän tason laitteeseen, siirrettävät tiedot saadaan hyödynnettyä monessa eri muodossa. Jos ylemmän tason laite sisältää älykkyyttä, voidaan suoja-reileiltä ja hälytysyksiköiltä saatavat tiedot hyödyntää esimerkiksi tapahtumaraportoinnin muodossa tai mahdollisesti siirtää tiedot edelleen valvomoon.

Järjestelmän isäntälaitteena toimii yksikkö, joka kerää jatkuvasti tapahtumatietoja suoja- ja hälytysyksiköiltä ja voi edelleen välittää tiedot protokollasovittimen kautta valvomoon. Lisäksi paikallinen tapahtumaraportointi on mahdollista paikalliselle kirjoittimelle tai erilliselle päätteelle /35/.

5.4.3 Häiriöiden selvitys

Häiriön selvitys jakaantuu manuaaliseen ja automaattiseen häiriön selvitykseen. Kun vika on aiheuttanut lopullisen laukaisun verkossa, laukaisun syyt joudutaan selvittämään, jotta tiedetään mihin toimenpiteisiin täytyy ryhtyä. Kaukokäytön kautta siirtyvät tyypillisesti hälytystiedot kyseisestä tapahtumasta. Hälytystiedoista voidaan päätellä mikä aiheutti laukaisun. Rekisteröidyistä tiedoista saadaan selville vielä tarkempia tietoja vian laadusta.

Ohimenevien häiriöiden tapauksessa kiinnostaa mikä on häiriön aiheuttaja, koska vika voi kehittyä suuremmaksi tai on muuten vain kiusallinen ja rasittaa turhaan verkkoa. Tällaisissa tapauksissa on hyötyä häiriöpiirtureista ja muistitoiminnoista, joilla saadaan tallennettua muistiin mittaussignaaleja ja asentotietoja. Rekisteröidyistä tiedoista saadaan myös selville esimerkiksi kuinka monessa vaiheessa häiriö esiintyy ja kuinka suuri vikasuureen arvo on ollut.

Automaattista häiriön selvittelyä toteutetaan esimerkiksi jälleenkytkentäreleellä ja taukoerottimien avulla. Automaattisen häiriönselvittelyn piiriin voidaan lukea myös katkaisijavikasuojaus.

Tekoälytyyppiset toiminnot antavat oman apunsa häiriön selvittelyyn ja myös verkon uudelleen rakentamiseen. Tekoälyjärjestelmät tulevat perustumaan verkosta saataviin mittaus- ja rekisteröintitietoihin. Tällä hetkellä ei voi puhua varsinaisesta tekoälystä, sillä pikemminkin kyse on ohjelmistoista, joihin on talletettu suuri määrä vikatietoja. Jos samanlainen ilmiö havaitaan, pystyy ohjelma suoraan kertomaan, mikä vikatyyppejä on kyseessä. Koska näiden tietojen määrä tulevaisuudessa vain kasvaa, tulee välttämättömäksi tietojen esikäsittely ennen kuin ne edes siirretään valvomoon /35/.

5.4.4 Tietojen hyödynnettävyys

Suojareleet yhdistettynä hälytysjärjestelmään antavat mahdollisuuden tarkkaan tapahtumaraportointiin. Tapahtumaraportista voidaan nähdä, mistä häiriö on saanut alkunsa. Myös suojareleiden rekisteröivää ominaisuutta voidaan käyttää hyödyksi häiriön selvittämisessä. Suojattavalla alueella, lähdoissa tai asemalla, tapahtuvien vikojen analysointiin ja selvittämiseen muistiin rekisteröidyt arvot tarjoavat tietoa vian laadusta.

Releiden muistiin rekisteröidään yleensä havahtumisien lukumäärä ja mittaussuureen maksimiarvo, joka korvautuu releen toimiessa toimintahetken arvolla. Havahtumistietojen lukumäärä yhdessä maksimiarvon kanssa antavat melko hyvän tiedon siitä, ovatko toiminta-arvot lähellä normaalisti esiintyviä käyttöarvoja.

Viat ovat harvinaisia ja sen vuoksi jatkuva asiantuntijan läsnäolo laivalla ei ole tarpeellista. Kun järjestelmä sisältää muistia ja automaattisen tiedon keräyksen, erillistä valvontahenkilöä normaalin käyttöhenkilökunnan lisäksi ei tarvita. Vian tapahtuessa tiedot kerätään automaattisesti ja siirretään maa-asemalle, jossa tarvittaessa useampikin asiantuntija perehtyy mittaustuloksiin. Tällä menetelmällä saadaan henkilöresurssit paremmin käyttöön, kun hukka-aikaa ei kulu laivalle matkustamisen muodossa. Aikaa säästetään myös, kun vika analysoidaan heti ja tarvittavista toimenpiteistä ilmoitetaan käyttöhenkilöille välittömästi. Tällaisen asiantuntijajärjestelmän avulla saadaan tarkemmat ja nopeammat tiedot tilanteesta. Se helpottaa analyysin tekemistä ja vika löytyy nopeammin ja helpommin kuin ennen /39/.

Järjestelmää voi käyttää joko online- tai offline -muodossa. Online-muodossa tietokone on suoraan kytketty releisiin ja tiedon keruu on automaattista ja tiedot saadaan välittömästi. Offline-muodossa saadaan hälytys ja vasta tämän jälkeen aletaan kerätä tietoja muistista. Tämä vaatii henkilön suorittamaan keräyksen. Online-tiedonkeruu asettaa suuria vaatimuksia tietokoneen kovalevytilalle tai sitten tiedot pitää kerätä riittävän usein. Myös käyttöohjelmiston on tällöin oltava monipuolisempi ja erillisellä tietokoneella sijaitseva ohjelmisto on oltava päällä koko ajan. Online-tiedonkeruun helppokäyttöisyydestä ja hyödyllisyydestä johtuen, se on suositeltava tapa järjestää vikadiagnostiikan mittaustoiminnot.

5.4.5 Suojareleiden itsekoestus

Mikroprosessorireleissä on suojausohjelmien lisäksi itsetestausohjelmisto, joka valvoo jatkuvasti suojareleen toimintaa. Kun itsetestaus havaitsee pysyvän vian jossain toiminnossa, ulostulojen toiminta estetään välittömästi sekä ohjelmallisesti että myös ulkoisen signaalin avulla. Näin vältetään laiteviasta johtuvilta vääriä havahtumistiedoilta. Vikatilanteissa releen näyttöön tulostetaan myös viasta kertova koodi. Samoin ilmoitus näkyy diagnostiikkalaitteiston avulla tietokoneen ruudulla.

Itsetestaus koostuu kolmesta eri tason testauksesta:

- Mittausohjelmassa estetään lähinnä lyhytaikaisista häiriöistä johtuvat virheelliset mittaukset.
- Niin sanotussa spontaanissa testauksessa, joka aktivoidaan suojausohjelmasta käsin, estetään lähinnä pysyvien vikojen aiheuttamat virheelliset laukaisut.
- Taustalla jatkuvasti toimivilla koestuksilla varmistetaan lähinnä mahdollisen vian ilmoitus ulospäin. Ulostulo-ohjaukset estetään vikatilanteessa.

Proessoripohjaisissa laitteissa on vaarana, että prosessori harhautuu ja lähtee lukemaan ohjelmakoodia väärästä osoitteesta. Suojareleissä tähän on varauduttu erillisellä valvonnalla. Normaalityössä itsetestausohjelma antaa valvontapiirille pulsseja. Jos nämä pulssit loppuvat, tai niitä tulee liian usein, valvontapiiri nollaa prosessorin ja käynnistää sen uudelleen.

6 VALVONTAJÄRJESTELMIEN VALINTA

Tässä luvussa perehdytään laitteistojen valintaan ja siihen vaikuttaviin asioihin. Ensin määritellään vaatimukset, joita laivaympäristö asettaa. Tämän jälkeen valitaan mielenkiintoisimmat laitteistot tai sovellukset vertailtavaksi. Vertailun jälkeen sopivin järjestelmä valitaan osaksi kaukodiagnostiikkaa. Lopuksi käsitellään vielä asioita, joihin on kiinnitettävä huomiota ennen järjestelmän asennusta laivaan. Samoin esitetään uusien laitteistojen liittyminen olemassa olevaan diagnostiikkajärjestelmään.

6.1 Laakereiden valvontalaitteisto

Laakereiden valvonta laivoissa on monimutkaista vaativan ympäristön vuoksi. Perinteinen valvontatapa on ollut lämpötilanmittaus, mutta tekniikan kehittyessä värähtelymittauksiin perustuva kunnonvalvonta on tullut mahdolliseksi myös laivoissa. Luvussa käsitellään laivaympäristöä ja sen asettamia vaatimuksia valvontalaitteistolle. Lisäksi tarkastellaan kaupallisia valvontalaitteistoja, joista kahta käsitellään tarkemmin. Lopuksi laitteistoja vertaillaan ja vertailun pohjalta valitaan käyttökelpoisin järjestelmä. Laivaympäristöön liittyy läheisesti Azipod-yksikkö, jota käsitellään omassa luvussaan.

6.1.1 Vaatimukset laitteistolle

Laivaympäristö on erittäin vaativa ympäristö värähtelymittauksen suorittamiselle. Koska laiva ei ole kiinteällä alustalla, moottoreiden ja generaattoreiden aiheuttamat värähtelyt vaikuttavat koko laivassa vaikeuttaen myös laakereiden värähtelymittauksien toteuttamista. Käytännössä nämä ympäristön omat värähtelyt aiheuttavat värähtelymittausten tuloksiin taustakohinaa, joka nostaa yleistä värähtelytasoa. Mittausjärjestelmän ja analysointiohjelmien on oltava tarpeeksi monipuolisia, jotta tätä korkeaa taustakohinaa ei sekoiteta laakerivikaan ja että laakerivika havaitaan taustakohinan seasta. Suotavaa olisi, että järjestelmä pystyisi myös erottamaan esimerkiksi akseli- tai moottorivian laakeriviasta. Kunnonvalvontahenkilökunnan on samalla oltava hyvin koulutettua ja asiansa osaavaa.

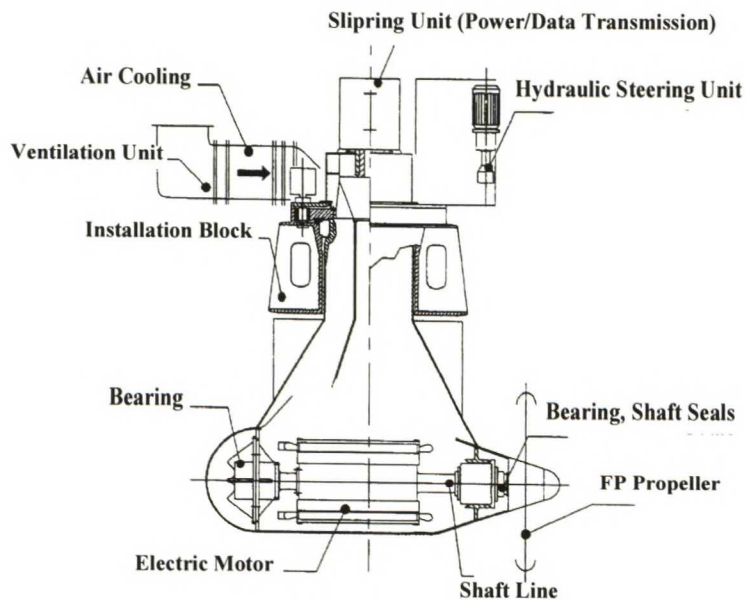
Tavoitteena on rakentaa järjestelmä, joka olisi mahdollista asentaa mihin tahansa laivaan, käyttökohteesta ja potkurijärjestelmästä riippumatta. Niinpä valinnassa on huomioitava vaativimmat mahdolliset olosuhteet. Koska kuitenkin esimerkiksi jäämurtajilla ja loistoristeilijöillä olosuhteet ovat huomattavan erilaiset, järjestelmä on joskus tarpeettoman varma ja samalla turhan kallis. Kaikesta huolimatta tämä tulee halvemmaksi kuin suunnitella ja testata erillistä valvontalaitteistoa jokaiseen laivaan.

6.1.2 Azipod-yksikkö

Yksi vaativimmista ympäristöistä värähtelymittauksen kannalta on Azipod-yksikkö, koska yksikkö sijaitsee laivan rungon ulkopuolella. Laivan kuoret eivät suojaa sitä ja se on alttiina iskuille. Nämä iskut tuntuvat myös laakereissa. Azipod-järjestelmässä potkurimoottori on sijoitettu Azipod-yksikön sisään eli laivan rungon ulkopuolelle. Akselilinja sisältää vain potkurin, tiivisteet, kaksi laakeria ja itse akselin. Perinteisiin potkurilaitteistoihin verrattuna akseli on lyhentynyt huomattavasti ja monta laakeria ja vaihteisto on jäänyt välistä pois. Azipodissa potkurimoottorin laakereina käytetään vierintälaakereita, jotta laakereiden valvonta olisi helpompaa. Azipodissa olevien laakereiden kuntoa on välttämätöntä valvoa, sillä laakereiden vaihto onnistuu parhaiten vuositarkastusten ohessa ja tällaisissa tapauksissa on pystyttävä ennustamaan laakerin jäljellä oleva ikä, jotta saadaan varmuus, kestäkö laakeri seuraavaan tarkastukseen asti.

Azipodin rakenne on yksinkertainen, mikä tekee siitä myös luotettavan. Potkurimoottori toimii normaalisti joko 9,0 tai 1,5 kV jännitteellä. Myös alemmat jännitteet ovat mahdollisia pienemmillä yksiköillä. Tehon- ja tiedonsiirto pyörimättömästä osasta pyörivään osaan tapahtuu liukurenkaiden kautta. Samoin tiedonsiirto toiseen suuntaan /40/.

