

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

DIPLOMITYÖ

Linjakäytön ennakkohuolto

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa

Diplomityön ensimmäinen tarkastaja: professori, TkT. Juha Pyrhönen

Diplomityön toinen tarkastaja: professori, TkT. Pertti Silventoinen

Diplomityön ohjaaja: System Development Manager, TkT. Jari Kallela, ABB Oy

Oulussa 28.06.2002

Juha Romppainen

Pellonmäenraitti 6 D32

53 850 LAPPEENRANTA

puh. 040 766 60 48

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Romppainen, Juha

Työn nimi: Linjakäytön ennakkohuolto

Osasto: Sähkötekniikka

Vuosi: 2002

Paikka: Oulu

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu

107 sivua, 25 kuvaa, 22 taulukkoa ja 10 liitettä

Ensimmäinen tarkastaja professori, TkT Juha Pyrhönen

Toinen tarkastaja professori, TkT Pertti Silventoinen

Hakusanat: kunnossapito, ennakkohuolto, säädettävät käytöt, taajuudenmuuttaja

Keywords: maintenance, preventive maintenance, adjustable speed drives, frequency converter

Diplomityön tavoitteena oli selvittää paperitehtaan linjakäytön ennakkohuollon kehittämiskohteita. Tavoitteena oli löytää huoltotoimenpiteet ja -menetelmät, joiden avulla voitaisiin parantaa linjakäyttöjen toimintavarmuutta.

Työssä perehdyttiin kirjallisuuden avulla kunnossapidon peruskäsitteistöön, kunnossapitostrategian valintaan vaikuttaviin tekijöihin ja käyttövarmuuden eri osa-alueisiin. Prosessisähkölaitteiden kunnossapitoa esitellään yleisellä tasolla sekä selvitetään prosessisähkölaitteiden rakenteiden vaikutusta toimintavarmuuteen. Paperikoneen eri käyttöryhmien merkitykset tuotannon kannalta ja niiden ohjaustavat selvitetään myös lyhyesti.

Työssä keskityttiin linjakäytössä käytettävien säädettävien AC-käyttöjen rakenteisiin ja huoltokohteisiin. Lisäksi tarkasteltiin AC-käyttöjen toimintavarmuutta kerättyjen vikahistoriatietojen pohjalta. Työssä verrattiin myös paperikoneiden tasavirtakäyttöjen ja AC-käyttöjen seisokkiaikoja. Linjakäyttöjä tarkasteltiin kunnossapidon toiminnallisen tehokkuuden kannalta. Kirjallisuus- ja kriittisyystarkastelun avulla vikahistoriatietoja hyväksikäyttäen määriteltiin alustavat linjakäyttöjen laitteistojen huoltokohteet ja -toimenpiteet.

ABSTRACT

Author: Romppainen, Juha

Title: Preventive Maintenance of Line Drives

Department: Department of Electrical Engineering

Year: 2002

Place: Oulu

Masters Thesis. Lappeenranta University of Technology

107 pages, 25 figures, 22 tables and 10 appendices

1st. Examiner: Professor, D.Sc. (Tech.) Juha Pyrhönen

2nd. Examiner: Professor, D.Sc. (Tech.) Pertti Silventoinen

Keywords: maintenance, preventive maintenance, adjustable-speed drives, frequency converter

The aim of this thesis was to study the development areas in the preventive maintenance of the line drives in a paper factory. The aim was to find the maintenance measures and methods, through which the performance reliability of line drives could be improved.

This thesis studies the basic concepts of maintenance, the factors that influence the selection of a maintenance strategy and the various areas of performance reliability on the basis of literature. Process electrical equipment is presented on a general level, and the effect of the structures of process electrical equipment on performance reliability is examined. The significance of the different drive groups of a paper machine from the perspective of production and ways of controlling them are also discussed here in brief.

This study focuses on the structures and maintenance areas in the AC drives used in line drives. In addition, the performance reliability of AC drives is examined on the basis of fault history information. Furthermore, this study compared the downtimes of a paper machine's DC drives with those of its AC drives. Line drives were studied from the perspective of the functional efficiency of maintenance. On the basis of the literature and criticality study, preliminary maintenance targets and measures were determined using fault history information.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Fortek Oy:n Oulun tulosityksikössä. Fortek Oy on StoraEnson ja ABB:n omistama yhtiö, joka tuottaa metsäteollisuuden kunnossapitopalveluita StoraEnson Pohjois-Suomen tehdaspaikkakunnilla. Ohjaavan professorina on toiminut LTTK:n sähkötekniikan osaston johtaja professori Juha Pyrhönen, toisena tarkastajan on toiminut LTTK:n sähkötekniikan osaston professori Pertti Silventoinen ja työni ohjaajana on toiminut ABB Oy:stä Jari Kallela. Häntä haluan kiittää työni ohjauksesta ja hyvistä vinkeistä työni edetessä. Fortek Oy:n Oulun tulosityksikön päällikköä Mauri Tervoa haluan kiittää mielenkiintoisesta työn aiheesta.

Työssäni tarvittavien tietojen hakuun uhratusta ajasta haluan kiittää tietopalvelun väkeä. Jarmo Lapinniemeä Fortek Oy:stä ja Asko Kavalaa ABB Service Oy:stä haluan kiittää paperikoneen linjakäytön huoltotoimintaan liittyvistä tiedoista. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työni valmistamiseen vaikuttaneita ihmisiä.

Erityisesti kiitän vanhempiani ja perhettäni, jotka ovat olleet tukenani opiskeluni aikana.

Oulussa kesäkuun 28. päivänä 2002

Juha Romppainen
Pellonmäenraitti 6D 32
53 850 LAPPEENRANTA

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KUNNOSSAPITO	2
2.1	Teollisuuden kunnossapito	2
2.1.1	Kunnossapidon organisointimallit	3
2.1.2	Kunnossapitotekniikat ja vianhaku	4
2.1.3	Kunnossapitolajin vaikutus työmotivaatioon	6
2.1.4	Kunnossapidon merkitys	6
2.2	Kunnossapitoon liittyvät käsitteet ja määritelmät	7
2.3	Kunnossapitostrategian valinta	9
2.4	Käyttövarmuus ja käyttövarmuustiedon kokoamiseen liittyvät ongelmat	12
2.5	Kunnossapitotoiminnan mittaaminen, laitoksen toimintavarmuuden ja käytettävyyden parantaminen	20
3.	PROSESSISÄHKÖLAITTEIDEN KUNNOSSAPITO	22
3.1	Sähkölaitteiden tutkiva ja ennaltaehkäisevä kunnossapito	22
3.2	Sähkölaitteistojen kunnonvalvontamenetelmät	25
3.3	Prosessisähkölaitteiden käyttövarmuus	32
4.	PAPERIKONEEN LINJAKÄYTÖT	39
4.1	Paperikoneen eri käyttöryhmät	39
4.2	Paperikoneen käyttöjen säätöjärjestelmä	43
4.2.1	Paperikone PK 7 ryhmien ohjaus	44

4.2.2	Päällystyskone PPK 7 ryhmien ohjaus	46
4.3	Säädettävät käytöt	47
4.3.1	Säädettävien AC-käyttöjen rakenne	49
4.3.2	Säädettävien AC-käyttöjen toimintavarmuus	54
5.	PAPERIKONEIDEN SEISOKKIMÄÄRIEN VERTAILU	60
5.1	Paperikoneiden ennakoimattomat sähköseisokit	60
5.2	Paperikoneiden sähkökäyttöjen seisokkimäärien vertailu	63
6.	HUOLTO	64
6.1	Huoltokohteiden tarkastelu	64
6.1.1	Syöttöyksikkö	64
6.1.2	DC-välipiiri	68
6.1.3	GTO- ja IGBT-vaihtosuuntaaja	71
6.1.4	Syöttöyksiköiden ja vaihtosuuntaajien elektroniikkakortit	74
6.1.5	Epätahtimoottori	78
6.1.6	Muut ulkoiset laitteistot	91
6.2	Linjakäytön huolto	92
6.2.1	Valmistajan suosittamat huoltotoimenpiteet	92
6.2.2	Laittoimittajalta tilatut huollot linjakäytölle	94
6.2.3	Huoltokoulutus ja huoltotoiminnan kehittäminen	95
6.2.4	Kunnossapidon linjakäytön huolto- ja korjaustoiminta	96
6.3	Laitteistojen kriittisyystarkastelu	99
7.	YHTEENVETO HUOLTOTOIMENPITEISTÄ	104

LÄHDELUETTELO

LIITTELUETTELO

LIITTEET

LYHENNELUETTELO

isot latinalaiset

<i>F</i>	vaurio tai vika
<i>C</i>	kondensaattori, kapasitanssi
<i>R</i>	toimintavarmuus, toimintatodennäköisyys, resistanssi
<i>T</i>	lämpötila
<i>U</i>	jännite
<i>V</i>	puolijohdetehokomponentti

pienet latinalaiset

<i>f</i>	vikatiheys
<i>i</i>	virta
<i>t</i>	aika
<i>u</i>	jännite

kreikkalaiset kirjaimet

λ	vikaintensiteetti
-----------	-------------------

alaindeksit

DRM	myötäestojännite, sulkujännite
RRM	estojännite
<i>i</i>	yksikkö, lukumäärä
<i>j</i>	liitos
<i>n</i>	kokonaislukumäärä, nimellinen
<i>p</i>	huippu
rms	tehollisarvo
<i>S</i>	laitteisto

lyhenteet

AC	vaihtovirta
APC	sovellusohjain
DC	tasavirta
DDC	käyttöohjain
di/dt	kriittinen virran nousunopeus, suurin sallittu kytkentähetkellä esiintyvä virran nousunopeus
du/dt	kriittinen jännitteen nousunopeus, suurin sallittu päästösuunnassa esiintyvä jännitteen nousunopeus, jolla tyristori ei siirry myötäesto-tilasta päästötilaan
GTO	hilalta sammutettava tyristori
IGBT	eristetyllä hilalla varustettu bipolaaritransistori
INU	vaihtosuuntaaja
I^2t	rajakuormitusintegraali, suurin sallittu tietyllä aikavälillä ja puoli-johteen lämpötilalla pätevä päästövirran neliön aikaintegraali.
<i>MDT</i>	seisokkiaika
<i>MIT</i>	tyhjäkäyntiaika
<i>MLD</i>	logistinen viiveaika
<i>MMD</i>	kunnossapidon viiveaika
<i>MOD</i>	käytöstä johtuva viiveaika
<i>MOT</i>	tuotantoaika
<i>MPDT</i>	huoltoaika
<i>MRT</i>	vian korjausaika
<i>MTBF</i>	vikaväli
<i>MTTF</i>	vikaantumisaika
<i>MTTM</i>	kunnossapitoaika
<i>MUT</i>	käyttökelpoisuusaika
PK7	Paperikone 7
PL71	Pituusleikkuri 71
PL72	Pituusleikkuri 72

PPK7	Päällystyskone 7
PSK	PSK-standardi
PWM	pulssileveysmodulointi
RH	ilman suhteellinen kosteus
SK71	Superkalanteri 71
SK72	Superkalanteri 72
URK71	Uudelleenrullain 71
VR71	Välirullain 71
VR72	Välirullain 72

1. JOHDANTO

Diplomityön tavoitteena on löytää keinoja paperikoneen tuotantolinjan AC-linjakäyttöjen häiriöiden vähentämiseksi. Työn aihe on saatu Fortek Oy:stä. Työssä kartoitetaan kohteita, jotka vaativat säännöllisiä ennakkohuollollisia mittaus- ja huoltotoimenpiteitä. Lisäksi on pyritty löytämään kohteita, jotka voivat aiheuttaa tulevaisuudessa häiriöitä.

Työn alkuosassa käsitellään yleisesti teollisuuden kunnossapitoon liittyviä asioita ja käsitteistöä sekä kunnossapidon kehittämismenetelmiä. Lisäksi kartoitetaan kunnossapidon toiminnan tehokkuuden tarkastelumenetelmiä. Työn edetessä siirrytään tarkastelemaan prosessisähkölaitteiden kunnonvalvontaa ja käyttövarmuutta sekä sähkö- ja elektroniikkalaitteiden rakenteiden vaikutusta laitteiston toimintavarmuuteen.

Kappaleessa neljä tarkastellaan paperikoneen linjakäyttöä tuotannolliselta näkökannalta ja selvitetään paperi- ja päällystyskoneen ryhmien säätötavat. Tämän jälkeen tarkastellaan säädetävien AC-käyttöjen rakennetta, toimintavarmuutta sekä linjakäytön häiriöiden kehitystä. Häiriöitä tarkastellaan myös vaihtosuuntaaja- ja prosessitoimialuekohtaisesti. Kappaleessa viisi verrataan vuonna 1971 ja 1991 käynnistyneiden tasavirtakäyttöisten paperikoneiden ja vuonna 1997 käynnistyneen AC-linjakäytön seisokkimääriä keskenään.

Työn loppuvaiheessa kartoitetaan huoltokohteet ja pyritään selvittämään kirjallisuuden ja laitevalmistajien tietojen pohjalta yksittäisten laitteiden tai komponenttien käyttöikä- ja vikaintensiteettitietoja. Lisäksi on pyritty kartoittamaan komponenttiin tai laitteistoon liittyviä rasi-
tustekijöitä ja niiden vaikutusta käyttöikänsä. Edellä mainitun lisäksi on selvitetty eri huolto-
toimintoihin liittyviä mittausmenetelmiä ja niiden hyödyllisyyttä kunnossapitotoiminnoissa. Lopuksi ehdotetaan toimenpiteitä linjakäyttöjen ennakkohuoltoon.

2. KUNNOSSAPITO

2.1 Teollisuuden kunnossapito

1980-luvulla teollisuuden kunnossapitotoiminnoissa tapahtui rakenteellisia muutoksia. Hyvin merkittävä määrä aikaisemmin yrityksen itse tuottamista palveluista hankitaan nykyään ulkopuolisilta erikoisosaamista halussaan pitäviltä yrityksiltä. Teollisuuden tuotantotoimintaa harjoittavat yritykset pyrkivät keskittymään ydinosaamiseensa ja hankkivat tarvitsemansa palvelut ulkopuolelta. Laitetoimittajien lisätessä ja kehittäessä omia kunnossapitopalveluita ovat yritykset myös lisänneet hankintoja oman kunnossapito-organisaationsa ulkopuolelta. Tuotantolaitetoimittajat ovat kehittäneet myös huolto-palvelujaan itsenäisiksi liiketoiminnan alueiksi. Lisäksi perustekniikan alueella toimii nykyään paljon myös huolto-, asennus- ja varaosapalveluja tarjoavia yrityksiä. 1990-luvulla on myös teollisuudessa kunnossapitotoimintoja osin ulkoistettu. Yleensä yritys ulkoistamisen yhteydessä yhtiöittää kunnossapitotoimintansa omaksi yrityskokonaisuudeksi ja sen jälkeen myy sen kokonaan tai osittain ulkopuoliselle yritykselle. Lisäulottuvuuksia teollisuuden kunnossapitoon tuo kunnossapidon palvelutuotantoluonne. Palvelutuotannon yleisiä ominaisuuksia ovat:

- tuotanto tapahtuu useimmiten asiakkaan luona eikä tuotetta voi varastoida
- asiakas osallistuu usein tuotantoprosessiin
- markkinointiin osallistuu myös suorittava henkilöstö normaalin toiminnan kautta
- tärkein pääomatekijä on osaaminen
- henkilöstön ohjaus tapahtuu pääasiassa yrityskulttuurin, menetelmien ja osaamisen avulla.

Edellä esitetyt ominaisuudet toteutuvat myös kunnossapidossa. Teollisuuden kunnossapidon palvelutuotteet ovat epähomogeenisia. Palvelutuotannon luonteen ja asiakkaan tarpeiden vuoksi ovat kunnossapitoa tuottavan yrityksen markkinat useimmiten paikallisia. Kunnossapidon suorittamiin palveluihin vaikuttaa ratkaisevasti asiakkaan tuotantoprosessi, kunnossapitokohteen teknologia, seisokkikustannukset ja kunnossapitofilosofia. [1]

2.1.1 Kunnossapidon organisointimallit

Kunnossapito-organisaatiot ovat kunnossapidon merkityksen korostumisen myötä voimakkaan muutoksen tilassa. Kunnossapidon organisoinnissa on käytettävissä erilaisia periaatemalleja:

- keskitetty kunnossapito
- hajautettu kunnossapito
- kunnossapito omana tuloyksikkönä
- kunnossapidon osto alihankintana
- käynnissäpito, pieni oma kunnossapito-osasto
- edellä mainittujen kohtien erilaisia yhdistelmiä.

Keskitetyssä järjestelmämallissa saavutetaan seuraavia teknisiä etuja:

- yhtenäisesti ja helposti siirrettävä työvoimaresurssi
- keskitetty osaaminen, kehittäminen ja koulutus
- erikoisosaamista voidaan käyttää koko yrityksessä
- selkeä johtaminen, seuranta ja tiedonhallinta.

Varjopuolia ilmenee keskitetyssä järjestelmässä vastaavasti seuraavilla alueilla:

- keskitetty organisaatio on jäykkä
- resurssien jako tuottaa ongelmia
- tehottomuus ja hitaus (isot organisaatiot)
- etääntymien yksittäisten osastojen ongelmista. [2]

Hajautetussa järjestelmässä kunnossapito toimii suoraan omana alayksikkönä tuotannon alaisuudessa. Hajautettu järjestelmä antaa palvelua nopeasti ja joustavasti sekä hallitsee oman osastonsa erikoisosaamista vaativat työmenetelmät. Vastaavasti haittapuolina hajautetussa järjestelmässä ilmenee päällekkäisresursointia yritystasolla. Erikoisosaaminen tuo mukanaan osaavien henkilöresurssien haavoittuvuuden sekä kapasiteettien joustavuus on vaikeammin toteuttavissa kuin keskitetyssä järjestelmässä. [2]

Kunnossapidon toimiessa omana tuloyksikkönä pyrkii se toiminnassaan tehokkuuteen ja kustannusten karsintaan. Palvelu- ja asiakassuhde tuo palvelualltiutta toimintaan sekä kilpai-

luttamismahdollisuus ylläpitää kunnossapitotoiminnon halua ja kykyä tehokkaaseen toimintaan. Haittapuolena voidaan todeta, että kunnossapidon kustannusvaikutukset nähdään pelkääjän kunnossapidon tulosityksikön kannalta. [1]

Kunnossapitotoimintojen osto alihankintana tapahtuu useista lähtökohdista. Useimmiten alihankinnalla pyritään tasaamaan kapasiteettihiippuja, hankkimaan erityisosaamista tai pelkääjän standardilaitteiden kunnossapidon ostaminen niihin erikoistuneilta yrityksiltä. Alihankinta voi tulla kysymykseen kunnossapidon yhtiöittämissä yhteydessä, jolloin kunnossapitopalvelut ostetaan uudelta perustettavalta yhtiöltä. Alihankinnan etuja ovat: kunnossapidosta maksetaan vain tarvittaessa, kapasiteettijoukot ovat helppoja toteuttaa ja kilpailuttaminen tuo mahdollisuuden tarkempaan kustannuskontrolliin. Alihankinnan haittapuolia vastaavasti ovat seuraavat asiat: aikaviiveet kiireellisissä ongelmissa, osa tietämyksestä siirtyy yrityksen ulkopuolelle, mahdolliset yhteistyöongelmat ja oman prosessin tuotantolaitteiden huolto-osaamisen heikkeneminen. [2]

Viimeaikaisena trendinä on ollut keskitettyjen kunnossapito-osastojen hajauttaminen tuotantolinjoille. Kunnossapidon ja tuotantohenkilöstön toimintoja on pyritty yhdistämään ja kunnossapidon monitaitoisuutta lisäämään. Oman lisänsä on tuonut tiimimallien soveltaminen kunnossapidon organisointiin. Kunnossapidon organisoinnin kehitysaskeleita voidaan kuvata 1950-luvulta lähtien seuraavasti. Aluksi tuotanto-osastot olivat kunnossapidon kannalta omavaraisia. Seuraava kehityssaskel johti keskitettyyn kunnossapitoon, jonka seurauksena tuottavuus nousi, mutta varjopuolena vastaavasti toiminta jäykistyi. 1990-luvulla kunnossapitoorganisaatioiden kehitys on jatkunut seuraavasti; käynnissäpitoa on hajautettu ja muu kunnossapito on keskitetyssä järjestelmässä. [1], [2]

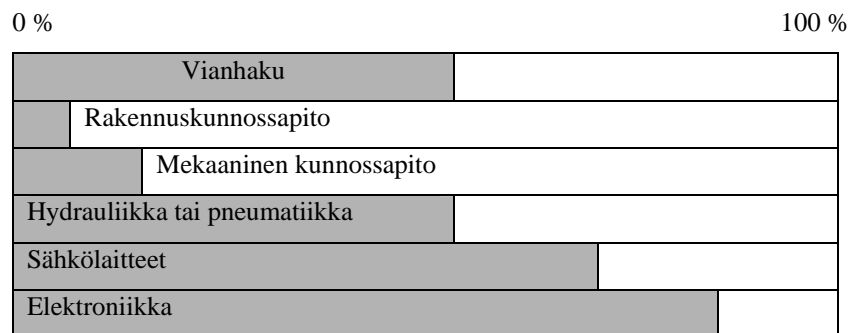
2.1.2 Kunnossapitotekniikat ja vianhaku

Kunnossapito voidaan jakaa tekniikan mukaan seuraavasti:

1. Automaatiokunnossapito
2. Sähkökunnossapito

3. Mekaaninen kunnossapito
4. Rakennuskunnossapito.

Kunnossapitotyön suoritus voidaan jakaa kahteen osaan: vianhakuun ja korjaukseen. Vianhaun ja korjauksen osuudet kokonaistyöajasta vaihtelevat tekniikasta toiseen. Kuvassa 2.1 on merkitty varjostetulla alueella vianhaun osuus kokonaistyöajasta.



Kuva 2.1 Kunnossapidon suhteellinen aikajakauma [1]

Kuvasta 2.1 voidaan havaita, että elektroniikkalaitteiden vianhaku vie suurimman osan korjausajasta, huolimatta laitteiden kehittyvästä itsediagnostiikasta. Toiseksi suurimman osan korjausajasta vie sähkölaitteiden vianhaku ja seuraavana hydrauliiikka ja pneumatiikka. Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden sekä myös hydrauliiikka- ja pneumatiikkalaitteiden vianhaku ja vikatilanteet poikkeavat mekaanisten laitteiden vikatilanteista. Mekaaniset viat ovat useimmin paljastuvia vikoja, mutta vastaavasti hydrauliiikka-, pneumatiikka-, sähkö- ja elektroniikkalaitteiden vianhaussa ammattitaidon ja paikallistuntemuksen merkitys on ratkaiseva. [1]

Ennakoiva kunnossapito vähentää seisokkikustannusten riskiä ja tätä kautta laitteistojen yrittäjäkohtaisuusastetta. Elektroniikan ja sähkölaitteiden (myös automaatio) ennakoiva kunnossapito on vaikeaa ja näin ollen seisokkiriskin alentaminen ennakoivan kunnossapidon avulla on vaikeampaa kuin mekaanisessa kunnossapidossa. [1]

2.1.3 Kunnossapitolajin vaikutus työmotivaatioon

Kunnossapitolajien vaikutuksesta työmotivaatioon löytyy pohjatietoa Kari Komosen väitöskirjasta, jossa tutkimustuloksissa havaittiin sähkökunnossapidon asentajien olevan paremmin motivoituneita kuin mekaanista tai rakennuskunnossapitoa suorittavan henkilöstön. Edellä mainitun lisäksi esimiestoiminta oli helpompaa ja onnistui paremmin sähkökunnossapidossa. Komonen tulkitseekin sähkökunnossapidon toiminnan luonteen olevan itsenäisempää ja vähemmän esimiesohjausta tarvitsevaa kuin mekaanisen kunnossapidon ja työn itsessään luovan myönteistä asennetta ja motivaatiota. [1]

2.1.4 Kunnossapidon merkitys

Kunnossapidon merkitys on kasvanut ratkaisevasti 1980-luvulta lähtien. Pakollisesta kustannuksesta on tullut tuottavuustekijä ja kilpailuedun luoja. Kunnossapidon merkityksen kasvuun löytyy seuraavia syitä:

1. Tuotantolaitosten yksikkökoon kasvaessa ovat myös pääomakustannukset kasvaneet. Tuotantolaitteiden toimimattomuudesta johtuvan menetety tuotannon korvaaminen myöhemmin on usein hyvinkin hankalaa. Lisäkapasiteetin hankkiminen kunnossapidon avulla tuotantolaitteiston käytettävyyttä lisäämällä on useimmiten edullisempaan kuin investoiminen uusiin laitteisiin.
2. Laitteistojen automaatioaste on kasvanut. Automatisoidut prosessit kasvattavat pääomakustannuksia. Prosessiautomaation seurauksena tuotantolaitteistot monipuolistuvat ja sisältävät myös enemmän toimilaitteita, jotka voivat pysäyttää koko tuotantolinjan. Edellä esitetyn perusteella kunnossapidon laatu on tuottavuuden ja tuotannon laadun-tuottokyvyn oleellisia tekijöitä.
3. Suorat kunnossapidon kustannukset ovat lisääntyneet automaatioasteen kohoamisen ja suurempien pääomakustannusten myötä. Kunnossapidon osuus yrityksen kokonais-kustannuksista kasvaa ja tämän myötä kunnossapidon tehokkuuden merkitys kasvaa.

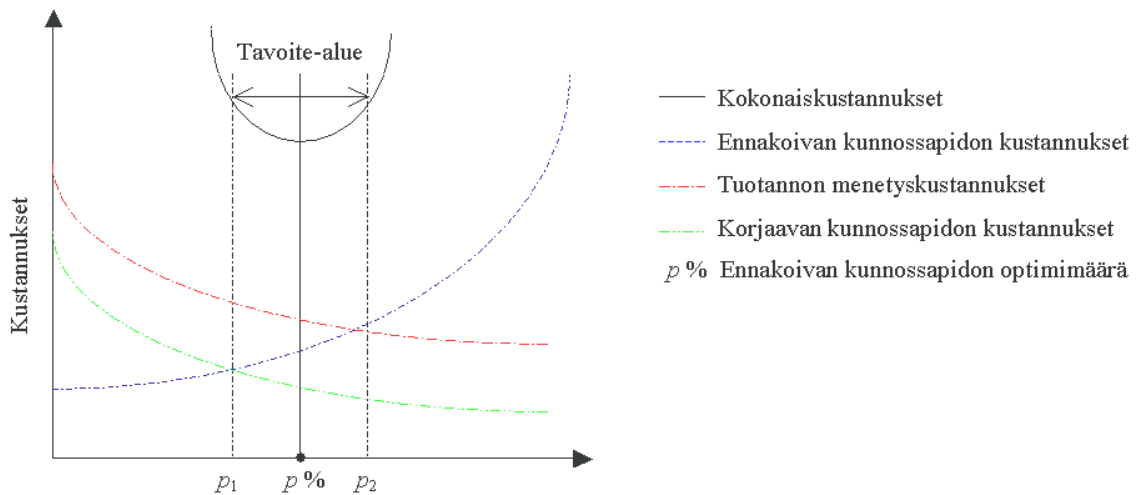
4. Toimitusvarmuutta ei ole järkevä varmistaa varastojen avulla. Paine alentaa varastoihin sitoutuneen pääoman kustannuksia kasvattaa tuotantolaitteiden toimivuuden merkitystä.
5. Tuotantolaitteiden koon kasvun ja lisääntyneiden komponenttien määrän myötä lisääntyy varaosiin sitoutunut pääoma. Varaosatoimintojen järjeistäminen lisää myös yrityksen kannattavuutta. [1]

2.2 Kunnossapitoon liittyvät käsitteet ja määritelmät

Prosessiteollisuuden standardoimiskeskuksen standardissa PSK 6201 EHD määrittellään kunnossapito toimenpiteiksi, joilla todetaan kohteen toimintakunto, pidetään kohde halutussa toimintakunnossa tai saatetaan se haluttuun toimintakuntoon. Standardissa kunnossapitoon on sisällytetty kunnonvalvonta, huolto ja korjaus. Kunnossapitoon kuuluu myös johtaminen, tiedonhallinta, toteutus ja tarkastus. Standardin mukaan kunnonvalvonnalla määrittellään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan sen kehittyminen mahdollisen vikaantumis-, huolto- ja korjausajankohdan määrittämiseksi. Vastaavasti huolto kuvataan toiminnaksi, jolla pidetään yllä kohteen käyttöominaisuuksia tai palautetaan heikentynyt toimintakyky ennen vian syntymistä tai estetään vian syntyminen. Standardi määrittelee huollon ja ennakkohuollon yhdenmukaisiksi toimenpiteiksi. PSK 6201 -standardin mukaan korjauksella palautetaan vikaantunut kohde toimintakuntoon ja käyttöturvallisuudeltaan alkuperäiseen tilaansa. [3]

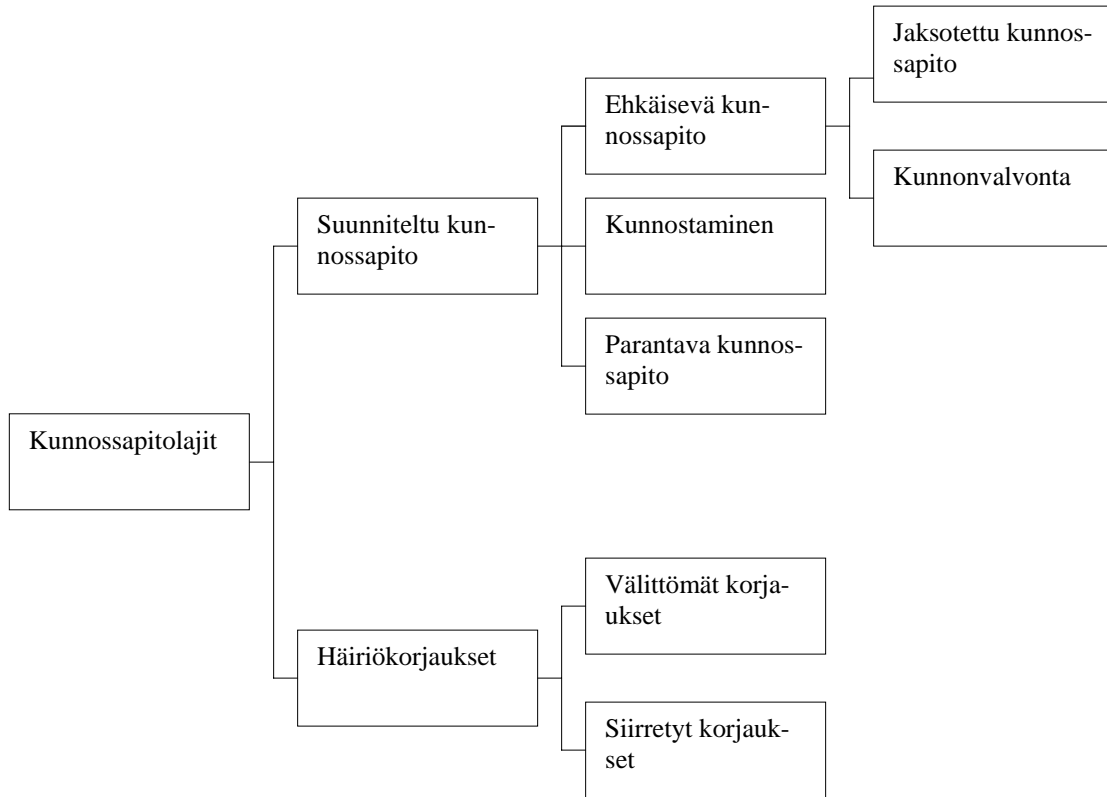
Tarkasteltaessa kunnossapidon käsitteitä havaitaan, että kunnossapitotoiminta on perinteisesti jaettu kolmeen eri osa-alueeseen: Korjaavaan kunnossapitoon, ennakoivaan kunnossapitoon sekä parantavaan kunnossapitoon. Ennakoivaan kunnossapitoon luetaan määräaikaishuollot, kunnossapito-ohjeiden mukaiset osien vaihdot sekä havaittujen tulossa olevien vikojen korjaaminen ennen lopullista vikaantumista. Ennakoivan kunnossapidon avulla voidaan alentaa seisokkikustannuksia ja kunnossapidon kustannuksia. Ennakoivassa kunnossapidossa huolto- toimet ajoitetaan luonnollisiin seisokkeihin aina mahdollisuuksien mukaan. Ennakoivan kun-

nossapidon ensimmäinen aste on määräaikaishuolto. Seuraavalla tasolla on tarkastustoimintaa ja kunnonvalvontaa. Lisättäessä ennakoivaa kunnossapitoa seisokkien ja kunnossapidon kokonaiskustannukset ensi alkuun pienenevät ja alkavat sitten nousta, koska lisääntyvä ennakoiva kunnossapito tarvitsee myös lisää huolto-aikaa ja lopulta laitteiden vaatima seisonta-aika on suurempi kuin ennakoivan kunnossapidon avulla saavutettu seisokkiaikojen lyhentyminen. Asiaa selkeyttää kuva 2.2.



Kuva 2.2 Ennakoivan kunnossapidon vaikutus kustannuksiin

Parantavaan kunnossapitoon sisällytetään investointiluonteiset hankkeet, jotka edistävät laitteistojen toimintavarmuutta ja huollettavuutta. Käytännössä kunnossapidon määrittelyissä on poikkeavuuksia. Jorma Järviön toimittamassa artikkelissa (Kunnossapito 5/98) määritellään kunnossapitotyypit hieman uudella tavalla. Ennakoiva kunnossapito on määritelty toiminnaksi, jossa mittaamalla tai arvioimalla selvitetään laitteen vikaantumisasaste. Ehkäisevä kunnossapito on määritelty toiminnaksi, jossa suoritetaan toimenpiteitä tarkan aikataulun mukaan tarkoituksena poistaa mahdollinen alkava vikaantuminen ennen kuin laite lopullisesti pysähtyy vian vuoksi. Korjaava kunnossapito on vastaavasti vian korjaamista, kun vikaantuminen on havaittu tai laite on pysähtynyt. Edellä mainittuihin kunnossapitotoimiin lisätään artikkelissa vielä tutkiva kunnossapito, joka on laitteiden asianmukaisen toiminnan tarkastamista ja selvittämistä. [1], [4]

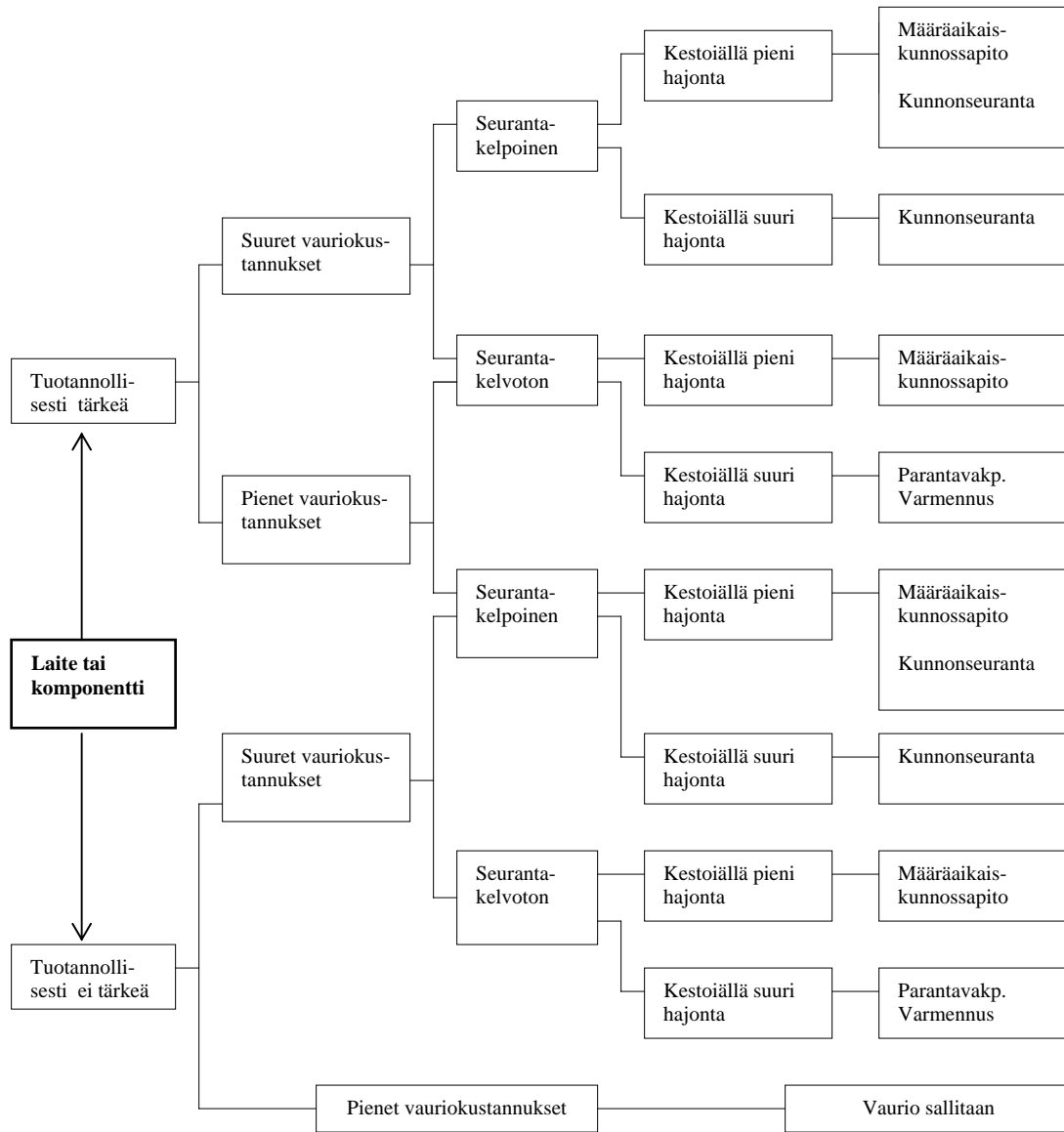


Kuva 2.3 Standardin PSK 7501 mukaiset kunnossapitolajit

Standardissa PSK 7501 jaetaan kunnossapitolajit kuvan 2.3 mukaan suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriökorjauksiin, joiden alta löytyvät edellä mainitut toiminnot lukuun ottamatta ns. tutkivaa kunnossapitoa ellei sitä sisällytetä kunnonvalvonnan toimiin.

