



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# LAAGRIRIKETE DIAGNOSTIKA MEETODITE VÕRDLEV ANALÜÜS

## COMPARATIVE ANALYSIS OF BEARING FAILURE DIAGNOSTIC METHODS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Artur Obolonin

Üliõpilaskood 221325AAAM

Juhendaja: Karolina Kudelina, doktorant-  
nooremteadur  
Hadi Ashraf Raja, teadur

(Tiitellehe pöördel)

## **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.

“13” mai 2024.

Autor: Artur Obolonin

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“13” mai 2024.

Juhendaja: Karolina Kudelina

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....2024.

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Artur Obolonin

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Laagririkete diagnostika meetodite võrdlev analüüs,

mille juhendaja on Karolina Kudelina,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

13.05.2024 (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Artur Obolonin

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Laagririkete diagnostika meetodite võrdlev analüüs

*Kuupäev:* 13.05.2024

80 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Karolina Kudelina, doktorant-nooremteadur.

*Töö juhendaja(d):* Hadi Ashraf Raja, teadur

*Töö konsultant (konsultandid):*

*Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärgiks on välja selgitada optimaalsed meetodid laagririkete diagnoosimiseks, võrrelda nende tõhusust ning anda soovitusi parimate lahenduste rakendamiseks. Laagririkete diagnostika meetodite võrdlev analüüs on oluline, kuna laagrid moodustavad olulise osa masinate ja seadmete tööstuslikust infrastruktuurist. Laagririketest tingitud rikete varajane avastamine on eluliselt tähtis, et vältida ootamatuid seiskumisi, parandada seadmete töökindlust ning suurendada tootlikkust.

Konkreetsed küsimused, millele töö püüab vastust leida, on: millised on kõige efektiivsemad meetodid laagririkete varaseks diagnoosimiseks tööstuslikes seadmetes? Kuidas erinevad laagririkete diagnostika meetodid võrreldes omavahel efektiivsuse poolest?

Teoreetilises osas analüüsiti seisundi jälgimise ja rikke diagnoosimise võimalusi, keskendudes kasulikumatte meetodite peale. Elektromagnetilise ajamisüsteemi tervise analüüsamiseks on nii invasiivseid kui ka mitteinvasiivseid meetodeid, mida saab kasutada rikke diagnoosimiseks.

Praktilises osas analüüsiti nii tervislikke kui ka kahjustatud laagrite signaale MATLAB tarkvaras, kasutades Dewetron OXYGEN mõõtmistarkvara. See spetsialiseeritud tarkvara võimaldab mitmekülgseid mõõtmisi ja andmete analüüsi mitmesuguste füüsikaliste suuruste kohta, nagu vibratsioon, temperatuur, surve jne.

*Märksõnad:* MATLAB, laagrite rikked, diagnostika, analüüs, laagrite tõrked

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Artur Obolonin	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Comparative analysis of bearing failure diagnostic methods	
<i>Date:</i> 13.05.2024	80 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Karolina Kudelina, Early-Stage Researcher.	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Hadi Ashraf Raja, Researcher.	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of the work is to identify optimal methods for diagnosing bearing faults, compare their effectiveness, and provide recommendations for implementing the best solutions. Comparative analysis of bearing fault diagnostic methods is crucial as bearings constitute a significant part of industrial machinery and equipment infrastructure. Early detection of faults caused by bearings is crucial to prevent unexpected downtime, improve equipment reliability, and increase productivity.</p> <p>Specific questions the work seeks to answer include: what are the most effective methods for early diagnosis of bearing faults in industrial equipment? How do different bearing fault diagnostic methods compare in terms of effectiveness?</p> <p>In the theoretical part, possibilities for condition monitoring and fault diagnosis were analyzed, focusing on the most beneficial methods. There are both invasive and non-invasive methods for analyzing the health of electromagnetic drive systems, which can be used for fault diagnosis.</p> <p>In the practical part, healthy and damaged bearing signals were analyzed in MATLAB software using Dewetron OXYGEN measurement software. This specialized software enables versatile measurements and data analysis of various physical quantities such as vibration, temperature, pressure, etc.</p>	
<i>Keywords:</i> MATLAB, bearing fault, fault diagnosis, fault signal analysis, rolling element	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Laagririkete diagnostika meetodite võrdlev analüüs**

Lõputöö teema inglise keeles: **Comparative analysis of bearing failure diagnostic methods**

Üliõpilane: **Artur Obolonin, 221325AAAM**

Eriala: **Energiamuundus ja juhtimissüsteemid**

Lõputöö liik: **magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Karolina Kudelina**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Hadi Ashraf Raja**  
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **1 aasta**  
2023/2024      2023/2024 Kevad

Lõputöö esitamise tähtaeg: **13.05.2024**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## **1. Teema põhjendus**

Laagririkete diagnostika meetodite võrdlev analüüs on oluline, kuna laagrid moodustavad olulise osa masinate ja seadmete tööstuslikust infrastruktuurist. Laagririketest tingitud rikete varajane avastamine on eluliselt tähtis, et vältida ootamatuid seiskumisi, parandada seadmete töökindlust ning suurendada tootlikkust. Antud teema uurimine on oluline nii inseneridele, hooldustehnikutele kui ka tootmisettevõtetele, kes sõltuvad efektiivselt ja katkematust masinapargist. Probleemi taustaks on laagririketest tingitud kulukad ja aeganõudvad remonttööd, mille ennetamine või varajane avastamine võib oluliselt vähendada.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on välja selgitada optimaalsed meetodid laagririkete diagnoosimiseks, võrrelda nende tõhusust ning anda soovitusi parimate lahenduste rakendamiseks. Konkreetne küsimus, millele töö püüab vastust leida, on: millised on kõige efektiivsemad meetodid laagririkete varaseks diagnoosimiseks tööstuslikes seadmetes?

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

1. Millised on meetodite tugevused ja nõrkused erinevates tööstusharudes ja keskkondades?
2. Kuidas erinevad laagririkete diagnostika meetodid võrreldes omavahel efektiivsuse poolest?
3. Kuidas saab optimeerida laagririkete diagnostika protsessi, et tagada varajane avastamine ja vähendada seadmete seisakute aega?
4. Millised on praktilised rakendused ja soovitusid parimate meetodite integreerimiseks olemasolevasse hooldussüsteemi?

## **4. Lähteandmed**

Püstitatud eesmärkide lahendamiseks on vaja koguda ja analüüsida mitmekesiseid andmeid, mis kajastavad laagririkete diagnostika meetodite tõhusust ja nende rakendatavust erinevates tööstuskeskkondades.

Laboratoorsed katsed.

## **5. Uurimismeetodid**

Laboratoorsed katsed, vibratsioonianalüüs, kirjanduse analüüs.

Andmete analüüsiks kasutatavad vahendeid: tabelarvutused Excelis, MATLAB, valemid.

## **6. Graafiline osa**

Graafiline osa läheb põhiosasse kui ka lisadesse.

## **7. Töö struktuur**

1. SISSEJUHATUS
2. ELEKTRIMOOTORITE PÕHILISED TÕRKED
  - 2.1. Elektrilised tõrked
  - 2.2. Mehaanilised tõrked
  - 2.3. Teised tõrked
3. LAAGRI KONSTRUKTSIOON JA PEAMISED TÕRKED
  - 3.1. Laagrite määrimine
  - 3.2. Laagrite tihendamine
  - 3.3. Laagrite tõrked
    - 3.3.1. Liigkoormus
    - 3.3.2. Väsimum
    - 3.3.3. Halb määrimine
    - 3.3.4. Saastumine
    - 3.3.5. Ebaõige paigaldamine
    - 3.3.6. Hooletu kohtlemine
    - 3.3.7. Laagrivoolud
4. LAAGRITÕRKETE DIAGNOSTIKA MEETODITE VÕIMALUSED
  - 4.1. Klassikaliste lähenemisviiside võimalused
    - 4.1.1. Termiline jälgimine
    - 4.1.2. Õhuvahemiku pöördemomendi jälgimine
    - 4.1.3. Müra jälgimine
    - 4.1.4. Vibratsioonianalüüs
    - 4.1.5. Spektraalanalüüs
    - 4.1.6. Klassikaliste lähenemisviiside võrdlev analüüs
  - 4.2. Signaalipõhiliste lähenemisviiside võimalused
    - 4.2.1. Kiire Fourier' teisendus
    - 4.2.2. Lühiajaline Fourier'i teisendus
    - 4.2.3. Wigner-Ville'i jaotus
    - 4.2.4. Wavelet teisendus
    - 4.2.5. Empiirilise moodi lagunemine
    - 4.2.6. Tsüklilise statistika analüüs
    - 4.2.7. Signaalipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs
  - 4.3. Mudelipõhiliste lähenemisviiside võimalused
    - 4.3.1. Mitmekordne ahelate mudel
    - 4.3.2. d-q mudel
    - 4.3.3. Magnetahelate mudel
    - 4.3.4. Lõplike elementide mudel



- 4.3.5. Hübrid mudel
- 4.3.6. Kunstlik neuronaalne võrk
- 4.3.7. Hägusloogika
- 4.3.8. Tugivektormasin
- 4.3.9. Mudelipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs

## 5. VIBRATSIOONISIGNAALIDE ANALÜÜS

- 5.1. Vibratsioonispektri analüüs
- 5.2. Kiire Fourier' teisenduse spektri analüüs
- 5.3. Teised analüüsimisvõimalused

## KOKKUVÕTE

## 8. Kasutatud kirjanduse allikad

- 1) Karolina Kudelina, Bilal Asad, Toomas Vaimann, Anton Rassõlkin, Ants Kallaste, Huynh Van Khang. "Methods of Condition Monitoring and Fault Detection for Electrical Machines", 2021
- 2) Karolina Kudelina, Bilal Asad, Hadi Ashraf Raja, Siarhei Autso. "The Impact of Load on Global Parameters of Electrical Machines in Case of Healthy and Broken Rotor Bars", 2022.
- 3) Muhammad Amir Khan, Bilal Asad, Karolina Kudelina, Toomas Vaimann, Ants Kallaste. "The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines — The State of the Art", 2022.
- 4) Siddique Akbar, Toomas Vaimann, Bilal Asad, Ants Kallaste, Muhammad Usman Sardar, Karolina Kudelina. "State-of-the-Art Techniques for Fault Diagnosis in Electrical Machines: Advancements and Future Directions", 2023.

## 9. Lõputöö konsultandid

Pole konsultante.

## 10. Töö etapid ja ajakava

- Lähteandmete kogumine (29.01.2024 - 15.02.2024)
- Teoreetilise osa kirjutamine (15.02.2024 - 15.03.2024)
- Praktilise osa tegemine (15.03.2024 - 10.04.2024)
- Kokkuvõtte koostamine (20.04.2024 - 29.04.2024)
- Töö esimene versioon valmis (30.04.2024)
- Töö lõplik versioon valmis (11.05.2024)

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	12
1 SISSEJUHATUS.....	13
2 ELEKTRIMOOTORITE PÕHILISED TÕRKED .....	16
2.1 Elektrilised tõrked .....	16
2.2 Mehaanilised tõrked.....	16
2.3 Teised tõrked.....	18
3 LAAGRI KONSTRUKTSIOON JA PEAMISED TÕRKED .....	19
3.1 Laagrite määrimine .....	20
3.2 Laagrite tihendamine .....	21
3.3 Laagrite tõrked .....	21
3.3.1 Liigkoormus.....	23
3.3.2 Väsimus .....	23
3.3.3 Halb määrimine.....	24
3.3.4 Saastumine .....	25
3.3.5 Ebaõige paigaldamine .....	26
3.3.6 Hooletu kohtlemine .....	27
3.3.7 Laagrivoolud .....	27
4 LAAGRITÕRKETE DIAGNOSTIKA MEETODITE VÕIMALUSED .....	29
4.1 Klassikaliste lähenemisviiside võimalused .....	29
4.1.1 Termiline jälgimine .....	30
4.1.2 Õhuvahemiku pöördemomendi jälgimine .....	31
4.1.3 Müra jälgimine .....	32
4.1.4 Vibratsioonianalüüs .....	32
4.1.5 Spektraalanalüüs .....	33
4.1.6 Klassikaliste lähenemisviiside võrdlev analüüs.....	34
4.2 Signaalipõhiste lähenemisviiside võimalused .....	35
4.2.1 Kiire Fourier' teisendus .....	36

4.2.2	Lühiajaline Fourier'i teisendus .....	37
4.2.3	Wigner–Ville'i jaotus .....	37
4.2.4	Wavelet teisendus .....	38
4.2.5	Empiirilise moodi lagunemine.....	38
4.2.6	Tsüklilise statistika analüüs .....	39
4.2.7	Signaalipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs .....	39
4.3	Mudelipõhiliste lähenemisviiside võimalused .....	40
4.3.1	Mitmekordne ahelate mudel.....	41
4.3.2	d-q mudel .....	41
4.3.3	Magnetahelate mudel.....	43
4.3.4	Lõplike elementide mudel .....	43
4.3.5	Hübriid mudel .....	44
4.3.6	Kunstlik neuronaalne võrk .....	44
4.3.7	Hägasloogika .....	45
4.3.8	Tugivektormasin .....	45
4.3.9	Mudelipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs .....	46
5	VIBRATSIOONISIGNAALIDE ANALÜÜS.....	48
5.1	Vibratsioonispektri analüüs.....	48
5.2	Kiire Fourier' teisenduse spektri analüüs .....	54
5.3	Teised analüüsimisvõimalused .....	58
	KOKKUVÕTE .....	60
	SUMMARY.....	62
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	64
	LISAD .....	70

## **EESSÕNA**

Käesoleva töö teema pakkus välja juhendaja. Töö teema on aktuaalne kuna laagrid moodustavad olulise osa masinate ja seadmete tööstuslikust infrastruktuurist.

Töö kirjutamisel oli eesmärk mitte ainult pakkuda põhjalikku ülevaadet olemasolevast kirjandusest, vaid ka katsetada erinevad stsenaariumid praktilises osas.

Täna enda juhendajat Karolina Kudelina asjaliku ning konkreetse abi ja tagasiside eest kogu protsessi vältel.

# 1 SISSEJUHATUS

Elektrimasinate rikete diagnoosimine on oluline nende ohutu ja usaldusväärse toimimise tagamiseks. Elektrimasinad, nagu mootorid ja generaatorid, mängivad olulist rolli mitmesugustes tööstus- ja ärirakendustes ning talitlushäire või rike võib kaasa tuua olulisi katkestusi, tootmiskadusid ja ohutusriske. Seetõttu on oluline rikkeid analüüsida kiiresti ja täpselt riskide maandamiseks ning tööefektiivsuse säilitamiseks.

Üks peamisi põhjusi, miks elektrimasinate rikete diagnoosimine on vajalik, on ettenägematu seisakute ja kulukate remontide vältimine. Rikete varajase avastamise ja diagnoosimise korral saab hooldustegevusi planeerida ja ellu viia ennetavalt, vähendades ootamatute katkestuste võimalusi ja maksimeerides tööaega. See ennetav hoolduslähenedamine, mida tuntakse ennustava hooldusena, sõltub suuresti rikete analüüsist, et ennetada ja lahendada potentsiaalseid probleeme enne nende muutumist tõsisteks probleemideks.

Teine oluline aspekt rikete diagnoosimisel on ohutus. Elektrimasinad töötavad kõrgete pinge- ja voolutasemetega, muutes need olemuslikult ohtlikuks, kui neid ei hooldata korralikult. Rikked nagu lühiseid, isoleerimise läbipõlemist või ülekuumenemist võivad põhjustada olulisi ohutusriske, sealhulgas elektrilööke, tulekahjusid ja isegi plahvatusi. Rikete analüüs võimaldab tuvastada ohutusohud ja võtta meetmeid riskide maandamiseks ning tagada ohutu töökeskkond.

Ent hoolimata sellest, kui oluline on rikete diagnoosimine elektrimasinate puhul, kaasnevad sellega omad väljakutsed ja probleemid. Üks peamisi väljakutseid on elektrisüsteemide keerukus ja mitmekesisus. Elektrimasinad on erinevat tüüpi, suuruse ja konfiguratsiooniga, igaühel neist omad tööomadused ja rikete tekkimise viisid. Rikete analüüsimine sellistes mitmekesistes süsteemides nõuab sügavat arusaamist elektriinseneri põhimõtetest, diagnostilistest tehnikatest ja valdkonna spetsiifilisest teadmistest.

Veel üks väljakutse on diagnostiliste andmete kättesaadavus ja usaldusväärsus. Elektrimasinad tekitavad töötamise ajal suuri andmemahtusid, sealhulgas pinge- ja voolulaineid, temperatuuri lugemisi, vibratsioonimustreid ja muud. Nende andmete analüüsimine nõuab keerukaid andmehankesüsteeme, signaalitöötlusalgoritme ja diagnostikatööriistu. Siiski võivad andmete kvaliteediprobleemid, nagu müra, andurite vead ja puuduvad andmed, mõjutada rikete analüüsi tulemuste täpsust ja usaldusväärset.

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on läbi viia laagririkete diagnoosimise meetodite võrdlev analüüs, võrreldes nende tõhusust ja rakendatavust. Selleks antakse ülevaade erinevatest laagririkete diagnoosimise meetoditest ning uuritakse nende efektiivsust ja kasutatavust erinevates tingimustes. Lõputöö käigus käsitletakse nii klassikalisi kui ka uusi innovatiivseid meetodeid ning nende rakendamist erinevates tööstusharudes.

Laagrid moodustavad olulise osa masinate ja seadmete tööstuslikust infrastruktuurist ning nende tõrgeteta toimimine on äärmiselt oluline tootmise sujuvuse tagamiseks. Siiski võivad laagrites esinevad rikked põhjustada ootamatuid seiskumisi, suurendada hoolduskulusid ning vähendada seadmete töökindlust ja tootlikkust. Seetõttu on oluline arendada efektiivseid meetodeid laagririkete varaseks diagnoosimiseks, mis võimaldaksid ennetavat hooldust ja vähendaksid seiskumiste riski.

Lõputöö teema valikule pani aluse teema aktuaalsus ja tähtsus tööstussektoris ning vajadus arendada paremaid lahendusi laagririkete varajaseks avastamiseks. Lisaks on antud teema oluline ka teaduslikust aspektist, kuna see võimaldab süvendada arusaamist laagrites esinevatest rikestest ning nende diagnoosimise meetoditest.

Teises peatükis on põhjalikult uuritud elektrimootorite peamisi tõrkeid, sealhulgas nende elektrilisi ja mehaanilisi tõrkeid. Töö keskendub tõrgete põhjustele, erinevustele ja nende võimalikele tagajärgedele, pakkudes ülevaadet elektrimootorite töökindluse olulistest aspektidest ja nende tõrgetega seotud puudustest.

Kolmandas peatükis on keskendutud laagri konstruktsioonile ning peamistele tõrgetele, mis võivad laagrite töös esineda. Teemad hõlmavad laagrite määrimist, tihendamist ning erinevaid võimalikke tõrkeid. Peatükk pakub ülevaadet olulistest aspektidest, mis mõjutavad laagrite töökindlust ja võivad põhjustada nende tõrkeid tööstuslikes rakendustes.

Neljandas peatükis uuritakse laagritõrkete diagnoosimise erinevaid võimalusi, jagunedes klassikaliste, signaalipõhiste ja mudelipõhiste lähenemisviisideks. Peatükk pakub põhjaliku ülevaate erinevate lähenemisviiside võimalustest ning sisaldab ka nende võrdlevat analüüsi.

Viies peatükk on lõputöö kõige olulisem osa, kus keskendutakse vibratsioonisignaalide analüüsile. Meetodid nagu vibratsioonispektri analüüs ja kiire Fourier' teisenduse spektri analüüs võimaldavad sügavamalt arusaamist laagririkete diagnoosimisest.

Lisaks käsitletakse ka muid analüüsimisvõimalusi, mis aitavad tuvastada ja mõista laagririkete olemust ning võimalikke põhjuseid.

Lõputöö uurimisobjektiks on erinevad laagririkete diagnoosimise meetodid. Meetodite efektiivsuse hindamisel kasutatakse arvutitarkvara MATLAB ja spetsiaalsed laagririkete diagnoosimise käsured.

## **2 ELEKTRIMOOTORITE PÕHILISED TÕRKED**

Enamus mootoririkkeid võib jaotada kaheks peamiseks kategooriaks: mehaanilised ja elektrilised. Rikete põhjused võivad hõlmata mootori konstruktsioonivead, tootmisdefekte, vale paigaldust, ebaõiget kasutamist, kaitse puudumist või hooldusprobleeme. Siiski kuuluvad kõik lõpptulemused põhimõtteliselt nende kahe kategooria alla.

### **2.1 Elektrilised tõrked**

Elektririkked on elektrimasinate kõige sagedasemad rikked, peamiselt staatoris. Need võivad tekkida isolatsioonirikete, lühiste, avatud ahelate või muude probleemide tõttu masina elektriosade juures.

Masinate võivad ilmned erinevad elektrilised tõrked, sealhulgas staatori defektid, mis võivad põhjustada faasimähise avanemise või lühise, staatori mähiste ebanõuetekohane ühendamine, lühiskeerd, keerduvaheline lühis, avatud faas, faaside vaheline lühis ja maalühis [1].

Masinate elektrilised tõrked saavad tavaliselt alguse juhtmete kulumisest või isolatsiooni rikketest, mis võivad põhjustada lühiseid või avatud faase kui ennetavat hooldust ei tehta. Need erinevad lühisetüübid võivad esineda ka kombinatsioonides, mis võivad põhjustada olulist kahju mootorile ning viia olukorrani, kus edasine töö pole võimalik.

### **2.2 Mehaanilised tõrked**

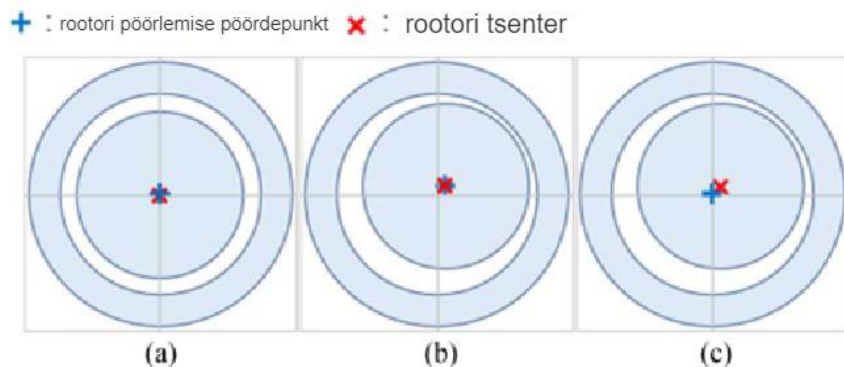
Mehaanilised rikked on elektrimasinate teiseks kõige sagedasemaks rikkeks pärast elektririkkeid. Need võivad tekkida laagrite, võlli vale paigutuse, tasakaalustamata koormuste või muude probleemide tõttu masina mehaanilistes komponentides. Sellist tüüpi rike esineb peamiselt elektrimasina rootoris.

Peamised mehaaniliste rikete tüübid on [1]: ekstsentrilisuse rike, kahjustatud rootorsõrmikud või katkised rootorvardad, katkised laagrid, kahjustatud käigukast ja lühistega rootorimähis. Painutatud võll võib põhjustada hõõrdumist staatori ja rootori vahel, kahjustades mähist ning katkised rootorvardad.

Mehaanilised rikked, nagu laagririkke, võllirikke ja katerikke, põhjustavad võlli võimetuse säilitada oma asendit ja põhjustavad õhuvahemiku tasakaalustavatust. Need mehaanilised defektid võivad viia ekstsentrilisusteni.



See võib tekkida erinevatel põhjustel nii töötamise ajal kui ka halva kvaliteediga remondi tulemusena [2]. Rootori ekstsentrilisus mõjutab halvasti mootori omadusi, vähendades selle tehnikalik-majanduslikke näitajaid, mis takistavad rootori korrektset asendit säilitamast.



Joonis 2.1 Eksentrilisuse rikke juhtumite mudelid: (a) normaalne, (b) staatiline ekstsentrilisus ja (c) dünaamiline ekstsentrilisus [2]

Ekstsentrilisust eristatakse kahte tüüpi: staatiline (liikumatu) ekstsentrilisus - rootori ekstsentriline asend staatori lõikes ja dünaamiline ekstsentrilisus - rootori pinna tasakaalustavuse suhtes selle pöörlemisel, nagu näidatud joonisel 3.1. Normaalses mootoris joonisel 2.1(a) on staatori tsenter, rootori pöörlemise pöördepunkt ja pöörlemistelg on ühel punktil.

Staatiline ekstsentrilisus on näidatud joonisel 2.1(b), kus rootori pöörlemise pöördepunkt ja pöörlemistelg nihkunud staatori tsentrist. Seega pöörleb rootor pidevalt vale asendis. Sellel korral esineb pidev õhuvahemiku tasakaalustavatus pöörlemise ajal.

