



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ELEKTRIAJAMITE DIAGNOSTIKA JA TÕRKEID TALUVA JUHTIMISE ALUSED

BASICS OF DIAGNOSTICS AND FAULT-TOLERANT CONTROL OF ELECTRICAL
DRIVES

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kaur Kuslap

Üliõpilaskood: 134113AAAB

Juhendaja: Anton Rassõlkin, professor

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Kaur Kuslap

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Elektriagamite diagnostika ja tõrkeid taluva juhtimise alused

Kuupäev: 11.12.2019

45 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): professor Anton Rassõlkin

Sisu kirjeldus:

Käesoleva bakalaureusetööga antakse eestikeelne ülevaade elektriagamite diagnostika ja tõrkeid taluva juhtimise alustest. Kirjeldatakse tõrkeid taluva juhtimise ja diagnostika olemust, elektriagamite tõrgete tekkepõhjuseid ning tõrkeliike. Et anda ettekujutus valdkonna tänapäeva tasemest, tuuakse näiteid viimase kahe aasta jooksul avaldatud teadusartiklitest, kus kirjeldatakse uusi meetodeid elektriagamite tõrgete diagnostika ning tõrkeid taluva juhtimise vallas. Töö on koostatud erialastest kirjandusallikatest pärineva info põhjal.

Märksõnad: elektriagamid, tõrkeid taluv juhtimine, tõrketaluvus, diagnostika, bakalaureusetöö.

ABSTRACT

Author: Kaur Kuslap

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Basics of diagnostics and fault-tolerant control of electrical drives

Date: 11.12.2019

*45 pages (the number of thesis pages
including appendices)*

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor of the thesis: Professor Anton Rassõlkin

Abstract:

This thesis gives an overview of the basics of diagnostics and fault-tolerant control of electrical drives in Estonian. The essence of fault-tolerant control and diagnostics is described. An overview of the fault categories and conditions leading to faults in electrical drives are presented. A brief insight to the current state of the research in diagnostics and fault tolerant control of electrical drives is given with examples from recent research papers about different diagnostics and fault tolerant control methods. The thesis is compiled based on information found in literature.

Keywords: electrical drives, fault-tolerant control, fault tolerance, diagnostics, Bachelor Thesis.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Elektriamite diagnostika ja tõrkeid taluva juhtimise alused
Lõputöö teema inglise keeles:	The basics of diagnostics and fault-tolerant control of electrical drives
Üliõpilane:	Kaur Kuslap, 134113AAAB
Eriala:	elektriamid ja jõuelektroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	professor Anton Rassõlkin
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	kehtivusaja annab juhendaja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	03.01.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektriamite töökindlus on ohutuse ja majandusliku efektiivsuse seisukohalt olulise tähtsusega. Kuigi tänapäeva elektriamid on üldlevinud seisukoha järgi töökindlad seadmed, esineb siiski rikkeid. Et minimeerida elektriamide sihipärast tööd seiskavate rikete ootamatu esinemise tõenäosust ja tagada seadme vähemalt kriitilisel tasemel tööspüsimine ka rikkeolukorras, uuritakse viise elektriamide tõrgete varajaseks diagnoosimiseks ning elektriamide tõrkeid taluvaks juhtimiseks. Eesti keeles ei ole elektriamide tõrkeid taluvast juhtimisest autorile teadaolevalt varem kirjutatud, seega seisneb töö väärtus valdkonnast eestikeelse ülevaate andmises.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on anda eestikeelne ülevaade elektriamide tõrkeid taluva juhtimise ja diagnostika alustest.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Milline on tõrkeid taluva juhtimise ning diagnostika olemus? Kuidas diagnoositakse erinevaid elektriamide tõrkeid? Millised meetodid on elektriamide tõrkeid taluvaks juhtimiseks?

4. Lähteandmed

Plaanin kasutada interneti teadusartiklite andmebaase.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemuseni plaanin jõuda kirjanduse analüüsimise teel.

6. Graafiline osa

Graafiline osa on töö põhiosas. Olulisemad joonised kujutavad tõrkeid taluva juhtimise struktuuri ning elektriagamite tõrgete liigitust.

7. Töö struktuur

SISSEJUHATUS

1. TÕRKEID TALUV JUHTIMINE

- 1.1 Tõrkekindlad ja tõrkeid taluvad süsteemid
- 1.2 Tõrkeid taluva juhtimise struktuur
 - 1.2.1 Seisundi jälgimine ja diagnostika
- 1.3 Elektriagamite tõrkeid taluv juhtimine
- 1.4 Tõrkeid taluvat juhtimist nõudvad seadmed

2. ELEKTRIAJAMI DIAGNOSTIKA

- 2.1 Elektriajami tõrgete tekkepõhjused
- 2.2 Elektriagamite vealiigid
- 2.3 Elektriagamite tõrgete diagnostikameetodid
 - 2.3.1 Mootorite tõrgete diagnostika
 - 2.3.2 Jõuelektronika tõrgete diagnostika
 - 2.3.3 Andurite tõrgete diagnostika
 - 2.3.4 Redukti/ülekanne tõrgete diagnostika

3. ELEKTRIAJAMI TÕRKEID TALUVAD JUHTIMISE VIISID

- 3.1 Jõuelektronikaseadmete tõrketaluvuse saavutamise viisid
- 3.2 Juhtimise kohandamise ehk tõrkeid taluvad juhtimise viisid
 - 3.2.1 Jõuelektronika tõrkeid taluv juhtimine
 - 3.2.2 Andurite tõrkeid taluv juhtimine
 - 3.2.3 Mootorite tõrkeid taluv juhtimine

KOKKUVÕTE

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kasutan teadusartikleid. Peamised allikad:

1. D. U. Campos-Delgado, D. R. Espinoza-Trejo, ja E. Palacios, „Fault-tolerant control in variable speed drives: A survey“, IET Electric Power Applications, kd 2, nr 2, lk 121–134, 2008.

2. Z. Gao, S. X. Ding, ja C. Cecati, „Real-time fault diagnosis and fault-tolerant control“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, kd 62, nr 6, lk 3752–3756, 2015.
3. J. Jiang, „Fault-tolerant control systems - An introductory overview“, Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica, kd 31, nr 1, lk 161–174, 2005.
4. T. Vaimann ja B. Asad, „ELECTRICAL DEVICE DIAGNOSTICS TOWARDS CLOUD COMPUTING and IoT“, 2019.

9. Töö etapid ja ajakava

1. Lähteandmete kogumine ja teoreetilise osa kirjutamine (31.10.2019)
2. Uuringu tulemuste kirjeldamine, järelduste ja kokkuvõtte koostamine (30.11.2019)
3. Töö lõplik versioon valmis (20.12.2019)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
SISSEJUHATUS	10
1. TÕRKEID TALUV JUHTIMINE.....	12
1.1 Tõrkekindlad ja tõrkeid taluvad süsteemid	13
1.2 Tõrkeid taluva juhtimise struktuur	14
1.2.1 Seisundi jälgimine ja diagnostika	18
1.3 Elektriagamite tõrkeid taluv juhtimine.....	19
1.4 Tõrkeid taluvat juhtimist nõudvad seadmed	21
2. ELEKTRIAJAMI DIAGNOSTIKA	22
2.1 Elektriajami tõrgete tekkepõhjused	24
2.2 Elektriagamite vealiigid	27
2.3 Elektriagamite tõrgete diagnostikameetodid	28
2.3.1 Mootorite tõrgete diagnostika.....	28
2.3.2 Jõuelektronika tõrgete diagnostika.....	31
2.3.3 Andurite tõrgete diagnostika	32
2.3.4 Reduktori/ülekannete tõrgete diagnostika.....	33
3. ELEKTRIAJAMI TÕRKEID TALUVAD JUHTIMISE VIISID	34
3.1 Jõuelektronikaseadmete tõrketaluvuse saavutamise viisid.....	34
3.2 Juhtimise kohandamise ehk tõrkeid taluvad juhtimise viisid.....	36
3.2.1 Jõuelektronika tõrkeid taluv juhtimine	36
3.2.2 Andurite tõrkeid taluv juhtimine.....	37
3.2.3 Mootorite tõrkeid taluv juhtimine	38
KOKKUVÕTE	39

SUMMARY	40
KASUTATUD KIRJANDUS	41

SISSEJUHATUS

Ükski süsteem, olgu bioloogiline või tehnilik, ei ole selle üksikosa rikke korral kaitstud tõrkumise või hävinemise eest. Seejuures suureneb süsteemi kompleksuse kasvuga ka tõrgete esinemise tõenäosus. Bioloogilistes süsteemides esineb sageli ootamatustega kohanemise ja enese ravimise omadus, kuid tehnilikes süsteemides ei ole veel selles osas samaväärset taset saavutatud. Tehnilikud süsteemid luuakse aga üha keerulisemad ning vajadus autonoomseks tõrgetega toimetulemiseks süveneb.

Elektriam on elektri jõul töötav töömasinat või mehhanismi käitavate seadmete kogum, mis tavaliselt koosneb ühest või mitmest elektrimootorist, ülekandemehhanismist, juhtimis-, reguleerimis- ja kaitseaparatuurist [1]. Elektriamite töökindlus on ohutuse ja majandusliku efektiivsuse seisukohalt olulise tähtsusega. Kuigi tänapäeva elektriamid on üldlevinud seisukoha järgi väga töökindlad seadmed, esineb siiski rikkeid. Et minimeerida elektriamide sihipärast tööd seiskavate rikete ootamatu esinemise tõenäosust ja tagada seadme vähemalt kriitilisel tasemel tööpüsimine ka rikkeolukorras, uuritakse viise elektriamide tõrgete varajaseks diagnoosimiseks ning elektriamide tõrkeid taluvaks juhtimiseks.

Seadmete tõrkeid taluvat juhtimist ning ehitust on uuritud juba aastakümneid. 1969. aastal avaldati NASA teadustöö tõrkeid taluvate navigeerimisarvutite ehituse meetoditest [2], samal ajal ja ka järgnevatel kümnenditel avaldati töid lennukite tõrkeid taluvate juhtimissüsteemide kohta [3]. Varajasim elektriamide tõrkeid taluva juhtimise teemaline teadusartikkel, mis käesoleva töö autoril õnnestus leida, pärineb 1990. aastast ning selles esitleti mitut tõrget taluvat meetodit harjadeta alalisvoolumootori juhtimiseks [4]. Pärast seda on avaldatud hulganisti elektriamide tõrkeid taluva juhtimise ning diagnostika teemalisi artikleid. Eesti keeles ei ole autorile teadaolevalt elektriamide tõrkeid taluvast juhtimisest kuigi palju kirjutatud. Käesoleva töö eesmärgiks on anda eestikeelne ülevaade elektriamide tõrkeid taluva juhtimise ning diagnostika aluspõhimõtetest. Mõisteid tõrge, rike ning viga on siin töös kasutatud sünonüümidena.

Esimeses peatükis selgitatakse tõrkeid taluva juhtimise olemust, otstarvet ja struktuuri ning tuuakse välja mõned valdkonnad, mis tõrkeid taluvat juhtimist vajavad.

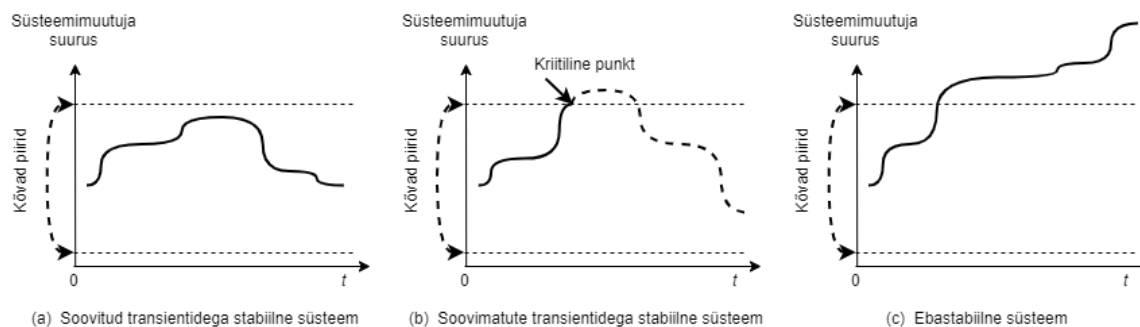
Teises peatükis käsitletakse elektriamide diagnostikaga seonduvat, antakse ülevaade elektriamide vealiikidest, nende tekkepõhjustest ja vigade diagnoosimise meetoditest.

Kolmandas peatükis tuuakse näiteid uuematest erinevaid tõrkeid taluvatest juhtimisviisidest, et anda lugejale ettekujutus valdkonna hetketasemest.

Teemakohaste allikate leidmiseks on kasutatud teadusartiklite andmebaase, peamiselt IEEE, ja töö koostamiseks MS Word ja Excel tarkvara. Masinõppe ning tehisintellektiga seotud terminoloogia tõlkimisel on autor abi saanud Eesti andmeteaduse kommuuni masinõppe sõnastikust.

1. TÕRKEID TALUV JUHTIMINE

Igal füüsilisel protsessil on oma kulgemise piirid, mis tulenevad süsteemi ettenähtud otstarbest, materjalide tugevusest ja struktuuri omadustest. Neid nimetatakse kõvadeks piirideks ja nende ületamine on alati ohtlik. Ohutus-kriitiliste süsteemide puhul võib kriitiliste süsteemimuutujate väärtuste eiramine viia katastroofini [5].



Joonis 1.1 Süsteemi stabiilsus ja ohutus [5]

Joonisel 1.1 on kujutatud seost süsteemi ohutuse ja stabiilsuse tagamise vahel. Joonisel 1.1(a) on kujutatud stabiilset turvalistes piirides kulgevat protsessi. Joonis 1.1(b) kujutab olukorda, kus stabiilse kuluga süsteemi muutuja väärtus ületab ajutiselt kriitilise piiri ja sellega on süsteemi töö tõsiselt ohtu seatud. Joonisel 1.1(c) on kujutatud ebastabiilset kontrolli alt väljunud süsteemi. Kuigi stabiilsus ja ohutus on kaks fundamentaalselt erinevat mõistet, on süsteemi stabiilsus ohutuse tagamise eelduseks. Tõrkeid taluva juhtimise eesmärgiks on hoida kriitiliste süsteemimuutujate väärtused turvalistes piirides ja tagada tõrgete korral süsteemi stabiilsus [5].