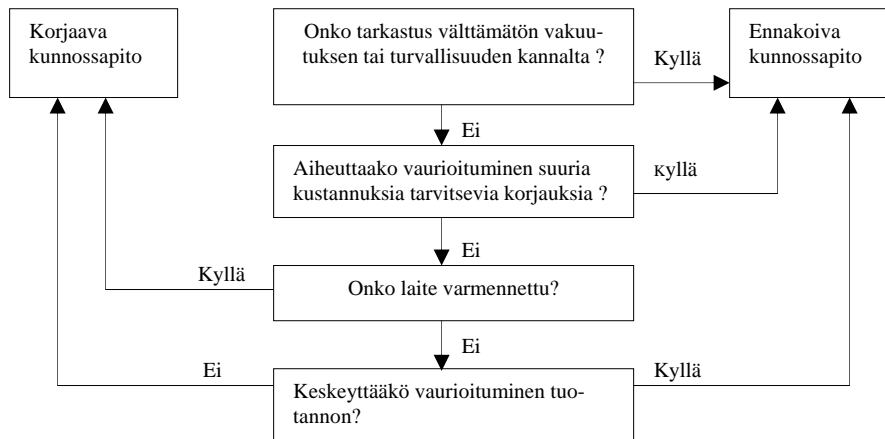
2.3 Kunnossapitostrategian valinta

Kunnossapitostrategian valintaan vaikuttavat taloudelliset, tuotannolliset ja tekniset näkökulmat. Ehkäisevän ja korjaavan kunnossapidon taloudellisen optimoinnin lisäksi kunnossapitostrategian valintaan voidaan käyttää kuvan 2.4 mukaista valintakaaviota. [2]



Kuva 2.4 Kunnossapitostrategian valintakaavio

Lisäksi on mahdollista käyttää hyväksi kuvan 2.5 mukaista arviointikaaviota selvittäessä kunnossapidon työperiaatteita. [2]



Kuva 2.5 Kunnossapitoperiaatteen arviointikaavio

Laitteiden tai komponenttien kunnossapitostrategian valinnan tueksi voidaan käyttää myös taulukon 2.1 kriittisyysluokittelua. Komponentit luokitellaan koko järjestelmän, ei vain yksittäisen laitteen, kannalta. Tällä on merkitystä, mikäli laitteisto on varmennettu toimintoiltaan. Varmennettu toiminta vaikuttaa laitteen kriittisyysluokkaan. [32]

Taulukko 2.1 Komponenttien kriittisyysluokittelu vaurioseurauksien mukaan [32]

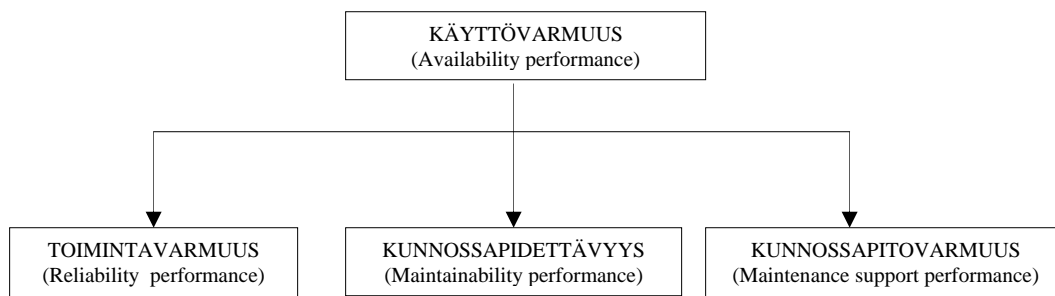
Kriittisyysluokka	Vaurioseuraus
1	Aiheuttaa ihmisen kuoleman
2	Saattaa aiheuttaa vakavaa vaaraa ihmisille ja ympäristölle
3	Pysäyttää prosessin aiheuttaen taloudellisia menetyksiä
4	Komponentti kallis tai sen vaihto tai korjaus hankalaa ja siksi kallista
5	Pysäyttää tehokkaan laitteen, joka joudutaan korvaamaan heikommalla, mikä aiheuttaa taloudellisia menetyksiä
6	Heikentää tuotteen laatua tai saantoa, mutta ei pysäytä tuotantoa
7	Ei välittömästi vaikuta tuotantoon tai turvallisuuteen

2.4 Käyttövarmuus ja käyttövarmuustiedon kokoamiseen liittyvät ongelmat

Kunnossapidon kehittämisessä on käyttövarmuuden analysointi varsin tehokas työkalu. Sen avulla päästään käsiksi kohteisiin, jotka tarvitsevat parantamista ja kehittämistä. Edellä mainitun vuoksi perinteisen kunnossapidon tekninen painopiste on käyttövarmuuden toteuttamisessa. Käyttövarmuus on teknisen laitteen tai järjestelmän kyky suorittaa vaadittu toiminto ilman häiriöitä ja käyttökeskeytyksiä. Käyttövarmuuteen vaikuttavat laitteiden toimintavarmuus, kunnossapidettävyyden sekä kunnossapitovarmuus, kuva 2.6. Toimintavarmuus on kohteen kyky suorittaa vaadittu toiminto määräoloissa vaaditun ajan. Toimintavarmuus riippuu kohteen rakenteesta, varakapasiteetista, huollosta ja käyttöhenkilöstöstä. Standardi PSK 6201 EHD määrittelee kunnossapidettävyyden ja kunnossapitovarmuuden seuraavasti:

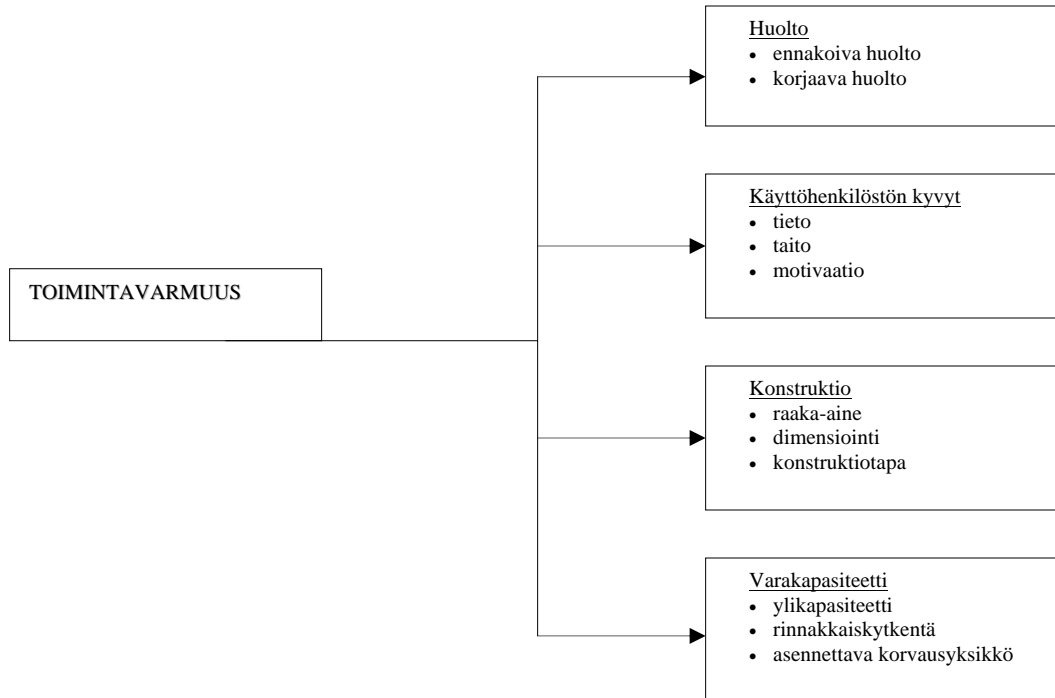
- kunnossapidettävyyden on kohteen ominaisuus pysyä toimintakunnossa tai olla palautettavissa toimintakuntoon määritellyissä olosuhteissa määrääjän.
- kunnossapitovarmuus kuvaa kohteen ominaisuutta ja kunnossapito-organisaation kykyä suorittaa vaadittu toiminto tietyssä oloissa vaaditulla ajanhetkellä tai ajanjaksona.

Käyttövarmuutta ja sen eri osa-alueita selventää seuraava kaavio. [2], [5], [6]

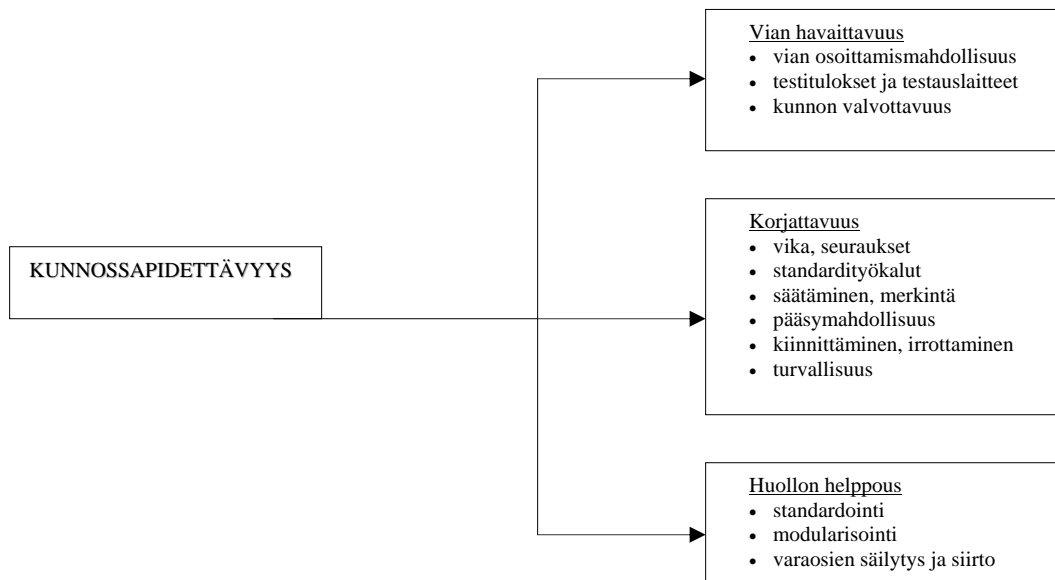


Kuva 2.6 Käyttövarmuus ja sen eri osa-alueet

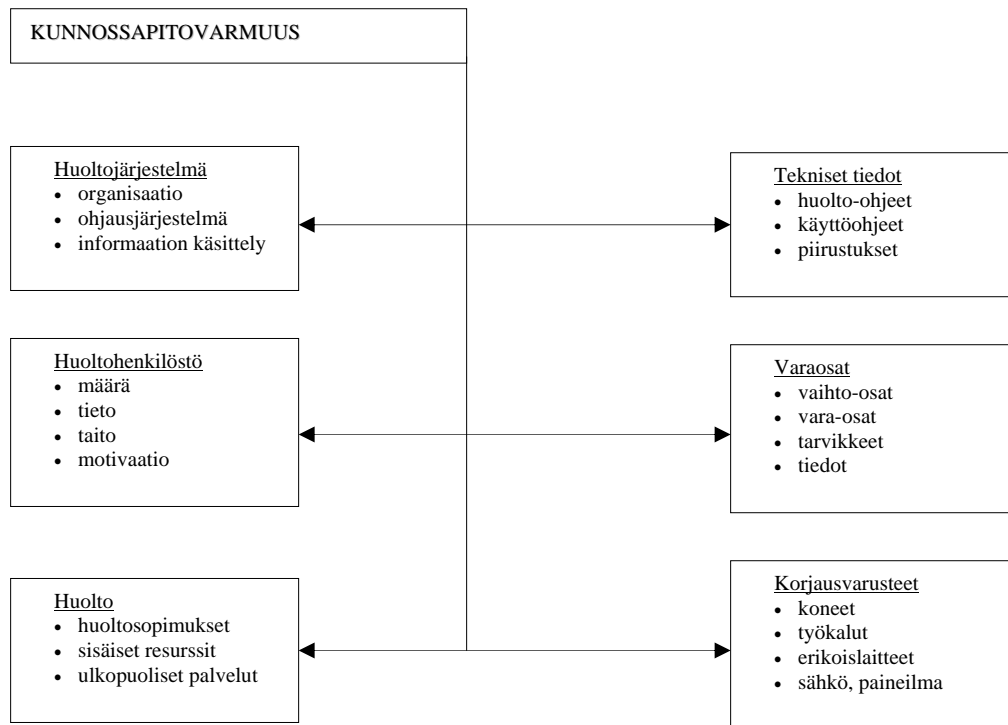
Toimintavarmuutta, kunnossapidettävyyttä ja kunnossapitovarmuutta selventävät kuvat 2.7, 2.8 ja 2.9. [6], [23]



Kuva 2.7 Toimintavarmuus



Kuva 2.8 Kunnossapidettävyys



Kuva 2.9 Kunnossapitovarmuus

Toimintavarmuus

Toimintavarmuuden mittareita ovat vikaintensiteetti, toimintatodennäköisyys ja keskimääräinen vikaantumisaika *MTTF* (Mean Time To Failure). Vikataajuus eli vikaintensiteetti $\lambda(t)$ on vikojen lukumäärän odotusarvo aikayksikössä tietyllä hetkellä. Vikakertymä $F(t)$ on vikaantumisaajan todennäköisyysjakauman kertymäfunktio. Vikakertymä määritellään seuraavasti:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (2.1)$$

jossa $f(t)$ on vikatiheysfunktio.

Toimintavarmuus $R(t)$ on todennäköisyys, että laite toimii vaaditun ajan vioittumatta tietyissä olosuhteissa.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt. \quad (2.2)$$

Vaihtoehtoisesti toimintavarmuuden funktio voidaan määrittää myös

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt, \quad (2.3)$$

tai

$$R(t) = e^{-\int_t^{\infty} \lambda(t)dt}, \quad (2.4)$$

jossa $\lambda(t)$ on vikaintensiteetti.

Vikaintensiteetti johdetaan seuraavasta yhtälöstä

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (2.5)$$

keskimääräinen vikaantumisaika *MTTF* voidaan määrittää seuraavasti [26]:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt. \quad (2.6)$$

Kunnossapidettävyys

Kunnossapidettävyydellä voidaan joskus tehostaa kunnossapitoa ja siten lyhentää kunnossapitoaikoja. Kunnossapidettävyyden mittarina käytetään kunnossapitoon kuuluvaa keskimääräistä aikaa *MTTM* (Mean Time To Maintain). Kunnossapitoaikaan sisältyy keskimääräinen vian korjausaika *MRT* (Mean Repair Time) sekä pysäytyksen vaatima keskimääräinen huolto-aika *MPDT* (Mean Preventive Down Time).

$$MTTM = MRT + MPDT \quad (2.7)$$

Kunnossapitovarmuus

Kunnossapitovarmuus on kunnossapitoresursseihin liittyvä laatuominaisuus, joka saavutetaan jakamalla investoinnit järkevästi eri resurssilajeille. Resurssien jaolla päästään sopivaan organisaatioon ja ostosopimuskäytäntöön. Kunnossapitovarmuuden mittarina käytetään keskimääräistä odotusaikaa ennen kunnossapitotoimia *MMD* (Mean Maintenance Delay). Kunnossapitovarmuus on riippuvainen seuraavista tekijöistä:

- kunnossapitotöiden suunnittelu ja esivalmistelu
- töiden tilausjärjestelmät ja rutiinit
- varaosien ja erikoistyökalujen saatavuus
- koulutus
- työssä tarvittavien dokumenttien saatavuus.

Näistä aiheutuva viiveaika on nimeltään logistinen viiveaika *MLD* (Mean Logistic Delay). Odotusaikaan vaikuttaa lisäksi tuotantoprosessin pysäyttämisestä ja käynnistymisestä aiheutuva tuotannon viiveaika *MOD* (Mean Operational Delay). [6]

$$MMD = MLD + MOD \quad (2.8)$$

Keskimääräinen seisokkiaika *MDT* (Mean Down Time) saadaan laskemalla yhteen odotusaika ja kunnossapitoaika eli [6]

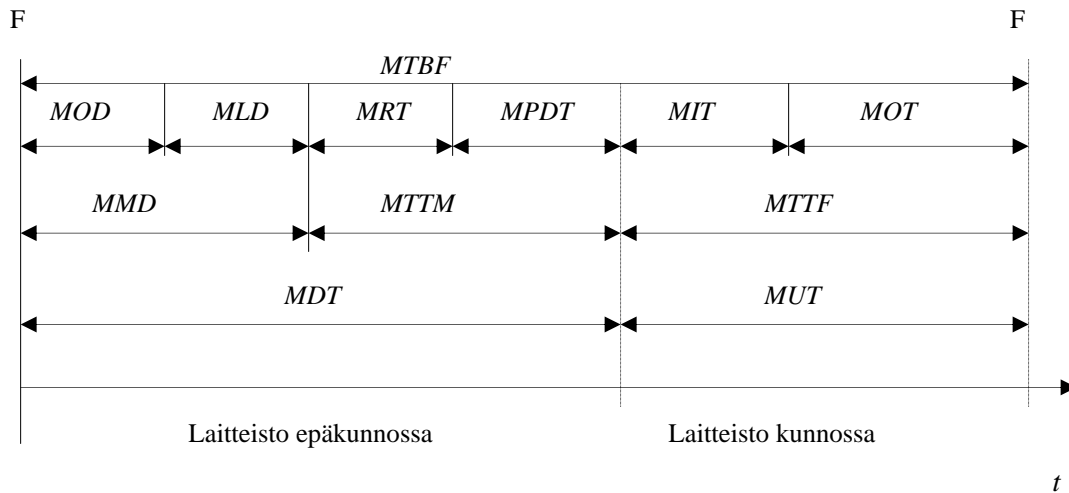
$$MDT = MMD + MTTM \quad (2.9)$$

Keskimääräinen vikaväli *MTBF* on vikavälin odotusarvo, joka on käyttökelpoisuusajan *MUT* ja seisokkiajan *MDT* summa [6]

$$MTBF = MUT + MDT \quad (2.10)$$

Aikakäsitteet

Kuvassa 2.10 on esimerkki aikamäärittelyistä. Aikamäärittelyistä valitaan sopivimmat tapauskohtaisesti, ottaen huomioon määrittelyiden tilastollinen luonne. [3], [6]



Kuva 2.10 Aikamäärittelykaavio [3], [6]

Kuvassa 2.10 käytetyistä lyhenteiden määrittelyistä on jätetty pois sana (mean) keskimääräinen.

F vaurio tai vika

MTBF vikaväli

MOD käytöstä johtuva viiveaika

MLD logistinen viiveaika

MRT vian korjausaika

MTTM kunnossapitoaika

MIT tyhjäkäyntiaika

MOT tuotantoaika

MMD kunnossapidon viiveaika

MPDT huoltoaika

MTTF vikaantumisaika

MDT seisokkiaika

MUT käyttökelpoisuusaika

Käyttövarmuustietojen kokoaminen

Paperi- ja sellutehtaiden tietojärjestelmistä saatava tieto on usein vähäistä ja puutteellista. Luotettavien analyysien tai laitosten toiminnan kehittäminen tämän tiedon pohjalta on työlästä ja siksi tietoja ei voida hyödyntää tehokkaasti. Tilanne on tulevaisuudessa kohentumassa, koska paperi- ja sellutehtaissa siirrytään Windows-pohjaisiin kunnossapidon tietojärjestelmiin. Pelkästään uuteen tietojärjestelmään siirtyminen ei kuitenkaan ratkaise tiedonkeruun ongelmia, vaan on oltava laajaa yhteisymmärrystä tiedonkeruun merkityksestä ja sen tarpeellisuudesta. [5]

Laitoksissa käyttövarmuustieto on usein hyvin hajanaisessa muodossa ja vain murto-osa tiedoista tallentuu. Hajanaisen tiedon analysointi on vaikeaa ja usein jopa kannattamatonta. Pääasiassa eri prosesseista kertyviä vika- ja häiriötietoja on saatavissa seuraavista lähteistä:

- käyttöraportit
- vuoromestareiden raportit
- valvomohenkilökunnan vikakirjat
- kunnossapidon tietojärjestelmät
- käyttötilastot
- ennakkohuollon raportit
- tuotannonhallintajärjestelmät.

Tavoitteena tulisi olla eri tietojärjestelmistä saatavien tietojen ja toimenpiteiden yhdistäminen siten, että kirjattujen toimenpiteiden avulla voidaan seurata laitteiden käytettävyyden kehitystä ja ohjata laitoksen kunnossapitoa. Pitkäkestoiset ja ongelmalliset häiriöt kirjataan ja analysoidaan tarkasti, mutta tietoa voi joutua hakemaan useista edellä mainituista dokumenteista ja tietolähteistä. Arkipäiväiset ja rutiininomaiset korjaustoimenpiteet eivät välttämättä kirjaudu ylös mihinkään edellä mainittuihin dokumentteihin vaan osa korjauspyynnöistä tehdään pelkästään suullisina esityksinä suoraan kunnossapidon esimiehille. [5]

Käyttövarmuuden tunnuslukujen laskennan kannalta ovat suurimpia kirjauskäytännön puutteita seuraavat asiat:

- seisokki- ja korjausaikatiedot puuttuvat
- kaikkia vikoja ei kirjata

- vikakirjauksia ei kohdisteta korjattavalle laitteelle
- vikojen luokittelu on puutteellinen tai puuttuu kokonaan
- vikojen vaikutusta prosessin toimintaan ei kirjata
- kunnossapidon tietojärjestelmät ja tuotannonohjausjärjestelmät eivät linkity keskenään esim. aikatietojen osalta.

Käyttövarmuuden kehittämiseksi tulisi vikahistoriaan kirjata vähintään seuraavat tiedot:

- laitepositio
- vian kuvaus
- korjauksen alkamis- ja päätty-misajankohta
- vian oire, vaikutukset, havaitsemis-tapa ja ajankohta
- ympäristöolosuhteet vikaantumis-hetkellä
- tehdyt toimenpiteet vian korjaami-seksi
- vian oletettu syy ja vikaryhmä

Vika- ja korjaustietojen lisäksi kunnossapidon historiatiedoiksi pitää lukea myös ennakoivan kunnossapidon toimet. Kunnossapidon historiatieto muodostuu kahdesta pääalueesta: vika- ja korjaushistoriasta sekä ennakoivan kunnossapidon historiasta. Haluttaessa optimoida ja tehostaa ennakoivan kunnossapidon toimenpiteitä on tunnettava kohteen historiatiedot. [5]

Laitteistojen historiatietojen keruussa voidaan käyttää hyväksi erilaisia automaattisen tiedonkeruun mahdollisuuksia. Olemassa olevia prosessiautomaatiojärjestelmiä voidaan käyttää mahdollisuuksien mukaan hyväksi, koska mahdolliset tarvittavat anturoinnit ovat jo valmiina, mutta sovellukset joudutaan kuitenkin ohjelmoimaan järjestelmään aina tapauskohtaisesti. Keskitetty vikatietojen keruu ja analysointi antavat myös mahdollisuuden laitetoimittajan ja tehtaiden väliseen yhteistyöhön, jonka avulla voidaan tehtaiden järjestelmiä ja toimintatapoja kehittää. Laitetoimittaja pystyy keskitetyn vikatietopankin kautta tarjoamaan eri tehtaille benchmarking- analyyseja laitteiden toimivuudesta ja kunnossapidon tehokkuudesta, mikäli eri tehtaiden vikatiedot kirjataan, kohdistetaan ja luokitellaan mahdollisimman standardoidulla menetelmätavoilla ja järjestelmillä. [5]

2.5 Kunnossapitotoiminnan mittaaminen, laitoksen toimintavarmuuden ja käytettävyyden parantaminen

Kunnossapidon toimintaa voidaan tarkastella joko kunnossapidon toiminnallisen tehokkuuden tai kustannustehokkuuden näkökulmasta. Kunnossapidon toiminnallista tehokkuutta tarkasteltaessa yleisimmin käytetyt tunnusluvut ovat:

1. Miten usein laitteisto rikkoontuu. Mittarina voidaan käyttää vikaväliä (*MTBF*)
2. Vikaantumisaika (*MTTF*)
3. Miten pitkään laitteisto on pois käytöstä vikatilanteessa (*MDT*)
4. Miten todennäköisesti laitteisto vikaantuu seuraavan ajanjakson aikana
5. Laitteiston tehokkuus.

Kunnossapidon kustannustehokkuuden tunnusluvut ovat vastaavasti:

1. Suorat kunnossapitokustannukset
2. Työvoimakustannukset
3. Materiaali- ja varaosakustannukset
4. Suunnittelu- ja valvontakustannukset.

Laitoksen toimintavarmuuden ja käytettävyyden paraneminen näkyy vikataajuuden pienene-
misenä ja vakavien odottamattomien vikojen vähenemisenä. Toimintavarmuutta ja käytettä-
vyyttä voidaan parantaa seuraavilla toimintamenetelmillä:

- systemaattisella vika-analyysillä
- mahdollisten vikakohteiden paikallistamisella ennen niiden muuttumista toiminnalli-
siksi häiriöiksi
- vikatietojen hyväksikäyttö vianhaussa, mistä on seurauksena vian paikallistamisen no-
peutumisen ja laitteiston korjausajan lyheneminen
- laitteiston tarpeen mukainen kunnossapito vähentää kunnossapitotöiden kokonaismää-
rää

- käyttökohteille valittava kunnossapitostrategia. Strategian avulla voidaan vähentää kunnossapidon työmäärää ja sen kautta päästää lyhyempiin seisokkiaikoihin
- seisokkiaikaisten töiden vähentyessä myös ylösajon ongelmat vähenevät. Ylösajon ongelmien vähentyminen on seurausta huollon laitteistolle aiheuttamien häiriötekijöiden vähenemisestä
- laitteiston ylimääräisten komponenttien poistaminen, joilla ei ole ratkaisevaa merkitystä toiminnalle, mutta aiheuttavat vikaantuessaan epäkäytettävyyttä
- vika-analysien ja henkilöstön asiantuntemusta hyödyntämällä on mahdollista tunnistaa ja poistaa krooniset laitteistohäiriöt. [7], [24]

3. PROSESSISÄHKÖLAITTEIDEN KUNNOSSAPITO

Sähkölaitteiden vikaantumisprosessi alkaa heti, kun sähkölaitteisto on asennettu ja otettu käyttöön. Vikaantumisprosessi voi johtaa sähköiseen vaurioitumiseen tai toimintahäiriöihin, mikäli laitteistoja ei tarkasteta. Lisäksi kuormat muuttuvat tai sähkölaitteiden ja virtapiirien muutokset, jotka ovat tehty ilman tarkempaa yleistä suunnittelua, voivat johtaa sopimattomiin tai väärin komponentteihin, suojausyksiköihin tai suojauslaitteistojen asetuksiin laitekokonaisuuksissa. Sähkölaitteiden ennaltaehkäisevällä kunnossapidolla ja testauksella on tarkoitus tunnistaa edellä mainitut vikaantumistekijät ja luoda keinot niiden korjaamiselle. Ehkäisevällä sähkölaitteiden kunnossapidolla ja testausohjelmalla voidaan mahdolliset piilevät häiriötekijät havaita ja korjata, ennen kuin ne johtavat sähkölaitteiden vikaantumiseen tai vaurioon. Lisäksi sähkölaitteistojen asianmukaisella hyvin organisoidulla ja toimivalla kunnossapito-ohjelmalla voidaan pienentää vaurioiden kestoaikaa, vähentää suurien pitkäkestoisten vaurioiden syntymistä, suunnittelemattomia seisokkeja ja pidentää sähkölaitteiden vikavälejä. [8]

Sähkölaitteistojen ennaltaehkäisevällä ja tutkivalla kunnossapidolla saavutetaan suoria ja epäsuoria etuja. Välittömät vaikutukset pitävät sisällään vähenevät korjauskustannukset, pienemmät laitteistojen seisokkiajat ja näkyvät parantuvana työturvallisuutena. Epäsuorat vaikutukset näkyvät työmoraaalin parantumisena, ammattitaidon kehittymisenä, kasvavana tuottavuutena ja laitoksesta löydettävistä puutteista, jotka vaativat korjaustoimenpiteitä. [8]

3.1 Sähkölaitteiden tutkiva ja ennaltaehkäisevä kunnossapito

Suurin osa tehokkaan sähkölaitteistojen ennaltaehkäisevän kunnossapidon asiasisällöstä voidaan sisällyttää neljään seuraavaan perussääntöön:

- pidä sähkölaitteistot kuivana
- pidä laitteistot tiiviinä
- pidä laitteistot viileinä
- pidä laitteistot puhtaina

Tutkittaessa tarkemmin sähköisiä ohjaus- ja tehonsyöttölaitteistoja havaitaan niiden olevan hyvin herkkiä suhteellisen pienille häiriömekanismeille. Sähkölaitteistojen ennaltaehkäisevän ja tutkivan kunnossapidon tarkoituksena on estää, hidastaa tai vähentää häiriöitä. Sähkö- ja automaatiokunnossapidon kunnossapitostrategian valintaan vaikuttavat toimialakohtaiset ja yritysmaatkohtaiset tekijät. Useilla toimialoilla asetetaan käyttövarmuustavoitteet mahdollisten häiriöiden aiheuttamien vahinkoriskien perusteella, kun käyttöhäiriöistä voi olla seurauksena suuria henkilö-, ympäristö- tai taloudellisia vahinkoja. Toisaalta tietyillä toimialoilla on myös lakisääteisiä velvoitteita, jotka pakottavat alalla toimivat yritykset tietyn tasoiseen kunnossapitotoimintaan. Sähkölaitteiden ennaltaehkäisevä kunnossapitofilosofia voidaan jakaa neljään osa-alueeseen [6], [8]:

1. Passiivinen kunnossapito ("Run to Failure").
2. Tarkasta ja tutki vain välttämätön
3. Jaksotettu ennaltaehkäisevä kunnossapito
4. Käyttövarmuuteen perustuva kunnossapito.

Passiivisessa kunnossapidossa heikentynyt laite vaihdetaan ainoastaan silloin, kun toimintojen vaikutus prosessiin on tullut kestäväksi. Suurimmalla osalla sähkö- ja automaatiolaitteita tämä merkitsee laitteistojen täydellistä rikkoutumista. Käytössä ei ole tarkkaa valvontaohjelmaa vikojen ja ongelmien välttämiseksi ja riskit laitteistojen vaurioille ja vikaantumisille hyväksytään. Pienet organisaatiot, joilla ei ole omaa erillistä kunnossapito-organisaatiota, soveltavat useasti passiivisen kunnossapidon toimintamallia, mutta myös suuremmat ja kehittyneemmät kunnossapito-organisaatiot soveltavat myös ajoittain edellä mainittua toimintamallia ei kriittisille prosesseille ja laitteille. [8]

"Tarkasta ja tutki vain välttämätön" toimintamallissa laitoksen henkilökunta tai kunnossapidonhenkilöstö suorittavat huoltokierroksiaan enemmän tai vähemmän säännöllisesti. Tällä toimintamallilla useimmiten pystytään ehkäisemään alkuasteella olevat häiriöt ennen kuin ne kehittyvät todelliseksi vioiksi varsinkin silloin, kun vian jälkivaikutuksia ei hyväksytä. Tulevien häiriöiden ehkäisemiseksi on käytössä yleensä yksinkertainen valvontaohjelma. Monet teollisuuden tuotantolaitokset soveltavat tätä toimintamallia ja pitävät sitä tyydyttävänä. [8]

Jaksotetussa ennaltaehkäisevässä kunnossapitomallissa toiminnot perustuvat kiinteisiin ajanjaksoihin, käyttöaikaan tai toimintasykleihin. Toimintamallissa ohjelmat useimmiten perustuvat laitevalmistajan suosituksiin tai teollisuuden standardeihin. Toimintamallissa laitteistot saavat huomiota tietyllä periodilla, jolloin ei ole tarvetta priorisoida laitteistojen ennaltaehkäisevää ja tutkivaa kunnossapitoa. Tällöin ei ole tarvetta optimoida rajoittuneita kunnossapitoresursseja tai ottaa huomioon, mitä käyttökokemustietoja laitteistoista on kertynyt ajan myötä. Tätä toimintamallia käytetään sellaisissa prosesseissa, missä tuotanto ja turvallisuus ovat etusijalla.

Käyttövarmuuteen perustuva toimintamalli on kaikkein kustannustehokkain, koska se parantaa laitoksen turvallisuutta, toimintavarmuutta ja käytettävyyttä. Käyttövarmuuteen perustuvassa kunnossapitomenetelmässä vähennetään kunnossapitokustannuksia keskittämällä kunnossapitotoimintaa niihin kohteisiin, mitkä ovat tärkeimpiä ja ongelmallisimpia. Käyttövarmuuteen perustuvassa mallissa vähennetään kunnossapitotoimintaa vähemmän tärkeistä kohteista ja laitteistoista, joilla on hyvin korkea toimintavarmuus. Käyttövarmuuteen perustuvaan malliin kuuluu laitteistojen ennaltaehkäisevän toiminnan kehittäminen, kuten vikojen alkuperäisyyden analysointi, korjauksien ja laitteistojen siirtämisen tarvittaessa jatkuvan kunnonvalvonnan piiriin. [8]

Sähkölaitteiden tutkivan ja ennaltaehkäisevän kunnossapito-ohjelman sisältö

Sähkölaitteiden tutkivaan ja ennaltaehkäisevään kunnossapito-ohjelmaan pitäisi sisällyttää ainakin seuraavat toiminnot [8]:

1. *Sähkölaitteiden ennakkohuolto ja testaus.* Toiminta pitää sisällään erilaisia jaksottaisia varmistustoimenpiteitä, kuten silmämääräisiä tarkastuksia, laitteiden puhdistamista, säätöjen ja asetuksien tarkastamista ja laitteiden toimivuuden varmistamista. Toimintaan kuuluu myös osien vaihtoa ja laitteiden testausta, jotta välttyttäisiin odottamattomilta seisokeilta.

2. *Korjaus.* Peruslähtökohta kunnossapito-ohjelmassa on pyrkiä välttämään odottamattomia seisokkeja, mutta kun laite yllättäen rikkoontuu tulisi sähkö- ja automaatiokunnossapitohenkilöstöllä olla tarvittavat vara-osat käytettävissä ja lisäksi henkilöstön tulisi olla riittävän ammattitaitoista ja harjaantunutta pystyäkseen suorittamaan korjaukset ripeästi ja asianmukaisesti.
3. *Vika-analyysit.* Sähkölaitteiden häiriöt tulee aina analysoida, jotta välttyttäisiin vastaavanlaisilta häiriöiltä tulevaisuudessa. Mikäli selvää syytä rikkoontumiselle ei löydetä, tulee kyseenalaistaa laitteiston tai osien laatu.
4. *Huolto- ja mittaustoimintojen seuranta.* Järjestelmällinen kunnossapitotoimintojen ja mittaustuloksien seuranta mahdollistaa kunnossapidon henkilöstölle laitteistojen tarkemman seurannan ja oikeat työmenetelmät häiriöiden ehkäisyyn.

3.2 Sähkölaitteistojen kunnonvalvontamenetelmät

Kunnonvalvonnan menetelmät voidaan jakaa subjektiivisiin (aistihavainnot) ja objektiivisiin (mittaukset) menetelmiin. Kunnonvalvontaan liittyvät mittaukset voivat koskea hyvin monenlaisia suureita; kuten painetta, lämpötilaa, värähtelyjä ja tietenkin sähköisiä suureita. [9]

Kunnonvalvontamittaukset ovat joko tietyn aikavälin tai muun säännön perusteella tehtäviä mittauksia tai jatkuvatoimisia mittauksia. Jatkuvatoimiset mittaukset tulevat yleensä kyseeseen tärkeiden laitteiden kunnonvalvonnassa. Jatkuvatoimisiin mittauksiin voidaan liittää tiedon siirto hälytyksineen ylempään prosessiohjausjärjestelmään. [9]

Kunnonvalvonnan avulla saatavien mittaustulosten arviointi ei ole useinkaan yksiselitteistä. Aistihavaintoihin perustuva laitteiden kunnon arviointi perustuu yleensä kunnossapitohenkilöstön aikaisempaan kokemukseen laitteistoista. Mittaustuloksien arvioinnissa on otettava huomioon laitteiston ikä, käyttöolosuhteet ja laitteiston rakenne. Sama mittaustulos voi yhden laitteen osalta olla merkki vakavasta viasta ja toisen laitteen osalta kertoa normaalista ikään-

tymisestä. Usein päätöksenteossa on pääteltävä laitteen kuntoa useiden erilaisten mittaustulosten perusteella. Mittaustulosten seuranta tulisi aloittaa heti uuden laitteiston käyttöönoton jälkeen, jotta kunkin laitteen yksilöllisiä ominaisuuksia pystyttäisiin huomioimaan. [9]

Sähköisten signaalien mittaaminen, käsittely ja tulkinta on kehittynyt huomattavasti elektronikan, digitaalisen signaalinkäsittelyn ja mikrotietokonetekniikan kehittymisen seurauksena. Mittaustiedoista saadaan entistä enemmän ja tarkempaa tietoa tulosten analysointiin, ja ohjelmistotekniikan kehityksen myötä analysoinnit ovat nopeampia ja luotettavampia. Mittalaitteiden kehittymien on tuonut myös uusia mahdollisuuksia sähköisten signaalien mittaamiseen ja käsittelyyn. Sähköisten kunnonvalvontamenetelmien kehitys tuo uusia vaatimuksia mittajille ja tuloksia analysoiville henkilöille, koska mukana on suureita ja ilmiöitä, joita ei ole aikaisemmin voitu hyödyntää. [10]

Sähkölaitteistojen kunnonvalvonnan seuranta-, mittaus- ja työmenetelmiä

Määräaikaistarkastukset

Sähkökeskuksien, sähkötilojen ja niihin liittyvien laitteiden tarkastukset tulee tehdä määrävälein yhtenäisen käytännön mukaisesti. Tarkastuksen tehtävänä on varmistaa ja ylläpitää sähköturvallisuutta, työturvallisuutta, palosuojelua ja sähkölaitteiden käyttövarmuutta. Tarkastuksen tulokset on kirjattava esim. kunnossapidon tietojärjestelmään. [13]

Tarkastuksen päämääränä on seurata sähkölaitteistoon liittyvien komponenttien kuntoa soveltuvuutta ja mitoituksen oikeellisuutta käyttökohteeseen. Tarkastustoiminnassa käytetään hyväksi keskuslähtöluetteloita, piiri- ja johdotuskaavioita sekä muita mahdollisia laitteistoihin liittyviä dokumentteja. Tarkastuksen yhteydessä tulee myös havainnoida laitteiden kuormitus-tilannetta sekä dokumentoinnin paikkansapitävyyttä, jotta havaittaisiin mahdolliset puutteet ja ristiriidat etukäteen eikä vasta vikatilanteessa. Tarkastuksen yhteydessä saadaan päivitettyä myös mahdolliset kirjaamattomat muutokset kunnossapidon ennakkohuoltojärjestelmään. Osa tarkastustoiminnasta voidaan suorittaa esimerkiksi lämpökuvauksen yhteydessä. [13]

Lämpökuvaus

Lämpökuvaus on yksi ennakoivan kunnossapidon menetelmistä, jolla lisätään laitteiden käyttövarmuutta. Sähkölaitteiden lämpötilan määrittäminen tavanomaisin mittalaittein on hankalaa, mikäli laitteet ovat normaalissa käytössä. Lämpökameran avulla voidaan sähkölaitteiden kuormitetuista jännitteisistä osista paikallistaa kohteita, joiden liiallinen lämpeneminen voi johtaa myöhemmin laitteen vaurioitumiseen. [14]

Useimmat lämpökamerat sallivat vain yhden käyttäjän ilmoittaman arvon mitattavan kohteen emissiviteetille, jota sitten käytetään koko kuva-alueen lämpötilojen määrittämiseksi. Lämpökuvauksen kannalta ongelmallisia kohteita ovat pinnat, joissa emissiviteetti vaihtelee voimakkaasti. Tällaisia pintoja löytyy hyvin paljon mm. elektroniikkateollisuuden tuotteista, joissa tarkasteltavat kohteet ovat hyvin pieniä. Piirilevyillä sijaitsevien komponenttien pintamateriaalit eroavat toisistaan. Täten myös niiden emissiokerroin on erilainen, joten ne säteilevät lämpöä kukin omalla tavallaan. Tarkkojen lämpötietojen saamiseksi olisi kunkin komponentin emissiokerroin selvitettävä. Elektroniikkateollisuuden tarpeisiin onkin kehitetty infrapunamikroskooppeja, jotka ottavat huomioon kohteen emissiviteetin kuvapikseleittäin. [15], [16]

Lämpötilan perusteella voidaan päätellä laitteiden toimintaa. Häiriintynyt toiminta näkyy tavallisesti lämpötilan nousuna riippumatta siitä, onko kyseessä sähkötekninen vai mekaaninen laite. Laitteiden normaalia käyttölämpötilaa ja lämpötilajakaumia ei aina välttämättä ole tiedossa. Laitteiden lämpökuvauksista olisikin hyvä pitää kuva-arkistoa, joissa ovat lämpökuvat tarkkailtavista kohteista. Seuraamalla kuvia voidaan havaita seurattavan kohteen lämpötilan kohoaminen sekä lämpötilajakauman muuttuminen ja tämän myötä voidaan ajoissa havaita huollon tarve ja samalla huolto voidaan ajoittaa yrityksen tuotantotoimintaa sopivaksi ajaksi. Sähköjärjestelmien yleisiä kuvauskohteita ovat mm. johtoliitokset, läpiviennit, teho- ja mittamuuntajat, kaapelipäätteet, kiskot rakenteineen, kontaktorit, kytkinvarokkeet ja maadoitukset.