Dünaamiline ekstsentrilisus näidatud joonisel 2.1(c), mille korral rootori pöörlemise pöördepunkt klappib staatori tsentriga, kuid ei kattu rootori pöörlemise pöördepunktiga. Sellisel juhul keerleb rootori geomeetiline keskpunkt rootori pöördepunkti ümber. Selle tulemusena tekib õhuvahemiku voogudes tugev kõikumine sõltuvalt rootori asendist [2]. Ekstsentrilisuse rikke tagajärjel suureneb müra ja vibratsioon ning väheneb efektiivsus ja suureneb rauakaotus. Eriti juhul, kui temperatuur tõuseb ekstsentrilisusest tingitud suurenenud rauakaotuse tõttu, võib rike ulatuda pöördumatuks püsिमagnet demagnetiseerimisveaks.

## 2.3 Teised tõrked

Masinate võivad esineda termilised rikked. Näiteks laagrikahjustused ja isolatsioonirike, mis on elektrimasinate termiliste probleemide kõige levinumad põhjused ning tõstavad masina temperatuuri [11]. Peamiseks põhjuseks on ülekuumenemine, isolatsiooni lagunemine ja ülekoormus.

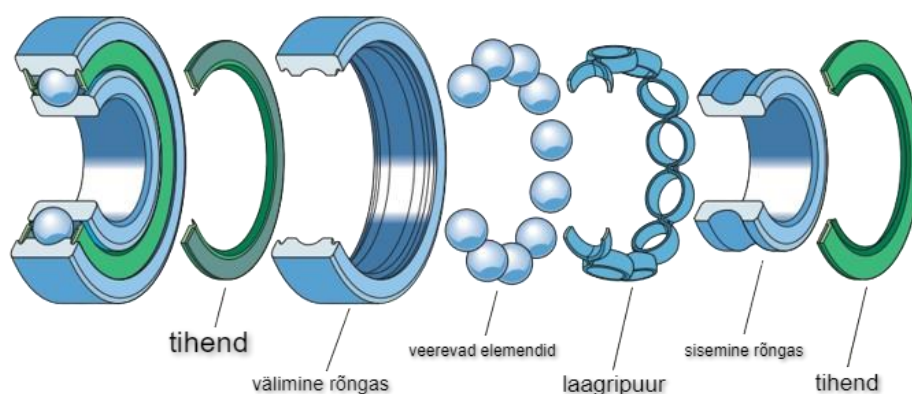
Lisaks võivad esineda keskkonnarikked, mille põhjuseks on masina kokkupuude veega, vibratsiooniga, tolmu ja niiskusega, mis põhjustavad roostetamist ja muid kahjustusi.

Juhtimisrikked võivad tekkida juhtimissysteemi, anduri tõrke, toiteallika rike või tarkvara probleemide tõttu, mis võivad põhjustada masina ebaõiget tõed.

Võivad esineda magnetiga seotud rikked. P simagnet on üks olulisemaid osi masinas, kuid see võib mitmel põhjusel kannatada parandamatut demagnetiseerimist [1]. Lisaks  lekoormusele, suurenenud vibratsioonidele ja rootori defektidele põhjustab magneti demagnetiseerimine sageli rootori voogu vähendamisele ja tasakaalustamisele.

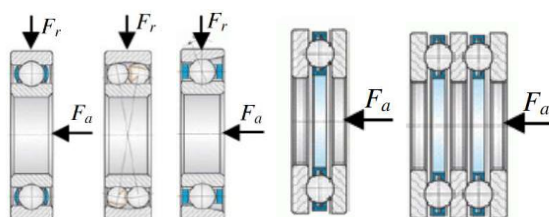
### 3 LAAGRI KONSTRUKTSIOON JA PEAMISED TÕRKED

Laagrid on pöörleva masina kriitilised komponendid. Samal ajal moodustavad laagri rikked suurima osa mehaanilistest kahjustustest ja nende tootmine tuleb läbi viia rangelt määratletud nõuete kohaselt. Siiski on tegelik laagri eluiga palju lühem kui peaks olema, tingituna erinevatest jõududest, mis mõjutavad seda töö käigus, näiteks ootamatu ülekoormus, ebapiisav määrimine ja ebaõige laagri paigaldus [1]. Veerelaagrit kasutatakse tunduvalt sagedamini kui teisi laagritüüpe. Nende eelisteks on suur konstruktsioonide valik ja masstootmine, rahvusvaheline standardiseeritus, suur radiaalne kandevõime väikese laiuse juures, suur kasutegur ja väike hõõrdemoment ning väike määrdekulu. Peamised puudused hõlmavad madalat töökindlust tõukelisel koormusel ning suuri gabariitmõõtmeid [3]. Laager koosneb sisemisest rõngast ja välisest rõngast, nende vahel asuvaist veerelementidest ja viimaste vahel distantsi määravast separaatorist. Joonisel 3.1 on esitatud laagri konstruktsioon.

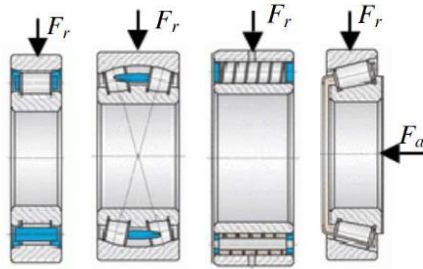


Joonis 3.1 Laagri konstruktsioon [4]

Veerelaagrid klassifitseeritakse veerekehade kuju, vastuvõetava koormuse, veeretede ridade arvu ja seaduvuse järgi. On olemas mitut erinevat tüüpi laagrit, näiteks kuullaagrid, rull-laagrid, radiaallaagrid, radiaal-tugilaagrid, tugilaagrid, seaduvad, mitteseaduvad [12].



Joonis 3.2 Kuullaagri konstruktsioon [5]



Joonis 3.3 Rull-laagrite konstruktsioon [5]

Laagrite valimine on oluline protsess, mis määrab masina või seadme töökindluse, tõhususe ja pikaajalise jõudluse. Laagritüübi valik sõltub konkreetse rakenduse nõudmistest ja töötingimustest. Erinevad laagrid on kavandatud erinevate koormuste, kiiruste ja keskkonningimuste jaoks [12]. Näiteks võivad rasketööstuse masinad vajada spetsiaalseid laagreid, mis on võimelised taluma suuri koormusi ja kõrgeid temperatuure, samas kui elektroonikaseadmed võivad vajada väiksema müratasemega ja väiksema hõõrdumisega laagreid. Oluline on arvestada ka hooldusvajadust ja eluea prognoosi. Mõned laagrid võivad nõuda regulaarset määrimist või hooldust, samas kui teised võivad olla isemääritavad või pikaajalise määrimisvahemikuga. Lisaks võib laagri eluiga varieeruda sõltuvalt sellest, kui hästi see on paigaldatud, hooldatud ja millistele koormustele see on välja pandud.

### 3.1 Laagrite määrimine

Laagrite määrimise eesmärk laagris on vähendada hõõrdekadusid, detailide kulumist ja kuumenemist ning samuti kaitsta pindu korrosiooni eest. Lisaks aitab see vähendada vibratsiooni ja müra ning hoiab ära tolmu ja mustuse sattumise masinasse. Määrdeaine moodustab laagri veere- ja liugepindadel õhukese kaitsekihi, mis takistab pindade otsest kokkupuudet, isegi kui neile rakendub suur koormus. Määrdeaine valik sõltub laagri töötingimustest, eriti temperatuuri, pöörlemiskiiruse ja töökeskkonna omadustest. Üks oluline näitaja on viskoossus, mis määratakse tavaliselt temperatuuridel 40°C ja 100°C [6]. Mida madalam on määrde viskoossus, seda paremini see vähendab sisehõõrdumist, kuid samas väheneb ka määrdekihi kandevõime.

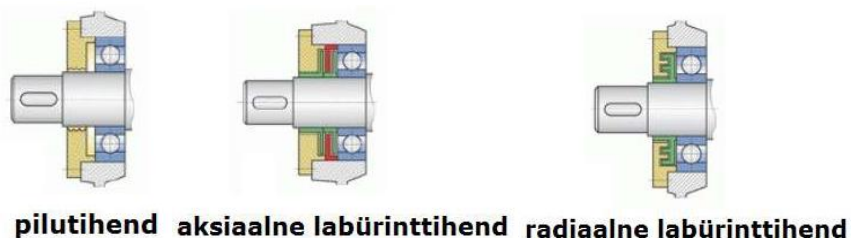
Veerelaagrite määrimiseks eelistatakse tavaliselt plastseid määrdeid. Plastne määre omab omadust muutuda koormuse all voolavaks, moodustades seega efektiivse määrdekihi. See koosneb tavaliselt mineraal- või sünteetilisest õlist ning tihkestist, mis koosneb metallisoolade kiududest, moodustades võrgustiku, mis toimib määrdeõli mahutina. Selle võrgustiku poorid on täidetud õliga, sarnaselt veega täidetud märja käsna pooridele.

Määrimisperioodi jooksul leiab määre endale laagris ja selle ümbruses vaba ruumi. Õli immitseb kontakt- ja liugepindade vahele peamiselt temperatuuri tõusu tõttu, tagades nende efektiivse määrimise [6]. Lisaks mõjutab määre imbumist ja jaotumist ka laagri töötemperatuur ning koormus.

### 3.2 Laagrite tihendamine

Määre püsimise tagamiseks ja väliskeskkonnast, nagu tolm ja vesi, eemal hoidmiseks on oluline laagrisõlmed tihendada. Selleks kasutatakse erinevaid tihenduslahendusi, sealhulgas kontakt- ja kontaktivabu tihendeid ning nende kombinatsioone. Kontakt-tihendused on tavaliselt valmistatud vildist või õlikindlast kummist. Lihtsamatel juhtudel, kus laagrit määratakse plastse määre või viskoosse õliga, kasutatakse sageli viltrõngaid. Raskemates töötingimustes, eriti kui kasutatakse plastset määret või mineraalõli, eelistatakse mansett-tihendeid, mis on spetsiaalselt ette nähtud laagrisõlmede tihendamiseks [7]. Laagrite tihendamise näidet on toodud joonisel 5.6.

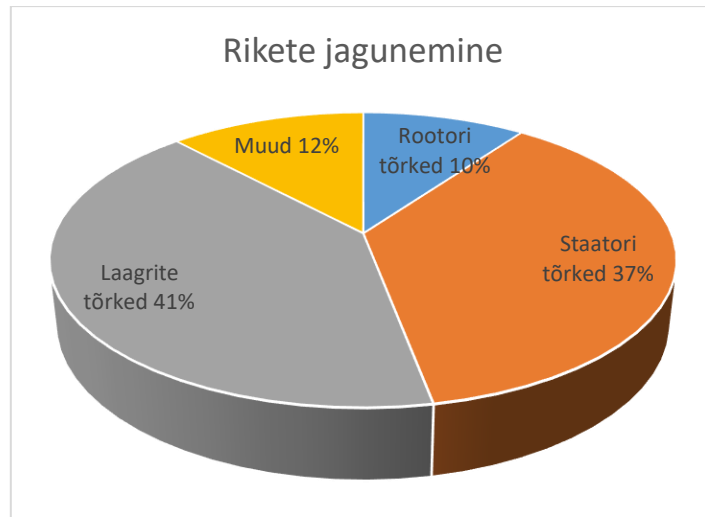
Kontaktivabad tihendid võimaldavad töötamist suurtel kiirustel. Puhta õhu keskkonnas on levinud valik pilutihendid. Labürinttihendites, kus kitsad pilud vahelduvad laiematega, tagatakse tihendus keeruka pilukujuga [7]. Lisaks on oluline tihendite kavandamine vastavalt konkreetsetele rakendusnõuetele, võttes arvesse nii kiirust kui ka keskkonna tingimusi, tagades seeläbi optimaalse tihenduse ja jõudluse.



Joonis 3.4 Laagrite tihendamine [5]

### 3.3 Laagrite tõrked

Laagri vigastumisest annab märku müra ja vibratsiooni suurenemine. Tavaliselt annab see indikaator piisavalt aega laagri asendamiseks enne kui see lõplikult töökõlbmatuks muutub. Joonisel 3.5 on kujutatud rikete jagunemine.



Joonis 3.5 Rikete jagunemine [3]

Statistiliselt on laagrite torked kõige enam levinud elektrimasinate rikkepõhjus. Laagrite torked omakorda jagunevad laias laastus. Kolmandik vanaduse tõttu ehk laagri tööpindade kontaktväsimumise tagajärjel. Kolmandik halva määrimise tõttu.

Kolmandik laagrisse pääsenud saasteaine, hooletu kohtlemise tõttu saadud vigastuste, ebakorrekse paigalduse jms toimetel.

Laagrite tõe põhjuseid on mitmeid [3]:

- Liigkoormus (50% liigkoormust vähendab laagri eluiga kolm korda, kahekordne koormus kuni 10 korda);
- Väsimus;
- Halb määrimine;
- Saastumine;
- Ebaõige paigaldamine;
- Hooletu kohtlemine;
- Laagrivoolud.

### 3.3.1 Liigkoormus

Laagrite liigkoormus, mis illustreeritud joonisel 3.6 on üks levinumaid ja olulisemaid rikkeid, mis võib tekkida erinevates masinates ja seadmetes. See tekib siis, kui laagrit koormatakse üle selle disaini piiride. Liigkoormus võib ilmneda mitmel viisil [3]:

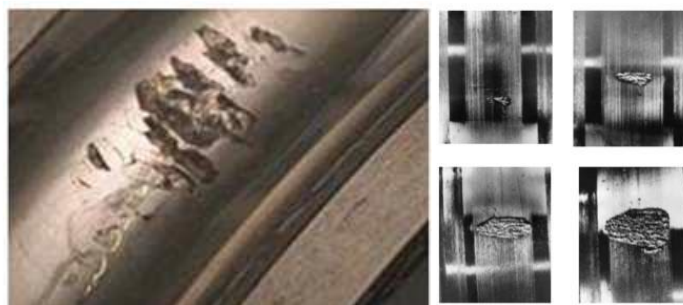
- Staatiline ülekoormus: See juhtub siis, kui laager on pidevalt liigkoormatud stabiilses olekus, näiteks kui masin on pidevalt ülekoormatud.
- Dünaamiline ülekoormus: Tekib siis, kui laager puutub kokku korduvate või vahelduvate koormustega, mis ületavad selle taluvusvõimet. Näiteks kiirendamisel või pidurdamisel võib tekkida suurem koormus kui tavapäraselt.



Joonis 3.6 Laagri ülekoormus [3]

### 3.3.2 Väsimus

Väsimust tekitavad nihkepinged, mis tekivad tsükliliselt veerete koormatud pinna all, on oluline laagrite rikkepõhjus. Need pinged põhjustavad mikropragude teket, mis aja jooksul jõuavad pinnale. Kui veerekeha liigub üle pragude, põhjustab see metallikillukesi, mis purunevad pinnalt välja. Seda protsessi nimetatakse väsimusmurenemiseks või helestumiseks. Väsimusmurenemine levib järk-järgult suuremale pinnale, kuni lõpuks muutub laager kasutuskõlbmatuks [3]. Need metallikillukesed omakorda võivad kahjustada määrdeainet, mis suurendab saastumist ja halvendab laagri töötingimusi. Seega on väsimus üks olulisi tegureid, millele tuleb laagrite disainis ja hoolduses tähelepanu pöörata, et tagada nende pikaajaline ja tõrgeteta töö.



Joonis 3.7 Laagri väsimus [3]

Laagrite valmistamiseks kasutatavate materjalide valik mõjutab otseselt nende jõudlust ja võimekust taluda erinevaid koormusi ning keskkonnatingimusi. Üks levinumaid materjale, mida kasutatakse laagrite valmistamisel, on teras. Teras kvaliteet võib varieeruda sõltuvalt selle keemilisest koostisest, termilisest töötlustest ja tootmisprotsessist. Halva kvaliteediga teras võib sisaldada defekte või ebapuhtusi, mis võivad nõrgendada laagri struktuuri ja suurendada selle vastuvõtlikkust väsimusmurdudele või muudele defektidele. Lisaks terasele võivad mõned laagrid olla valmistatud ka muudest materjalidest, nagu keraamika või polümeerid. Keraamilised laagrid võivad olla vastupidavamad korrosioonile ja kõrgetele temperatuuridele ning neil võib olla suurem tugevus ja jäikus võrreldes traditsiooniliste teraslaagritega. Polümeerlaagrid omakorda võivad pakkuda madalamat hõõrdumist ja vibratsiooni, kuid nende vastupidavus võib olla piiratud teatud koormuste ja keskkonnatingimustega.

### 3.3.3 Halb määrimine

Halb määrimine võib tekkida nii määrde liigsest kui ka ebapiisavast kasutamisest. Määrde puudulikkus võib tuleneda liiga madalast viskoossusest või füüsiliselt ebapiisavast kogusest. Sellisel juhul jäävad veerekehad ebapiisavalt määrituks ning hõõrdumise tagajärjel võivad tekkida väsimusmurrud ja pragunemine. Liigne määrde või kõrge viskoossusega määrde kasutamine võib aga põhjustada võlli libisemist, mis omakorda võib kiirendada mikropragude tekkimist ja nende edasist arengut. Lisaks võib vale määrdevalik soodustada määrdeaine saastumist, mis võib omakorda kahjustada laagrite ja muude mehhanismide tööd ning viia lühema elueani [8]. Ebapiisav määrimine või vale määrimiskogus põhjustada hõõrdumist ja kulumist laagri pinnal. See võib juhtuda siis, kui määrimispunktid ei saa piisavalt määrdeainet või kui määrimissüsteem ei toimi korralikult. Lisaks võib määrimise puudumine põhjustada laagri kuivamist, kulumist ja lõpuks riket, eriti juhul, kui laagrid vajavad regulaarset määrimist, kuid seda ei tehta õigeaegselt.



Vale tüüpi määre võib tekitada halva määrimistõhususe, mis omakorda võib põhjustada laagri rikkeid, kuna erinevad rakendused nõuavad erinevat tüüpi määret, olenevalt temperatuurist, kiirusest, koormusest ja keskkonnatingimustest. Ning viimaks, tolmu, mustuse või muude saasteainete sattumine määrdesse võib põhjustada selle halvenemist või kvaliteedi langust, suurendades hõõrdumist ja kulumist ning vähendades määrimise efektiivsust.



Joonis 3.8 Laagri halb määrimine [5]

Õige määrimine on oluline osa laagrite hooldamisel ja jälgimisel ning see võib oluliselt mõjutada laagrite eluiga ja jõudlust. Korrapärane kontroll, õigeaegne määrimine ja kvaliteetse määrdaine kasutamine on olulised sammud, mis aitavad vältida laagrite rikkeid ja tagavad seadmete sujuva ja tõhusa töö.

### 3.3.4 Saastumine

Saastumine võib hõlmata tolmu, mustust, niiskust ja muid väliskeskkonnast pärinevaid osakesi, mis kogunevad laagri pindadele ja siseosadele. See võib juhtuda erinevatel viisidel ning sõltuda nii väliskeskkonna tingimustest kui ka masina enda tööprotsessidest. Tööstuslike masinate puhul võib tolmu ja mustuse hulk õhus olla eriti suur, mis võib hõlbustada nende sattumist laagritele ja määrdetele. Lisaks võib niiskus või vesi masina ümbruses suurendada korrosiooni riski ning soodustada rooste teket laagrite metallpindadel. Lisaks võib laagrite saastumist põhjustada ka masina enda tööprotsessid. Näiteks võib tootmisprotsessi käigus tekkida kulumis- või lõiketolmu, mis võib levida ümbritsevasse keskkonda ja koguneda laagritele. Samuti võivad teatud tööprotsessid kaasa tuua kemikaalide või õlide pihustamist, mis võivad jõuda laagritele ja määrdetele ning põhjustada saastumist.

Laagrite saastumisel võib olla mitmeid negatiivseid tagajärgi. Saastumine võib suurendada hõõrdumist ja kulumist laagrite pindadel, mis omakorda võib põhjustada nende enneaegset kulumist ja riket. Lisaks võib saastumine vähendada määrdaine efektiivsust, mis võib omakorda suurendada hõõrdumist ja soodustada rooste teket laagri siseosades. Vale tihendivalik võib võimaldada saasteosakeste, nagu tolmu või mustuse, sattumist laagrisse, mis omakorda võib tekitada mülke või kahjustusi laagri pinnal, mis illustreeritud joonisel 5.10.

Et vältida selliseid probleeme, on oluline valida õige tihend ja hoida laagri ümbrus puhas ning vältida saastunud määrdeainete kasutamist ning liigset jõudu laagri tööprotsessis.



Joonis 3.9 Laagri saastumine [5]

Vesi ja keemilised aktiivsed ained põhjustavad ajapikku laagri korrodeerumise, sest määrdeomadused halvenevad. Abrasiivsete osakeste poolt saastumisele viitavad laagri kulunud pinnad. Saastumise vähendamiseks võib kasutada tihendeid ja kaitsekatted, et vähendada tolmu ja mustuse sattumist laagritele.

### 3.3.5 Ebaõige paigaldamine

Ebaõige paigaldamine võib ilmneda mitmel erineval viisil. Esiteks võib ebaõige paigaldamine hõlmata laagrite valede komponentide kasutamist või ebaõiget konfiguratsiooni, kus laagrite sisemise ja välimise rõnga vahetus võib põhjustada koormuse ebaühtlast jaotumist ning suurendada hõõrdumist ja kulumist. Samuti võib laagri ebaõige paigaldamine põhjustada pingete ja deformatsioonide teket, mis võivad omakorda põhjustada laagri purunemist. Lisaks võib hõlmata ebapiisavat ettevalmistust ja puhastustööd enne laagri paigaldamist, kus mustus, praht või jäägid võivad jääda laagri kinnitamisalale, mis võib takistada laagri stabiilset paigaldamist. Ebaõige paigaldamine võib hõlmata ka vale meetodi või tööriistade kasutamist laagrite paigaldamisel. Laagri löökidega paigaldamine või liigne jõud laagri kinnitamisel võib põhjustada laagri rõngaste deformatsiooni või pragude teket. Joonisel 3.10 on toodud võimalikud tagajärjed vale paigaldamise korral.

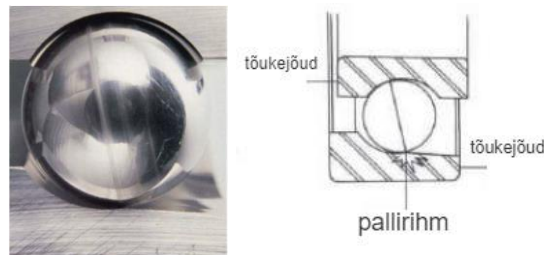


Joonis 3.10 Laagri ebaõige paigaldamine [5]

### 3.3.6 Hooletu kohtlemine

Hooletu kohtlemine võib hõlmata ülekoormamist, löökidele avatud paigaldust, ebasobivate töötingimuste kasutamist või ebatäpset hooldust, mis on kujutatud joonisel 3.11. Sellised tegevused võivad kiirendada laagrite kulumist, põhjustada määrimise puudulikkust või suurendada korrosiooni riski, mis omakorda võib viia laagririketeni ning süsteemi talitlushäireteni.

Lisaks võib hooletu kohtlemine kaasa tuua laagrite vale hoiustamise, mis võib mõjutada nende töökindlust ja vastupidavust. Näiteks laagrite ladustamine määrdeta või niisketes tingimustes võib põhjustada roostetamist ja kulumist. Samuti võib laagrite kokkupuude keemiliselt agressiivsete ainetega või äärmuslike temperatuuridega põhjustada nende varajast riknemist. Oluline on märkida, et hooletu käsitus võib vähendada laagrite tööiga oluliselt ning suurendada süsteemi hoolduskulusid.



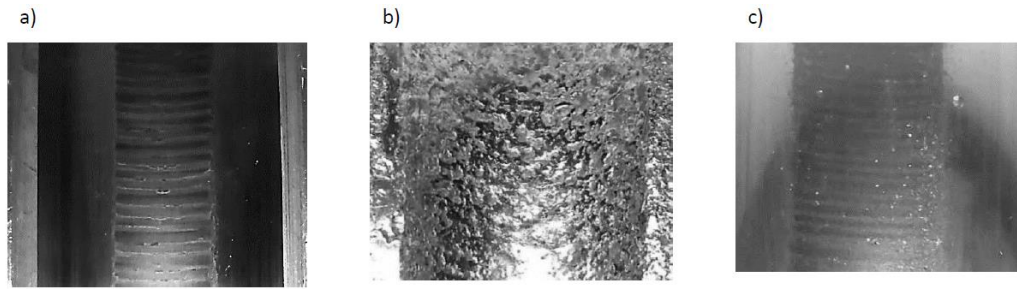
Joonis 3.11 Laagri vale hoiustamine [10]

### 3.3.7 Laagrivoolud

Laagrit mõjutavad elektrimasinates esinevad uitvoolud. Uitvoolude tagajärjel tekkinud defektid laagri pindadel eristuvad selgelt teistest tüüpilistest kahjustustest, muutes need visuaalselt kergesti tuvastatavaks. Seetõttu on soovitatav kahtlustäratavate laagriprobleemide korral, eriti suuremate ja võimsamate sagedusmuundurite juhitavate mootorite puhul, pärast laagrite demonteerimist need avada ja kontrollida nii veerekehi kui ka veerepindu [9].