Tõrge on süsteemi vähemalt ühe karakteristikliku omaduse või parameetri lubamatu kõrvalekalle tavaolekust. Sääraste kõrvalekallete näideteks on täituri blokeerumine, anduri riknemine või süsteemikomponendi ühenduse katkemine [6].

Automatiseeritud protsessides aset leidvad tõrked põhjustavad juhitavates objektides sageli soovimatuid reaktsioone ja seisakuid ning tagajärgedeks võib olla kahju teke juhitavas protsessis osalevale tehnikale, isikkoosseisule või keskkonnale. Tõrkeid taluv juhtimine (fault-tolerant control) hõlmab eneses diagnostikat koos juhtimismeetoditega [7] ja seda käsitletakse ohutus-juhtsüsteemide (safety control systems) hädavajaliku elemendina [8]. Tõrkeid taluv juhtimine on veadiagnoosimise etapi kasutamise loomulik tagajärg [9]. See on edasijõudnud korralduslik meetod kindlustamiseks süsteemi talutava kvaliteediga tööpüsimine olukorras, kus esineb mõne

süsteemiosa või -parameetri tõe. Tõrketaluvus saavutatakse kas tarkvaraliste või riistvaraliste liiasuste kasutuselevõtuga [10].

Nõudlus reaajas veadiagnostika ning tõeid taluva juhtimise tehnikatele on aina kasvamas [10]. Paljudele tänapäevastele tehnoloogilistele süsteemidele on seatud kõrgendatud ohutus- ja jõudlusnõuded. Eriti kehtib see ohutus-kriitiliste rakendusvaldkondade kohta nagu lennundus, kosmoseseadmed, tuumajaamad ja keemiavabrikud, mille puhul väikestest tõegetest võivad ilma õige sekkumiseta potentsiaalselt alguse saada katastroofilised tagajärjed [11]. Kuid tõeid taluvat juhtimist kasutatakse üha enam ka tööstuses laiemalt, kuna tänapäeva tööstuslikud seadmed ja süsteemid on kallid, keerulised ning ootamatute tõegete põhjustatud võimalike tagajärgede suhtes tundlikud [10].

Tõrketaluvus ei ole isenesest uus mõiste, kuid seoses arvutitehnika arenguga on tõeid taluvad süsteemid keerulisemaks läinud. Varasemad ja levinumad näited tõrketaluvusest põhinevad pigem leidlikel insenerilahendustel kui keerulistel analüüsiprotsessidel. Levinud tõeid taluvate süsteemide näideteks on UPS süsteemid arvutitehnikale, et vältida andmekadusid võrgupinge katkemisel. Samuti tagavara diislgeneraatorid haiglates ja kesketes finantsasutustes. Signaaliedastuses kasutatakse madala signaali saatmiseks 0 mA asemel 0,4 mA, tagamaks sisseehitatud teadmine signaaliedastuskanali töökorras [11].

1.1 Tõeekindlad ja tõeid taluvad süsteemid

Blanke jt järgi on oluline eristada tõeekindlaid (fail-safe) ja tõeid taluvaid süsteeme alljärgnevalt [12]:

Tõeekindlad süsteemid taluvad mistahes üksikviga ilma igasuguse märgatava muutuseta oma funktsionaalsuses või sooritusvõimes. Tõeekindlate süsteemide omadused:

- Jätkavad toimimist hoolimata mistahes üksikveast;
- Kasutavad kolmekordset riistvaralist liiasust;
- Kasutavad tajurite signaalide puhul hääletamist;
- Kasutavad signaalitöötuseks kolme arvutit;
- Kasutavad kahte või enam täiturit üheks ülesandeks;
- On üldiselt väga kallid.

Tõeid taluvate süsteemide sooritusvõime võib tõe esinemisel kahaneda, kuid välditakse tõe arenemist süsteemitasemeliseks rikkeks, kui see on juhtsilmsuse (control-loop)

programmeeritavates osades õigete meetmete rakendamisel võimalik. Tõrkeid taluvate süsteemide omadused:

- Püüavad vältida mistahes lihtsate tõrgete arenemist süsteemitasemeliseks rikkeks;
- Kasutavad tarkvaralist liiasust tõrgete tuvastamiseks;
- Kasutavad vigadega toimetulekuks programmeeritavate süsteemiosade ümberseadistamist;
- Lepivad tõrkest tuleneva kahanenud sooritusvõimega, kuid säilitavad süsteemi toimimise;
- On odavad, kuna ei kasuta täiendavat riistvara.

Käesoleva töö autor peab vajalikuks märkida, et tänapäeval näivad olevat tõrkeid taluvate ja tõrkekindlate süsteemide mõisted mõnevõrra segunenud. Leidub hulganisti näiteid, kus süsteemi tõrketaluvus saavutatakse justnimelt riistvaraliste liiasuste kasutuselevõtuga. Üheks selliseks näiteks on elektriagamite jõumuundurid, kus tõrketaluvusega käib alati riistvaraline liiasus kaasas [13]. Samuti leidub hulganisti tõrkeid taluvaid juhtimismeetodeid, mis kombineerivad oma eesmärkide täitmisel tarkvaralist ja riistvaralist liiasust. Üheks näiteks on töö [14], kus arendati täiturite tõrkeid taluv juhtimismeetod kasutades liiasust kontrolleri. Seega ei ole tõrkeid taluvad süsteemid ilmingimata odavad.

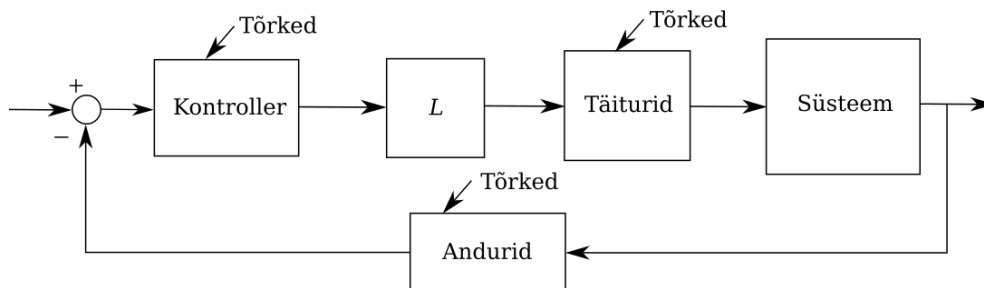
1.2 Tõrkeid taluva juhtimise struktuur

Eristatakse passiivset ja aktiivset tõrkeid taluvat juhtimist [11].

Passiivse tõrkeid taluva juhtimisega süsteemi korral eeldatakse projekteerimise faasis, et potentsiaalsed tõrked juba esinevad. See tähendab, et juhtsüsteem projekteeritakse selliselt, et potentsiaalsete komponentide rikete ja kõikvõimalike süsteemi töötamise stsenaariumite, sealhulgas tõrkevaba stsenaariumi, korral oleks tagatud selle toimimine soovitud tasemel. Pärast projekteerimist jääb passiivse tõrkeid taluva juhtimise süsteem fikseerituks – süsteemi töö käigus enam muudatusi ei tehta [11]. Veadiagnostikat, juhtimise ümberseadistamist ning liiasuste juhtimist passiivse tõrkeid taluva juhtimise korral ei kasutata [5].

Joonisel 1.2 on kujutatud passiivse tõrkeid taluva juhtsüsteemi üldine struktuur. Sümboliga L on tähistatud diagonaalne maatriks, mis esindab täiturite kanalite olekut. Peadiagonaali suvalise elemendi nullväärtus tähendab, et vastaval täituri kanalil esineb tõrge ja selle kanali juhtsignaal ei pääse süsteemini. Passiivse tõrkeid taluva süsteemi projekteerimisülesandeks on koostada ja

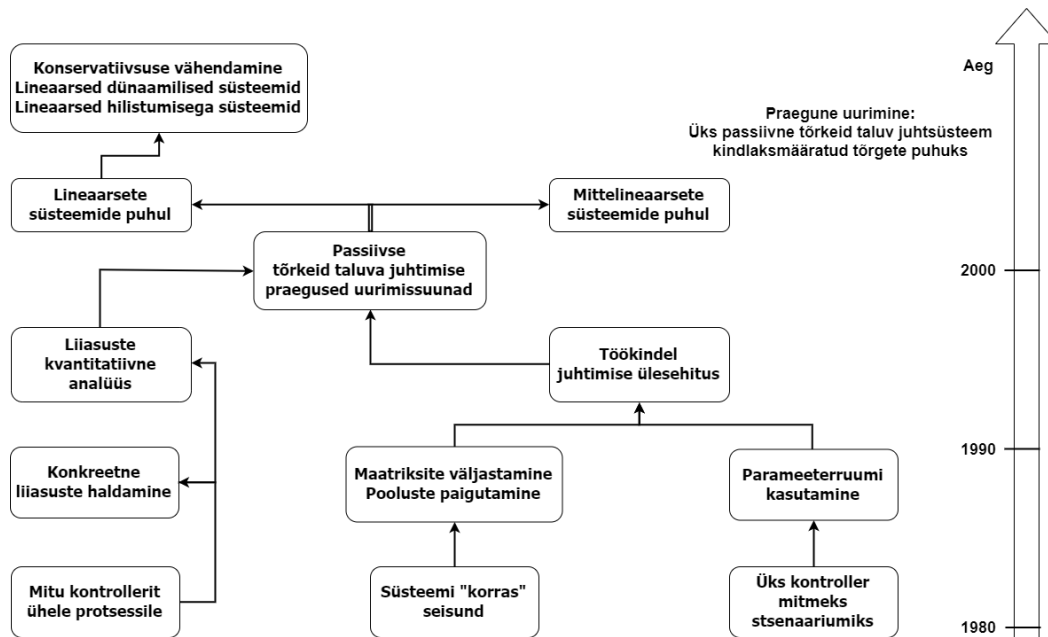
häälestada kontrolleri selliselt, et suletud süsteem oleks stabiilne iga võimaliku L -matriksi peadiagonaali elemendi nullväärtuse korral igas kombinatsioonis [11].



Joonis 1.2 Passiivse tõrkeid taluva juhtsüsteemi üldine struktuur [11]

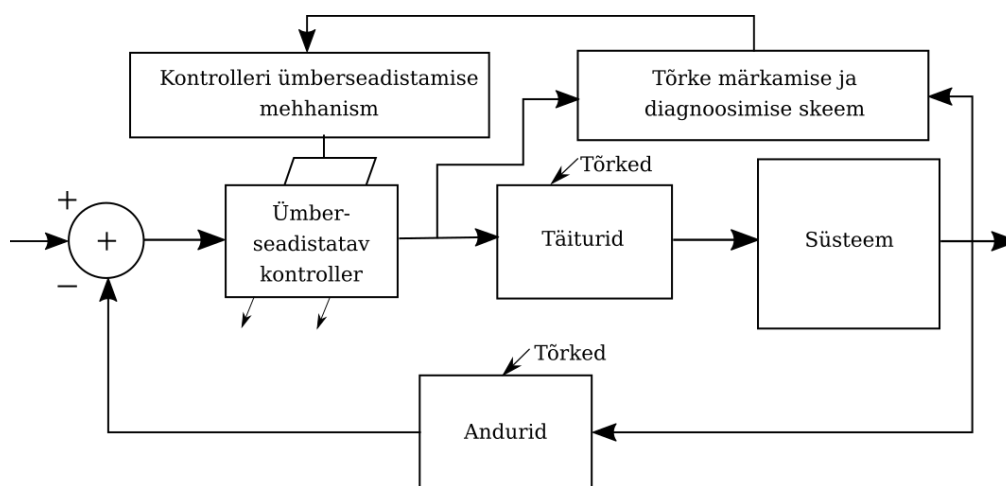
Passiivne tõrkeid taluv juhtimissüsteem rõhub iga mõeldava tõrke esinemise korral eelkõige süsteemi töökindlusele, mitte tõrkejärgse optimaalse jõudluse saavutamisele [5]. Sellest tulenevalt on passiivsel tõrkeid taluval süsteemil paar selget nõrkust. Kui esineb tõrkeid, millega projekteerimise faasis ei arvestatud, võib passiivse tõrkeid taluva juhtimisega süsteemi tulemuslikkus olla vastuvõetamatu [11]. Samuti on keeruline tagada passiivse tõrkeid taluva juhtimisega süsteemi kõrget efektiivsust oma peaülesande täitmisel, kuna mitmete tõrgete esinemisega samal ajal arvestamine seab paratamatud kitsendused isegi süsteemi tõrkevabale tööle. Seda passiivse tõrkeid taluva juhtimissüsteemi omadust nimetatakse ingliskeelses kirjanduses konservatiivsuseks. Kuid teisest küljest on passiivse tõrkeid taluva juhtimissüsteemi korral süsteemi stabiilsus arvesse võetud tõrgete esinemise puhul garanteeritud [5].

Joonisel 1.3 on kujutatud passiivse tõrkeid taluva juhtimise uurimise suundi ajateljel. Tänapäeval uuritakse võimalusi passiivse tõrkeid taluva juhtimise kasutamiseks mittelineaarsete süsteemide korral ning konservatiivsuse vähendamiseks lineaarsete süsteemide puhul [5].



Joonis 1.3 Passiivse tõrkeid taluva juhtimise uurimise suunad [5]

Vastupidiselt passiivse juhtimise iga mõeldava olukorraga ettearvestavale fikseeritud juhtsüsteemile, tugineb aktiivse tõrkeid taluva juhtimisega süsteem reaalajas tõrkediagnosticsale ning vajaduspõhiste juhtsüsteemi ümberhäälestamise otsustele [11]. Joonisel 1.4 on toodud aktiivse tõrkeid taluva juhtimise üldine struktuurskeem. See koosneb muuhulgas veadiagnostika skeemist, kontrolleri ümberseadistamise mehhanismist ja ümberseadistatavast kontrollerist.