Säädettyjen käyttöjen vika ja valvontatoiminnot

Säädettyjen käyttöjen vika- ja valvontatoiminnot ovat lisääntyneet prosessoreiden kehityksen mukana. Tehokkaat prosessorit ovat mahdollistaneet monipuolisia varoituksia ja vianilmaisutoimintoja moottoriohjaimilla. Säädettyjen käyttöjen suojausien monipuolisuus on sidoksissa

suoritettujen mittausten monipuolisuuteen. Suurien moottoriohjaimien laajat mittaukset mahdollistavat laajemman suojaus- ja vikadiagnostiikan kuin pienten ohjaimien vaatimattomat mittaukset. Osa valvontamenetelmistä on tarkoitettu suojaamaan moottoriohjainta vikojen vaikutuksilta ja vastaavasti osa liittyy moottorin kunnonvalvontaan. Käytön ohjelman valvontasignaaleista osa pysäyttää laitteiston, varoittaa viasta, mutta ei estä käyttöä ja osa kertoo käytön tilan. [12], [17], [18]

Seuraavaksi on lyhyesti luetteloitu yleisimpiä sähkömoottorikäytön ohjelman antamia vika- tai mittaustietoja, joita voidaan käyttää hyväksi kunnonvalvonnassa ja vianhaussa.

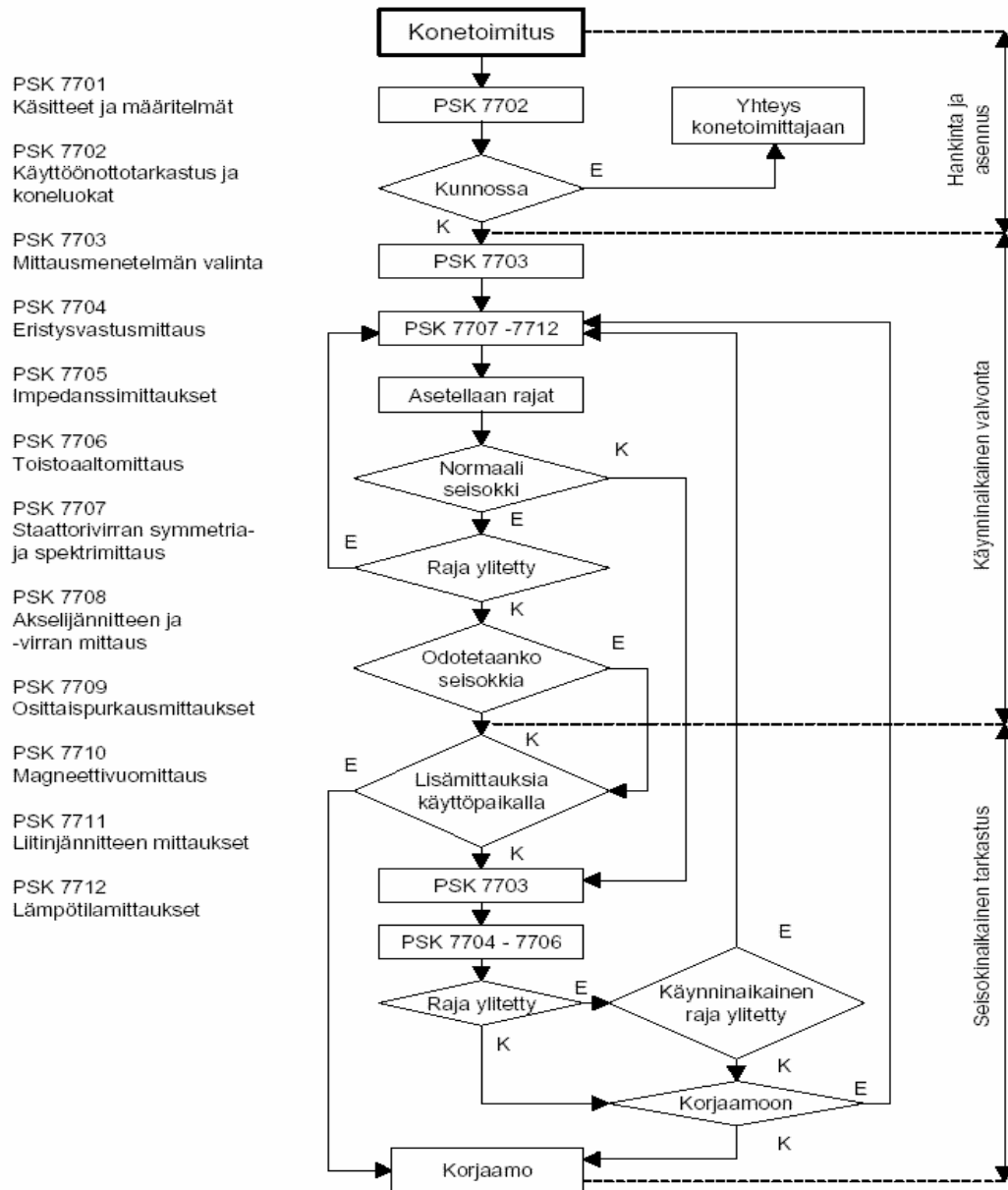
- ylivirta
- DC-välipiirin jännite
- taajuusmuuttajan lämpötila
- moottorin lämpötila
- ohjelmiston virhetoiminto
- lähdön oikosulku
- puolijohdevika
- kortti- ja mittausviat
- luku- ja kirjoitusviat muistiin
- moottorin jumitieto
- mikroprosessorin Watchdog-toiminto
- parametrintivirheet
- maasulkuhälytys
- laitteiston kommunikointihäiriö
- syöttö- ja lähtövaihevalvonta
- jarrukatkojan toiminnan valvonta
- apu- ja referenssijännitteiden valvonta
- ulkoisten laitevikojen hälytykset

Käyttäjä voi ottaa käyttöön ja asetella osan hälytys- ja vikaparametreista ympäristö- ja käyttöolosuhteiden mukaan, jolloin vältetään turhilta ja käyttöä hankaloittavilta ongelmatilanteilta. Hälytystietojen käyttö kunnonvalvonnassa edellyttää tietenkin hälytystietojen säännönmuokausta seurantaan, jotta voitaisiin estää häiriön kehittyminen käytön pysäyttäväksi viaksi. [17], [18]

Käyttöihin on saatavissa myös erilaisia PC-työkaluohjelmia. Ohjelmien avulla voidaan ladata parametreja taajuusmuuttajaan tai taajuusmuuttajasta PC:lle, tarkastella graafisesti trendinäytönä valvottavia signaaleja sekä myös antaa taajuusmuuttajalle suoraan käskyjä esim. käynnistys-, pysäytys- ja taajuusohjeen muutoskäskyjä. [17], [18]

Sähköiset kunnonvalvontamenetelmät pyöriville sähkökoneille

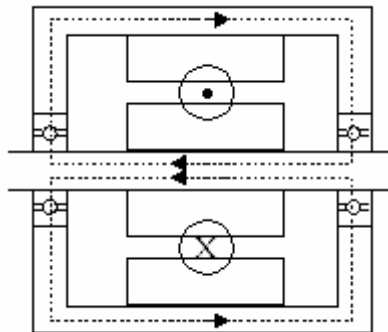
Kuvassa 3.1 on esitetty pyörivien sähkökoneiden kunnonvalvonnan mittausmenetelmän valintaan, soveltuvuuteen ja menetelmien käyttöön liittyviä tietoja.



Kuva 3.1 Pyörivien sähkökoneiden sähköiset kunnonvalvontamenetelmät [11]

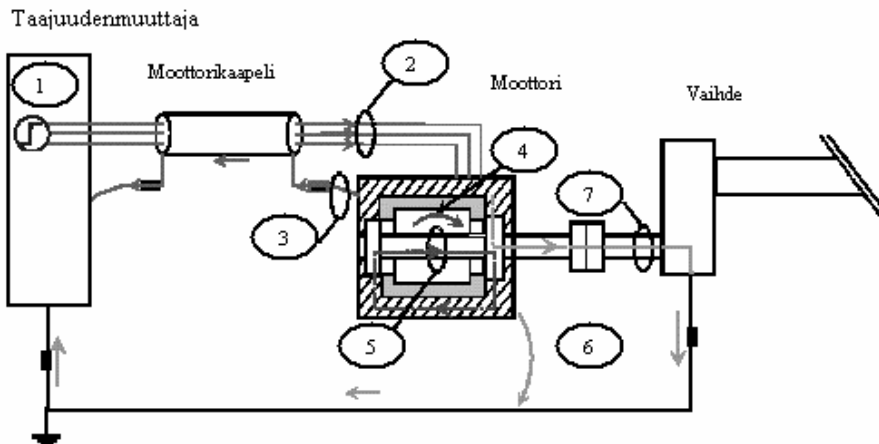
Kaaviossa 3.1 esitetään käynnin aikaisiksi valvontamenetelmiksi pyöriville sähkökoneille seuraavia mittauksia [11]:

1. *Staattorivirran symmetriamittauksella* pyritään määrittämään mahdollinen jännite-epäsymmetria. Jännite-epäsymmetria aiheuttaa moottorin yllämpenemistä ja tämän myötä moottorivaurion. Staattorivirran spektrimittauksella tapahtuva kunnonvalvonta perustuu vikojen aiheuttamien mekaanisten ja sähkömagneettisten epäsymmetrioiden vaikutuksiin staattorivirrassa. Staattorivirran spektrin avulla havaittavista vioista merkittävämpiä ovat epätahtikoneen roottorisauvavauriot ja roottorin epäkeskeisyys. [11], [12]
2. *Akselijännitteen ja -virranmittauksen* avulla pyritään määrittelemään häiriöt taajuusmuuttajasyötössä, vialliset maadoitukset, laakereiden ja laakerieristysten viat. Akselijännitteet ovat akselin päiden välille indusoituneita jännitteitä. Akselijännite on joko syöttötaajuinen vaihtojännite tai suurtaajuinen jännite tai niiden yhdistelmä. Suurtaajuista akselijännitettä esiintyy PWM-taajuusmuuttajakäytöissä. Kiertovirta on akselijännitteen aiheuttama laakerivirta, joka kulkee akselin, laakereiden ja rungon muodostamassa suljetussa virtapiirissä, kuva 3.2.



Kuva 3.2 Kiertävän laakerivirran virtapiiri [48]

Akselin maadoitusvirta taas kulkee moottorin rungosta moottorin laakerin ja akselin kautta maadoitettuihin rakenteisiin. Akselin maadoitusvirran lähteenä toimii staattori-käämityksestä koneen runkoon vuotanut suuritaajuinen vuotovirta. Edellä mainittujen lisäksi esiintyy kapasitiivista purkausvirtaa. Kapasitiivisessa purkauksessa ilmvälikapasitanssin sähkökentän varaus purkautuu laakerin läpi, kuva 3.3. [11]



- 1) Yhteismuotoinen jännitepulssi => 2) Suuritaajuinen yhteismuotoinen virta => 4) Suuritaajuinen akselijännite => 5) Kiertävä suuritaajuinen virta.
 1) Yhteismuotoinen jännitepulssi => 3) PE - Virta => 6) Suuritaajuinen runkojännite => 7) Akselin maadoitusvirta.

Kuva 3.3 Suuritaajuisen kiertovirran ja akselin maadoitusvirran kulkureitti [46]

3. *Aksiaalisen magneettivuonmittauksessa* analysoidaan magneettivuon spektriä. Erilaiset staattorin käämityksen, roottorikäämityksen tai roottorin oikosulkurenkaan viat sekä syöttöjännitteen muutokset aiheuttavat magneettivuohon epäsymmetriaa, joka on havaittavissa spektrin jakaumassa. [11]
4. *Osittaispurkausmittaus*, suurjännitekoneiden eristystason määrittäminen
5. *Liitinjännitteen* mittauksilla saadaan selville syöttöjännitteen huippuarvo ja nousunopeus. Mittauksessa voidaan todeta myös jännitepulssien lukumäärä aikayksikköä kohden. Liitinjännitemittaukset tulisi tehdä säädettyjen käyttöjen kaikissa nopeuspisteissä sekä kiihdytys, jarrutus ja suunnanvaihtotilanteissa. Liitinjännitteen nousunopeudella on merkitystä moottorin käämityksen eristyksen kestoon. [11]
6. *Lämpötilamittauksien* avulla pystytään seuraamaan käämitysten, laakereiden, jäähdytysilman ja koneen ulkopinnan lämpötilamuutoksia, jotka voivat olla eri asteisten vikojen tai epänormaalien käyttöolosuhteiden aiheuttamia. Moottorin lämpötiloja valvottaessa ja lämpötilamuutoksia analysoitaessa on eri ajankohtien mittausarvojen

perustuttava samanlaiseen moottorin kuormitustilanteeseen, jotta havaittaisiin parhaiten poikkeavat muutokset. [11]

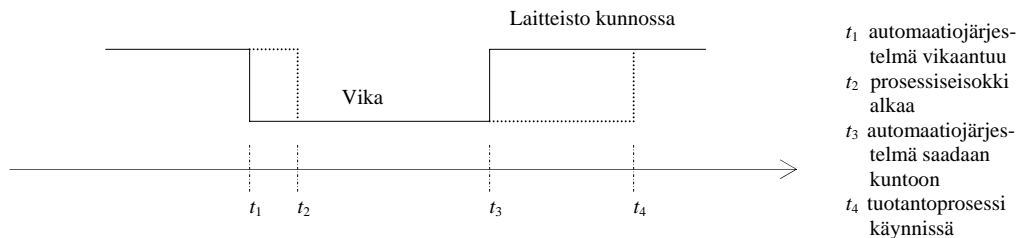
Kuvassa 3.1 esitetään seisokinaikaisiksi tarkastusmenetelmiksi eristysvastusmittausta, impedanssimittausta ja toistoaltomittausta. Pysähdyksissä olevan sähkökoneen käämityksen eristystila pystytään määrittämään eristysvastusmittauksella. Käämityksen eristysvastuksen hyväksyttävän minimiarvoon vaikuttavat koneen ikä, nimellisjännite sekä eristys- ja käämitysrakenne. Eristysvastus on myös riippuvainen käämityksen ympäristöolosuhteista, kuten lämpötilasta ja kosteudesta. Eristysvastusmittauksella on helppo tarkastaa käämitykset ruutiiniluontoisesti. Impedanssimittauksella saadaan selville sähkökoneen käämityksen sähköinen kunto. Aiempia mittauksia ei välttämättä tarvita, koska eri vaiheiden mittaustuloksia voidaan verrata suoraan keskenään. Toistoaltomittauksella pystytään paikallistamaan johdinkierrosten välinen kierrosoikosulku, joka ei aivan välttämättä aiheuta ongelmia koneen käytölle. Kierrosoikosulusta aiheutuu moottorin rikkoutuminen, kun vika pääsee laajenemaan pahemmaksi esim. käämin ja koneen rungon väliseksi maasuluksi tai kahden vaiheen väliseksi oikosuluksi. [11]

3.3 Prosessisähkölaitteiden käyttövarmuus

Automaatiojärjestelmän käyttövarmuutta voidaan tarkastella joko automaatiojärjestelmän tai prosessin kannalta. Huoltohenkilöstölle ja laitevalmistajalle automaatiojärjestelmän häiriö on aina merkittävä, vaikka sillä ei olisi suoranaista vaikutusta itse prosessin toimintaan. Laitteiston vikaantuessa vian kunnossapitoaika *MTTM* muodostuu huoltoajasta ja korjausajasta. Huolto- ja korjausaika muodostuu vian havaitsemisesta ja paikallistamisesta sekä komponentin vaihtoon kuluvasta ajasta. [25]

Tuotantoprosessi vikaantuu automaatiojärjestelmän vikojen seurauksen myötä vasta, kun tuotettavan tuotteen laatu heikkenee, tuotantokapasiteetti vähenee tai laitteisto pysähtyy kokonaan. Edellä mainitussa tilanteessa prosessiautomaatiojärjestelmässä saattaa olla jo useampia vikatekijöitä. Automaatiojärjestelmän vika voi aiheuttaa tuotantoprosessissa seisokin, jonka

pituus on moninkertainen automaatiojärjestelmän korjausaikaan nähden. Prosessin viallisuus-aika saattaa olla huomattavasti pitempi kuin itse automaatiojärjestelmän viallisuus-aika. [25]



Kuva 3.4 Automaatiojärjestelmän ja prosessin viallisuusajat

Laitteiston vikojen määrä

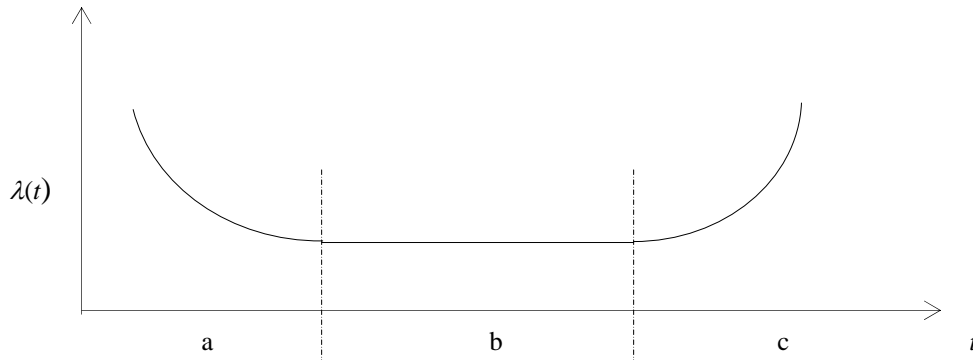
Laitteiston luotettavuuden tunteminen helpottaa kunnossapitostrategian valintaa. Laitteiston toimintahäiriöt voidaan jaotella seuraaviin kategorioihin.

Katastrofaalisiin toimintahäiriöihin, jotka ilmenevät yllättäen ja aiheuttavat seisokin. Toimintahäiriöön johtanutta tilannetta ei voida määrittää etukäteen ennakoivan kunnossapidon keinoin.

Toimintahäiriöihin, jotka aiheutuvat laitteistoon liittyvien osien ominaisuuksien muutoksista. Toimintahäiriöön johtava tilanne voidaan määrittää etukäteen suoritettavin jaksollisin mittauksin. Toimintahäiriöt voivat ilmetä laitteiston koko eliniän aikana vaihtelevalla todennäköisyydellä. Vikataajuudet voidaan jaotella kolmeen eri ajanjaksoon.

1. Varhaiskäyttökausi. Käyttöajan alussa vikaintensiteetti laskee.
2. Käyttökausi. Käyttökaudella vikaintensiteetti on likimain lähes vakio.
3. Vanhenemiskausi. Käyttöajan lopussa oleva aikaväli, jossa vikaintensiteetti kasvaa.

Vikaintensiteetti $\lambda(t)$ käyttöajan funktiona voidaan esittää seuraavalla ”kylpyammekäyrällä”.



Kuva 3.5 Vikataajuus laitteiston eliniän aikana [29]

Kuvassa 3.5 esitetty vikaantumisen ammekäyrä kuvaa ns. toisen sukupolven näkemystä vuosien 1950 – 1980 väliseltä ajalta laitteiden vikaantumisesta. Kolmannen sukupolven näkemys 1980-luvulta alkaen antaa useita eri vaihtoehtomahdollisuuksia laitteiston teoreettiselle vikaintensiteetille. Vaihtoehtona yhä kasvavan vikaantumisen tai ammekäyrän lisäksi voi olla laitteen koko eliniän jatkuva vakiovikataajuus. [33]

Vikataajuuden merkitys kunnossapitostrategian valinnassa

Varhaiskäyttökaudella (kuva 3.5, alue a) vikaintensiteetti putoaa, koska osa laitteiston komponenteista on jo lähtötilanteessa vaurioituneita. Laitteistoon liittyvä komponentti voi olla vaurioitunut jo valmistusvaiheessa. Varhaiskäyttökauden vaurioita voidaan vähentää seuraavasti:

1. Suorittamalla etukäteen laitteistolle tai sen osille koekäyttö
2. Suorittamalla laitteistolle hyvin tiukka testiohjelma.

Käyttökaudella (kuva 3.3, alue b) elektronisille laitteistoille vikaintensiteetti $\lambda(t)$ on vakio. Suoritettava kunnossapito käyttökauden aikana voi olla ehkäisevää kunnossapitoa sekä korjaavaa kunnossapitoa kriittisille häiriöille. Vanhenemiskauden aikana (c) vikaintensiteetti kasvaa ja mittaustoimenpiteet ovat tarpeellisia, koska elektroniikkalaitteistojen komponenttien

arvot muuttuvat vanhenemisen myötä. Kunnossapitotoiminta tällä jakson alueella voi olla suunniteltua ja korjaavaa kunnossapitoa. [29]

Asianmukaisen ennakkohuollon on todettu pidentävän laitteen normaalikäyttökautta. Elektronisilla laitteilla vakiovikaintensiteettialue on huomattavasti pidempi kuin mekaanisilla laitteilla. [31]

Elektronisten laitteiden luotettavuustarkastelu

Elektronisten laitteiden luotettavuustarkastelussa vikaintensiteetti $\lambda(t)$ oletetaan yleensä vakioiksi. Oletuksen avulla helpotetaan tarkastelua, ja on myös oikeutettu. Suurin osa varhaiskäyttökauden vioista karsitaan jo tuotantovaiheessa. Normaalitilanteessa elektroniikkalaitte ei ehdi joutua elinkaarensa aikana vanhenemiskauteen, jolloin vikaintensiteetti kasvaa. [27]

Elektronisille laitteille voidaan käyttää seuraavaa vikatiheysfunktioita

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (3.1)$$

jossa λ on elektronisen laitteen vakiovikaintensiteetti.

Nyt voimme laskea laitteen toimintavarmuuden $R(t)$ ja keskimääräisen vikaantumisajan $MTTF$.

Sijoittamalla yhtälön (3.1) vikatiheysfunktio yhtälöön (2.2) saadaan

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

Sijoittamalla yhtälöt (3.1) ja (3.2) yhtälöön (2.5) saadaan vikaintensiteetiksi $\lambda(t) = \lambda$.

Elektronisen laitteen keskimääräiseksi vikaväliksi saadaan

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.3)$$

Keskimääräinen vikaväli on vikavälin odotusarvo. [25]

Hetkellistä rikkoutumistodennäköisyyttä mittaa vikaintensiteetti λ . Vikaintensiteetti kuvaa laitteen laatua ja laitteen suhtautumista toimintaympäristöönsä. Vikaintensiteetti ei kuitenkaan kuvaa laitteen suoriutumista toimistaan, koska usein vikaantuvan laitteiston käytettävyys saattaa olla hyvä, mikäli se pystytään korjaamaan nopeasti. Vikaintensiteetti aikavälillä Δt voidaan määrittellä voittuneiden laitteiden lukumäärän suhteena aikavälin Δt alussa olleisiin laitteisiin. Yhdelle laitteelle vikaintensiteetti on vikojen lukumäärän suhde tarkastelujakson Δt pituuteen. [31]

Laitteiston rakenteen vaikutus toimintavarmuuteen

Laitteiston rakenteella voidaan vaikuttaa prosessin toimintavarmuuteen. Toimintavarmuus voidaan jaotella rakenteesta riippuen kolmeen eri luokkaan:

- aktiivinen varmennus
- passiivinen varmennus
- k/n-rakenteen mukaiseen varmennukseen

Aktiivinen varmennus

Tarkastellaan kahta erilaista laitteistorakennetta; sarjarakennetta ja rinnakkaisrakennetta. Lisäksi oletetaan laitteistoon kuuluvien yksiköiden olevan itsenäisiä toimintokokonaisuuksia ja yksiköiden vikataajuuksien olevan vakion.

Sarjarakenne on järjestelmän rakennemuoto, jossa kaikkien osien on toimittava, jotta järjestelmä toimii. Järjestelmän osat ovat luotettavuusmielessä ketjussa, mikäli yksi laitteiston yksikkö vaurioituu niin koko laitteiston toiminta estyy.

Jos sarjarakenteessa on n kappaletta yksiköitä S_i , niin laitteiston S toimintatodennäköisyys on:

$$R_S(t) = R(S_1 \cap S_2 \cap S_i \cap S_n) = R_{S_1}(t) \times \dots \times R_{S_n}(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t}, \quad (3.4)$$

jossa λ_i on järjestelmän S yksikön $i=1, 2, \dots, n$ vikaintensiteetti.

Sarjajärjestelmän yksikön vikaintensiteetti λ_S voidaan laskea seuraavasti:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (3.5)$$

kun oletetaan keskimääräisen seisokkiaika (MDT) pieneksi verrattuna vikaantumisaikaan ($MTTF$).

Rinnakkaisrakenne on järjestelmän rakennemuoto, jossa yhdenkin yksikön toiminta riittää pitämään järjestelmän toiminnassa eli järjestelmä vaurioituu vain kaikkien systeemin yksiköiden vaurioituessa.

Sarja- ja rinnakkaisrakenteesta voidaan todeta, että:

1. Sarjarakenteisen laitteiston toimintavarmuus on pienempi kuin yhden yksittäisen yksikön toimintavarmuus
2. Rinnakkaisrakenteisen järjestelmän toimintavarmuus on parempi kuin yhden yksikön toimintavarmuus. [29]

Passiivinen varmennus

Passiivisessa varmennuksessa prosessin toiminta on varmistettu laitteistorakenteella, jossa järjestelmän yksi yksikkö on toiminnassa ja muut yksiköt ovat valmiustilassa. Laitteiston toimivan yksikön vaurioituessa korvautuu se valmiustilassa olevalla yksiköllä. [29]

K/n-rakenne

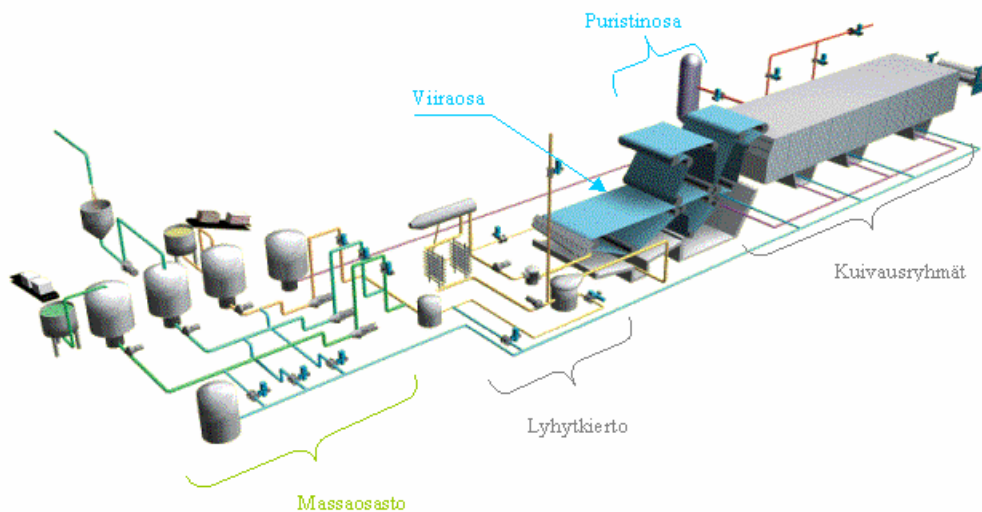
K/n-rakenteen mukaista varmennusta käytetään kriittisille prosesseille, mikäli halutaan korkeaa toimintavarmuutta. K/n-rakenteen mukaisella varmennuksella voidaan verrataan esimerkiksi ohjaussignaaleja keskenään ja tarvittaessa jätetään vääristynyt signaali huomiotta. [29]

4. PAPERIKONEEN LINJAKÄYTÖT

Paperikoneen nopeussäädetyissä käytöissä tasavirtamoottori alkoi yleistyä 1960-luvulla tehoelektronikan kehityksen myötä. Tasavirtakäytöt olivat pitkään valta-asemassa säädetyissä paperikonekäytöissä. 1980-luvun alusta lähtien signaalinkäsittelyn ja suuntaajatekniikan kehityksen ansiosta taajuusmuuttajilla syötetyt oikosulkumoottorit ovat vallanneet säädettyjen käytöjen käyttökohteita tasavirtakäyttöiltä. [19]

4.1 Paperikoneen eri käyttöryhmät

Paperikoneen eri käyttöryhmät koostuvat viiraryhmästä, puristinosasta, kuivausryhmästä, kalanterista ja rullaimista. Paperikoneeseen kuuluu myös muita liittyviä käyttöjä kuten sekoituspumppuja, jotka liittyvät läheisesti paperikoneen viiraryhmän toimintaan. Paperikonekokonaisuuteen sisältyvät myös pituusleikkurit, kalanterit, arkkileikkurit ja päällystyskone, joka voi liittyä myös suoraan paperikoneeseen ns. on-line päällystyskoneena. [20]



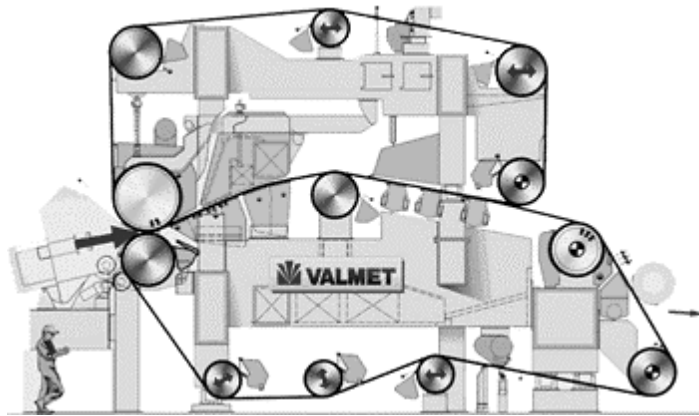
Kuva 4.1 Paperikoneen prosessikuvaus [69]

Paperikoneen alkupuolta, jossa raina varsinaisesti muodostuu perälaatikolla, viiraosalla ja edelleen puristinosalla, kutsutaan märkääksi. Puristinosalta raina johdetaan kuivatusosalle. Kuivatusosan tarkoituksena on haihduttaa rainasta vesi ja siten päästä sopivaan paperin loppukosteuteen. Kuivatusosalla raina kulkee höyryllä lämmitettävien sylinterien päällä. Kuumen

sylinterin lämpö siirtyy paperiin ja haihduttaa siinä olevaa vettä, jotta päästäisiin sopivaan paperin loppukosteuteen, joka on paperilajin tai seuraavan prosessin mukaan 3 - 10 %. Kuivatusosa on huuvan sisällä lämmön talteenoton mahdollistamiseksi. [21]

Viiraosa

Perälaatikolta laimea kuituseos syötetään mahdollisimman tasaisesti vettä läpäisevän muovi-, teräs- tai lasikuituviiran päälle. Viiraosalla poistetaan yli 95 % perälaatikolta virtaavasta vesimäärästä ja viiran loppuosalla rainan kuiva-ainepitoisuus on jo kasvanut 15 - 20 %:iin. Viiraosan nopeuden pysyvyys on tärkeää, koska viiran nopeuden ja perälaatikon massasuihkun nopeuden suhde määrää syntyvän paperin neliömassan. [20], [21]



Kuva 4.2 Paperikoneen viiraosa, Speed Former [22]

Puristinosa

Puristinosalla rainan kuiva-ainepitoisuus kasvaa 40 - 55 %:iin, vaikka kuiva-ainepitoisuus nousee viiraosan jälkeen huomattavasti, poistuu puristinosalla viiraosaan verrattuna vähäinen määrä alkuperäisestä vesimäärästä. Tuotannon taloudellisuuden vuoksi on tärkeää saavuttaa puristimella mahdollisimman suuri kuiva-ainepitoisuus kalliin höyryenergian säästämiseksi kuivatusosalla. Märkäpuristus tapahtuu kahden toisiaan vasten puristetun telan avulla. Paperiraina kulkee yhdessä yhden tai kahden huovan kanssa telojen muodostaman nipin läpi. Puristinosalla on tyypillisesti 2 - 4 telaparin muodostamaa puristusvyöhykettä eli puristinnippiä. Puristuksessa vesi siirtyy rainasta huopaan, sillä veteen kohdistuva paine huovassa on pienempi kuin puristuvassa rainassa. Vesi poistetaan nipissä muodostuneen hydraulisen paineen avulla, joka on ainoa vettä poistava voima puristinosalla. Puristus vaikuttaa aina myös rainan raken-

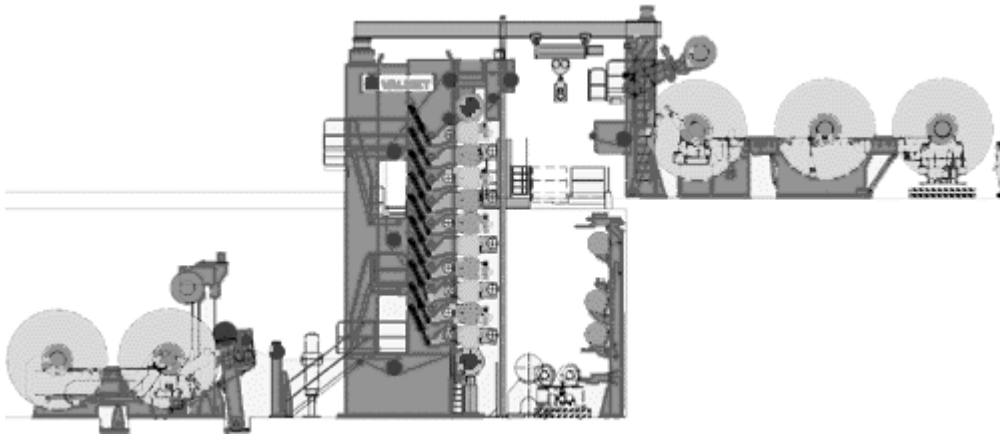
teeseen, koska puristuspaineen vaikutuksesta kuidut sitoutuvat toisiinsa. Veden siirtymiseen paperista huopaan ja sieltä edelleen telalle vaikuttava monet tekijät, kuten huovan ja telan rakenne, lämpötila, massan koostumus, koneen nopeus sekä viivakuorma ja viipymäaika nipissä. Puristintelojen ja huopien lukumäärällä, rakenteella ja sijoittelulla voidaan vaikuttaa paperin symmetrisyyteen. [21]

Kuivausosa

Puristinosalta paperiraina johdatetaan kuivatusosalle. Kuivatusosalla kosteus poistetaan paperirainasta höyryllä lämmitettyjen sylintereiden avulla. Kuivatussylinterin ja rainan kosketuksen aikana rainan lämpötila nousee ja vettä haihtuu kuivatuskudokseen ja sen läpi. Rainan siirtyessä puristinosalta kuivatusosalle on sen lujuus alhainen. Edellä mainitusta johtuen ensimmäisten kuivatussylintereiden alueella paperirainaa tuetaan samalla kuivatusviiralla ala- ja yläsylinterillä, yksiviiraviennillä. Myöhemmissä ryhmissä käytetään nopeudesta riippuen yksitai kaksiviiravientiä, jossa ylä- ja alasylinterillä on omat kuivatusviiransa. Kuivatusosan höyrynpainetta säädetään mittaamalla rainan kosteutta kuivatuksen jälkeen. Kuivatuksen ohjearvo riippuu siitä mitä paperirainalla kuivatuksen jälkeen tehdään, päällystetäänkö vai leikataanko heti asiakasrulliksi pituusleikkurilla. [21]

Kalanterointi

Kalanteroinnilla tarkoitetaan prosessia, jossa paperi puristetaan kahden tai useamman telan välissä. Tällöin paperi muuttaa muotoaan sekä tason että paksuussuunnassa puristuspaineen ja leikkaus- ja kitkavoimien vaikutuksesta. Päällystettyjen papereiden kalanterointi tehdään kahdessa vaiheessa. Esikalanterointi tehdään ennen paperin päällystystä ja vastaavasti loppukalanterointi päällystysten jälkeen. Kalanterointi on paperinvalmistuksessa viimeinen vaihe, jolla voidaan vielä merkittävästi vaikuttaa paperin ominaisuuksiin. Kalanterointimenetelmiä on mm. konekalanterointi, softkalanterointi, superkalanterointi, monitelakalanterointi, on-line sovellukset ja pitkänippikalanterointi. [21]



Kuva 4.3 Monitelakalanteri [22]

Rullaimet

Rullausten tarkoituksena on muuntaa tasomaiseksi valmistettu paperi helpommin käsiteltävään muotoon. Rullausprosessiin kuuluu neljä päävaihetta: rainan hallinta ennen rullainta, kiinnirullaus, vaihto ja valmiin rullan käsittely aukirullaussineen. Kuva 4.3 selventää rullaustapahtumaa ja rullauksessa hallittavia toimintoja. [21]

Radan hallinta:

Kireyssäätö, nopeussäätö, pito, levitys, oskillointi ja tuenta.

Kiinnirullaus:

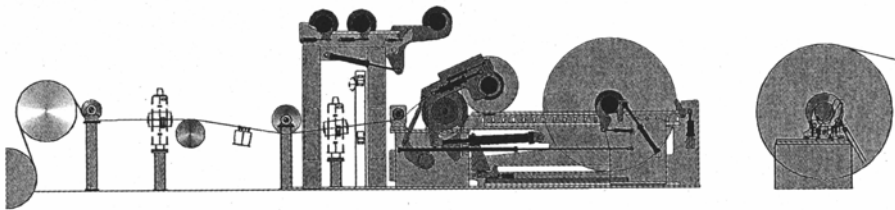
Tampuurin rakenteen hallinta ja vaihto.

Tampuurin käsittely:

Hidastus, pysäytys, nosto ja siirto.

Aukirullaus:

Kiihdytys, kireyssäätö, nopeussäätö, pito ja levitys.