Laagri pindadele uitvooludest põhjustatud kahjustuste erinevused on peamiselt seotud mootori töötingimustega. Uitvooludega põhjustatud defekte võib jagada kolme rühma [9]:

- Fluting (rööpjooned - kahjustus laagri sise- ja välispindadel);
- Frosting (frostimine - ühtlane matistumine laagri veeringil);
- Pitting (nõgusus - kahjustus laagri pinnal, tavaliselt süvendite kujul).



Joonis 3.12 Laagrivoolud: a) fluting, b) frosting, c) pitting [9]

Sageli muutuvad uitvoolude mõjul laagrite veerekehad matiks ning tekivad rööpjooned (fluting) nii laagri sise- kui ka välissaaldele. Rööpjooned ilmnevad tavaliselt juhul, kui mootor töötab suurema osa ajast ühtlasel kiirusel. Kui mootor töötab peamiselt madalatel kiirustel, tekitatakse kahjustus laagri pinnal, tavaliselt süvendite kujul (pitting). Kui aga mootor opereerib eelkõige erinevatel kiirustel, muutuvad ühtlaselt matiks ka laagri veerepinnad (frosting) samal viisil nagu kuulid.

Laagrivoolude põhjuseks võivad olla elektromagnetiline tasakaalutus, mehaaniline tasakaalutus, sagedusmuundurite olemasolu, sisemine elektrostaatika ja väline elektromagnetiline mõju. Sõltuvalt laagrite läbivoolu kontuurist võib laagrite voolusid jaotada mitmesse kategooriasse: sisemised sõlmevoolud, sisemised korpusevoolud, välised kohalikud voolud ja välised üldised voolud [10]. Pikaajalise laagrite voolu mõjul võivad ilmned mitmesugused tagajärjed. See hõlmab laagri osade, nagu rõngad ja rullikud, soojenemist, laagri õlifilmi kuumenemist ja isegi põlemist, elektrikaarte teket laagri osade vahel, laagri erosiooni, kaarekujuliste soonte teket laagri rõngaste pinnal ning laagri osade katmist õlise ladestusega [10]. Lühiajalise laagrite voolu mõjul võivad tekkida elektrilised tühjenemised, sädeme teke laagrites, laagri osade kokku liitumine, laagri rõngaste ja rullikute punktine erosioon, mustrite teke laagri osade pinnal, laagri osade kohalik soojenemine ning laagri osade ja õlifilmi mustumine ja ülekuumenemine [10].

## **4 LAAGRITÖRKETE DIAGNOSTIKA MEETODITE VÕIMALUSED**

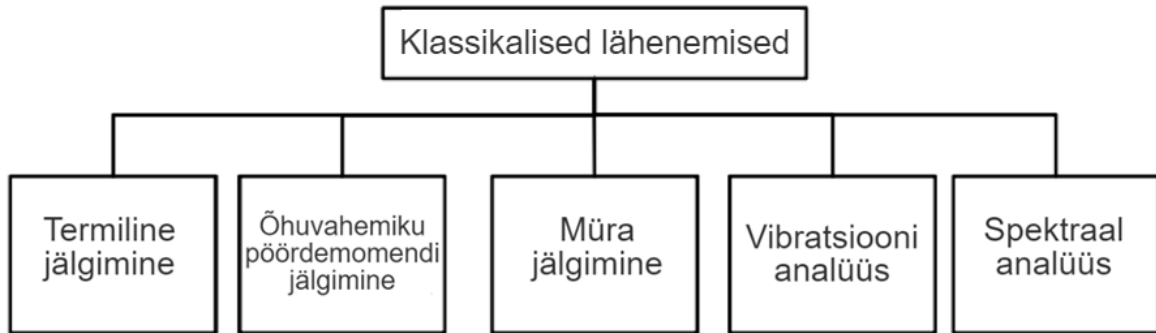
Selles peatükis analüüsitakse seisundi jälgimise ja rikke diagnoosimise võimalusi, keskendudes kasulikumatte meetodite peale. Elektromagnetilise ajamisüsteemi tervise analüüsimiseks on nii invasiivseid kui ka mitteinvasiivseid meetodeid, mida saab kasutada rikke diagnoosimiseks. Mitteinvasiivne rikete diagnoosimise meetod ei hõlma otsest kontakti jälgitava mootori ajamisüsteemiga, vaid analüüsib süsteemi käitumist ja otsib võimalikke probleeme, kasutades mõõtmisi või signaale süsteemist väljastpoolt. Invasiivsete rikke diagnoosimise meetodite hulka kuulub otsekontakt süsteemiga, et täpselt tuvastada selle puudused.

### **4.1 Klassikaliste lähenemisviiside võimalused**

Seisundi jälgimise meetodid, mis kasutavad tundlikkuse andmeid ja elektrilise allkirja analüüsi on kasulikud elektrimootori, eriti induktsioonmootori seisundi hindamiseks. Mootori voolu allkirja analüüsi kasutatakse laialdaselt standardseks lähenemisviisiks vigade tuvastamisel induktsioonmootoris, mis hõlmab voolu signatuuri uurimist ja tõlgendamist võimalike probleemide tuvastamiseks ja asukoha määramiseks mootorisüsteemis. Elektrilise allkirja analüüs kasutab mootori vooluringi analüüsi oma hindamisprotsessis, mis koosneb mitmest osast: takistus, faasi nurk, voolureaktsioon, sagedusreaktsioon ja võrreldav takistus, induktiivsus [13]. Elektriseadmete defektide tuvastamiseks kasutatakse mitmeid strateegiaid seisundi jälgimisel, näiteks mootori voolu signatuuri analüüs, pinge signatuuride analüüs, laiendatud Parki vektor, hetkvõimsuse signatuuride analüüs, seisundijärelevalve parameetrite analüüs, nagu temperatuur, häired, kiirus ja magnetvälja muutused.

Seisundi jälgimise andurid hõlmavad mitmeid erinevaid tüüpe: vibratsioonandurid, kiirendusandurid, lähedusandurid, temperatuuriandurid, vooluandurid, mikrofonid ja ultraheliandurid.

Rikke diagnoosimise protseduuride jaoks on mitu klassifikatsiooni, näiteks invasiivsed ja mitteinvasiivsed meetodid, klassikalised lähenemised, signaalitöötlus või modifitseeritud tehnikad. Joonisel 4.1 on näidatud erinevad klassikalised tehnikad rikke jälgimiseks.



Joonis 4.1 Klassikaliste lähenemiste tehnikad [14]

#### 4.1.1 Termiline jälgimine

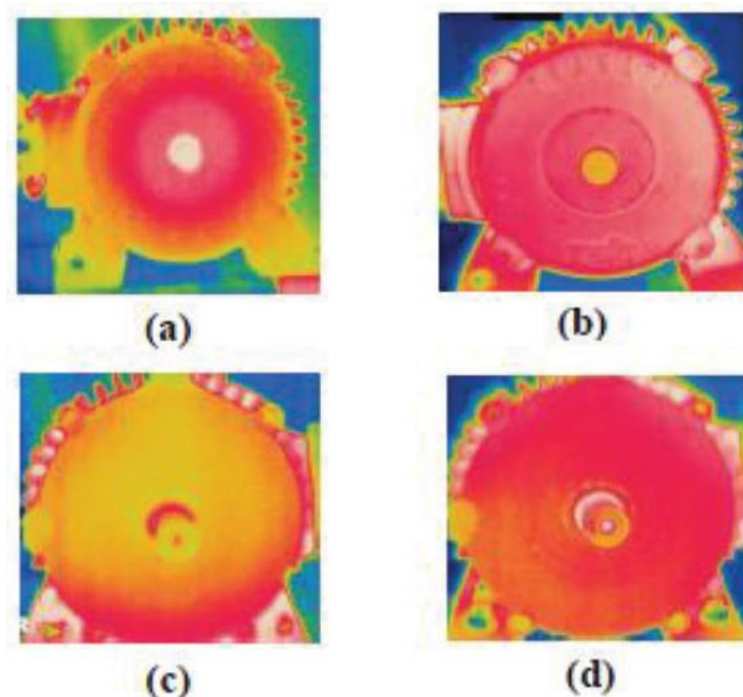
Tervise hindamisel temperatuur on kasulik näitaja. Elektriseadmete seisundit saab täpselt määrata täiustatud soojuse jälgimise tehnikate abil. Elektriseadmete termilise jälgimise täitmiseks on vajalik mootori temperatuuri mõõtmine või selle parameetri hinnang. Temperatuuride jälgimine on oluline optimaalse toimimise tagamiseks [17].

Üks peamisi meetodeid termilise jälgimise raames on temperatuuri jälgimine. See hõlmab laagrite temperatuuri pidevat mõõtmist ja jälgimist, et avastada ebanormaalseid kõikumisi, mis võivad viidata riketele. Temperatuuri jälgimist saab teostada erinevate andurite abil, näiteks termopaaride või termistoride kasutamisega, mis võimaldavad reageerida temperatuuri muutustele, mis võivad viidata riketele või muudele probleemidele. Veel üks oluline termilise jälgimise meetod on infrapunatermograafia. See meetod võimaldab laagrite temperatuuri mõõtmist mittekontaktset ja selle visualiseerimist infrapunakaameraga. Infrapunatermograafia võimaldab tuvastada temperatuurierinevusi eri piirkondades, mis võivad viidata hõõrdumisele, määrdeaine puudumisele või muudele riketele.

Kõrged temperatuurid vähendavad elektriseadmete kasulikku eluiga, hävitades nende mähise ümber oleva isolatsiooni, põhjustades elektrilisi lühiseid, kiirendades laagrite kulumist ja nõrgendades rootori püsimagneteid. Jahutussüsteemi rikked ja kõrged voolud mähises põhjustavad enamiku temperatuuri tõuse. Termilise modelleerimise peamised kategooriate hulka kuulub lõplike elementide analüüs ja punkt-paraametril põhinev modelleerimine [16].

Kuigi lõplike elementide analüüsi mudel on täpsem kui alternatiivne, on see arvutusmahukas ja aeganõudev. Termiline võrk võib olla esitatud punkt-paraametril põhineva mudelina, mis koosneb termilistest takistustest, mahtuvustest ja võimsuskadudest.

Temperatuur tõuseb külgnevates piirkondades pööre-pöörde lühisega, kuid see võib olla liiga aeglane, et riket enne selle tekkimist tuvastada. Joonisel 4.2 on näidatud termopilt erinevates tingimustes.



Joonis 4.2 Termopilt nelja tüüpi laagritingimustes (a) Puudulik määrimine (b) Sisemine defekt (c) Välisratta defekt (d) Terve [15]

Elektriseadmete tööseisundit saab reaajas hinnata termiliste vaatlusvahendite abil. Neid tehnikaid saab tõhusalt kasutada ainult sisemise isolatsiooni rikete ennetamiseks. Lisaks võivad teatud töökeskkonnad omada äärmiselt kuumi pindu, mis võivad moonutada termilise jälgimisseadmete kogutud tulemusi. Üaltoodust võib järeldada, et termilise jälgimise lähenemisviis nõuab täiendavaid ressursse.

#### 4.1.2 Õhuvahemiku pöördemomendi jälgimine

Õhuvahemiku pöördemomendi jälgimine on muutunud väärtuslikuks tehnikaks mitmesuguste tööstussüsteemide, eriti elektrimootorite ja generaatorite rikete diagnoosimise hindamisel. Õhuvahemiku pöördemomendi pideva jälgimise abil on võimalik varakult tuvastada ja diagnoosida võimalikke rikkeid. Kõrvalekalded õhuvahemiku pöördemomendi signaalis võivad viidata anomaaliatele nagu mehaanilised tasakaalustamised, nihked, laagrite kulumine või isegi mähisrühmade rikked. See lähenemine kasutab ära õhuvahemiku pöördemomendi loomulikku tundlikkust mootori tingimuste muutustele, pakkudes reaajas ja mitteinvasiivset meetodit arenevate rikete tuvastamiseks.

Tänu keerukale signaalitötlusele ja analüüsile, sealhulgas tehnikatele nagu kiire Fourier'i muundus ja mustrituvastus, saab õhuvahemiku pöördemomendi profiilist eraldada ja tõlgendada peeneid variatsioone, pakkudes väärtuslikke teadmisi mootori tervise ja võimalike probleemide kohta [18]. Õhuvahemiku pöördemomendi jälgimine oluliselt aitab kaasa vähendada seisakuaega, minimeerida operatiivseid riske ning tagada tööstussüsteemide optimaalse jõudluse ja pikaajalise töökindluse.

#### **4.1.3 Müra jälgimine**

Müra jälgimine saavutatakse müra spektrite süstemaatilise mõõtmise ja analüüsiga. Heli tekkib õhuvahemiku ekstsentrilisuse tõttu. Tavaliselt kasutatakse selle lähenemisviise induktsioonmootoris müra probleemide tuvastamiseks [18].

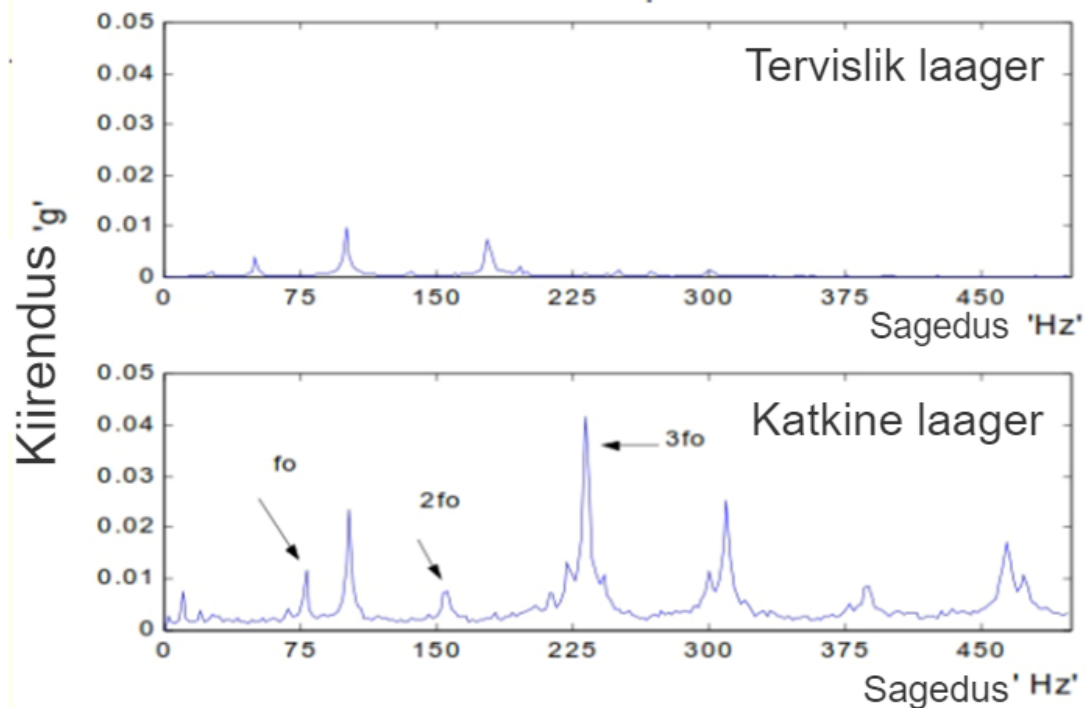
Teisest küljest masinaid tekitavad taustamüra, mis oluliselt segab probleemi tuvastada ja selle puhul see ei ole täpne meetod [18]. Õhuturbulentsus on seotud ventilatsioonimüraga ning tekib pöörlevate osade poolt põhjustatud perioodiliste õhurõhu häirete tõttu.

Müra jälgimine hõlmab mitmeid erinevaid lähenemisviise ja tehnikaid. Üks levinumaid meetodeid on akustiliste andurite kasutamine. Andurid registreerivad helilaineid erinevatest allikatest, mis võivad olla paigaldatud otse seadmetele, masinatele või asetatakse ümbruskonda, et jälgida üldist müra taset.

#### **4.1.4 Vibratsioonianalüüs**

Vibratsioon on veel üks aktiivselt kasutatav parameeter rikete diagnostikas, kus masinale paigaldatakse üks või mitu andurit ning see käivitatakse hinnangu saamiseks. Elektriseadme rikkepotentsiaali suurust on võimalik kindlaks teha selle tekitatud vibratsioonide põhjal. Sellise täpse diagnostika ja jälgimissüsteemiga saab masina seisundit ära tunda ning rikkeid vältida. Vibratsioonid elektriseadmetes võivad pärineda mitmesugustest allikatest, mis hõlmavad magnetvälju, vedelikuvoolu, tasakaalustavatust ja eriti pöörlevaid osi nagu laagrid, käigukastid või rootorid ning pöörete vahelised mähisrühmad, ühefaasilised rikked ja toitepinge tasakaalustavatus. Vibratsioonianalüüsi peamine eesmärk on süsteemi kõikumiste analüüsimine ja eraldamine määratletud vibratsioonisignatuuridest. Sagedus, amplituud ja kiirenduse aste võivad kõikuda. Tänapäeval kasutatakse mitmeid erinevaid andureid, mis võivad olla piesoelektrilised, mahtvuslikud, induktiivsed, piesotakistuslikud või deformatsioonimõõturid, sõltuvalt kasutatavast tehnikast, mis täidab eesmärgi [20].





Joonis 4.3 Sagedusspektrid terve ja defektse laagritest [19]

Diagnostikasüsteemi põhiliseks eesmärgiks on rikke põhjuse kindlakstegemine. Teisest küljest võivad vibratsiooni diagnoosimise tehnikad sageli olla ebatäpsed ja ebausaldusväärsed, mis raskendab elektririkete täpse põhjuse väljaselgitamist [24]. Vibratsiooniparameetrite kõikumised ei pruugi tingimata tõlgendada elektririkete allikat.

#### 4.1.5 Spektraalanalüüs

Sageli kasutatakse probleemide tuvastamiseks seisundi jälgimise meetodit, mida tuntakse mootori voolu signatuuranalüüsina. Mootori voolu signatuuranalüüs keskendub peamiselt rootori voolu spektraalsele uurimisele ja seda on edukalt kasutatud mitmesuguste mehaaniliste probleemide tuvastamiseks, sealhulgas kahjustatud rootori ribad, eriti suure õhuvahemiku eksentrilisus ja lühikesed pöörded staatori mähises [21]. Lisaks on mootori voolu signatuuranalüüs olnud alates 1980. aastatest edukalt katsetatud mitmesugustes tööstusharu juhtumites [22]. Mootori voolu signatuuranalüüsi peamine eesmärk on analüüsida staatori voolu, otsides voolu harmoonikute, mis on spetsiaalselt seotud uute pöörlevate voogude elementidega, mis on tingitud mootorivoo jaotuse vigadest. Arvestades selle lihtsust, on sellel tehnikal mitmeid eeliseid, mistõttu see on laialdaselt aktsepteeritud standardina. See põhineb lihtsatel signaalitötlusmeetoditel nagu kiire Fourier'i muundus ja vajab iga masina kohta ainult ühte vooluandurit.

See on peamiselt välja töötatud fikseeritud sagedusega toite, nagu elektriliselt ühendatud masinad [23]. Siiski on kiire Fourier'i muunduse rakendamine staatori voolus eriti väljakutsuv sageduse eraldusvõime, amplituudi täpsuse püsivuseta olekus ning andmete töötlemise probleemide tõttu.

Selle probleemi lahendamiseks pakutakse mitme signaali klassifitseerimise tehnikat, kasutades algoritmi, mis keskendub konkreetsele sagedusvahemikule, et eraldada signalist olulised sagedused. Seda tehnikat pole seni dünaamiliste signaalide puhul üheski juhtumis rakendatud.

#### 4.1.6 Klassikaliste lähenemisviiside võrdlev analüüs

Tabel 4.1 Klassikaliste lähenemisviiside võrdlev analüüs

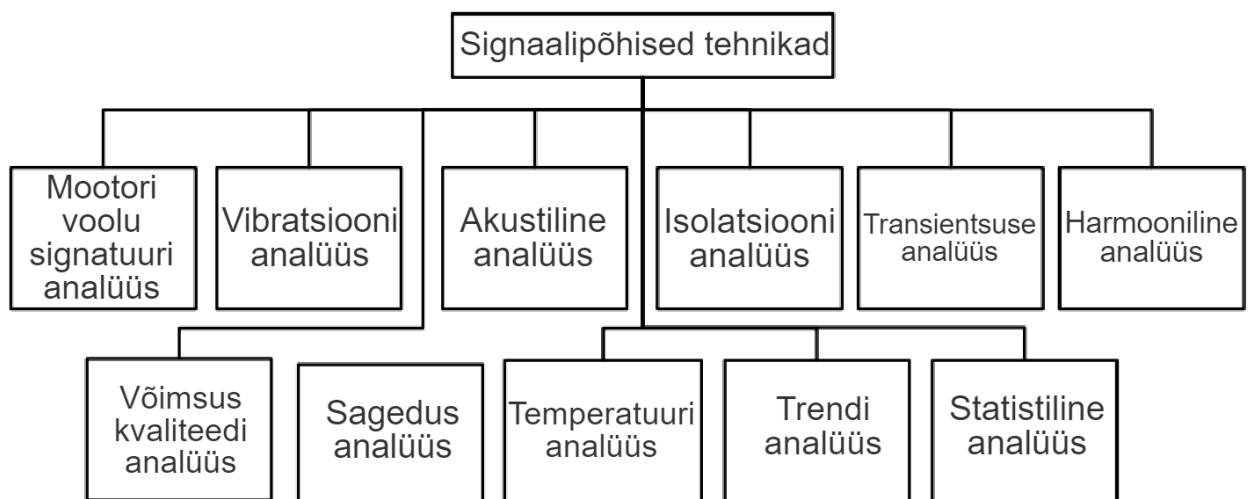
	<b>Eelised</b>	<b>Puudused</b>
<b>Terminiline jälgimine</b>	<p>Tuvastab varajased rikked; Mitteinvasiivne meetod; Tuvastab isolatsiooni lagunemise, laagri kulumise, rootori tasakaalutuse ja staatori defektid; Pakub temperatuuri pidevat jälgimist; Võimaldab planeerida hooldust.</p>	<p>Ei pruugi otsest rikke asukohta tagada; Ümbritsev temperatuur mõjutab täpsust ja müra; Andmete tõlgendamiseks on vajalik ekspertiis terminilise analüüsi valdkonnas ning masina tööparameetritega tutvumine; Andmed ei pruugi olla piisavad;</p>
<b>Õhuvahemiku pöördemomendi jälgimine</b>	<p>Tuvastab rootori ebakõla, staatori mähiste defektid, laagri kulumise ja eksentrilisuse; Ei nõua otsest kontakti ega masina seisaku aega; Tuvastab täpse rike asukohta; Tuvastab mitu riket samal ajal; Võimaldab reaajas masina seisundi jälgimist.</p>	<p>Täpseks tuvastamiseks on vaja arenenud matemaatilisi ja arvutuslikke tehnikaid; Ei kehti kõigi elektriliste masinate kohta; Kooormuse muutused ja kiiruse muutused võivad mõjutada täpsust; Võib nõuda pöördemomendi andureid või kõrgtäpseid mõõtmisi; Tulemuste analüüsimiseks on vajalik ekspertiis.</p>
<b>Müra jälgimine</b>	<p>Tuvastab ebaregulaarsed helimustrid, kõikumised; Mitteinvasiivne meetod; Tuvastab laagri kulumise, rootori tasakaalutuse, ebakõla, elektrilist sädet; Pakub akustiliste emissioonide pidevat jälgimist; Lihtne ja kulutõhus.</p>	<p>Tuvastab vigu, kuid mitte nende asukohta; Rikete tunnuste tuvastamine nõuab ekspertiisi ja kogemusi; Ümbritsev müra võib mõjutada täpsust; Andmed ei pruugi olla piisavad; Ebapiisav kalibreerimine põhjustab negatiivseid tulemusi.</p>
<b>Vibratsioonianalüüs</b>	<p>Tuvastab varajased rikked, vibratsioonimustrid; Mitteinvasiivne meetod; Tuvastab laagri kulumist, rootori tasakaalutust, ebakõla, lahtisust, elektrilist asümmeetriat ja resonantsi; Näitab masina rikke asukohti; Võimaldab vibratsioonitasemete jälgimist.</p>	<p>Hädavajalik valdkonna ekspertiis; Keskkonnamüra, häireid mõjutavad täpsust; Ei pruugi tuvastada teatud defekte; Vibratsioonianalüüsimeetodite tõlgendamiseks on vajalik ekspertiis; Vibratsioonianalüüsimiseks on vajalik täiendav varustus.</p>

<b>Spektraal analüüs</b>	<p>Tuvastab sagedust vibratsioonis, signaalides; Aitab masinarikete asukohta kindlaks teha; Hindab masinat põhjalikult; Võimaldab reaajas masina seisundi jälgimist; Võimaldab varajast defektide avastamist.</p>	<p>Hõlmab arenenud signaalitöötlust; Nõuab ekspertiisi ja kogemusi; On vaja sageduse spektre; Koormuse ja kiiruse muutused mõjutavad tulemust; Ei pruugi avastada mõningaid vigu, millel puudub unikaalne sageduslik allkiri.</p>
--------------------------	---	---

## 4.2 Signaalipõhiste lähenemisviiside võimalused

Signaalipõhiste meetodikate rakendamine seisundi jälgimise ja elektriseadmete rikke diagnoosimise valdkonnas hõlmab mitme signaali uurimist ja analüüsimist, mis on saadud nendest seadmetest. Selle analüüsi eesmärk on tuvastada võimalikud ebatavalisused, kõrvalekalded või riketele viitavad tunnused, mis võivad esineda seadmetes. Mõned levinumad signaalipõhised tehnikad on näidatud joonisel 5.2.