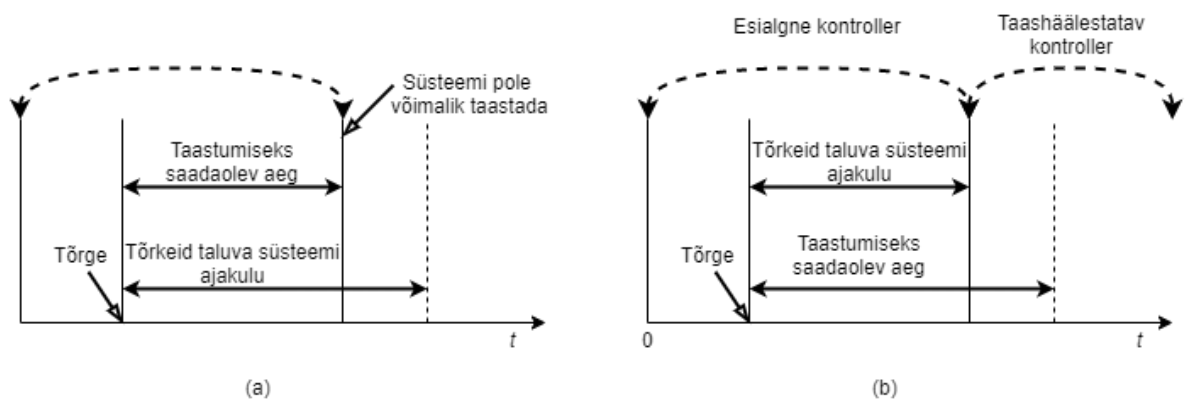


Joonis 1.4 Aktiivse tõrkeid taluva juhtimisega süsteemi üldine struktuur [11]

Seisundi jälgimisest tulenev informatsioon saadetakse tõrke märkamise ja diagnoosimise skeemi. Aktiivne tõrkeid taluv juhtsüsteem vastab süsteemis diagnoositud tõrgetele liiasuste korrektse rakendamise teel selliselt, et süsteemi stabiilsus säiliks ja jõudlus oleks vastuvõetaval tasemel [11]. Liiasused võivad olla tarkvaralised, näiteks tõrkeid taluva juhtimise algoritmid, või riistvaralised, näiteks täiturid, andurid või juhitavad objektid [5]. Seejuures seab ümberseadistatud süsteemi tõrkejärgsele jõudlusele piirangu saadaolevate liiasuste määr. On mõistlik leppida mõningase jõudluse vähenemisega nii, et säiliks kõige hädavajalikumad süsteemi omadused, nagu stabiilsus ja baasfunktsionaalsus. Seda aktiivse tõrkeid taluva juhtimissüsteemi omadust tuntakse jõudluse väärrika vähenemisena (ingl. k. *graceful performance degradation*) [11]. Nii ei koormata töövoimelisi täitureid üle ja saavutatakse süsteemi optimaalne tõrkejärgne toimimine.

Juhtimise ümberseadistamine sisaldab referentsväärtuste ehk juhitava objekti mõõdetud väärtuste kohandamist ning toimub diagnostikaskeemilt saadava värskel seisundiinfo põhjal. Kui sobiv seadistus on koostatud või leitud, on oluline see töösse rakendada nii, et ei tekiks järskel transiente, et süsteemi kriitilised füüsilised muutujad püsiks ohututes piirides. Vastasel korral võivad tekkida sekundaarsed tõrked [5].

Aktiivse tõrkeid taluva juhtimise eesmärgiks on tagada tõrkejärgsetes oludes süsteemi võimalikult hea ehk optimaalne jõudlus. Peamiseks murekohaks selle eesmärgi täitmisel on reaajas toimuva diagnostika täpsus ja kiirus. Esiteks, kuna kulgevas protsessis on igal ajahetkel võimalik teha vaid piiratud arv mõõtmisi ja mõõtetulemused võivad olla mürast rikutud, esineb vale juhtotsuse tegemise oht. Teiseks probleemiks on asjaolu, et optimaalse tõrkejärgse juhtimise leidmine ning rakendamine võtab aega. Seoses ümberseadistatavate kontrollritega tõestatud, et mistahes tagasisidega juhtsüsteemis mõjub süsteemi stabiilsusele negatiivselt, kui õige otsus tehakse liiga hilja [15]. Selle ületamiseks seadistatakse mõnel juhul enne optimaalsete juhtimisseadistuste leidmist kontrollid esmalt turvalisele tasemele [5]. Siiski võivad need võimalikud puudused kiiresti arenevate tõrgete korral saada süsteemi kontrolli alt väljumisel määravaks [11].



Joonis 1.5 Aktiivse tõrkeid taluva juhtimissüsteemi tõrkele reageerimise kiiruse olulisus [5]

Joonisel 1.5 on kujutatud aktiivse tõrkeid taluva juhtsüsteemi tõrkejärgsete seadistuste leidmise ja rakendamise kiiruse olulisust kriitiliste tõrgete korral. Juhul (a) on aega reageerimiseks liiga vähe ja süsteemi toimimist ei ole enam võimalik taastada.

Tabel 1.1 Aktiivse ja passiivse tõrkeid taluva juhtimise võrdlus

	Aktiivne tõrkeid taluv juhtimine	Passiivne tõrkeid taluv juhtimine
Ettenägemata tõrgete taluvus	Hea	Halb
Tõrke potentsiaalne mõju süsteemi jõudlusele	Pigem suur	Väike
Diagnostika vajadus	Jah	Ei
Süsteemi stabiilsus garanteeritud	Ei	Jah
Olemasolevate liiasuste rakendamise optimaalsus	Kõrge	Madal

Nii aktiivse kui passiivse tõrkeid taluva juhtimise tabelis 1.1 toodud puudustest tulenevalt kombineeritakse mõlemat lähenemist, saavutamaks tõrkeid taluv juhtimissüsteem, mille rakendamisel oleks tagatud süsteemi stabiilsus nagu passiivsel juhtimisel ning aktiivse juhtimise jõudluse optimeerimise omadused [11].

1.2.1 Seisundi jälgimine ja diagnostika

Tõrkeid taluva juhtimise eelduseks on seisundiseire (*condition monitoring*) ja diagnostika.

Reaalajas seisundi jälgimise ja veadiagnoosimise eesmärgiks on märgata, piiritleda ning tuvastada kõikvõimalikke potentsiaalseid kõrvalekaldeid ning tõrkeid selleks, et oleks võimalik rakendada vajalikke meetmeid kahjude vältimiseks [10]. Seisundi jälgimise kasutamise põhjusteks võib muuhulgas olla [16]:

- Katastroofiliste rikete ja seadmete märkimisväärse kahjustamise vältimine;
- Elude säästmine, majandusliku kahju ja keskkonnaohu vältimine;
- Plaanivälise seisakute ärahoidmine;
- Masinate tootlikkuse optimeerimine;

- Remontimise ajakulu ja varuosade laohulga vähendamine;
- Hooldusvälba pikendamine;
- Hinna ja tooraine kasutamise vähendamine;
- Toote kvaliteedi tõstmine.

Mistahes veatuvastuse ja diagnostikaskeemi töö põhineb süsteemi ootuspärase toimimise võrdlemisel tegelikkusega [11]. Nende kahe seisundi vahelist erinevust saab kasutada süsteemi seisukorra hindamiseks ning vigade tuvastamiseks. Selle põhjal, kuidas süsteemi ootuspärane toimimine on iseloomustatud, jagatakse diagnostikatehnikad järgmiselt:

- Mudelivabad (*model-free*);
- Mudelipõhised (*model-based*).

Kuna ümberseadistatav juhtimissüsteem tugineb suuresti süsteemi tõrkejärgsele mudelile, on mudelipõhised tehnikad selles kasutuses kõige sobivamad. Mudelipõhise diagnostikaskeemi puhul kasutatakse kirjeldatav süsteemi ootuspärast toimimist matemaatiliste mudelitega. Kirjeldavate suurustena kasutatakse süsteemi olekuid (system states), süsteemi parameetreid (system parameters) ja süsteemi sisendite ja väljundite kokkusobivust [11].

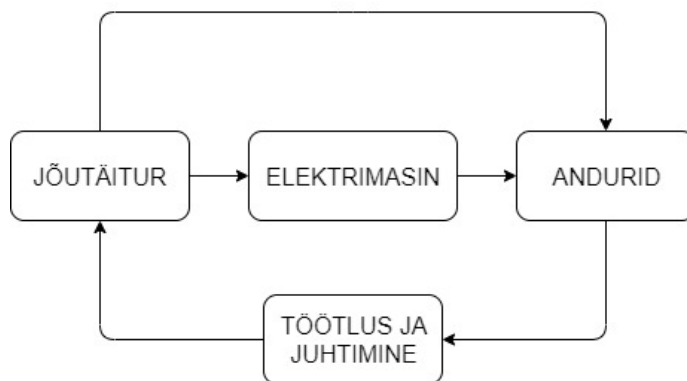
On leitud, et oleku hindamisel põhinevad skeemid on oma kiirusest tulenevalt veatuvastuseks sobivaimad, kuid ei anna enamasti kontrolleri ümberseadistamiseks tõrke kohta piisavalt detailset infot. Parameetri hindamisel põhinevad skeemid on neile ideaalseks täienduseks. Seega on parim lahendus enamikele tõrkeid taluva juhtimise süsteemidele kombinatsioon oleku ja parameetri hindamise skeemidest [17].

Kui on teada tõrkejärgse süsteemi mudel, siis saab vastavalt sellele kontrolleri ümber seadistada. Ümberseadistamise ülesandeks on stabiliseerida tõrkejärgne süsteem ning taastada jõudlus võimalikult laias ulatuses. Ümberseadistamiseks kasutatakse kahte viisi: kas leitakse sobivad kontrolleri seaded eelnevalt koostatud andmebaasist või koostatakse sobivad seadistused töö käigus. Viimane ei pruugi ajakriitilistel juhtudel olla sobiv variant. Esimese piiranguks on tõsiasi, et tõrkejärgne süsteemimudel ei pruugi olla eelnevalt ette aimatud ja sobivaid seadeid ei pruugi seega andmebaasis olla [11].

1.3 Elektriajamite tõrkeid taluv juhtimine

Elektrimasinad tagavad automatiseeritud protsessis mehaanilise jõu olemasolu, muundades elektrienergiat mehaaniliseks, ja on seetõttu paljudes tööstusprotsessides võtmetähtsusega.

Elektrimasinalt võidakse nõuda töötamist püsival või muutuv kiirusel ja teadmata koormusel. Seesuguse paindlikkuse saavutamiseks on elektrimasina ümber läbi jõupooljuhtmuunduri (*power electronics actuator*) rakendatud juhtimise ja tagasiside süsteem, mille elektrilised ja mehaanilised andurid annavad informatsiooni mootori tegeliku seisundi kohta (joonis 1.6). Juhtalgoritm võrdleb mõõdetud informatsiooni referentsväärtustega ja vajadusel kohandatakse läbi jõupooljuhtmuunduri mootorile rakendatud pinget või voolu [9].



Joonis 1.6 Elektriajami üldskeem [9]

Jõupooljuhtmuunduri tuumprotsessor raalib reaajas keeruliste juhtalgoritmidega, mis on suletud juhtsüsteemis efektiivne. Kuid erinevate välismõjude või lihtsalt mehaanilise kulumise ja vananemise mõjul võivad elektriajami süsteemis torked tekkida. Õnnetuste ärahoidmise seisukohalt on oluline torked võimalikult kiiresti tuvastada ja kohaseid meetmeid rakendada [9].

Törkeid taluva juhtimise üheks eesmärgiks on vältida juhitava süsteemi osas tekkinud lokaalse rikke arenemist tõsiseks kogu süsteemi halvavaks rikkeks ja seeläbi suurendada juhitava objekti töökindlust ning ohutust. Soovitud tulemused saavutatakse reaajas veadiagnostika, automatiseeritud seisundi hindamise ning sobivate abinõude väljaselgitamisega, vältimaks mingeid kindlaid vea tagajärgi. Võimalike abinõude spekter on väga lai. Mõnel juhul piisab lihtsalt taashäälestamisest, teinekord võib abi olla vigase sensori signaali asendamisest hinnangulise õige signaaliga. Keerulisematel juhtudel võib olla vaja kompleksset ümberseadistamist [7].

Törkeid taluv juhtimine nõuab suurt arvutusjõudlust ja selle kasutamine ei ole igas rakenduses majanduslikult otstarbekas. Siiski on kasutatava elektrimasina töökindlus paljudel juhtudel kriitilise tähtsusega ja kõrgem hind õigustatud [9].

1.4 Tõrkeid taluvat juhtimist nõudvad seadmed

Allpool on toodud mõned näited valdkondadest, kus tõrkeid taluv juhtimine kasutust leiab.

Käimasoleva tööstuse digitaliseerimise ehk Tööstus 4.0 valguses on tõrkeid taluval juhtimisel üha enam rakendust, sest autonoomselt toimetavad suured masinate süsteemid vajavad ladusaks koostoimimiseks mõningast paindlikkust ning stabiilsust. Viimasel ajal on arendatud jaotatud tõrkeid taluvate juhtsüsteemide (DFTC – *distributed fault tolerant control*) ja jaotatud tõrkehindamise (DFE – *distributed fault estimation*) meetodeid [18], mis rakenduvadki just suurtele ja keerulistele läbipõimunud süsteemidele. Keeruliste süsteemide näitena võib tuua tänapäevase automatiseeritud elektriirrongiliikluse, mille turvaliseks koordineerimiseks on tõrkeid taluvad juhtimismeetodid hädavajalikud [19].

Kuna lennunduses on ohutus kriitilise tähtsusega, on sellega seonduvad süsteemid juba ammu tõrketaluvusele orienteeritud olnud. Üks varajane tõrkeid taluva juhtimisega seotud teadusuuring pärineb aastast 1985, kui arendati mõne juhtkonsooli rikkele järgnev automaatne juhtkonsoolide ümberseadistamine selliselt, et tõrkunud konsoolide funktsionaalsus jaotati töökorras konsoolide vahel [3]. Lennunduse jaoks arendatakse ka tõrkeid taluvaid elektriajamisüsteeme [20].