Azipodin periaate on esitetty kuvassa 6.1



Kuva 6.1 Azipod-yksikkö /41/

Ominaisuuksiensa vuoksi Azipod soveltuu laivoihin, joissa vaaditaan hyvää ohjattavuutta, hiljaista ääntä, vähäisiä värähtelyjä ja joustavia koneistojärjestelyjä. Tällaisia ovat mm. tutkimusalukset, kaapelinlaskualukset, jäänmurttajat, matkustaja-alukset ja monet muut erilaiset alukset.

Rakenteensa vuoksi Azipod aiheuttaa tiettyjä ongelmia laakerin kunnonvalvontaan liittyen. Suurimpana ongelmana on mittaustiedon siirto Azipodista laivan sisäosiin. Erityisesti laakereiden värähtelymittauksessa tämä on ongelma, sillä anturista saatava mittaustieto on korkeataajuisista ja pienijännitteistä. Se on siis erityisen altis häiriöille /42/, joita Azipod-ympäristössä on tilan vähäisyydestä johtuen paljon. Samassa tilassa, missä mittaustiedon pitäisi kulkea, sijaitsevat myös moottorin syöttökaapelit. Lisäksi liukurenkaat eivät ole häiriökeston kannalta varmin tapa siirtää korkeataajuisia mittaustietoa, sillä liukurenkaissa signaalien suojaus on suhteellisen heikkoa ja häiriöt voimakkaita, koska moottorin syöttövirta kulkee myös liukurenkaiden kautta.

Azipod on ympäristönä erittäin värähtelyaltis. Azipodiin kohdistuu noin 10 Hz taajuudella 2 g suuruisia iskuja. Lisäksi satunnaiset iskut saattavat olla jopa 5 g. Näihin värähtelyihin vaikuttaa, kiihdytetäänkö tai jarrutetaanko laivaa, ajetaanko suoraan vai käännytäänkö, kuljetaanko jäissä tai onko merenkäynti kovaa. Jotta vääriä hälytyksiltä ja tarpeettomilta tallennuksilta vältyttäisiin, laakerinvalvontajärjestelmään joudutaan rakentamaan logiikka, joka estää mittauksen tallettamisen ja hälytyksien läpimenon tiloissa, joissa ympäristön aiheuttamat värähtelyt ovat liian suuret.

Lisäksi on huomioitava Azipod-yksikön sisällä toisinaan oleva erittäin korkea tai matala lämpötila. Normaalisissa käytöissä lämpötila on lähes vakio, sillä ilmastointi- ja seisontalämmitysyksikkö huolehtii lämpötilan pitämisestä vakiona. Mutta on mahdollista, että korjaustöiden tai muiden syiden vuoksi seisontalämmitys ei ole päällä. Tällöin esimerkiksi jäänmurtajissa lämpötila voi laskea joissain osissa yksikköä jopa nollan alapuolelle. Tämä on otettava huomioon valittavissa komponenteissa.

6.1.3 Kaupalliset valvontalaitteistot

Tarkoituksena on valita laakereiden kunnonvalvontalaitteisto, joka selvittää laakereiden kunnon varmasti ja mahdollisimman yksinkertaisesti vaativista olosuhteista huolimatta. Koska laakereiden valvonta halutaan liittää osaksi kaukodiagnostiikkaa, joudutaan valvonta ja mittaus tekemään automaattiseksi, tietokoneohjatuksi mittaukseksi, jossa kiinteästi asennetuista antureista saadut mittaustulokset tallennetaan tietyin, ennalta määräytyin väliajoin. Kun tietokone huolehtii mittausrutiineista, mittauksia voidaan tehdä huomattavasti useammin kuin manuaalisella mittauksella. Näin tuloksista saadaan luotettavampia.

Kaupallisia valvontalaitteistoja löytyi useita. Käytännössä valittavat laitteistot ovat kokonaisuuksia, jolloin valinta tehdään kaikkien ominaisuuksien, mittaustapa, tiedonkäsittely, ohjelmistot, yhteisvaikutuksen perusteella. Mittaustulosten informatiivisuuden kannalta on kuitenkin oikean mittaustavan löytäminen kaikkein oleellisinta. Lisäominaisuudet ovat hyödyllisiä, mutta ne eivät täysin korvaa huonon mittaustavan valintaa.

Osa laitteistoista karsiutui pois jo mittaustavan perusteella, sillä ei haluttu valita mittausta, joka on vasta kokeiluasteella. Kaikilla valmistajilla ei myöskään ollut tarjota mittaushdollisuutta sekä vierintä- että liukulaakereille. Eri valmistajien laitteistoja on vaikeaa yhdistellä keskenään eikä se olisi taloudellisesti kannattavaa. Niinpä keskityttiin vain valmiisiin kokonaisuuksiin. Joukosta erottui kaksi laitteistoa, joissa tarjonta ja vaatimukset tuntuivat kohtaavan. Nämä kaksi kiinnostavinta laitteistoa sisältävät toisistaan poikkeavat mittaustavat, jotka kuitenkin molemmat soveltuvat laivakäyttöön ja käytössä oleviin pyörimisnopeuksiin. Seuraavassa tarkastellaan laitteistoja hieman tarkemmin. Tarkastelun ensimmäinen laitteisto on laakerinvalmistaja SKF:n tekemä. Jatkossa puhutaan SKF-laitteistosta. Toinen tarkasteltava laitteisto on SPM Instrument Oy:n valmistama. Siitä käytetään jatkossa nimitystä SPM-laitteisto.

6.1.4 SKF-laitteisto

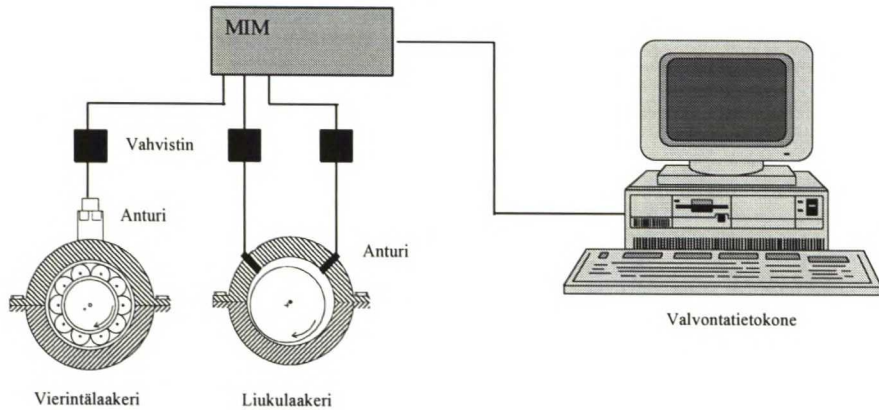
SKF-laitteistossa vierintälaakereiden värähtelyjä voidaan mitata siirtymä-, nopeus- ja kiihtyvyyssantureilla. Yleensä mitataan kiihtyvyyssantureilla. Vierintälaakereita on laivassa yleensä vain Azipod-yksikön moottorissa, jossa niitä on kaksi kappaletta. Kumpaankin laakeriin asennetaan yksi anturi, joka mittaa värähtelyjä kolmessa eri suunnassa. Kiihtyvyyssanturista saatava signaali on analogista jännitetietoa. Jännitteessä on korkeataajuisia, jopa lähes 40 kHz taajuuskomponentteja. Koska anturin antama signaali on hyvin heikkotehoista, sitä täytyy vahvistaa erillisellä vahvistimella, jossa tapahtuu lisäksi suodatusta ja verhoikäyrämuunnos. Jännitteessä on tämän jälkeen enintään noin 10 kHz taajuisia komponentteja. Vaihtoehtoisia valvontatapoja ovat värähtelyn kokonaistason mittaus, taajuusanalyysi sekä verhoikäyräanalyysi.

Muita valvottavia laakereita ovat generaattoreiden ja muiden moottoreiden liukulaakerit. SKF-laitteistossa liukulaakereita voidaan valvoa rataikäyrän mittaamisella tai tavallisella kiihtyvyyssanturilla värähtelyn yleistaso ja taajuusspektriä seuraten. Jos käytetään rataikäyrämittausta, kuhunkin laakeriin asennetaan kaksi siirtymäanturia. Jos käytetään kiihtyvyyssanturia, yksi anturi riittää. Kummassakin tapauksessa anturien signaaleja joudutaan vahvistamaan erillisellä vahvistimella. Liukulaakerin rakenteen vuoksi saatava mittaussignaali ei ole yhtä korkeataajuista kuin vierintälaakerilla.

Vahvistuksen ja suodatuksen jälkeen kaikki signaalit siirretään mittaus- ja valvontayksikölle, jossa suurin osa tiedonkäsittelystä tapahtuu. SKF:llä on kaksi erilaista yksikköä tätä tarkoitusta varten. Molemmissa on 32 kanavaa. Erona on tarvittavien esivahvistimien ja verhoikäyrämuuntimien sekä rataikäyrämittauksen tarve. Koska laivaympäristössä tarvitaan molempia, valitaan tietojenkäsittely-yksikkö, joka sisältää molemmat. Tämän yksikön nimi on MIM.

Mittaus- ja valvontayksikkö sijoitetaan lähelle valvontatietokonetta. Yksikössä suoritetaan osa laskuista, mutta keskusyksiköiden, tässä tapauksessa tietokoneen, tullessa

tehokkaammiksi, yhä suurempi osa laskurutiinista suoritetaan siellä. Tiedonsiirto Azipodista mittaus- ja valvontayksikköön on suurten häiriöiden vuoksi vaativaa. Laivan sisäpuolelta tiedon siirto sitävästoin onnistuu helposti esimerkiksi koaksiaalikaapeleilla. Mittaus- ja valvontayksiköstä siirretään käsitelty ja digitaaliseksi muutettu signaali sarjamuotoisena keskusyksikölle. Kuvassa 6.2 on esitetty periaatekuvaus SKF-laitteistosta.



Kuva 6.2 Periaatekuva SKF-laitteistosta

Keskusyksikkötietokoneessa sijaitsee itse valvontaohjelma. Sen avulla voidaan hallita tarpeen mukaan useita eri laitoksia ja kaikkien laakereiden valvontaa. Valvontaohjelmasta pystytään antamaan käskyjä mittaus- ja valvontayksikköön, jossa käskyt suoritetaan. Valvontaohjelmassa on graafinen Windows-pohjainen käyttöliittymä. Ohjelmalla voidaan muuttaa laakerimittauksen asetuksia. Voidaan esimerkiksi asentaa ja muuttaa hälytysrajoja, asentaa uusia laakereita järjestelmään sekä asentaa salasanoja laakeritietoihin.

Ohjelman toinen päätehtävä on analysoinnin mahdollistaminen monipuolisten kuvaajien avulla. Käyttöliittymä on monipuolinen ja mahdollistaa usean eri kuvaajan sijoittamisen näytölle vierekkäin, mikä tekee analyysistä tarkemman ja paremman. Signaalia voidaan analysoida aikatasossa tai taajuustasossa. Mahdollisia ovat värähtelyn yleistason kuvaaja, taajuusspektrin ja verhoikäyrän muodostaminen. Vesiputouskuvaajassa saadaan taajuusspektrit eri ajanhetkiltä samaan kuvaan. On myös mahdollista tarkastella eri mittausten käyrämuotoja päällekkäin samassa kuvassa. Näin erot ovat paremmin havaittavissa. Kiihtyvyystieto voidaan integroida nopeus- tai siirtymätiedoksi. Ohjelmassa voidaan määrittellä jokaiselle laakerille tyypilliset vikataajuudet, jotka saadaan näkyviin samaan kuvaan taajuusspektrin kanssa /43/.

6.1.5 SPM-laitteisto

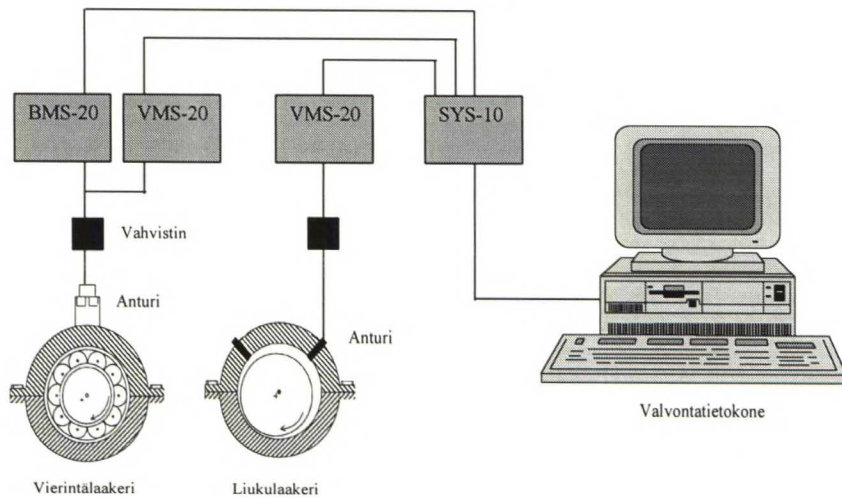
SPM-laitteisto perustuu vierintälaakereiden osalta iskusysäysmenetelmään. Mittaus tapahtuu kiihtyvyyssanturilla, josta saatava signaali on korkeataajuisista analogista jännitesignaalia. Kuhunkin laakeriin asennetaan yksi anturi, jossa on sisäinen vahvistin. Sisäisen vahvistuksen johdosta signaalin häiriönsieto on hyvä, sillä tieto ei siirry ollenkaan ennen vahvistusta.

SPM-menetelmällä valvotaan liukulaakereita kiihtyvyyssanturilla, joka mittaa laakerista yleistä värähtelytasoa. Tasoa voidaan tarkastella aika- ja taajuustasossa. Kuhunkin laakeriin riittää yksi anturi.