Need signaalid hõlmavad mitmeid parameetreid, nagu vibratsioon, vool, temperatuur ja akustilised emissioonid [23]. Signaalide põhjalik analüüs võimaldab tuvastada kõrvalekaldeid või eristatavaid rikketunnuseid, pakkudes olulisi teadmisi seadmete töökorrasoleku kohta. Signaalimustrite ja muutuste põhjalikul tõlgendamisel annavad need tehnikad võimaluse kiiresti tuvastada võimalikke probleeme, võimaldades vähendada seisakuid ning optimeerida elektriseadmete üldist usaldusväärsust ja tõhusust.



Joonis 4.4 Signaalipõhiliste lähenemisviiside tüübid [23]

Signaalipõhistes tehnikates seisundi jälgimise ja rikke diagnoosimise raames kasutatakse mitmesuguseid signaalitöötluse meetodikaid, et eraldada andurite andmete signatuurist rikete tunnuseid.

Olulised on põhi-lähenemisviisid, nagu kiire Fourier'i teisendus, lühiajaline Fourier'i teisendus, aja-sagedusanalüüs, Winger-Ville'i jaotus, waveleti muundus, Hilbert-Huang'e muundus, mitme signaali klassifikatsioon, empiirilise moodi lagunemine ja tsüklilise analüüs.

Kiire Fourier'i teisendus ja lühiajaline Fourier'i teisendus on sagedusspektri analüüsiks kõige levinumad signaalitööstustehnikad, et jälgida andurite andmete signatuuris rikke sagedust [25].

Waveleti muundus pakub mitme resolutsioonitasandi analüüsi, avastades peidetud tunnuseid erinevatel skaaladel nii ajas kui ka sagedusaladel [29]. Empiirilise moodi lagunemine lahkab signaalid sisemisteks moodifunktsioonideks, hõlbustades keerukate ja mittestatsionaarsete rikketüüpide tuvastamist. Tsükliline analüüs kasutab signaalides tsüklilisi omadusi, tuvastades tõhusalt tsüklilised komponendid, mis on seotud konkreetsete rikketüüpidega. Nende edasijõudnud signaalitööstustehnikate kogumi kasutamisega saavutavad seisundi jälgimine ja rikke diagnoosimine põhjaliku arusaamise masina käitumisest, võimaldades varajast avastamist ja täpset diagnoosi tuvastamist.

#### 4.2.1 Kiire Fourier' teisendus

Aja domeenis sageduse elemendi arvutamiseks on lihtsaim põhiline matemaatiline meetod diskreetne Fourier'i teisendus (DFT). Viimasel ajal tehnoloogiate rakendamisel antud meetod on juba ebaefektiivne. Kui diskreetse Fourier'i teisenduse punktide arv läheneb sadadele või tuhandetele vajalik arvutuste hulk suureneb. Selle algoritmi täiustatud nimetus on Kiire Fourier'i teisendus, mis on lihtsalt tehnik, et määrata arvutuslikult efektiivne diskreetne Fourier'i teisendus [30].

Kiire Fourier'i teisendus vähendab oluliselt vajalikku arvutuste hulka, kasutades korrutatavate siinuste tsükleid teisendamiseks ja funktsionaalsuse osas jagab kiire Fourier'i teisendus suure andmekogumi mitmeks väiksemaks andmekogumiks, peale selle jagab ta need väiksemad kogumid veelgi väiksemateks [30]. Iga eelneva etapi töötlemistulemused segatakse ainulaadselt igal etapil. Seejärel arvutab ta iga väikese andmekogumi diskreetse Fourier'i teisendusega. Kiire Fourier'i teisenduse algoritmi saab kasutada erinevat tüüpi mootoririkete leidmiseks.

Diskreetne Fourier'i teisendus [26]:

$$DFT X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4.1)$$

See valem annab diskreetse Fourier'i teisenduse tulemuse iga sageduse komponendi kohta, alates sagedusest  $k = 0$  kuni  $k = N - 1$ .

### 4.2.2 Lühiajaline Fourier'i teisendus

Aja informatsioon kaob sagedusalaste lähenemiste kasutamisel ja harmooniate eristamine võib mõnikord olla ebatäpne, mille tulemusel on välja töötatud erinevad aja-sagedusanalüüsi meetodid, millel on omad eelised ja puudused [31].

Lühiajaline Fourier'i teisendus (STFT) on täiustatud versioon algsest kiire Fourier'i teisendusest, mis teostab aja-sagedusanalüüsi, jagades signaali diskreetseteks ajaintervallideks erinevate kujude ja suurustega, nagu näiteks ristkülikud, Hammingi aknad, Hanni aknad, Gausi aknad jne [31].

Lühiajaline Fourier'i teisendus [27]:

$$STFT X[n, k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \omega[n - mH] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4.2)$$

Ülaltoodud võrrandis tähistab  $\omega$  ( $n$ ) aknafunktsiooni,  $k$  on sagedusindeks,  $N$  on kiire Fourier'i teisenduse punktide arv, ja  $m$  tähistab akna asukohta ning  $H$  kahe akna vahelist kaugust.

See tehnika aitab hakkama saada mitte-lineaarsete ja keerukate signaalidega. Nii ajas kui ka sageduses resolutsioon sõltub valitud aknast. Ajaakna suurus  $H$  fikseeritud, mistõttu on resolutsioon sama kogu aja ja sageduse vahemikus.

### 4.2.3 Wigner–Ville'i jaotus

Wigner–Ville'i jaotus on aja-sagedusanalüüsi meetod, mis võimaldab uurida signaali aja ja sageduse omavahelist seost ning tuvastada signaali muutuvaid sageduskomponente. See meetod pakub üksikasjalikumat teavet signaali ajalise struktuuri kohta võrreldes klassikalise spektraalanalüüsiga, näiteks Fourier'i teisendusega [31].

Wigner–Ville'i jaotus [28]:

$$WVD X[n, k] = \sum_{m=-N}^N x \left[ n + \frac{m}{2} \right] x^* \left[ n - \frac{m}{2} \right] e^{-j\frac{2\pi}{N}km} \quad (4.3)$$

Ülaltoodud võrrandis tähistab  $x(n)$  sisendsignaali,  $m$  on viivise muutuja,  $x^*(n)$  tähistab signaali komplekskonjugaati.

#### 4.2.4 Wavelet teisendus

Wavelet transformatsioonid on matemaatilised tööriistad andmete analüüsimiseks, kus tunnused varieeruvad erinevatel skaaladel. Signaalide puhul võivad tunnused olla sagedused, mis muutuvad ajas, lühiajalised transientsed või aeglaselt muutuvad trendid. Piltide puhul hõlmavad tunnused servad ja tekstuurid. Wavelet transformatsioonid loodi peamiselt, et lahendada Fourier'i transformatsiooni piiranguid [29].

Funktsioonid on konstrueeritud tõlgetest ja suuruse muutustest ühest funktsioonist, mida nimetatakse "emalaineletiks"  $\psi(t)$ . Kui signaali  $x(t)$  on  $v0$  (ajahetkel  $t = 0$ ), siis signaali  $x(t)$  keskmine sagedus saab arvutada kasutades järgmist valemit [29]:

$$W[a, b] = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{t=0}^{N-1} x[t] \psi^* \left[ \frac{t-b}{a} \right] \quad (4.4)$$

Wavelet'i teisenduse signaali arvutamiseks on kaks erinevat meetodit: diskreetne wavelet teisendus ja pidev wavelet teisendus. Diskreetne meetod kasutab sageli madalpääs- ja kõrgpääs-laine filtreid, kus skaalategur 'a' on kahe astmega. Kuna konvolutsiooniprotsessi Fourier'i teisendus on vastava sagedusalas olevate Fourier'i teisenduse korrutis, on pidevas wavelet teisenduses skaalateguri 'a' faktor vabalt valitav ja seda saab arvutada otse, kasutades konvolutsiooniteoreemi [32].

Hoolimata nende sarnasustest, pakub Wavelet'i teisendus paremat ajalist lokaliseerimist kõrgetel sagedustel ja viib analüüsini pideva protsendi. Wavelet teisendus laialdaselt kasutusel elektrimasina tervise jälgimiseks ja diagnoosimiseks tänu paremale jõudlusele mittestatsionaarsete signaalide korral ja ajasagedusanalüüsi kohanemisvõimele [32].

#### 4.2.5 Empiirilise moodi lagunemine

Empiiriline moodi lagunemine on signaalitöötamise tehnik, mis on tõusnud esile seisundi jälgimise ja vea diagnoosimise valdkonnas, mis sobib eriti hästi mittestatsionaarsete ja keerukate signaalide analüüsiks, muutes selle väärtuslikuks tundlike vigade ja anomaaliade avastamiseks erinevates süsteemides, sealhulgas masinates ja mehaanilistes komponentides [33].

Põhialus seisneb signaali jagamises intrinsiilseteks moodfunktsioonideks läbi kohanduva iteratiivse protsessi. Iga intrinsiilsene moodfunktsioon esindab originaalsignaali kohalikku võnkumise või lihtsat komponenti, mis esile tõstab erinevaid mustrid seotud erinevate rikke režiimidega. Need intrinsiilsed moodfunktsioonid saadakse signaali äärmuskohtade tuvastamise ja kasutades kuubispliini interpolatsiooni, et luua ümbriseid, mis hõlmavad andmepunkte. Protsess jätkub kuni sobiva lõpetamiskriteeriumi täitmiseni [18].

#### 4.2.6 Tsüklilise statistika analüüs

Tsüklilise statistika analüüs on keerukas signaalitöötamise tehnik, millel on olulised rakendused seisundi jälgimises ja vea diagnoosimises.

See lähenemine on eriti võimeline tuvastama tsüklilisi signaalmustreid masinate ja mehaaniliste süsteemide puhul, mis sageli ilmutavad perioodilisi või tsüklilisi käitumisi seotud erinevate vigade ja anomaaliatega [34].

Tsüklilise statistika analüüs keskendub tsüklilistele omadustele, mis esinevad signaali sagedusdomeenis, erinevalt traditsioonilistest Fourier'i-põhistest tehnikatest, mis eeldavad statsionaarsust, arvestab analüüs tsüklilisust [18]. Arvutab tsüklilisi autokorrelatsioone ja spektreid, mis pakuvad väärtuslikke teadmisi signaali tsüklilise käitumise kohta ajas, võimaldades avastada modulatsioonisagedusi ja perioodilisi variatsioone, mis on seotud konkreetsete veatüüpidega.

#### 4.2.7 Signaalipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs

Tabel 4.2 Signaalipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs

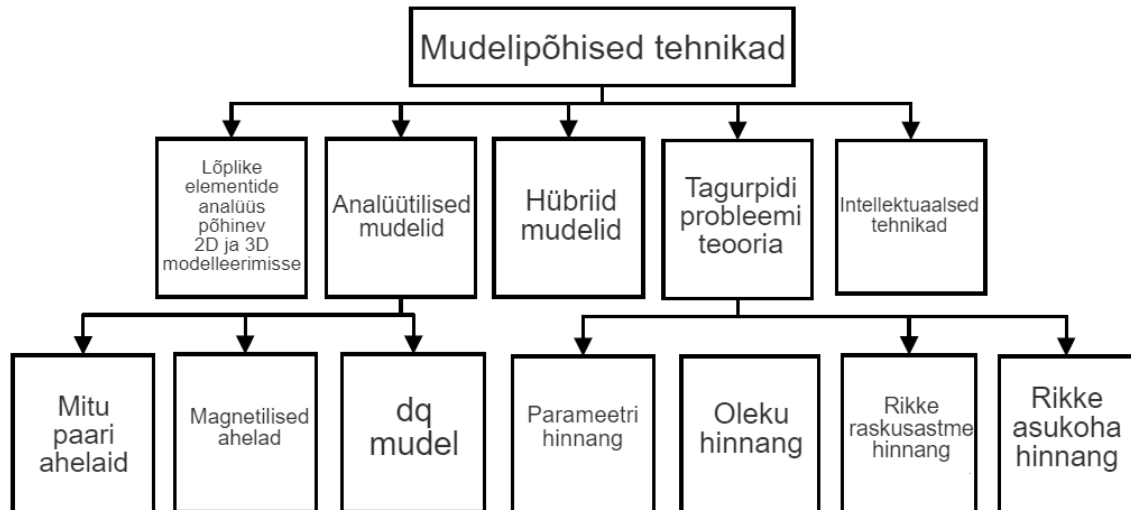
	Eelised	Puudused
<b>Kiire Fourier' teisendus</b>	Tuvastab veale iseloomulikud sagedused või harmoonikud; Arvutuslikult efektiivne; Kiiresti arvutab sagedusspektri; Pakub signaalist sagedusalast esindust; Lihtne visuaalne võrdlus tervete ja vigaste sageduste vahel.	Ajadomeeni eraldusvõime piirang; Aknafunktsioonide kasutamine mõjutab tulemust; Oluliselt keerukam mitme rikke stsenaariumi korral; Ebatäpsed sagedusesitused.
<b>Lühiajaline Fourier'i teisendus</b>	Võimaldab lühiajaliste sündmuste ja ajas muutuvate käitumiste avastamist; Pakub paremat ajalist eraldusvõimet; Analüüsib nii kõrgeid kui ka madalaid sageduskomponente; Võimaldab sageduskomponentide visuaalset esindust; Hea võrdlus spektrogramide vahel.	Piirang akna suuruse valikul; Kunstlikud moonutused nagu spektri leke ja kõrvalehed; Tundlik müra suhtes; Kõrge arvutuslik koormus; Kõrge lahutusvõime analüüsides korral;

<b>Wigner–Ville'i jaotus</b>	Võimaldab täpset sagedussisu lokaliseerimist; Pakub hea kujutise ajas muutuvast käitumisest; Eraldab sageduskomponente efektiivsemalt; Tuvastab ristteid ajasagedusanalüüsis; Hindab signaalide hetkelist sagedust täpselt.	Arvutusmahukas; Tundlik mürale; Teabe väljavõtmine maatriksist on keeruline; Nõuab palju oskusi signaalialalüüsis ja veadiagnoosimises.
<b>Wavelet teisendus</b>	Lai analüüs; Kõrge- madalasageduslike komponentide analüüs; Tuvastab ajalised ja sageduslikud omadused; Pakub adaptiivset analüüsi.	Keeruline valida õiged parameetrit; Keeruline tõlgendada mitmeid rikked; Arvutuslikult nõudlik; Vajalikud kõrged arvutusnõuded
<b>Empiirilise moodi lagunemine</b>	Sobib keerukate signaalide analüüsiks; Pakub andmepõhist tunnuste eraldamist; Adaptiivne lagunemine püüab kinni mitte-lineaarsed suundumused.	Esineb moodide segunemist; Keeruline tõlgendada; Tundlikkus müra suhtes.
<b>Tsüklilise statistika analüüs</b>	Võib tuvastada hammasrataste kulumine, tasakaalustamise; Efektiivne vea tuvastamine; Võimaldab täpsemat vea klassifitseerimist ja diferentseerimist.	Hõlmab keerukaid matemaatilisi operatsioone; Jõudlus sõltub signaali-müra suhtest; Arvutuslikult nõudlik.

### 4.3 Mudelipõhiliste lähenemisviiside võimalused

Mudelipõhiste meetodikate rakendamine elektriseadmete seisundi jälgimise ja rikke diagnoosimise valdkonnas tugineb matemaatiliste mudelite rakendamisele mootori jõudluse hindamiseks ning oluliste probleemide või kõrvalekallete tuvastamiseks kehtestatud töökriteeriumidest. Analüütilised mudelid, lõplike elementide analüüs, signaalitöötlus, magnetilised ahelad, oleku hinnang, tehisintellekt, hübriid mudelid ja masinõpe on peamised mudelipõhised tehnikad, mida kasutatakse rikke diagnoosimisel, nagu näidatud joonisel 4.5. Mudelipõhised tehnikad pakuvad märkimisväärseid eeliseid elektriseadmete seisundi jälgimise ja rikke diagnoosimise osas. Eelmainitud kategooriaid saab rakendada ka tehisintellekti tehnikate kontekstis, mida kasutatakse diagnostilistel eesmärkidel. Ennustava hoolduse rakendamine tehisintellekti abil nõuab inimese intellekti integreerimist masinõppe tehnikatega, eelkõige algoritmide koolitamist masinarikete diagnoosimise eesmärgil [18].





Joonis 4.5 Mudelipõhiliste lähenemisviiside tüübid [35]

### 4.3.1 Mitmekordne ahelate mudel

Mitmekordne ahelate mudel on elektriline ahelatüüp, mis töötab eeldusel, et staatori ja rootori induktiivsus on omavahel seotud. Vastupidiselt sellele toimib iga elemendi vool iseseisvalt. Mähiste funktsioonil põhinev lähenemine, mis on üks enim kasutatavaid meetodeid staatori ja rootori ahelate enese- ja vastastikuste induktiivsuste hindamiseks, on üks paljudest meetoditest, mida tehnilises kirjanduses pakutakse [23]. See meetod integreerib mähiste funktsioone faasi induktiivsuse tootmiseks, mis nõuab keeruliste integraalide lahendamist protsessi käigus. See kehtib eriti juhulike mähistega jaotuste korral, mis suurendab tööaega.

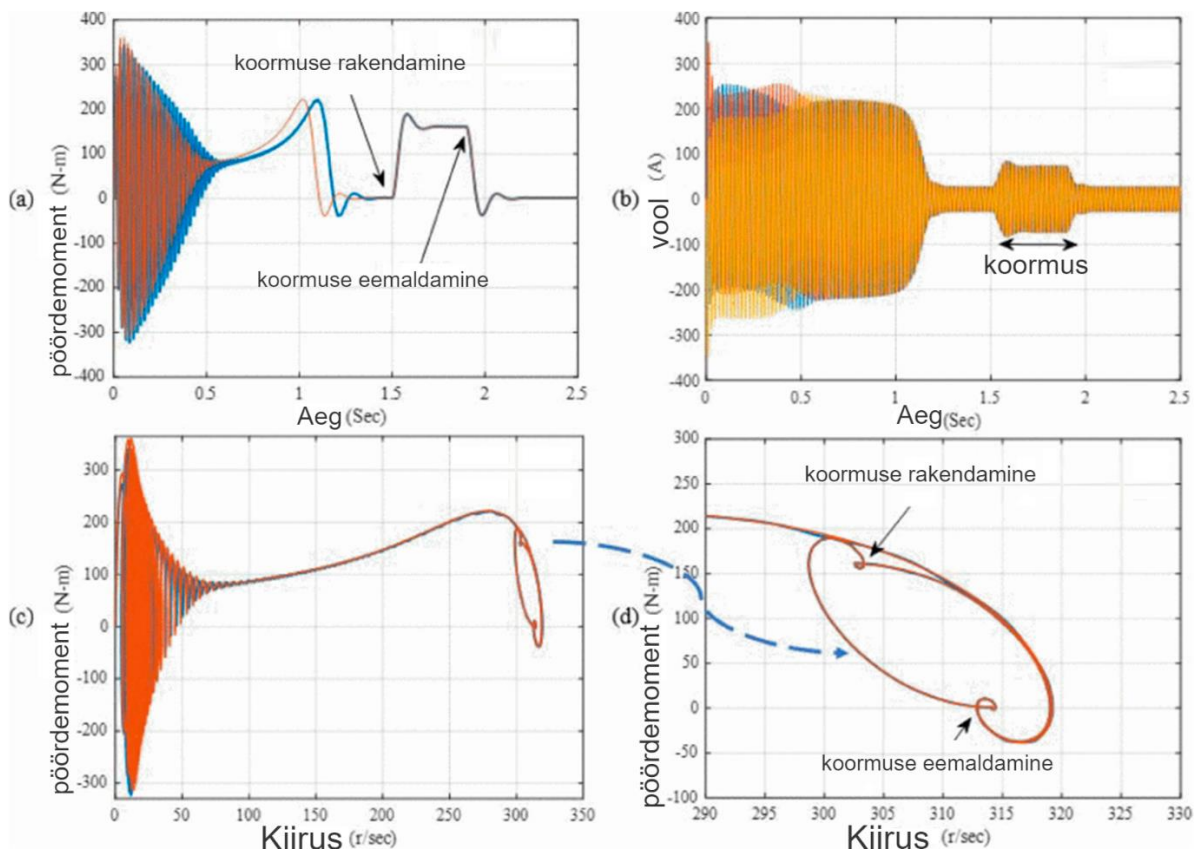
Mitmekordse ahelate mudeli eeliseks on võime anda üksikasjalikumat teavet süsteemi toimimise kohta, võrreldes traditsiooniliste empiiriliste meetoditega, mis võimaldab analüüsida süsteemi käitumist erinevates töörežiimides ja tingimustes, mis aitab avastada võimalikke vigu või defekte. Lisaks võimaldab süsteemi simulatsiooni, millega saab virtuaalselt katsetada erinevaid stsenaariume ja valida optimaalseid parandusmeetmeid [35].

### 4.3.2 d-q mudel

d-q modelleerimismeetod on üks populaarsemaid meetodeid induksioonmootorite modelleerimiseks, mis on välja töötatud, et muuta mitmekordse ahelate mudeleid lihtsamini mõistetavaks. Clarki ja Parki teisendused loovad need mudelid, kombineerides pingeid ja voolusid risti kulgevate teedena. d-q viiteraamis kirjutatakse masina võrrandid keerulistes d-q muutujates [18]. Teisest küljest see ei ole kõige parem meetod vigade diagnoosimiseks, kuna vigase masina testimiseks tuleb teha iga vigase mudeli jaoks katse.

See tähendab, et laia valiku rikete mudelite loomiseks vajalikke hävitava katsetamiseks on vaja raha, et luua vigade diagnoosimise tehnikaid ja seisundi jälgimise süsteeme.

Kasutades dünaamilist d-q mudelit, saab uurida mootori toimimist stabiilses olekus ja ajutistes töörežiimides. Staatori ja rootori parameetrite teisendamine ühisesse võrdlusraami vähendab mudeli keerukust. Joonisel 4.6 kujutatakse mootori jõudlust pöördemomendi, kiiruse ja tegelike kolmefaasiliste vooludena. Joonisel 4.6 a) on näha mootori elektromagnetiliselt indutseeritud pöördemomenti, nagu seda jälgitakse lineaarsetes ja mitte-lineaarsetes mudelites. Tulemuste võrdlus ei näita olulist erinevust, välja arvatud arveldusaeg. See võib olla tingitud asjaolust, et mitte-lineaarne induktiivsuse mudel arvutab oma häälestusparameetrid, kasutades Simulink mudeli voogu [18].



Joonis 4.6 a) Loodud pöördemoment, b) Kolmefaasiline staatori voolud, c) Kiirus-pöördemomendi kõver, d) Suurendatud kiirus-pöördemomendi kõver [18]

Mõlemad tulemused kattuvad mootori töötamisel tema lineaarses piirkonnas. See tähelepanek näitab, et eelpool mainitud mudelit rakendatakse masinate ajamite riistvarasilmuses [18]. Joonisel 4.6 b) kujutatakse tegelikku kolmefaasilist masina voolu, mis saadakse staatori voolude teisendamisel pöörlevast võrdlusraamist tagasi staatilisse võrdlusraami.

Mootori kiiruse pöördemomendi kõver on näidatud joonistel 4.6 c) ja d), muutes lihtsaks koormuse lisamise või eemaldamise mõju mootori kiirusele ja pöördemomendile analüüsimise. Need simulatsioonid eeldavad ideaalseid tingimusi, ignoreerides detailid nagu küllastus, pilude paigutus ja staatori ning rootori mähistike jaotus [18]. Kuigi need sümmeetrilised mudelid vähendavad arvutusaega ja on seega kasulikud ajamisüsteemidele, ei sobi need vigade diagnoosimiseks, kuna vigu ei saa simuleerida.