Tänapäevane suund taastuvate energiaallikate väärtustamisele on muuhulgas aidanud kaasa tuuleparkide levikule. Neis kasutatavate turbiinide jaoks arendatakse mitmeid tõrkeid taluvaid juhtimistehnikaid. Ühe näitena võib tuua tuuleenergia muundamise süsteemide andurite tõrkeid taluva juhtimismeetodi [21].

Maailmas haaravad elektritoitel transpordivahendid järk-järgult üha suuremat turuosa. Sellega käib kaasas elektriajamite tõrketaluvuse arendamine. Uuritakse tõrkeid taluvaid juhtimismeetodeid elektriajamitele rakendamiseks nii merenduses [22], lennunduses, aga ka veo- ning sõiduautode jaoks, nagu näiteks muunduri lülitusseadme lühist taluv reluktantsmasina juhtimisstrateegia [23].

Elektrisõidukite süsteemide puhul on tõrkeid taluva juhtimise põhieesmärgiks säilitada elektriajami mõne osa tõrke korral sõiduki töövõime vastuvõetaval tasemel ning võimalusel taastada tõrkeolekule eelnenud normaaltalitus [8]. Tänapäeva elektriautodes kasutatakse veojõu tekitamiseks mitmeid lähenemisi ja osalt seetõttu arendatakse ka erinevaid tõrkeid taluvaid juhtimismeetodeid. On sõidukeid, mis kasutavad liikumapanevaks jõuks ühte elektrimootorit, kuid toodetakse ka kahe või enama mootoriga elektriautosid. Hübriidautode korral võib elektrimootor olla rakendatud sise põlemismootoriga rööbiti või jadamisi. Ning kuigi aastal 2019. on autotootjad võtnud suunaks kasutada elektriautodes püsिमagnetergutusega sünkroonmootoreid (PMSM), on neis kasutatud ka teisi mootoritüüpe, nagu asünkroonmootorit Tesla Model S puhul.

2. ELEKTRIAJAMI DIAGNOSTIKA

Diagnostika ning seisundi jälgimine on aktiivse tõrkeid taluva juhtimise eelduseks ning on elektrijami tõrke vältimise või edasilükkamise seisukohalt võtmetähtsusega [16]. Selle eesmärgiks on märgata, piiritleda ning tuvastada kõikvõimalikke potentsiaalseid kõrvalekaldeid ning tõrkeid selleks, et oleks võimalik rakendada vajalikke meetmeid kahjude vältimiseks [10]. Tänapäeval nõutakse elektrijami diagnostikalt lisaks korras ja rikkis seisundi eristamisele ka usaldusväärset veatuvastust ning tõrke tõsidusastme hindamist [24].

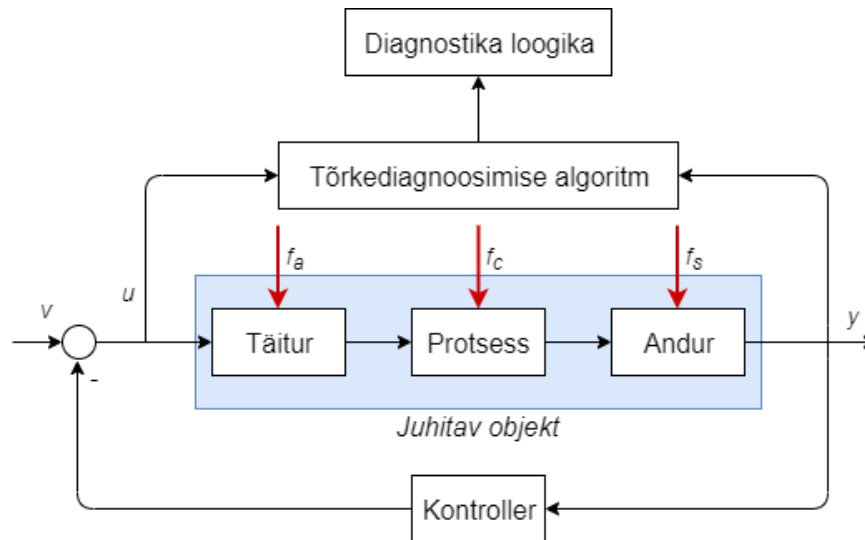
Elektrimasinate seisundi jälgimise eesmärgiks on lisaks rikete ärahoidmisele ka nende efektiivsuse säilitamine. Elektrimasina efektiivsus on oluline, kuna elektrimootori töötamise aastane kulu võib olla 8-9 korda suurem selle esialgselt maksumusest [25]. Seisundi jälgimise kasutamise tulemuslikkus tööstusprotsessides on toodud tabelis 2.1 [26].

Tabel 2.1 Seisundi jälgimise kasu tööstusprotsesside töökindlusele [26]

Hoolduskulud	50%-80% vähenemine
Varustuse kahjud	50%-60% vähenemine
Lisatundide kulud	20%-50% vähenemine
Masina eluiga	50%-60% kasv
Kogu tootlikkus	20%-30% kasv

Mistahes veatuvastuse ja diagnostikaskeemi töö põhineb süsteemi ootuspärase toimimise võrdlemisel tegelikkusega [11]. Nende kahe seisundi vahelist erinevust saab kasutada süsteemi seisukorra hindamiseks ning vigade tuvastamiseks.

Diagnostika sisaldab kolme toimingut: vea märkamise, vea piiritlemise ja vea tuvastamise. Vea märkamine on neist kõige lihtsam, sellega registreeritakse tõsiasi, et süsteemis on rike ning rikke toimumise aeg. Vea piiritlemisega määratakse rikke asukoht ning vea tuvastamisega iseloomustatakse riket - määratakse rikke tüüp, vorm ja ulatus. Joonisel 2.1 on toodud tänapäeval levinuima diagnostikatehnika, tarkvaralise (ehk analüütilise) liiasuse põhise veadiagnostika, struktuur, millel on võimalikud vead jaotatud kolme kategooriasse: täituri vead (f_a), protsessi/komponentide vead (f_c) ja anduri vead (f_s) [6].



Joonis 2.1 Tarkvaralise liiasuse põhise veadiagnostika struktuur [6]

Veadiagnostika algoritm koostatakse sisendi u ja väljundi y väärtuste põhjal ning see rakendatakse kontrollima toimiva süsteemi parameetrite ühtivust tõrkevaba süsteemi eelnevalt teadaolevate vastavate väärtustega. Diagnoos pannakse diagnostika loogika abil [6].

Diagnostikaks kasutatakse paljusid erinevaid algoritme, nagu tehislikud neurovõrgud (ingl. k. *Artificial Neural Networks*), tugivektorklassifitseerijad (ingl. k. *Support Vector Machines*), otsustusmets (ingl. k. *Random forest*), juhendatud hägus-naabrus tiheduspõhine sorteerimine (ingl. k. *supervised fuzzy-neighborhood density-based clustering*), otsustuspuud (*decision trees*), Bayes'i klassifitseerija, Eukleidiline kauguse minimeerimine ja paljud teised [27].

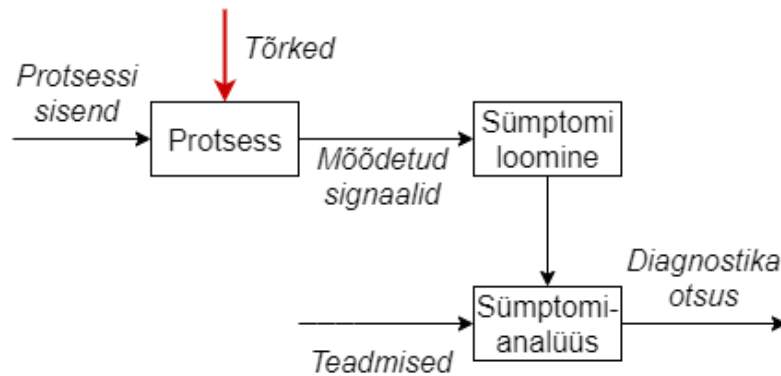
Veadiagnostika tehnikad saab liigitada nelja üldisesse kategooriasse [10]:

- Mudelipõhised (*model-based*);
- Signaalipõhised (*signal-based*);
- Teadmuspõhised (*knowledge-based* või *data-driven*);
- Hübriidsed.

Mudelipõhise diagnostika puhul on diagnostikaskeemi projekteerijale süsteemimudelid teada. Nende põhjal arendatakse mudelipõhised algoritmid, mis rakendatakse töötlemas sisendi- ja väljundi andmeid ning sooritama seeläbi seisundiseiret ja veadiagnostikat [10].

Joonisel 2.2 on toodud signaalipõhise veadiagnostika skeem. Signaalipõhise diagnostika puhul on projekteerijale teada töökorras süsteemi signaalimuster. Veadiagnostika toimib sel juhul teadaoleva korras signaalimustri võrdlemisel reaallaja signaalimustriga. Viimane tuletatakse talitava

süsteemi jooksvatest mõõteandmetest erinevaid signaalitöötlustehnikaid kasutades [10]. Signaalid võivad olla kas ajapiirkonnas (*time-domain*) või sageduspiirkonnas (*frequency-domain*). Näiteks voolu efektiivväärtused, faasinurga tuletise absoluutväärtused, voolukõvera tõusunurgad või sagedused [6].



Joonis 2.2 Signaalipõhise veadiagnostika skeem [6]

Teadmuspõhise veadiagnostika projekteerijale on saadaval laialdane hulk ajaloolisi andmeid süsteemi toimimisest. Süsteemimuutujate suhtelisi väärtusi süsteemi erinevate seisundite korral, mida nimetatakse teadmusbaasiks (ingl. k. *knowledge-base*), on võimalik erinevaid analüüsimeetodeid kasutades ajaloolistest andmetest tuletada. Veadiagnostika kätkeb siis endas teadmusbaasi võrdlemist jooksvate andmete põhjal tuletatud vastavate väärtustega. See eeldab reaajas andmeanalüüsi ning masinõppe kasutamist. Olgugi, et kõik loetletud kategooriad põhinevad oma olemuselt andmetel, siis tulenevalt teadmuspõhise veadiagnostika vajadusest suure hulga ajalooliste andmete kättesaadavusele nimetatakse seda mõnikord ka andmepõhiseks (ingl. k. *data-driven*) veadiagnostika meetodiks [10].

Hübriidsete veadiagnostikatehnikate puhul kombineeritakse kahte või enam eelpoolnimetatud viisi.

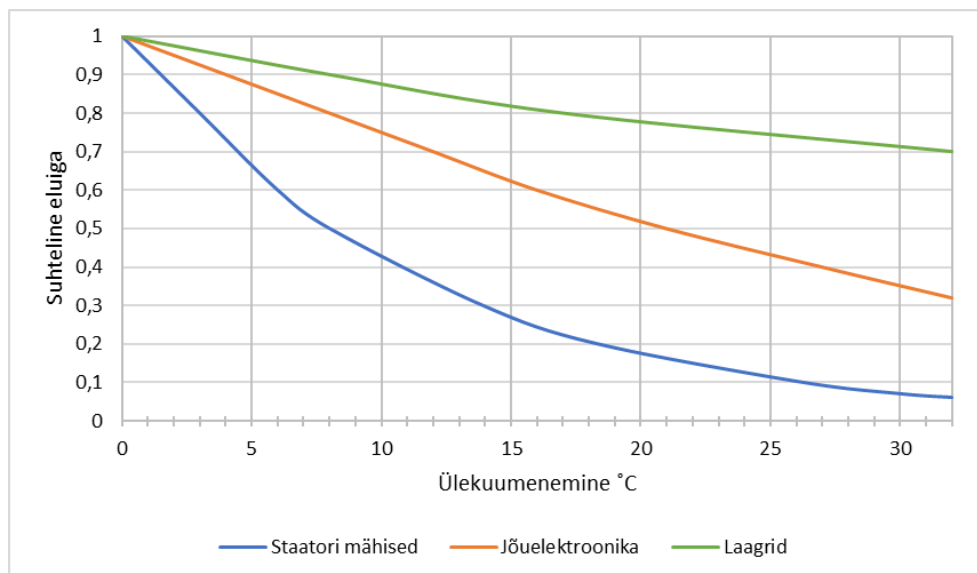
2.1 Elektriajami tõrgete tekkepõhjused

Elektrimasinate rikete tekkimise algpõhjused võib klassifitseerida järgnevalt [16]:

- karmi töökeskkonna mõju;
- väär elektrimasina valik ja rakendamine;
- ebasobiv paigaldus;

- mehaanilised vead;
- elektrilised probleemid;
- toitefaaside pingete asümmeetria;
- ebasobiv hooldus;
- erinevad kombinatsioonid eelpoolmainitutest.

Üheks karmi keskkonna aspektidest on liiga kõrge temperatuur – on leitud, et iga nimiväärtust ületav 10°C poolitab isolatsiooni eluea. Samuti võib rikkeid põhjustada liigne niiskus, kahjulikud gaasid, soolarikas õhk, mustus, tolm jne [16]. Joonisel 2.3 on kujutatud ülekuumenemise mõju erinevatele elektriaparaatide osade elueale [28].



Joonis 2.3 Ülekuumenemise mõju elektriaparaatide osade elueale [28]

Sageli on elektrimasina rikete tekkimise põhjuseks masina ülekoormus, mille tagajärjel tarbib mootor rohkem voolu ning temperatuur tõuseb. Ülekoormus võib tekkida ka laagri purunemise tagajärjel, mille äärmuslikul juhul võib rootor kinni kiiluda [16].