Mittaus- ja valvontayksikkö on fyysisesti yksi yksikkö, josta käytetään vain nimitystä mittausyksikkö. Vierintälaakereiden ja liukulaakereiden valvonnassa tarvitaan kumpaankin erillinen yksikkö. Vierintälaakereista signaalit menevät laakerimittausyksikköön, BMS-20. Mittausyksikkö mittaa pelkästään iskusysäykset, käsittelee tiedon ja lähettää digitaalisen sarjamuotoisen signaalin eteenpäin järjestelmäyksikölle. Mittausyksikkö sisältää enintään 16 kanavaa ja mittaus tapahtuu sarjamuotoisesti. Kutakin kanavaa mitataan 5–45 minuuttia kerrallaan ja tämän jälkeen vuoro siirtyy seuraavalle kanavalle. Rinnakkainen, jatkuva mittaus ei ole mahdollista. Mittausyksikköön on mahdollista ja suositeltavaa liittää takometrikortti tulosten parantamiseksi. Lisäksi tulosta parantaa, jos rinnalla mitataan yleistä värähtelytasoa värähtelymittausyksiköllä. Mittausyksikkö tallentaa jokaisen kanavan mittaustiedon ja säilyttää sen kunnes samaa kanavaa mitataan uudestaan /44/. Mittausyksikkö on syytä sijoittaa mahdollisimman lähelle antureita, joten mittausyksikkö sijoittuisi esimerkiksi Azipodin tapauksessa sen sisälle.

Liukulaakereista mittaustieto siirtyy värähtelymittausyksikköön VMS-22. Värähtelymittausyksikkö mittaa vain värähtelyn kokonaistason. Se valvoo enintään 8 kanavaa esivalitusjärjestyksessä ohjelmoidun ajanjakson aikana. Yhtä kanavaa voidaan mitata 2–250 sekuntia valinnan mukaan.

Useita eri mittausyksiköitä voidaan liittää keskenään sarjaan, jolloin valvottavien kohteiden määrää pystytään lisäämään. Mittausyksiköt on liitettävä järjestelmäyksikköön SYS-10, jossa eri yksiköistä muodostuu paikallisverkko. Järjestelmäyksikköön voidaan liittää 250 mittausyksikköä. Järjestelmäyksikkö liittää mittausyksiköt keskusyksikköön, joka tässä tapauksessa on valvontatietokone. Järjestelmäyksikkö sijoitetaan mahdollisimman lähelle keskusyksikköä. Järjestelmäyksikön ja tietokoneen välillä voidaan käyttää myös modeemiyhteyttä /44/. Kuvassa 6.3 on esitetty periaatekuva SPM-laitteistosta.



Kuva 6.3 Periaatekuva SPM-laitteistosta

Tietokoneessa sijaitsevalla ohjelmistolla mittaustuloksia voidaan tarkastella graafisten kuvaajien avulla. Käyttöliittymä on yksinkertainen ja tulokset ovat helposti luettavissa kuvaajasta. Ohjelmalla voidaan muuttaa myös laakereiden valvontajärjestystä, asentaa uusia aika-asetuksia sekä poistaa ja lisätä laakereita mittausketjuun. Ohjelmalla kyetään hallitsemaan myös useiden laivojen laakerinvalvontajärjestelmiä maa-asemalta käsin.

6.1.6 Laitteistojen vertailu ja valinta

Vertailtaessa näitä kahta järjestelmää keskenään, joudutaan valinnassa ottamaan huomioon muitakin asioita kuin pelkkä mittaustavan soveltuvuus tai saatavien käyrämuotojen lukumäärä, vaikka esimerkiksi mittaustavalla suuri painoarvo onkin. Molempien järjestelmien vierintälaakerimittaus on riittävän tarkka ja soveltuva ympäristöön, missä taustavärähtelyt ovat normaalia suuremmat. Ratkaisevaksi muodostuu liukulaakereiden valvonta sekä kaukodiagnostiikkavaatimusten toteutuminen.

SKF:n valmistamassa laitteistossa on monipuolisemmat mahdollisuudet tarkastella laakerin vikaantumista kuin SPM:llä. Useat eri aikataso- tai taajuustasovaihtoehdot mahdollistavat jopa selvittämään, missä osassa laakeria alkava vika sijaitsee. Jos lisääntyneen värähtelyn syy on akselin epäkeskoisuudessa tai käyristymisessä tai jopa sähkökoneessa, saa senkin näkyviin SKF-laitteistolla. Moottorivikaa ei tosin pystytä tarkasti paikallistamaan, mutta ohjelmiston avulla saadaan selville ainakin se, ettei laakerissa eikä akselissa ole vaurioita, joten syytä on etsittävä muualta.

SPM:llä valvonta perustuu vain vian havaitsemiseen. Siinä ei saada selville missä osassa vika on. Tiedetään vain, että se on olemassa ja toimenpiteisiin pitää ryhtyä. Siitäkin huolimatta myös SPM:n laitteistolla pystytään havaitsemaan alkavat viat, mutta ei yhtä aikaisin kuin SKF:llä. Koska tarkkaa vikapaikkaa ei tiedetä, korjauksessa joudutaan vaihtamaan enemmän osia tai tutkimaan osat tarkemmin, jolloin kuluu enemmän aikaa.

SKF:n ohjelmistopaketti on laaja ja monipuolinen. Tiedostojen käsittely on helppoa ja kuvaajien käsittelyyn on runsaasti erilaisia vaihtoehtoja, jolloin kokonaisvaltainen kunnan arviointi on mahdollista. Ohjelmisto on myös helposti laajennettavissa uusien mittaustapojen valvontaan. Esimerkiksi akustinen emissiomittaus voidaan haluttaessa liittää järjestelmään. Lisäksi järjestelmään saa automaattisen vianmääritysohjelman, mutta toistaiseksi vianmääritys sekä akustisen emission mittaus ovat liian kalliita toteutettavaksi laivoissa. Samalla ohjelmistolla onnistuu myös liukulaakereiden kunnan valvonta ratakäyrään perustuvan mittauksen avulla.

SPM:n ohjelmisto on yksinkertaisempi. Se sisältää vain perustarpeet ilman laajennusmahdollisuuksia. Tarkoituksena on ollut kehittää kevyt valvontasysteemi, joka olisi myös edullinen. Tässä on onnistuttukin, mutta hinta on edullinen vain perustapauksissa, joissa valvottavien kanavien määrä on suhteellisen alhainen. Usean kanavan järjestelmässä, jolloin tarvitaan useita iskusysäys- ja värähtelymittausyksiköitä, hinta nousee samalle tasolle SKF:n laitteiston kanssa. Vierintälaakereiden osalta tarkasteltavaksi saadaan vain yksi käyrä aikatasossa. Vaikka se kertoo laakerin kunnosta suhteellisen paljon, ei yhtä suureen tarkkuuteen SKF:n kanssa päästä.

Liukulaakerit ovat SPM:n suurin ongelma. Valvonta on mahdollista ainoastaan yleisen värähtelytason mittauksella ja se ei liukulaakereilla, etenkin tärisevässä ympäristössä, anna yhtä tarkkoja tuloksia kuin ratakäyrämittaus.

Kaukodiagnostiikka vaatii, että valvontaohjelmistot kykenevät itsenäisesti keräämään tietoa ja tallentamaan mittaustiedon tiedostoon. Valvontaohjelmistojen on käynnistytävä automaattisesti valvontatietokoneen käynnistyessä, jotta valvonta toimii myös miehittämättömällä asemalla. Molemmat valmistajat täyttävät nämä vaatimukset, joten mitään eroa ei siinä suhteessa laitteistojen välillä ole.

Järjestelmän luotettavuudessa SKF on SPM:ää edellä. SPM:n laitteiston komponenteilla on kapea toimintalämpötila-alue. Normaalikäytössä ongelmaa ei ole, mutta jos halutaan varmistaa laitteiston kestäminen myös mahdollisissa ääriolosuhteissa, SPM ei tule enää kysymykseen. SKF:llä toimintalämpötila-alue on riittävän laaja kaikkiin tapauksiin.

SKF:n laitteisto on jonkin verran kalliimpi kuin kilpailijansa, mutta hintaero kapenee sitä enemmän, mitä useampaa kanavaa käytetään. SKF:llä on vakiona niin paljon kanavia, että ne kattavat kaikki tarvittavat anturit. SPM:llä laitteistoa on rakennettava pienistä osista ja lopputulos on, että laivalla tarvittu määrä kanavia maksaa lähes yhtä paljon molemmilla valmistajilla.

Valintaan vaikuttaa myös toimittajan valmius yhteistyöhön ja mahdolliseen kehitys- ja henkilöstönkoulutustyöhön. Lisäksi toimittajan yhteistyökykyisyys asennusvaiheessa ja mahdollisissa vikatilanteissa käytön aikana vaikuttaa ratkaisuun. SKF vaikuttaa paremmalta myös toimittajan luotettavuuden ja yhteistyökykyisyyden suhteen, sillä laitteiston maahantuojana toimii ABB Service, jonka kanssa divisioonamme perinteisesti tekee

paljon yhteistyötä. Taulukkoon on kerätty tärkeimmät valintakriteerit molempien valmistajien osalta. Taulukossa + kuvaa laitteiston hyvää toteutuskelpoisuutta. Mitä enemmän + -merkkejä kohdassa on, sitä paremmin laitteisto on kyseisen ominaisuuden puolesta toteutettavissa. Huonoa toteutuskelpoisuutta kuvaa – -merkki. Kolme merkkiä on maksimi yhdelle kohdalle.

Taulukko 6.1 Valintakriteerit

	SKF	SPM
Vierintälaakerivalvonta	+++	+++
Liukulaakerivalvonta	++	--
Ohjelmisto	++	+
Hinta	–	+
Laajennusmahdollisuudet	++	--
Lämpötila-alue	++	–
Kaukodiagnostiikka	+++	+++
Yhteistyö	++	+

Taulukosta nähdään, että laitteiston osalta SKF:n kokonaisuus sekä yksittäiset laitteet vaikuttavat paremmin soveltuvalta tarkoituksiin, jossa laakerin kunnan huonontumisesta on saatava aikainen tieto. Hyvien ominaisuuksien merkitys korostuu vaikeissa olosuhteissa. Huolimatta hieman korkeammasta hinnasta valitaan laivan laakereiden kunnonvalvontaan SKF:n valvontajärjestelmä.

6.1.7 Tiedonsiirto

Tiedonsiirto laivan sisällä valvottavien kohteiden ja valvontajärjestelmän välillä tehdään koaksiaalikaapeleita käyttäen. Azipodin tapauksessa tiedonsiirto on monimutkaisempaa. Tiedonsiirto Azipodin ja laivan järjestelmien kesken tapahtuu tällä hetkellä liukurenkaiden kautta. Laivasta Azipodiin siirtyy mm. koneiden tarvitsema tehonsyöttö. Azipodista laivaan päin siirtyy vain mittaustietoa.

Osa mittaustiedosta siirtyy sellaisenaan liukurenkaiden kautta, jolloin jokainen mittaussignaali tarvitsee oman liukurenkaansa. Suurin osa mittatiedosta on kuitenkin hitaammin muuttuvaa signaalia. Silloin on mahdollista käyttää A/D-muuntimia ja multiplekseriä, jolloin voidaan toteuttaa sarjamuotoinen tiedonsiirto. Multipleksattu tieto siirtyy optisen kuidun ja optisen liukurenkaan kautta. Optinen siirto on ideaalista häiriönkeston suhteen, mutta samalla se on erittäin kallis tapa siirtää tietoa. Niinpä sitä käytetään vain tärkeimpien signaalien tuomiseen Azipodin sisälle ja sarjamuotoisen mittaustiedon siirtoon Azipodista pois.

Laakereiden mittaustiedon siirto olisi edullisinta toteuttaa jo aikaisemmin käytettyjen tiedonsiirtokanavien kautta. Siis tiedonsiirtoliukurenkaiden kautta joko suoraan tai multipleksattuna optista rengasta käyttäen. Ongelmaksi muodostuu mittaustiedon korkea taajuus ja vaatimus, että tieto siirtyy jatkuvana mittaus- ja valvontayksikölle. Niinpä jo olemassa olevaa optista sarjaliikennettä ei voi käyttää, sillä tiedonsiirtonopeus ei riitä siirtoon. Tämä tarkoittaa sitä, että tavallisia liukurenkaita on lisättävä tai sitten on käytettävä jotain muuta tiedonsiirtotapaa.

Optisten liukurenkaiden lisääminen ei ole kannattavaa kalliin hinnan vuoksi. Toinen syy on tilan puute. Liukurenkaita on jo nyt niin paljon, että niitä pyritään pikemminkin vähentämään kuin lisäämään.

Tavallisilla liukurenkailla ongelmana on edelleen tilan puute sekä siirrettävän signaalin korkea taajuus ja alhainen jännite. Liukurenkaissa häiriönsuojaus ei ole paras mahdollinen, jolloin suhteellisen lähellä siirtyvä huomattavasti voimakkaampi tehonsyöttö saattaa aiheuttaa häiriöitä mittaussignaaliin. Tavalliset liukurenkaat ovat yksi vaihtoehto mittaustiedon siirtoon, jos muita toteuttamiskelpoisia vaihtoehtoja ei löydy. Siinäkin tapauksessa häiriöiden vaikutusta joudutaan tutkimaan ennen asennusta.