### **4.3.3 Magnetahelate mudel**

Magnetahelal põhinevad ekvivalentsmudelid tuginevad spetsiifilisele magnetilisele modelleerimisele, saades masina kujunduse magnetiliste takistuste ja püsivuse esindamise kaudu, võrreldes magnetahela lähenemisega, mis põhineb vastavatel elektriahelatel. Magnetahela mudelis on kõik staatori hambad ühendatud kõigi rootori hammastega ja vastupidi [36]. Selle mudeli põhiline probleem on õhuvahede läbitavus, mida mõjutab staatori ja rootori hammaste ümber olev äär, mille lahendamiseks läbitavuse jagatakse järgmisse kategooriasse: mittesidusus, osaliselt kattuv, osaliselt konstantne ja konstantne. Töötatakse välja magnetahelal põhinev mudel, mis võimaldab induktsioonmootorite reaajas simuleerimist, mida saavutatakse läbitavuste defineerimisega magnetiliste skalaarpotentsiaalide mitte-lineaarsete funktsioonidena, mis on mõjutatud raua küllastumisest [36]. Selle tulemusel lühenevad tavaliselt vajalikud pikad simulatsiooniajad ning mudelit saab kasutada riistvara-silmus testimise keskkonnas. Mis puudutab ekstsentrilisust, siis magnetahela mudeli konstrueerimisel ekstsentrik rootori asenditega seotud mõjud, kasutades muudetud valemit õhuvahede läbitavuse jaoks. Sellised õhuvahede läbitavused näitavad läbitavust, mis varieerub ühtlaselt rootori pöörlemise tulemusel.

Magnetahela põhine tehnika näitab mõistlikku täpsust võimekuses ennustada masina jõudlust erinevates tööpunktidest ja koormussituatsioonides, sealhulgas tasakaalustamata erutuse ja defektsete tingimuste korral.

### **4.3.4 Lõplike elementide mudel**

Magnetmaterjalide mitte-lineaarsed omadused ja riskid, mis tulenevad ebapiisavatest ennustustest mähise kujunduse ja paigutuse osas, on sundinud välja töötama tehnikaid, mis suudavad neid tegureid arvesse võtta. Kõike seda arvesse võttes saab induktsioonmasina jõudlust kindlalt taastada numbriliste tehnikate abil, mis põhinevad lõplike elementide meetodil või piirimõõtmete meetodil [37].

Lõplike elementide meetod on numbriline meetod mis võimaldab tuvastada defektid mootorites. Masina magnetvälja jaotus arvutatakse masina spetsiifiliste magnetiliste ja geomeetriliste omaduste abil.

Induktsioonmasina magnetvälja jaotusest saab määrata masina staatori, rootori ja muud liikuvad elemendid [38]. Kui masina matemaatiline mudel on täpne, siis saab masinat kavandada ja juhtida suurema täpsusega.

Arvutusvõimsuse suurenedes muutub lõplike elementide mudel tavalisemaks modelleerimise ja simulatsiooni valdkonnas, kuna mudel arvestab iga võimaliku parameetriga, pakkudes täpseid esitusi reaalmaailma süsteemidest, kuid selleks on vaja keerukust ja pikka arvutusaega.

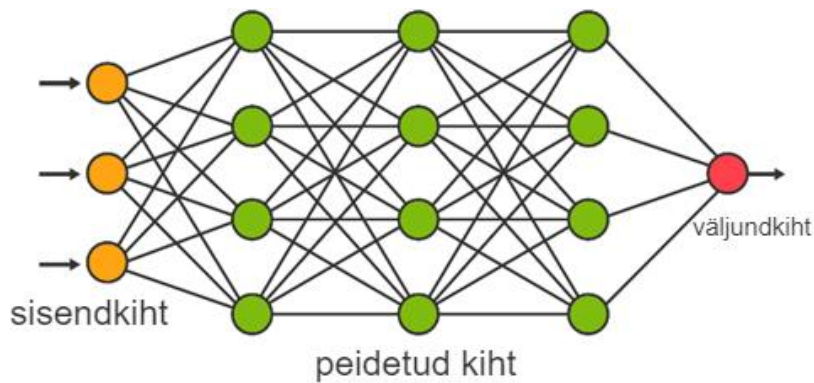
#### **4.3.5 Hübriid mudel**

Kuigi lõplike elementide modelleerimine on äärmiselt täpne, on see võrreldes analüütiliste meetoditega arvutusmahukas ja aeganõudev mudel. Siiski teevad analüütilised mudelid tavaliselt lihtsustusi, mis vähendavad nende täpsust ja muudavad need ebatäpseks defektide diagnoosimisel [35]. Selle probleemi lahendamiseks ühendatakse lõplike elementide ja analüütiliste lähenemiste võimalused, et luua mudeleid, mis on lõplike elementide tasemel täpsed, kuid mida saab teostada reaalajas simulatsioonides.

#### **4.3.6 Kunstlik neuronaalne võrk**

Elektroenergeetika valdkonnas on kunstlikud närvivõrgud hästi tuntud tehisintellekti lähenemisviis, mis meenutab inimese aju struktuuri kasutades lihtsaid aritmeetikablokke, mis on omavahel ühendatud oskuslikult kujundatud kihtidega [40]. Tehisintellekt pakub mitme sisendi ja väljundi visualiseerimist ning kirjeldab võrrandeid olulise mittelineaarsusega. See metodika on leidnud märkimisväärset rakendust masina seisundi jälgimises, sealhulgas defektide tuvastamisel.

See on võimas tehnik, mis võimaldab elektriliste pöörlevate mootorite ja seadmete jäävate tööeluiga täpsemat hindamist ja prognoosimist. Induktsioonmootorite ja elektriseadmete operatiivse tervise diagnoosimiseks, masinõpe lähenemised sobivad paremini, kuna võimaldavad suurte hulka andmeid koguda.



Joonis 4.7 Tehisintellekti põhistruktuur [39]

### 4.3.7 Hägusloogika

Hägusloogika on algoritm, mille puhul antakse tõeväärtusele tõenäosuslik hinnang, mis on tõhusalt rakendatud mitmesugustes energiasüsteemide juhtimise rakendustes. Nii masinõpe kui ka hägusloogika võib pidada tehisintellekti harudeks, mille rakendamise peamine eesmärk on ennetava hoolduse tähtsuse maksimeerimine esmaste piiride raames [41]. Hägusloogikat saab määratleda tavalisemate tõeväärtuste kontekstis, näiteks tõene ja väär ning jah ja ei.

### 4.3.8 Tugivektormasin

Tugivektormasin on masinõppe algoritm, mis sobib klassifitseerimiseks ja regressiooniülesanneteks. Tugivektormasinad suudavad käsitleda nii lineaarseid kui ka mittelineaarseid klassifitseerimisprobleeme, keskendudes andmete optimaalsele eraldamisele, et luua nende vahele maksimaalne piir. Mittelineaarse klassifitseerimise jaoks kasutatakse kerneli meetodit, mis töötab sarnaselt lineaarsetele algoritmidele, kuid võimaldab andmekogumite asendamist [42].

Tugivektormasinaid peetakse sageli optimaalseks valikuks, kui andmekogumite kohta on vähe esialgset teavet, mis nõuavad täpsete tulemuste saamiseks vähem arvutusvõimsust võrreldes teiste algoritmidega. Siiski võib suurte andmekogumite töötlemine võtta palju aega, ning mittelineaarsete protsessidega tegelemine võib osutuda keeruliseks.

### 4.3.9 Mudelipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs

Tabel 4.3 Mudelipõhiliste lähenemisviiside võrdlev analüüs

	<b>Eelised</b>	<b>Puudused</b>
<b>Mitmekordne ahelate mudel</b>	<p>Pakub täpset esitust; Võimaldab tugevat tuvastamist; Püüab kinni sidumise mõjud ja koostoimed erinevate komponentide vahel.</p>	<p>Kompleksne ja arvutusmahukas; Täpsus sõltub seotud ahelate mudelite täpsusest; Aeganõudev ja töömahukas.</p>
<b>d-q mudel</b>	<p>Muudab kolmefaasilised suurused kaheksakordseks süsteemiks; Tuvastab riketega seotud nähtusi; Analüüsib nende mõjusid masina tööle; Võimaldab analüüsida d-q komponentide muutusi; Võimalik reaalajas jõudluse jälgimist.</p>	<p>Tugineb mitmele eeldusele ja lihtsustusele; Keskendub ainult elektririketele ja nähtustele; Mõjutab diagnostilist täpsust; Kõrge arvutusliku keerukusega.</p>
<b>Magnetahelate mudel</b>	<p>Analüüsib staatori mähised, rootori südamikud ja magnetmaterjalid; Tuvastab rootori asümmeetria, staatori mähistevahelised vead, katkised rootori ribad ja magnetküllastus; Ei vaja lisa andureid; Võimaldab mudeli valideerimist.</p>	<p>Kompleksne ja nõuab masina geomeetria arusaamist; Täpsus sõltub parameetrite hindamisest; Nõuab märkimisväärseid arvutusressursse; Piirangud teatud vigade diagnoosimisel.</p>
<b>Lõplike elementide mudel</b>	<p>Pakub täpset modelleerimist; Võib simuleerida palju rikkeolukordi; Võimaldab masina sisu ülevaadata; Võimalik disaini optimeerida.</p>	<p>Arvutusmahukas; Nõuab masina geomeetria arusaamist; Aeganõudev ja nõuab valdkonna ekspertiisi; Täpsus sõltub arvutusvõrgu kvaliteedist.</p>
<b>Hübriid mudel</b>	<p>Põhjalik hinnang terviseseisundist; Kasutab erinevate tehnikate teavet; Suur rikete taluvus; Tugev rikete diagnoos.</p>	<p>Keeruline integreerida; Põhjustab väljakutseid; Nõuab valdkonna ekspertiisi; Nõuab lisavarustuse.</p>
<b>Kunstlik neuroonaalne võrk</b>	<p>Võimeline efektiivselt modelleerima; Suudab kohaneda ja õppida uutest andmetest; Omab teatud määral viga taluvust; Suudab töödelda andmetes esinevat müra.</p>	<p>Nõuab märkimisväärset kogust andmeid; Üleõppimise risk; Arvutuslikult keeruline; Vajadus tasakaalu järele üle- ja alakohandatud andmete vahel.</p>

<b>Hägasloogika</b>	<p>Võimaldab ekspertteadmiste integreerimist; Lubab lingvistiliste terminite ja hägasate hulkade esitamist; Tugev mürade ja ebaselguste suhtes; Olemuslikult tõlgendatav; Lihtne struktuur.</p>	<p>Nõuab sobivate hägasate reeglite; Keeruline süsteem; Probleemid keerukate järelaluskeemidega; Reaktsiooniaeg.</p>
<b>Tugivektormasin</b>	<p>Usaldusväärne; Vajab vähem arvutusvõimsust; Suudavad tõhusalt töödelda mitte-lineaarseid seoseid.</p>	<p>Tugineb peamiselt hüperparameetrite; Võib olla raske tõlgendada; Arvutusmahukas;</p>

## 5 VIBRATSIOONISIGNAALIDE ANALÜÜS

Praktilises osas analüüsitakse nii tervislikke kui ka kahjustatud laagrite signaale, kasutades Dewetron OXYGEN mõõtmistarkvara. See spetsialiseeritud tarkvara võimaldab mitmekülgseid mõõtmisi ja andmete analüüsi mitmesuguste füüsikaliste suuruste kohta, nagu vibratsioon, temperatuur, surve jne. Tarkvara võimaldab koguda andmeid erinevatest allikatest, teostada põhjalikku signaalianalüüsi, visualiseerida tulemusi graafiliselt ning eksportida neid erinevatesse formaatidesse edasiseks töötlemiseks või aruandluseks.

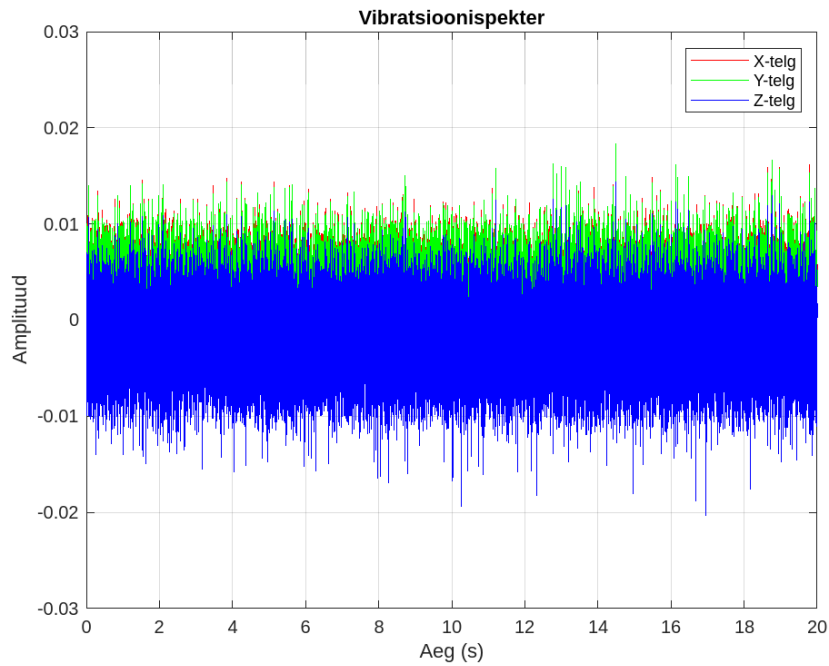
### 5.1 Vibratsioonispektri analüüs

Signaali töötlemiseks kasutatakse MATLAB tarkvara. Rull-laagri töötamise ajal on välimine rõngas ühendatud laagrivõru või laagrikasti külge, mis on fikseeritud, ning sisemine rõngas on ühendatud mehaanilise ülekande võlliga, mis pöörleb koos võlliga. Pinnakahjustuste korral tekib vigastatud kohtade üle rulliva laagriskorvi pindade impulsijõud. Jõud on lai sagedusala signaal ja see hõlmab iga laagrisüsteemi looduslikku sagedust, mille tagajärjel tekib laagri vibratsioon, mis on vigastuse tõttu tekkinud vibratsioonisignaali põhiline omadus. Kui vigastus esineb sisemises rõngas, välises rõngas, rullikehas või puuris, tekib tööprotsessis perioodiline mõju tõttu vibratsioon. See tähendab, et laagri kahjustus kajastub vibratsioonisignaalides teatud laagri iseloomuliku sagedusega ning see pakub olulist näitajat laagri rikke diagnoosimisel.

MATLAB tarkvaras sai kirjutatud kood, mis laeb andmed failist, mis sisaldab vibratsiooniandmeid. Eraldab signaalid kolme telje jaoks ja määrab ajaandmed. Kokkuvõtteks kuvatakse selles koodis kolme telje (x, y ja z) vibratsioonisignaali ühes graafikus, võimaldades neid võrrelda ja analüüsida.

Joonisel 5.1 kuvatakse vibratsioonispekter, mis hõlmab tervislikku laagri signaali 0% mootori koormatusega.

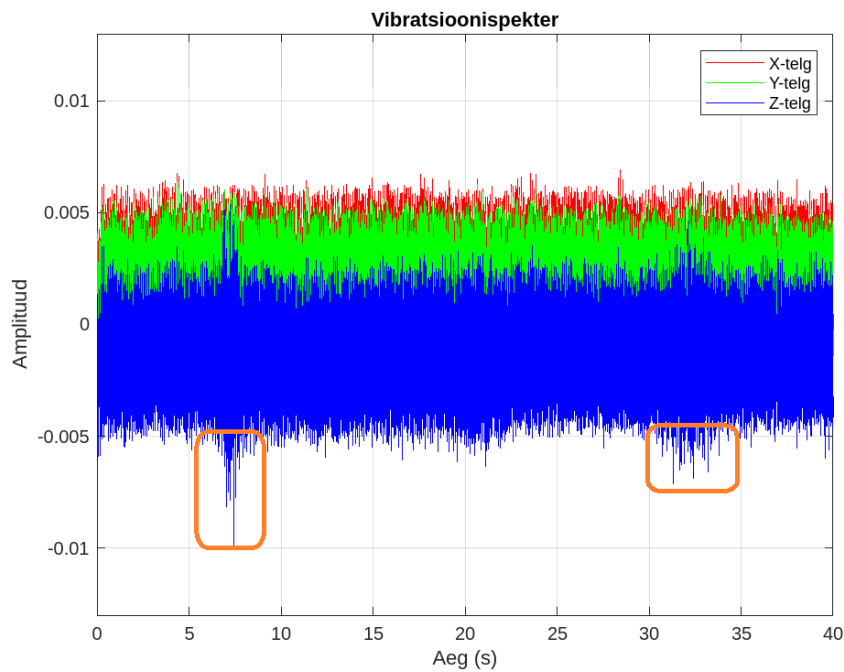




Joonis 5.1 Korrekse laagri vibratsioonisignaali 0% mootori koormatusega

Nagu on joonisel näha, siis selle signaali müratase on madal, stabiilne amplituud, puuduvad resonantsagedused. Lisaks signaal ei sisalda muutusi või kõrvalekaldeid.

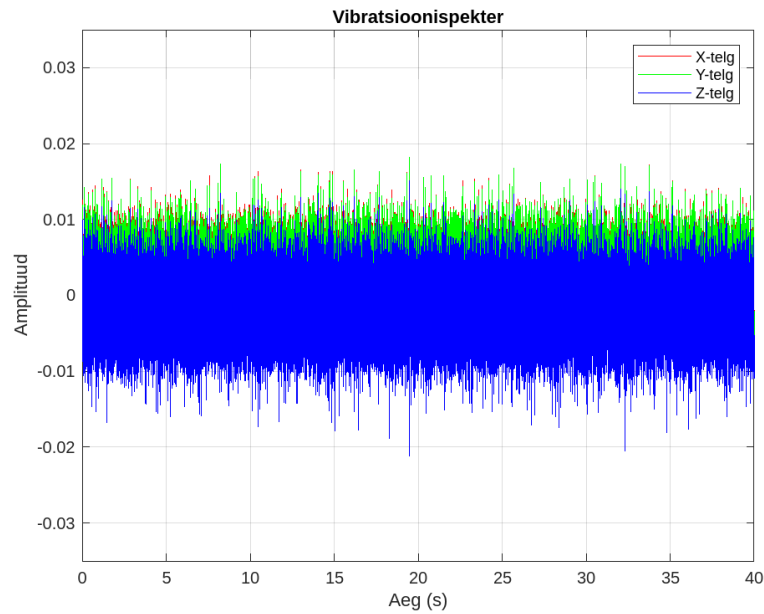
Järgmisel joonisel 5.2 kuvatakse sisemise rõnga tõrke laager, mis on kontrollitud samades tingimustes.



Joonis 5.2 Sisemise rõnga tõrke laagri vibratsioonisignaali 0% mootori koormatusega

Sellel joonisel on vastupidi nii müratase, kui ka taustavibratsioon on esinenud kõrgemal tasandil. Lisaks signaal sisaldab impulsiivseid komponente, nagu näiteks muutuv amplituud.

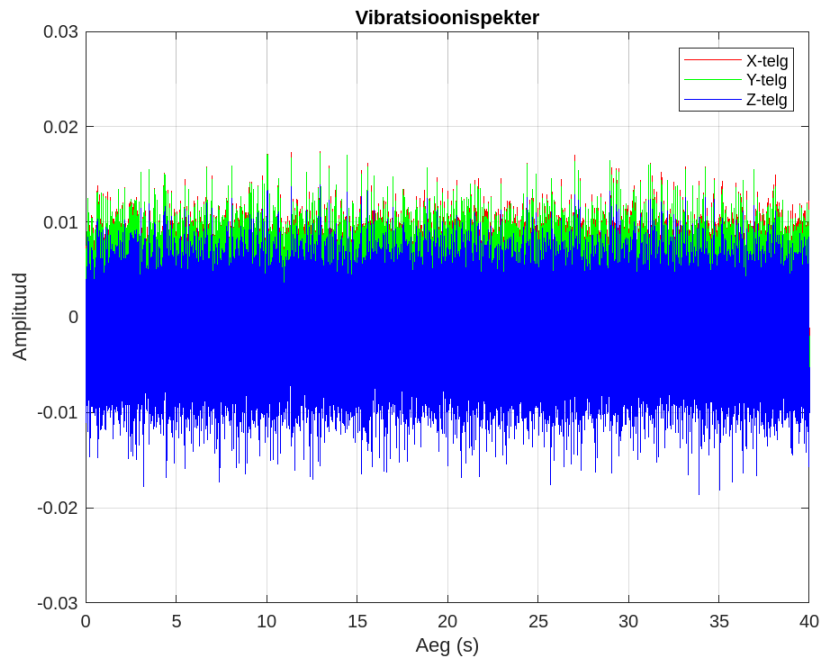
Järgmiselt on toodud kõik ülejäänud vibratsioonispektril analüüsitud signaalid mootori koormuse 25% astme tõstmisega: 25%, 50%, 75%, 100% nii korrektse laagril, kui ka sisemise rõnga tõrkega.



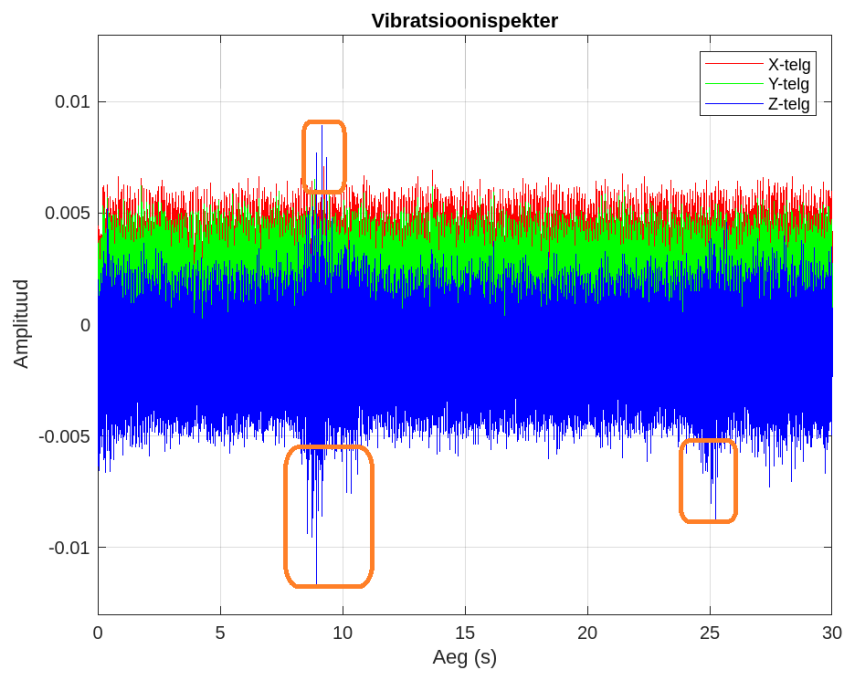
Joonis 5.3 Korrektse laagri vibratsioonisignaali 25% mootori koormatusega



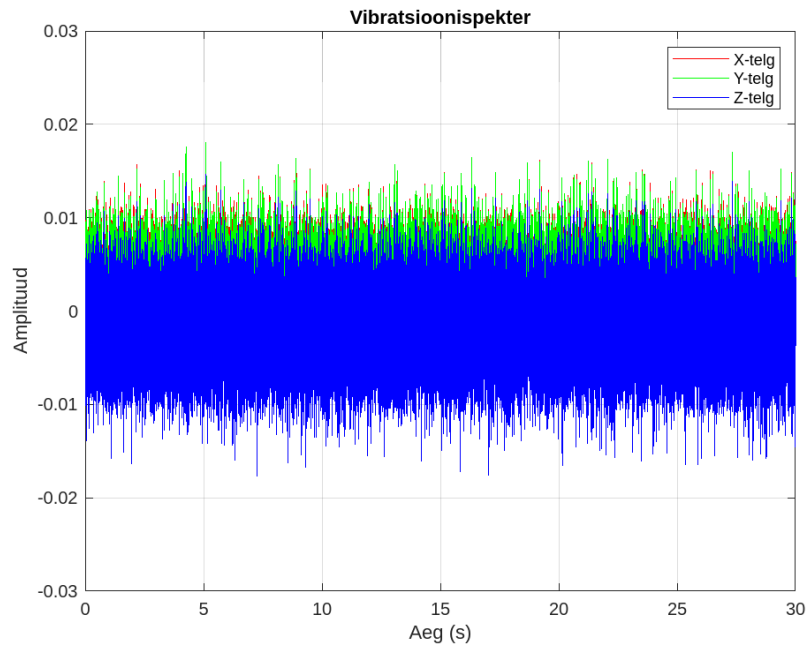
Joonis 5.4 Sisemise rõnga tõrke laagri vibratsioonisignaali 25% mootori koormatusega