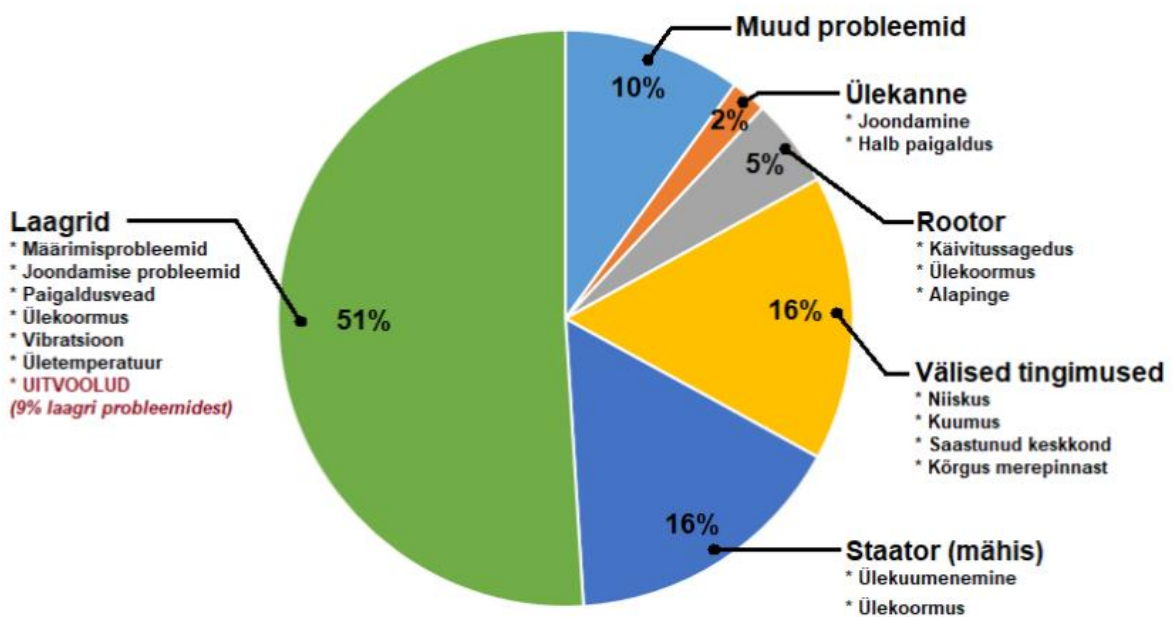
Mootorile rakendatud ülepinge põhjustab ülekuumenemist, sest rauaskaod suurenevad. Samuti on ülekuumenemise põhjustajaks faasipingete asümmeetria, mille tagajärjel on ka voolud tasakaalust väljas. Võrgus esinevate üleliigsete harmoonikute ning mittelineaarsete tarbijate tõttu on masina

voolude asümmeetrilisuse probleem üha tõsisem ning seab ohtu lisaks mootorile ka jõuelektroonika [16].

Jõuelektroonikaseadme alalisvoolulüli pingemanduri tõrke tagajärjel võib asünkroonmootori puhul mootori kiiruse reguleeritavus väheneda ning võib esineda kiiruse ja pöördemomendi pulseerimine. Vooluanduri tõrke tagajärjeks võib olla mootori voolude asümmeetria, mis põhjustab ülekuumenemist ning kiiruse ja pöördemomendi kõikumist. Kiiruse anduri tõrkest tulenevalt võib tekkida mootori kiiruse kõikumine ja kõikuvate väärtustega harmooniliste komponentide teke faasivooludesse [29].

Elektrimasina jõuülekanne mehhanismid peavad olema korrektselt joondatud ja elektrimasina kinnituspoldid õiges mõõdus ning õigesti pingutatud, et vältida kahjulike vibratsioonide esinemist [16].

Joonisel 2.4 on ülevaatlukult toodud elektrimootorite rikete peamised põhjused koos nende suhtelise esinemissagedusega.



Joonis 2.4 Elektrimootorite rikete peamised põhjused [30]

2.2 Elektriajamite vealiigid

Elektriajamite tõrked saab liigitada järgmiselt [9]:

1. Elektrimasina tõrked;
2. Andurite tõrked;
3. Jõuelektronika tõrked;
4. Ülekannete tõrked [31].

Elektrimasina tõrked jagunevad omakorda mehhaanilisteks ja elektrilisteks tõrgeteks.

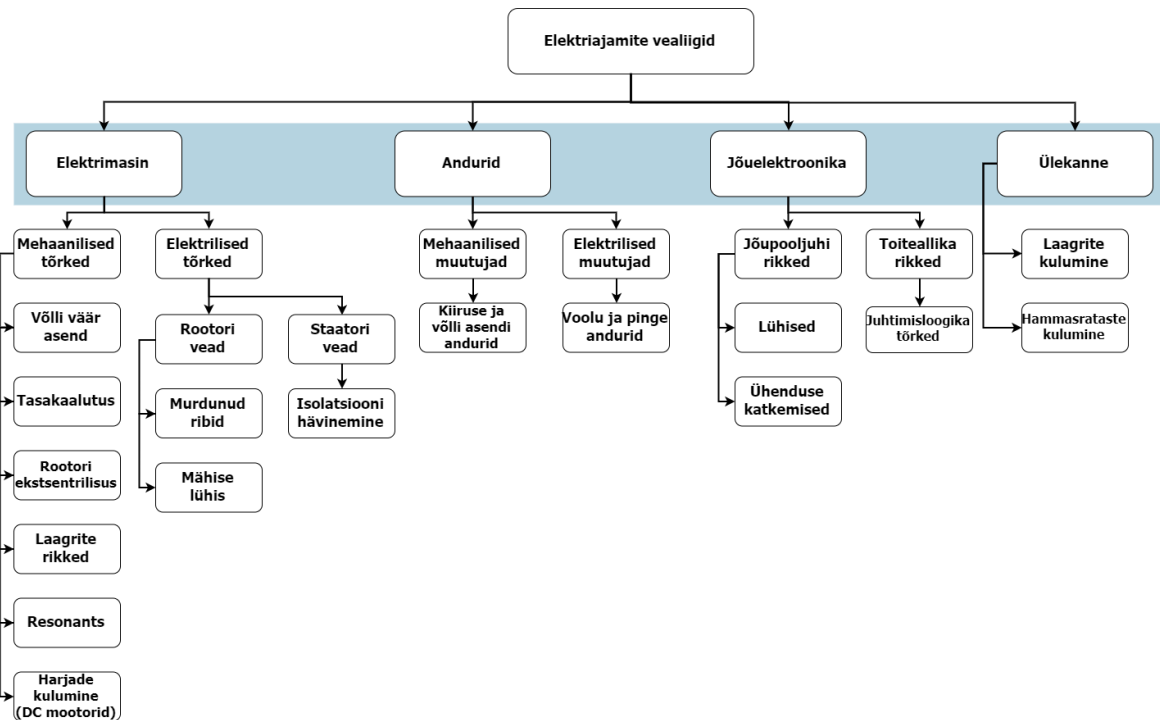
Levinumateks mehhaanilisteks tõrgeteks on harjade kulumine (alalisvoolumootorite korral), võlli väär asend, tasakaalutus, rootori ekstsentrilisus, laagrite vead ja resonants. Elektrilised elektrimasina tõrked jagunevad rootoriga seotud tõrgeteks ja staatori tõrgeteks. Rootori tõrgetest on levinumad murdunud ribad ja lühised mähise keerdude vahel. Staatori tõrgetest esineb enim isolatsiooni hävinemist [9].

Sarnaselt elektrimasina tõrgetele, jagunevad andurite tõrked anduri mõõdetava omaduse tüübi järgi mehhaanilisteks ja elektrilisteks. Levinumad mehhaaniliste väärtuste andurite tõrked on seotud kiiruse andurite ning võlli asendi andurite rikkumisega. Elektriliste väärtuste andurite tõrgetest moodustavad levinumad vooluandurite ja pingemandurite tõrked [9]. Andurite tõrked saab mõõtetulemuste põhjal üldiselt liigitada nihkevigadeks (*offset fault*), mõõtetulemuse kinnikiilumiseks (*stuck fault*) ja müratõrkeks (*noise fault*) [29].

Jõuelektronikaseadmete (sagedusmuundurite jne) tõrked on peamiselt seotud neis sisalduvate kondensaatorite ja jõupooljuhtide riketega. Kõige tüüpilisemateks jõupooljuhtide riketeks on lühised ja ühenduse katkemised [32]. Samuti kuuluvad jõuelektronika tõrgete alla toiteallikaga seotud rikked [9].

Ülekannete tõrked on peamiselt seotud neis sisalduvate hammasrataste ning laagrite kulumisega. Seesugused mehhaanilised vead avalduvad pöörlemise ekstsentrilisuses, pöördemomendi pulseerimistes ning elektrilistes väärtustes. Tuvastamisel saab oluliseks andurite füüsiline kaugus vigastatud laagritest või hammasratastest, sest teekonna pikkusega rikete mõju hajub [31].

Ülevaatlik skeem elektriajami vigade liigitusest on toodud joonisel 2.5.



Joonis 2.5 Elektriagamite vealiigid [9], [31], [32], [33]

2.3 Elektriagamite tõrgete diagnostikameetodid

Avaldatavate teadustööde rohkus viitab sellele, et käib pidev arendustöö suurendamiseks elektriagamite tõrketuvastuse efektiivsust ning ületamaks olemasolevate tehnikate puudusi. Enamasti arendatakse ja uuritakse elektriagamite tõrgete diagnostikameetodeid konkreetse tõrke tuvastamise jaoks. Seni ei ole leitud ühtegi üksikut elektrimasina omadust, mille kaudu saaks ammendavalt ja usaldusväärset diagnoosida masina seisundit täies võimalike tõrgete ulatuses, mistõttu kombineeritakse täielikuma pildi saamiseks erinevatest allikatest pärinevat infot masina seisundi kohta. Täiendamaks valdkonnas teada-tuntud voolude ja vibratsioonide analüüsile tuginevatel meetoditel ammutatavat informatsiooni, uuritakse ka alternatiivseid masina omadusi [34]. Neil põhjustel lähtutakse käesolevas töös värsketest diagnostikameetoditest ülevaate andmisel diagnoositavatest veatüüpidest.

2.3.1 Mootorite tõrgete diagnostika

Rootori vead. Töös [34] uuriti asünkroonmootorivälise puistevoo (ingl. k. *stray-flux*) kasutamist katkiste rootoriribide tuvastamiseks. Erinevate mootori töörežiimide korral ja erinevates asukohtades mõõdeti puistevoo korras rootori ja katkiste ribidega rootori puhul ning

mõõdetulemuste töötlemiseks rakendati aja-sageduse piirkondade (bispektri ja autokovariatsiooni) analüüsil põhinevat algoritmi. Leiti, et puistevoo signaalide analüüsimise teel on võimalik leida osutusi katkiste rootoriribide esinemise kohta, kuid katsetatud meetodi täpsus vajab hindamist ning magnetvoo andurite optimaalne asukoht väljaselgitamist.

Töös [35] tugineti asünkroonmootori katkiste ribide tuvastusalgoritmi väljatöötamisel asünkroonmootori lihtsustatud mudelist võrsunud teooriale, mille põhjal on võimalik koormuse kõikumisest ning temperatuurimuutusest olenemata usaldusväärselt vigu tuvastada, kui võrrelda kahe erineva hindamismudeli abil leitud rootori magnetvoovektori nurka (ingl. k. *rotor flux angle*). Magnetvoovektori hindamismudeliteks kasutati tavapäraselt vektorjuhtimises kasutatavaid pinge ja voolu mudeleid. Simulatsiooni ja praktiliste katsetuste teel leidis kinnitust, et väljatöötatud meetodi põhjal on võimalik katkiste rootoriribide esinemist õigesti tuvastada isegi äärmuslikel juhtudel, kui koormuse kõikumise põhjustatud ilmingud kattuvad tõrke tundemärkidega. Sel juhul jääb näiteks MCSA (*motor current signature analysis*) hätta.

Töös [36] tutvustati asünkroonmootori katkise rootoriribi tuvastamiseks sümmeetriliste komponentide mudelile põhinevat diagnostikameetodit. Tõrke tuvastamiseks ja selle tõsiduse määra hindamiseks kasutati pingete ja voolude alumiste kõrvalsageduste ja põhisageduste analüüsi. Leiti, et väljatöötatud meetod ei nõua suurt arvutusvõimsust ja seda on lihtne olemasolevatesse juhtimissüsteemidesse lisada. Meetodi puudujäägiks on, et selle efektiivsus pole teada juhtudel, kui esineb mitut tüüpi rootori tõrkeid korraga.

Asünkroonmootori diagnostikameetodit esitleti ka töös [37], kus keskenduti transientses režiimis (kõikuvatel koormustel ja kiirustel) töötavatele mootoritele. Veatuvastuseks analüüsiti mootori voolusignaale aja-sageduse piirkondades spektrogrammi abil. Uuenduslikuks väärtuseks oli paljudest kitsastest sagedusaladest koosneva kõrgresolutsioonilise spektrogrammi akna automaatne koostamine. Autorite hinnangul saab tänu sellele diagnoosida mitmesuguseid tõrkelikke ilma diagnoosiprotsessi sekkumata, mis teeb esitletud lähenemise eriliselt kasulikuks tehisintellektil põhinevatele automatiseeritud diagnostikasüsteemidele. Katseliselt tõestati meetodi toimimine katkise rootoriribi tuvastamisel.

Mootorisüsteemis esinevad tõrked võivad põhjustada mootori voolu põhikomponenti moduleerivate lisakomponentide tekke. Viimaste olemasolu on võimalik võimsusespektris näha põhisageduse ümber paiknevate asümmeetriliste madala-amplituudiliste kõrvalsagedustena. Töös [38] võrreldi võimsusspektri kaudu tõrgete põhjustatud lisakomponentide eraldamiseks kahte sagedusanalüüsi meetodit: konventsionaalset bispektri (*conventional bispectrum - CB*) analüüsi

meetodit ning selle edasiarendust - moduleeriva signaali bispektri (*modulation signal bispectrum - MSB*) analüüsi meetodit. Uuriti meetodite võimekust järgmiste vigade tuvastamisel: murtud rootoriribi, ülekande hammaste kulumine, mootori ümber oleva kompressori tõrked. Tulemuseks leiti, et MSB on CB-st uuritud juhtudel võimekam meetod. MSB abil, erinevalt CB-st, oli võimalik kõiki nimetatud tõrkeid ja nende esinemise määra tuvastada.