Kuva 4.4 Rullaustapahtuma toimintoineen [21]

Pituusleikkaus

Pituusleikkaus on osa jälkikäsitelyä. Pituusleikkurin tehtävänä on leikata täysleveä konerulla, testata asiakasrullien ajettavuus ja rullata paperikoneelta tai sen jatkokäsittelystä tulevat rullat asiakasrulliksi. Pituusleikkurityyppejä on mm. kantotelaleikkuri, hihnakantotelaleikkuri ja keskiöleikkuri. [21]

Päällystyskone

Paperin päällystämällä tarkoitetaan niiden pinnoittamista erilaisilla aineilla. Näitä ovat sideaineet, pigmentit, vahat ja muovit sekä näiden erilaiset yhdistelmät. Päällyste levitetään yleensä vesiseoksena tasaisesti paperirainan pintaan, minkä jälkeen sen sisältämä ylimääräinen vesi haihdutetaan kuivatukseen tarkoitetuilla laitteilla. Päällystyksen tarkoituksena on täyttää paperin pinnan epätasaisuudet yhdellä tai useammalla päällystyskerroksella. Päällystyksen avulla parannetaan paperin painettavuusominaisuuksia, ulkonäköä, jäykkyyttä sekä veden, rasvan ja liuottimien kestoja. [21]

Päällystyskoneen toiminta muistuttaa osin pituusleikkureiden ja muiden rullauskoneiden ja osittain paperikoneiden käyttäjiä. Päällystyskoneelta saatava konerulla leikataan pituusleikkurissa tai ajetaan kalanterissa ja leikataan sen jälkeen pituusleikkurissa asiakasrulliksi. [20]

4.2 Paperikoneen käyttöjen säätöjärjestelmä

Paperikoneen käyttömoottorit on jaettu käyttöryhmiin siten, että sähkömoottorit joiden käyttämien telojen kehänopeuksien pitää olla yhdenmukaiset muodostavat yhden erillisen käyttöryhmän. Käyttöryhmässä on yleensä yksi nopeussäätöinen päämoottori ja vaihteleva määrä apukäyttöjä. Useita sähkömoottoreita sisältäviä ryhmiä ovat mm. viiraryhmä, puristimet ja kuivausryhmät. Käyttöryhmien välisten nopeuserojen on oltava aseteltavissa, koska yleensä paperiradan ominaisuudet muuttuvat kulkusuunnassa. [20]

Paperikoneen eri ryhmien nopeuksien ohjearvot tulevat ohjearvoketjusta, jonka avulla eri ryhmien nopeudet ohjataan siten, että paperirata kulkee ryhmästä toiseen hallitusti. Kun käyttöryhmään sisältyy useita moottoreita, on niiden välisen kuormituksen jaon oltava aseteltavissa ja ohjattavissa. Liitteessä yhdeksän on esitetty paperikone PK7:n puristinosa ja etukuivatuosan ohjearvoketju. [20]

4.2.1 Paperikone PK 7 ryhmien ohjaus

Viiraryhmän ja samalla myös koko paperikonekäytön pääryhmä on alaviiran vetotela. Alaviiran vetotelan mukana käynnistyvät imutela ja yläviiran vetotela, jotka ovat pääryhmän vääntömomenttisäätöisiä orjaryhmiä. Orjaryhmien kuormajakoasettelun rajat ovat imutelalle 15 - 30 prosenttia ja yläviiran vetotelalle 10 - 40 prosenttia yhteenlasketusta tehosta. [61], [72]

Puristinosan pääryhmä on keskitela. Keskitelan nopeusero asetellaan alaviiran vetotelaa nähden. Keskitelan mukana käynnistyvät ensimmäisen puristimen uratela ja pick-up imutela, jotka ovat pääryhmän vääntömomenttisäätöisiä orjaryhmiä. Kuormajaot ovat imutelalle 5 - 15 prosenttia ja ensimmäisen puristimen uratelalle 15 - 30 prosenttia koko kuormituksesta. [72]

Etukuivausosan kuivausryhmät muodostuvat kahdesta käytöstä. Ensimmäinen käyttö (A) on aina kyseessä olevan kuivausryhmän nopeussäädetty pääkäyttö ja toinen käyttö (B) on vääntömomenttisäätöinen orjakäyttö. Kuivausryhmän nopeussäädetyn pääkäytön nopeusero asetellaan edellisen ryhmän pääkäyttöön nähden. Kuivausryhmien 1 - 8 orjakäyttöjen kuormajaot voidaan asettaa linjakäytön sovellusohjelmassa 30 - 50 prosentin välille koko ryhmän kuormituksesta. Kahdeksannen kuivausryhmän jälkeinen paperinjohtotela on radan kireysmitaustela, joka on nopeussäädetty ryhmä. Ryhmän nopeusero asetellaan kahdeksannen kuivausryhmän pääkäytön mukaan. [72]

Pintaliimausyksikön säätö riippuu nipin asennosta ja ohjaustavan valinnasta. Nipin ollessa kiinni on ylätela kireyssäädetty ja alatela vääntömomenttisäädetty orjaryhmä. Alatelalle voidaan haluttaessa valita myös nopeuserosäätö nipin ollessa kiinni. Nipin ollessa auki on myös alatela nopeussäädöllä. Kuormajakoasettelut koko kuormituksesta ovat alatelalle 40 - 60 prosentin välillä. Ylätela siirtyy kireyssäädölle, kun kireyssäätö on valittu käyttöön ja kireyden oloarvo on vähintään 60 prosenttia ohjearvosta. Kireyssäädöltä siirrytään takaisin nopeussäädölle nipin avautuessa, kireyden oloarvon pudotessa 20 prosenttia aseteltua ohjearvoa pienemmäksi, ryhmän pysäytyksen tai ryöminnälle ohjauksen yhteydessä tai kun kireyssäädön esivalinta poistetaan. Pintaliimausyksikön mukana käynnistyy myös ryhmän paperinjohtotela

kaksi ja levitystela yksi. Johtotela ja levitystela ovat nopeussäädetyjä ryhmiä ja niiden nopeusohje asetellaan kahdeksannen kuivausryhmän pääkäyttöön nähden. [61], [72]

Jälkikuivatusosa muodostuu kahdesta kuivatusryhmästä, joiden nopeusero asetellaan aivan vastaavalla tavalla kuin muutkin kuivatusryhmien käytöt. Yhdeksannen kuivausryhmän nopeusero asetellaan kahdeksannen kuivausryhmän pääkäyttöön nähden ja vastaavasti kymmenennen kuivatusryhmän sekä myös kuivatussylinteri 41:n nopeusero asetellaan yhdeksänteen kuivatusryhmään nähden. Viimeisen kuivatusryhmä jälkeinen paperinjohtotela kolme on radan kireysmittaustela, joka on nopeussäädetty ryhmä. Paperinjohtotela kolme käynnistyy ja sen nopeusero-ohje asetellaan kymmenennen kuivatusryhmän mukaan. [72]

Kalanterin ylätela on nopeus- ja kireyssäätöinen pääkäyttö. Ylätelan nopeusero asetetaan 10. kuivausryhmään nähden ja alatela on ylätelan vääntömomenttisäätöinen orjaryhmä nipin ollessa kiinni. Nipin ollessa auki on myös alatela nopeussäädöllä kalanterin pääkäytön mukaan. Kalanterin teloja ohjataan samoin kuin pintaliimausyksikön teloja. Kalanterin kanssa yhtäaikaaisesti käynnistyvät myös nopeussäädetyt paperinjohtotela neljä ja levitystela kaksi. [72]

Rullain koostuu alkurullauskäytöstä, keskiökäytöstä ja rullaussylinterin käytöstä. Rullaimen pääkäyttö on nopeus- ja kireyssäätöinen rullaussylinteri. Alkurullauskäyttö kiihdyttää tampuuriraudan ratanopeuteen ja suorittaa tampuurin alkurullauksen. Keskiökäytöllä tehdään loppurullaus täyteen halkaisijaan saakka. Rullaussylinterin nopeus- ja kireyssäätö toimivat kuten kalanterin pääkäytön säätö. Rullaussylinterin nopeusero asetellaan kalanterin ylätelan nähden. Alkurullauskäyttö ja keskiökäyttö ovat rullaussylinterin orjaryhmiä, jotka ovat myös nopeus- ja vääntömomenttisäädetyjä käyttöjä. Alkurullauskäytön avulla kiihdytetään tyhjä tampuurirauta rullaussylinterin nopeuteen. Kun nopeudet ovat yhtäläiset siirtyy tampuurirauta kiinni rullaussylinteriin ja alkurullauskäytöstä tulee rullaussylinterin vääntömomenttiorja. Alkurullauksen aikana tampuurin halkaisijan kasvaessa suurenee alkurullauskäytön vääntömomentti ja vastaavasti rullaussylinterin vääntömomentti pienenee. Alkurullaus suoritetaan vaihtoalkaisijaan saakka, jonka jälkeen suoritetaan vaihto keskiökäytölle. Kun vaihtoalkaisija on saavutettu, kiihdytetään keskiökäyttö alkurullauskäytön kulmanopeuteen ja aloitetaan vääntömomentin siirto alkurullauskäytöltä keskiökäytölle. Siirron yhteydessä alkurullauskäytön vään-

tömommentti ajetaan rampilla noltaan ja keskiökäytön vääntömommentti nostetaan tampuurin halkaisijan mukaiseen arvoon. Paperinjohtotela viisi ja levitystela kolme toimivat rullaussy-linterin mukana. [72]

4.2.2 Päällystyskone PPK 7 ryhmien ohjaus

Päällystyskoneen käyttöryhmiä voidaan ohjata joko erillisohjauksella tai yhteisohjauksella. Erillisohjauksessa ohjaustoiminnot kohdistuvat yksittäiseen käyttöryhmään ja yhteisohjauksessa koko koneeseen tai koneen osaan. Päällystyskone on jaettu seuraaviin kolmeentoista osaan:

- aukirullausosa 1
- aukirullausosa 2
- 1. päällystysasema
- 1. kuivatusryhmä
- 2. päällystysasema
- aputelat 1
- 2. kuivatusryhmä
- 3. päällystysasema
- 3. kuivatusryhmä
- 4. päällystysasema
- aputelat 2
- 4. kuivatusryhmä
- kiinnirullaus ja päänvienti

Käyttöryhmien ohjaus

Aukirullain toimii vääntömomenttisäädettynä normaalissa ajotilanteessa. Aukirullaimen vääntömomenttiohje määräytyy rullan halkaisijan, asetellun ratakiireyden ja kireyssäätäjän korjauksen perusteella. [73]

Päällystysasemien vastatelat ovat kireyssäädettyjä ryhmiä. Nopeusero asetellaan koko koneen nopeusohjeeseen nähden. Päällystyskoneen eri osien johtotelaryhmät ja levitystelat ovat myös kireyssäädettyjä käyttöryhmiä, joiden nopeusero asetellaan aina linjakäytön pääryhmään nähden. [73]

Koko päällystyskoneen pääryhmä on toisen kuivatusryhmän huovanjohtotela, joka määrää koneen nopeuden. Muiden kuivatusryhmien huovanjohtotelat ovat kireyssäädettyjä ja niille an-

netaan nopeusero-ohjeet. Kuivatusryhmien paperinjohtotelojen ja levitystelojen kuormanjako määritetään jokaisella ryhmällä tapauskohtaisesti kyseessä olevan kuivatusryhmän yhteenlasketusta momentista. Kuivatusryhmät ovat sekä vääntömomentti- että nopeussäädettyjä. Mikäli paperinjohtotelojen tai levitystelan nopeuden oloarvo poikkeaa aseteltua enemmän nopeusohjeesta muuttuu käyttö vääntömomenttisäädöstä nopeussäädöksi ja palaa takaisin vääntömomenttisäädöksi kun nopeuden oloarvo palaa asetteluunsa. [73]

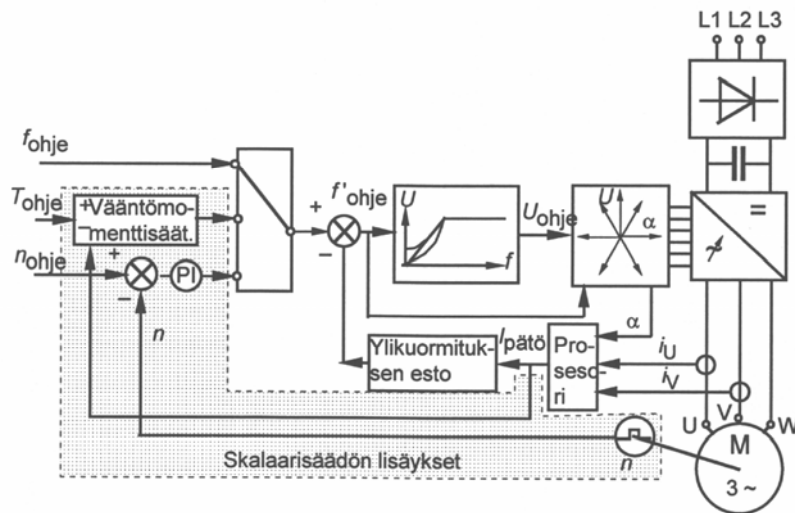
Kiinnirullain muodostuu kolmesta käyttöryhmästä, aukirullauskäytöstä, keskiökäytöstä ja rullaussylinterin käytöstä. Rullaimen pääryhmä on nopeus- ja kireyssäätöinen rullaussylinteri. Rullaussylinteriä ajetaan normaalisti kireyssäädöllä. Rullaussylinterin nopeusero-ohje asetellaan neljänteen kuivatusryhmään nähden. Alkurullauskäytön tehtävänä on kiihdyttää tyhjä tampusyöttö rataa nopeuteen ja suorittaa tampusyöttö alkurullaus tiettyyn halkaisijaan saakka ja loppurullaus tehdään keskiökäytöllä. Alkurullaus ja keskiökäyttö ovat sekä nopeus- että vääntömomenttisäädettyjä käyttöjä. Kun alkurullaus tai keskiökäyttö on kiinni rullaussylinterissä se on momenttisäädöllä. Vääntömomenttiohje määräytyy ajotilanteen mukaan. [73]

4.3 Säädettävät käytöt

Epätahtikoneet joutuvat usein muutostilaan mm. käynnistyksessä ja prosessin säädön yhteydessä. Muutostilojen käsittely ei onnistu pysyvän tilan kuvaamiseen tarkoitetuilla osoitindigrammeilla ja yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Epätahtikoneiden muutostilojen käsittelyä varten onkin kehitetty kaksiakseli- ja avaruusvektoriteoriat, joiden avulla mallinnetaan epätahtikonetta eri käyttötilanteissa. Kaksiakseli- ja avaruusvektoriteorioiden avulla luotujen moottorimallien avulla saadaan epätahtikone - taajuusmuuttajakäytön säätöominaisuudet vastaamaan tasavirtakäytön säätöominaisuuksia. Epätahtikoneiden säätötapoja ovat skalaarisäätö, vektorisäätö ja suora vääntömomenttisäätö. Paperikoneen linjakäyttöjen epätahtimoottoreita säädetään joko skalaari- tai vektorisäädön avulla. [74]

Skalaarisäätö

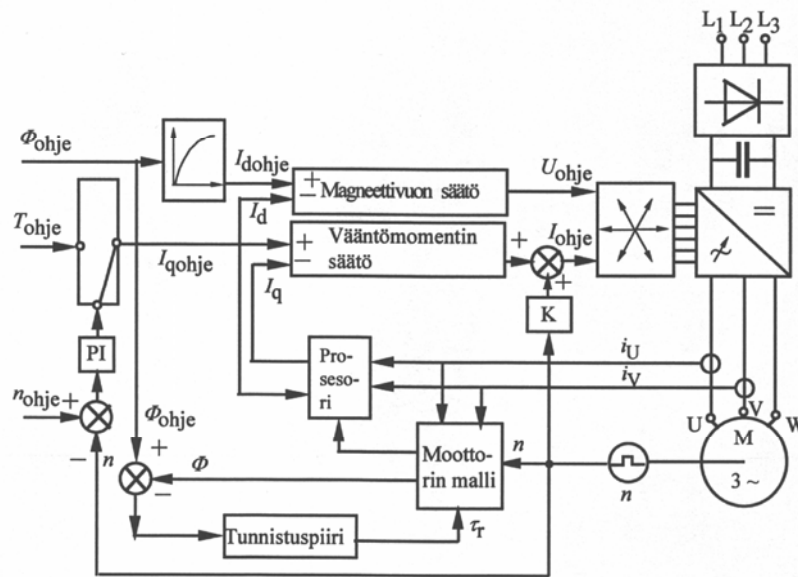
Skalaarisäätö säätää epätahtimoottoria staattiseen tilaan perustuvien menetelmien. Ohjaussuureina ovat epätahtimoottorin jännite ja taajuus sekä virranmittauksen avulla tehdyt korjaukset edellisiin. Skalaarisäädön avulla voidaan säätää joko moottorin pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia tai molempia vuorotellen. Moottorin pyörimisnopeus jää jättämällä verran tahtipyörimisnopeutta pienemmäksi. [28], [74]



Kuva 4.5 Skalaarisäädön lohkokkaavio [28]

Vektorisäätö

Epätahtimoottorin vääntömomentti voidaan laskea vuon ja virran vektoritulon avulla. Vääntömomenttia säädettäessä on vuovektorin suunta otettava huomioon. Edellä kuvattua säätöä kutsutaan vektorisäädöksi. Vektorisäädössä lasketaan epätahtikoneen virran magnetointi- ja vääntömomenttikomponentit hetkellistilassa. Perusluonteeltaan vektorisäätö on vääntömomenttisäätö, jota säätää nopeussäätö. Vektorisäätöön liittyy takaisinkytkentä, jonka avulla lasketaan epätahtikoneen moottorimallin mukaiset ohjaussuureet. Vektorisäädöllä päästään tarkkaan vääntömomentti- ja nopeussäätöön sekä dynaamisesti että staattisesti. Vektorisäätöä käytetään kohteissa, joissa vaaditaan nopeaa dynaamista käyttäytymistä sekä tarkkaa nopeussäätöä. Vektorisäädön tarkkuuteen vaikuttavaa moottorin komponenttiarvojen lämpötila- ja taajuusriippuvuus sekä pyörimisnopeusanturin antaman mitta-arvon tarkkuus. [28], [74]



Kuva 4.6 Vektorisäädön lohkokaavio [28]

4.3.3 Säädettävien AC-käyttöjen rakenne

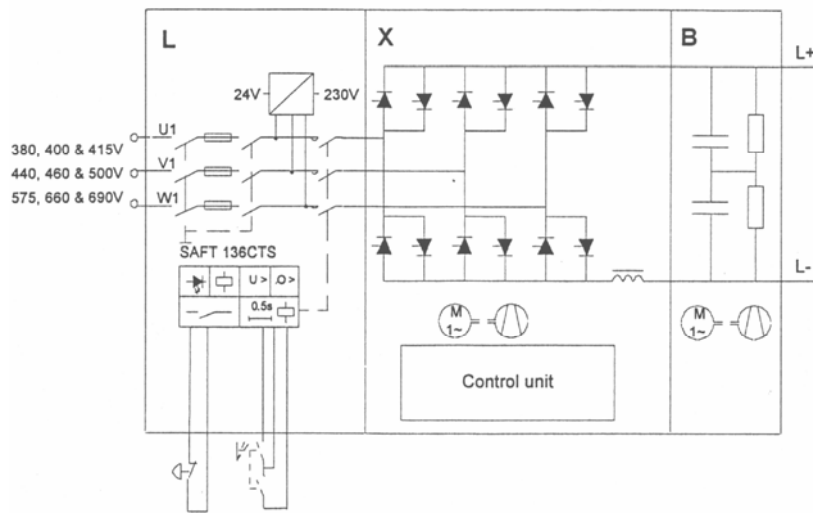
Säädettävien käyttöjen yleisimmät käyttösovellukset ovat erilliskäyttö, ryhmäkäyttö ja linjakäyttö. Erilliskäyttö on yleisin taajuusmuuttajasovellus, joka koostuu erillisestä syöttö- ja invertteriyksiköstä. Erilliskäytöllä voidaan syöttää yhtä tai useampaa moottoria samanaikaisesti. Ryhmäkäyttö koostuu usean erilliskäytön yhdistelmästä. Ryhmäkäytössä on yhteinen kontaktoriyksikkö, verkkosuuntaaja ja energiavarasto. Linjakäyttö koostuu yhdestä tai useammasta syöttöyksiköstä, tasajännitevälipiiristä ja jokaiselle käytölle tai käyttöryhmälle on oma vaihtosuuntaajayksikkö. Yhteinen digitaalinen ohjausjärjestelmä hoitaa koko linjakäytön säädön.

ACV-700 Linjakäytön rakenne, sisäiset laitteistot

Syöttöryhmä

Linjakäytön syöttöryhmä voi muodostua joko diodi- tai tyristorisyöttöryhmästä. Mikäli käyttö vaatii nopeita jarrutuksia ja käyttökohteella on suuri huimamassa voidaan jarruvastuksilla varustettu diodisyöttöryhmä korvata tyristorisyöttöryhmällä ja syöttää varastoitunut liike-energia takaisin syöttöverkkoon. Tarkastellaan kaksisuuntaista kuusipulssityristorisiltasyöttöryhmää.

Tyristorisillassa käytetään teholuokasta riippuen joko tyristorimoduuleita tai tablettityyppisiä tyristoreita. Tyristorisyöttöryhmä tasasuuntaa syöttöjännitteen välipiiriin tasajännitteeksi ja vastaavasti jarrutustilassa syöttää välipiiriin muodostuvaa energiaa syöttöverkkoon. Tyristorisiltaan kuuluvat RC -suojat, termostaatti ja jäähdytys-elementit. Syöttöryhmän tasajännitevälipiiri on varustettu kondensaattoriyksiköllä sekä kuristinyksiköllä. Kuristinyksikkö suodattaa välipiiriin virtahuiput ja kondensaattoriyksikkö tasaa jännitevaihtelut.

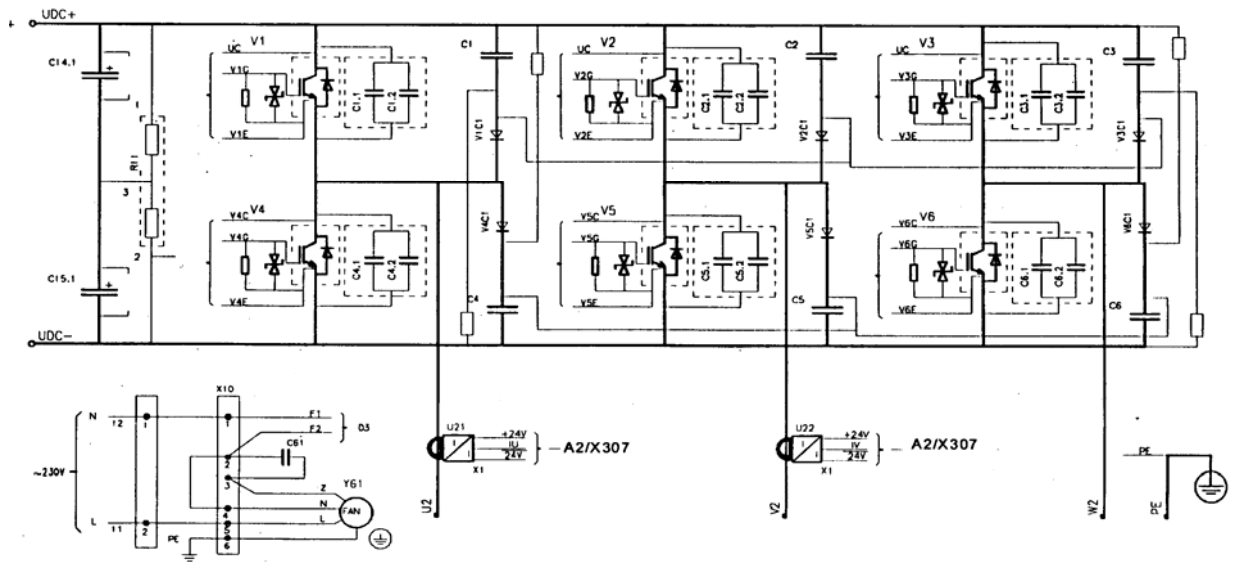


Kuva 4.7 Syöttöryhmän pääpiirikaavio [54]

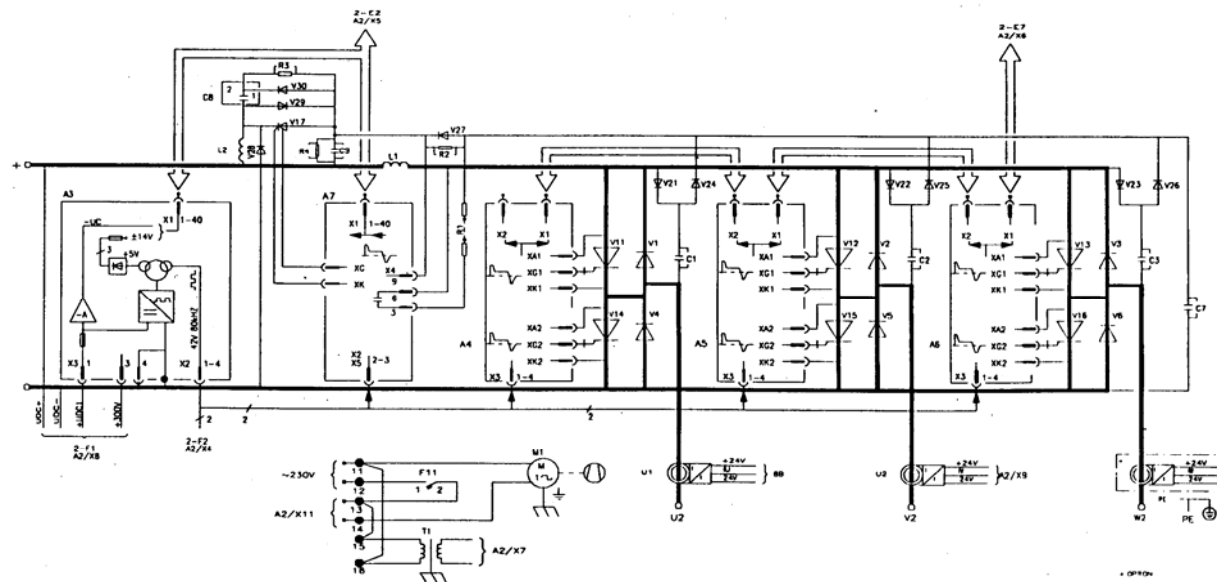
Kuvassa 4.7 esiintyvään kaksisuuntaisen kuusipulssityristorisillan ohjausyksikköön sisältyy tyristorisillanohjauskortti (SDCS-CON-1), pulssivahvistinkortit (SDCS-PIN-41), tasajännitevälipiiriin jännitemittauskortti (SDCS-UCM-1), mittauskortit (SDCS-PIN-51 ja SDCS-IOE-2) apujänniteteholähde (SDCS POW-1) sekä liitäntäkortit (SDCS-IOB-21). Syöttöyksikkö liittyy ylempään järjestelmään kommunikointikortin (SDCS-COM-1) välityksellä. Korttien väliset kytkennät on esitetty liitteessä yksi. [70]

Vaihtosuuntaajayksikkö

ACV-700 käyttöjen vaihtosuuntaajasilta voi muodostua yksikön tehosta riippuen joko GTO-tyristoreista tai IGB- transistoreista.



Kuva 4.8 IGBT – vaihtosuuntaajyksikkö [53]



Kuva 4.9 GTO –vaihtosuuntaajyksikkö [53]

ACV- 700 vaihtosuuntaajyksikköön sisältyvien korttien määrä riippuu yksikön teho- ja jänniteluokasta.

Taulukko 4.1 ACV-700 vaihtosuuntaajayksikön piirikortit

Kortin nimi ja laji	Tunnus
Moottorinohjauskortti, SNAT 603 CNT	A1
Tako- & I/O-liitäntä, SNAT 609 TAI	A1.1
Pääpiirin liitäntä (IGBT), SNAT 7261	A2
Pääpiirin liitäntä (GTO), SNAT MCI	A2
Sovituskortti SNAT XXXV SCL (IGBT) ja SNAT XXXX-VB SCL (GTO).	A2.1
Apujännitelähde, SAFT 11_POW (GTO)	A3
Suojakortti IGB-transistoreille, SNAT XXX PTR	A4...A6
Pulssivahvistinkortti, SNAT 63_PAC (GTO)	A4...A6
Katkojan ohjauskortti (GTO), SNAT 617 CHC	A7
Rinnankytkentäkortti kahdelle GTO-vaihtosuuntaajalle, SNAT 620 PCB	A8
Vahinkokäynnistyksen eston relekortti IGBT-vaihtosuuntaajalle, SNAT 604 IFS	A9
Riviliitinkortti, SNAT 602 TAC	A10

Taulukossa 4.1 esiintyvien korttien keskinäiset kytkennät ja liittynät ulkopuolisiin kohteisiin GTO- ja IGBT-vaihtosuuntaajayksikössä selviävät liitteestä kaksi. Taulukossa kortin lajissa esiintyvät xxx- ja v- merkinnät korvaavat vaihtosuuntaajatyypin lähtötehoa ja jänniteluokkaa. [71]

Moottorinohjauskortti, joka sisältää yksikön ohjelman sekä vektori- että skalaarisäädölle ja käytön parametrit. Parametrit on tallennettu EEPROM-piirille ja ohjelmaversio EPROM-piirille. Kortilla on vikadiagnostiikkana toteutettu valvontaa mm. GTO-yksikön viasta, apujännitesyötöistä, kortin kellotaajuudesta, jarrutuksesta hätäpysäytyksessä ja vahinkokäynnistyksen estosta. [71]

Sovituskortti. Vaihtosuuntaajilla on teho- ja jänniteluokan mukaan oma sovituskorttinsa. Sovituskortti sovittaa jännitteen, virran ja virranmittaustiedon moottorin ohjauskortille vaihtosuuntaajatyypin mukaan. [71]

Apujännitekortti GTO-vaihtosuuntaajalle. Kortille syötetään jännitettä välipiirin tasajännitepiiristä pääpiirin SNAT 607 MCI -liitäntäkortilta. Kortilta syötetään jännitettä sekä moottorin ohjaus- että pulssivahvistinkorteille. Tuotettavien jännitteiden ± 14 V ja $+5$ V lisäksi tuotetaan 42 V, 80 kHz kanttaaltao pulssivahvistinkorteille. Kortilla on myös valvonta syöttöjännitteestä. [71]

Pulssivahvistinkortti. Pulssivahvistinkortilla ohjataan sillan ylä- ja alahaaran GTO-tyristoreita. GTO-vaihtosuuntaajassa on kolme pulssivahvistinkorttia ja jokaisessa vahvistinkortissa on kaksi pulssivahvistinta. IGBT-vaihtosuuntaajassa IGB-transistoreiden ohjaimet sisältyvät pääpiirin liitäntäkorttiin. [71]

Katkojan ohjauskortti GTO-vaihtosuuntaajayksikössä. Kortti liittyy pääpiirin liityntäkorttiin ja apujännitekorttiin. Kortti ohjaa katkojan V17 GTO-tyristorin toimintaa. GTO-tyristorien ohjuksista muodostuu energiaa kondensaattoriin C9, joka syötetään takaisin tasajännitekiskoon ohjaamalla V17 -tyristoria. [71]

Tako- & I/O-liitäntäkortti. Korttiin liittyy yksikön digitaaliset tulo- ja lähtösignaalit. Kortille tulevat signaalit välitetään riviliitinkortilta Tako- & I/O-korttiin ja siitä edelleen moottorinohjauskortille. [71]

Riviliitinkortin kautta välitetään yksikköön liittyvät digitaaliset tulo- ja lähtösignaalit sekä analogiatulot ja -lähdöt. Riviliitinkortilta on myös liityntä IGBT-yksikön vahinkokäynnistyksen estokortille. Sovellusohjainkortti liittyy yksikköön joko riviliitinkortin tai tako- & I/O-kortin kautta. [71]

ACV-700 Linjakäytön rakenne, ulkoiset laitteistot ja sähkökäytön ohjausjärjestelmä

ACV-700 linjakäytön ulkoisiin laitteistoihin kuuluvat ulkoiset ohjauspiirit, tehonsyöttö, APC-sovellusohjain, moottori ja pulssianturi kaapelointineen.

Sähkökäytön ohjausjärjestelmään sisältyy sovellusohjain (APC) ja käytönohjain (DDC). Käyttöryhmän vakio-ohjaustoiminnot, kuten vääntömomentti- ja nopeussäädöt, tehoaste, vika-

diagnostiikka, käynnistys- ja pysäytyslogiikka sijaitsevat käytönohjaimessa. Muut säädöt ja ohjaustoiminnot sijaitsevat sovellusohjaimessa. Sovellusohjaimen tyypillisiä toimintoja ovat; ryhmän käynnistys- ja pysäytystoiminnot, sisäiset ja ulkoiset liittynät, nopeuden ohjearvo-
ketju, kuormanjaon asettelut, loggeritoiminnot ja järjestelmänkommunikointi. Sovellusohjain (APC) voi ohjata samanaikaisesti yhteensä neljää käytönohjainta. Sovellusohjain liittyy muihin järjestelmän sovellusohjaimiin ja ylemmäntason automaatiojärjestelmiin kommunikointiväylän kautta. Sovellusohjain ja käytönohjaimet liittyvät toisiinsa optisen kuitulinkin kautta. Käytönohjausryhmän rakenne löytyy liitteestä kolme. [54]

4.3.4 Säädettävien AC-käyttöjen toimintavarmuus

Kappaleessa 3.3 käsiteltiin laitteiston rakenteen vaikutusta toimintavarmuuteen. ACV-700 linjakäyttö muodostaa sarjarakenteisen kokonaisuuden, joka koostuu syöttöryhmästä ja vaihtosuuntaajyksiköistä käyttöineen.

Linjakäytön syöttöyksiköt vaihtosuuntaajineen ovat prosessinohjausjärjestelmän ja tuotantolinjan kautta sidoksissa toisiinsa. Edellä olevan perusteella linjakäyttöä on tarkasteltava sarjarakenteisena aina tuotantolinja kohtaisesti, sillä syöttöryhmän, vaihtosuuntaajyksikön tai ulkoisten liittyvien laitteiden rikkoutuessa lakkaa myös tuotannollinen toiminta. Linjakäytön laitteet on edellä olevan perusteella jaettava omiksi kokonaisuuksiksi prosessitoimialueen mukaista tarkastelua varten.

Taulukko 4.2 PK-7 linjakäytön laitteistot

		Vaihtosuuntaajyksiköitä	Epätahtikoneita
Tyristorisyöttöryhmiä	2	38	39
Diodisyöttöryhmä	4	13	11
Yhteensä [kpl]	6	51	50

Taulukko 4.3 PPK-7, linjakäytön laitteistot

		Vaihtosuuntaajajyksiköitä	Epätahtikoneita
Tyristorisyöttöryhmiä	3	65	102
Diodisyöttöryhmiä	-		
Yhteensä [kpl]	3	65	102

Taulukko 4.4 Väilirullain 71, linjakäytön laitteistot

		Vaihtosuuntaajajyksiköitä	Epätahtikoneita
Tyristorisyöttöryhmiä	1	4	4
Diodisyöttöryhmiä	-		
Yhteensä [kpl]	1	4	4

Taulukko 4.5 Väilirullain 72, linjakäytön laitteistot

		Vaihtosuuntaajajyksiköitä	Epätahtikoneita
Tyristorisyöttöryhmiä	1	4	4
Diodisyöttöryhmiä	-		
Yhteensä [kpl]	1	4	4

Taulukko 4.6 Pituusleikkuri, linjakäytön laitteistot¹⁾

		Vaihtosuuntaajajyksiköitä	Epätahtikoneita
Tyristorisyöttöryhmiä	1	2	2
Diodisyöttöryhmiä	1	13	16+19
Yhteensä [kpl]	2	15	37

1) Laitteistot yhdenmukaiset pituusleikkureilla 71 ja 72.

Taulukko 4.7 Superkalanteri, linjakäytön laitteistot²⁾

		Vaihtosuuntaajajyksiköitä	Epätahtikoneita
Tyristorisyöttöryhmiä	1	8	7
Diodisyöttöryhmiä	-	-	-
Yhteensä [kpl]	1	8	7

2) Laitteistot yhdenmukaiset superkalantereilla 71 ja 72.

Taulukko 4.8 Uudelleenrullain 71, linjakäytön laitteistot

		Vaihtosuuntaajajyksiköitä	Epätahtikoneita
Tyristorisyöttöryhmiä	1	4	5
Diodisyöttöryhmiä	-	-	-
Yhteensä [kpl]	1	4	5

ACV-700 linjakäyttöjen häiriöt

Laitteiston tai järjestelmän vioittumisten kehittymisestä saadaan hyvä kuva tekemällä arviointi silmämääräisesti graafisen kuvan avulla. Tarkoitukseen sopii ns. Nelson–Aalen–diagrammi. Diagrammi piirretään seuraavasti:

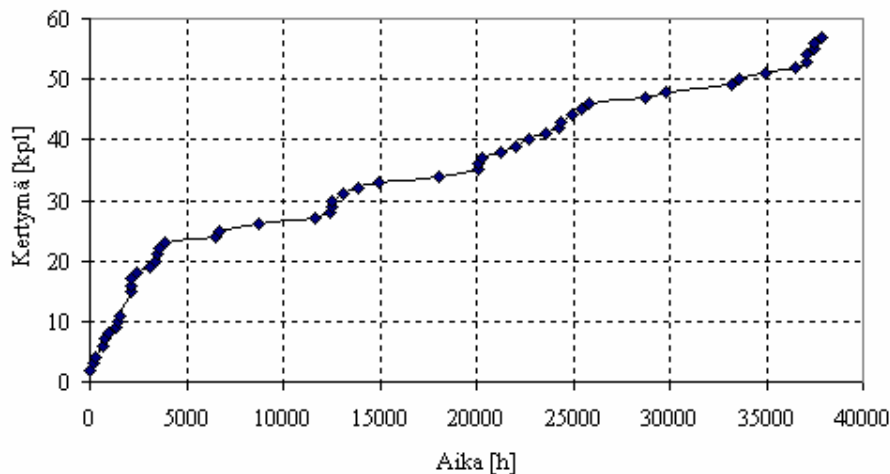
1. Muodostetaan pisteet (t_i, i) , missä t_i on i :ennen vikaantumisen vikaantumisaika ja i kertoo vikojen lukumäärän. Vikaantumisia on yhteensä tarkasteluvälillä $i=1, \dots, n$.
2. Pisteet piirretään koordinaatistoon, jossa vaaka-akseli kuvaa aikaa ja pystyakseli kertyneiden vikaantumisten lukumäärän.

Nelson–Aalen–diagrammin tulkinta:

- *pisteet asettuvat lineaarisesti käyrälle*, josta voidaan päätellä vikaantumisten väliaikojen olevan riippumattomia ja samoin jakautuneita. Prosessi on stationaarinen eli se ei muutu ajan kuluessa.
- *käyrän tangentin kulmakerroin kasvaa tai pienenee* ajan kuluessa. Prosessi joko paranee tai huononee.
- *selkeitä jaksoja peräkkäin*. Käyrä on jaettava osiin ja kiinnitettävä huomiota milloin järjestelmä saavuttaa vakiovikataajuuden.