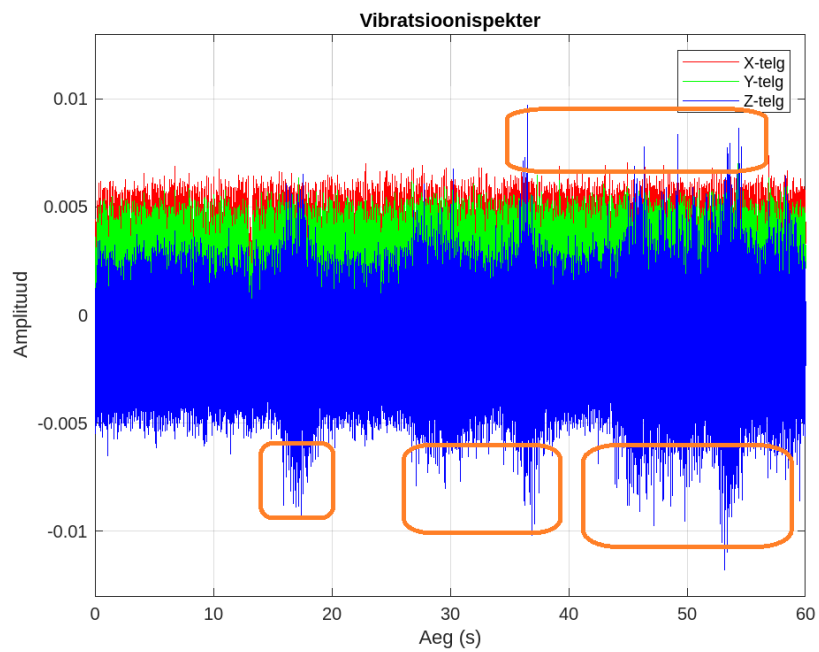
Joonis 5.5 Korrektsel laagri vibratsioonisignaali 50% mootori koormatusega



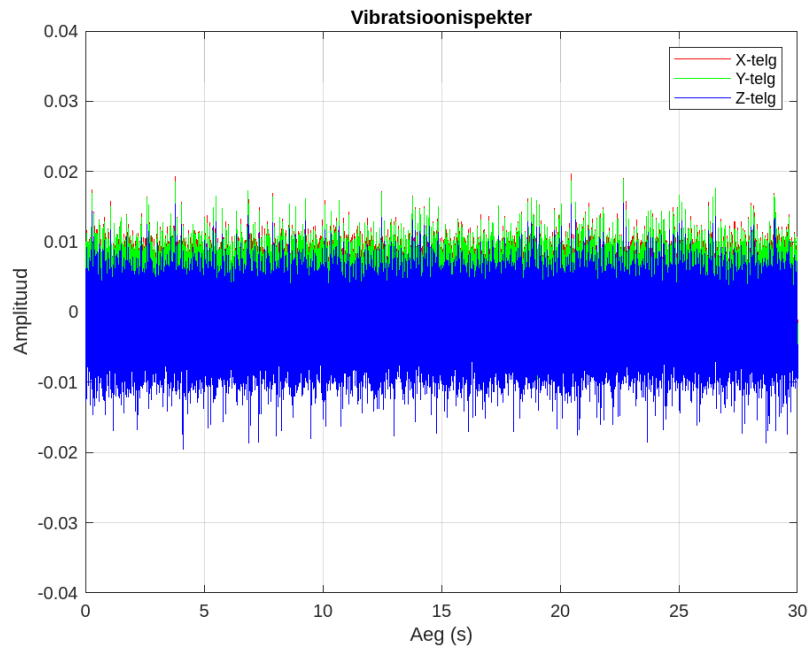
Joonis 5.6 Sisemise rõnga tõrke laagri vibratsioonisignaali 50% mootori koormatusega



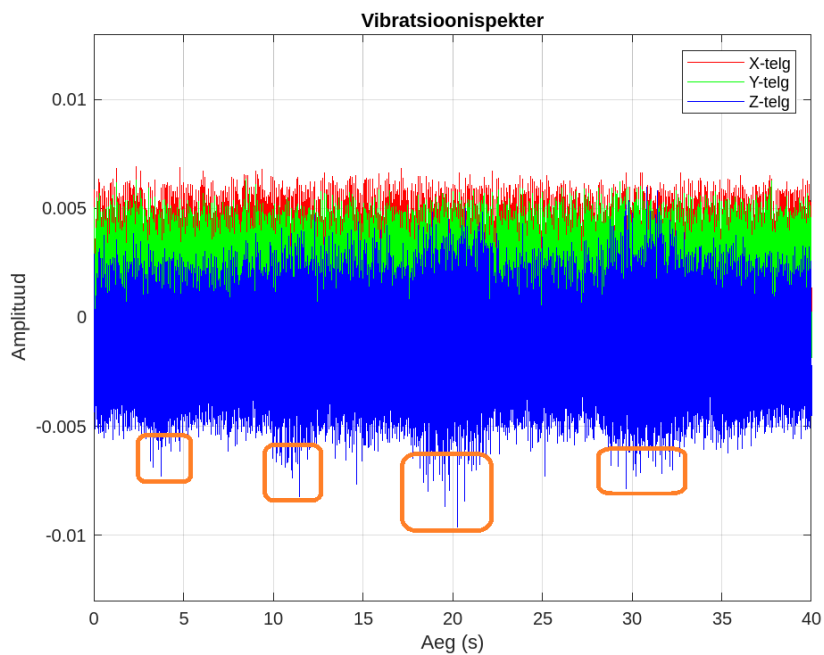
Joonis 5.7 Korrektse laagri vibratsioonisignaali 75% mootori koormatusega



Joonis 5.8 Sisemise rõnga tõrke laagri vibratsioonisignaali 75% mootori koormatusega



Joonis 5.9 Korrektsel laagri vibratsioonisignaali 100% mootori koormatusega



Joonis 5.10 Sisemise rõnga tõrke laagri vibratsioonisignaali 100% mootori koormatusega

Tervisliku ja sisemise rõnga tõrkega vibratsioonispektri graafikud erinevad oluliselt oma omaduste poolest. Tervisliku laagri vibratsioonispektri graafikul on näha regulaarset ja suhteliselt madalat müra taset, mis kajastavad laagri normaalset tööd. Sageduskomponendid stabiilsed ja selged ning ei esine märkimisväärseid kõrvalekaldeid.

Sisemise rõnga tõrkega vibratsioonispektri graafikul esinevad mitmed erinevad tunnused, näiteks impulsiivseid komponente, mis viitavad sisemise rõnga kahjustustele või pragudele. Lisaks ilmnevad ka ebatavalised harmonilised sageduskomponendid või muutused taustamüra tasemes.

Kokkuvõtteks võib öelda, et tervisliku ja sisemise rõnga tõrkega vibratsioonispektri graafikud erinevad oluliselt oma omaduste poolest ning võivad anda olulist teavet masinate seisukorra hindamiseks ja hoolduse vajaduste määramiseks.

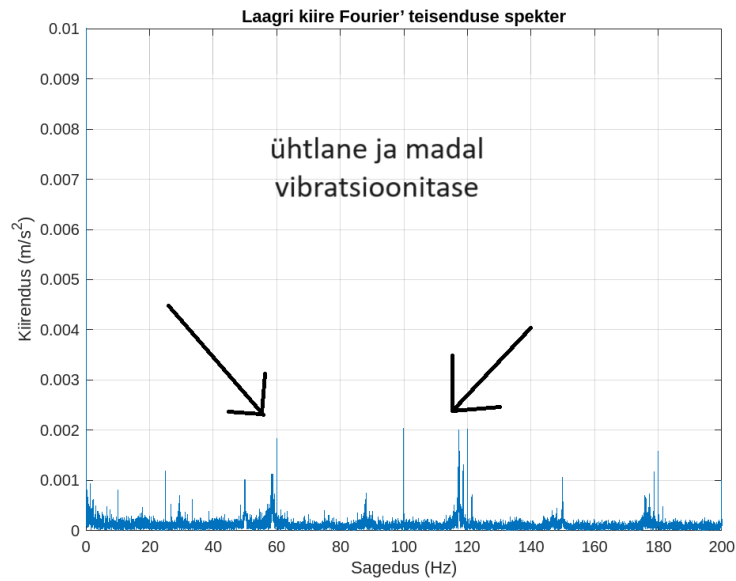
## **5.2 Kiire Fourier' teisenduse spektri analüüs**

Andmete analüüsiks sai valitud kiire Fourier' teisenduse (FFT) spektri analüüs, kasutades MATLAB tarkvara mis võimaldab uurida vibratsioonisignaali sageduskomponente ning tuvastada potentsiaalseid laagris esinevaid probleeme. Kui laager on kahjustatud, genereerib see sageli erinevaid vibratsioonimustreid, mida on võimalik tuvastada ja analüüsida FFT spektri abil.

Esiteks võimaldab määrata sageduskomponente, mis on signaalis esindatud. Kuna erinevad laagririkked võivad põhjustada erinevaid sageduslikke komponente, võib spektri analüüs tuvastada konkreetseid sagedusribasid, mis on seotud laagri defektidega, nagu sisemise või välimise rõnga, rulliku või korpuse kahjustused.

MATLAB tarkvaras sai kirjutatud kood, mis laeb andmed failist, mis sisaldab vibratsiooniandmeid. Sellest failist eraldatakse vibratsioonisignaali ja vastav aeg. Edasi arvutatakse signaali kiire Fourier'i teisenduse funktsioon, mis muudab signaali ajavaldise sagedusväljaks, võimaldades uurida signaali sageduskomponente. Arvutatakse saadud kahepoolne spektri absoluutväärtused ning seejärel korrigeeritakse need ühepoolseks spektriks, määratakse sagedusvahemik, kus signaal on esindatud, võttes arvesse signaali pikkust ja sageduse proovi sagedust.

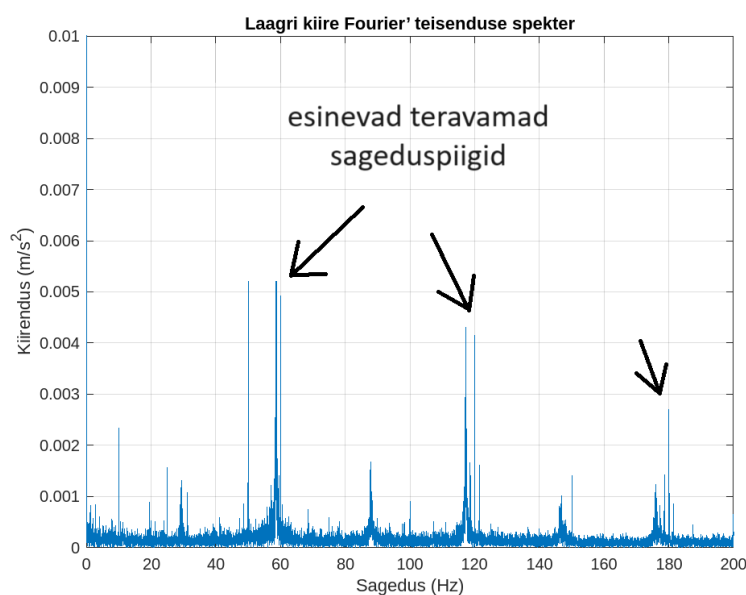
Joonisel 5.11 kuvatakse kiire Fourier' teisenduse spekter, mis hõlmab tervislikku laagri signaali 0% mootori koormatusega.



Joonis 5.11 Korrektse laagri FFT spekter 0% mootori koormatusega

Nagu on joonisel näha, siis y telg näitab signaali kiirenduse amplituudi vastavalt sagedusele. Iga punkt graafikul esindab sageduse komponenti ja sellele vastavat kiirenduse amplituudi. Graafik näitab ühtlast ja madalat vibratsioonitaset erinevatel sagedustel. See tähendab, et laager on tervislik ja ei esine olulisi defekte ega resonantse, mis põhjustaksid suuremaid vibratsioone teatud sagedustel. Graafikul võib esineda väikesi sageduskomponente, mis on seotud näiteks laagri töötingimustega või väiksemate välismõjudega, kuid üldiselt on spekter ühtlane ja madal.

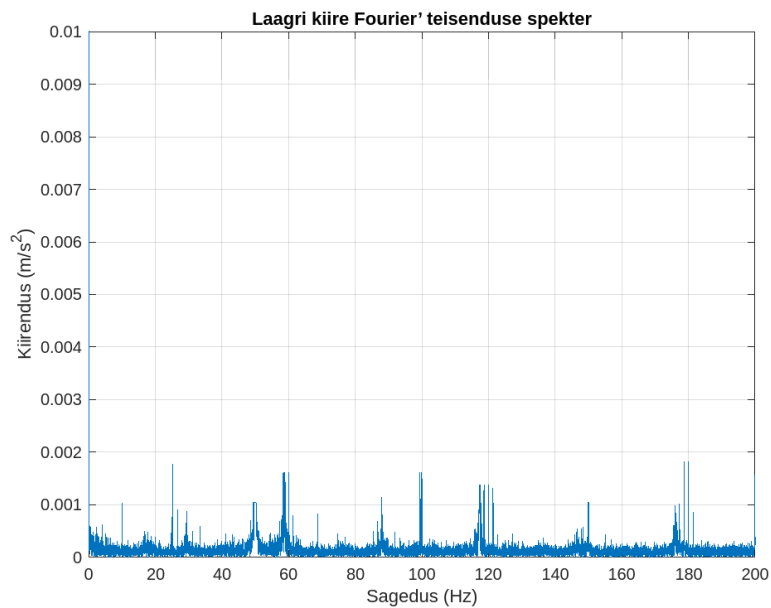
Järgmisel joonisel 5.12 kuvatakse sisemise rõnga tõrke laager, mis on kontrollitud samades tingimustes.



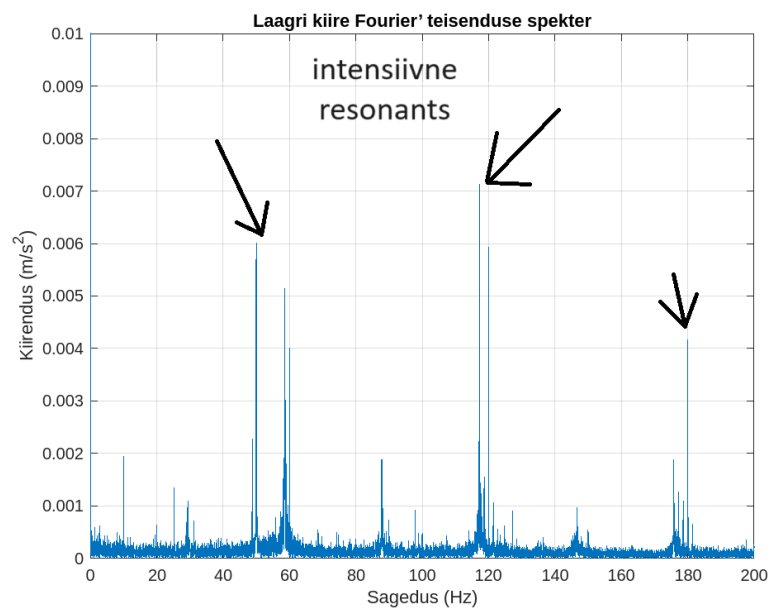
Joonis 5.12 Sisemise rõnga tõrke laagri FFT spekter 0% mootori koormatusega

Sellel joonisel on vastupidi esinevad teravamad sageduspiigid ja tugevad resonantsid teatud sagedustel. Sisemise rõnga rike võib põhjustada uute sageduskomponentide ilmumist spektrisse, mis ei olnud varem tervel laagril täheldatud. Lisaks võivad tekkida muutused peegeldusjoontes või sümmeetrias, viidavad spetsiifilistele defektidele või riketele laagri struktuuris.

Järgmiselt on toodud kõik ülejäänud vibratsioonispektril analüüsitud signaalid mootori koormuse 50% astme tõstmisega: 50% ja 100% nii korrektse laagril, kui ka sisemise rõnga tõrkega.

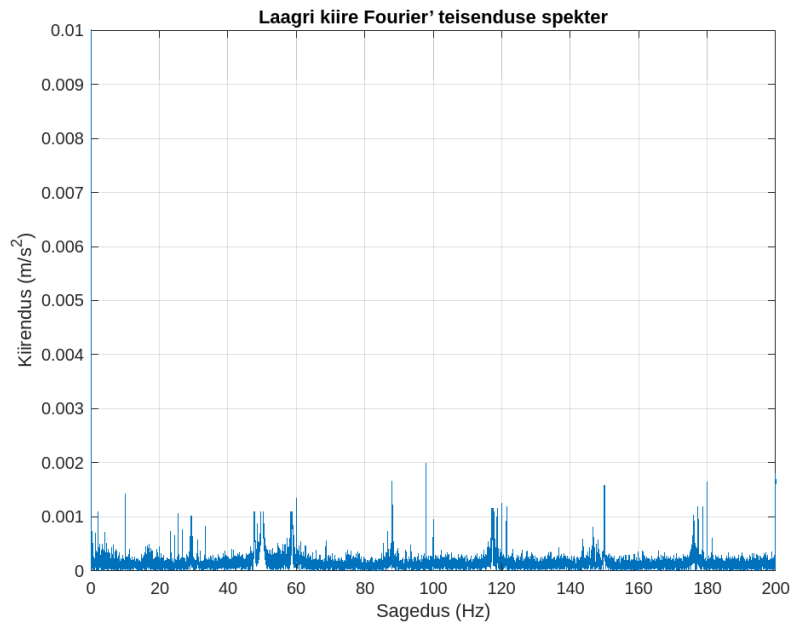


Joonis 5.13 Korrektse laagri FFT spekter 50% mootori koormatusega

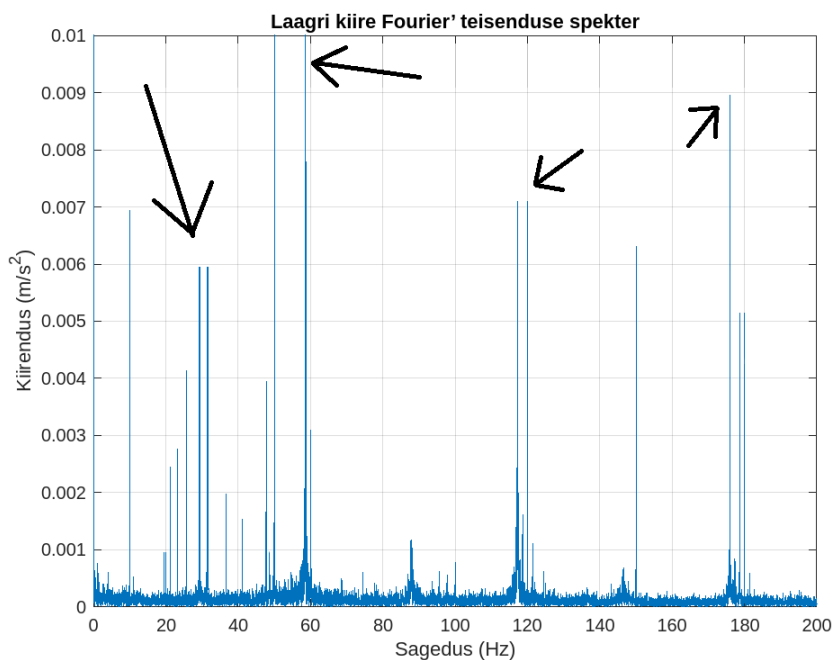


Joonis 5.14 Sisemise rõnga tõrke laagri FFT spekter 50% mootori koormatusega





Joonis 5.15 Korrektsel laagri FFT spekter 100% mootori koormatusega



Joonis 5.16 Sisemise rõnga tõrke laagri FFT spekter 100% mootori koormatusega

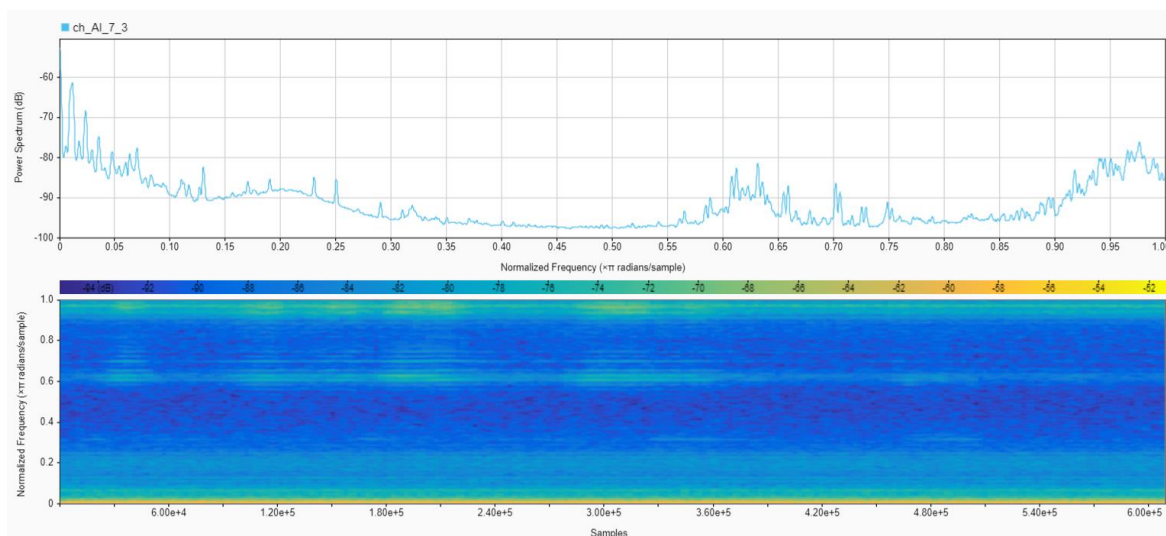
Kiire Fourier' teisenduse (FFT) spektri analüüs laagrikete diagnoosimisel võimaldab uurida vibratsioonisignaali sageduskomponente ning tuvastada potentsiaalseid laagris esinevaid probleeme. Kui laager on kahjustatud, genereerib see sageli erinevaid vibratsioonimustreid, mida on võimalik tuvastada ja analüüsida FFT spektri abil. Tervisliku ja sisemise rõnga tõrkega laagri FFT spektri graafikud erinevad oluliselt oma omaduste poolest. Esimesel sageduskomponendid on suhteliselt tasased ja sümmeetrilised, kusjuures tippude intensiivsus võib olla madal või mõõdukas.

Sisemise rõnga tõrkega laagri graafikul võivad aga esineda teravamad ja kõrgemad sageduspiigid ning intensiivsemad resonantsid, mis on seotud laagri defektidega. Samuti ilmuvad uued sageduskomponendid, mis pole tervisliku laagri spektris tavalised.

Kokkuvõtlikult võib järeldada, et tervisliku ja sisemise rõnga tõrkega FFT spektri graafikud erinevad märkimisväärselt oma omaduste poolest ning pakuvad olulist teavet masinate seisundi hindamiseks ja hoolduse vajaduste määramiseks.

### 5.3 Teised analüüsimisvõimalused

Signaalide analüüsimiseks on mitmeid moodi. Sagedusspektrianalüüs näitab signaali komponentide jaotust sageduse järgi. Y-teljel olev võimsusspekter (dB) näitab iga sageduse komponendi võimsust logaritmilises skaalas, mis võimaldab paremini eristada nõrgemaid signaale suurematest. Selle abil saab uurida, millised sagedused on signaalis esindatud ja milline on nende võimsus või energia suhe, mis võimaldab tuvastada olulisi sageduskomponente ja nende suhtelist tugevust signaalis.



Joonis 5.17 Sisemise rõnga tõrke laagri sagedusspekter ja spektrogramm 100% mootori koormatusega

Spektrogramm on kolmemõõtmeline graafik, mis näitab signaali sagedusspektri muutumist ajas, mis võimaldab visualiseerida, kuidas signaali sagedusspekter muutub aja jooksul, mis võib anda olulist teavet signaali dünaamiliste omaduste kohta, näiteks sagedusmuutuste, sageduskomponentide järjestuse või ajaliste muustrite kohta. See on kasulik tööriist vibratsiooni signaalide analüüsimisel.

Spektrogrammi ja sagedusspektrianalüüsi kasutamine nõuab kindlasti sügavamalt arusaamist signaalialalüüsi põhimõtetest ja meetoditest.

Selleks tuleb mõista, kuidas signaalid kujunevad, kuidas neid esitatakse ajas ja sageduses ning kuidas neid saab analüüsida ja tõlgendada.

## KOKKUVÕTE

Käesolev lõputöö keskendus laagririkete diagnoosimise meetodite võrdlevale analüüsile ning praktilisele rakendamisele. Töö alguses püstitatud eesmärkide saavutamiseks läbiti mitu olulist sammu, mis võimaldasid süveneda laagririkete diagnoosimise valdkonda ning hinnata erinevate meetodite efektiivsust tööstuslikes seadmetes.

Sissejuhatus tutvustas lugejale töö teematikat ning selle ühiskondlikku ja majanduslikku konteksti. Esile tõsteti laagrite olulisust tööstuslikes protsessides ning vajadust arendada paremaid lahendusi laagririkete varajaseks avastamiseks. Püstitati uurimisküsimused ning antud ülevaade lõputöö struktuurist ja metodoloogiast.