Eräs vaihtoehto on siirtää tieto langattomasti. Tällöin kyseeseen tulee radiotaajuinen tiedonsiirto tai infrapunankäyttö. Näitä vaihtoehtoja käytettäessä tieto siirretään digitaalisessa muodossa. Tällä saavutetaan parempi tiedonsiirtovarmuus. Analogiseen signaaliin sekoittuvat häiriöt jäävät huomaamatta, mutta digitaalitekniikassa tuleva signaali kyetään tarkistamaan ja tarvittaessa lähettämään tieto uudestaan, jos ensimmäinen siirto ei ollut hyväksyttävä. Tähän vaaditaan nopeaa tiedonsiirtoa. Vastaanottaja näkee tiedon rinnakkaismuotoisena. Tiedonsiirtoon on käytettävä tarkkuusvaatimuksista johtuen 12 bittiä. Kun korkeimmat taajuudet ovat noin 10 kHz, on näytteenottotaajuuden oltava Nyqvistin kriteerin /45/ mukaan vähintään kaksinkertainen eli tässä tapauksessa 20 kHz. Tarvittava siirtonopeus on tällöin

$$12 \text{ bit} \cdot 20 \text{ kHz} = 240 \text{ kbit} / \text{s}.$$

Radiotaajuisessa siirrossa on huomioitava kaistanleveys. Kaistanleveyden on oltava vähintään kaksinkertainen suurimpaan taajuuteen nähden ettei signaali suodatu. Kaistanleveyden on siis oltava vähintään 20 kHz, mieluummin hieman enemmän. 20 kHz kaistanleveys vaatii satojen megahertsien radiotaajuuden ja karsii mahdollisia toimittajia huomattavasti. Tällä alueella ei lisäksi ole enää kovin paljon sallittuja taajuuksia, joita saa käyttää tiedonsiirtoon. Se vähentää mahdollisuuksia varsinkin rinnakkaiseen siirtoon, joka muuten olisi radiotaajuudella mahdollista. Radiotaajuuden etuna ovat kuitenkin pienet komponentit. Korkeaa taajuutta ja laajaa kaistaa käyttämällä siirto olisi mahdollista toteuttaa.

Infrapunälähettiläiden ja -vastaanottimien käyttö poistaisi sähkömagneettisen häiriön mahdollisuuden siirron aikana kokonaan. Sähköisiä häiriöitä voisi syntyä enää anturin ja

infrapunalähtetimen välillä. Tämä ei ole ongelma, sillä tarpeeksi hyvin suojattua johtoa käyttämällä häiriöt saadaan eliminoitua. Infrapunaa käytettäessä ei ole mahdollista käyttää useampaa kuin yhtä kanavaa, sillä valolähtetimet toimivat vain yhdellä aallonpituusalueella. Siirto on tehtävä sarjamuotoisesti. Sarjamuotoisessa siirrossa on huomioitava Nyqvistin kriteeri tiedonsiirron nopeudessa. Ongelmana saattaa olla siirtomatkan pituus ja se, että tila, missä siirto tapahtuu, on likaantuva tila. Infrapunalaitteissa linssit on pidettävä puhtaina, jotta signaali siirtyy virheettömänä. Infrapunakomponentit ovat halpoja, mutta sarjamuotoisen siirron toteuttaminen vaatii suunnittelua signaalien tahdistuksen suhteen samoin kuin radiotaajuisen siirron tapauksessa.

Tiedonsiirto sisältää monia kysymyksiä ja asiaa tutkittiin tämän työn rinnalla. Lopputuloksena oli, että tiedonsiirto on järkevintä suorittaa radiotaajuisena tiedonsiirtona.

6.1.8 Laakereiden lopullinen kunnonvalvontalaitteisto

Laakereiden lopullinen kunnonvalvonta sisältää SKF:n kunnonvalvontalaitteiston kokonaisuudessaan. Vierintälaakereille käytetään kiihtyvyyssantureita ja liukulaakereille kahta siirtymäanturia yhtä laakeria kohti. Vierintälaakereilta lähteville signaaleille tehdään verhoikäyrämuunnos. Tiedot siirtyvät laakereilta mittaus- ja valvontayksikköön, josta käsittelyn jälkeen valvontatietokoneelle, joka toimii keskusyksikkönä.

Jos laivassa käytetään Azipod-yksikköä, laakerinvalvontaan on liitettävä kiellettyjen tilojen logiikka. Kun potkurimoottorin akseli tai laiva on kiihtyvässä tai hidastuvassa liikkeessä tai kun Azipodia käännetään, Azipodiin kohdistuu hyvin suuret voimat, jolloin laakerinmittaustiedon taustavärähtelyt ovat niin suuret, että mittaustiedot vääristyvät. Tämän takia automaattiseen tiedonkeruuseen on liitettävä mainittu logiikka estämään mittaus kielletyissä tiloissa. Kielletyksi tilaksi lasketaan myös nopeuden heilahtelu, jonka aiheuttaa kova merenkäynti. Signaalit nopeudesta, nopeuden muutoksesta ja Azipodin suunnasta saadaan diagnostiikan käyttöön, jolloin yksinkertaisella AND-logiikalla voidaan kielletyt tilat eliminoida. Kaikkien signaalien on oltava sallittuja, jotta mittaus ja analysointi suoritetaan. Kielletyissä tiloissa valvonta katkeaa, mutta se ei ole ongelma, sillä mittaustapahtuma vie niin vähän aikaa, että riittävän usein löytyy myös mittaukselle sallittu tila.

Valvonta tapahtuu automaattisesti miehittämättömällä asemalla. Valvontatietokone kerää tiedot ja tallettaa ne kovalevyllään. Diagnostiikkapalvelimen kautta päästään tiedostot hakemaan valvontakoneelta. Satelliittiyhteyden avulla tiedot saadaan myös maa-asemalle.

6.2 Relediagnostiikka

Mikroprosessorien käyttö ja kehittyminen on tehnyt mahdolliseksi suoja-releet, joissa on useita toimintoja. Tämä mahdollistaa kehittyneen samanaikaisen toiminnan kenttätasolla, koska kaikki tieto on siirrettävissä keskukseen ja keskuksesta pois helposti kommunikointiväylän kautta. Järjestely mahdollistaa helpon pääsyn kaikkeen tarvittavaan tietoon /35/. Tässä luvussa tutkitaan erään tällaisen integroidun suojaus- ja mittausjärjestelmän soveltuvuutta laivan sähköverkon vikadiagnostiikan apuvälineeksi. Ensin määritellään yleiset vaatimukset, jotka laitteiston on täytettävä, ja sen jälkeen selvitetään toteuttamisvaihtoehdot. Lisäksi kuvataan testilaitteistolla suoritettua testausta ja sen tuloksia. Lopuksi esitetään laitteisto, joka soveltuu parhaiten laivan sähköverkon vikadiagnostiikkaan.

6.2.1 Vaatimukset laitteistolle

Jotta valvonta täyttäisi sille asetetut tavoitteet, järjestelmän tiettyjen perusvaatimusten on oltava kunnossa. Kaiken toiminnan perusedellytys on, että suojauksesta on huolehdittu. Mittaus ei saa häiritä suojausta eivätkä suojaustoiminnot saa vaikuttaa mittaukseen. Näiden syiden vuoksi mittaus erotetaan tarpeeksi hyvin suojauksesta. Päätaulun aiheuttamien häiriöiden vaikutus tiedonsiirtoon on myös ehkäistävä.

Vikadiagnostiikan toteuttamistapa ja laitteisto laivalla asettavat ohjelmistolle omat erityisvaatimuksensa. Laivalla toimiva valvontakone toimii miehittämättömänä asemana, joka tarvittaessa voidaan nollata ja uudelleenkäynnistää maa-asemalta käsin. Niinpä ohjelmien on käynnistyttävä tietokoneen mukana ja tietyt asetukset on saatava käyttöön automaattisesti. Samoin tiedon keräyksen on oltava automaattista. Ohjelmien on toimittava luotettavasti, jotta tietokone ei keskeytä muita toimintoja yhden ohjelman toimintahäiriön takia.

Tiedon tallennus tapahtuu laivan valvontatietokoneelle, josta laivan diagnostiikkapalvelin hakee tiedot omalle levyille. Maa-asemalta saadaan satelliittiyhteyden kautta palvelimen tiedostot kerättyä. Laivalla saattaa olla hyvinkin paljon tilannetietoja, joten kaikkea kerättyä tietoa ei kannata siirtää. On pystyttävä valitsemaan tärkein tieto, joka siirretään.

Maa-asemalla käytettävän analysointiohjelmiston on oltava selkeä, sillä kerättävä tietomäärä on suuri. On tärkeää hallita valtava datamäärä, sillä erityisesti vikatilanteessa ilmoituksia tulee paljon ja käyttäjän täytyy löytää oikea tieto helposti ja nopeasti, koska vikatilanteessa ylimääräistä aikaa ei ole käytettävissä.

Tiedon keräyksessä on otettava huomioon, että eri suojauskohteet saattavat vaatia erilaista valvontaa. Tähän on valvontajärjestelmän annettava mahdollisuus, jotta kaikki tarvittava tieto saadaan kerättyä, ja jotta turhaa tietoa ei kerätä. Laivaverkossa generaat-

toreiden suojaus on erityisen vaativaa aluetta, joten siinä tarvitaan muita tarkempaa valvontaa. Muissa kohteissa riittää vähäisempi valvonta. Minimivaatimuksena on, että kaikilta releiltä on saatava talteen vian tapahtuessa ainakin laukaisun aiheuttanut virta tai jännite. Samoin on tiedettävä laukaisun ajankohta ja mielellään myös releiden havahtumisajat. Vaativilla alueilla virran ja jännitteen käyrämuodot on saatava selville. Oleellista tällöin on, että kuvaajissa näkyy myös aika ennen vikaa, jotta ilmiön todellinen olemus selviää ja analysointi on mahdollista. Mittauslaitteistossa on tällöin oltava muistia.

Analysointia vaikeuttavat samanaikaiset tai hyvin lähellä toisiaan tapahtuneet viat tai releiden havahtumiset. Järjestelmän ja erityisesti releiden erottelukyvyn on oltava niin tarkka, että tuloksista saadaan selville tapahtuman todellinen aloittaja. Tämä vaatii käytettäviltä releiltä suurta nopeutta. Mikroprosessorireleillä ei kuitenkaan ole ongelmia nopeuden suhteen /39/.

Lopullisen järjestelmän valintaan vaikuttavat myös hinta ja mittalaitteiden koko. Jokaiseen järjestelmään on arvioitava erikseen, minkä suuruinen ja kuinka tarkka valvonta on tarpeellista asentaa. Paras mahdollinen valvonta ei ole läheskään aina joko hinnan tai tilanpuutteen vuoksi mahdollista toteuttaa ja monesti joudutaan tyytymään kompromisseihin.

6.2.2 Vaihtoehdot diagnostiikan toteuttamiselle

Diagnostiikan toteuttamisessa ensisijaista on järjestelmän luotettavuus ja toimintavarmuus. Parhaiten onnistutaan, kun käytetään mahdollisimman vähän eri toimittajia yhden kokonaisuuden rakentamiseen. Relediagnostiikassa tämä tarkoittaa sitä, että diagnostiikan toimittajan on hyvä olla sama kuin releillä. Tällä varmistetaan tiedon siirron toimiminen ja järjestelmän toimiminen kokonaisuutena, jolloin turhilta asennus- ja käyttövioilta vältytään.

Nykyisen relettoimittajan diagnostiikkalaitteisto on laajuudeltaan ja vaihtoehdoiltaan ainakin muiden tasolla, laajan kehitystyön ansiosta osittain jopa muiden edellä. Valittavaksi jää, missä laajuudessa valvonta toteutetaan verkon eri osissa. Vaihtoehtoja ovat:

- Mitataan perustiedot releillä. Tietojen lukeminen onnistuu vain laivan automaatiojärjestelmästä käsin.
- Lisätään järjestelmään tiedonvälitysyksikkö, jolloin tiedot saadaan tietokoneelle. Konfiguraatiota voi muuttaa erilaisia tiedonkeräys- ja analysointi-ohjelmia valitsemalla.
- Sisällytetään järjestelmään erillinen mittausyksikkö kuvaajien saamiseksi. Lisäksi tarvitaan käyttöohjelmisto ja tiedonvälitysyksikkö.

Kaikissa tapauksissa tarvitaan peruslaitteisto, jonka päälle laajemmat toiminnot rakentuvat. Perustasolla diagnostiikassa käytetään samaa mittausta kuin suojauksen yhteydessä, koska ne sisältyvät käytettyihin releisiin. Mittaustulokset saadaan tällöin vain automatiikan käyttöön. Mittaustulosten siirtämiseen tietokoneelle tarvitaan erillinen tiedonvälitysyksikkö, jotta tietokone osaa lukea tulokset. Yksikössä on myös muistia, jotta tietojen siirron ei tarvitse olla jatkuvaa. Kehittyneitä ohjelmia käyttämällä muistissa olevat tiedot pystytään varustamaan kellonajalla ja tapahtumatiedolla pelkkien koodien sijaan.

Ohjelmistot muodostavat yhdessä kokonaisuuden, jonka laajuus voidaan valita tarpeen mukaan eri ohjelmia valitsemalla. Taulukossa 2 on lueteltu eri ohjelmat ja niiden tehtävät.

Taulukko 6.2 Relesuojausjärjestelmän ohjelmat ja käyttötarkoitus

Ohjelma	Taso	Tehtävä
Base	Perustaso	Käyttöjärjestelmä muille ohjelmille
SM/SPA	Perustaso	Releiden mallinnus käyttöjärjestelmälle
SM/SACO	Perustaso	Tietoliikenneasetusten teko
SPC-Modules	Perustaso	Perustason valvontaohjelma
Report	Tapahtumatiedot	Valvontaohjelma. Käyttää hyväkseen tietoliikenneyksikön muistia. Tapahtumatiedot ja kellonaika näkyvissä
SM/SPCR	Häiriötallennin	Häiriötallentimen mallinnus käyttöjärjestelmälle
DR-COM	Häiriötallennin	Valvontaohjelma. Lukee tiedot häiriötallentimelta. Kuvaajat näkyvissä

Perustan ohjelmistolle luo Base-ohjelma, joka on asennettava käyttöliittymäksi muille ohjelmille /46/.

Jokaiseen sovellukseen on lisäksi asennettava ohjelmat SM/SPA, SM/SACO. Ne on tarkoitettu vain asetusten tekoa varten. SM/SPA sisältää kaikki valmistajan relemoduleit suojausyksiköineen ja omassa verkossa käytössä olevat releet on asennettava käyttöjärjestelmään. SM/SACO tarvitaan hälytysten asettamista sekä tietoliikenneasetusten tekoa varten /46/.