Aineistoa ei välttämättä tarvitse tulkita Nelson–Aalen–diagrammin avulla vaan kuvaajat voivat olla myös porrasmaisia vikakertymäkuvaajia ajan funktiona ja jokaisen ”portaan” kohdalle voidaan tehdä merkintöjä kyseisestä vikakerrasta. [30], [31]

Kuvan 4.10 Nelson–Aalen–diagrammi on piirretty linjakäyttöjen häiriöistä vuosilta 1997 – 2001. [35]



Kuva 4.10 Nelson–Aalen diagrammi linjakäyttöjen häiriöistä

Kuvaajasta havaitaan pisteiden asettuvan lineaarisesti noin 4000 tunnista eteenpäin, jonka jälkeen vikaantumisten väliajat ovat riippumattomia ja samoin jakautuneita. Elektronisille laitteille voidaan käyttää yhtälön (3.1) vikatiheysfunktiota. Ratkaistaan koko laitteiston vikataajuus Nelson- Aalen diagrammin lineaariselta tarkasteluväliltä.

Tarkastelujaksoksi valitaan Nelson–Aalen–diagrammista aikaväli 3912 – 37896 tuntia, josta saadaan $\Delta T=33\,984$ tuntia. Tarkastelujakson alussa on ehjiä vaihtosuuntaajyksiköitä yhteensä 174 kappaletta, joita seurantajakson aikana rikkoutui yhteensä 34 kappaletta. Linjakäytön vaihtosuuntaajyksikölle vikataajuudeksi λ saadaan

$$\lambda = \frac{34}{\frac{174}{33984}} = 0,0000057 \frac{1}{h}$$

Vaihtosuuntaajyksikön keskimääräiseksi vikaväliksi *MTTF* saadaan 19,9 vuotta kaavan (3.3) avulla. Laitteiston keskimääräisen seisokkiajan *MDT* ollessa pieni verrattaessa vikaantumisaikaa, voidaan se jättää huomioimatta. Nyt voidaan olettaa $MTBF \approx MTTF$, kun $MDT \ll MTTF$.

Kirjallisuudesta saatuja *MTBF*-aikoja

Taulukossa 4.9 on esitetty muutamia *MTBF*-arvoja säädetyille käytöille ja käyttöihin liittyville komponenteille. [34]

Taulukko 4.9 Laskettuja *MTBF* aikoja taajuusmuuttajalle ja sen komponenteille

Laite/Komponentti	<i>MTBF</i>
Tyristori	33×10^6 h
GTO	1.7×10^6 h
Kondensaattoriipiirit	625 000 h
Suojauslaitteet	1.4×10^6 h
Digitaaliset ohjauslaitteet	100 000 – 200 000 h
Taajuusmuuttaja	46 000 h

Uuden laitteiston suunnitteluvaiheessa on otettava huomioon komponenttien käyttövarmuustiedot, joita löytyy mm. MIL-HDBK-217 Reliability Prediction of Electronic Handbook –

julkaisusta. Komponenttien keskimääräisen vikaintensiteetin laskenta esitetään MIL-HDBK-217 –julkaisussa mm. seuraavat asiat huomioiden: laitteen oppimiskerroin, laatutekijä, piirin monimutkaisuuskerroin, lämpötilatekijä ja ympäristötekijä. Edellä minituista asioista johtuen taulukon 4.9 arvoja on pidettävä suuntaa antavia.

Prosessitoimialueen mukaiset *MTTF*- ja λ -arvot

Lasketaan laitteistojen keskimääräiset vikavälit taulukoiden 4.2 - 4.8 mukaisista laitekokonaisuuksista huomioimalla tarkastelussa vaihtosuuntaajyksiköiden lukumäärä. Nelson-Aalen diagrammin lineaarisen tarkastelujakson aikana ($\Delta t=33984$ h) ilmeni linjakäyttöjen syöttöyksiköissä ainoastaan kolme syöttöryhmähäiriötä. Syöttöryhmissä olisi täytynyt tapahtua useampi häiriö syöttöryhmän tyyppin ja teholuokan mukaan, jotta aineiston perusteella pystyttäisiin määrittelemään erikseen keskimääräiset vikaintensiteetit diodi- ja tyristorisyöttöryhmille ja ottamalla huomioon syöttöryhmien vaikutukset myös kokonaistarkastelussa. Linjakäyttöjä tarkastellaan nyt sarjarakenteisena kokonaisuutena ja laitteistoihin liittyvät tunnusluvut on laskettu kaavojen (3.3) ja (3.5) avulla.

Taulukko 4.10 Linjakäyttöjen keskimääräinen vikaväli ja vikaintensiteetti

	INU	PPK7	PK7	PL71&72	SK71&72	VR71&72	URK71
λ	$5,75 \times 10^{-6}$	374×10^{-6}	287×10^{-6}	$86,2 \times 10^{-6}$	46×10^{-6}	23×10^{-6}	23×10^{-6}
<i>MTTF</i> [h]	173 918	2 676	3 478	11 595	21 740	43 480	43 480
<i>MTTF</i> [a]	19,9	0,3	0,4	1,3	2,5	5,0	5,0

Taulukkoon 4.10 liittyvät lyhenteet:

INU	Vaihtosuuntaaja
PPK7	Päällystyskone 7, linjakäytön vaihtosuuntaajat yht. 65 kpl.
PK7	Paperikone 7, linjakäytön vaihtosuuntaajat yht. 51 kpl.
PL71&72	Pituusleikkuri 71 tai 72, linjakäytön vaihtosuuntaajat 15 kpl.
SK71&72	Superkalanteri 71 tai 72, linjakäytön vaihtosuuntaajat 8 kpl.
VR71&72	Välirullain 71 tai 72, linjakäytön vaihtosuuntaajat 4 kpl.
URK71	Uudelleenrullain 71, linjakäytön vaihtosuuntaajat 4 kpl.

Taulukosta 4.10 havaitaan yksittäisen vaihtosuuntaajayksikön olevan hyvin luotettavan *MTTF*-arvon ollessa 19,9 vuotta, mutta vastaavasti päällystyskoneen ja paperikoneen linjakäyttöjen keskimääräinen vikaväli jää hyvin lyhyeksi. Paperikoneen ja päällystyskoneen lyhyt keskimääräinen vikavälin johtuu linjakäytön kriittisestä rakenteesta prosessin suhteen. Mikäli linjakäytön vaihtosuuntaajien toimintoja varmistettaisiin vikatilanteissa, johtaisi se monimutkaisiin laitteistorakenteisiin. Redundanssi vaatii ainakin varmistettavien laitteistojen kaksinkertaistamista ja ohjausjärjestelmän rakenne monimutkaistuisi, koska toimintaa täytyy myös ohjata. Laitteistorakenteesta muodostuu epäkäytännöllinen kokonaisuus, mutta joissakin kriittisissä prosesseissa se on ainoa toimintamalli jolla toiminnat voidaan varmistaa. Linjakäytössä redundanssia ei ole järkevää toteuttaa, vaan on huolehdittava mahdollisimman nopeasta huoltohenkilöstön toteuttamasta korjaustoiminnasta.

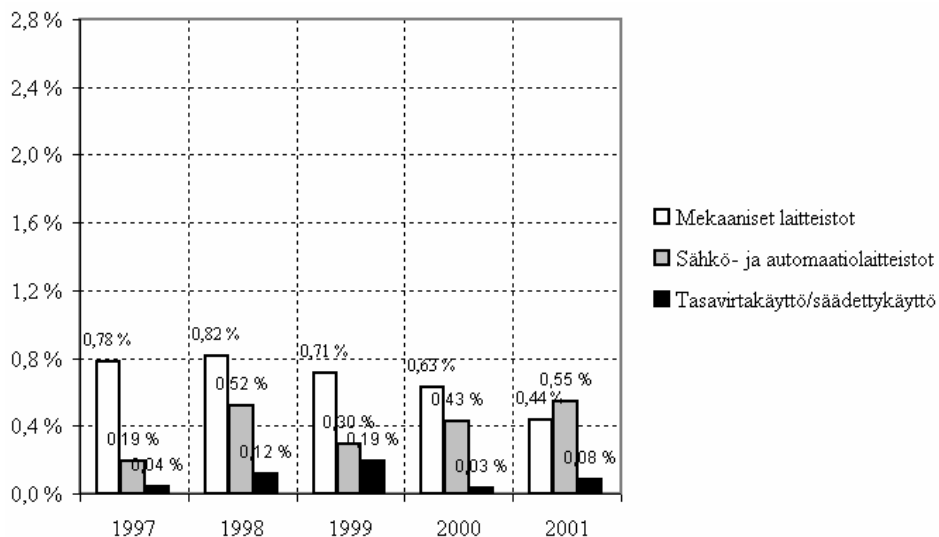
5. PAPERIKONEIDEN SEISOKKIMÄÄRIEN VERTAILU

Vertaillaan kolmen eri paperikoneen sähkökäyttöjen seisokkimääriä keskenään. Vertailtavat koneet ovat StoraEnso Oy:n Kemin tehtaiden paperikone 5 ja Oulun tehtaiden paperikoneet 6 ja 7. Paperikone viisi on aloittanut tuotannollisen toimintansa vuonna 1971, paperikone kuusi vuonna 1991 ja paperikone seitsemän vuonna 1997. Paperikoneiden käytöt ovat pääasiassa käyttöönottoajan mukaista tekniikkaa eli paperikone viiden ja kuuden lähes kaikki käytöt ovat tasavirtakäyttöjä muutamia modernisointikohteita lukuun ottamatta ja vastaavasti paperikone seitsemän linjakäytöt ovat vektori- tai skalaarisäädettyjä epätahtimoottorikäyttöjä.

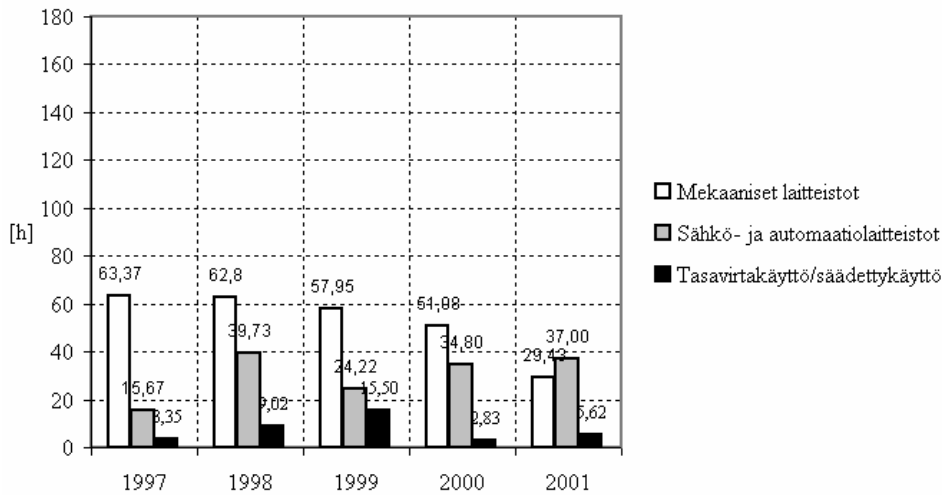
5.1 Paperikoneiden ennakoimattomat sähköseisokit

Paperikone 5

Tarkastellaan paperikone viiden seisokkitunteja ja –prosentteja vuosilta 1997 – 2001. Kuvassa 5.0 esitetään seisokkiprosentit ja kuvassa 5.1 seisokkitunnit sekä mekaanisille että sähköisille häiriöille. Lisäksi kaaviossa esitetään erikseen tasavirtakäyttöjen häiriömäärät [37], jotka sisältyvät myös sähkö- ja automaatiolaitteiden seisokkimääriin.



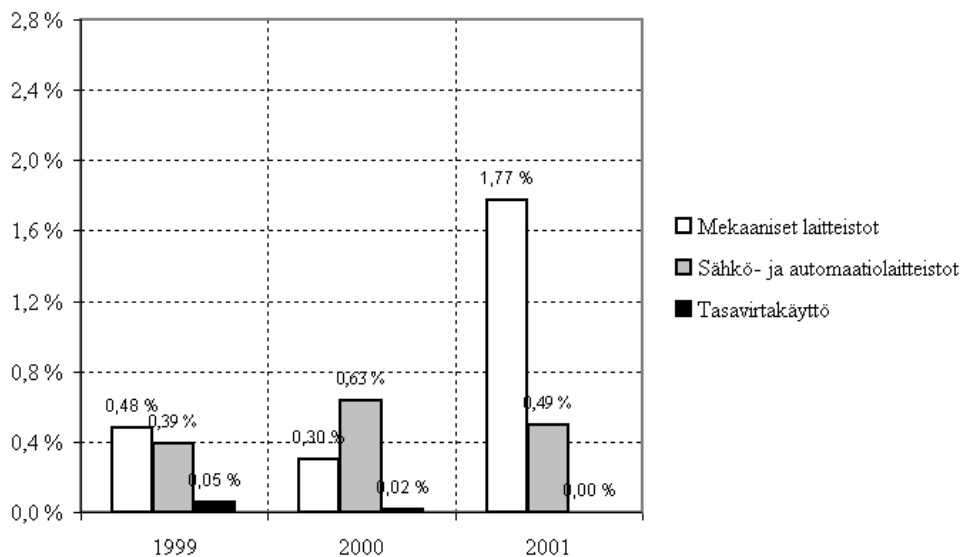
Kuva 5.0 Paperikone viiden sähköisten ja mekaanisten laitteiden seisokkiprosentit vuosilta 1997 – 2001



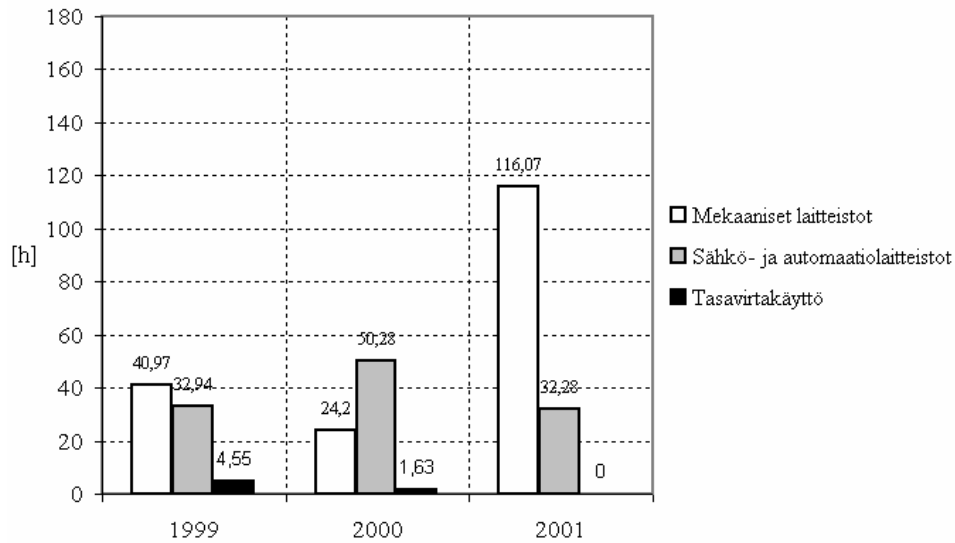
Kuva 5.1 Paperikone viiden sähköisten ja mekaanisten laiteiden seisokitunnit vuosilta 1997 – 2001

Paperikone 6

Paperikone kuudelta oli käytettävissä seisokkitiedot vuosilta 1999 – 2001.[36] Kuvassa 5.2 esitetään seisokkiprosentit ja kuvassa 5.3 seisokitunnit sekä mekaanisille että sähköisille häiriöille. Tasavirtakäyttöjen häiriömäärät sisältyvät myös sähkö- ja automaatiolaitteiden seisokkimääriin.



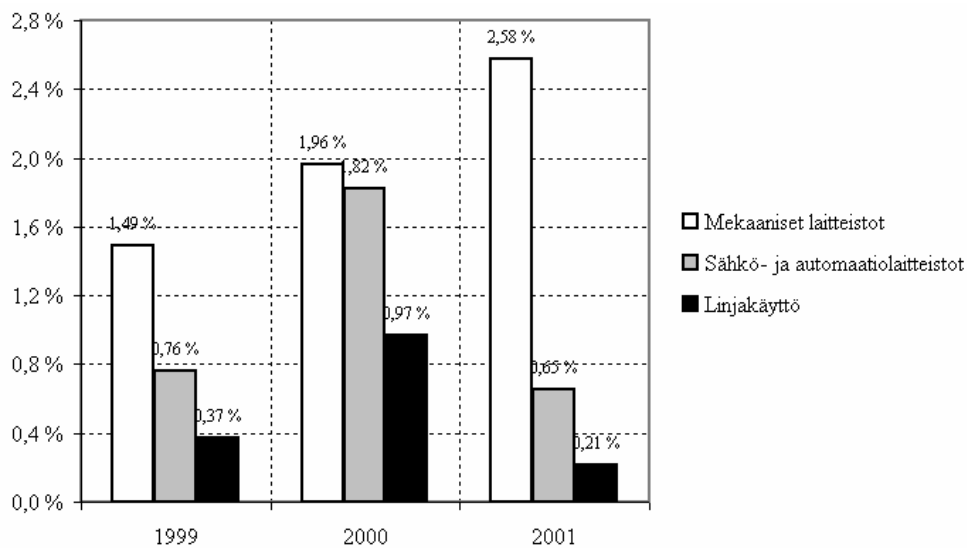
Kuva 5.2 Paperikone kuuden sähköisten ja mekaanisten laiteiden seisokkiprosentit vuosilta 1999 – 2001



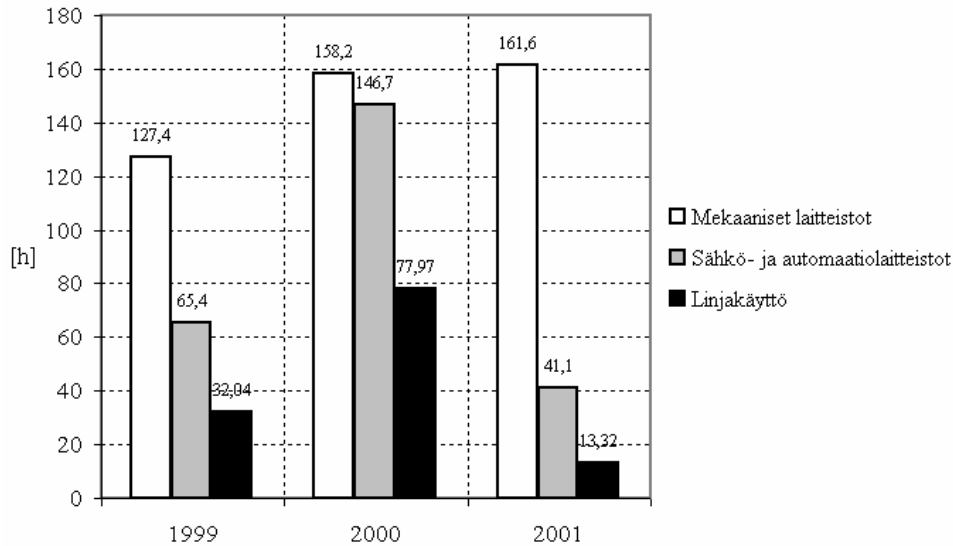
Kuva 5.3 Paperikone kuuden sähköisten ja mekaanisten laiteiden seisokitunnit vuosilta 1999 – 2001

Paperikone 7

Paperikone seitsemältä oli käytettävissä seisokkitiedot vuosilta 1999 – 2001 [36] ja sähkökäyttöjen häiriötiedot vuosilta 1997 – 2001. [35] Kuvassa 5.4 esitetään seisokkiprosentit ja kuvassa 5.5 seisokitunnit sekä mekaanisille että sähköisille häiriöille. Linjakäytön häiriöt sisältyvät myös sähkö- ja automaatiolaitteiden seisokkimääriin.



Kuva 5.4 Paperikone seitsemän sähköisten ja mekaanisten laiteiden seisokkiprosentit vuosilta 1999 – 2001



Kuva 5.5 Paperikone seitsemän sähköisten ja mekaanisten laiteiden seisokkitunnit vuosilta 1999 – 2001

5.2 Paperikoneiden sähkökäyttöjen seisokkimäärien vertailu

Paperikoneiden seisokkimääriä verratessa havaitaan Paperikone seitsemän linjakäytön aiheuttavan huomattavasti enemmän paperikonetta pysäyttäviä seisokkeja kuin Paperikone kuuden ja Paperikone viiden tasavirtakäyttöjen. Lisäksi Paperikone seitsemän linjakäyttö on aiheuttanut vuosina 1999 ja 2000 noin 50 % kaikista sähkö- ja automaatiolaitteiden seisokeista paperikoneella. Paperikone kuuden ja seitsemän seisokkimäärät ovat likimain suoraan verrattavissa toisiinsa, sillä huolto-organisaatio työaikamuodossa 37 on molemmilla koneilla yhteinen. Työaikamuodossa 15 työskentelee oma alueellinen sähkö- ja automaatiokunnossapito molemmilla koneilla. Työkulttuurin voidaan olettaa olevan samankaltainen, joten paperikoneiden seisokkimäärien eroavaisuuden syyt eivät löydy huolto-organisaatiosta vaan tekniikan erilaisuudesta. Paperikone viiden tasavirta- ja säädettyjen käyttöjen häiriöitä tarkasteltaessa voidaan todeta häiriömäärien pienenevän entisestään, mikäli taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamat häiriötunnit karsittaisiin pois, esimerkiksi vuonna 1999 kirjatut tasavirtakäyttöjen aiheuttamat seisokkituntimäärät jäisivät 5 tuntiin ja 9 minuuttiin ja vuonna 2001 vastaavasti 4 tuntiin ja 22 minuuttiin. [37]

6. HUOLTO

6.1 Huoltokohteiden tarkastelu

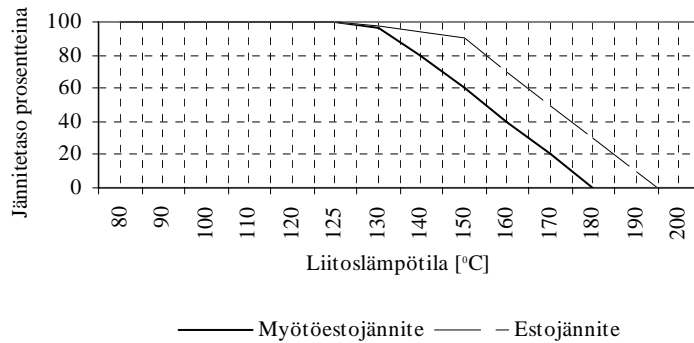
6.1.1 Syöttöyksikkö

Linjakäyttöihin kuuluu kaikkiaan 18 syöttöryhmää, joista 12 kappaletta on tyristorijarrutusyksiköitä ja loput kuusi kappaletta diodisyöttöryhmiä. Tyristori- ja diodisyöttöryhmän pääpiiri-kaaviot on esitetty liitteessä neljä. Linjakäyttöjen syöttöryhmien tehojen jakautuminen on esitetty taulukossa 6.1. Syöttöjännitteeltään 400 VAC olevat syöttöryhmät syöttävät IGBT-vaihtosuuntaajia ja 690 VAC jännitealueen laitteistot syöttävät GTO-vaihtosuuntaajia.

Taulukko 6.1 Syöttöryhmien tehot

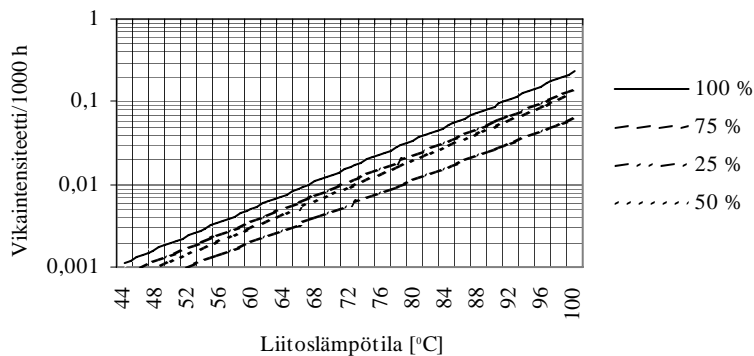
Syöttöryhmän tunnus	Teho, syöttöjännite ja syöttöryhmän tyyppi
101, 102, 103, 104	2500 kVA, 690 VAC, diodisyöttöryhmä
105, 106, 301, 302, 201, 401, 501, 601, 701, 801	2500 kVA, 690 VAC, tyristorisyöttöryhmä
303	1000 kVA, 400 VAC, tyristorisyöttöryhmä (2000 kVA, 500 VAC)
901	400 kVA, 690 VAC, tyristorisyöttöryhmä
702, 802	400 kVA, 400 VAC, diodisyöttöryhmä

Syöttöryhmän puolijohdekytkimien vikaantumiseen ja toimintaan vaikuttaa ratkaisevasti komponentin liitoslämpötila. Liitoslämpötilaan voidaan vaikuttaa ratkaisevasti laitteiston suunnitteluvaiheessa ja myöhemminkin voidaan tehostaa jäähdytysmenetelmiä, mikäli puolijohdehokytkimien *MTTF*-arvot lyhenevät ratkaisevasti. Puolijohdekytkimien suunnittelussa liitoslämpötilan maksimiarvona käytetään $T_j = 125$ °C, koska sitä ylemmässä lämpötilassa tyristorin ominaisuudet heikkenevät. Kuvassa 6.1 on esitetty tyristorin myötä- (U_{DRM}) ja estojännitekestoisuus (U_{RRM}) liitoslämpötilanfunktiona.



Kuva 6.1 Tyristorin myötä- ja estojännitekestoisuus liitoslämpötilanfunktiona. [59]

Linjakäytön tyristorijarrutusyksikön puolijohdetehokytkimien yllämpötilasuojaus toimii silloin, kun jäähdytyselementin lämpötila nousee 90 °C:een. Tyristorisyöttöyksikkö pysähtyy välittömästi, mikäli se ei toimi generaattorina. Generaattorina toimiessaan tyristoreiden ohjaus lopetetaan virran muututtua epäjatkuvaaksi. Kuvasta 6.1 havaitaan, että tyristoreiden jännitekestoisuus on vielä linjakäytön rajalämpötilassa riittävä. Tarkasteltaessa tyristoreiden vikaintensiteettiä eri lämpötiloilla havaitaan jäähdytyksen ratkaiseva merkitys tyristorin MTTF-arvoihin. Kuvassa 6.2 on esitetty tyristoreiden vikaintensiteetti liitoslämpötilan sekä sovelletun jännitteen ja myötäestojännitekestoisuuden suhteena.



Kuva 6.2 Tyristorin vikaintensiteetti liitoslämpötilan ja jännitesuhteen funktiona [59]

Kuvasta 6.2 voidaan havaita puolijohdekytkimien teoreettisen vikavälin olevan hyvin riippuvaisen jäähdytyksestä. Syöttöryhmien ja GTO-vaihtosuuntaajien tyristorisiltojen lämpötilat liikkuvat 30 - 45 °C alueella normaalissa käyntitilanteessa. Kuvien 6.1 ja 6.2 tarkat alkuperäiset kuvaajat löytyvät liitteestä viisi.

Puolijohdekomponenttien jäähdytselementtien avulla laajennetaan komponentin termistä pinta-alaa siten, että häviöteho johdetaan ympäröivään jäähdytysaineeseen, jolloin puolijohteessa syntynyt lämpö siirtyy pois. Linjakäytön puolijohdekytkimiä jäähdytetään puhaltimien avulla. Käytettävä jäähdytysilma otetaan suoraan sähkötilasta. Sähkötilat ovat tehokkaasti ilmastoituja ja tilavia, joten sähkötiloissa ongelmia syntyy ainoastaan ilmastointilaitteistojen rikkoutuessa. Laitetilan sisällä lämpötila nousee huomattavasti, mikäli ei käytetä pakotettua konvektiota. Lisäksi laitetilojen jäähdytystä on muutamissa kohteissa tehostettu viemällä ilmastointikanava suoraan laitetilaan. Jäähdytysolosuhteita voitaisiin parantaa vielä muutamissa yksittäisissä kohteissa, joissa laitepuhaltimen ja sähkötilan ilmastointikanavien ilmastointiaukot puhaltavat jäähdytysilmaa lähes vastakkaisista suunnista estäen osin ilmankiertoa. Jäähdytselementteinä syöttöryhmissä on käytetty yksi- ja kaksipuolisia alumiiniprofiileita. Yksipuoleisia jäähdytselementtejä on käytetty 400 kVA diodisyöttöryhmissä ja muissa ryhmissä on kaksipuoleiset jäähdytselementit.

Syöttöryhmien puolijohdekytkimien vikaantuminen ei ole ongelma paperikoneen linjakäytössä. Puolijohdekytkimiä ei ole vaurioitunut seurantajakson aikana syöttöryhmistä yhtään kappaletta. Mahdollisia ongelmia puolijohdehokytkimissä aiheuttavat suuret virrat ja jännitteet. Suuri virta edellyttää, että käytetään suurta pinta-alaa ja tasaisen virranjakauman varmistamiseksi on puolijohteen saostuksen ja muiden ominaisuuksien oltava tasaisia. Valmistuksen virheet voivat aiheuttaa erilaisia rappeutumisiilmiöitä. Puolijohdehokytkimien vikaintensiiviteettien lämpötilariippuvuuden vuoksi on syöttöryhmien yhtenä kunnonvalvontatoimenpiteenä seurattava sähkötilojen ilmastointilaitteistojen ja syöttöryhmien jäähdytyspuhaltimien kuntoa, jotta varmistettaisiin puolijohdekytkimien hyvät jäähdytysolosuhteet.

Puolijohdehokytkimien yhtenä kunnonvalvontatoimenpiteenä voidaan pitää myös vuotovirran mittausta. Kyseistä mittausta ei voida toteuttaa kuin seisokissa. Kyseisellä mittauksella voidaan todeta onko vuotovirta vastaavalla tasolla kuin laitevalmistaja on ilmoittanut komponentin teknisissä tiedoissa. Mikäli halutaan analysoida mittaustuloksia tarkemmin, on puolijohdehokytkimien vuotovirran kehittymistä seurattava käyttöönotosta lähtien ja puolijohdehokytkimien vuotovirralla olisi pystyttävä määrittämään teholuokittain erillinen kunto-

käyrä komponentin vaihtotasoineen. Liitteessä kymmenen esitetään laitetoimittajan käyttämät vuotovirran raja-arvot hila-katodijännitteen funktiona.

Tyristorin kytkentäominaisuudet perustuvat puolijohderajapinnan aukkojen ja elektronien muodostaman estovyöhykkeen muodostumiseen. Tyristorin toiminta riippuu sen läpi kulkevan virran ja siihen vaikuttavan jännitteen muutosnopeuksista. Tyristorin du/dt -kestoisuudella tarkoitetaan suurinta sallittua anodijännitteen nousunopeuden arvoa, jolla tyristori ei syty siirtäessä annetusta staattisesta myötäestotilasta sulkutilaan. Tyristorin sammuttamiseksi tulee virta saattaa nollassa. Sammutustilanne vaatii aikaa, koska puolijohderajapinnan varauksen kuljettajat siirtyvät uuteen vyöhykkeeseen, muodostaakseen uuden estokerroksen. Ennen kuin riittävä rajapintasulkujännite muodostuu, syntyy tyristoriin takavirta. Takavirran suuri muutosnopeus voi aiheuttaa tyristorin ulkopuolisissa induktansseissa huomattavia jännitepiikkejä. Jännitepiikkejä voidaan vaimentaa RC -suojan avulla. Tyristorin saadessa sytytyspulssin alkaa anodivirta kasvaa ulkoisen piirin määräämällä kulmakertoimella ja nousuajan jälkeen anodivirta saavuttaa ulkoisen piirin määräämän virran. Koko katodialueen saaminen johtavaksi voi viedä satoja mikrosekunteja. Tyristorin paikallisen kuumentumisen estämiseksi on tyristorille määritelty suurin sallittu virran nousunopeus eli di/dt -kestoisuus. Jos virran nousunopeutta ei ole rajoitettu tarpeeksi pieneksi voi ensiksi syttynyt pistemäinen alue kuumentua liiaksi ja tuhoutua. Yksinkertaisin tapa parantaa tyristorin di/dt -kestoisuutta on kasvattaa hilavirtapulssia ja sen nousunopeutta. Isommalla ja jyrkällä pulssilla saadaan suurempi alue johtavaan tilaan eli tyristori on aina sytytettävä riittävän tehokkaalla ohjausvirtapulssilla. Ohjattaville puolijohdetehokytkimille määritellään soveltuvat ohjausvirran ja jännitteen raja-arvot syttymisalueittain, joilla tyristori ei syty, syttyminen on mahdollinen ja varman syttymisen alue. Seurattaessa tyristoreiden ohjauspulssien jännite- tai virtatasoa säännöllisten mittaustoimenpiteiden avulla voidaan mahdollisesti ennaltaehkäistä sillan puolijohdetehokytkimien vaurioituminen liian heikon ohjauspulssin vuoksi. [58]

RC-suoja

Diodeissa ja tyristoreissa tarvitaan suojauspiirejä vähentämään ylijännitteitä. RC -suoja käytetään diodien ja tyristoreiden yhteydessä alentamaan komponentin sammussa esiintyvää ylijännitettä ja sen nousunopeutta. Tyristorin tai diodin sammussa RC -piiri tarjoaa kulkutien in-

duktiiviselle virralle. AC-piirin induktanssi muodostuu muuntajan hajainduktanssista ja vaiheen induktanssista. Suojan vaurioituminen näkyy tyristorin tai diodin yli olevan jännitteen käyrämuodossa. [56]

Oikosulkusuojaus

Tyristoreiden ja diodien oikosulkusuojaus onnistuu erikoisnopeiden sulakkeiden avulla. Sulakesuojauksen toimivuus edellyttää, että suojattavan komponentin I^2t -arvo on suurempi kuin sulakkeella, sulakkeen tulee kestää normaalin kuormituksen rasiukset ja suojaustilanteessa ei ylitetä puolijohdtehokeytkimen jännitekestoisuutta. Tyristorijarrutusyksikössä tehopuolikomponentit on suojattu niiden kanssa sarjaan kytketyillä erikoisnopeilla sulakkeilla. Diodisyöttöryhmässä erikoisnopeat suojaussulakkeet on sijoitettu syöttöjohtimiin. Tyristorikohtainen suojaus tuo etuja myös vian paikallistamiseen, koska toimineiden sulakkeiden perusteella voidaan määrittää vika nopeammin kuin vaihekohtaisessa suojausmallissa. [56]

6.1.2 DC-välipiiri

DC-välipiirin energiavarasto muodostuu kuristinyksiköstä ja kondensaattoriyksiköstä. DC-kuristinyksikön tehtävänä on tasasuuntaajan virran suodatus. Syöttöryhmissä 702 ja 802 diodisilta, kuristin ja kondensaattoriyksikkö ovat samassa laitepaketissa ja lisäksi kyseisten syöttöryhmien DC-välipiireihin on liitetty jarrukatkojan välityksellä jarruvastukset. Tyristorisyöttöryhmässä 901 tyristorisillan kanssa on samassa kotelossa myös DC-kuristin. Muissa laitteistoissa DC-välipiirin komponentit ovat erillisinä kokonaisuuksina.

Linjakäytössä olevat DC-kuristimet ovat ilmajäähdytteisiä kaksipylväskuristimia. Kuristimien jäähdytystä on tehostettu puhaltimien avulla. Kuristimen mittaukseen voidaan käyttää mittasiltaa, jonka avulla pystytään määrittämään kelan induktanssi ja hyvyysluku. Käytössä olevien DC-kuristinyksiköiden valmistaja suorittaa tuotteilleen jännitekokeen ja induktanssinmittauksen. Kuristinyksikön kunnonvalvontamittauksena voidaan käyttää myös eristysvastusmittausta. Käytössä olevien DC-kuristinyksiköiden materiaalina on käytetty vähintään lämpöluokan B-materiaaleja. Suurimmilla teholuokilla kuristimet valmistetaan H-lämpöluokan mate-

riaaleista, vaikka kuristin on termisesti mitoitettu F-luokkaan. Vikaintensiteettejä ei kyseisistä laitevalmistajan komponenteista ole käytettävissä. Kirjallisuudesta löytyy joitakin yleisiä arvoja, joissa käämittyjen komponenttien vikaväli on 57 – 114 vuoden välillä. Yleisten vikavälitietojen perusteella kuristinyksikköä voidaan pitää luotettavana komponenttina. Mikäli kuristin vikaantuu, tapahtuu se yleensä heti käyttöönotossa. Kuristinyksiköiden kunnonvalvontatoimenpiteenä voidaan eristysvastusmittauksen, silmämääräisen tarkastuksen sekä lämpökuvauksen lisäksi seurata mahdollista äänitason nousua, joka aiheutuu kuristimen rakenteiden löystymisestä. [50]

Linjakäytön kondensaattoriyksiköihin kuuluvat sarjaan- ja rinnankytketyt kondensaattorit, tassaustukset ja ohjauskortti. Kondensaattoriyksiköissä käytettyjen kondensaattoreiden sähköisiin ominaisuuksiin ja elinikään vaikuttaa ratkaisevasti käyttöympäristö. Korkea lämpötila aiheuttaa kondensaattoreissa kemiallisia muutoksia, mikä lyhentää kondensaattoreiden elinikää. Käyttölämpötilan nouseminen aiheuttaa lämpölaajenemista ja dielektrisyysvakion muuttumisen, jonka johdosta kapasitanssiarvo muuttuu. Kondensaattorin vuotovirta myös kasvaa lämpötilan noustessa. Linjakäytön kondensaattoriyksiköissä käytetään elektrolyyttikondensaattoreita. Elektrolyyttikondensaattorin käyttöikä on rajallinen elektrolyytin haihtumisen vuoksi. Kondensaattorin elinikä kaksinkertaistuu aina 7...10 °C lämpötilan alennusta kohden. Pitkäikäisten kondensaattoreiden elinikä on noin 100 000 tuntia + 60 °C lämpötilassa. Lisäksi elektrolyyttikondensaattoreiden vuotovirta kasvaa, mikäli kondensaattori on pitkään jännitteen. Vuotovirta pienenee jännitteen kytkennän jälkeen oksidikerroksen pakkautuessa pysyvään arvoonsa muutaman minuutin kuluessa. Edellä olevan perusteella kondensaattoreita sisältävien laitteistojen ja korttien varastoinnissa on pyrittävä lyhyihin varastointiaikoihin ja tarvittaessa laitteistoja ja kortteja on virkistettävä. Kondensaattorin liittäminen suoraan nimellisjännitteeseen pitkän varastoinnin jälkeen voi johtaa niin suureen vuotovirtaan, että kondensaattori rikkoontuu. Oksidikerros muodostetaan uudelleen kytkemällä kondensaattori vastuksen välityksellä tasajännitteeseen, siten ettei vuotovirta nouse liian suureksi ja jännitetaso nostetaan hitaasti nimellisjännitteen suuruiseksi.