Staatori vead. Töös [39] kasutati erinevatel koormustel töötava asünkroonmootori seisundi kohta info saamiseks mootorivälise puistevoogu (ingl. k. *stray axial flux*) spektraalanalüüsi. Puistevoogu mõõdeti erinevates mootori seisundites: korras mootori, staatorimähise lühise ning katkiste rootoriribide korral. Mõõtetulemuste näol talletatud info õpetati masinõppe korras kolmele erineva struktuuriga neurovõrgule (ingl. k. *neural network – NN*), nendeks olid mitmekihiline pertseptron (*multi-layer perceptron – MLP*), iseorganiseeruv kaart (*self-organizing map – SOM*) ja rekurrentne Hopfieldi võrk (*recurrent Hopfield network – RHN*). Katsetati neurovõrkude efektiivsust eelpooltoodud tõrgete ja nende kombinatsioonide märkamisel ja tuvastamisel. Leiti, et antud rakenduseks on kõige efektiivsemaks katsetatud neurovõrgu struktuuriks mitmekihiline pertseptron ehk MLP. Iseorganiseeruva kaardi puhul toodi selle eeliseks kiirus tõrke märkamisel, kuid mõnel juhul jääb tõrke tõsidusaste staatorimähiste tõrgete ja mitme tõrke korraga esinemise puhul selgusetuks. Hopfieldi võrk ei talunud mõõtehäiringuid piisavalt hästi, et olla töökindel.

Mehaanilised vead. Kolmefaasiliste sünkroongeneraatorite staatilise ekstsentrilisuse tuvastamisega tegeldi töös [24]. Staatori voolusid mõõdeti kolme erineva rootoriasendi korral ning nende põhjal arvutati pseudo-nulljärgnevusvool (ingl. k. *pseudo zero-sequence current*). Tõrke tõsiduse hindamiseks leiti kiire Fourier' teisenduse abil pseudo-nulljärgnevusvoolu spektrogramm ja tõrke esinemise korral tuvastati selge kolmanda harmooniku amplituudi kasv. Leiti, et pakutud meetod on mitte-invasiivne, odav ning tõrke tõsidusastme hindamisel täpne.

Töös [27] kasutati asünkroonmootori laagrite seisundi hindamiseks staatori voolu spektrit ja masinõpet. Autorid tõdevad, et kuigi üldjuhul on laagrite rikked täpsemini tuvastatavad vibratsioonide või heli kaudu, siis on neil meetodeil anduritega seotud probleeme ja seetõttu võiks vooluspektrist saadaolev info neid täiendada. Vooluspektri kasutamine laagririkete tuvastamiseks on aga keeruline, sest laagririketest tulenevad mõjud voolu spektrile on väikesed ning võivad eriti vaheldi toitel oleva mootori puhul mattuda mürasse. Tõrketuvastamisel kasutavad autorid vooluspektrist esimese üheteistkümne harmooniku kõrvalsageduste amplituude, mis suurendab veatundemärkide hulka eksponentsiaalselt. Vältimaks detailse info rohkusest tulenevast ülesobitamistest (ingl. k. *overfitting*) tingitud probleeme veadiagnostikat läbi viiva automaatse klassifitseerija kasutamisel, kasutatakse kahandamise meetoditena Lassot, kantregressiooni ning

nende kombinatsiooni. Uuriti säärase diagnostikasüsteemi varajase veatuvastuse võimet. Leiti, et kõik kahandamise meetodid on piisavalt head laagrite seisundi jälgimiseks ning tõrgete varajaseks tuvastamiseks, kuid Lasso abiga on võimalik luua kõige lihtsamaid ning paremini tõlgendatavaid mudeleid.

Asünkroonmootorite laagrite varajases järgus tõrgete tuvastamisega tegeleti ka töös [40], kus autorid mõõtsid erinevatel koormustel koormusvoolu ning koostasid kiire Fourier' teisenduse abil koormusvoolu sagedusspektri. Sagedusspektrist eraldati laagrite vigade põhjustatud tunnused ning õpetati need masinõppe ja tehisintellekti algoritmidele, samuti õpetati algoritmidele korras laagritega koormusvoolu spektri tunnused. Masinõppe algoritmidest katsetati tugivektorklassifitseerijat (*support vector machine, SVM*), naiivset Bayes'i klassifitseerijat (*NBC*), *k*-lähimat naabrit (*k-Nearest Neighbour, k-NN*), otsustuspuud (*decision tree, DT*) ja otsustusmetsa (*random forest, RF*). Tehisintellektist katsetati sügavõpet (*deep learning, DL*) koos konvolutsioonilise neurovõrguga (*convolutional neural network, CNN*). Järeldati, et kõik masinõppe algoritmid on laagri vea märkamisel täiuslikud ning augu ja kriimustuse diagnoosimise täpsuselt vahemikus ~80-90%, kuid igal on oma tugevused ja nõrkused, mistõttu tuleks algoritm valida vastavalt konkreetse rakenduse omapärale. Tehisintellektil põhinev algoritm andis samaväärselt lootustandvaid tulemusi ning rõhutati selle olulisi eeliseid masinõppel põhinevate ees – seda on võimalik treenida mistahes rakenduseks, vähesem ajakulu ning parameetrite häälestamine ei nõua programmeerimisoskust. Siiski on konvolutsioonilise neurovõrgu kõrge täpsuse saavutamiseks vaja suurt hulka andmeid.

2.3.2 Jõuelektronika tõrgete diagnostika

Jõuelektronikaseadmete tõrked on peamiselt seotud neis sisalduvate kondensaatorite ja jõupooljuhtide riketega. Mistahes jõumuunduri puhul on kahte tüüpi pooljuhtidest lülitusseadmete tõrkeid: lüliti lühised ja ühenduse katkemised [41]. Väga põhjalik ülevaade levinud jõutransistoride diagnostikameetoditest antakse töös [42]. Sobimatu toitepinge või elektromagnetiliste häiringute mõjul võib tõrkuda ka juhtimisloogika [33].

Jõutransistori vead. Töös [43] esitletakse reluktantsmasina jõumuunduri jõutransistori lühiste ja ühenduse katkemiste diagnoosimise algoritmi, mis põhineb muunduri väljundvoolu sageduse ja amplituudi analüüsil. Jõumuunduri kindlatesse transistoridesse juhiti kõrgsageduslik vool ning mõõdeti ja analüüsiti selle mõju muunduri väljundvoolule korras transistori, lühistatud transistori ning lahtiühendatud transistori korral. Katsetuste põhjal selgitati välja tõrketundemärgid. Autorite

hinnangul on meetod tõhus mitmesuguste mootori töörežiimide korral ning sobib kasutamiseks elektrilennukites ja elektrisõidukites. Kirjeldatud lähenemise eeliseks teiste jõutransistori diagnostikameetodite ees nimetatakse tõsiasi, et täiendavaid andureid ei lähe vaja, tänu millele on meetod töökindlam.

2.3.3 Andurite tõrgete diagnostika

Töös [29] arendati nutikas teadmuspõhine diagnostikameetod võimsate asünkroonmootoritega ajamisüsteemidele tuvastamiseks alalisvoolulüli pingemanduri, faasivoolude andurite ja kiiruse anduri tõrkeid. Andurite tõrked liigitati mõõteinfo põhjal kinnikiilumiseks (*stuck*), nihkumiseks (*offset*) ja müratõrkeks (*noise*). Diagnostikamudeli sisenditeks on pinge, voolu ja kiiruse mõõteinfo ning väljunditeks tõrke asukoht ja liik. Klassifitseerijana kasutati kiire õppimisvõime, kõrge üldistusvõime ja arvutuslikult efektiivse häälestusmehhanismiga Ekstreemselt Õppiva Masina nimelist algoritmi (*Extreme Learning Machine, ELM*). Et minimeerida väära diagnoosi võimalikkust, kasutati ansambelõppe mudelit, mis tähendab, et rakendati mitut ELM klassifitseerijat paralleelselt. Jäiga diagnoositsükli asemel kasutati diagnostika kiiruse ja täpsuse vahetõrgete reguleerivat aegkohanduvat diagnoosiprotsessi. Autorid tõdeavad, et esitletud meetodi eelis teiste selleks hetkeks olemas olnud teadmuspõhiste meetodite ees on tõrketuvastuse täpsus ning kiirus – anduri vigade täpne diagnoos saabus katsetel keskmiselt 10 ms jooksul tõrke tekkest. Kolmandaks meetodi tugevuseks on tõsiasj, et koostatud algoritmi on võimalik õpetada tuvastama ka teisi vigu.

Töös [44] tegeldi topeltfaasidega kolmefaasilise püsimagnetiga sünkroonmasina (PMSM) veadiagnostika ja tõrkeid taluva juhtimisega viit liiki tõrgete korral: kiiruse anduri tõrked, alalisvoolulüli pingemanduri tõrked, vooluanduri tõrked, faasi katkemine ja katkenud lüliti. Tegemist on laiaulatusliku diagnostikameetodiga, mis tähendab, et erinevate tõrkeliikide tuvastamise struktuurid on teineteisest mõjutamatud. Siiski ei ole meetod loodud tuvastama mitut liiki korraga esinevat tõrget. Autorid põhjendavad seda asjaoluga, et meetod suudab sekundaarsete tõrgete tekkimist vältida tuvastades ja taludes esimesena tekkiva tõrke piisavalt kiiresti. Tõrgete tuvastamiseks kasutatakse vektorruumi lagundamist (*vector space decomposition – VSD*) ning erinevate tõrgete tundemärgid leitakse erinevatest allruumidest.

2.3.4 Reduktori/ülekannete tõrgete diagnostika

Ülekannete laagrite või hammasrataste tõrgete tunnused avalduvad kolmel viisil: masina pöörlemissagedusest sõltuv tõrkeimpulsi kordumise sagedus, impulsist tekkivad vibratsioonid ning üldise mürataseme kasv [31].

Reduktori seisundi jälgimiseks on pakutud mitmeid meetodeid, nagu vibratsiooni, voolude, heli ja temperatuuri analüüsil põhinevaid [45]. Praktikas on enimlevinud viis reduktori tõrgete diagnostikaks vibratsiooni analüüs. Selleks tuleb paigaldada mitmeid vibratsiooniandureid, nagu näiteks akseleromeetrid, ning seoses sellega võib tekkida täiendavate andmetöötlusüksuste vajadus, mis teevad seisundi jälgimise süsteemid keerulisemaks ning raskendavad töökindluse tagamist [46]. Samuti ei pruugi mõne rakenduse puhul vibratsiooni andurite paigaldamiseks ruumi jaguda [45]. Teiseks levinuimaks viisiks reduktori tõrgete tuvastamisel on elektriliste signaalide analüüs, mille eeliseks on riistvaraline lihtsus – täiendavaid andureid paigaldada ei ole vaja. Kuid ülekannetes vigastatud hammaste või laagrite tagajärjel tekkiva vibratsiooni mõju ei pruugi tuvastamiseks piisaval määral elektrimasina elektrilistes signaalides kajastuda. Eriti kehtib see varajases faasis tõrgete puhul [46].

Töös [47] kasutati tuulegeneraatori reduktori hammasrataste tõrgete tuvastamiseks generaatori vooluspektri analüüsi. Et kasutada elektrimasina muutuvate kiiruste oludes kiiret Fourier' teisendust, teisendati reduktori tõrgete dünaamilised tunnussagedused konstantseteks väärtusteks. Seejärel eraldati tõrketunnused statistilise analüüsi algoritmi abil ning tõrketuvastus sooritati kahe erineva matemaatilise valemi põhjal. Leiti, et oludes, kus tõrkest tulenev vibratsioon muutub koos elektrimasina võlli pöörlemiskiirusega, on meetod efektiivne. Samas märgiti, et praktikas ei pruugi see alati nii olla.

Töös [46] koostati algoritm kombineerimaks reduktori tõrgete tuvastamiseks akustiliste, vibratsiooni ja elektriliste signaalide analüüsi. Autoritele teadaolevalt on see ka esimene töö, kus reduktori tõrgete tuvastamiseks erinevate allikate võimalusi korraga kasutatakse. Katseliselt leiti, et kombineeritud viisil on veatuvastus märkimisväärselt kvaliteetsem kui ühegi eraldiseisva signaali kaudu.

3. ELEKTRIAJAMI TÕRKEID TALUVAD JUHTIMISE VIISID

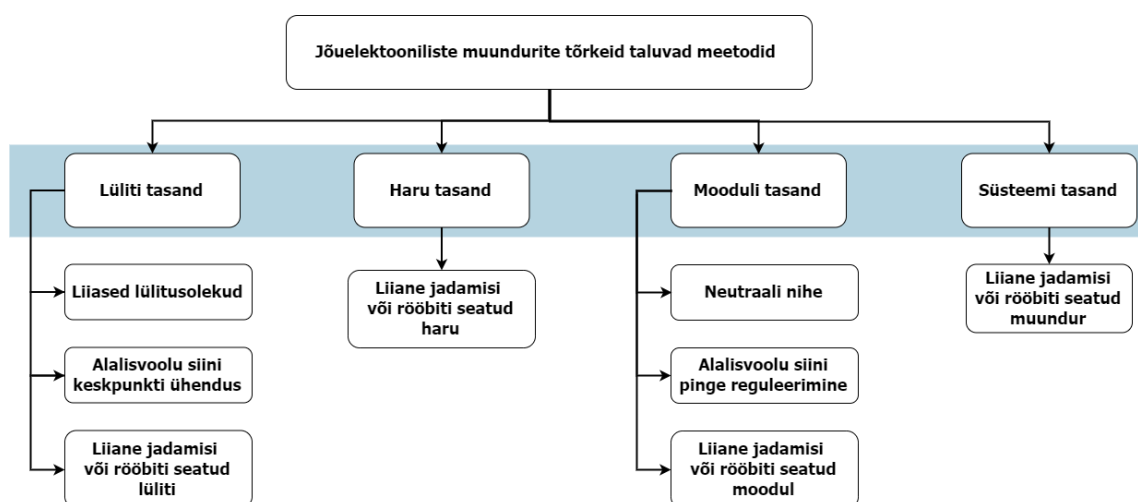
Mõningate mehhaaniliste, elektriliste, andurite ja täiturite tõrgete puhul on elektriajames võimalik tõrkejärgset jõudluse vähenemist ära hoida või süsteemi töö vähemalt kriitilisel tasemel säilitada. Elektriajami tõrketaluvuse saavutamise strateegiad võib liigitada kahte kategooriasse [9]:

1. Jõuelektronikaseadme ümberseadistamine;
2. Elektriajami juhtimise kohandamine.

3.1 Jõuelektronikaseadmete tõrketaluvuse saavutamise viisid

Jõumuundurites aset leidvatest tõrgetest on levinumad kondensaatorite ja jõulülite, nagu isoleeritud paisuga bipolaartransistoride (IGBT) ja metall-oksiid väljatransistoride (MOS-FET) rikked. Mistahes jõumuundurite tõrketaluvus saavutatakse alati riistvaraliste liiasuste kasutuselevõttuga, millele lisatakse vastav juhtimisstrateegia [13].