Jotta releiltä saatavia mittaus- ja hälytysarvoja voidaan lukea, tarvitaan erillinen valvontaohjelma SPC-Modules. Se mahdollistaa häiriötapauksissa automaattisesti mitattujen arvojen lukemisen. Käyttäjän on itse annettava käsky, jolla tiedot saadaan siirretyksi releiden muistista tietokoneelle. Kukin rele tallentaa vain viiden viimeisimmän vian mittausarvot. Jos vikoja on ollut enemmän kuin viisi, tallentuvat uudet tiedot aina vanhimpien päälle Ohjelmalla käyttäjä voi myös antaa mittauskäskyn, jolloin tietoa saadaan normaalista tilanteesta. SPC-Modules -ohjelmaa käytettäessä ei saada talteen kellonaikoja eikä tapahtumaraportointia.

Järjestelmää voidaan parantaa lisäämällä käyttöliittymään raportointiohjelman Report. Se mahdollistaa tarkat raportit tapahtumista, hälytyksistä ja haluttaessa myös mittaustiedoista. Raportit sisältävät mm. vikatiedot. Raporteista selviää myös mikä rele on kyseessä ja mikä suojausosa on toiminut. Ohjelman yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on tarkka kellonaikatieto tapahtumista. Tarkkuutena on yksi millisekunti. Jos useat toiminnot tapahtuvat millisekunnin sisällä, ne raportoituvat ohjelmaan samalla kellonajalla tapahtuneiksi. Käyttäjä saa valita mitä tapahtumia raportoidaan ja haluttaessa saadaan selville mm. tarkat releiden havahtumisajat sekä laukaisajat. Ohjelmasta voidaan ohjata mittaus toimintoja, mutta yleensä mittaustiedot talletetaan automaattisesti käyttäjän määrittelemiin väliajoin. Äkillistä vikavirtaa ei ohjelmaan saa. Report käyttää hyväkseen tiedonvälitysyksikköä ja sen muistiominaisuuksia. Tämä tarkoittaa sitä, että tapahtumat eivät siirry tietokoneelle välittömästi, vaan tieto pysyy tiedonvälitysyksikön muistissa kunnes se sieltä haetaan. Hakeminen on tehty ohjelmassa automaattiseksi ja käyttäjä voi määrittellä kuinka usein tiedonvälitysyksikön kanssa kommunikoidaan. Tiedonvälitysyksikkö toimii aina päällä ollessaan. Hälytystietojen tallennus ei vaadi, että valvontatietokone tai Report-ohjelma on päällä ennenkuin tietoja aletaan kerätä /46/.

Tärkeä lisäys järjestelmään vikadiagnostiikan kannalta on vikasuureiden esiinsaaminen graafisesti. Tähän päästään, kun releiden rinnalla käytetään häiriötietojen tallenninta ja siihen liittyviä ohjelmia /47/. Häiriötietojen tallennin mittaa releiden suojausyksiköiden signaaleita. Häiriötietojen tallennin on relekohtainen. Jokaista relettä kohti on oltava oma tallennin. Tallentimella saadaan rekisteröityä ongelmallisessa suojauskohteessa esiintyneiden suureiden käyrämuodot sekä normaaleissa käyttötilanteissa että suojauskohteen toimintatilanteissa. Häiriötietojen tallennin sopii ääriarvovalvontansa ansiosta myös verkon käyttösuureiden selvittämiseen esimerkiksi kuormitus- tai jänniteolosuhteiltaan kiinnostavissa kohteissa. Tallennin sisältää muistia, joten vikatilanteessa talteen saadaan myös tilanne ennen vikaa.

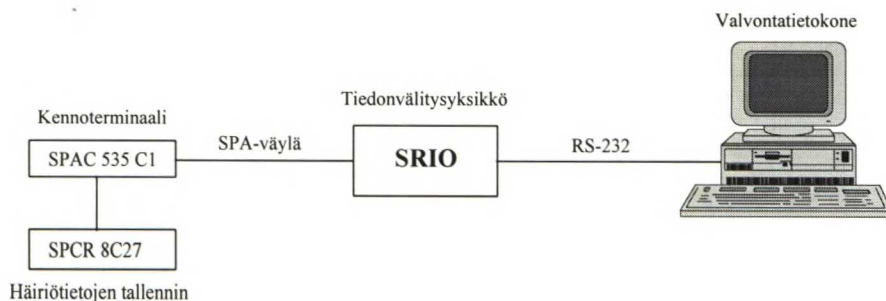
Häiriötietojen tallennin vaatii kaksi ohjelmaa lisättäväksi käyttöjärjestelmään. SM/SPCR on vain asennusta varten. DR-COM on tarkoitettu valvontaan ja analyysien tekoon. Ohjelman avulla tiedot kerätään häiriötietojen tallentimilta. Tallennin on varustanut eri vikatilanteet kellonajalla ja järjestysnumerolla. Ohjelmassa voidaan valita, mitä signaaleja halutaan graafisesti tarkkailla. Koska yhteen tallennukseen varattu muisti on rajallinen, vähenee tallennuksen pituus, mitä enemmän signaaleja valitaan mukaan. Tallennin mahdollistaa enimmillään 8 analogisen ja 8 digitaalisen kanavan käytön, jolloin tallennuksen pituus on minimissään, 0,75 s. Käyttäjä pystyy valitsemaan aikavälin miten usein tietoja siirretään tietokoneelle.

6.2.3 Vaihtoehtojen testaus ja vertailu

Diplomityössä testattiin releiden diagnostiikkalaitteistoa ja sen valvontamahdollisuuksia erillisellä koejärjestelmällä. Järjestelmä koostuu SPAC 535 C1 kennoterminalista,

SPCR 8C27 häiriötietojen tallentimesta, SRIO 1000M tiedonvälitysyksiköstä sekä valvontatietokoneesta. Valvontatietokoneena on Pentium tietokone, jossa keskusmuistia on 16 MB ja kellotaajuutta 120 MHz. Testauksessa käytetty valvontatietokone vastaa ominaisuuksiltaan laivalla käytettävää valvontatietokonetta.

Kennotermiinaali sisältää releen ja kennoyksikön. Kennoyksiköllä mallinnetaan yksinkertainen sähköverkko. Relettä käytetään tämän verkon oikosulku- ja maasulkusuojaukseen. Kennotermiinaali mahdollistaa sähköverkon kaukokäytön ja tätä mahdollisuutta käytettiin häiriöiden tekoon. Itse häiriötietojen tallennin on liitetty suoraan releeseen. Tiedonsiirto kennotermiinaalin ja tietoliikenneyksikön välillä on toteutettu SPA-väylällä, jollaista käytetään yleensä useamman releen verkoissa. Tiedonvälitysyksikön ja tietokoneen välinen yhteys on toteutettu RS-232 -väylällä. Kuvassa 6.4 on koejärjestelmä esitetty.



Kuva 6.4 Koejärjestelmä

Testauksen tarkoitus oli löytää oikea laitteisto ja oikeat ohjelmat laivaverkon valvontaan. Eensisijainen tehtävä oli etsiä vian selvittämisen oikea tarkkuus, johon eri ohjelmilla päästään. Lisäksi oli testattava ohjelmien toimivuus vaativissa tilanteissa. Diagnostiikkalaitteiston on tarkoitus tallentaa vikatiloja, kun laivan muissa järjestelmissä on vikoja. Niinpä on erittäin tärkeää, että tietokoneohjelmat toimivat moitteettomasti eri käyttötilanteissa. Haastavaksi tilanteen tekee se, että laivalla valvontatietokone huolehtii useiden kohteiden valvonnasta, jolloin useat ohjelmat ovat toiminnassa samanaikaisesti. Ohjelmistoista testataan mm. niiden sopivuus Windows-ympäristöön sekä niiden varaama muisti käytön aikana ja lepotilassa. Samoin tarkastellaan tiedonsiirtoon kuluva-aikaa. Lisäksi testataan automaattisten tehtävien toimivuus ja todetaan pystyykö valvonnan suorittamaan miehittämättömässä asemassa.

Ohjelmistot soveltuivat relevalvontaan ja Windows-ympäristöön hyvin, huolimatta muiden valvontaohjelmien käytöstä samaan aikaan esimerkiksi tiedonsiirron kanssa. Tähän vaikutti se, että, ohjelmissa on kaksi toimintavaihtoehtoa, joilla vaikutetaan ohjelman käyttäytymiseen. Voidaan valita, että valvontaohjelman on oltava koko ajan aktiivisena. Tällöin saavutetaan tiedonsiirrolle maksimaalinen nopeus. Muita ohjelmia

käytettäessä tiedonsiirron aikana, tiedonsiirto keskeytyy ja kun valvontaohjelmaan palataan takaisin, jatkuu tiedonsiirto siitä mihin jäätiin ennen keskeytystä. Toinen vaihtoehto on käyttää valvontaohjelmia muiden taustalla. Tiedonkäsittelynopeus hidastuu hieman, kun prosessoritehosta osa menee muille ohjelmille, mutta etuna on ohjelman hyvä käytettävyys. Tiedonsiirto jatkuu, vaikka toisia valvontaohjelmia käytetään samaan aikaan.

Releillä ja minimiohjelmistolla varustettu järjestelmä toimi hyvin molemmilla toiminta-asetuksilla. Se johtui osittain siitä, että mitään automaattisia lataustoimintoja ei ole valittavissa, vaan käyttäjän on päivitettävä tietokannat, jolloin käyttöruutu on aktiivisena koko ajan. Tietojen päivitys tapahtuu niin nopeasti, ettei se häiritse muita ohjelmia. Samoin muiden ohjelmien käyttö tiedonsiirron aikana ei muodostunut ongelmaksi. Vianmäärityksessä on apuna oltava kuitenkin muuta laitteistoa ja muita ohjelmia. Minimiohjelmistolla saatavat tiedot, hetkellisarvot ja vika-arvot ilman tarkkaa aikaa, eivät riitä analyysin tekoon. Samoin automaattisen tiedonkeruu-toiminnon puuttuminen vähentää hyötyä.

Kun järjestelmään lisätään Report-ohjelma, vikadiagnoosiominaisuudet paranevat huomattavasti. Reportin avulla vikatilanteesta saadaan tarkat aikatieidot niin releiden havahdumisista kuin laukeamisista. Lisäksi nähdään toiminut releyksikkö. Kun Report liitetään perusohjelmistoon, vianmäärityksessä päästään jo niin pitkälle, että useimmassa tapauksessa vian aiheuttaja selviää. Report tuo mukanaan automaattisen tiedonkeruun, jolloin toimiminen miehittämättömänä asemana on mahdollista. Report ei haittaa muiden ohjelmien toimintaa. Tiedonsiirto Reportissa kestää kuitenkin niin kauan, että ainoa vaihtoehto on käyttää ohjelmaa taustatoiminnolla. Näin muut ohjelmat eivät häiritse tiedonsiirtoa.

Tärkeä ominaisuus on mahdollisuus käynnistää Report suoraan ilman käyttöjärjestelmänä toimivaa Base-kantaa, jolloin Report voidaan asettaa käynnistymään samalla, kun tietokone käynnistyy. Tämä on toinen ehto, joka vaaditaan miehittämättömänä asemana toimimiseen. Reportin ansiosta molemmat ehdot täyttyvät.

DR-COM lukee tiedot häiriötietojen tallentimelta. Tämä ohjelma tuo lisää tarkkuutta vian määritykseen. Häiriöiden syyt saadaan selville kuvaajista, joita ohjelmassa voi tarkastella ja tarvittaessa jonkin verran käsitellä. DR-COM ei häirinnyt muiden ohjelmien toimintaa vaikka se on isompi ohjelma kuin Report. Siirrettävän tiedon paljouden vuoksi DR-COM:ia on käytetävä taustatoiminnalla. Tallentimessa on kahdenkymmenen tapahtuman muisti, joten automaattinen tiedonkeruuväli on asetettava riittävän tiheäksi, ettei muisti pääse täyttymään. Koska DR-COM käynnistyy myös samalla, kun valvontatietokone käynnistetään, voidaan DR-COM:ia käyttää miehittämättömällä asemalla.

Jos käytetään sekä Reportia että DR-COM:ia automaattitoiminnolla, ei molempia voi avata käynnistyksen yhteydessä. Ongelmana on, että molemmat ohjelmat käyttävät tietolähteenä samaa tiedonvälitysyksikköä, jolloin tieto kulkee saman sarjaportin kautta. Jos molemmat ovat käytössä, tietoliikenneyhteys sekoaa eivätkä tiedot siirry. Ongelma ratkaistaan siten, että avataan vain toinen ohjelmista ja tehdään kyseisen ohjelman käynnistystietoihin asetus, että määrätyn väliajoin vierailaan toisessa ohjelmassa keräämässä mahdolliset häiriötiedot /46/. Vierailutoiminto toimi hyvin ja tiedot kerääntyivät automaattisesti molemmista ohjelmista valvontakoneelle. Tiedonsiirtonopeudet olivat samoja kuin nopeudet, jotka saadaan, kun ohjelmat toimivat yksin. Samoin kuormitus muulle järjestelmälle oli samaa luokkaa kuin yksittäisten ohjelmien aiheuttama kuormitus.

Testeissä havaittiin, että käytetyt ohjelmat soveltuvat hyvin valvontaan ja eri ohjelmia ja laitteita käyttämällä verkkoa pystytään valvomaan monipuolisesti. Ohjelmien ja tallentimien ominaisuudet vastasivat hyvin valmistajan lupaamia arvoja /46/, /47/. Niinpä eri releiden tarkkailussa ei tarvitse tehdä suuria muutoksia alkuperäisiin suunnitelmiin.