Järgnevad peatükid tutvustasid laagririkete diagnoosimise meetoditest ja nende võrdlevat analüüsi. Klassikaliste, signaalipõhiste ja mudelipõhiste lähenemisviisidega tutvumine võimaldas mõista erinevate meetodite tugevusi ja nõrkusi ning nende rakendatavust erinevates olukordades.

Praktilises osas analüüsiti vibratsioonisignaale mitme erineva meetodi abil ning hinnati nende efektiivsust laagririkete diagnoosimisel, kasutades MATLAB tarkvara erinevaid funktsioone ja käsklusi. Töö lisades on teised mitte põhiosas olevad sagedusspektrid ja spektrogramm, mis on saadud 3 erinevatest andurist.

Töö tulemused näitasid, et erinevate meetodite kombinatsioon võib anda täpsemaid ja usaldusväärsemaid tulemusi laagririkete diagnoosimisel kui üksik meetod. Vibratsioonisignaalide analüüs osutus eriti tõhusaks meetodiks, võimaldades tuvastada laagririkkeid varakult ja ennetada ootamatuid seiskumisi.

Võttes arvesse töös tehtud järeldusi ja avastusi, on oluline märkida ka võimalikke edasisi uurimissuundi. Saadud tulemused on olulised mitte ainult akadeemilises kontekstis, vaid neil võib olla ka praktiline rakendus. Analüüsitud teema sügavam mõistmine võib aidata kaasa selle valdkonna edasisele arengule ning pakub potentsiaalseid lahendusi praktilistele probleemidele. Uurimistöö käigus esile tulnud järeldused on olulised ka tulevaste uurimissuundade jaoks ning pakuvad uusi teoreetilisi ja praktilisi väljavaateid.

Lõputöö eesmärgiks oli välja selgitada optimaalsed meetodid laagririkete diagnoosimiseks, võrrelda nende tõhusust ning anda soovitusi parimate lahenduste rakendamiseks. Selleks oli läbi viidud põhjalik analüüs erinevatest laagririkete diagnoosimise meetoditest, ning põhjalik praktiliste katsete ja simulatsioonide hinnang.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et lõputöö seatud eesmärgid on saavutatud ning töö käigus leiti vastused alguses püstitatud küsimustele. Uurimistöö läbiviimisel keskenduti sügavale analüüsile ning kombineeriti mitmeid erinevaid meetodikaid, sealhulgas empiirilisi uuringuid ja teoreetilist raamistikku. Tulemused näitavad selgelt uurimisprobleemi keerukust ja mitmekülgust ning pakuvad uusi teadmisi antud valdkonnas. Lisaks sellele toetavad saadud tulemused varasemaid teooriaid ning avavad uusi uurimisvõimalusi tulevastele teadusuuringutele. Uurimistöö on oluline panus valdkonna teadmiste laiendamisse ning pakub alust edasiseks teadustööks ja praktilisteks rakendusteks.

## **SUMMARY**

This thesis focused on the comparative analysis and practical implementation of bearing fault diagnosis methods. To achieve the objectives set at the beginning of this study, several significant steps were undertaken, allowing for an in-depth exploration of bearing fault diagnosis and an assessment of the effectiveness of various methods in industrial machinery.

The introduction provided an overview of the thesis topic, its societal and economic context, emphasizing the importance of bearings in industrial processes and the necessity to develop better solutions for early detection of bearing faults. Research questions were posed, and an outline of the thesis structure and methodology was provided.

Subsequent chapters introduced different methods of bearing fault diagnosis and their comparative analysis. Familiarization with classical, signal-based, and model-based approaches helped to understand the strengths, weaknesses, and applicability of different methods in various scenarios.

In the practical part, vibration signals were analyzed using several different methods, and their effectiveness in bearing fault diagnosis was evaluated utilizing various functions and commands in the MATLAB software. The thesis also includes frequency spectra and spectrograms obtained from three different sensors, which are provided in the appendices.

The results indicated that the combination of different methods could yield more accurate and reliable results in bearing fault diagnosis compared to individual methods. Vibration signal analysis proved to be particularly effective, enabling early detection of bearing faults and prevention of unexpected breakdowns.

Considering the conclusions and discoveries made in this study, it is important to highlight potential future research directions. The results obtained have significance not only in academic contexts but also in practical applications. A deeper understanding of the analyzed topic can contribute to further advancements in the field and offer potential solutions to practical problems. The conclusions drawn from this research are also crucial for future research directions, providing new theoretical and practical perspectives. The aim of this thesis was to determine the optimal methods for bearing fault diagnosis, compare their effectiveness, and provide recommendations for the implementation of best practices.

To achieve this, a thorough analysis of various bearing fault diagnosis methods was conducted, along with comprehensive practical experiments and simulations.

In conclusion, the objectives set forth in this thesis were achieved, and answers to the initial research questions were found. The research involved a deep analysis and the integration of various methodologies, including empirical studies and theoretical frameworks. The results clearly demonstrate the complexity and diversity of the research problem and provide new insights into the field. Furthermore, the findings support existing theories and open up new avenues for future research. This research contributes significantly to the expansion of knowledge in the field and provides a foundation for further academic and practical endeavors.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] K. Kudelina, T. Baraskova, V. Shirokova, T. Vaimann, A. Rassõlkin, Fault Detecting Accuracy of Mechanical Damages in Rolling Bearings [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/2/86>
- [2] J. Hyuk Im, , J. Kyu Kang, J. Hur, Static and Dynamic Eccentricity Faults Diagnosis in PM Synchronous Motor Using Planar Search Coil [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9917294>
- [3] A. Muhammad, B. Asad, K. Kudelina, T. Vaimann, A.Kallaste, The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines – The State of the Art [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/296>
- [4] SKF, *Catalog: Rolling Bearings*, 2018.
- [5] K. Kudelina, T. Vaimann, *EEV5100, Elektriseadmete tõrked ja töökindlus*, 2023.
- [6] P. Lugt, A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings [Võrguväljaanne] <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000802687940>
- [7] E. Quaranta, P. Davies, Emerging and Innovative Materials for Hydropower Engineering Applications: Turbines, Bearings, Sealing, Dams and Waterways, and Ocean Power [Võrguväljaanne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809921003581>
- [8] M. Hilmi Aksoy, Cost-Effectiveness of an Automatic Lubrication System for Bearings [Võrguväljaanne] [https://www.researchgate.net/publication/377803268\\_Cost-Effectiveness\\_of\\_an\\_Automatic\\_Lubrication\\_System\\_for\\_Bearings](https://www.researchgate.net/publication/377803268_Cost-Effectiveness_of_an_Automatic_Lubrication_System_for_Bearings)
- [9] K. Kudelina, H. Raja, M. Naseer, S. Outsou, B. Asad, T. Vaimann, A. Kallaste, Bearing Currents of Induction Machine – Fault Detection, Condition Monitoring, and Predictive Maintenance [Võrguväljaanne] [https://www.researchgate.net/publication/378309621\\_Bearing\\_Currents\\_of\\_Induction\\_Machine\\_-\\_Fault\\_Detection\\_Condition\\_Monitoring\\_and\\_Predictive\\_Maintenance](https://www.researchgate.net/publication/378309621_Bearing_Currents_of_Induction_Machine_-_Fault_Detection_Condition_Monitoring_and_Predictive_Maintenance)



[10] Б. Васильев, А. Козярук, ПОДШИПНИКОВЫЕ ТОКИ ПРИВОДНЫХ МАШИН В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ [Võrguväljaanne] <https://cyberleninka.ru/article/n/podshipnikovye-toki-privodnyh-mashin-v-elektroprivodah-s-poluprovodnikovymi-preobrazovateljami>

[11] A. Choudhary, S. Fatima, B. K. Panigrahi, Passive Thermal Imaging - based Fault Detection in Induction Motor Under Varying Speed Conditions [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9909221>

[12] Y. Li, H. Cao, L. Niu, X. Jin, A General Method for the Dynamic Modeling of Ball Bearing-Rotor Systems [Võrguväljaanne] [https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/137/2/021016/377485/A-General-Method-for-the-Dynamic-Modeling-of-Ball?casa\\_token=jxHpoUiG3LIAAAAA:sh8imuqRN26eY0PvqFToshl4Dzk5bRiWItXS\\_E18Ej3I5LLMDgwEdfUO9cHJTUeXfMtp\\_eE](https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/137/2/021016/377485/A-General-Method-for-the-Dynamic-Modeling-of-Ball?casa_token=jxHpoUiG3LIAAAAA:sh8imuqRN26eY0PvqFToshl4Dzk5bRiWItXS_E18Ej3I5LLMDgwEdfUO9cHJTUeXfMtp_eE)

[13] B. Asad, T. Vaimann, A. Kallaste, A. Belahcen, Harmonic Spectrum Analysis of Induction Motor With Broken Rotor Bar Fault [Võrguväljaanne] [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8659842?casa\\_token=MfWAqvL5O-QAAAAA:n5ep0HJgvhyKVKpNUC9bIjwsq9NDJVAoiKwLoI52Y6ysPEhYtfN4wIDz2s3gnErDWn8wOE23xg](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8659842?casa_token=MfWAqvL5O-QAAAAA:n5ep0HJgvhyKVKpNUC9bIjwsq9NDJVAoiKwLoI52Y6ysPEhYtfN4wIDz2s3gnErDWn8wOE23xg)

[14] G. Purushottam, R Tiwari, Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review [Võrguväljaanne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327020302946?via%3Dihub>

[15] A. Choudhary, S. Shimi, A. Akula, Bearing Fault Diagnosis of Induction Motor Using Thermal Imaging [Võrguväljaanne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327020302946?via%3Dihub>

[16] H. Shao, M. Xia, G Han, Y. Zhang, J. Wan, Intelligent Fault Diagnosis of Rotor-Bearing System Under Varying Working Conditions With Modified Transfer Convolutional Neural Network and Thermal Images [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9130129>

[17] S. Halder, S. Bhat, D. Zychma, P. Sowa, Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8569>

[18] S. Akbar, T. Vaimann, B. Asad, A. Kallaste, M. Sardar, K. Kudelina, State-of-the-Art Techniques for Fault Diagnosis in Electrical Machines: Advancements and Future Directions [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/17/6345>

[19] N. Azeez; A. Alex, Detection of rolling element bearing defects by vibration signature analysis: A review [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/document/6908270>

[20] A. Dimitrios, N. Giannousakis, S. Dermatas, D. Mitronikas, Vibration Monitoring for Position Sensor Fault Diagnosis in Brushless DC Motor Drives [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2248>

[21] J.R. Cameron, W.T. Thomson, A.B. Dow, Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors [Võrguväljaanne] <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-b.1986.0022>

[22] M. Benbouzid, A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/document/873206>

[23] P. Zhang, Y. Du, G. Thomas, L. Bin, A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/document/5620974>

[24] T. Schotzko, W. Lang, Embedded Strain Gauges for Condition Monitoring of Silicone Gaskets [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12387>

[25] B. Mohapatra, R. Kumari, FFT and sparse FFT techniques and applications [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12387>

[26] MathWorks, Discrete Fourier Transform [Võrguväljaanne]  
<https://uk.mathworks.com/help/signal/ug/discrete-fourier-transform.html>

[27] MathWorks, Short-time Fourier Transform [Võrguväljaanne]  
<https://uk.mathworks.com/help/signal/ref/stft.html>

[28] MathWorks, Wigner-Ville Distribution [Võrguväljaanne]  
<https://uk.mathworks.com/help/signal/ref/wvd.html>

[29] MathWorks, Wavelet Transforms [Võrguväljaanne]  
<https://uk.mathworks.com/discovery/wavelet-transforms.html>

[30] G. Plonka, D. Potts, G. Steifdi, Fast Fourier Transforms [Võrguväljaanne]  
[https://www.researchgate.net/publication/375501373\\_Fast\\_Fourier\\_Transforms](https://www.researchgate.net/publication/375501373_Fast_Fourier_Transforms)

[31] X. Zhang, H. Zheng, Signal Enhancement Methods Based on Wavelet Transform, Fractional Fourier Transform and Short-time Fourier Transform [Võrguväljaanne]  
[https://www.researchgate.net/publication/377743448\\_Signal\\_Enhancement\\_Methods\\_Based\\_on\\_Wavelet\\_Transform\\_Fractional\\_Fourier\\_Transform\\_and\\_Short-time\\_Fourier\\_Transform](https://www.researchgate.net/publication/377743448_Signal_Enhancement_Methods_Based_on_Wavelet_Transform_Fractional_Fourier_Transform_and_Short-time_Fourier_Transform)

[32] A. Najmi, The Continuous Wavelet Transform and Variable Resolution Time-Frequency Analysis [Võrguväljaanne]  
[https://www.researchgate.net/publication/2437352\\_The\\_Continuous\\_Wavelet\\_Transform\\_and\\_Variable\\_Resolution\\_Time-Frequency\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/2437352_The_Continuous_Wavelet_Transform_and_Variable_Resolution_Time-Frequency_Analysis)

[33] S. Roshanamesh, F. Hayati, M. Papaalias, Utilisation of Ensemble Empirical Mode Decomposition in Conjunction with Cyclostationary Technique for Wind Turbine Gearbox Fault Detection [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/9/3334>

[34] A. Maurico, L. Zhou, D. Mba, K. Gryllias, Vibration-Based Condition Monitoring of Helicopter Gearboxes Based on Cyclostationary Analysis [Võrguväljaanne] <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/142/3/031010/958335/Vibration-Based-Condition-Monitoring-of-Helicopter?redirectedFrom=fulltext>

[35] M. U. Sardar, T. Vaimann, L. Kütt, A. Kallaste, B. Asad, S. Akbar, K. Kudelina, Inverter-Fed Motor Drive System: A Systematic Analysis of Condition Monitoring and Practical Diagnostic Techniques [Võrguväljaanne] <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/15/5628>

[36] N. Tavana, V. Dinavahi, Real-Time Nonlinear Magnetic Equivalent Circuit Model of Induction Machine on FPGA for Hardware-in-the-Loop Simulation [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/document/7381688>

[37] P. Naderi, F. Fallahi, Eccentricity fault diagnosis in three-phase-wound-rotor induction machine using numerical discrete modeling method [Võrguväljaanne] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jnm.2157>

[38] J. Faiz, B. Ebrahimi, H. Toliyat, Effect of Magnetic Saturation on Static and Mixed Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motor [Võrguväljaanne] <https://ieeexplore.ieee.org/document/5170221>

[39] P. Ingle, Top Neural Network Architectures For Machine Learning Researchers [Võrguväljaanne] <https://www.marktechpost.com/2022/09/23/top-neural-network-architectures-for-machine-learning-researchers/>

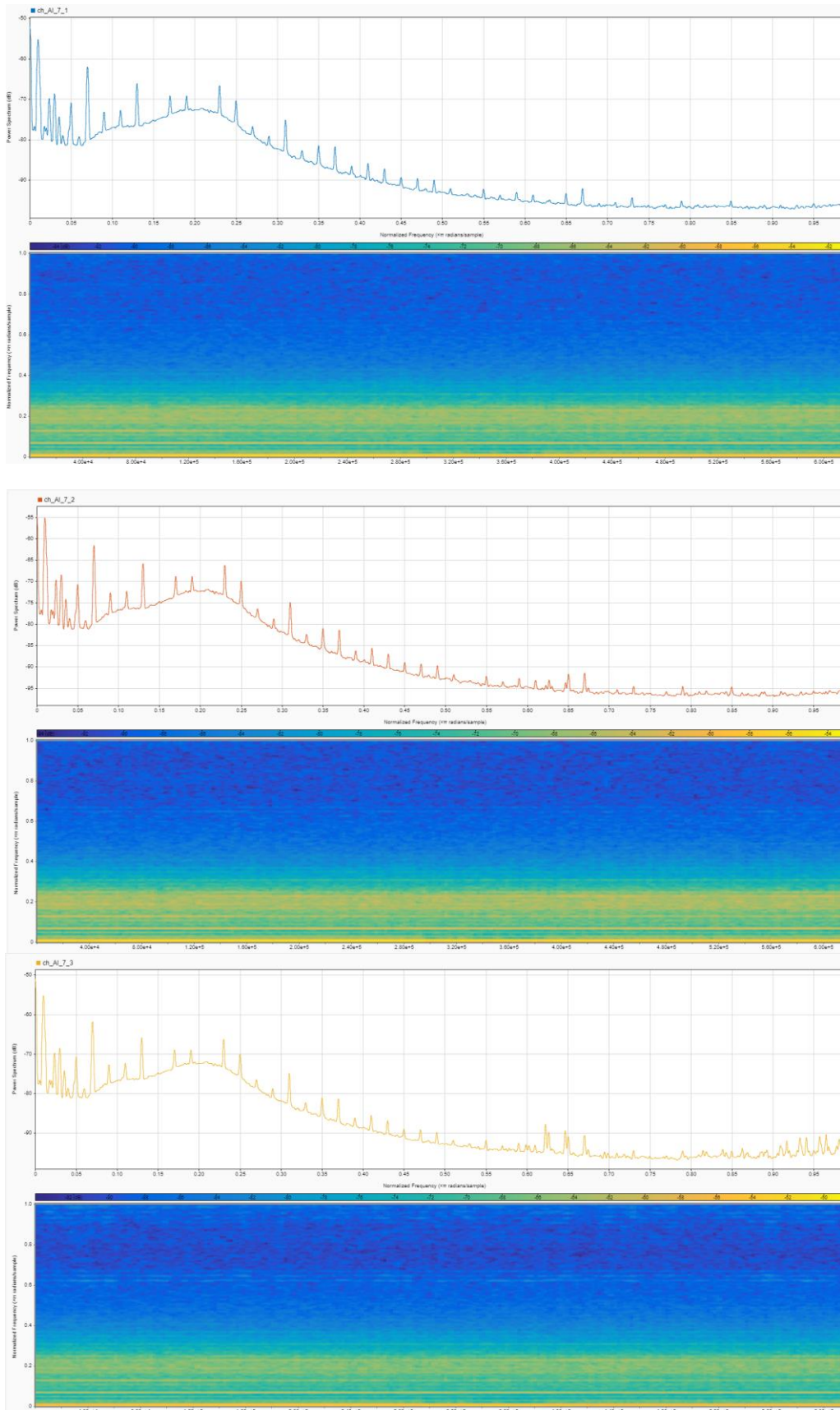
[40] B. Rao, P. Srinvasava, T. Nagabhushana, Failure Diagnosis and Prognosis of Rolling - Element Bearings using Artificial Neural Networks: A Critical Overview [Võrguväljaanne] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/364/1/012023>

[41] W. Zhang, M. Jia, L. Zhu, X. Yan, Comprehensive Overview on Computational Intelligence Techniques for Machinery Condition Monitoring and Fault Diagnosis [Võrguväljaanne] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10033-017-0150-0>

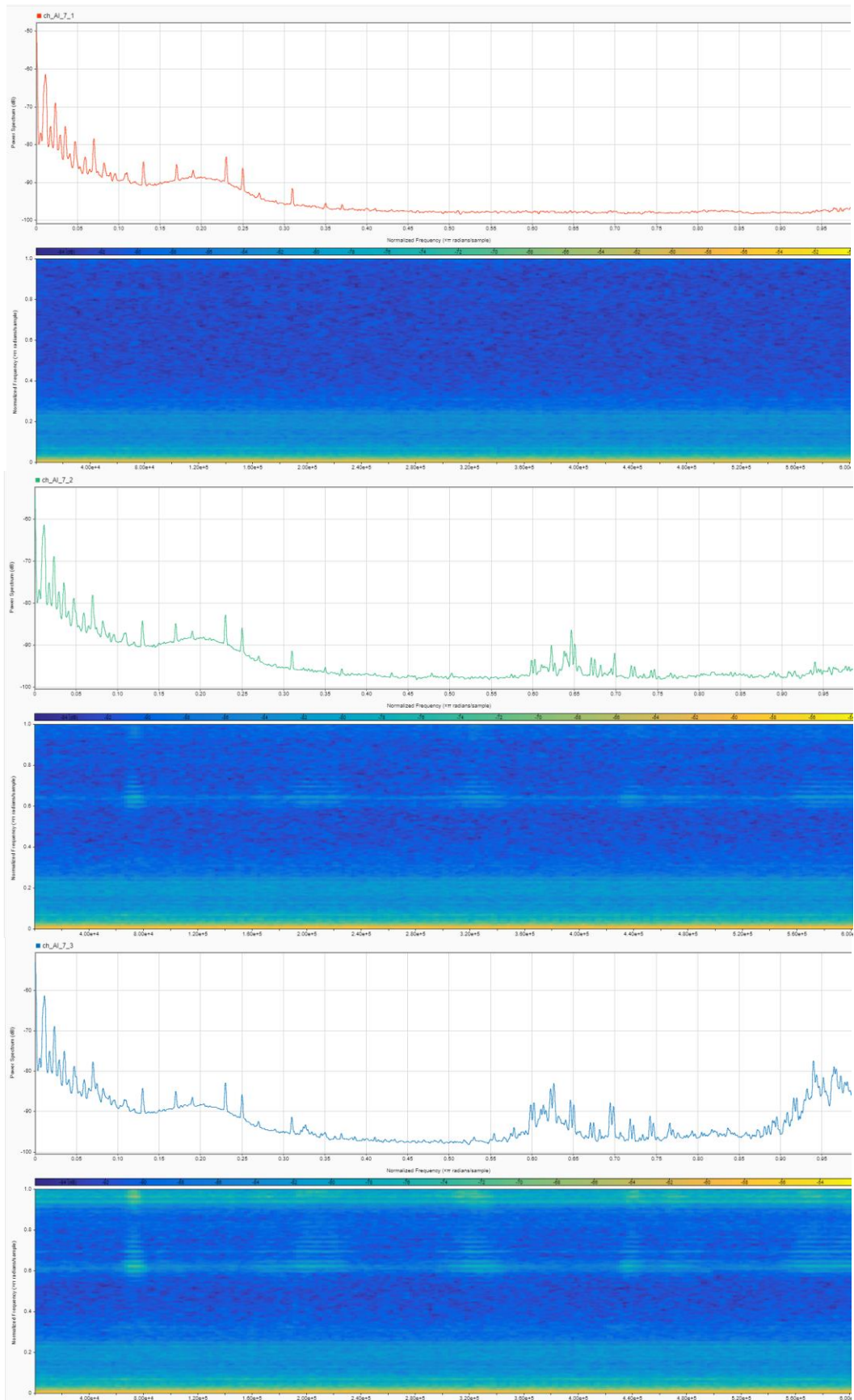
[42] P. Kankar, S. Sharma, S. Harsha, Fault diagnosis of ball bearings using machine learning methods [Võrguväljaanne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417410007475?via%3Dihub>