Joonisel 3.1 on ülevaatlilikult toodud jõumuundurite tõrketaluvuse saavutamise meetodite liigitus koos näidetega igas kategoorias. Riistvaralise liiasuse tüübist lähtuvalt jaotatakse tõrkeid taluvad meetodid nelja kategooriasse [13]: lülititasandi meetodid, harutasandi meetodid, moodulitasandi meetodid ja süsteemitasandi meetodid.



Joonis 3.1 Jõumuundurite tõrkeid taluvate meetodite liigitus [13]

Lihtsaim lahendus jõumuunduris aset leidvate rikete ületamiseks on täieliku riistvaralise liiasuse kasutamine ehk teisisõnu mitme rööbiti või jadamsi ühendatud jõumuunduri süsteemi rakendamine [9]. See on süsteemitasandiline meetod. On selge, et niisugune lähenemine on lisaks täiendavale kaalule ja ruumivajadusele ka kulukas. Tööstuses on leiab see siiski tänu töökindlusele laialdast kasutust [13].

Optimaalsemaks lahenduseks terve elektriajami tööd halvavate jõuelektronikakomponentide või pingeallika rikete mõjude välistamisel on riistvaralise liiasuse kasutamine jõuelektronikaseadmete ülesehituses ehk mooduli tasandil, haru tasandil või lüliti tasandil. Nii saavutatakse muunduri ülesehituse ümberseadistamise võimalus. Seesugustel lähenemistel on enamasti mõtet vaid juhul, kui nende hind ei ületa süsteemitasemelise liiasuse kasutuselevõtu hinda [9].

Tõrkejärgse topoloogia korral on vaja lülitusmustreid mootori õigeks juhtimiseks sobivaks kohandada. See tähendab juba tarkvaralise ja riistvaralise liiasuse kombineerimist ja nii on võimalik saavutada väga töökindlaid riistvara ümberseadistamise viise kriitilisteks rakendusteks [9]. Seejuures on kriitilisteks rakendusteks parima hinna, jõudluse ja töökindluse vahekorraga meetodiks liiasuse paralleelse haru (*redundant parallel leg*) topoloogia, mis suudab tõrkeid taluda ilma jõudluses järele andmata [13].

Asünkroonmootorite puhul on muunduritesse liiasuste sisseviimisel peamiselt kasutatud kahte suunda. Et lahendada riknenud jõupooljuhtidest või lühistatud mootori mähhistest tulenevaid probleeme, lisatakse muunduri skeemi täiendavaid kahesuunalisi lüliteid ja kasutatakse mootori neutraaliühendust. Teise suunana lisatakse jõuelektronilise täituri riistvaralisse topoloogiasse täiendavaid harusid, mida on võimalik pooljuhi rikke korral sisse või välja lülitada [9].

Tänapäeval on lülitusrežiimis reluktantsmasinad (*switched reluctance machine, SRM*) tänu oma madalale hinnale ning lihtsale ja töökindlale püsिमagnetiteta ehitusele saanud üheks potentsiaalseks elektrisõidukite veojõumootorite kandidaadiks [48]. Lülitusrežiimis reluktantsmasinate juhtimisel kasutatavate muundurite tõrkeid taluvat ehitust on vahelduvvoolumasinate muundurite tõrketaluvusest vähem uuritud. Töö [41] autorid toovad selle seletamiseks kaks võimalikku põhjendust. Esiteks peetakse reluktantsmasinat ehituselt töökindlaks, sest selle kriitiline töövõime säilib ka faasi katkemise puhul, eriti juhtudel kui faaside arv on vähemalt 4. Teiseks võimalikuks põhjuseks olevat reluktantsmasinate faaside sõltumatu juhtimine - kuna faasidel puudub elektriline ühendus, on nende voolud teineteisest sõltumatud, seega ei riku ühe faasi rike ülejäänud faaside toimimist. Töös [41] arendati reluktantsmasina jõumuunduri mitmete lülitite tõrgete taluvuse meetod, tänu millele püsis süsteemi jõudlus korras süsteemi

taseme lähedal kuni nelja lüliti tõrke korral. Mootor oli vähenenud jõudlusega juhitud ka iga kolme faasi kahe lüliti samaaegse riknemise korral. Tõrketaluvuse saavutamiseks täiendati levinud jõumuunduri topoloogiat kahe lüliti ning kuue türistoriga, tegemist on harutasandi liiasust kasutava meetodiga.

Moodulitasandi liiasust rakendava meetodi näiteks on töö [48], kus arendati kolmefaasilistele lülitusrežiimis reluktantsmasinatele moodulaarne täis-sild muunduritopoloogia. Liideti kaks standardset kuuelülilist moodulit selliselt, et tavaolukorras on kõik lülitid korraga kasutuses, mis ühtlustab temperatuurijaotust muunduris. Autorite hinnangul sobib väljatöötatud muundur kasutamiseks kõrget töökindlust nõudvates rakendustes nagu lennukites, laevades ja elektriautodes.

Hetkel levinumaks elektriautodes kasutatavaks elektrimootoritüübiks on PMSM ehk püsimagnetergutusega sünkroonmasin (vt. Tabel 1.2). Töös [49] pakuti PMSM jaoks tõrkeid taluv muunduri topoloogia. Töös pakutud meetod rakendab lülititasandil riistvaralist liiasust, täiendades standardset kuuelülilist vaheldit kolme sulavkaitsme ja kolme sümistori (TRIAC-i) lisamisega. Kasutatakse ka alalisvoolulüli keskpunkti ühendust.

3.2 Juhtimise kohandamise ehk tõrkeid taluvad juhtimise viisid

Tõrkeid taluva juhtimise olemust ja üldist struktuuri on kirjeldatud käesoleva töö esimeses peatükis. Järgnevalt antakse ülevaade mõnest värskest teadustööst elektriajamite tõrkeid taluva juhtimise vallas.

3.2.1 Jõuelektronika tõrkeid taluv juhtimine

Kui lülitusrežiimis reluktantsmasina (SRM) ühe faasi jõulülitis tekib lühis, siis kaob selles faasis demagneetimisühik, mille tagajärjeks on mootori pöördemomendi tõsine pulseerimine. Et pulseerimist vähendada, tuleb mootori väljundvõimsuses järeleandmisi teha. Töös [23] esitleti SRM-i muunduri jõulüliti lühist taluvat juhtimismeetodit elektriautode kontekstis. Arendatud tõrkeid taluv juhtimisalgoritm otsustab sõiduki teeoludest lähtuvalt mootori jõudluse vähenemise astme. Eristatakse kahte olukorda. Esiteks, kui sõiduk asub jõulüliti tõrke hetkel tavapärast sujuvat sõitu võimaldavas keskkonnas, siis seatakse ohutuseesmärgiks sujuv sõit hoolduspunkti. Selleks kompenseeritakse pöördemomendi pulseerimist mootori väljundvõimsuse arvelt. Teiseks, kui

sõiduk asub nõudlikumas keskkonnas, näiteks tõusul, siis seatakse ohutuseesmärgiks õnnetuste vältimine ja sõit turvalisusesse. Selle eesmärgi täitmiseks eelistatakse mootori võimsuse säilitamist pulseerimise vähendamisele. Mootori jõudluse vähendamise astme järgi arvutatakse sobivad faasivoolud ning korrigeeritakse lülitite töötüsikleid. Simulatsiooni teel läbi viidud katsete tulemusena leiti, et pakutud meetodil on võimalik pöördemomendi pulseerimist efektiivselt alla suruda ning tõsta SRM süsteemi töökindlust. Antud meetod on teadmuspõhine, sest juhtimisalgoritm peab otsuste tegemisel kasutama varasemalt talletatud infot.

Töös [50] analüüsiti püsिमagnetergutusega topeltfaasidega püsिमagnetergutusega kolmefaasiliste sünkroonmootorite (PMSM) mudeli prognostilist juhtimist (*model predictive control* – MPC) ühe faasi lülitite katkemise korral. PMSM-i tõrkejärgse matemaatilise mudeli analüüsi põhjal töötati välja uus tõrkeid taluv mudeli prognostilise juhtimise meetod FT-PWMPC (*fault tolerant PWM predictive control*), mille prognoosimisprotseduur on vastupidine levinud CMPC (*model predictive current control*) meetodile ja mille viimane samm on pingete reguleerimine pulsilaiusmodulatsiooni abil. Võrreldi pakutud meetodit kahe alternatiivse juhtimisstrateegiaga nende dünaamiliste karakteristikute, ühtlase talitluse voolude, vibratsiooni ja parameetrite tundlikkuse põhjal. Autorid leidsid, et PMSM-i tõrkejärgseks juhtimiseks oleks parim lahendus kasutada nende pakutud mudelipõhist meetodit, et parandada tõrkejärgset voolukvaliteeti, vähendada nõutavat arvutusvõimsust ja tõsta seeläbi süsteemi töökindlust.

3.2.2 Andurite tõrkeid taluv juhtimine

Töös [44] tegeldi topeltfaasidega kolmefaasilise püsिमagnetergutusega sünkroonmasina (PMSM) tõrkeid taluva juhtimisega kolme liiki tõrgete korral: vooluanduri tõrked, faasi katkemine ja katkenud lüliti. Põhiliseks juhtraamistikuks kasutati ruumivektori pulsilaiusmodulatsiooni põhise mootori momendi vahetut juhtimismeetodit (*space vector modulation direct torque control* – SVM-DTC). Vooluanduri tõrke talumiseks leiti pärast tõrke tuvastamist arvutuslik hinnanguline voolu väärtus kasutades uuenduslikult vektorruumi lagundamise teooriat (*vector space decomposition* – VSD). Et juhtimises ei toimuks järske hüppeid, asendati andurist tulev info hinnangulise õige voolu väärtusega sujuvalt. Avatud lülitite ja faasi katkemist taluv juhtimine korraldati ühtviisi, tõrkega faasi pinge kompenseeriti teiste faaside pingete arvelt.

3.2.3 Mootorite tõrkeid taluv juhtimine

Töös [51] arendati kolmefaasiliste asünkroonmootorite vektorjuhtimisel (*field oriented control* – FOC) põhinev faasi katkemist taluv meetod, millega autorid soovivad tavalisi vektorjuhtimisega ajameid täiendada. Meetod on lihtne, kuna faasi katkemise talumiseks rakendatakse tõrkejärgseks juhtimiseks riknenud mootorile pärilevi (*feedforward*) põhimõttel sobiv nulljärgnevuspinge ja seega puudub vajadus vastuelektromotoorjõu keerukaks arvutamiseks.

Töös [52] esitleti neurovõrkudel põhinevat adaptiivset juhtimisstrateegiat asünkroonmootori juhtimiseks murdunud rootoriribi korral nii, et jõudlus säilib talutaval tasemel. Koostati asünkroonmootori tõrkejärgne mudel, mille tundmatute muutujate väärtuste hindamiseks rakendati neurovõrgu (*radial basis function network* - RBFNN) algoritmi. Nii saavutati rootori pöörlemiskiiruse, rootori magnetvoo, staatori voolude ja voolude homopolaarsete komponentide hinnangulised väärtused. Juhtudeks, kui asünkroonmootori dünaamika ei ole täpselt teada, seati adaptiivsed hägusloogilised juhtimiseadused. Meetodi töökindlus kinnitati katseliselt ka äärmuslike väliste ja sisemiste häiringute esinemise korral.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetööga anti ülevaade elektriajamite tõrkeid taluva juhtimise ning veadiagnostika alustest. Autorile teadaolevalt ei ole seni elektriajamite tõrkeid taluva juhtimise teemal eestikeelseid kirjutisi avaldatud, mistõttu on see töö mainitud tühimiku esimeseks täiteks.

Lõputöö koostamisel töötati läbi hulganisti tõrkeid taluva juhtimise, elektriajamite veadiagnostika ning üldisi elektriajamite teemalisi teadusartikleid selleks, et valdkonna tausta paremini hoomata. Osade mõistete sisu adumisel oli abi eestikeelsetest loengukonspektidest ning õpikutest. Kuna teemakohaseid eestikeelseid allikaid autoril leida ei õnnestunud, tuli tugineda ingliskeelsetele teadusartiklitele. Lõputöö kirjutamisel püüti lähtuda loogilisest struktuurist, pidades silmas lugejat, kelle jaoks teema on uus.

Lõputöö esimeses peatükis anti ülevaade tõrkeid taluva juhtimise vajalikkusest, olemusest, struktuurist ja toodi näiteid tõrkeid taluvat juhtimist nõudvatest valdkondadest.

Teises peatükis tutvustati alustuseks elektriajamite veadiagnostika põhimõtteid, tõrgete tekkepõhjuseid ning tõrkeliike koos levinumate tõrgete näidetega iga liigi puhul. Seejärel toodi elektriajamite vigade liikide kaupa näiteid elektriajamite tõrkeadiagnostika meetoditest, mis pärinevad peamiselt viimase kahe aasta jooksul avaldatud teadusartiklitest.

Lõputöö kolmandas peatükis anti sissevaade elektriajamite tõrkeid taluva juhtimise hetkeseisu, tuues näiteid teadusartiklitest, mis kirjeldavad erinevaid tõrkeid taluvaid juhtimise viise.

Väärrib mainimist, et kuna teema on mitmekesine ja keeruline, siis saaks seda lahata detailsemalt, näiteks kirjeldada lähemalt diagnostika- ning tõrkeid taluva juhtimise otsuseid langetavate algoritmide sisust ja toimimismehhanismidest või avada väljatöötatud tõrkeid taluvate juhtimismeetodite teoreetilist tausta. Samuti võiks olla väärtuslik ülevaade elektriajamite tõrkeid taluva juhtimise värsketest uurimissuundadest. See aga eeldab põhjalikke eelteadmisi ning kogemust, mistõttu vääriks uurimist edasise teadustöö raames.