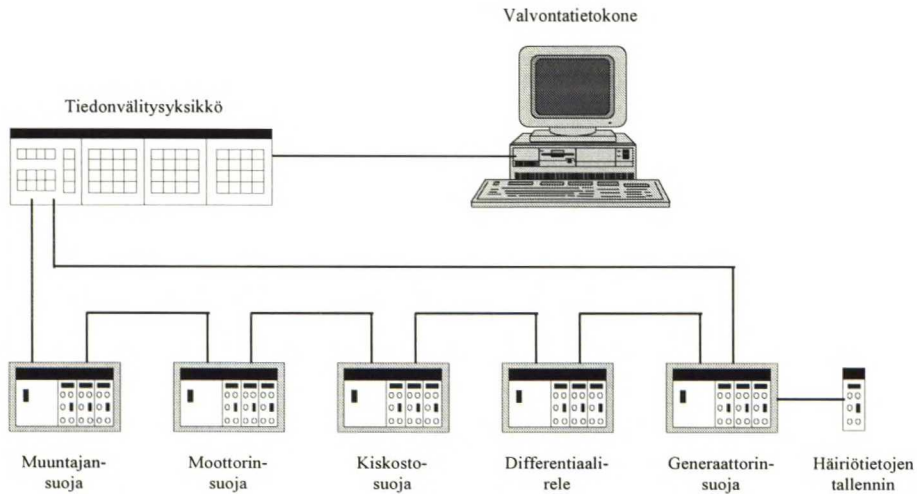
6.2.4 Valinta ja toteutus

Valvontajärjestelmä valitaan siten, että jokaisessa paikassa suoritetaan vain tarpeellinen valvonta, sillä mm. häiriötietojen tallennin maksaa noin 20 000 mk, joten se on yhtä kallis komponentti kuin itse rele. Toinen syy on, että turhaa tietoa on pyrittävä välttämään, koska se hidastaa analysointia.

Peruslaitteisto sisältää ominaisuuksia, jotka tulevat mukaan joka tapauksessa. Tosin miehittämättömän aseman sovelluksessa niistä ei valvonnan kannalta ole kovin paljon hyötyä. Perusohjelmisto on joka tapauksessa oltava mukana, jotta muut sovellukset toimivat.

Report ohjelma on hyödyllinen valvonnan apuväline, jos häiriötietojen tallentimia ei käytetä. Niinpä se sisällytetään valvontaohjelmistoon. Report ohjelma mahdollistaa kaikkien releiden valvonnan. Ja koska se järjestelmään sisällytetään, kaikkia releitä kannattaa myös valvoa ohjelmalla. Tarkat tapahtumatiedot ovat hyödyllistä tietoa, vaikka häiriötietojen tallennin olisi mukanakin.

Häiriötietojen tallennin on kallis komponentti ja koska se on relekohtainen, joudutaan osa releistä jättämään ilman tallenninta. Vain tärkeimpiin kohteisiin, joissa vaaditaan äärimmäistä tarkkuutta, laitetaan tallentimia. Niinpä häiriötietojen tallentimia käytetään vain generaattorinsuojareleiden yhteydessä, hintojen halventuessa mahdollisesti myös differentiaalireleissä. Lopullinen järjestelmä on esitetty kuvassa 6.5. Kuva on periaatteellinen esitys releiden kytkeytymisestä toisiinsa, sillä kuvassa ei ole kaikkia valvottavia releitä eikä useampia silmukoita.



Kuva 6.5 Valvontajärjestelmä

6.3 Liittyminen muuhun diagnostiikkaan

Diagnostiikkalaitteiston sisältö on eri tyyppisissä laivoissa hieman erilainen. Lopulliseen koostumukseen vaikuttaa myös laivan ostajan käsitys diagnostiikan hyödyllisyydestä eri kohteissa. Täydellinen järjestelmä sisältää tällä hetkellä diagnostiikan syklokonverttereille, laakereille ja releille. Laakereiden ja releiden diagnostiikka on käyty läpi tässä työssä. Ohessa lyhyt selostus syklokonverttereiden diagnostiikasta sekä tiedon keruusta ja kokoamisesta yhteen paikkaan.

Syklokonverttereiden diagnostiikka on pääasiassa vikadiagnostiikkaa. Laitteisto koostuu syklokonvertterin valvontayksiköstä, muutostietojen tallentimisesta sekä valvontaohjelmista, jotka sijaitsevat valvontatietokoneella. Sekä valvontayksikölle että muutostietojen tallentimelle on omat valvontaohjelmat. Nämä ohjelmat sisältävät vain valvonnan. Turvallisuussyistä asetusten muuttaminen ja muu laitteistoon vaikuttaminen laivan ulkopuolelta on tehty mahdottomaksi.

Yhden syklokonvertterin valvontaan käytetään yhtä valvontatietokonetta. Laivoissa, joissa on kaksi syklokonvertteria, tarvitaan kaksi valvontakonetta. Laakerinvalvontaan ja relevalvontaan tarvitaan yksi yhteinen tietokone. Jokaisessa tietokoneessa on käytössä yhtä aikaa useampi ohjelma. Kun kaikki valvontatoiminnot ovat jatkuvia, ohjelmien on kyettävä toimimaan ja keräämään tietoa muiden taustalla. Käyttöliittymänä valvontatietokoneessa on Windows, joten ainakin niiden ohjelmien, joita ei alkuperäisesti ole tehty Windowsille, toiminta on testattava todellisessa käyttöympäristössä.

Laivojen kaukodiagnostiikka edellyttää tietojen saamista laivalta maa-asemalle. Laivalla toimii Unix-pohjainen palvelin, josta on yhteys satelliitin tai puhelinlinjojen kautta maa-

asemalle. Laivan palvelin on verkotettu kaikkien valvontatietokoneiden kanssa, joten palvelimelta pääsee valvontakoneelle keräämään haluamansa tiedostot ja siirtämään ne maa-asemalle. Maa-asemalla analysointi tehdään samoilla ohjelmilla, joilla tieto kerätään laivalla, koska ohjelmia ei tehdä pelkästään kaukokäyttöä varten. Samalla ohjelmalla on tarkoitus kerätä tiedot ja tehdä analysointi.

Laivalla täytyy olla yksi puhelinlinja vapaana kaukodiagnostiikan puhelin- tai satelliittiyhteyksille. Puhelinyhteyttä käytettäessä kytkeytyminen diagnostiikkapalvelimeen tapahtuu modeemin kautta. Satelliittiyhteyttä (Inmarsat B) käytettäessä modeemia ei tarvita.

7 JATKOKEHITYSMAHDOLLISUUDET

Propulsiojärjestelmän kaukodiagnostiikka on yhä varsin uusi asia, vaikka valvontalaitteistoja on kehitetty jo joidenkin vuosien ajan. Valvontalaitteistoja on nykyään saatavilla, mutta kaikki laitteistot eivät ole suoraan soveltuvia vaativiin laivaolosuhteisiin. Myös eri valvontatoimintojen liittyminen yhdeksi valvontakokonaisuudeksi on erittäin mutkikasta ja nykyisellä tekniikalla osittain puutteellistakin. Laitteistoissa ja valvontaohjelmissa on siis vielä paljon kehitettävää.

Valvontajärjestelmät ovat vielä toistaiseksi erittäin kalliita. Se rajoittaa usein järjestelmien käyttöä täydessä laajuudessaan. Teknisen kehityksen seurauksena nykyisin vaadittavat ominaisuudet ovat tulevaisuudessa halvempia kuin nyt. Samoin erityisesti ohjelmistoista otettava ylihinta jää pois, kun kilpailu alalla kiristyy. Erityyppisen valvonnan lisääntyessä, on myös selvä, että tuotekehitys alalla kiihtyy entisestään ja uusia parempia järjestelmiä kehitetään.

Tässä luvussa keskitytään valvonnan ja diagnostiikan parantamiseen ja tulevaisuuden näkymiin pelkästään laivojen osalta. Luvuissa 7.1 ja 7.2 käsitellään erikseen nyt rakennettujen valvontajärjestelmien, laakeri- ja relevalvonnan, kehittämistä sekä uusien kohteiden diagnostiikan rakentamista.

7.1 Tekniikan kehityksen tuomat mahdollisuudet

Laakereiden värähtelymittaus on alue, johon on panostettu paljon ja siltä alueelta löytyy paljon valmiita ratkaisuja antureista analysointiohjelmistoihin. Etenkään anturitekniikassa ja valvontamenetelmissä ei ole odotettavissa muutoksia lähivuosien aikana. Muutokset kohdistuvat pääasiassa tiejojenkäsittely-yksiköihin ja analysointiohjelmistoihin. Tämän tekee mahdolliseksi nopeasti kehittyvä tietotekniikka. Parantunut prosessoriteho mahdollistaa yhä vaativammat ja laajemmat ohjelmistot, jotka sisältävät tietoa enemmän kuin ennen. Automaation osuus lisääntyy niin tiedonsiirrossa kuin analysoinnissa.

Relevalvontalaitteistot ovat huomattavasti keskeneräisempiä kuin laakerivalvontalaitteistot. Syynä on relediagnostiikan alkuvaiheessa oleva kehitys. Kehitettävää löytyy sekä ohjelmistoista että mittaustoiminnoista. Jo nyt on tiedossa, että vuoden kuluessa ilmestyy relesarja, jossa häiriötallentimen toiminnot on sisällytetty releeseen. Tämä on suuri etu, sillä nykyinen erillinen häiriötietojen tallennin on vaikea saada mahtumaan kaikkiin haluttuihin kohteisiin. Lisäksi häiriötietojen tallennin on erittäin kallis. Muistin suurentuminen on toivottavaa etenkin häiriötapausten tallennuksessa, jotta enemmän tapahtumia voidaan sisällyttää valvontaan. Tärkeää on myös, että tallennusaika pitenee.

Tiedonsiirtotekniikassakin on odotettavissa parannusta. Laivan vaikeissa ja häiriöllisissä olosuhteissa toimittaessa tiedonsiirrolle asetetaan suuria vaatimuksia ja siksi sen kehittyminen on tärkeää. Tiedonsiirto korostuu erityisolosuhteissa kuten esimerkiksi Azipod-sovelluksissa. Nykyiset ratkaisut riittävät, mutta samalla tiedonsiirto on kallista käytettäessä viimeisintä tekniikkaa. Langattomat tiedonsiirtovaihtoehdot yleistyvät koko ajan ja samalla hinnat alenevat. Viime aikoina tiedonsiirtokapasiteetti on kehittynyt langattomilla vaihtoehdoilla riittäväksi. Myös optinen tiedonsiirto kehittyy koko ajan. Ennen kaikkea on tärkeää, että häiriönsieto paranee. Muun kehityksen ohessa tähänkin on tulossa parannusta.

Mittaustulosten käsittely paranee jatkossa ja antaa mahdollisuuden entistä nopeammalle ja tehokkaammalle valvonnalle. Laskenta nopeutuu ja esimerkiksi mittaustulosten derivointi tai integrointi hoituu nopeasti ja entistä tarkemmin, kun laskennassa päästään yhä pienempiin askeliin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että analysoinnissa saadaan ylimääräiset häiriötekijät suljettua tarkemmin pois ja päähuomio keskittyy nimenomaan mahdollisten vikojen tarkkailuun. Kun ylimääräinen kohina saadaan eliminoitua ja viat erottuvat signaaleista selvästi, automaattisen vikahaun on mahdollista toimia tehokkaasti. Käsittelyä parantaa myös ohjelmistojen kehitys. Kuvaajia päästään entistä paremmin tarkastelemaan ja vertailemaan keskenään. Olisi hyödyllistä, jos eri valvontamuodoista saatuja tuloksia pystyttäisiin tarkastelemaan yhdellä ohjelmalla. Toistaiseksi jokainen valvontatapa sisältää oman valvontaohjelmiston.

Tietotekniikan kehitys mahdollistaa yhä automaattisemmat toiminnot. Kun automaatio-toiminta on sijoitettu laivalle, valvontatietokone tarkkailee tapahtumia ja analysoi mittaustiedot keräyksen yhteydessä. Muistiin tallennettujen vikamallien avulla tietokone tekee analyysin ja ilmoittaa mahdollisesta viasta eteenpäin. Vika-analyysiin johtaneet tiedostot siirretään automaattisesti maa-asemalle tarkempaa analyysia ja vian syiden selvittämistä varten. Tavoitteena on, että turhaa tietoa ei siirretä ja kerätä maa-asemalle. Toinen vaihtoehto olisi sijoittaa automaattinen tietokoneella toimiva vika-analysointi maa-asemalle, mutta tällöin joudutaan siirtämään kaikki laivalla kerätyt tiedot.

Tietotekniikan ja tiedonsiirron kehitys mahdollistaa tiedon siirtämisen myös laivaan päin. Tällä hetkellä korjausvaihtoehtona on antaa puhelimella tietoa laivan huoltomiehelle tai lähettää asiantunteva huoltomies paikalle. Korjaustoiminta parantuu huomattavasti, jos laivalle pystytään lähettämään kuvia tai jopa videokuvaa kyseisen vian korjaustilanteesta. Useimmassa tapauksessa välttyttäisiin silloin asiantuntijan lähettämiseltä laivalle ja säästetään huomattavasti aikaa.

7.2 Taajuusmuuttajien diagnostiikka

Jotta laivan kaukodiagnostiikasta saadaan kattava kokonaisuus, siihen on lisättävä ainakin taajuusmuuttajien diagnostiikkaa. ABB:n toimittamien propulsiojärjestelmien moottoreiden syötössä käytetään tapauksesta riippuen syklokonverttereita, kolmitasoinverttereitä tai kaksitasoinverttereitä. Syklokonverttereita käytetään tahtikoneiden ohjaukseen ja kaksi- ja kolmitasoinverttereitä käytetään epätahtikoneiden ohjaukseen.