Eräs kondensaattorivalmistaja lupaa valmistamilleen pitkäikäiselle kondensaattorityypille 1×10^{-7} 1/h vikaintensiteetin 60 °C lämpötilassa. Kyseisen kondensaattorivalmistajan komponent-

teja on käytetty myös linjakäytön vaihtosuuntaajien korteilla. Lisäksi kondensaattoreiden vikaintensiteettiin vaikuttaa voimakkaasti käytetty jännitetaso ja lämpötila. Liitteestä kuusi löytyy lisätietoja kondensaattorin ominaisuuksista, sijaiskytkennästä ja vikaintensiteeteistä jännitesuhteen ja lämpötilan funktiona. [55], [56]

Elektrolyyttikondensaattoreiden laskennallisen eliniän aikana vikaintensiteetti pysyy vakiona, minkä jälkeen vikaintensiteetti alkaa kasvaa. Käytössä olevien pitkäikäisten elektrolyyttikondensaattoreiden todellinen elinikä voi olla laskennallista arvoa pidempi. Mikäli kondensaattoriyksiköitä ei vaihdeta noin 10 vuoden käytön jälkeen, on niiden kuntoa alettava seurata säännöllisten mittausten avulla. Todennäköisesti riittää, kun seurataan muutamien erikseen valittujen syöttöryhmien kondensaattoriyksiköiden ekvivalenttista sarjaresistanssia, koska laitteistot on otettu samaan aikaan käyttöön ja lisäksi voidaan olettaa käytössä olevien komponenttien vanhenevan likimain samankaltaisesti. Elektrolyyttikondensaattoreiden eliniän raja-arvoina voidaan käyttää kondensaattorin kapasitanssin toleranssiarvoja ja ekvivalenttista sarjaresistanssia sekä vuotovirtaa. Kondensaattorin voidaan katsoa vikaantuneen, kun kyseiset arvot ylittävät valmistajan ilmoittamat toleranssirajat. Eräs laitevalmistaja ilmoittaa kondensaattorin laskennallisen eliniän päättyneen silloin, kun ekvivalenttinen sarjaresistanssi ylittää kaksinkertaisesti alkuperäisen arvonsa taajuuksilla 1 kHz ja 100 Hz lämpötilassa 20 °C, vuotovirran ylittäessä raja-arvonsa ja kondensaattorin häviökertoimen ylittäessä 1.3 kertaa määritellyn arvonsa sekä kapasitanssin poiketessa toleranssiarvoista $\Delta C/C$ yli ± 15 prosenttia kondensaattorin nimellisjännitealueella $10 \leq U \leq 160$ ja yli ± 10 prosenttia yli 160 V jännitteillä. [57]

Jarruvastus

Diodisyöttöryhmässä jarrukatkojan avulla ohjataan tehoa jarruvastukseen, kun tasajännitevälipiirin jännitetaso nousee yli 15 prosenttia nimellisestä. Jarruvastus on varustettu yllämpökylimellä vastuksen liiallisen lämpenemisen estämiseksi katkojan häiriötilanteessa. Jarrukatkoja voi aktivoitua toimimaan myös verkon ylijännitepiikeistä. [53]

6.1.3 GTO- ja IGBT-vaihtosuuntaaja

IGBT-vaihtosuuntaajia on käytössä yhteensä 72 kappaletta. Päällystyskoneen syöttöryhmässä 303 on käytössä yhteensä 48 kappaletta IGBT-vaihtosuuntaajayksiköitä teholuokka-alueella 50 - 150 kVA. Pituusleikkureiden syöttöryhmissä 702 ja 802 on yhteensä 24 kappaletta IGBT-vaihtosuuntaajia tehoalueella 50 - 100 kVA. GTO-vaihtosuuntaajia on käytössä kaikkiaan yhteensä 102 kappaletta tehoalueella 40 - 2000 kVA. Suurimmat 2000 kVA:n käytöt ovat rinnankytkettyjä konstruktioita, joissa on erillinen isäntä- ja orjakäyttö. Rinnankytkennässä on käytettävä epätahtimoottoria, jossa on kaksi identtistä ja erillistä staattorikäänitystä. Kyseisiä käyttöjä on yhteensä neljä kappaletta.

IGBT-vaihtosuuntaajia käytetään pienimmillä tehoalueilla ja vaihtosuuntaajayksiköt on sijoitettu linjakäytön keskukseen, vaikka IGBT-vaihtosuuntaajat ovat lähes kokonaan koteloidut. Vaihtosuuntaajien DC-liittimet ovat näkyvillä ja nopeuttavat tarvittaessa yksikön vaihtotyötä. IGBT-vaihtosuuntaajayksikön tehokomponenttien vikaantuessa on todennäköisesti nopeampaa ja tuotannollisesti edullisempaa vaihtaa varaosayksikkö vikaantuneen laitteen tilalle, ennen kuin paikallistaa vika ja korjata rikkoontunut laite käyttöpaikalla. IGBT-vaihtosuuntaajien osalta tulisi keskittyä korjaavaan kunnossapitoon siten, että laitteiston vikaantuessa vuorossa oleva kunnossapidon henkilökunta pystyy mahdollisimman nopeasti vaihtamaan vikaantuneen vaihtosuuntaajan ja päivittämään laitteistoihin liittyvät asetukset. Käytössä oleville IGBT-vaihtosuuntaajille on kaikille teholuokille vaihtoyksiköt.

Puolijohteen vaurioitumisen aiheuttaa pääsääntöisesti joko ylijännite tai tehokomponentti ei kestä siihen kohdistuvia du/dt - ja di/dt -rasituksia. Komponentin vaurioituminen voi aiheutua myös ylivirrasta sekä puolijohteen liiallisesta lämpenemisestä.

IGBT-transistorin suojaustasoon vaikuttaa kytkentätaajuus, koska virran katketessa syntyy piiriin ylijännitteitä. Syntyvät ylijännitepiikit lisäävät suojauspiirissä olevan kondensaattorin varauksia. Kondensaattoreihin syntynyt lisävaraus poistetaan tehotransistorin sytytyksen yhteydessä suojauspiirissä olevan purkausvastuksen avulla. Suojauspiirin kondensaattoreiden avulla pystytään tasaamaan piirin ylijännitteitä.

Oikosulkuilanteessa pieni-impedanssisessa piirissä oikosulkuvirta nousee hyvin korkeaksi ja aiheuttaa puolijohteen tuhoutumisen. IGBT-vaihtosuuntaajan kuormitusilanteesta huolehditaan ohjelmallisesti. IGBT-vaihtosuuntaajan oikosulkusuojaus onnistuu komponenttien valvonnan avulla. IGBT-vaihtosuuntaajan kollektori-emitteri-jännitettä tutkitaan, jos haluttua jännitetasoa ei saavuteta ohjataan silta jännitteettömäksi. Oikosulkuilanteessa katkaistaan oikosulkuvirta ohjaamalla tehokomponentit johtamattomaksi. Vaihtosuuntaajan sulakesuojauksella pystytään vastaavasti estämään oikosulkusuojauksen epäonnistuessa vaurioiden leviäminen laajemmalle linjakäyttöön. Linjakäytön DC-välipiirin ja IGBT-vaihtosuuntaajan välissä käytetyt sulakkeet suojaavat myös epätahtimoottoria ja syöttökaapelia. [51]

IGBT-vaihtosuuntaajat sisältävät myös välipiirin DC-kondensaattorit, jotka ovat elektrolyytikondensaattoreita. Edellä olevan perusteella ei linjakäytön syöttöryhmässä tarvita välttämättä erillisiä tasajännitevälipiirin kondensaattoriyksiköitä, mikäli kaikki käytettävät laitteistot ovat IGBT-vaihtosuuntaajia. [52]

GTO-vaihtosuuntaajissa käytetyt puolijohdekytkimet voidaan syyttää kuten tyristorit positiivisella ohjauspulssilla sekä sammuttaa negatiivisella ohjauspulssilla. GTO-tyristoreita käytetään suurilla tehoilla ja tehokomponentti on yleensä suojattu sekä sytytys- että sammutussuojilla. Tarkastellaan aikaisemmin kuvassa 4.9 esitettyä vaihtosuuntaajayksikköä kahdessa eri ohjaustilanteessa.

Tehokytkimen V11 johtaessa kulkee positiivinen kuormitusvirta epätahtimoottorille. Ohjattaessa V11 sulkutilaan siirtyy induktiivinen virta diodin V21 ja kondensaattorin C1 kautta kulkevalle virtareitille. Virran siirtyessä uudelle reitille alkaa kondensaattori C1 varautua ja lopulta diodi V4 alkaa johtaa. Nyt tehokytkin V14 ohjataan johtavaksi. Vastaavasti GTO-tyristorin V14 ohjaaminen sulkutilaan negatiivisella kuormitusvirralla aiheuttaa induktiivisen virran siirtymisen vaihtoehoiselle reitille. Vaihtoehtoinen virtapiiri muodostuu nyt kondensaattorin C1, diodin V24 ja kondensaattorin C7 kautta. Kondensaattorin C1 varaus purkautuu myös tässä yhteydessä. Kondensaattorin C1 varauksen purkauduttua alkavat diodit V21 ja V1 johtaa ja

tehokytkin V11 ohjataan johtavaksi. Suojakondensaattorin C9 varaus puretaan katkojan GTO-tyristorin V17 kautta takaisin tasajännitevälipiiriin. [60]

Sulakesuojaus

GTO-tyristoreiden ja transistoreiden ylivirtakestoisuus on heikompi kun tyristoreilla ja diodeilla. GTO-vaihtosuuntaajia ei ole suojattu oikosulkutilanteita vastaan ja suuntaajan puolijohdetehokomponentit vaurioituvat oikosulkutilanteessa oikosulkuimpedanssin ollessa pieni. Vaihtosuuntaajien sulakesuojauksella pyritäänkin estämään komponentin räjähtäminen ohjauksen epäonnistuessa oikosukuvirran katkaisemisessa ja lisäksi tasajännitevälipiirissä olevat sulakkeet toimivat myös syötettävän epätahtimoottorin ja syöttökaapelin oikosulkusuojana. Käyttöönoton jälkeen on tehokomponentteja vaihtosuuntaajien pääpiireistä särkynyt yhteensä kaksitoista kappaletta, joista kymmenen on tyypiltään ollut GTO-tyristoreita ja loput IGB-transistoreita. [35], [52]

Vaihtosuuntaajan suojaukset

Maasulkukoe. Linjakäytössä käytetty vaihtosuuntaaja ei tunnista käytönaikaista maasulkua. Vaihtosuuntaaja suorittaa käynnistyksen yhteydessä maasulkukokeen syöttämällä ylähaaran tehokytkimillä jännitepulsseja käyttöön. Maasulku aiheuttaa normaalia korkeamman vaihevirran, jonka avulla pystytään määrittämään maasulkutilanne. [52]

Oikosulkukoe. Oikosulkukoe tehdään myös ennen vaihtosuuntaajan käynnistystä. Oikosulkukoe eroaa maasulkukokeesta tehokytkimen ohjauksen osalta. Oikosulkukokeessa ohjataan vaihtoehtoisesti joko ylä- tai alahaaran tehokytkimiä. [52]

Ylikuormitus. Vaihtosuuntaaja ylikuormituksen estäminen perustuu lähtövirran rajoittamiseen. Vaihtosuuntaajassa on myös ylivirtalaukaisu, joka pysäyttää tarvittaessa käytön. Moottorin ylikuormitussuojaukseen voidaan käyttää myös moottorin todellista lämpötilaa silloin, kun moottorissa on termistorit tai PT-100 anturit. Moottorin ohjausohjelmassa on erillinen lämpömalli, jota pystytään käyttämään ylikuormitussuojana yksittäisissä käytöissä. Mikäli lämpömallia ei käytetä, voidaan moottoreille syötettävää virtaa rajoittaa myös vääntömomentinra-

joituksen avulla. Moottorin ohjausohjelmassa on myös käytettävissä jumisuoja, jonka avulla myös käyttö voidaan tarvittaessa pysäyttää. [52]

Ylilämpö. Vaihtosuuntaaja pysähtyy jäähdytys-elementin lämpötilan noustessa yli + 85 °C:een tai laskiessa alle - 10 °C:een. [53]

6.1.4 Syöttöyksiköiden ja vaihtosuuntaajien elektroniikkakortit

Elektroniikkakorttien osalta ongelmat liittyvät useasti niiden staattisen sähkön heikkoon sielokykyyn. Vaihtosuuntaajissa käytetyille elektroniikkakorteille ei yleensä vikatilanteessa voida tehdä muuta kuin vaihtaa koko kortti. Linjakäytöissä olevilta pienimmiltä IGBT-vaihtosuuntaajilta ei välttämättä kannata vaihtaa edes ohjauskortteja, vaan nopeampaa saattaa olla vaihtaa uusi varayksikkö heti vaurioituneen vaihtosuuntaajan tilalle. Linjakäytön vaihtosuuntaajan kortista osa on lisäksi tasajännitevälipiirin jännitteessä, mikä osaltaan hankaloittaa mittaustoimintaa vikatilanteessa. Ohjauskorttien väliset kaapeloinnit voivat muodostua ongelmalliseksi. Tarkastellaan seuraavana muutamia tyypillisiä vikaantumisia, jotka aiheutuvat käytettävistä elektroniikkakomponenteista.

Liittimet ovat elektronisten järjestelmien herkimpiä osia. Kontaktipinnoilta vaaditaan pientä ja käytössä stabiilia kontaktivastusta, riittävää kuormituskestävyyttä ja elinikää käyttöolosuhteissa. Liittimien korroosionkeston on oltava myös hyvä. [64]

Vastusten ominaisuuksiin ja elinikään vaikuttaa ratkaisevasti lämpö. Vastus lämpenee joko omasta tehonkulutuksesta tai ympäristön vaikutuksesta. Vikaantumiseen vaikuttavat myös mm. mekaaniset rasitukset, ympäristön epäpuhtaudet ja ilman kosteus. [64]

Optoelektronisten komponenttien toimintaan vaikuttaa myös ratkaisevasti käyttölämpötila. Valotehon laskunopeus on suoraan verrannollinen liitoksen läpi kulkevaan virrantiheyteen ja käyttölämpötilaan. [64]

Mikropiirien pakkaustiheyttä on kasvatettu piirialkioiden mittoja pienentämällä ja myös puolijohdepalan kokoa kasvattamalla. Palan koon kasvattaminen on lisännyt koteloinnin laadun merkitystä, mutta piirin mittojen pienentäminen on aiheuttanut sähkökentänvoimakkuuksien ja virrantiheyksien kasvua. Edellä olevan perusteella on esitetty mikropiirien pakkaustiheyden kasvattamisen lisäävän rappeutumisvikojen merkitystä. [64]

Releiden ja kytkimien osalta edellytetään, että niiden kytkentäpintojen pinnoitteet kestävät hyvin mekaanista kulumista ja sähköistä eroosiota. Lisäksi niiltä vaaditaan hyvää sähköistä kuormitus- ja katkaisukykyä. Muuten niiden vaatimukset ovat hyvin pitkälle samat kuin liittimillä. Releet ja kytkimet vaurioituvat useimmiten ylikuormitustilanteessa. [64]

Komponenttien vikaantumisen voidaan todeta, että mikropiirien, vastusten ja optoelektronisten komponenttien vikaantuminen ilmenee parametrimuutoksina ja toiminnallisina vikoina. Diodien ja transistoreiden vikaantumiset ilmenevät vastaavasti sähköisten piirien katkoksenä. [64]

ESD-suojaus

Energiatasoltaan hyvin pieni sähköstaattinen purkaus pystyy tuhoamaan muun muassa puolijohdeliitoksen, kalvovastuksen tai kondensaattorin. Staattisen sähköin aiheuttama vaurio elektroniikkapiirissä on vaikea havaita, koska ylijännitteen aiheuttama vaurio heikentää yleensä komponentin suoritusarvoja tai aiheuttaa satunnaisesti ilmeneviä vikatoimintoja. [66]

ESD-suojauksen periaatteiden on katettava koko ketju tavaran kuljetuksesta, vastaanotosta varastoinnista laitetuotannossa, laitteen valmistuksen sekä asennuksen ja huollon ajalta. Suojauksen onnistumisen edellytyksenä on materiaalien käsittelyssä puolijohtavien suojausmateriaalien käyttö, oikeat säilytysmateriaalit, pöytä- ja lattiapinnoitteet, suojausrannekkeet ja varastointitavat. Laitteistojen huoltohenkilöstön osalta olisi kiinnitettävä huomiota varusteisiin, vaatetukseen ja toimenpiteisiin staattisen sähköin ehkäisemiseksi. Laitteiden käyttöympäristössä on käytettävä samoja työmenetelmiä kuin laitteiden valmistusprosessin aikana staattiselta sähköltä suojautuessa. [65]

Tehdasvarastossa varastoitavien varaosien osalta tulisi noudattaa aina varovaisuutta ja linjakäytön sähköisiin varaosiin olisi suhtauduttava aina niin kuin ne olisivat ESD-herkkiä kokonaisuuksia. Ongelmien välttämiseksi tulisi huoltotoimenpiteiden ja varastoinnin aikana noudattaa seuraavia toimenpideohjeita:

1. Linjakäytön varaosakortit on aina kuljetettava ja varastoitava suljetuissa ja johtavissa säilytyskoteloissa.
2. Varaosakortit saa poistaa pakkauksestaan vain staattisesti suojatulla alueella.
3. Varaosakortteja käsittelevien huoltohenkilöiden pitää käyttää maadoitusranneketta.
4. Pöytäpinnoitteiden pitää olla staattista sähköä kuluttavaa. Työtasojen johtavat ja puolijohtavat materiaalit on aina maadoitettava.
5. Laitekortteja tulee testata vain työpisteissä, jotka on suojattu staattiselta sähköltä. Lisäksi elektroniikkakomponentteja juotettaessa on myös kolvin kärjen oltava maadoitettu. Mittaustoiminnassa käytetyt mittalaitteet on myös maadoitettava.
6. Eristävien materiaalien käsittelyä huoltotoiminnan aikana tulisi välttää, koska eristemateriaaleihin jää helpommin sähköstaattisia varauksia kuin johteisiin. Eristeestä varaus ei pääse purkautumaan, kuten johteissa.
7. Koko henkilökunta on koulutettava asianmukaisesti. Koulutuksen piiriin on sisällytettävä huollon henkilöstön lisäksi myös elektroniikkakomponenttien ja -korttien varastoinnista vastaava henkilökunta. [64], [65]

Staattisen purkauksen aiheuttamat vikaantumiset voidaan jakaa pysyviin ja piileviin vikoihin. Pysyvät viat ilmenevät heti ESD-purkauksen jälkeen, ja vikaantuminen pystytään havaitsemaan komponentin toimintojen testauksella. Piilevät viat ovat huoltohenkilöstön kannalta vaikeimpia, koska ne eivät vaikuta heti ratkaisevasti laitteiston toimintaan, mutta heikentävät laitteistojen luotettavuutta. Piilevät viat voivat ilmetä komponentin ominaisarvojen, kuten kytkentänopeuden, jännitekestoisuuden tai vuotovirran muuttumisena. Piilevät viat ilmenevät elektroniikkalaitteissa usein epämääräisinä toiminnallisina häiriöinä. Piilevät viat pystytään paikallistamaan usein vasta kortin tai komponentin rikkoonnuttua lopullisesti. [66]

Elektroniikkakorteilla käytettävät komponentit ja myös vaihtosuuntaajan pääpiirissä olevat puolijohdetehokomponentit ovat erittäin herkkiä staattiselle purkaukselle. Taulukossa 6.2 on esitetty suuntaa-antavia arvoja komponenttien ESD-kestoisuudesta.

Taulukko 6.2 Eri komponenttien ESD-kestoisuuksia [65]

Komponentti	Jännite [V]
Eprom	100
CMOS	250 - 3000
Operaatiovahvistin	190 – 2500
Kalvovastus	300 – 3000
Tyristori	680 – 1000
Schottky-diodi	300 – 2500

ESD-purkaukseen vaikuttaa huomattavasti eristemateriaalin johtavuus ja ympäristön ilman kosteus. Taulukossa 6.3 on joitakin tyypillisiä varautumisjännitteitä eri toiminta- ja työskentelyolosuhteissa.

Taulukko 6.3 Varautumisjännitteitä eri toiminta- ja työskentelyolosuhteissa [64]

Varauksen kehittymistapa	Jännite [V], RH = 10 – 30 %	Jännite [V], RH = 65 – 90 %
Kävely tekokuitumatolla	35 000	1 500
Kävely vinyylilattialla	12 000	250
Työskentely työtason ääressä	6 000	100
Vinyyliketeloiden käsittely	7 000	600
Polyeteenilaukun pakkaaminen	20 000	1 200
Työskentely polyuretaanipintaisella tuolilla	18 000	1 500

Taulukosta 6.3 havaitaan muutamien elektroniikkakorttien peruskomponenttien osalta, että ESD-kestoisuuden raja korkeallakin ilman kosteuden arvolla ylittyy lähes kaikissa tapauksissa. ESD-kestoisuuden osalta voidaan todeta, että syöttöryhmien ja vaihtosuuntaajien huoltotoimenpiteiden osalta on aina noudatettava oikeita työskentelymenetelmiä. Linjakäyttöjen lähdeissä on varauduttu korjaustoimenpiteissä aiheutuvien ESD:n vaikutuksien ehkäisyyn sijoittamalla valmiiksi maadoitusrannekkeet jokaiseen vaihtosuuntaajayksikköön. Erityistä huomiota olisi kiinnitettävä varaosasuuntaajien huoltotoiminnoissa. Tällä hetkellä varaosasuuntaajat

on varastoitu sähkötilaan vaihtolavojen päälle. Laitteistoja huolletaan myös kyseisessä ympäristössä ilman asianmukaisia työskentelytasoja ja maadoitusjärjestelmiä. Huoltotilojen työskentelytasojen heikosti johtavat pinnoitteet on maadoitettava vähintään 1 M Ω :n suojavastuksen kautta ja maadoitusjärjestelmästä on toteutettava erillisenä ESD-maadoituksena. Lisäksi ESD:ltä suojatulla alueella tulee olla selvästi merkityt rajat ja kaikkien työskentelypintojen ja lattiapinnoitemateriaalien tulee olla maadoitettuja ja niiden pintaresistanssin on oltava välillä $1 \times 10^4 - 1 \times 10^9 \Omega/m^2$. Käytettävien kalusteiden kyseisellä alueella on oltava puolijohtavia ja maadoitettavissa. Varaosasuuntaajien huoltotilat olisi saatettava ESD-vaurioiden suojautumisen kannalta asianmukaiseksi, mitä ehtoja nykyiset tilat eivät toteuta. [66], [67]

6.1.5 Epätahtimoottori

Epätahtimoottorin eristysten vanheneminen

Eristyksen päätehtävä on erottaa sähköisesti eri jännitteessä olevat osat toisistaan. Eristykset voidaan jakaa kahteen luokkaan: pää- ja johdineristykseen. Pääeristys erottaa toisistaan osat, jolla ei saa olla galvaanista yhteyttä. Johdineristys erottaa käämin tai vyyhdin langat ja kierrokset toisistaan. [41]

Epätahtimoottorin eristys rakentuu useista eristeistä ja eristykseen kohdistuu erilaisia lämpörasituksia, kuten jatkuva käyttölämpötila ja nopeasti ohimenevät lämpövaihtelut. Eristyksen lämpökestoisuus ilmoitetaan eristysluokkien ja niitä vastaavien rajalämpötilojen avulla. Rajalämpötilan avulla ilmaistaan eristyksen kuumimman kohdan lämpötila jatkuvassa käytössä. Lämpenemä ilmaisee käämitykselle sallitun lämpötilan nousun nimelliskuormituksella, kun ympäristön lämpötila on 40 °C.

Taulukko 6.4 Yleisimmät eristysluokat ja niitä vastaavat rajalämpötilat [40],[44]

Luokka	Rajalämpötila [°C]	Lämpenemä [°C]	Sallittu vastusmittauksella määritetty käyttölämpötila [°C]
A	105	60	
B	130	80	120
F	155	100	140
H	180	120	165

Eristyksen vanheneminen on sarja palautumattomia kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia, jotka heikentävät eristyksen ominaisuuksia. Vanhenemisen jatkuessa tarpeeksi kauan on siitä seurauksena eristyksen rikkoutuminen. [40], [42]

Eristysten vanhenemista aiheuttavat lämpötilan lisäksi seuraavat tekijät:

- sähkökenttä
- mekaaniset rasitukset
- ympäristöolosuhteet
- kemiallisesti vaikuttavat aineet. [40]

Epätahtikoneen lämmönkestoisuus voidaan jakaa lyhyt- ja pitkäaikaiseen lämpörasituslajiin. Lyhytaikainen lämmönkestoisuus kuvaa eristyksen käyttäytymistä, kun lämpörasitusaika on korkeintaan tunteja ja lämpötila on huomattavasti yli normaalin käyttölämpötilan. Lyhytaikaisessa lämpörasituksessa eristys tai sen osa voi eristysmateriaalista ja lämpötilasta riippuen joko:

- sulaa ja valua pois paikoiltaan
- muodostaa kaasua tai kuplia ja turvota
- kutistua ja siitä johtuen halkeilla
- hiiltyä.

Eristys ei saa edellä mainituilla tavoilla vaurioitua normaalissa käytössä ja lisäksi eristyksen on säilytettävä eristyskykynsä lyhytaikaisen lämpörasituksenkin jälkeen niin kauan, että on mahdollista vaihtaa moottori seuraavassa suunnitellussa seisokissa. Lisäksi moottorin suoja-laitteiden kuuluisi toimia aina ennen kuin moottori vaurioituu. [42]

Eristysten sähkövanheneminen aiheutuu yleensä osittaispurkauksista. Osittaispurkauksia syntyy eristeen huokosissa, joissa jännitelujuus on eristeainetta heikompi, kun kentänvoimakkuus on tarpeeksi suuri. Alle 500 voltin jännitteillä osittaispurkauksia ei yleensä esiinny. Osittaispurkauksien aiheuttamaan vanhenemiseen liittyy useita vaikutustapoja:

- aineen mekaaninen kuluminen, joka johtuu osittaispurkauksen aiheuttamasta mekaanisesta rasituksesta sekä lämpövaikutuksesta eristeen pinnassa

- osittaispurkaukset aiheuttavat sekundäärisiä pintapurkauksia, jotka puolestaan vaikuttavat aineen pintakerrokseen
- epäsuorat kemialliset vaikutukset. Osittaispurkaukset synnyttävät ilmassa typpioksideja ja otsonia. Kosteuden kanssa reagoidessaan typen oksidit muodostavat typpihappoa, joka puolestaan heikentää eristystä. Otsoni aiheuttaa aineen hapettumista
- varauksen kuljettajien injektioituminen eristeeseen ja kulkeutuminen syvemmällä eristeessä
- osittaispurkaukset aiheuttavat myös välittömiä reaktioita eristeen pintakerroksissa kuten ionisaatiota ja radikaalin muodostusta, jotka aiheuttavat kemiallisia reaktioita. [40], [41]

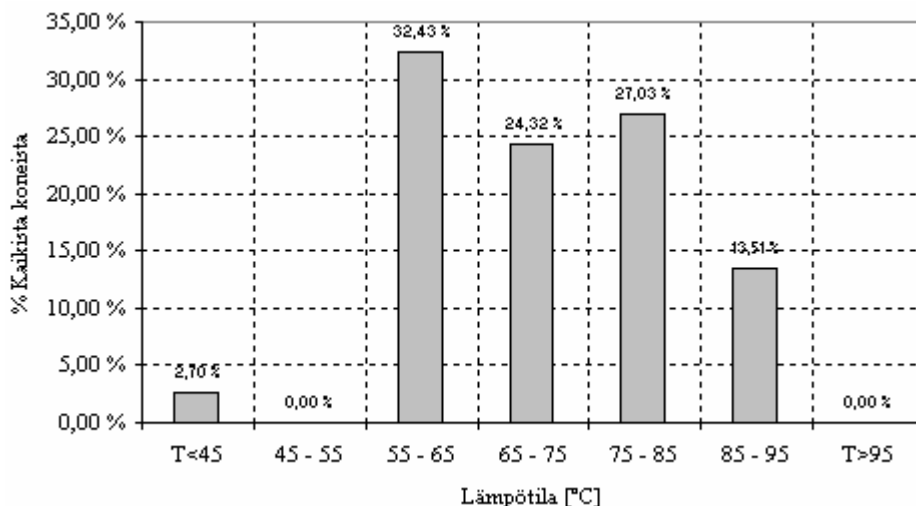
Mekaaninen vanheneminen on useasti luonteeltaan lähellä metallien väsymistä. Suurimolekyylisten polymeerien väsymiseen liittyvät myös kemialliset reaktiot, koska murtuminen mikrotasolla voi merkitä kemiallisten sidosten katkeamista ja johtaa radikaalien muodostumiseen ja uusiin reaktioihin. Sähköiset vetovoimat täristävät käämityksiä. Kyllästyslakka ja lankaemali väsyvät tämän vuoksi ja ne voivat rikkoontua, mikäli lämmön aiheuttama vanheneminen on haurastuttanut eristettä. Lisäksi toistuvia ja suuria mekaanisia rasituksia aiheutuu vyyhdin ja levypaketin välisistä lämpöliikkeistä. Eristyksen sisällä syntyy myös lämpöjännityksiä, koska eristyksen pinta jäähtyy nopeammin kuin sisus. [40], [41]

Lämpövanhenemisen lisäksi on aina ympäristön aiheuttamista kemiallisista rasituksista mukana hapettumisreaktiot ja veden aiheuttamat hydrolyysireaktiot. Hapettuminen lisää polymeerien välisiä ristsidoksia. Edellä mainitusta johtuen eriste kovettuu ja tulee vähemmän joustavaksi. Kun hapettumista tapahtuu tarpeeksi kauan, tulee eriste hauraaksi. Veden aiheuttamaan depolymeroitumista sanotaan hydrolyysiksi. Polyesterit ja aineet, jotka ovat pääasiallisesti esteriketjua, ovat alttiimpia hydrolyysille. Muita ympäristön vanhenemistekijöitä ovat mahdolliset ympäristön ilman sisältämät kemikaalit, kosteus ja lika. Eri eristetyyppien kestävyys kemikaaleja vastaan vaihtelee. Kosteus voi vaikuttaa myös mekaanisesti moottoria käynnistettäessä. Eristeen huokosissa oleva vesi laajetessaan ja höyrystyessään voi aiheuttaa vaurioita. Sähkökoneen jatkuva käyttötapa ehkäisee kosteuden aiheuttamaa vaurioitumista, sillä jatkuvasti käyvän koneen lämpötila on niin korkea, ettei kosteus pääse tunkeutumaan eristerakenteisiin. [40], [41]

Sähkökoneiden käyttötapa ja toimintaympäristö vaikuttavat määrääviin vanhenemistekijöihin. Yleisimpiä tekijöitä ovat lämpö, värinä kosteus ja kemikaalit sekä suurimmissa koneissa osittaispurkaukset ja mekaaniset rasitukset. Yleensä vanhenemistekijöitä on useita ja puhutaan yhdistetystä vanhenemisestä. Vanhenemistekijöiden vuorovaikutus saattaa olennaisesti vaikuttaa eristyksen elinikään. [41]

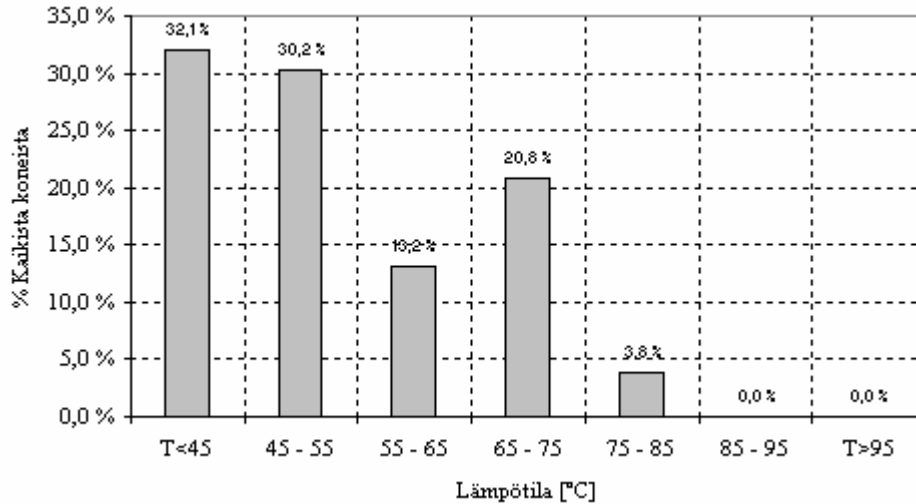
Käämityksen eristysvastus koostuu pintavastuksesta ja tilavuusvastuksesta. Tilavuusvastukselle asetetaan sähkökoneissa suhteellisen pienet vaatimukset. Tilavuusvastuksen arvo ei riipu kosteuden vaikutuksesta, mikäli eristeet eivät ole hygroskooppisia. Pintavastus on riippuvainen eristyksen pinnalle kertyneestä liasta. [40]

Pienjännitteisen 1000 kW:n moottorin eristysvastus käyttöönotossa on 5000 – 10 000 M Ω , joka vastaa noin 10^{14} Ω m ominaisvastusta. Pienjännitteinen kone on vielä hyväksyttävässä kunnossa eristysvastuksen ollessa 1 M Ω , joka vastaa likimain 10^{10} Ω m ominaisvastusta. Edellä mainitusta johtuen ei eristysvastuksen tavoitearvolla ole ratkaisevaa merkitystä. Käämityksen eristetyille pinnoille kertyy ajan kuluessa likaa, joka johtaa sähköä. Likaantuneen ja kostean käämityksen eristysvastus voi pudota alle 1 M Ω :n, jolloin eristyksen kestävyys joutuu vaaraan. [40]



Kuva 6.3 Paperikone seitsemän epätahtimoottoreiden toimintalämpötilat

Prosessiautomaatiojärjestelmässä oli kaikkiaan 37 moottorin lämpötilamittaustiedot. Lämpötiloista ei ole pitkäaikaisia mittaustietoja saatavissa. Paperikoneen perusnopeus oli mittaushetkellä 1250 m/min.



Kuva 6.4 Päällystyskone seitsemän epätahtimoottoreiden toimintalämpötilat

Päällystyskoneelta oli kaikkiaan 53 kappaletta epätahtimoottoreiden lämpötilamittauksia prosessiautomaatiojärjestelmässä. Linjan tuotantonopeus mittaustietojen tulostushetkellä oli 1550 m/min. Lämpötilamittauksista ei ole saatavissa pitkältä aikaväliltä hetkellisiä maksimiarvoja kestoaikoinen.

Kuvista 6.3 ja 6.4 ilmenee moottoreiden lämpötilojen olevan huomattavasti alle F lämpöluokan salliman 140 °C lämpötilan. Kuvien 6.3 ja 6.4 lämpötilajakaumien perusteella voi olettaa, etteivät eristysvauriot synny normaalilla vanhenemisella, vaan todennäköisempää on että käämitysauriot syntyvät poikkeuksellisten hetkellisten yllämpötilojen seurauksena.

Eristykset vaihtosuuntaajakäytöissä

Linjakäytön vaihtosuuntaajien tehoasteet on toteutettu joko GTO-tyristoreilla tai IGB-transistoreilla. Transistorityyppiset puolijohdekomponentit sallivat suuremman jännitteen muutos-

nopeuden komponentin yli, mikä pienentää komponentin sisäisiä häviöitä ja sallii käytettävän korkeampia kytkentätaajuuksia kuin tyristoreilla.