**LISAD**

# Lisa 1 sagedusspekter ja spektrogramm korrektse laagri 0% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist

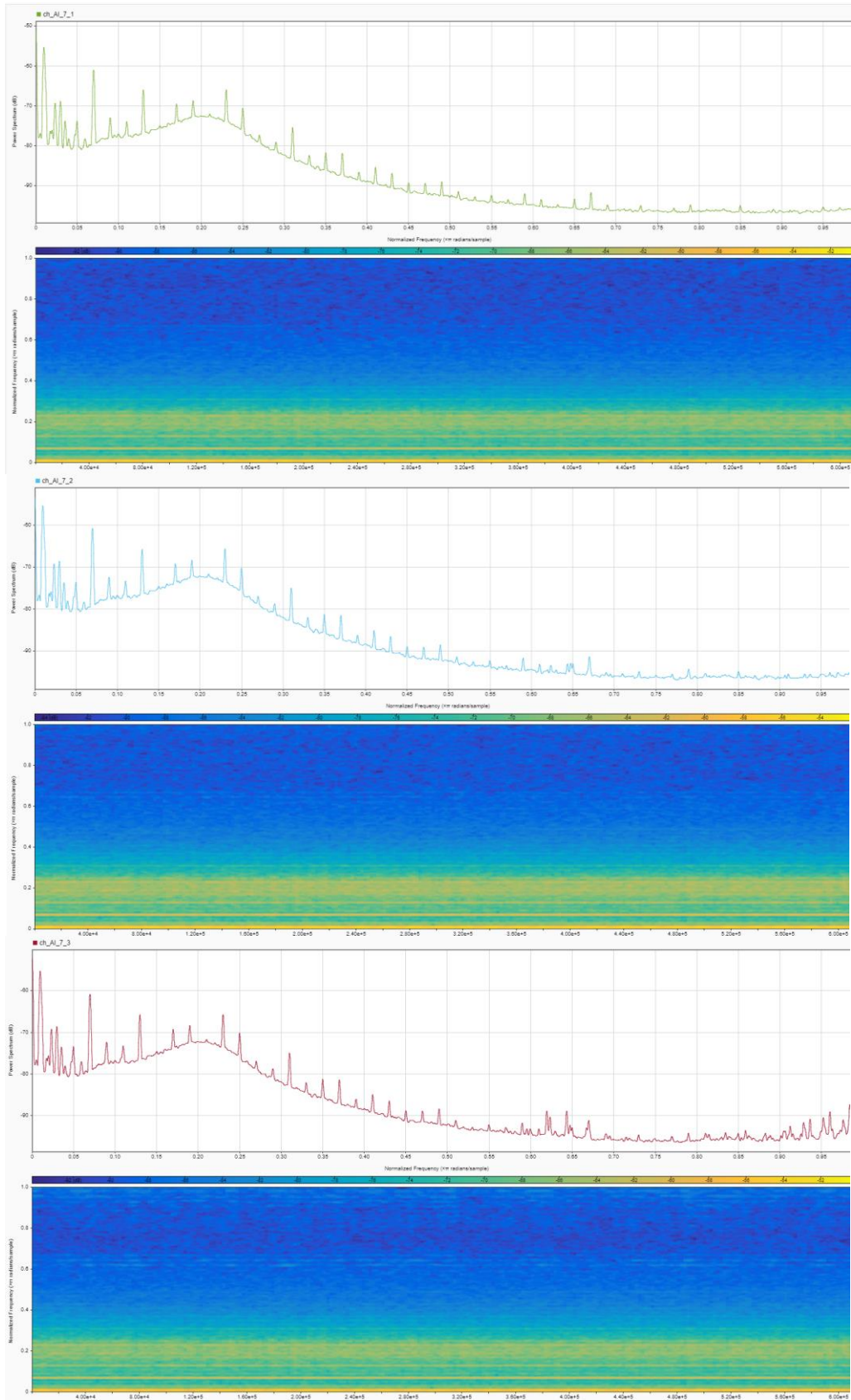


## Lisa 2 sagedusspekter ja spektrogramm katkise laagri 0% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist

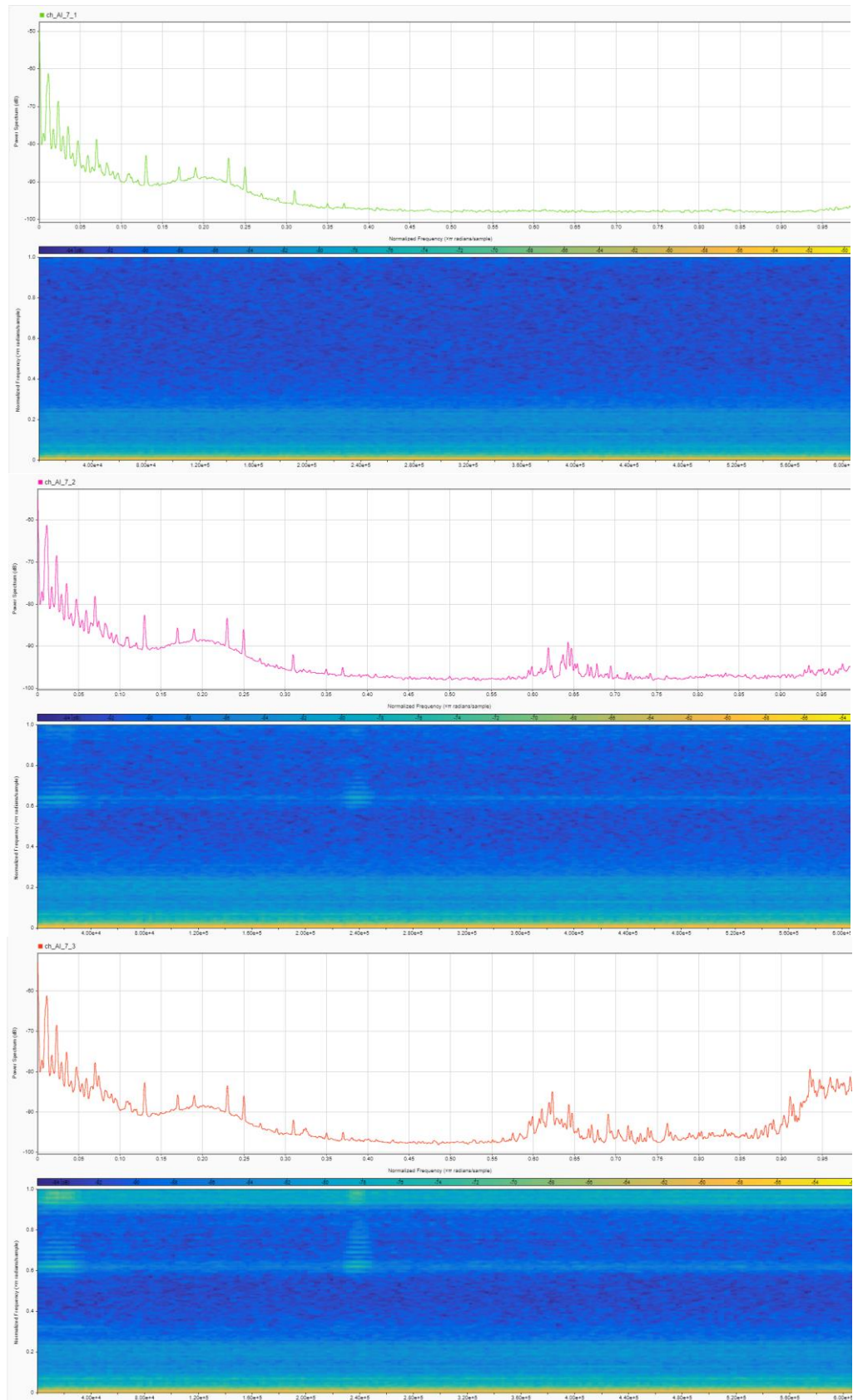




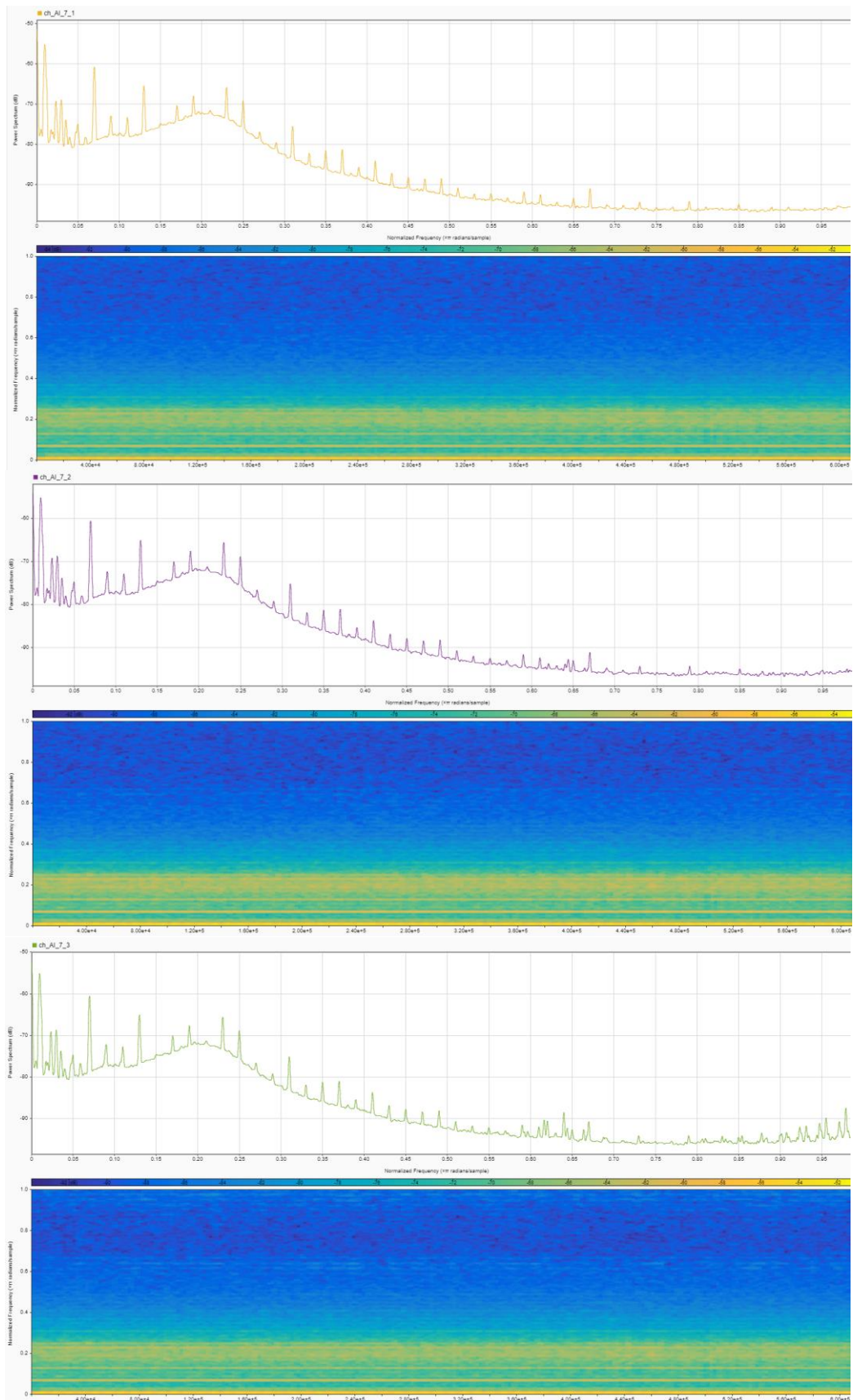
### Lisa 3 sagedusspekter ja spektrogramm korrektse laagri 25% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist



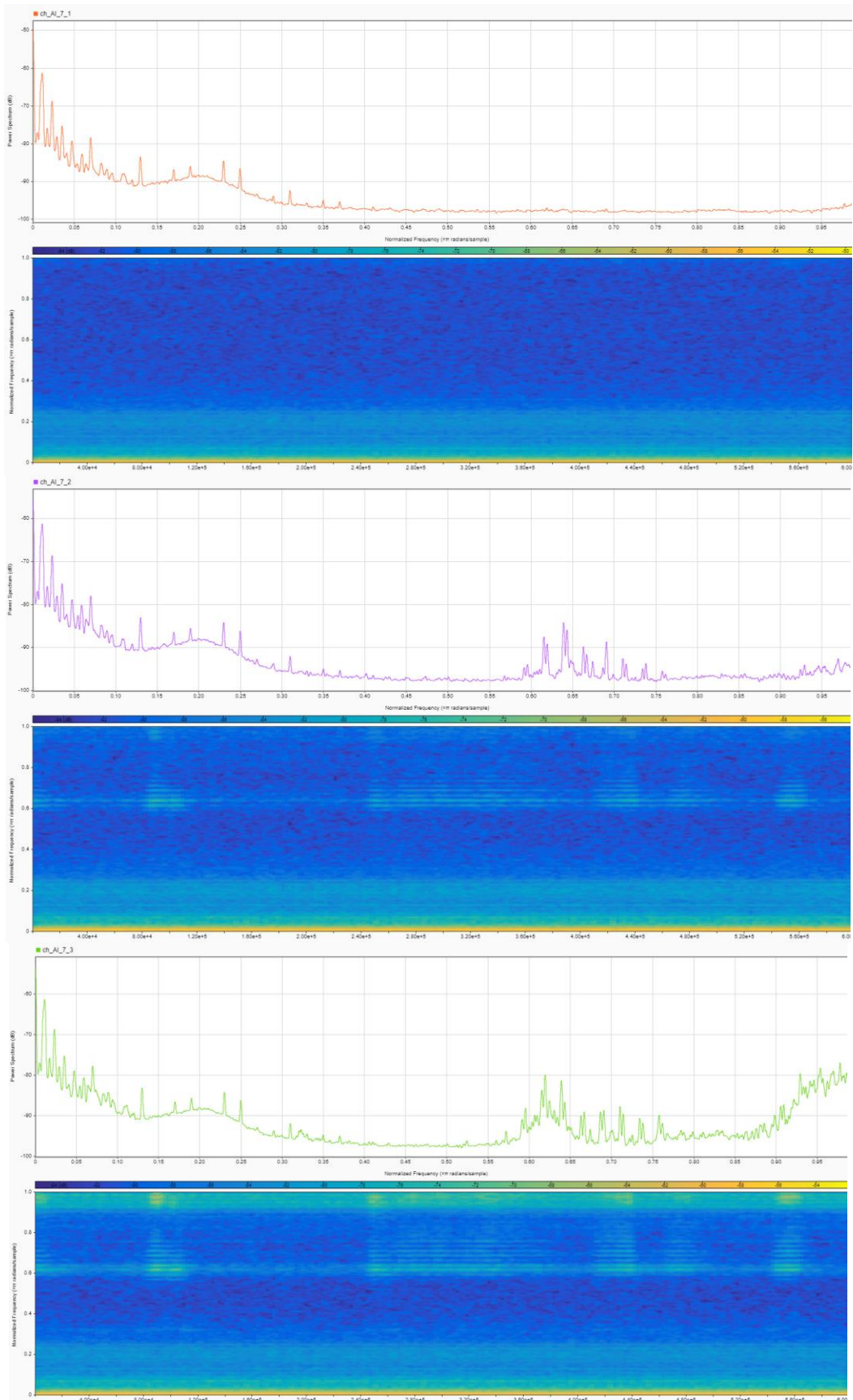
## Lisa 4 sagedusspekter ja spektrogramm katkise laagri 25% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist



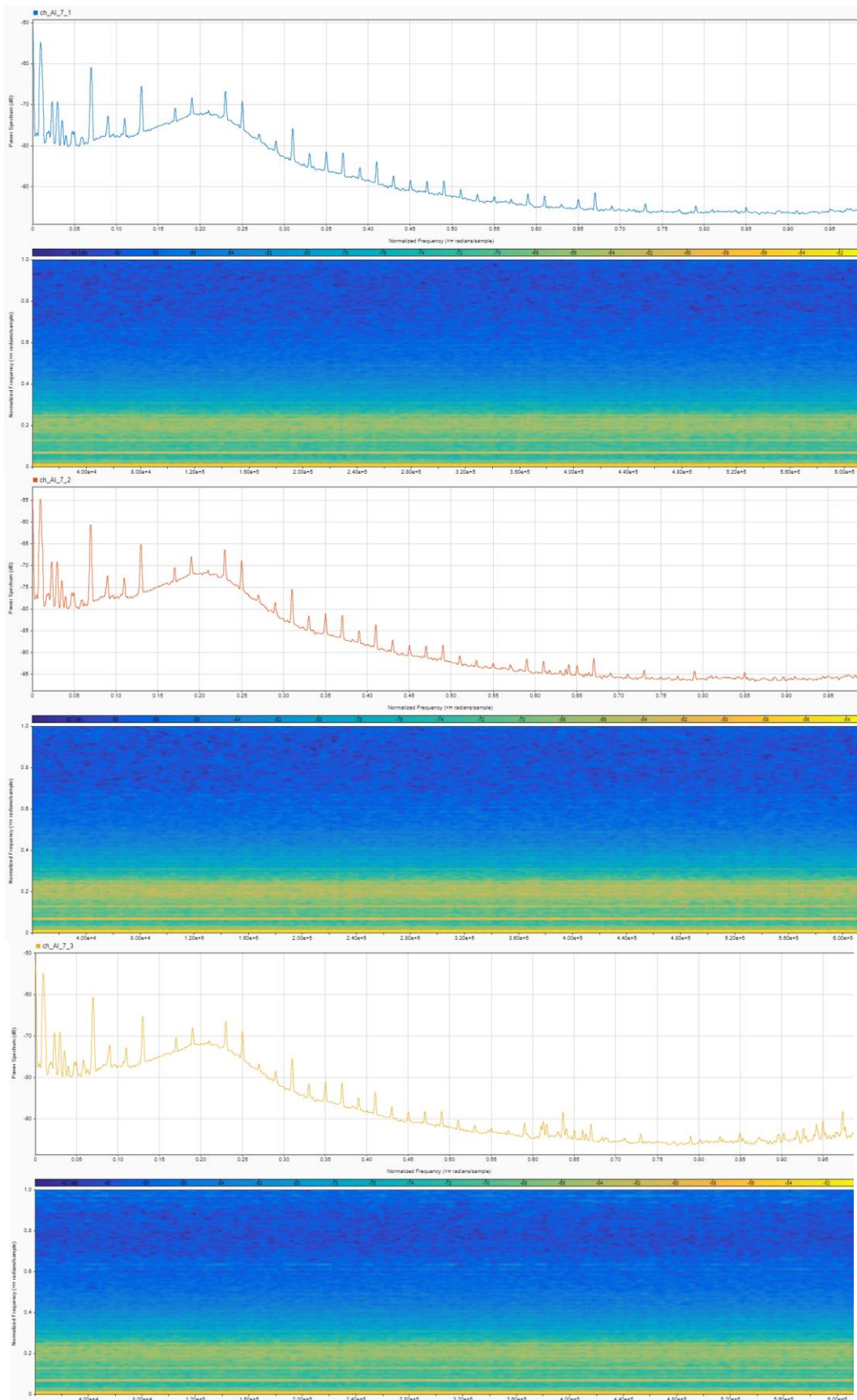
## Lisa 5 sagedusspekter ja spektrogramm korrektse laagri 50% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist



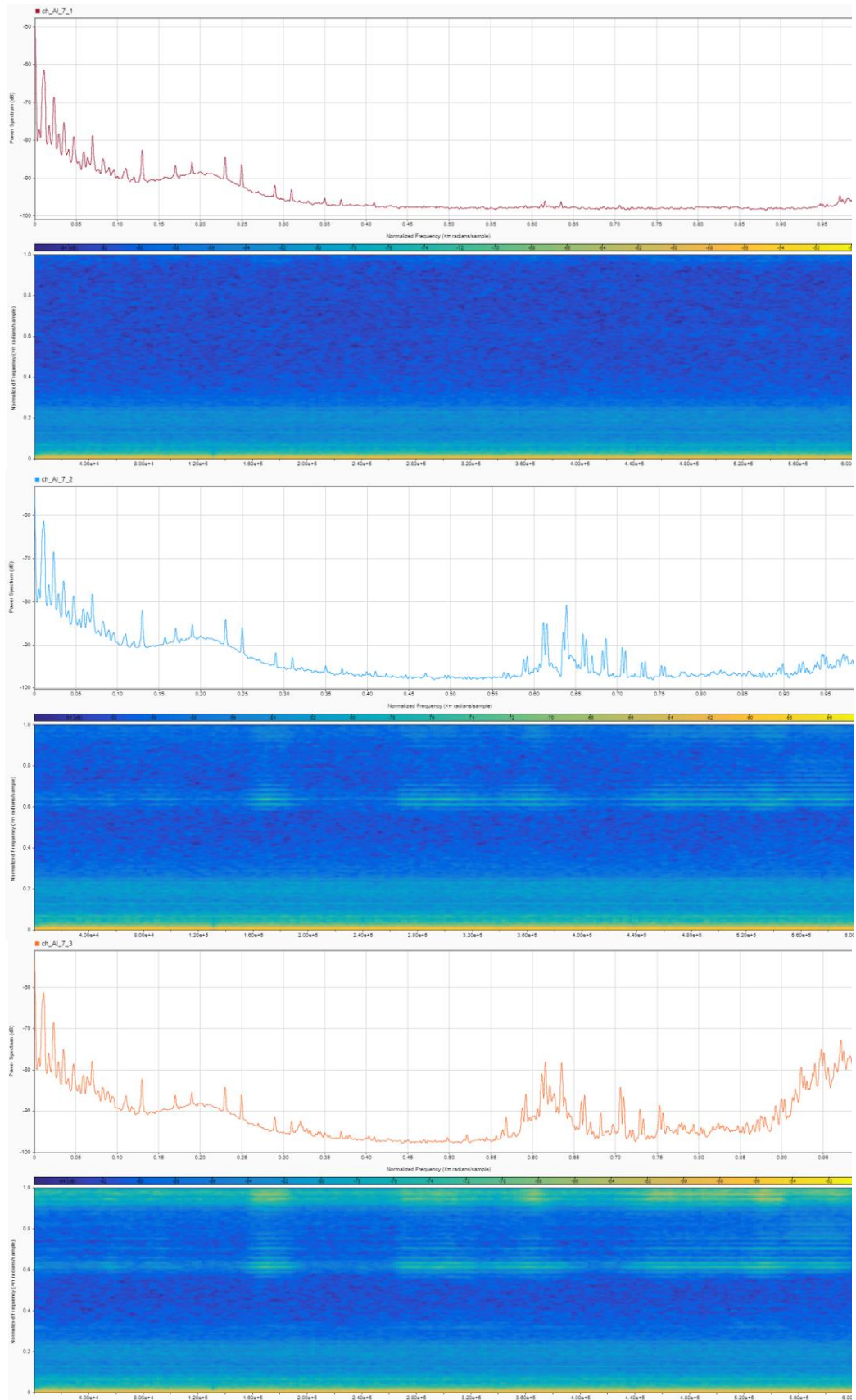
## Lisa 6 sagedusspekter ja spektrogramm katkise laagri 50% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist



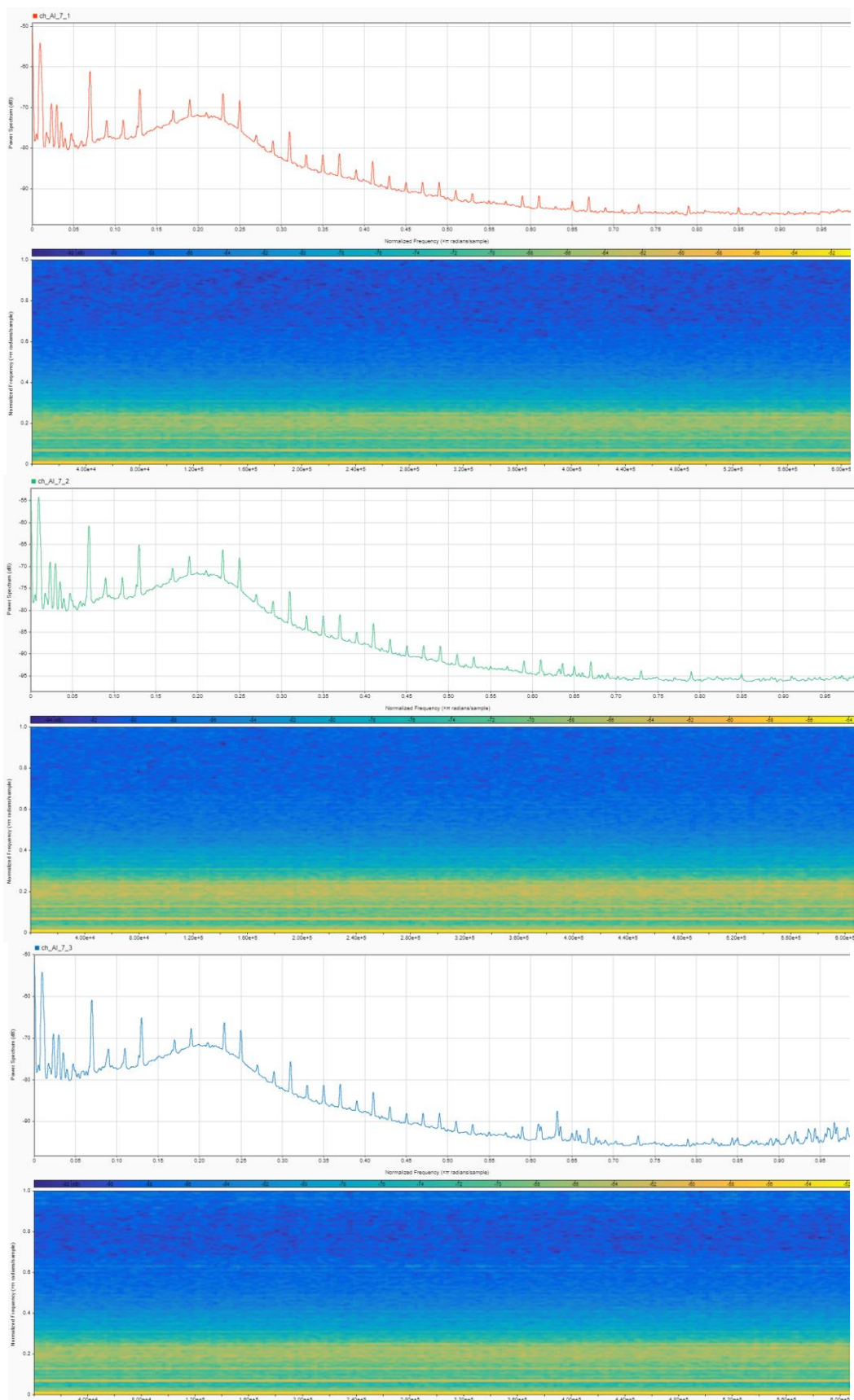
## Lisa 7 sagedusspekter ja spektrogramm korrektse laagri 75% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist



## Lisa 8 sagedusspekter ja spektrogramm katkise laagri 75% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist



## Lisa 9 sagedusspekter ja spektrogramm korrektse laagri 100% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist



# Lisa 10 sagedusspekter ja spektrogramm katkise laagri 100% mootori koormatusega 3 erinevatest andurist