Syklokonverttereille on jo suunniteltu ja toteutettu erillinen kaukodiagnostiikkalaitteisto. Diagnostiikka on siinä pääasiassa vikadiagnostiikkaa. Tietojen keräykseen käytetään erillistä tallenninta, transient recorderia. Tallennin mittaa signaalit ja tallentaa tulokset muistiin. Tallennus käynnistyy, kun säädöltä saadaan tieto vikatilanteesta. Käyttäjä voi valita kuinka suuri osa tallennuksesta on ennen vikaa ja kuinka suuri vian jälkeen. Vika-analyysissä kiinnostavin osa on luonnollisesti vikaan johtaneet syyt eli ennen vikaa olleet tapahtumat. Näytteenottoväli on kymmenien mikrosekuntien luokkaa, joten taajuusmuuttajille tyypilliset nopeat häiriöt saadaan talteen. Seuraava askel on integroida diagnostiikka taajuusmuuttajaan. Nyt käytetään diagnostiikan osalta erillistä laivalaitteistoa.

Tallentimilta tiedot kerätään erillisillä valvontaohjelmilla, jotka sijaitsevat valvontatietokoneella. Valvontakoneelta tiedot kerätään palvelimelle. Tähän asti tiedonsiirto tapahtuu automaattisesti. Palvelimelle saadaan yhteys maa-asemalta luvussa 6.3 kuvatulla tavalla. Kerättävä tieto sisältää ohjausparametreja, nopeasti muuttuvia signaaleja, hälytyslistoja ja yleisiä tilatietoja. Tiedot saadaan esiin joko numerotietoina tai graafisina kuvaajina myöhempiä analyyseja varten.

Kolmi- ja kaksitasoinverttereiden diagnostiikka on hyvin samanlainen syklokonvertteri-diagnostiikan kanssa, koska eri taajuusmuuttajilla ilmiöt ja viat ovat hyvin samanlaisia. Syklokonvertterin tapauksessa valvontaohjelmat on jo kertaalleen sovellettu laivakäyttöön ja haluttuun valvontakäyttöön sopivaksi. Niinpä kannattaa käyttää samoja ohjelmia. Tallentimia on myös kehitetty paljon ja kehitetään yhä, joten luonnollisesti samoja tallentimia käytetään muidenkin taajuusmuuttajien signaalien mittaukseen.

Suurimmat erot eri taajuusmuuttajien diagnostiikassa ovat tallennettavien signaalien tyypeissä ja määrässä. Syklokonverttereilla tarkkaillaan mm. taajuusmuuttajan ulostulovirtojen todellista arvoa ja ohjearvoa, tyristorien ohjauksulmaa, moottorin magnetointivirtaa, momentin todellista arvoa ja ohjearvoa. Lisäksi valvotaan useita digitaalisia signaaleja. Kaksi- ja kolmitasoinverttereillä on tarkkailtava hieman eri signaaleja, jotta yllättävien käyttökeskeytysten syyt saadaan selvitettyä. Tarvittavat signaalit määritellään heti, kun laakerinvalvonta ja relevalvonta ovat valmiita. Kun kaikki taajuusmuuttajat on saatu valvonnan piiriin, kaukodiagnostiikka muodostaa kokonaisuuden, joka kattaa suurelta osin propulsiojärjestelmän.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä perehdyttiin kunnonvalvonnan teoriaan, jonka pohjalta kehitettiin ratkaisut laakereiden kunnonvalvonnan ja releiden vikadiagnostiikan käyttämiseksi sähköisen propulsiojärjestelmän kaukodiagnostiikassa. Valmiin laitteiston ja käyttöohjelmiston avulla on mahdollista seurata laakereiden kuntoa ja ennustaa niiden kulumisen ja määrätä ennalta huoltoajankohta. Relesuojaukseen diagnostiikka tuo apua verkon vikojen analysointiin ja mahdollistaa perinpohjaisen vikojen syiden selvittämisen. Korjaus nopeutuu ja sähköverkko tulee paremmaksi, kun vikojen aiheuttajiin päästään käsiksi. Työn alussa käsiteltiin valvontaa teoreettisesti. Tämän jälkeen valittiin parhaat kaupalliset järjestelmät vertailuun ja lopuksi sopivimmat järjestelmät toteutettiin. Laitteistot sovittiin lopuksi laivakäyttöön.

Laakereiden kunnonvalvonnan toteuttamiselle löytyi useampi mahdollinen vaihtoehto. Vertailussa kiinnitettiin erityistä huomiota monipuolisuuteen, laajennusmahdollisuuksiin, ennustamisen tarkkuuteen sekä siihen, että tuote soveltuu laivaympäristöön. Hinta oli myös tärkeä, mutta tässä asiassa vaihtoehdot olivat tasavertaisia. Valittu laitteisto sisältää useamman valvontamahdollisuuden sekä vierintä- että liukulaakereille. Valvontaa voi tehdä kokonaistason mittauksella, taajuusanalyysillä, verhoikäyrällä ja rataikäyrällä. Kulumisen ennustaminen on tarkkaa ja järjestelmää pystyy helposti laajentamaan myöhemmin sekä valvottavien kohteiden että analysointiohjelmien osalta. Erityistä huomiota kiinnitettiin Azipod-yksikössä sijaitsevan potkurimoottorin laakereihin. Ongelmana oli anturien mittaustiedon siirtäminen Azipodista laivan sisälle, mutta se ratkaistiin työssä langattomasti radiotaajuuden tiedonsiirron avulla.

Suojareleiden diagnostiikkaa tarkasteltiin eri lähtökohdista. Käytännössä releiden ja relediagnostiikan toimittaja on oltava sama, jotta järjestelmän toiminta olisi varmaa tiedonsiirron ja analysoinnin osalta. Reletoimittajan diagnostiikkalaitteisto otettiin tarkasteluun ja keskityttiin valitsemaan oikeanlaajuinen järjestelmä laivan koko sähköverkon suojaukseen. Testilaitteiston avulla tutustuttiin diagnostiikkalaitteiston toimintaan, jonka jälkeen sopiva laitteisto pystyttiin valitsemaan verkon eri osien valvontaan. Käyrämuodot talteen ottava häiriötietojen tallennin on kallis komponentti, joten niitä laitetaan vain kohteisiin, joissa vaaditaan suurinta tarkkuutta. Tällaisia ovat generaattorin suojareleet. Kaikki kohteet varustetaan ohjelmistolla, joka mahdollistaa tapahtumien seuraamisen automaatiojärjestelmästä tai diagnostiikkatietokoneelta käsin.

Sekä laakereiden että releiden valvontajärjestelmissä otettiin alusta alkaen huomioon kaukodiagnostiikan vaatimukset. Suurimmat vaatimukset kohdistuivat ohjelmistoihin. Laivalla diagnostiikka toimii miehittämättömänä toimintona, jolloin tiedon keruun, tallennuksen, tiedon siirron ja osittain tiedon käsittelyn on oltava automaattista. Tietokoneen käynnistyessä ohjelmien on myös käynnistytävä automaattisesti.

Valittujen laitteistojen jatkokehitys on tarpeellista kaikkien haluttujen toimintojen saamiseksi mukaan diagnostiikan piiriin. Toinen jatkokehityksestä saatava hyöty on hinnan aleneminen. Samat toiminnot saadaan tulevaisuudessa halvemmalla mm. komponenttien halpenemisen ja valvonnan yleistymisen vuoksi. Suurimmat kehitystarpeet löytyvät tiedonsiirrosta sekä ohjelmistoista. Syklokonverterin diagnostiikka on jo pitkälle kehitetty, mutta kaukodiagnostiikkajärjestelmää on syytä laajentaa muihin taajuusmuuttajiin kuten kaksi- ja kolmitasoinverttereihin.

VIITELUETTELO

1. Syklokonvertteri: selostukset, käyttö- ja huolto-ohjeet, piirikaaviot. 1995. ABB Industry Oy.
2. Vauhkonen, V. 1985. Syklokonvertterit ja syklokonvertterien ohjaus. INSKO 75-85 VII. 26 s.
3. Mård, M., Vauhkonen, V., Kangasaho, O. 1990. Pat.U.S. 4920 306. Method for controlling the torque of a synchronous machine supplied by a frequency converter. ABB Strömberg Drives Oy. Finland. Appl 227 775, 24.4.1990, 8 s.
4. Hackman, T. 1990. Diesel electric propulsion systems for cruise vessels: The experience of the "Fantasy" sea trials. ABB Industry Oy, Marine Division. 18 s.
5. Kyyrä, J. 1994. Suuntaajatekniikka. Luentomoniste. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Sähkökäytön ja tehoelektroniikan laboratorio.
6. Järvinen, P. 1993. Vierintälaakereiden kunnonvalvonta spektrianalyysin avulla. Spektrivalvonta ja verhoikäyräanalyysi. INSKO 271616-93V. 21 s.
7. Berry, J.E. 1993. Predictive maintenance and vibration signature analysis II. Charlotte, Technical Associates Of Charlotte Inc. 795 s.
8. O'Donnell, P. 1985. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part I and II. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, no. 4. s.853-872.
9. Albrecht, P.F. et al. 1986. Assessment of the reliability of motors in utility applications. IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. EC-1, no 1. s. 39-46.
10. Jääskeläinen, P. 1978. Elektroniikan luotettavuus. Espoo, Otakustantamon julkaisu 405. 151 s.
11. Hanna A.J. 1974. Predictive maintenance via vibration analysis. Tappi. Vol 57, no. 5, s.153-157.
12. Holmberg, K., Folkson, A. 1991. Operational reliability and systematic maintenance. London, Elsevier science publishers Ltd. 331 s.
13. Vinko, A. 1987, Sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan tarve ja toteuttamismahdollisuudet. Diplomityö. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu. 96 s.
14. Tennilä, J. 1989. Teollisuuden sähkölaitteiden ennakoiva ja ehkäisevä kunnossapito. INSKO 120-89 I IV. 30 s.

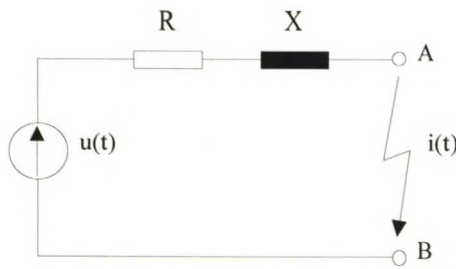
15. Jaatinen, E. 1983. Paperikoneen kuivatusosan käynninaikainen kunnonvalvonta. Diplomityö. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 153 s.
16. Väisänen, J. 1994. Dieselsähköisen laivakäytön kaukodiagnostiikka. Diplomityö. Helsinki, Tampereen teknillinen korkeakoulu. 82 s.
17. Tavner, P.J., Penman, J. 1987. Condition monitoring of electrical machines. Herts. Research Studies Press Ltd. 286 s.
18. Wireman, T. 1984. Preventive Maintenance, Reston. Reston Publishing Company, Inc. A Prentice-Hall Company. 242 s.
19. Tikkanen, L. 1985. Esiselvitys pyörivien koneiden kunnonvalvontajärjestelmän toteuttamiseksi. Diplomityö. Helsinki, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 65 s.
20. Gilstrap, M. 1984. Transducer selection for vibration monitoring of rotating machinery. Sound and Vibration. Vol. 18, no.2, s. 22-24.
21. Koukkari, J. 1995. Spesifikaatio: Remote diagnostics. ABB Industry Oy, Marine Division. 25 s.
22. Braun, S., Datner, B. 1979. Analysis of Roller/Ball Bearing Vibration. Journal of mechanical design, Transactions of the ASME, s. 118-125.
23. Holmberg, K., Kuoppala, R. 1981. Koneiden kunnon mittausmenetelmät. Espoo Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedote 58.
24. Collacot, R. A. 1979. Vibration monitoring and diagnosis. London, George Godwin Limited. 333 s.
25. Lang, G.F. 1976. The hidden message in mechanical vibration. Machine design. Vol. 48, no.14, s. 86-92.
26. Barthel, K. 1977. The shock pulse method for measuring the condition of antifriction bearings. Tappi Vol. 60, no. 8, s. 111-113.
27. Kunnossapitokoulu. 1995. SPM-Menetelmä: Vierintälaakereiden käyttökunnan arviointi. Kunnossapito-lehden erikoisliite. Vol. 2, no. 33, 16s.
28. Kuoppala, R. et al. 1986. Pyörivien koneiden käynninaikainen kunnonvalvonta. Espoo, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, tiedotteita 596. 58 s.
29. Harker, R.G., Cronquist, W.E. 1983 The impact of microprocessors on rotating machinery data acquisition and diagnosis information system. Noise and Vibration Control Worldwide. Vol. 14, no. 6, s. 166-170.
30. Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. Espoo, Otatiето Oy. 459 s.
31. Maaskola, J. et al. 1989. Relesuojaustekniikan näkymät. INSKO julkaisu 80-89. 200 s.

32. Karttunen, M. 1989. Oikosulkuvirta ja sen vaikutuksia, INSKO julkaisu 183-89: Oikosulkukysymykset sähköverkossa. 13 s.
33. Short-circuit current evaluation with special regard to rated short-circuit capacity of circuit-breakers in installations in ships. 1972. IEC julkaisu 363. 64 s.
34. Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems. 1988. IEC julkaisu 909. 175 s.
35. Wiklund, G. 1988. SPACOM-a system for the integration of secondary equipment in distribution substation. Sähkö: Electricity and Electronics. Vol. 61, no. 6, s. 54-56.
36. SPACOM-releiden tuotedokumentit. 1994. ABB Strömberg Releet, Vaasa.
37. Burt, B.M., McDonald, J.R. 1991. Potential advantages of a diagnostic expert system for assisting operator response to system events. IEE Third International Conference on Power System Monitoring and Control, Conference Publication Number 336. 293 s.
38. IEEE Committee Report. 1992. Protective relaying performance reporting. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 7, no. 4, s.1892-1899.
39. Protopapas, C.A. et al. 1991. An expert system for substation fault diagnosis and alarm processing. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 6, no. 2, s. 648-656.
40. Azimuthing electric propulsion drive, Project guide. 1995. Kvaerner Masa-Azipod. 25 s.
41. Laapio, J., Niini, M. 1995. A shipowner's view on the benefits of retrofitting product tankers with electrical pod drives. Ship Repair & Conversion. 14 s.
42. Benda, S. 1991. Interference-free electronics. Lund. 388 s.
43. On-line system for multi-parameter monitoring. 1996. SKF. 32 s.
44. CMS Järjestelmä, asennusohje. 1994. SPM Instrument. 17 s.
45. Carlson, B.A. 1986. Communication systems. 2.p. Singapore, McGraw-Hill Book Company. 686 s.
46. SMS 010, User's guide. 1996. ABB Transmit Oy. 249 s.
47. Häiriötietojen tallennin SPCR 8C27, toimintaselostus. 1994. ABB Strömberg Releet. 26 s.
48. Kuurne, M. 1984. Laivan sähköverkon oikosulkuvirrat ja jännitesäro. Diplomityö. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu. 78 s.