Eristyksen kannalta oleellista ovat vaihtosuuntaajakäytössä seuraavat asiat:

- vaihtosuuntaajalla syötetty jännite pitää sisällään yliaaltoja, jotka aiheuttavat käämityksessä ylimääräisiä virtoja. Ylimääräiset virrat aiheuttavat lisähäviöitä johtaen käämityksen lämpötilan nousuun. Lämpötilan nousu on kompensoitava joko saatavan tehon pienentämisenä tai hyväksyttävä lämpövanhenemisen kiihtymisenä
- vaihtosuuntaajan jännite muodostuu pulseista, joiden huippujännite saattaa huomattavasti poiketa normaalin sinimuotoisen jännitteen huippuarvosta
- pulssitaajuus on suurempi verkkotaajuuteen verrattuna
- vaihtosuuntaajan syöttämän jännitteen nousunopeus on niin suuri, että pulssi alkaa käyttäytyä kuin käämitykseen tuleva syöksyaalto, jakautuen käämityksessä epälineaarisesti ja heijastumisen vaikutuksesta aiheuttaen jännitteen suurenemista. [40]

Vaihtosuuntaajakäytöissä on huomattava myös, että transistoreilla toteutetuissa tehoasteissa syötetyn jännitteen muutosnopeus on tavallisesti korkeampi kuin tyristoreilla toteutetuissa vaihtosuuntaajissa. Edellä mainitusta johtuen IGBT-vaihtosuuntaajilla pulssin nousuaika suhteessa yleisesti käytettyyn kaapelipituuteen on lyhyt ja useissa sovelluksissa on varauduttava huomattavaan jännitetason nousuun heijastumisen vaikutuksesta. [40]

Normaali epätahtimoottori soveltuu vaihtosuuntaajakäyttöön, mutta eristyksen ja käämityksen rakenteesta sekä mitoituksesta riippuu kuinka suuria jännitteitä moottorille voidaan sallia. IGBT-vaihtosuuntaajalla on varauduttava aina kriittiseen kaapelipituuteen. Kaapelin pituus ja aallon etenemisnopeus määräävät moottorin ja vaihtosuuntaajan välillä heijastuneen aallon värähtelytaajuuden. Värähtelytaajuus ja kaapelin sekä käämityksen ominaisimpedanssisuhde ratkaisevat moottorin jännitteen navoissa tapahtuvan jännitteen nousun. Kriittinen kaapelin pituus lasketaan aallon etenemisnopeuden ja jännitteen nousujan avulla. Kriittinen kaapelin pituus on kaapelin maksimimita, jota pidemmällä kaapeleilla jännite moottorin navoissa ehtii nousta teoreettiseen maksimiinsa. GTO-vaihtosuuntaajissa myös kaapelin pituus on ratkaiseva varsinkin yli 500 voltin jännitteillä, sillä silloin voi kaapelin vaikutuksesta käämityksen jännite

nousta yli osittaispurkausjännitteen. Pienjännitteisten koneiden eristyksiä ei ole normaalisti mitoitettu kestämaan osittaispurkauksia ja käämitysten elinikä voi lyhentyä ratkaisevasti. Yleensä vaihtosuuntaajakäytöissä käytetään taajuusmuuttajakäyttöön mitoitettuja eristyksiä ja eristysrakenteita. [40]

Epätahtimoottorin laakerivirrat taajuusmuuttajakäytössä

Vaihtosuuntaajan tehtävänä on taajuusmuuttajassa kytkeä moottorin vaihejohtimet oikea-aikaisesti positiiviseen tai negatiiviseen DC jännitteeseen. Vaihtosuuntaajan ja epätahtimoottorin yhdessä muodostamat jännitevektorit voidaan määrittää avaruusvektoriesityksen avulla. Kaksitasoisessa kolmivaihetajuusmuuttajassa on kaikkiaan kahdeksan eri kytkinasentokombinaatiota. Vaihejännitteet ovat symmetrisiä tähtipisteen jännitteeseen nähden. Epätahtimoottorin tähtipisteen potentiaali poikkeaa kuitenkin nolasta eli epätahtimoottorin tähtipisteen potentiaali heiluu kytkinasentokombinaatioiden mukana maan potentiaaliin verrattaessa. PWM-taajuusmuuttajan epätahtimoottorille syöttämä yhteismuotoinen jännite, suuri kytkentätaajuus, huonot kaapeloinnit vaihtosuuntaajan ja epätahtimoottorin välillä sekä käämitysten hajakapasitanssit ovat laakerivirtaongelmien perimmäinen syy. [44]

Sähkövirran aiheuttama laakerin vikaantuminen

Laakerivaurion aiheuttavat laakerin läpi kulkevat virtapulssit. Laakerivirran suuruus riippuu laakerivirtapiirin impedanssista. Laakerin impedanssiin vaikuttavat laakerin kuormitus, lämpötila, pyörimisnopeus, voiteluainetyyppi ja laakerin vierintäpintojen karheus. Epätahtimoottorin laakeri voi olla rakenteeltaan kuula- tai rullalaakeri. Itse laakeri muodostuu vierintäelimien lisäksi ulko- ja sisärenkaasta sekä mahdollisista suoja- tai tiivistelevyistä. Lisäksi vierintälaakereita on voideltava, jotta vierintäelimet ja laakerirenkaiden mekaaninen kosketus ja kuluminen vähenisi. Matalilla pyörimisnopeuksilla, alle 10 % nimellispyörimisnopeudesta, laakerin vierintäelimillä sekä ulko- ja sisärenkaalla on metallinen kontakti. Virta voi hitailla pyörimisnopeuksilla olla suuri, mutta se ei ole vahingollinen suuren kontaktipinnan ansiosta. Pyörimisnopeuden kasvaessa nousee kuula voiteluaineen pinnalle, jolloin impedanssi ulko- ja sisärenkaan välillä alkaa nousta. Mikäli ulko- ja sisärenkaan välillä kulkeva galvaaninen yhteys katkeaa, muodostuu kaksi kondensaattoria joiden varaus alkaa kasvaa. Kun jännitetaso ulko-

ja sisärenkaan välillä ylittää voitelukalvon läpilyöntikestoisuuden, on seurauksena laakerivirtapulssi. Virtapulssi keskittyy pienelle alueelle, jossa virrantiheys on suuri ylittäen metallin sulamislämpötilan. Nyt virtapulssia voidaan verrata kipinätyöstössä tapahtuvaan valokaari-purkaukseen, joka aiheuttaa laakerin vierintäpinnoille pyykkilautakuvion sekä muuttaa kuulan pinnaltaan himmeäksi. [11], [44]

PWM-taajuusmuuttajilla moottoreiden akselijännitteet ovat epäsäännöllisiä vaihtojännitepulsseja, jotka esiintyvät harvoin ja ovat lyhyitä ja korkeataajuisia. Ennen virtapulssia laakerin yli vaikuttava jännite määrää pulssin energian. PWM-taajuusmuuttajien akselijännitteiden pulssien huippuarvot ovat sopivia suureita arvioitaessa niiden haitallisuutta laakereille. Taulukossa 6.5 esitetään kokemusperäisiä arvoja PWM-taajuusmuuttajakäyttöisten moottoreiden akselijännitteille. Taulukossa 6.6 esitetään erikseen raja-arvot laakerivirran huippu- ja tehollisarvoille. [11]

Taulukko 6.5 Jännitepulssien haitallisuusasteet [11]

Huippuarvo U_p	Haitallisuusluokka
< 3 V	Ei haitallinen
3...10 V	Voi olla haitallinen
>10 V	Haitallinen, vaarallisen korkea arvo laakerille

Taulukko 6.6 Laakerivirran haitallisuusasteet [11]

I_{rms}	I_p	Haitallisuusluokka tehollisarvolle ja huippuarvolle
< 20 mA	< 1 A	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään
20 mA...50 mA	1 A...2 A	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään
> 50 mA	> 2 A	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään

Laakerivirtojen ehkäiseminen

Vierintälaakereiden kuntoa pystytään valvomaan värähtelymittauksien avulla ja vierintälaakereilla on tyypillisiä vikaantumisvaiheita, joiden kautta vika kehittyy. Laakerin vaurioituessa oireiden voimakkuus kasvaa ja niiden määrä lisääntyy. Yleensä laakerit pystytään vaihtamaan ennen niiden lopullista rikkoutumista, mutta järkevämpää on poistaa vaurioitumistekijät kuin hyväksyä mahdolliset syntyvät vauriot. Laakerivirtoja ei välttämättä pystytä poistamaan kokonaan vaihtosuuntaajakäytöissä, mutta niiden vähentäminen hyväksyttävälle tasolle onnistuu. Seuraavana tarkastellaan menetelmiä, joilla voidaan vähentää ongelmia kohtuullisilla laitteistojen muutostöillä jo käytössä olevista laitteistoista. [45]

Potentiaalintasaus. Akselinmaadoitusvirrasta päästään osittain eroon maadoittamalla moottorin staattori, jolloin virralla on pieni-impedanssinen rinnakkainen kulkureitti. Lisäksi yli 100 kW:n käytöillä voi olla tarpeen parantaa moottorin ja käytettävän laitteen välistä maadoitusta, varsinkin silloin, kun moottori on betonisella alustalla ja käytettävä laite on hyvin maadoitettu, vaikka epätahtimoottorin ja vaihtosuuntaajan välillä on käytetty asianmukaista häiriösuojattua kaapelointia ja moottorin runko on maadoitettu vaihtosuuntaajan kanssa samaan PE-pisteeseen erillisellä maadoitusjohtimella. [46], [47]

Eristettyjen laakereiden käyttäminen. Molempien laakereiden eristäminen voi johtaa akselin potentiaalitason nousuun ja siitä voi aiheutua laakerivaurio käytävälle laitteelle. Pelkästään N-pään laakerin eristäminen riittää katkaisemaan kiertävältä laakerivirralla kulkureitin toisaalta virtapiiri voi edelleen sulkeutua vaihtoehtoista kulkureittiä pitkin kuten käytettävän laitteen laakeroinnin tai moottorin pulssianturin kautta. [44], [47]

Akselin maadoittaminen ja käytettävän laitteen galvaaninen eristäminen. Epätahtimoottorin laakerivaurioita voidaan vähentää asentamalla akselille hiiliharjat laakereiden lähelle ja liittämälle ne pieni-induktiivisesti moottorin runkoon. Käytettävän laitteen laakerivauriot voidaan ehkäistä käyttämällä sähköisesti eristävää kytkintä. [44]

Lähtökuristimet ja suodattimet. Muutosilmiöitä voidaan vaimentaa käyttämällä erilaisia lähtökuristimia ja suodattimia, jolloin saadaan lähtöjännite muistuttamaan puhdasta siniaaltoja. Näin varustetun vaihtosuuntaajan kanssa voidaan käyttää laakerivirtojen osalta normaalia epätahtimoottoria. [44], [47]

Moottoreiden vaurioiden jakautuminen

Erään tutkimuksen mukaan, joka perustui 4000 moottorin vaurioiden syiden selvittämiseen, yleisimmäksi vaurioitumisen syyksi muodostui likaantuminen 43 prosentin osuudella. Liikaantuminen pitää sisällään kemikaaleista, liasta, öljystä ym. aiheutuvat vauriot. Toiseksi suurin vikaantumissyö oli ylikuormitus (ylilämpö) 25 prosentin osuudella. Laakerivauriot aiheuttivat 12 prosenttia vikaantumisista. Käämityksen eristyskyvyn vanhenemisen osuus vaurioitumisista oli vain viisi prosenttia. [39]

Vastaavasti yli 150 kW:n epätahtimoottoreilla vikaantumiset jakaantuvat eri tutkimusten mukaan seuraavasti: staattorivaurioiden osuus on liikkunut 25 - 35 prosentin alueella, roottorivauriot ovat olleet rikkoantumisen syynä noin 10 prosentissa tapauksista, laakeriviat ovat olleet syynä likimain 40 - 50 prosentissa vaurioitumisista ja apulaitevikojen osuus on ollut 15 - 25 prosentin välillä. [10]

Paperikoneella käytössä olevat epätahtimoottorityypit

Taulukossa 6.7 esitetään linjakäytön epätahtimoottorityypit, jotka löytyvät myös varaosamoottoreina tehdasvarastosta. Moottoreissa HXR400 - HXR500 on laakerivirtaeristys vakiona. ABB:n valmistamat ja myymät HXR-moottorit joiden tiedettiin tulevan taajuusmuuttajakäyttöön vahvennettiin käämityseristyksiltään 1990-luvun puoleenväliin saakka. Vahvennuksesta käämityseristyksestä ei ole merkintää arvokilvessä. 1990-luvun puolenvälin jälkeen valmistetut HXR-moottorit ovat kaikki vahvistettuja käämityseristyksiltään riippumatta käyttökohteesta. M2-sarjan moottoreiden arvokilpeen on merkitty erikseen, mikäli moottorissa on eristetty laakeri tai vahvistettu staattorikämmieristys. [43]

Taulukko 6.7 Linjakäytön epätahtimoottorityypit

Runko	Asento, teho ja pyörimisnopeus
HXR500LN6	B3, 1360 kW, 1800 r/min
HXR450LM4	B3, 965 kW, 1800 r/min
HXR400LH4	B3, 585 kW, 1800 r/min
HXR400SF4	B3, 365 kW, 1800 r/min
HXR400SA4	B3, 255kW, 1800 r/min
HXR450LM4	B3, 310 kW, 573...1650 r/min
HXR400LH4	B3, 257kW, 1800...617 r/min
HXR450LJ8	B3, 203 kW, 515...318 r/min
HXR400SG6	B3, 160 kW, 561...1800 r/min
M2BA 315 MLA4	B3, 200 kW, 1800 R/min
M2BA 315 SMC4	B3, 160 kW, 1800 r/min
M2BA 280 SMC6	B3, 75 kW, 1800 r/min
M2BA 250 SMC10	B3, 30 kW, 600 r/min
M2AA 200 MLA4	B3, 30 kW, 1800 r/min
M2AA 160 L4	B3, 15 kW, 1800 r/min
M2BA 200 MLB10	B3, 15 kW, 600 r/min
M2BA 280 SMB4	B3, 90 kW, 1800 r/min
M2AA 132 MB4	B5, 18 kW, 3000 r/min

Paperitehtaan linjakäytön moottorit ovat kaikki tarkoitettut taajuusmuuttajakäyttöön. Moottoreissa on vahvistettu käämityseristys. Lisäksi moottoreissa on varustuksena pulssianturi (varasamooottoreissa), mittausnipat vierintälaakereiden käyttökunnan seurantaan varten, eristetty laakeri N-päässä runkokoosta 355 ylöspäin, PT-100 anturit runkokoosta 280 eteenpäin ja termistorit runkokoosta 250 alaspäin. Moottoreiden kotelointiluokka on IP 55 ja eristysluokka F.

Ennakkohuoltomittaukset epätahtikoneista

Eristyskoe. Standardien mukaan koestettaessa yli 1 kW:n moottoreita jännitekoe on suoritettava 50 Hz vaihtojännitteellä ja lisäksi koejännitteen on oltava $2 \times U_n + 1000 \text{ V}$. Jännitekokeen avulla pyritään varmistamaan eristyksen sähköinen kunto. Jännitekoe tehdään yleensä suurten huoltojen yhteydessä. [49]

Eristysvastusmittaus. Sähkökoneen eristystilan tarkistamiseen käytetään eristysvastusmittausta. Käytettävä mittausjännite määritetään käämityksen nimellisjännitteen perusteella. Nimellisjännitteen ollessa alle 1 kV käytetään mittausjännitteenä 500 V – 1000 V. Mittausjännite pidetään kytkettynä koko mittauksen ajan ja eristysvastusarvo kirjataan 60 s:n kuluttua mittauksen aloittamisesta. Mikäli halutaan laskea polarisaatioindeksi, täytyy mittausjännitteen olla kytkettynä käämityksiin yhteensä 10 minuuttia, jonka jälkeen kirjataan toinen lukema ylös. Polarisaatioindeksin avulla voidaan tehdä päätelmiä eristyksen mahdollisesta kosteudesta, likaisuudesta ja soveltuvuudesta jännitekokeeseen. Polarisaatioindeksi on viimeisen ja ensimmäisen mittaustuloksen suhde. Eristysvastusmittaustulokseen vaikuttaa myös voimakkaasti kohteen lämpötila ja mittaustulokset on tarvittaessa redusoitava, mikäli mittauksia halutaan verrata aikaisempiin eristysvastusmittaustuloksiin. [11]

Impedanssimittauksen avulla pystytään tarkistamaan moottorin staattorin ja roottorin kunto resistanssien, impedanssien ja induktanssien vaihteluiden avulla roottorin asentoa muutettaessa. Markkinoilla on mittalaitteita, joilla voi suorittaa sekä eristysvastus- ja impedanssimittaukset moottoreille. [11]

Toistoaaltomittaus. Sähkökoneiden käämivauriot alkavat usein johdinkierrosten välisenä kierrossulkuina. Vika voi laajeta ajan kuluessa käämin ja rungon väliseksi maasuluksi tai kahden vaiheen väliseksi oikosuluksi. Tasa- ja vaihtojännitteellä ei välttämättä saada aikaan riittävää jänniterasitusta eri käämien osien kesken ja tämän vuoksi on käytettävä kierros- ja johdineristyksen koestuksessa syöksyaaltoa, joka edetessään käämitykseen jakaantuu eri kerrosten välille ja saa aikaan pitkittäisen jännitejaon. Yksittäisten syöksyaallon antavien koestuslaitteiden lisäksi käytetään toistoaaltokoestuslaitteita. Toistoaaltokoestuslaitteet lähettävät käämitykseen samanlaista syöksyaaltoa sopivalla taajuudella. Koestuslaitteet ovat useasti monikanavaisia ja koestuksen yhteydessä voidaan verrata samanlaisten käämielementtien värähtelyvastetta. Kierrosten välinen eristysvika muuttaa piirin värähtelyominaisuuksia ja näkyy siten erilaisena värähtelyvastena. [11], [40]

Laakerivirtamittauksia standardi PSK 7708 suosittelee tehtävän kaikille vaihtosuuntaajakäyttöisille yli 100 kW:n moottoreille aina käyttöönoton yhteydessä ja vaihtosuuntaajan uusinnan yhteydessä sekä epäiltäessä laakerin vaurioitumisen johtuvan laakerivirrasta. Moottorin kytkeytyessä käyttävään laitteeseen sähköä johtavalla kytkimellä standardi suosittelee suoritettavan taulukossa 6.8 esitettyjä mittauksia laakerivirtojen toteamiseksi. [11]

Taulukko 6.8 Suoritettavat mittaukset laakerivirtojen määrittämiseksi (sähköä johtava kytkin) [11]

Moottorin teho	≤ 30 kW	30 ... 100 kW	> 100 kW
Indusoitunut jännite			X (ei voi käyttää yksin tilanearviossa)
Akselin maadoitusvirta	X	X	X
Kiertovirta			X

Linjakäytön suurista epätahtimoottoreista on laakeri vaurioitunut ainoastaan paperikoneen keskitelan M2 epätahtimoottorista. Epätahtimoottorin laakerivaurio johtui käyttöakselin välyksettömyydestä. Paperitehtaan kunnossapidon henkilöstön haastatteluissa ei ole tullut ilmi, että samalla linjakäytön epätahtimoottorilla olisi ollut toistuvia laakerivaurioita. Yksittäisiä laakerivaurioita on ilmennyt eri käytöillä. Mikäli käytöissä ilmenisi erittäin haitallisia laakerivirtoja olisivat ne todennäköisesti ilmenneet vuoden 1997 käyttöönoton jälkeen toistuvina laakerivaurioina ongelmakäytöillä. Edellä olevan perusteella ei laakerivirtamittauksia ole tarpeen suorittaa jälkikäteen, mutta mittausmenetelmät voitaisiin ottaa käyttöön aina vaihtosuuntaajan vaih-

don yhteydessä sekä kyseiset mittaukset tulisi aina vaatia suoritettavaksi uusien laitteistojen käyttöönoton yhteydessä. Lisäksi käytössä olevilta yli 1000 kW:n epätahtikoneilta ja huollossa käyneiltä sekä uusilta epätahtimoottoreilta voitaisiin suorittaa vertailumittaukset laakerivirroista, jotta pystyttäisiin toteamaan muutokset jo varhaisessa vaiheessa ja estämään vikakehityksen alkaminen.

Korjaavassa kunnossapidossa on käytetty hyväksi eristysvastus-, impedanssi- ja toisioaltomittauksia, mutta ei ennakoivana kunnossapidon toimenpiteenä. Toisioaltomittaukset on teetetty vikatilanteissa erillisenä tilaustyönä. Eristysvastus- ja impedanssimittaukset ovat yksinkertaisia mittaustoimenpiteitä, joiden avulla voidaan määrittää moottorin käämitysten ja roottorin sen hetkinen kunto. Eristysvastus- ja impedanssimittaus voitaisiin suorittaa kerran vuodessa kunnontarkastusmittauksena suurimmille epätahtimoottorikäyttöille. Mikäli epätahtimoottoreiden alkuperäiset mittauspöytäkirjat ovat käytettävissä voitaisiin mittaustuloksia myös verrata alkuperäisiin mittaustuloksiin. Esimerkki mittauspöytäkirjasta löytyy liitteestä seitsemän.

Epätahtimoottoreiden laakereiden kuntoa tarkkaillaan värähtelymittauksen avulla. Analysaattorin käyttöä voitaisiin laajentaa myös spektrimittauksina suurimmille epätahtimoottorikäyttöille käytönaikaiseksi kunnonvalvontamenetelmäksi. Mittausmenetelmän soveltuvuutta vianmäärityksessä vaihtosuuntaajasyöttöiselle epätahtimoottorille eri pyörimisnopeusalueilla ja kuormitustilanteissa täytyisi kuitenkin selvittää tarkemmin. Staattorivirran spektrimittauksen avulla voidaan myös tunnistaa vaihtosuuntaajan syöttämän epätahtimoottorin vauriot [10]. Toisaalta paperikoneen käytöt toimivat vakio-olosuhteissa ja roottorivikojen syntymistä korreloi käynnistyskerrat ja käynnistysrasitukset ei niinkään käyttötunnit eli roottorivaurioiden syntyminen on todennäköisempää raskailla usein käynnistyvillä ja pysähtyvillä käytöillä.

6.1.6 Muut ulkoiset laitteistot

Pulssianturi

Pyörimisnopeuden tarkkuuteen vaikuttaa pulssianturin antaman mitta-arvon tulos. Linjakäytössä käytettävät pulssianturit antavat kaksi toisistaan 90 asteen vaihe-erossa olevaa pulssisignaalia, joiden avulla pystytään määrittämään pyörimisnopeus ja -suunta. Pulssianturista aiheutuvat ongelmat johtuvat kytkimestä, asennuksesta ja pulssianturin laakereiden kulumisesta. Edellä mainittujen asioiden lisäksi pulssianturi sijaitsee moottorin N-päässä ulommaisena, mistä johtuen se on erityisen herkkä mekaaniselle vaurioitumiselle. Markkinoilla on pulssiantureita, joiden ominaisuuksiin sisältyy ennakoiva vianilmaisutoiminta.

Ennakoivassa vianilmaisutoiminnassa valvotaan pulssianturin toimintaa ja pyritään hälyttämään mahdollisimman aikaisessa vaiheessa vikaantumisesta. Pulssianturin laakereiden kulumisen ilmenee pulssien katoamisena silloin tällöin, mutta anturi toimii kuitenkin yhä täyttäen käyttötarkoituksensa. Vianilmaisuuksia havaitsee mm. seuraavia vikoja:

- merkkipulssia ei muodostu
- pulssianturin resoluutio ei pysy vakiona
- kanavien väliset vaihesiirrot poikkeavat sallituista arvoista. [62]

Pulssianturin muistipiiriin talletetaan vian laatu, tapahtuma-aika, lämpötila ja pulssitaajuus. Vikatiedot voidaan siirtää RS 232 sarjaliikenneliittymän kautta tietokoneelle ja tarkastella erikseen analyysiohjelmiston avulla häiriöitä. Pulssianturin muistipiiriin kertyy tietoa myös anturin kokonaistoiminta-ajasta. Muistipiirissä on myös talletettuna anturin tunnistetiedot. Pulssianturin antama hälytyssignaali voidaan välittää suoraa prosessinohjausjärjestelmään ja anturi voidaan vaihtaa ennakoiden seuraavassa suunnitellussa seisokissa. [62]

Ilman vianilmaisua olevien pulssiantureiden kuntoa on seurattava määrävälein. Kunnonseuranta voidaan toteuttaa silmämääräisen tarkastelun avulla sekä mittaamalla erikseen pulssianturin antamat signaalit molemmilta kanavilta. Laakereiden kunto voidaan tarkastaa mm. lii-

kutteleamalla käsin anturia akselin suuntaisesti, jolloin laakereiden kulumisen voi tuntea lievävä välyksenä. Lisäksi linjakäytön ohjausjärjestelmä antaa virhesignaalikoodin nopeusmittausvirheestä. Nopeusmittausvirhe voi aiheutua mm. pussisignaalin puuttumisesta ja kun pulsien määrä kierrosta kohden ei vastaa ohjelmaan asetettuja parametreja.

Ohjelmiston virheet, viat ja häiriöt

Ohjelmisto ei vikaannu samalla tavalla kuin mekaaniset tai sähköiset komponentit ja lisäksi ohjelmiston kuntoa ei voida valvoa mittausmenetelmin. Ohjelmoinnin jälkeen on arvioitu ohjelmissa olevan yhden virheen muutamaa kymmentä ohjelmariviä kohden. Testauksen yhteydessä havaitut virheet ovat poikkeamia spesifikaatioista. Spesifikaatio pitää sisällään toiminnalliset ja tekniset määrittelyt. Itse virheen tulkinnasta voi olla eri käsitys toimittajalla ja tilaajalla. Tilaajan mielestä tietty toiminta voi olla selvä virhe ja vastaavasti toimittaja pitää toimintaa järjestelmän ominaisuutena. Pitkäänkin käytössä olleista ohjelmista arvioidaan löytyvän noin yksi virhe tuhatta ohjelmariviä kohden. Lisäksi arvioidaan viisi prosenttia ohjelman virheistä olevan sellaisia ettei niitä koskaan havaita. Selitys virheen havaitsemattomuudelle johtuu siitä, että vaikka virheellinen kohta suoritetaan, se ei johda häiriöön. Virheellisen ohjelmakohdan suorittaminen voi aiheuttaa järjestelmään vian, mutta vika voi korjautua järjestelmän toisen toiminnon seurauksena tai sen vaikutus voi kumoutua toisen virheen seurauksena. Huonoimmassa tapauksessa vika aiheuttaa häiriötoiminnon, joka näkyy ohjelman ohjaaman järjestelmän ulkoisessa toiminnossa. [38]

6.2 Linjakäytön huolto

6.2.1 Valmistajan suosittelemat huoltotoimenpiteet

Laitevalmistaja suosittelee ennaltaehkäisevänä huoltotoimenpiteenä laitepuhaltimien ja tasajännitevälipiirin kondensaattoreiden kunnonvalvontaa sekä määrävälein suoritettavaa laitteistojen puhdistusta. Lisäksi ennaltaehkäisevässä huolto-ohjeessa painotetaan myös releiden toiminnan ja liitännöiden tarkastusta. Elektrolyyttikondensaattoreiden eliniäksi huolto-ohjeessa on

annettu noin 100 000 tuntia ja tämän jälkeen ohjeistuksessa suositellaan kondensaattoreiden mittaussväliksi 20 000 tuntia. [52]

Vaihtosuuntaajien ja syöttöryhmän huolto-ohjeessa painotetaan toimintamenetelmiä huolto-työtä suoritettaessa ja korostetaan staattisen purkausjännitteen ehkäisemistä. Lisäksi korostetaan, että osa laitekorteista on pääpiirin jännitteessä, minkä vuoksi osa vian paikannuksista on suoritettava toimintoja simuloimalla. Huolto-ohjeessa selostetaan myös ohjauskorttien toiminnot, asetukset, jännitetasot ja korteilla olevat vikaindikoinnit. Ohjeistuksesta löytyy myös vikadiagnostiikan ilmoitukset sekä vian jäljitystaulukko. Huolto-ohjeessa on myös selvitetty vaihtosuuntaajan vaihtaminen ohjelmisto päivityksineen, puolijohdetehokytkimien mittaukset, puhaltimien vaihdot sekä esitetty komponenttien sijoitukset laitteissa. [53]

Vaihtosuuntaajien huolto-ohjeet ovat keskittyneet korjaavan kunnossapidon toimintamenetelmiin sekä vian paikannukseen. Huolto-ohjeista ei löydy selviä sähkölaitteiden ennakkohuoltoon ja testaukseen liittyviä ohjeistuksia. Huolto-ohjeissa pitäisi olla alustavat huolto- ja mittaustoimintaa tukevat ohjeistukset suoritusväliaikoinen, jotta käyttöjä ylläpitävä huolto-organisaatio keskittyisi heti laitteistojen käyttöönoton jälkeen ennalta sovittuihin yhdessä määriteltyihin huoltokohteisiin ja jonka pohjalta pystyttäisiin edelleen kehittämään kunnossapitotoimintaa.

Laitevalmistajan vikaraportit ja huolto-ohjeet

Laitevalmistaja on jaotellut huoltotoimenpiteet viiden, seitsemän ja puolen sekä kymmenen vuoden ajanjaksoille. Huolto-ohjeissa on viiden sekä seitsemän ja puolen vuoden huoltovälille määritetty osa puhaltimien vaihdoista. Seitsemän ja puolen vuoden huoltoajanjaksoon sisältyy myös GTO-vaihtosuuntaajien pulssinvahvistinkorttien vaihtotyö, koska kyseiset kortit sisältävät elektrolyyttikondensaattoreita. Kymmenen vuoden välein toteutettavissa ennakkohuoltotoissa suoritetaan laitevalmistajan ohjeistuksien mukaan GTO-vaihtosuuntaajista suojauspiiriin liittyvien diodien V21 - V26 vaihdot ja suojauskondensaattoreiden C1 - C3 vaihdot. Perusteluna vaihdoille on esitetty GTO-tyristoreiden kytkentähäviöiden kasvu ja tämän myötä tyristoreiden aiheettomien vaurioitumisien lisääntymisen, mikäli kyseiset suojauskomponentit ovat rikkoutuneet tai kapasitanssiarvot pienentyneet. Katkojan suojauskondensaattorin C8 se-

kä vaihtosuuntaajan nauhakaapeleiden vaihdot kuuluvat myös kymmenen vuoden välein tapahtuvaan ennakkohuolto-ohjelmaan. [60]

Laittevalmistajan yleiset vikaraportit sisältävät vikaantuneen komponentin tai kortin tiedot ja käyttökohteet. Vikaraportit muodostuvat huolloista ja vikakorjauksista saaduista kokemuksista. Kyseisten raporttien avulla pystytään kohdistamaan vaihtosuuntaajien huollot ja ne mahdollistavat myös laitetoimittajan huoltohenkilöstölle oikeat työmenetelmät mahdollisten tulevien häiriöiden ehkäisyyn. Kyseisiä raportteja olisi myös hyvä toimittaa paikallisille kunnossapito-organisaation edustajille, jotta he pystyisivät tarvittaessa päättämään erikseen tilattavista ylimääräisistä huolloista laitteistoille.

6.2.2 Laitetoimittajalta tilatut huollot linjakäytölle

Laitetoimittajan huoltoedustaja on yhdessä kunnossapito-organisaation kanssa suorittanut liitteen kahdeksan tarkastusohjelman mukaiset mittaukset ja tarkastukset kolmelletoista paperikoneen (PK7) ja kahdeksalle superkalanterin (SK72) linjakäyttöjen GTO-vaihtosuuntaajalle. Laitetoimittajan tarkastusohjelman ennakkohuollollisina mittausmenetelminä on suoritettu du/dt -mittaus, GTO-tyristoreiden syttymisviiveiden, hila-jännitteen mittaus ja katkojan latausajan tarkistus sekä vuotovirtojen mittaukset. Muut tarkastusohjelman kohdat ovat normaalia sähkölaitteiden ennakkohuolloista toimintaa, jotka tehtaan oman kunnossapito-organisaation pitäisi suorittaa määrävälein vaihtosuuntaajille.

Laitetoimittajan huoltoedustaja on tutkinut diodisyöttöryhmien 101 - 104 tasajännitevälipiirin käyttäytymistä välipiirin latauksessa sekä paperikoneen kiihdytys- ja hidastustilanteissa. Tutkimuksen perusteella syöttöryhmien tasajännitevälipiirien latausaikoja on jatkettu ja tämän avulla on pystytty pienentämään ylijännitepiikkejä tasajännitevälipiiristä välipiirin kondensaattoreiden latautuessa.

Katkojan lataus ja du/dt -mittaus

Suoritettaessa katkojan toiminnan tarkastamista sekä niin sanottua du/dt -mittausta on moottorin syöttökaapelit irrotettava vaihtosuuntaajasta, koska moottorin syöttökaapelointi saattaisi vääristää osaa mittaustuloksista. Katkojan latauskäyrän tulee nousta tasaisesti nimellisarvoonsa tietyn ajan kuluessa. Katkojan lataamiseksi ei GTO-vaihtosuuntaajassa ole erillisiä laitteita, vaan katkojan kondensaattorit ladataan pääpiirin yhden haaran tehokytкимиä vuorotellen ohjaamalla. Katkojan jännitteen nousuun vaikuttaa kytkentätaajuus, ohjattavien tehokytкимиien suojauskondensaattorin kapasitanssi ja välipiirinjännite, mikäli katkoja ei lataudu ennalta määrättyssä ajassa aiheutuu siitä alijännitehälytys. Katkojan latauskäyrästä pystytään päättämään onko itse katkojassa vai vaihtosuuntaajan pääpiirin komponenteissa vikaa. Du/dt -mittaus on jännitteen käyrämuodon tarkastusmittaus. GTO-tyristorin jännitteen käyrämuodosta pystytään tarkastamaan oskilloskoopin avulla vaihtosuuntaajan pääpiiriin liittyvien komponenttien kunto. Jännitteen käyrämuodosta pystytään tarkastamaan GTO-tyristorin syttymisviive. Laitetoimittaja on omaan käyttöön tarkoittamissaan huoltodokumenteissa määritellyt tyristorien syttymisviiveet tehoportaittain. Laitetoimittajan vaihtosuuntaajan määräaikaishuoltodokumenteissa on lisäksi esitetty vaihtosuuntaajasillan normaalit kommutointipulsit. Puolijohdetehokytкимиen jännitteen käyrämuodon mittaustuloksista pystytään tarkastamaan GTO-tyristorin syttyminen, suojauspiirin puolijohdetehokytкимиien ja kondensaattoreiden sekä RC -suojan kunto. [60]

6.2.3 Huoltokoulutus ja huoltotoiminnan kehittäminen

Linjakäyttöjä ylläpitävälle henkilöstölle on annettu laitteistojen käyttöönoton yhteydessä linjakäyttöjen sähköhuoltokoulutus. Huoltokoulutuksen lisäksi henkilökunta on osallistunut vaihtosuuntaajien mittauskoulutukseen neljä vuotta käyttöönoton jälkeen. Mittauskoulutus on tukenut huoltokoulutuksessa opetettuja asioita. Koulutuksen sisällön pääpaino on ollut laitteiston ylläpidossa ja viankorjaukseen liittyvissä asioissa. Huolto- ja kunnossapitokoulutuksessa on käsitelty sähkökäyttöjen dokumentointiin, järjestelmäkokonaisuuteen, ohjelmistokonfiguraatioon, ohjaussignaaleihin, ohjelmointi-, ylläpito-, ja ohjauslaitteistoihin sekä vianhakuun liittyviä asiakokonaisuuksia. Koulutukset tukevat korjaavan kunnossapidon toimia.

Huoltotoiminnan kehittämisessä on käytetty hyväksi muiden samantyyppisten linjakäyttöjen häiriötietoja. Tiedonvaihtoa on suoritettu laitevalmistajan ja yrityksen eri tehdasyksiköiden välillä vuosittain järjestetyissä linjakäyttö- ja kunnossapitopäivillä. Tilaisuuden tarkoituksena on kartoittaa mahdolliset ongelmat linjakäytöissä ja samalla kehittää kunnossapitotoimintaa.

6.2.4 Kunnossapidon linjakäytön huolto- ja korjaustoiminta

Sähkö- ja automaatiokunnossapidon toiminnassa korostuu mahdollisimman nopea vian paikallistaminen ja laitteistojen käyttökuntoon saattaminen, jota tukevat laitetoimittajan antamat koulutukset sekä varaosien kattavuus. Kunnossapito-organisaatio on suorittanut korjaavan kunnossapitotoiminnan lisäksi ennakkoivana kunnossapitotoimena pääpiirin suojauskondensaattoreiden vaihdot laitetoimittajan antaman kehotuksen pohjalta. Laitetoimittaja on antanut vaihtosuosituksensa vaihtosuuntaajien vikaseurantatulosten perusteella. Kunnossapito-organisaatio on vaihtanut myös yksittäisiä laitteistojen jäähdytyspuhaltimia seurantakierrosten pohjalta.

Suurimmat ennakkohuollolliset työkohteet ovat suojauskondensaattoreiden vaihtotyön lisäksi olleet linjakäyttöjärjestelmässä nauhakaapeleiden vaihdot, jotka on vaihdettu kaikista syöttöryhmistä ja vaihtosuuntaajista. Nauhakaapelit on vaihdettu laitetoimittajan suosituksesta. [61] Nauhakaapelit liittävät ohjaussignaalit järjestelmän eri korttien välillä toisiinsa ja mikäli liitännät eivät ole kunnollisia aiheutuu niistä hankalasti paikallistettavia epämääräisiä häiriötä vaihtosuuntaajien toiminnoissa. [60]

Parhaillaan suoritetaan laitteistoista riviliitinkorttien vaihtotyötä ennakkoivana kunnossapitotyönä. Kortit ovat riviliitinkortteja, joilla järjestelmään liitetään ulkoiset signaalit. Sovellusohjaimen laajennusriviliitinkorttien ennaltaehkäisevään vaihtotyöhön on ryhdytty korteissa ilmenneiden lämpövaurioiden vuoksi. Vastaavasti perusriviliitinkorttien vaihtotyö on lähtenyt liikkeelle laitevalmistajalta, koska korteilla on havaittu ennenaikaista komponenttien vanhene- mista ja korteista on valmistettu uudet kestävämmät versiot. [61], [63]

Korttien vaihtotyön lisäksi olisi kiinnitettävä huomiota kennojen jäähdytysolosuhteisiin. Sovellusohjain ja siihen liitetyt kortit ovat yleensä linjakäytön keskuksessa omissa erillisissä pystykentissä, joita ei jäähdytetä erikseen laitepuhaltimien avulla. Kaksisuuntaisen kuusipulssityristorisillan ohjausyksikköjen kortit ovat samassa kennossa syöttöryhmän katkaisijan kanssa. Kortit on sijoitettu katkaisijan alapuolelle vaakasuoraan tai noin 30° kulmaan. Kortit on kiinnitetty kahdelle eri puolelle alumiinista levyä ja alapuolen kortit on suojattu vielä erikseen kosketussuojalevyllä. Kortit, katkaisija ja kennoon liittyvät kosketussuojalevyt täyttävät kennon rakenteen ja estävät vapaan ilmankierron kennossa. Haluttaessa välttää korttien mahdolliset lämpöongelmat myös tulevaisuudessa olisi kiinnitettävä huomiota jäähdytysolosuhteiden parantamiseen, jotka voidaan ainakin näissä tapauksissa toteuttaa hyvin pienillä rakenteellisilla muutostöillä.

Kunnossapito-organisaatio on myös aloittanut epätahtimoottoreiden pulssitakometriä vaihtotyön ennakoivana kunnossapitotyönä. Pulssiantureita ei vaihdeta yhtäaikaisesti kaikilta koneilta, vaan vaihtotyö suoritetaan porrastetusti vaihtamalla pieni erä pulssiantureita kerralla. Pulssiantureiden valmistaja lupaa antureiden laakerille 50 000 tunnin vakiovikataajuuden maksimipyörimisnopeudella ja -akselikuormalla. Tällä hetkellä vaihdettavista antureista ei välttämättä vielä yksikään ole laakereiden puolesta käyttöikänsä päässä. Vaihtotyötä tukee ainostaan se, että uudet takometrit sisältävät lisäominaisuutena ennakoivan vianilmaisutoiminnan ja pulssiantureiden seuraavat vaihtotyöt on mahdollista suorittaa pienimissä erissä todellisen käyttöikänsä mukaan, kunnossapito-organisaation muiden huoltoseisokkitoimien häiriintymättä. [61], [68]

Ennakoivana kunnossapitotoimena on myös suoritettu lämpökuvausta vaihtosuuntaajien ja syöttöryhmien pääpiirin liitynnöistä. Lämpökuvaus on suoritettu linjakäytön laitteistoista vuosittain.

Linjakäytön laitteistojen varaosat

Pienimmillä tehoportilla olevilla diodi- ja vastarinnankytketyille kuusipulssityristorisyyttöryhmille on vaihtoyksiköt käytettävissä, muut syöttöryhmät pystytään korjaamaan varaosina

löytyivistä komponenteista. Tasajännitevälipiirin kuristinyksikköjä ja kondensaattoriyksikköjä ei ole käytettävissä varaosina.

Linjakäyttöjen IGBT-vaihtosuuntaajille löytyy kaikille teholuokille vaihtoyksiköt, mutta GTO-vaihtosuuntaajilla ei ole kaikilla teholuokilla varaosasuuntaajaa. GTO-vaihtosuuntaajille pystytään tarvittaessa päivittämään vaihtoyksikkö varaosina olevasta teholuokkaa suuremmasta samalla runkokoolla olevasta laitteistosta.

Varaosille ei ole laadittu erillistä ylläpito-ohjelmaa. Kondensaattoreita sisältävät kortit voivat muodostua ongelmallisiksi pitkän varastointiajan jälkeen, mikäli korttien kondensaattoreita ei virkistetä määrävälein. Pahimmassa tapauksessa voi vaihdettu varaosa aiheuttaa enemmän tuhoa laitteistolle kondensaattorin räjähtäessä, kuin mitä alkuperäinen vika olisi saanut aikaan. Varastoitaville komponenteille ja vaihtosuuntaajille tulisi varastokirjanpito-ohjelmistossa pysyä määrittämään erilliset huoltotoiminnat tai maksimivarastointiajat, jotta komponentit ja laitteet säilyisivät pitkälläkin varastointiajalla käyttökunnossa. Erityinen painoarvo tulisi olla pulssivahvistinkorteilla ja katkojanohjauskorteilla, jotka sisältävät elektrolyyttikondensaattoreita. Kyseisten korttien toiminta vaikuttaa ratkaisevasti pääpiirin puolijohdetehokytkimien kestävyYTEEN. Lisäksi olisi kiinnitettävä huomiota varastoitavien teholähteiden toimivuuteen, jotta niiden lähtöjännitteet pysyvät valmistajan suosittelemalla toleranssialueella. Vaihtosuuntaajissa käytettävien katkojanohjaus- ja pulssivahvistinkorttien kondensaattoreille valmistaja lupaa kymmenen vuoden varastointiajan + 40 °C:een lämpötilassa jännitteettömänä. Varastointitoiminnassa olisi huomattava myös se, että kondensaattoreiden elinikäen luetaan valmiin tuotteen varastointi jännitteettömänä. Edellä olevan perusteella kaikki kortit, jotka sisältävät elektrolyyttikondensaattoreita olisi syytä päivittää määrävälein. Elektroniikkateollisuudessa elektrolyyttikondensaattoreiden varastointiajaksi suositellaan yhdestä kahteen vuotta. Mikäli jo kortin valmistusvaiheessa on kondensaattoreita varastoitu jo kaksi vuotta, jää tehtaan varastossa varastointiajasta vielä kahdeksan vuotta jäljelle, jota voidaan pitää pitkäikäisten kondensaattoreiden osalta maksimi varastointiaikana.