SUMMARY

In this bachelor's thesis an overview of the basics of diagnostics and fault tolerant control of electrical drives has been presented. Up to this point in time and to the best of the author's knowledge, not a single work on the subject of fault tolerant control of electrical drives has been published in Estonian. Thus, this is the first step towards filling the aforementioned void.

Many research papers concerning fault tolerant control, diagnostics of electrical drives and electrical drives in general were reviewed in order to better grasp the essence of the subject. Some lecture notes and books in Estonian played an important role in describing the meaning of terms that had not been clear to the author. Due to the lack of literature in Estonian, the thesis is based on research papers written in English. The author tried to compile the work in a logical structure, keeping in mind a reader without any prior knowledge of the subject.

In the first part, an overview of the objective, essence and structure of fault tolerant control was given. Additionally, examples of areas that use fault tolerant control were presented.

In the second part, the principles of the diagnostics of electrical drives were explained. Also, an overview of the conditions leading to a fault and fault categories was provided. The chapter ends with examples of fault diagnosing methods from research papers mostly published in the last two years.

In the third part, a brief insight to the current state of the research in fault tolerant control of electrical drives was given with examples from recent research papers about different fault tolerant control methods and strategies.

Due to the complexity of the subject, there is ample room for more elaboration. For example, giving a closer look at the mechanisms of the decision-making algorithms used at different stages of the control system or presenting a detailed theoretical background of some of the control methods. Also, a comprehensive review about the most recent trends of research in fault tolerant control of electrical drives would be valuable. This however requires a foundation of thorough knowledge and experience of the field and thus might be an objective of a future research paper.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] R. Lahtmets, *Tehnoloogia ja ajamid*, 2. Tallinn: Kirjastus Elektriajam, 2008.
- [2] AVIZIENIS A, „DESIGN METHODS FOR FAULT-TOLERANT NAVIGATION COMPUTERS“, 1969, lk 171–185.
- [3] D. P. Looze, J. L. Weiss, J. S. Eterno, ja N. M. Barrett, „AUTOMATIC REDESIGN APPROACH FOR RESTRUCTURABLE CONTROL SYSTEMS.“, *IEEE Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference*, 1985, lk 570–577.
- [4] R. SpéE ja A. K. Wallace, „Remedial Strategies for Brushless DC Drive Failures“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, kd 26, nr 2, lk 259–266, 1990.
- [5] X. Yu ja J. Jiang, „A survey of fault-tolerant controllers based on safety-related issues“, *Annual Reviews in Control*, 2015, kd 39, lk 46–57.
- [6] Z. Gao, C. Cecati, ja S. X. Ding, „A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques-part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, kd 62, nr 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., lk 3757–3767, 01-juuni-2015.
- [7] M. Blanke, M. Staroswiecki, ja E. E. Wu, „Concepts and methods in fault-tolerant control“, *Proceedings of the American Control Conference*, kd 4, lk 2606–2620, 2001.
- [8] B. Guo ja Y. Chen, „Robust adaptive fault tolerant control of four wheel independently actuated Electric vehicles“, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, lk 1–1, jaan 2019.
- [9] D. U. Campos-Delgado, D. R. Espinoza-Trejo, ja E. Palacios, „Fault-tolerant control in variable speed drives: A survey“, *IET Electric Power Applications*, kd 2, nr 2, lk 121–134, 2008.
- [10] Z. Gao, S. X. Ding, ja C. Cecati, „Real-time fault diagnosis and fault-tolerant control“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, kd 62, nr 6, lk 3752–3756, 2015.
- [11] J. Jiang, „Fault-tolerant control systems - An introductory overview“, *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, kd 31, nr 1, lk 161–174, 2005.
- [12] M. Blanke, R. Izadi-Zamanabadi, S. A. Bøgh, ja C. P. Lunau, „Fault-tolerant control systems - A holistic view“, *Control Engineering Practice*, 1997, kd 5, nr 5, lk 693–702.
- [13] W. Zhang, D. Xu, P. N. Enjeti, H. Li, J. T. Hawke, ja H. S. Krishnamoorthy, „Survey on fault-tolerant techniques for power electronic converters“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, kd 29, nr 12, lk 6319–6331, 2014.

- [14] M. Maki, J. Jiang, ja K. Hagino, „A stability guaranteed active fault-tolerant control system against actuator failures“, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, kd 2, lk 1893–1898, 2001.
- [15] M. Mariton, „Detection delays, false alarm rates and the reconfiguration of control systems“, *International Journal of Control*, kd 49, nr 3, lk 981–992, 1989.
- [16] T. Vaimann ja B. Asad, „ELECTRICAL DEVICE DIAGNOSTICS TOWARDS CLOUD COMPUTING and IoT“, 2019.
- [17] J. Jiang ja Q. Zhao, „Should We Use Parameter Estimation or State Estimation Based FDI Algorithms?“, *IFAC Proceedings Volumes*, kd 30, nr 18, lk 459–464, aug 1997.
- [18] K. Zhang, B. Jiang, M. Chen, ja X.-G. Yan, „Distributed Fault Estimation and Fault-Tolerant Control of Interconnected Systems“, *IEEE Transactions on Cybernetics*, lk 1–11, aug 2019.
- [19] D. Y. Li, P. Li, W. C. Cai, X. P. Ma, B. Liu, ja H. H. Dong, „Neural adaptive fault tolerant control for high speed trains considering actuation notches and antiskid constraints“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, kd 20, nr 5, lk 1706–1718, mai 2019.
- [20] X. Jiang, Q. Li, W. Huang, ja R. Cao, „A Dual-Winding Fault-Tolerant Motor Drive System Based on the Redundancy Bridge Arm“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, kd 66, nr 1, lk 654–662, jaan 2019.
- [21] E. Kamal, A. Aitouche, R. Ghorbani, ja M. Bayart, „Robust fuzzy fault-tolerant control of wind energy conversion systems subject to sensor faults“, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, kd 3, nr 2, lk 231–241, apr 2012.
- [22] K. Nounou, J. F. Charpentier, K. Marouani, M. Benbouzid, ja A. Kheloui, „Fault-Tolerant Control of VSI Driven Double Star Induction Machine for Electric Naval Propulsion“, *Proceedings - 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, PEAC 2018*, 2018.
- [23] M. Ma, R. Wang, F. Li, J. Wang, ja S. Yang, „A fault-tolerant control strategy for switched reluctance motor drive for electric vehicles under short-fault condition“, *Microelectronics Reliability*, kd 88–90, lk 1221–1225, sept 2018.
- [24] K. N. Gyftakis, C. A. Platero, Y. Zhang, ja S. Bernal, „Diagnosis of Static Eccentricity in 3-Phase Synchronous Machines using a Pseudo Zero-Sequence Current“, *Energies*, kd 12, nr 13, lk 2476, juuni 2019.
- [25] L. Frosini, A. Borin, L. Girometta, ja G. Venchi, „Development of a leakage flux measurement

- system for condition monitoring of electrical drives“, *SDEMPED 2011 - 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, 2011, lk 356–363.
- [26] P. Henriquez, J. B. Alonso, M. A. Ferrer, ja C. M. Travieso, „Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, kd 44, nr 5. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., lk 642–652, 2014.
- [27] O. Duque-Perez, C. Del Pozo-Gallego, D. Morinigo-Sotelo, ja W. Fontes Godoy, „Condition Monitoring of Bearing Faults Using the Stator Current and Shrinkage Methods“, *Energies*, kd 12, nr 17, lk 3392, sept 2019.
- [28] I. Bolvashenkov, J. Kammermann, S. Willerich, ja H. G. Herzog, „Comparative study of reliability and fault tolerance of multi-phase permanent magnet synchronous motors for safety-critical drive trains“, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, kd 1, nr 14, lk 133–138, 2016.
- [29] B. Gou, Y. Xu, Y. Xia, G. Wilson, ja S. Liu, „An Intelligent Time-Adaptive Data-Driven Method for Sensor Fault Diagnosis in Induction Motor Drive System“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, kd 66, nr 12, lk 9817–9827, dets 2019.
- [30] H. Annival, „Uitvoolud ja nende diagnostika sagedusmuunduritega juhitavates asünkroonmootorites“, Tallinna Tehnikaülikool, 2018.
- [31] H. Henao *et al.*, „Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques“, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, kd 8, nr 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., lk 31–42, 2014.
- [32] M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, ja G. A. Capolino, „Advances in electrical machine, power electronic, and drive condition monitoring and fault detection: State of the art“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, kd 62, nr 3, lk 1746–1759, märts 2015.
- [33] „Guide to Common Causes of PLC Failures“. [Online]. Available at: <https://gesrepair.com/programmable-logic-controller-failure/>. [Vaadatud: 05-dets-2019].
- [34] M. Iglesias-Martínez, J. Antonino-Daviu, P. Fernández de Córdoba, ja J. Conejero, „Rotor Fault Detection in Induction Motors Based on Time-Frequency Analysis Using the Bispectrum and the Autocovariance of Stray Flux Signals“, *Energies*, kd 12, nr 4, lk 597, veebr 2019.
- [35] M. Nemeč, V. Ambrožič, R. Fišer, D. Nedeljković, ja K. Drobnič, „Induction Motor Broken

- Rotor Bar Detection Based on Rotor Flux Angle Monitoring“, *Energies*, kd 12, nr 5, lk 794, veebr 2019.
- [36] T. Wang, H. Liu, L. Zhao, J. Huang, ja Z. Hou, „Quantitative broken rotor bar fault detection for closed-loop controlled induction motors“, *IET Electric Power Applications*, kd 10, nr 5, lk 403–410, mai 2016.
- [37] J. Burriel-Valencia, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, A. Sapena-Baño, M. Riera-Guasp, ja M. Pineda-Sánchez, „Multi-band frequency window for time-frequency fault diagnosis of induction machines“, *Energies*, kd 12, nr 17, lk 3361, aug 2019.
- [38] B. Huang *et al.*, „A Performance Evaluation of Two Bispectrum Analysis Methods Applied to Electrical Current Signals for Monitoring Induction Motor-Driven Systems“, *Energies*, kd 12, nr 8, lk 1438, apr 2019.
- [39] M. Skowron, M. Wolkiewicz, T. Orłowska-Kowalska, ja C. T. Kowalski, „Effectiveness of Selected Neural Network Structures Based on Axial Flux Analysis in Stator and Rotor Winding Incipient Fault Detection of Inverter-fed Induction Motors“, *Energies*, kd 12, nr 12, lk 2392, juuni 2019.
- [40] S. Esakimuthu Pandarakone, Y. Mizuno, ja H. Nakamura, „A Comparative Study between Machine Learning Algorithm and Artificial Intelligence Neural Network in Detecting Minor Bearing Fault of Induction Motors“, *Energies*, kd 12, nr 11, lk 2105, juuni 2019.
- [41] P. Azer, J. Ye, ja A. Emadi, „Advanced Fault-Tolerant Control Strategy for Switched Reluctance Motor Drives“, *2018 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, ITEC 2018*, 2018, lk 178–182.
- [42] B. Lu ja S. K. Sharma, „A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, kd 45, nr 5, lk 1770–1777, 2009.
- [43] N. Ali, Q. Gao, C. Xu, P. Makys, ja M. Stulrajter, „Fault diagnosis and tolerant control for power converter in SRM drives“, *The Journal of Engineering*, kd 2018, nr 13, lk 546–551, jaan 2018.
- [44] X. Wang, Z. Wang, Z. Xu, M. Cheng, W. Wang, ja Y. Hu, „Comprehensive Diagnosis and Tolerance Strategies for Electrical Faults and Sensor Faults in Dual Three-Phase PMSM Drives“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, kd 34, nr 7, lk 6669–6684, juuli 2019.
- [45] X. Jin, F. Cheng, Y. Peng, W. Qiao, ja L. Qu, „A comparative study on Vibration- and current-

based approaches for drivetrain gearbox fault diagnosis“, *IEEE Industry Application Society, 52nd Annual Meeting: IAS 2016*, 2016.

- [46] L. He, J. Unnikrishnan, L. Hao, B. Matthews, ja W. Qiao, „Enhanced wind turbine main drivetrain gearbox and bearing monitoring and diagnostics via information fusion of acoustic, electrical, and vibration signatures“, *2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2019*, 2019, lk 51–56.
- [47] D. Lu, W. Qiao, ja X. Gong, „Current-Based Gear Fault Detection for Wind Turbine Gearboxes“, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, kd 8, nr 4, lk 1453–1462, okt 2017.
- [48] Q. Sun, J. Wu, C. Gan, ja J. Guo, „Modular Full-Bridge Converter for Three-Phase Switched Reluctance Motors with Integrated Fault-Tolerance Capability“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, kd 34, nr 3, lk 2622–2634, märts 2019.
- [49] M. Moujahed, B. Touaiti, H. Ben Azza, M. Jemli, ja M. Bousak, „Fault tolerant power converter topologies for sensor-less speed control of PMSM drives“, *Periodica polytechnica Electrical engineering and computer science*, kd 63, nr 3, lk 227–234, 2019.
- [50] H. Lu, J. Li, R. Qu, D. Ye, ja Y. Lu, „Fault-Tolerant Predictive Control of Six-Phase PMSM Drives Based on Pulsewidth Modulation“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, kd 66, nr 7, lk 4992–5003, juuli 2019.
- [51] M. Tousizadeh, H. S. Che, J. Selvaraj, N. A. Rahim, ja B. T. Ooi, „Fault-Tolerant Field-Oriented Control of Three-Phase Induction Motor Based on Unified Feedforward Method“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, kd 34, nr 8, lk 7172–7183, aug 2019.
- [52] N. Layadi, S. Zeglache, A. Djeriou, H. Mekki, ja F. Berrabah, „Adaptive RBFNN Strategy for Fault Tolerant Control: Application to DSIM under Broken Rotor Bars Fault“, *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, kd 11, nr 2, lk 49–61, veebr 2019.