-
49. Laible, T. 1952. Die theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb. Berlin, Springer-Verlag. 128 s.

Liite 1: Oikosulkuvirran laskeminen

Oikosulkuvirran laskeminen käydään läpi viitteissä /33/ ja /34/ esitetyllä tavalla. Kun verkon kuormitusilannetta ei oteta huomioon, kolmivaiheverkko voidaan esittää kuvan L.1 yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla.



Kuva L.1 Kolmivaiheverkon yksivaiheinen sijaiskytkentä.

Kuvassa L.1 jännite $u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha)$ ja oikosulku tapahtuu pisteiden A ja B välillä. Piirille voidaan kirjoittaa differentiaaliyhtälö

$$Ri + L \frac{di}{dt} = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha), \quad (\text{L.1})$$

josta ratkaisemalla saadaan oikosulkuvirralle yhtälö

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - e^{-\frac{t}{T}} \sin(\alpha - \varphi) \right], \quad (\text{L.2})$$

missä U = syöttöjännitteen tehollisarvo

Z = oikosulkupiirin impedanssi

ω = kulmataajuus

t = aika

α = jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun alkuhetkellä

φ = jännitteen ja virran välinen vaihekulma

T = oikosulkupiirin aikavakio

Oikosulkupiirin impedanssi, vaihekulma ja aikavakio saadaan yhtälöistä

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (\text{L.3})$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right), \quad (\text{L.4})$$

$$T = \frac{X}{\omega R}, \quad (\text{L.5})$$

missä R = oikosulkupiirin resistanssi

X = oikosulkupiirin reaktanssi

Yhtälön (L.2) ensimmäinen termi vaihtelee sinimuotoisesti ajan funktiona, ja se on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti. Jälkimmäinen termi puolestaan vaimenee piirin häviöiden takia eksponentiaalisesti aikavakiolla T . Sitä kutsutaan oikosulkuvirran tasavirtakomponentiksi. Oikosulun syntyhetkellä $t=0$ tasa- ja vaihtovirtakomponenteilla on aina sama arvo, mutta ne ovat vastakkaismerkkiset, joten oikosulkuvirta on tällöin nolla.

Oikosulun syntyhetkellä on suuri vaikutus syntyvän tasavirtakomponentin suuruuteen. Kun oikosulku tapahtuu hetkellä , jolloin $\alpha - \phi = 0$ tai 180° , ei tasavirtakomponenttia esiinny. Tällöin oikosulkuvirta on täysin symmetrinen ja sen yhtälöksi saadaan

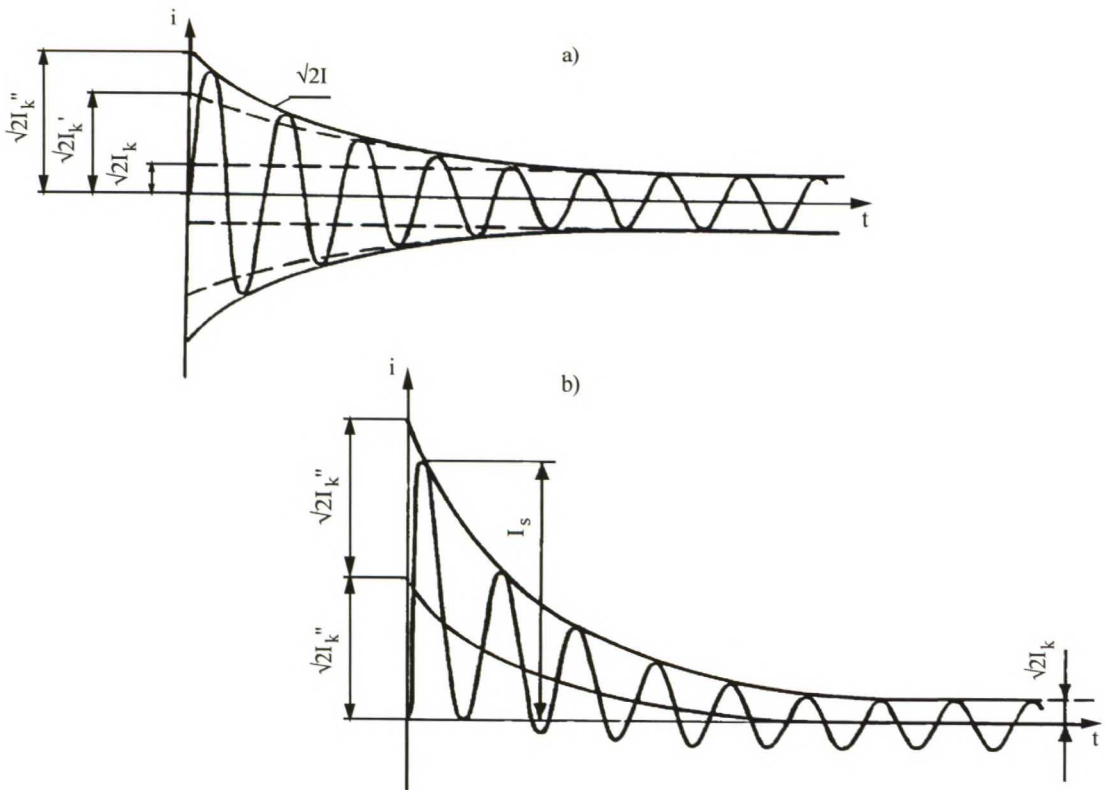
$$i_{sym}(t) = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \sin(\omega t). \quad (\text{L.6})$$

Jos oikosulun syntyhetkellä pätee $\alpha - \phi = \pm 90^\circ$, saadaan suurin mahdollinen tasavirtakomponentti, jonka alkuarvo on yhtä suuri kuin vaihtovirtakomponentin huippuarvo. Oikosulkuvirran yhtälöksi saadaan tällöin

$$i_{esym}(t) = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \left[\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{T}} \right]. \quad (\text{L.7})$$

Oikosulkuvirta on tällöin mahdollisimman epäsymmetrinen. Kuvassa L.2 on esitetty symmetrinen ja epäsymmetrinen oikosulkuvirta. On huomattava, että kolmivaihejärjestelmässä oikosulkuvirta voi olla symmetrinen ainoastaan yhdessä vaiheessa kerrallaan, sillä vaihejännitteet ovat toisiinsa nähden 120° vaihesiirrossa.

Oikosulkuvirta saavuttaa suurimman hetkellisarvonsa yhden puolijakson kuluttua oikosulun syntyhetkestä. Tätä suurinta huippuarvoa sanotaan sysäysoikosulkuvirraksi i_s . Kuten kuvasta L.2 voidaan havaita, oikosulun syntyhetkellä on suuri vaikutus myös sysäysoikosulkuvirran suuruuteen.



Kuva L.2 Tahtikoneen oikosulkuvirran riippuvuus vian syntyhetkestä a) symmetrisen oikosulkuvirta b) epäsymmetrinen oikosulkuvirta

Oikosulkuvirtoja laskettaessa on tunnettava verkon eri komponenttien sijaiskytkennät ja ominaisuudet oikosulussa. Laivaverkon komponentteja ovat mm. tahtigeneraattorit, tahtimoottorit, epätahtimoottorit, suuntaajat, muuntajat, kuristimet, kiskot sekä kaapelit. Tarkat oikosulkulaskut tehdään komponenttien runsaudesta johtuen tietokoneella /48/. Periaatteena on, että jokaisen komponentin vaikutusta tarkastellaan vikapisteeseen nähden. Vikapisteessä nämä vaikutukset summataan ja saadaan koko järjestelmän vikapisteeseen aiheuttama oikosulkuvirta. Jonkinlainen arvio oikosulkuvirroista saadaan, kun lasketaan pelkästään esimerkiksi generaattoreiden oikosulkuvirta. Tässä yhteydessä ei ole tarpeellista perehtyä tarkasti oikosulkuvirran laskemiseen. Verkon suojauksen ja valvonnan kannalta ei ole edes kovin tärkeää tietää lopullista oikosulkuvirtaa tai virran vaimenemisen aikavakiota. Oikosulkutapauksissa virta on katkaistava ennen kuin se saavuttaa huippuarvonsa. Kiinnostavimmat arvot ovat alkuoikosulkuvirta I_k'' sekä sysäyoikosulkuvirta I_s . Alkuoikosulkuvirta saadaan kaavasta (L.8)

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}, \quad (\text{L.8})$$

missä U_n = järjestelmän nimellijännite

c = taulukon mukainen jännitekerroin (keskijännitealueella $c=1.1$)

Z_k = myötäverkon impedanssi

Sysäysoikosulkuvirta on

$$i_s = \kappa \sqrt{2} i_k'' , \quad (\text{L.9})$$

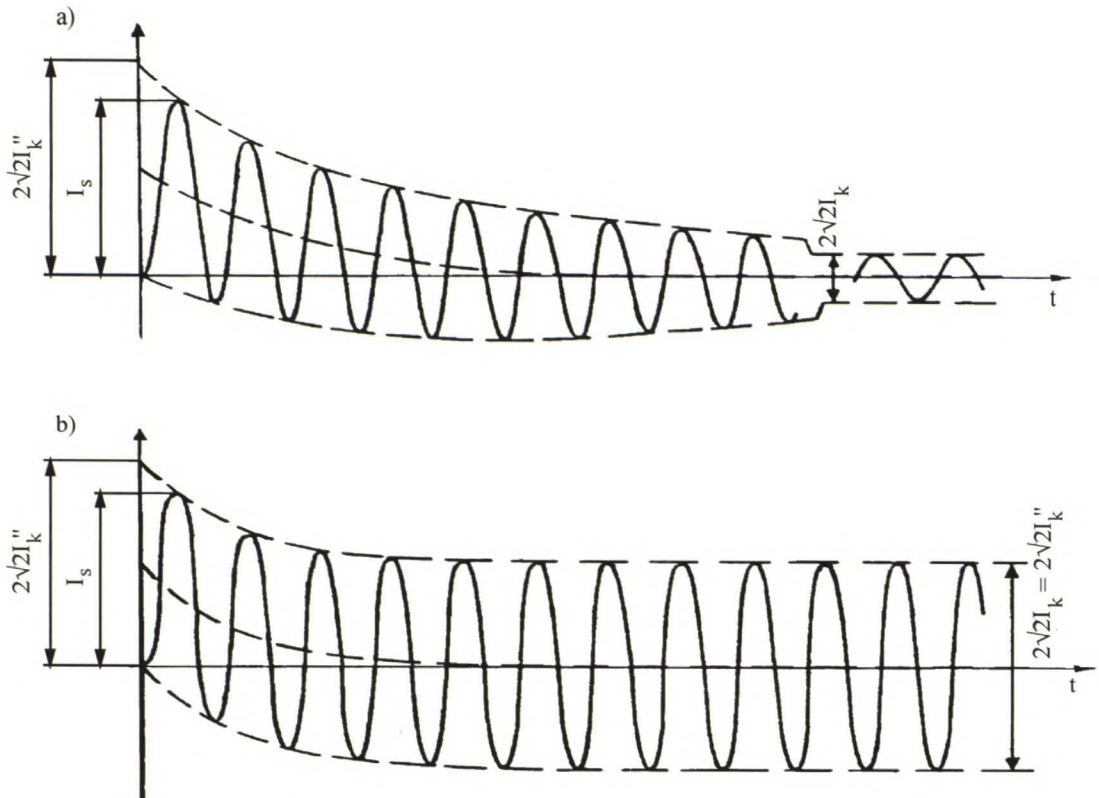
missä $\kappa = R/X$ -suhteesta riippuva sysäyskerroin.

Sysäyskerroin κ lasketaan yhtälöstä

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} . \quad (\text{L.10})$$

Oikosulkuvirran vaimeneminen riippuu ratkaisevasti vikapaikasta. Kun vika tapahtuu kaukana tahtikoneesta on tahtikoneen ja vikapaikan välinen impedanssi suuri tahtikoneen impedanssiin verrattuna ja tahtikoneen impedanssin muuttumisella ei ole enää suurta merkitystä virtapiirin kokonaisimpedanssin kannalta. Tällöin oikosulkuvirta ei vaimene ja alkuoikosulkuvirta on yhtä suuri kuin lopullinen oikosulkuvirta.

Oikosulun tapahtuessa lähellä tahtikonetta, vaimenee oikosulkuvirran vaihtokomponentti koneen reaktanssin kasvamisen johdosta. Reaktanssin muutokseen on syynä oikosulkutilanteessa koneen magnetoimis- ja vaimennuskäämityksiin sekä rautaan indusoituvat virrat, jotka estävät magneettivuon nopeat muutokset /49/. Kuvassa L.3 on esitetty vikapaikan vaikutus epäsymmetriseen oikosulkuvirtaan.



Kuva L.3 Oikosulkuvirta, kun oikosulku on a) koneen navoissa b) etäällä koneen navoista

Jos kyseessä ei ole symmetrinen verkko, lasketaan symmetrisiä komponentteja käyttäen. Tilanteesta muodostetaan myötä-, vasta- ja nollaverkko, joita käyttäen epäsymmetrinen tilanne saadaan laskettua. Tähän joudutaan menemään, sillä muuntajia ja pyöriviä koneita sisältävässä verkossa ovat laitteiden sisäiset impedanssit erisuuria, joten vaihe-
suureita ei voida laskea suoraan.