Vikaantuneiden korttien lähetysraportit tulisi yksilöidä erikseen korjatun vaihtosuuntaajan tai syöttöryhmän mukaan, sillä elektroniikkakorjaamolta saatava korjausraportin tieto voi antaa aiheutta tarkistaa seuraavassa huoltoseisokissa vikaantuneesta laiteista muitakin kohteita. Esi-

merkiksi, mikäli kortin liittimistä on löytynyt hapettumia, on tarpeellista tarkistaa ja tarvittaessa puhdistaa muutkin vaihtosuuntaajan korttien liitännät. Korjausraportit tulisi myös lähettää alueen automaatioryhmän vetäjälle, asiantuntijalle ja niiden tulisi myös seurata korjattuja kortteja. Korjausraportit ovat yleensä alunperin sähköisessä muodossa, jolloin ne ovat suhteellisen helppo liittää liitteeksi myös kunnossapidon laitekohtaiseen vikahistoriatietoon.

6.3 Laitteistojen kriittisyystarkastelu

Kunnossapitostrategian valinta edellyttää laitteistojen kriittisyystarkastelua. Laitteiston kriittisyystarkastelussa hyödynnettäviä valinta-, arviointikaavioita ja kriittisyysluokittelu menetelmiä on käsitelty kappaleessa 2.3. Linjakäytön syöttöryhmän, vaihtosuuntaajan tai epätahtimoottorin vaurioitumien aiheuttaa aina laitteistoseisokin. Tuotantolinjan laitteiston merkitys prosessin kannalta on huomioitava tarkastelussa, kuten kuvan 2.4 kunnossapitostrategian valintakaaviossa on esitetty.

Tuotantolinjassa olevat pituusleikkurit, superkalanterit ja uudelleenrullain ovat erillisiä laitteistokokonaisuuksia. Kyseisten laitteistojen vaurioituessa eivät seuraukset ole välttämättä tuotannollisesti vakavia. Pituusleikkureita ja superkalantereita on kaksi kappaletta tuotantolinjassa ja molemmilla on omat erilliset linjakäyttönsä. Mikäli toinen laitteistoista vikaantuu, aiheutuu siitä ainoastaan vajaakäyttöä, mutta tuotanto ei pysähdy. Uudelleenrullain on linjakäyttöjen osalta rakenteellisesti pieni laitekokonaisuus, jonka korjausaika ei vikatilanteessa muodostu tuotannon kannalta kestävämmäksi. Vastaavasti käytettäessä kuvan 2.5 kunnossapitoperiaatteen arviointikaaviota päädytään myös pituusleikkureiden ja superkalantereiden osalta korjaavaan kunnossapitotoimintaan. Pituusleikkureiden ja superkalantereiden voidaan katsoa olevan varmennettuja kokonaisuuksia, vaikka toisen leikkurin tai kalanterin rikkoontuminen aiheuttaa tuotannollista vajaakäyttöä. Mikäli tarkastellaan laitteita myös taulukon 2.1 mukaan, voi osa tuotantoprosessiin liittyvistä laitteista kuulua kriittisyysluokkaan neljä ja siitä johtuen otettava myös mukaan ennakkohuolto- ja testaustoiminnan sekä mittaustoiminnan piiriin. Superkalantereilla voidaan pääkäyttöjen katsoa kuuluvan kriittisyysluokkaan neljä, koska ne kuuluvat teholuokiltaan suurimpiin linjakäytön epätahtimoottorikäyttöihin.

Paperikonetta, päällystyskonetta ja välirullaimia voidaan pitää rakenteellisesti lähes yhtenä tuotantolinjana. Välirullaimien tai päällystyskoneen linjakäyttöhäiriö ei pysäytä välittömästi paperikonetta. Paperikoneen jälkeen tuotantolinjassa on välirullain 71, jonka jälkeen tulee päällystyskone ja välirullain 72. Paperikoneen ja välirullaimien välissä on tampoüreiden siirtorata, johon pystytään varastoimaan osa tampoüreista välirullaimen häiriötilanteessa. Lisäksi siltanosturilla pystytään nostamaan tarvittaessa tampoüreita siirtoradalta pois. Edellä olevan perusteella ei normaalissa ajotilanteessa välirullaimien tai päällystyskoneen häiriö keskeytä paperin tuotantoa välittömästi. Välirullaimilla ja päällystyskoneella on vikatilanteessa pystytävä paikallistamaan ja korjaamaan vika ennen kuin paperikone pysähtyy. Varaosatarkastelussa ilmeni, että linjakäytön laitteistolle on käytössä varaosavaihtosuuntaajat ja tämän lisäksi syöttöryhmien komponentit tai vaihtoyksiköt löytyvät varaosina. Kunnossapito-osasto pystyy mittaamaan vaihtosuuntaajan kunnan ja tarvittaessa vaihtamaan vaihtosuuntaajan, riippuen vaurion vakavuudesta sekä korjaamaan syöttöryhmän puolijohdetehokytken tai ohjauskorttien vaurion, vähintään kahdeksassa tunnissa jolloin ei myöskään paperin tuotanto pysähdy normaalissa tuotantotilanteessa. Edellä mainittujen seikkojen vuoksi painottuu kunnossapito-ohjelman sisällöllinen jako seuraavasti:

1. Paperikone. Sähkölaitteiden ennakkohuolto- ja testaustoiminnan sekä mittaustoimintojen seurannan on oltava tehokasta sekä korjaustoiminnan nopeaa
2. Päällystyskoneella ja välirullaimilla korostuu nopea korjaustoiminta muita kunnossapito-ohjelman toimintoja enemmän.

Käytettäessä kuvan 2.5 kunnossapitoperiaatteen arviointikaaviota hyväksi paperikoneen, päällystyskoneen sekä välirullaimien kunnossapitostrategiaa arvioidessa päädytään samaan tulokseen kuin edellä. Kuvan 2.5 viimeistä kysymystä on kuitenkin muokattava muotoon: *Keskeyttääkö vaurioituminen välittömästi paperin tuotannon?* Nyt päädytään paperikoneen osalta ennakoivaan kunnossapitoon ja välirullaimien sekä päällystyskoneen osalta korjaavaan kunnossapitoon. Lisäksi kuvan 2.5 arviointikaavio ohjaa suuria kustannuksia vaativat kustannukset ennakoivan kunnossapidon piiriin. Taulukon 2.1 komponenttien kriittisyysluokittelun avulla voidaan erottaa osa laitteista huolto- ja mittaustoiminnan piiriin. Kriittisyysluokittelussa voi-

daan painottaa niitä laitteistoja erikseen, jotka kuuluvat yhtä aikaa kriittisyysluokkiin kolme ja neljä.

Kappaleessa 4.3.2 käsiteltiin prosessitoimialueen mukaisia *MTTF*- ja λ -arvoja ja havaittiin yksittäisen vaihtosuuntaajan olevan luotettava. Taulukossa 4.10 lyhimmät vikavälit olivat päällystyskoneella ja paperikoneella. Vikaväleihin vaikuttavat linjakäytössä olevien vaihtosuuntaajien määrä. Tarkastellaan toteutuneita häiriöitä vaihtosuuntaaja tyyppin (IGBT/GTO), vian ja prosessitoimialueen mukaan paperi- ja päällystyskoneilla. Häiriöitä koko seurantajakson aikana 15.5.1997 – 11.9.2001 on paperikoneella ilmennyt yhteensä 28 kappaletta ja vastaavasti päällystyskoneella 17 kappaletta. Taulukossa 6.9 esitetään pohjapaperikoneen häiriöt vaihtosuuntaajan teholuokan mukaan ja taulukossa 6.10 esitetään päällystyskoneen linjakäytöjen häiriöt.

Taulukko 6.9 Pohjapaperikoneen linjakäytön häiriöt GTO-vaihtosuuntaajan (N=49) teholuokan mukaan

Vaihtosuuntaajan teholuokka	Teholuokat $1040 \leq S \leq 2000$ kVA (n= 11 ¹⁾)			Teholuokat $40 \leq S < 1040$ kVA (n=38)		Syöttöryhmä
	2000 kVA	1370 kVA	1040 kVA	500 kVA	$40 \leq S \leq 420$ kVA	
Vikamäärä (N=28)	n=7	n=4	n=9 ²⁾	n= 0	n=7	n=1 ³⁾

1) sisältää kaksi rinnankytkettyä konstruktioita. 2) Sisältää neljä sähkötilan yllimmästä johtuvaa häiriötä. 3) Riviliitinkorttivika.

Päällystyskoneella on APC-sovellusohjaimen liittyviä häiriöitä kirjattu kaikkiaan seitsemän kappaletta seurantajakson aikana. Lisäksi kyseisellä ajanjaksolla on myös ilmennyt yksi sähkötilan yllimmästä aiheutunut häiriö. Seurantajakson aikana on myös kirjattu ylös yksi ns. yhteinen häiriötekijä ”väyläviat”, jotka on korjattu liittimien vaihtotyöllä. Mikäli edellä mainitut viat karsitaan pois häiriöistä, jää jäljelle ainoastaan kuusi kappaletta vaihtosuuntaajille kirjattua vikaantumista sekä kaksi kappaletta tyristorisyöttöryhmille kirjattua vikaa. Molemmilla tyristorisyöttöryhmillä häiriöt ovat johtuneet apujänniteteholähdekortista (SDCS POW-1) ja edellä mainitun kortin lisäksi toiselta syöttöryhmältä on vaihdettu korjaavana kunnossapitotoimena myös kommunikointikortti (SDCS-COM-1). APC-sovellusohjaimen liittyvät häiriöt ovat johtuneet yleensä riviliitinkortteihin liittyvistä ongelmista. Taulukossa 6.10 esitetään pelkästään päällystyskoneen vaihtosuuntaajien häiriöt teholuokittain vaihtosuuntaajatyypin mukaan.

Taulukko 6.10 Päälylystyskoneen vaihtosuuntaajien (N=65) häiriömäärät

Vaihtosuuntaajan teholuokka	Teholuokat $500 \leq S \leq 260$ kVA (n= 17)			Teholuokat $50 \leq S \leq 150$ kVA (n= 48)		
	500 kVA (GTO)	315 kVA (GTO)	260 Kva (GTO)	150 kVA (IGBT)	100 kVA (IGBT)	50 kVA (IGBT)
Vikamäärä (N=6)	n=0	n=0	n=2	n= 2	n=0	n=2

Taulukon 6.10 vaihtosuuntaajienkin häiriöistä myös on kaksi kappaletta liittynyt kommunikointiongelmiin APC-sovellusohjaimen kanssa.

Seurantajakson aikana on häiriöitä ilmennyt myös superkalanterilla (71) ja pituusleikkureilla. Superkalanterilla kirjatuista häiriöistä kaksi kappaletta on liittynyt vaihtosuuntaajien laajenusriviliitinkortteihin ja yksi kappale syöttöryhmään sekä GTO-vaihtosuuntaajaan. Superkalanterin vaihtosuuntaajasta (pääkäytöstä) on särkynyt puolijohdetehokytin ja suojauspiirin komponentteja. Pituusleikkureilla häiriöt ovat liittyneet vaihtosuuntaajan tehokomponentteihin ja suojauspiirin komponentteihin. Syöttöryhmällä on häiriöitä ollut yksi kappale. Taulukossa 6.11 esitetään superkalanterin ja pituusleikkureiden vaihtosuuntaajien häiriöt teholuokittain, joista on poistettu APC-sovellusohjaimen liittyvät häiriöt ja syöttöryhmähäiriöt.

Taulukko 6.11 Superkalanterin ja pituusleikkureiden vaihtosuuntaajien (N= 44) häiriöt

Vaihtosuuntaajan teholuokka	Teholuokat $1040 \leq S \leq 2000$ kVA (n= 6 ¹⁾)		Teholuokat $40 \leq S < 1040$ kVA (n=12)			Teholuokat $50 \leq S \leq 150$ kVA (n=26)	
	2000 kVA (GTO)	1370 kVA (GTO)	800 kVA (GTO)	500 kVA (GTO)	$40 \leq S \leq 420$ kVA (GTO)	100 kVA (IGBT)	50 kVA (IGBT)
Vikamäärä (N=8)	n=1	n=7	n=0	n=0	n=0	n=0	n=0

1) sisältää kaksi rinnankytkettyä konstruktioita

Taulukoiden 6.9, 6.10 ja 6.11 vikaantumismääristä voidaan todeta häiriöiden painottuvan yli 1040 kVA:n GTO-vaihtosuuntaajille. Seurantajakson vikahistoriatietojen perusteella kunnossapidon ennakkohuoltotoiminnan pitäisi keskittyä yli 1040 kVA:n vaihtosuuntaajakäyttöihin.

Kuvan 2.5 kunnossapitoperiaatteen arviointikaavio ja taulukon 2.1 komponenttien kriittisyysluokittelu ohjaavat suuria kustannuksia aiheuttavat korjaukset ennakoivan kunnossapidon piiriin. Vaihtosuuntaajien hinta liikkuu yli 1040 kVA:n teholuokilla noin 30 000 eurosta ylöspäin ja vastaavasti alle 420 kVA:n teholuokilla hinta on vain puolet siitä pienentyen teholuokittain. Vikahistoriatiedot tukevat kyseistä tarkastelumallia, sillä vaihtosuuntaajien häiriöitä teho-

luokilla $420 < S < 1040$ kVA ei tarkastelujakson aikana ole kirjattu ylös ja teholuokilla $S \leq 420$ kVA on häiriöitä ilmennyt vähemmän, kuin suurimmilla vaihtosuuntaajilla. Edellä olevan perusteella tulee vaihtosuuntaajien ennakoiva ja tutkiva kunnossapitotoiminta keskittää suurimmille käytöille. Linjakäytöissä on yhteensä 18 kappaletta yli 1040 kVA:n vaihtosuuntaajakäyttöä, joita on huomioitava tarkemmin ennaltaehkäisevän kunnossapidon toiminnassa. Taulukossa 6.12 esitetään tehdyn kriittisyystarkastelun perusteella yhteenveto linjakäyttöjen vaihtosuuntaajien kunnossapitostrategiasta teholuokittain.

Taulukko 6.12 Linjakäytön vaihtosuuntaajien kunnossapitostrategia teholuokittain

Vaihtosuuntaajan teholuokka	Teholuokat $1040 \leq S \leq 2000$ kVA			Teholuokat $40 \leq S < 1040$ kVA		
	2000 kVA	1370 kVA	1040 kVA	800 kVA	500 kVA	$40 \leq S \leq 420$ kVA
Kunnossapitostrategia	Ennakoiva ja tutkiva kunnossapito	Ennakoiva ja tutkiva kunnossapito	Ennakoiva ja tutkiva kunnossapito	Korjaava kunnossapito	Korjaava kunnossapito	Korjaava kunnossapito

7. YHTEENVETO HUOLTOTOIMENPITEISTÄ

Linjakäyttöjen toteutuneista kunnossapitotoista suurin osa on ollut laitteiden korjausta ja osien vaihtoa. Laitteiston ikääntyessä kunnossapito-ohjelmaan pitää sisällyttää myös huolto- ja mittaustoimintaa. Sähkölaitteiden vikatapaukset on kirjattu ylös ja käsitelty käytön- ja kunnossapidon yhteisissä palavereissa. Vika-analyysit tulisi liittää myös kunnossapidon tietojärjestelmään aina laitekohtaisesti.

Linjakäyttöjen ennakkohuollon huolto- ja mittaustoiminnan kehittämistoimenpiteinä voidaan toteuttaa seuraavia asiakokonaisuuksia:

1. Syöttöryhmien puolijohdetehokytkimien kunnonvalvontana voidaan toteuttaa suojauspiirien toiminnan tarkastus määräväleihin. Lisäksi olisi myös tarkastettava tyristorisyöttöryhmien ohjaspulssit, joilla on vaikutusta tyristorin sähköisen rasituksen keston. Puolijohdetehokytkimien vuotovirrat voidaan tarkastaa samassa yhteydessä.
2. Tasajännitevälipiirin komponenteille tulee tehdä ensimmäiset tarkastustoimet kahdeksan vuotta käyttöönoton jälkeen. Kondensaattori- ja kuristinyksiköitä ei tarvitse välttämättä mitata kaikkia. Mittauskohteeksi voidaan valita esimerkiksi syöttöteholtaan suurimpien diodisyöttöryhmien tasajännitevälipiirien kondensaattori- ja kuristinyksiköt, jolloin mitattavia kohteita olisi vain neljässä eri diodisyöttöryhmässä. Laitteistojen käyttöönoton yhtäaikaisuuden perusteella voidaan olettaa muiden syöttöryhmien tasajännitevälipiirin komponenttien vanhenevan likimain samankaltaisesti.
3. Linjakäytön valmistajan huoltoedustajan suorittamalla tutkivan kunnossapidon toimilla voidaan korvata GTO-vaihtosuuntaajan suojauskomponenttien ennaikainen vaihtotyö. Tehoelektronikan komponenttien vikaintensiteetti on hyvin alhainen ja komponentit ovat käyttö kautensa aikana erittäin luotettavia. Linjakäyttöjen sähkötilat ovat ilmastointi- ja jäähdytysolosuhteiltaan hyvät, jolloin sähköisten komponenttien ennaikaista vikaintensiteetin kasvua tuskin tapahtuu. Pitkäikäisten elektrolyyttikondensaattoreiden vakiovikaintensiteettiajaksi on arvioitu kymmenen vuotta 60 °C:een läm-

pötilassa. Sähkötiloissa ympäristön lämpötila on huomattavasti alhaisempi ja keskuk-sien sisällä laitteistojen jäädytykseen käytetään pakotettua konvektiota. Elektrolyytti-kondensaattoreiden osalta voidaan todeta, että niiden todellinen vakiovikataajuusaika on todennäköisesti huomattavasti pidempi. Aikaisemmin todettiin, että ympäristön lämpötilan 7 – 10 °C:een lasku jatkaa kondensaattoreiden elinikää kaksinkertaiseksi. Edellä olevan perusteella on järkevämpää suorittaa katkojen lataus- ja du/dt –mittauk-set kahdeksan vuotta käyttöönoton jälkeen, ennemmin kuin vaihtaa kaikki pulssivah-vistin-, katkojanohjauskortit ja suojauspiirien komponentit määrävälein. Laitevalmis-tajan huolto-ohjelmaan on sisällytetty nauhakaapeleiden vaihdot, joita ei myöskään välttämättä tarvitse vaihtaa kyseisenä ajanjaksona, mikäli tutkitaan esimerkiksi kym-menen kappaleen otoksena vaihtosuuntaajista sähkötilakohtaisesti nauhakaapeliliitän-töjen kunto visuaalisesti. Visuaalinen tarkastuksessa tulisi tutkia esiintykö nauhakaap-pelin liitännöissä hapettumia tai korroosiota. Mikäli liittimet ovat kunnossa ei vaihto-työhön ole järkevää ryhtyä. Vaihtosuuntaajien huoltomääräajoissa olisi syytä kiinnittää huomiota laitteiden toimintaympäristöön. Mikäli laitteistojen toimintaympäristö ei ra-sita komponentteja, tulee huoltoväliajat sovittaa aina laitteistokohtaisesti. Laitetoimit-taja voisi luokitella laitteet toimintaympäristön, mekaanisten ja sähköisten rasitusteki-jöiden mukaan tarkastusohjelmassa erikseen ja sen perusteella antaa laitteille huolto-välisuosituksensa. Laitetoimittajan esittämät määräaikaishuoltotoimenpiteet ovat jär-keviä siinä tilanteessa, kun laitteiden komponenttien todellinen käyttöikä on määritetty, jonka jälkeen vikaantuminen kasvaa kaikilla vaihtosuuntaajilla huomattavasti. Laite-toimittajan esittämällä toimenpiteillä pystytään palauttamaan laitteistosta vaihdettujen komponenttien osalta vikataajuus käyttöönottilanteen mukaiseksi.

Edellä olevien toimien lisäksi tehtaan oma kunnossapito-organisaatio voisi toteuttaa laitetoimittajan tarkastusohjelmasta määrävälein kohtien 1 – 9 ja 18 – 21 mukaiset huoltotoiminnot. Mittaustulokset voitaisiin kirjata kunnossapidon käyttämään tietojärjestelmään, samalla tavoin kuin vikaraportit. Markkinoilla on myös laitteita, joilla voidaan testata puolijohdetehokytkimi-en kunto. Testauslaitteiston avulla kunnossapito-organisaatio voisi suorittaa osan puolijohde-tehokytkimien kunnonvalvontamittauksista tarvittaessa itse. Laitetta voitaisiin käyttää tarkas-tustoiminnassa vaihtosuuntaajan korjaustoimenpiteiden jälkeen puolijohdetehokytkimen toi-

mivuuden varmistamiseksi ennen normaalia käyttöönottoa. Laitteistolla pystytään mm. tarkistamaan puolijohdetehtokytken sulku- ja estojäännite, vuotovirta ja ohjaamaan tyristori tai IGBT-komponentti johtavaan tilaan.

Linjakäyttöjen laitteiden kunnonvalvonnan mittaustoiminnalle on määritettävä oikeat mittausajanjaksot. Laitetoimittaja suosittelee osalle laitteiston komponenteista 100 000 tunnin jälkeen huoltoväliksi 20 000 tuntia, jota voidaankin pitää mahdollisesti koko laitteistojen alustavana mittausaikajaksona. Edellä mainitun lisäksi painoarvoltaan tärkeimmiltä erikseen laitteistojen kriittisyystarkastelussa määritellyiltä kohteilta tulisi tarkastusmittaukset suorittaa vuosittain. Komponenteille on annettu niiden toimiessa vakiovikataajuudella omat toleranssirajansa. Komponentin ominaisarvojen muuttuminen tietyn raja-arvon ala- tai yläpuolelle voidaan tulkita vikaantumiseksi. Komponentin vikaantumisen ja laitteiston vian välinen aikaväli voi olla joissakin tapauksissa hyvinkin lyhyt. Suoritettaessa osalle laitteistosta lyhyemmän aikaväliin perustuvia mittauksia voidaan niitä käyttää hyväksi myös muiden laitteiden osalta ennakkovaroituksena vikaantumisesta, vaikkakin monet sähköiset häiriöt ja viat eivät useinkaan ole laitteiston iästä riippuvaisia. Mittaavan kunnonvalvonnan avulla pystytään ehkäisemään laitteiston vikaantumista, mutta laitteiston vian kehittymismalli vaikuttaa ratkaisevasti mittauksista saatavaan hyötyyn. Mikäli vikaantuminen on erittäin nopeaa ei mittaavalla kunnonvalvonnalla saavuteta hyötyä, mutta mikäli vikaantuminen tapahtuu hitaasti voidaan mittavalla kunnonvalvonnalla helposti estää laitteiston rikkoutuminen. Verrattaessa sähköisiä laitteita ja mekaanisia laitteita voidaan todeta, että mekaanisilla laitteilla vikaantuminen tapahtuu hitaammin laitteiston osien kuluessa, kun taas sähköisillä laitteilla vikaantuminen voi olla erittäin nopeaa yhden ainoan komponentin pettäessä sähköisestä piiristä. Edellä mainitusta johtuen on sähköisten laitteiden, jotka sisältävät paljon elektroniikkaa hankala suorittaa mittaustoimintojen avulla jatkuvaa kunnonvalvontaa. Elektroniikkakortteja voidaankin pitää kerralla vaihdettavina laitteiston komponentteina niiden vikaantuessa. Vaihtosuuntaajan ja syöttöryhmien pääpiirin komponenttien ja ohjaus- sekä suojauspiirien kuntoa pystytään seuraamaan kohtuullisesti, mutta kuten aikaisemmin on todettu on myös niiden vikaantumien erittäin nopeaa. Edellä olevasta johtuen, vaikka käytettävissä on mittausmenetelmiä joilla voidaan viat paikallistaa, on myös pystyttävä määrittämään tarkat ja oikeat mittausaikavälit, jotta mittaustoiminnasta olisi hyötyä.

Oikeat mittausajanjaksot käytössä olevista laitteistoista saadaan selville ainoastaan jatkuvien määräaikaisten mittauksien ja niiden seurannan avulla.

Käyttöjen vikakirjaustoimintaa tulisi myös kehittää. Nelson–Aalen diagrammin avulla voidaan tarkastella hyvin pitkän aikavälin muutoksia häiriökehityksessä. Diagrammi antaa myös paremman visuaalisen käsityksen häiriömäärien kehityksestä, kuin pelkkä taulukoitu tieto häiriöistä ja laiteseisokeista.

Sähköisten komponenttien vikaintensiteetti on voimakkaasti riippuvainen ympäristön lämpötilasta ja tämän vuoksi sähkötilojen jäähdytyksen on toimittava ongelmitta. Tarkasteltaessa linjakäytön jäähdytysratkaisuja voidaan todeta, että keskitetyllä ilmastointiratkaisulla olisi voitu huomattavasti vähentää määräaikaisesti vaihdettavien ja kuluvien laitteistokohtaisten jäähdytyspuhaltimien määrää ja parantaa laitteiston käyttövarmuutta, koska laitteistojen puhaltimien vaihto vaatii huoltoseisokin.

Linjakäyttöjen huoltotoiminnassa ei saa unohtaa myöskään ihmisaisteja. Säännöllisten kunnonvalvontakierrosten avulla pystytään paikallistamaan laitteistoissa ilmeneviä muutoksia. Linjakäyttöjen kunnonvalvontakierrokset olisi tehtävä viikoittain ja mielellään saman henkilön suorittamana, koska ihmisaistein avulla vikoja havainnoidessa laitteiston vikaantuminen on usein edennyt niin pitkälle, että korjaustoimenpiteisiin joudutaan ryhtymään hyvin lyhyellä varoitusaajalla. Ihmisaistien avulla suoritettavaan kunnonvalvontaan vaikuttaa ratkaisevasti henkilön ammatillinen kokemus laitteistosta ja sen käyttäytymisestä. Mikäli laitteiston tarkastelu on jaettu yhteisvastuullisesti alueasentajien kesken, ei välttämättä laitteiston tarkastelu-kohteissa tapahtuvia muutoksia havainnoida yhtä vastuuntuntoisesti, kuin yhden erikseen määritellyn henkilön suorittamana.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Komonen, Kari. Teollisuuden kunnossapidon rakenne ja tehokkuus. Report No 5. Espoo 1998, HUT. 189 s.
- [2] Aalto, H. Kunnossapitotekniikan perusteet. Loviisa 1994, Kunnossapitoyhdistys ry. 95 s.
- [3] PSK 6201 EHD. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. Prosessiteollisuuden standardoimiskeskus r.y, 1994. 11 s.
- [4] Järviö, J. Kunnossapidon totuudet eilen ja tänään - Osa 2, Kunnossapito. 1998. No. 5, s. 18 – 23.
- [5] Konola, J. Kunnossapidon tietojärjestelmä käyttövarmuustiedon lähteenä Suomen paperi- ja selluteollisuudessa. Espoo 2000, VTT. 25 s.
- [6] Siekkinen, V. Tuotantolaitoksen kunnossapito. Opintojakson 24580 oppimateriaali. Tampere 1998, TTKK. 68 s.
- [7] Moubray, J. RCM II, Reliability-centered Maintenance. 2nd ed. USA 1997, Industrial Press Inc. 423 s.
- [8] Gill, P. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. USA 1998, Marcel Dekker, INC. 600 s.
- [9] Aro, M. Sähkölaitteiden kunnonvalvonta. Opintojakson S-18.149 oppimateriaali. Espoo 1998, TKK. 236 s.
- [10] Kokko, V. Pyörivien sähkökoneiden sähköiset kunnonvalvontamenetelmät. Kunnossapito (1998) No. 2, s. 18 – 22.
- [11] Työryhmä PSK 77. PSK-käsikirja 5. Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. 1. Painos. Vantaa 2002, PSK Standardisointiyhdistys ry. 66 s.
- [12] Lindh, T. Partanen, J. Sähkökäyttöjen mittaavan kunnonvalvonnan menetelmiä. Tutkimusraportti 4. Lappeenranta 1999, LTKK. 50 s.
- [13] Etto, J. Prosessisähköistyksen kunnossapito – Osa 2. Kunnossapito – lehden erikoisliite (1998) No. 48. 16 s.
- [14] Sähköinsinööriliitto. Sähkölaitteiden kunnonvalvontaa lämpökameralla, Sähkö & tele (1999) No. 3. s. 22-23.

- [15] Tynjälä, T. Lämpökuvauksen käyttö ennakoivassa kunnossapidossa ja kunnonvalvonnassa. In: Sarkomaa, P. & Pajari, R. Infrapunateknologian seminaari. Opetusmoniste EN C-130. Lappeenranta 1999, LTKK. S. 23.
- [16] Hänninen, Veijo. Lämpökuvaus elektroniikan tuotekehityksessä, Prosessori (1990) No: 4. S. 17-19.
- [17] VACON CX/CXL/CXS Käyttöohje & ”Five in One+” –sovellusopas, Vaasa Control Oy. 1998.
- [18] Laiteopas ACS/ACC/ACP 601 –taajuusmuuttajat 2,2 – 110 kW, ABB Industry Oy. 1999.
- [19] Haataja, J. AC-käyttöjen soveltuvuus paperikonekäyttöihin. In: Pyrhönen, J. & Partanen, J. Tehokas sähkön käyttö. Opetusmoniste EN C-72. Lappeenranta 1994, LTKK. S. 38.
- [20] Arjas, A. Paperin valmistus, osa 2. 2. painos. Turku 1983, Oy Turun Sanomat/Serioffset. 1343 s.
- [21] Häggblom-Ahnger, U. & Komulainen, P. Paperin ja kartongin valmistus. Helsinki 2000, Hakapaino Oy. 280 s.
- [22] <http://oulunotes.ou.ensocom/insite/fin/sivu02.htm>
- [23] Riikonen, E. TPM – tuottava kunnossapito. In: SCEMM. Käynnissäpidon johtaminen ja talous. Loviisa 1996, Painoryhmä Oy. 224 s.
- [24] Välisalo, T. Mitä RCM:n avulla saavutetaan? In: Järviö, J. RCM, Luotettavuuskeskeinen kunnossapito, Kunnossapidon julkaisusarja N:o 4. Hamina 2000, Kunnossapitoyhdistys ry. S. 143 - 152.
- [25] Niemelä, I & Hossi, H. Automaatiojärjestelmien käyttövarmuusanalyysi. Espoo 1984, VTT. 45 s.
- [26] Dhillon, B.S. Engineering Maintainability. USA 1999, Gulf Publishing Company. 253 s.
- [27] Pietikäinen, M & Pulli, T. Koneenohjausjärjestelmän luotettavuus. Helsinki 1988, Metalliteollisuuden Keskusliitto. 47 s.
- [28] ABB: Teknisiä tietoja ja taulukoita - Käsikirja.
Saatavissa: [http:// www.abb.com/fi](http://www.abb.com/fi)

- [29] Lyonnet, P. Maintenance Planning, Methods and mathematics. USA 1991, Chapman & Hall. 224 s.
- [30] Bergman, E. Korjattavien järjestelmien vikatietojen tilastollinen käsittely. In: Holmberg, K. Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Espoo 1997, VTT. 151 s.
- [31] Lyytikäinen, A. Käyttövarmuuskäsikirja. Espoo 1987, VTT. 147 s.
- [32] Leinonen, H & Säynätjoki, M. Komponenttien käyttöhistoriatiedot käyttövarmuus-tarkasteluissa. In: Holmberg, K. Käyttövarmuus kilpailutekijänä. Espoo 1997, VTT. 151 s.
- [33] Järviö, J. Luotettavuuskeskeinen kunnossapito. Hamina 2000, Kunnossapitoyhdistys ry. 192 s.
- [34] Oliver, J A. Adjustable speed drives. USA 1992, Electric Power Research Institute. 426 s.
- [35] Lapinniemi, J. Linjakäytönhäiriöt PK7-linja, 15.05.1997 – 11.09.2001. Häiriöraportti.
- [36] Joensuu, K & Yliherva, E. Laitevikojen aiheuttamat seisokit, 1999 – 2001. Häiriöraportti.
- [37] StoraEnso Oy:n Kemin tehtaiden Paperikone viiden häiriöpäiväkirjat 1997, 1998, 1999, 2000, 2001.
- [38] Haikala, I & Märijärvi J. Ohjelmisto tuotanto. 7. Painos. Pieksämäki 2000, Satku-Kauppakaari Oy. 414 s.
- [39] Skibinski, G L. Installation Considerations for IGBT AC Drives. In: Stebbins, W. Adjustable Speed Drives. USA 1998, IEEE. 233 s.
- [40] Paloniemi, P & Keskinen, E. Sähkökoneiden eristykset. Otaniemi 1996. TKK. 63 s.
- [41] Rintala, K. Sähkökoneiden eristykset ja niiden vanheneminen. Otaniemi 1982, TKK. 44 s.
- [42] Jokiniemi, M & Paloniemi, P. Sähkökoneiden eristeistä ja eristyksistä. 1976, Oy Strömberg Ab. 115 s.
- [43] Tiedustelu epätahtimoottoreiden eristyksistä Romppainen/Kallela, J & Pirhonen, S, ABB. 30.04.2002.

- [44] Pyrhönen, J. Pyörivän sähkökoneen suunnitteleminen. Opetusmoniste. EN C-70. Lappeenranta 1998, LTKK.
- [45] PSK 5707. Kunnanvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. Prosessiteollisuuden standardoimiskeskus r.y, 2001. 20 s.
- [46] Grounding and cabling of the drive system. Variable Speed Drives. ABB Industry Oy. 1998.
- [47] Hammar, T. Suurtaajuiset laakerivirrat oikosulkumoottorikäytöissä. In: Tuusa, H. Säädetyt moottorikäytöt. Licensiaattiseminaari. Tampere 1997, TTTK.
- [48] Boldea, I. & Nasar, S. A. Electric Drives. USA 1999, CRC Press LCC. 411 s.
- [49] Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry. Moottori ja muuntajakäämitykset. Espoo 1987, Cummerus Oy.
- [50] Puhelinkeskustelu. Romppainen/Kiviniemi, I. Muuntosähkö Oy – Trafox. 21.05.2002.
- [51] Puhelinkeskustelu Romppainen/Kavala, A. ABB. 03.06.2002
- [52] ABB. ACV 700 –taajuusmuuttajat. Yleiset ohjeet ja turvallisuus. 1997. ABB Industry Oy.
- [53] ABB. ACV 700 –taajuusmuuttajat. Huolto-ohje. 1995. ABB.
- [54] ABB. ACV 700-taajuusmuuttajat. Laitteistokäsikirja. 1995. ABB.
- [55] Niiranen, J. Tehoelektroniikan komponentit. Toinen korjattu painos. Helsinki 1997, Otatieto Oy. 233 s.
- [56] Pyrhönen, J. Hupponen, J. Kuisma, M. Laurila, L. Tehoelektroniikan komponentit. Opetusmoniste. UDK 621.314. Lappeenranta 2000, LTKK
- [57] Evox Rifa: Overview. (IEC Publications – Test Procedures and Requirements) Saatavissa: http://www.evox-rifa.com/electrolytic_cat/general.pdf
- [58] Aura, L. Tonteri, A. J. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo 1996, WSOY. 544 s.
- [59] Dynex Semiconductor: Effects Of Temperature On Thyristor Performance. Saatavissa: <http://www.dynexsemi.com/products/appnotes/data/an4870.pdf>
- [60] Kirjalliset tiedonannot. Taajuusmuuttajien huoltotoimenpiteet, huolto-ohjeet ja vikaraportit. Kavala, A. Kallela, J. ABB. Kevät 2002.

- [61] Suullinen tiedonanto. Lapinniemi, J. Fortek Oy. 04.06.2002.
- [62] Leine & Linde. Manual for Advanced Diagnostic System.
Saatavissa: <http://www.leinelinde.se>
- [63] Suullinen tiedonanto. Kavala, A. ABB. 07.06.2002
- [64] Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry. Elektroniikassa käytettävien komponenttien käyttösäännöt. Tutkimusraportti KOTEL 238. Saarijärvi 2000, Gummerus Kirjapaino Oy. 115 s.
- [65] Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry. Staattisen sähkön (ESD) vaikutukset elektroniikkalaitteille. Tutkimusraportti KOTEL 218. Espoo 1993, VTT Offsetpaino. 116 s.
- [66] Kuisma, M. Staattinen sähkö ja staattisen sähkön purkaus. In: Sähkömagneettinen yhteensopivuus. Opetusmoniste. Lappeenranta 2000, LTKK.
- [67] Elektroniikan tutkimuksen ja kehityksen yhteistyöelin KOTEL ry. Elektroniikkateollisuuden luotettavuuskäsikirja. Työryhmäraportti KOTEL 214. Espoo 1991, VTT Offsetpaino. 214 s
- [68] Leine & Linde: Specifications.
Saatavissa: <http://www.leinelinde.se>
- [69] http://insite.storaenso.com/knowpap/knowpap30/su_knowpap.htm
- [70] ABB. ACV 700, SAMI Star. Frequency Converters. Commissioning of SAFUT Thyristor Braking Unit. Installation of Rebuild Kit. ABB Industry Oy. 1996.
- [71] ABB. PPS200 Sähkökäyttö. Sähköhuoltokoulutus – mappi. 1997. ABB.
- [72] ABB Pulp & Paper. Enso Fine Papers Oy, Linjakäytön toimintakuvaus, Oulun tehtaat, Paperikone 7. 1996, ABB Pulp & Paper. 19 s.
- [73] ABB Pulp & Paper. Enso Fine Papers Oy, Linjakäytön toimintakuvaus, Oulun tehtaat, Päällystyskone 7. 1997, ABB Pulp & Paper. 17 s.
- [74] Pyrhönen, J. Sähkökäytöt. Opetusmoniste. Lappeenranta 1999, LTTK. 246 s.

LIITELUETTELO

- LIITE 1: Tyristorisyöttöryhmän elektroniikkakorttien väliset liittynät
- LIITE 2: IGBT- ja GTO-vaihtosuuntaajyksiköiden elektroniikkakorttien liittynät
- LIITE 3: Käytönohjausryhmän rakenne
- LIITE 4: Tyristori- ja diodisyöttöryhmien pääpiirikaaviot
- LIITE 5: Tyristorin myötä- ja estojännitekestoisuus lämpötilan funktiona, tyristorin vi-
kaintensiteetti liitoslämpötilan ja jännitesuhteen funktiona
- LIITE 6: Kondensaattoreiden ominaiskuvaajat, vikaintensiteetit ja sijaiskytkentä
- LIITE 7: Epätahtimoottorin mittauspöytäkirja
- LIITE 8: GTO-vaihtosuuntaajan tarkastuskohteet
- LIITE 9: Paperikoneen puristinosan ja etukuivausosan 1. kuivatusryhmän ohjearvoketju
- LIITE 10: GTO – Tyristorin vuotovirran raja-arvot hila-katodijännitteen funktiona.