

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

ATM70LT

Aksel Vain

# **ASÜNKROONMASINA AKUSTILINE RIKKEDIAGNOSTIKA**

Magistritöö

Instituudi direktor ..... prof. Tõnu Lehtla

Juhendaja ..... vanemteadur  
Toomas Vaimann

Lõpetaja ..... Aksel Vain

Tallinn 2016

## AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsentseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 13.05.2016.a.

..... Aksel Vain

ATM70LT

## **Asünkroonmasina akustiline rikkediagnostika**

**Aksel Vain**, üliõpilaskood 132157AAAM, mai 2016. – 79 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Energeetikateaduskond

Elektrotehnika instituut, Elektrimasinate õppetool

Töö juhendaja: vanemteadur Toomas Vaimann

Võtmesõnad: asünkroonmasin, rike, diagnostika, vibratsioon, heli, helilevimine, helifaili-formaadid, digitaalne signaalitöötlus, tehisneurovõrgustik, masinõpe

### **Referaat:**

Lõputöö on 79 lehel, sisaldab 3 tabelit ja 27 joonist.

Lõputöö eesmärk on kindlaks teha, kas nutitelefonidega salvestatud helifailide analüüsi põhjal on võimalik teostada asünkroonmasina rikkediagnostikat.

Lõputöö eripära seisneb selles, et varem pole Eestis elektrimasinate akustilise rikkediagnostikaga tegeletud. Asünkroonmasinale oli tahtlikult tekitatud kindlad rikked ning nende rikete poolt tekitatud heli salvestati nutitelefonidega.

Käesoleva magistritöö käigus uuriti, millised on tavaliselt elektrimasinate rikete tekke põhjused. Samuti uuriti heli ja vibratsiooni seoseid asünkroonmasinas ning vibratsiooni tekitavate jõudude tekke põhjuseid.

Helifailide analüüsimiseks tehti neile kiire Fourier' teisendus, mille abil leiti nende sagedusspekter. Failide sagedusspektri analüüsiks loodi mustrituvastusvõimekusega kahe kihiline tehisneurovõrgustik, mille abil on võimalik kiire Fourier' teisenduse tulemusi kategoriseerida. Loodud tehisneurovõrgustik suudab suure tõenäosusega helifaile õigesti kategoriseerida ning seega saab öelda, et lõputöö ülesanne on positiivselt sooritatud.

ATM70LT

**Acoustic noise fault diagnostics of an induction machine**

**Aksel Vain**, student code 132157AAAM, May 2016. – 79 pp.

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Power Engineering

Department of Electrical Engineering, Chair of Electrical Machines

Tutor of the work: senior research scientist Toomas Vaimann

Key words: induction machine, fault diagnosis, vibration, sound, sound propagation, audio file format, digital signal processing, artificial neural network, machine learning

**Summary:**

This thesis contains 79 pages, it includes 3 tables and 27 figures.

The goal of this master thesis is to investigate the possibility of performing induction machine fault diagnostics using sound files recorded by smartphones.

The peculiarity of this thesis is that nobody has researched acoustic fault diagnostics for rotating electric machines in Estonia before. For this thesis faults in the induction machine were created and the sound made by those faults was recorded with smartphones.

During the research part of this thesis, the causes for rotating electric machine faults were also investigated. The connection between sound and vibration in induction machines and the causes of the forces that create the vibration were also investigated.

For analysing the sound files, fast Fourier transform was used to create the frequency spectrum of the sound files. For analyzing the frequency spectrum of the sound files, a two-layer artificial neural network with pattern recognition capabilities was created, that enables us to categorise the results of the fast Fourier transform. The artificial neural network that was created for analyzing can categorize sound files with great accuracy. In conclusion it can be said that the task of this thesis was completed.

ATM70LT

## **Akustiska feldiagnos av en asynkron maskin**

**Aksel Vain**, Student kod 132157AAAM, Maj 2016. – 79 sidor

TALLINNS TEKNISKA UNIVERSITET

Fakulteten elkraftteknik

Institutionen för systemteknik, Ordförande för elektriska maskiner

Handledare för avhandlingen: äldre forskare Toomas Vaimann

Nyckelord: asynkron maskin, fel diagnos, vibrationer, ljud, ljudutbrednings , ljudfil format, digital signalbehandling, artificiella neurala nätverk, maskininlärning

### **Sammanfattning:**

Denna avhandling är 79 sidor lång, den innehåller 3 tabeller och 27 figurer

Målet med detta examensarbete är att undersöka möjligheten att göra induktionsdiagnostik maskin fel med ljudfiler som spelats in med smartphones.

Det särskilda med denna avhandling är att ingen har undersökt akustiska feldiagnos för roterande elektriska maskiner i Estland innan. För denna avhandling hade de skapat fel för induktion maskinen och ljudet från dessa fel spelades in med smartphones.

Under forskningsdelen av denna avhandling var orsakerna till roterande elektriska maskinfel också undersökts. Sambandet mellan ljud och vibrationer i induktionsmaskiner och orsakerna till de krafter som skapar vibrationen undersöktes också.

För att analysera ljudfiler den snabba Fourier "trans användes för att skapa frekvensspektrum av filerna. För att analysera frekvensspektrum ljudfiler en två lager artificiella neurala nätverk med mönsterigenkänningsfunktioner skapades, som gör det möjligt för oss att kategorisera resultatet av den snabba Fourier "transform. Den artificiella neurala nätverk som skapades för analys kan kategorisera ljudfiler med stor noggrannhet. Sammanfattningsvis kan jag säga att uppgiften med denna avhandling är klar.

# SISUKORD

1. EESSÕNA.....	9
2. LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	10
3. SISSEJUHATUS.....	11
3.1. Teema valiku põhjendus.....	11
3.2. Teema aktuaalsus .....	11
3.3. Elektrimasinate rikete põhjused .....	12
3.4. Uuritav elektrimasin ja selle rikked .....	14
3.4.1. Katkised rootorivardad .....	15
3.4.2. Õhupilu ekstsentrilisus .....	15
3.4.3. Laagrite kahjustused.....	17
4. FÜÜSIKALISTE NÄHTUSTE KIRJELDUSED .....	18
4.1. Heli .....	18
4.1.1. Helivälja muutujad ja lainevõrrandid .....	19
4.1.2. Helikiirus punktallikast .....	22
4.2. Vibratsioon .....	24
4.2.1. Mass-vedru-summuti ostsillaator .....	24
4.2.2. Liidetud parameetritega süsteem.....	26
4.3. Magnetism .....	30
4.4. Heli ja vibratsioon asünkroonmasinas.....	32
4.4.1. Elektromagnetilise müra allikad.....	32
4.4.2. Mehaanilise müra allikad .....	35
4.4.3. Aerodünaamilise müra allikad .....	39
5. INFOTEHNOLOOGILISED JA MATEMAATILISED LAHENDUSED .....	40
5.1. Kasutatud nutitefonid ja heliformaadid .....	40
5.1.1. Nutitefonid.....	40
5.1.2. Audioformaadid .....	41

5.2. Fourier' teisendus .....	42
5.2.1. Fourier' rida.....	42
5.2.2. Fourier' teisenduse põhimõte .....	44
5.2.3. Diskreetne Fourier' teisendus.....	46
5.2.4. Kiire Fourier' teisendus.....	50
5.3. Tehisneurovõrgustik.....	51
5.3.1. Bioloogiline neurovõrgustik.....	51
5.3.2. Tehisneurovõrgustiku mudel.....	52
6. ANALÜÜSI TULEMUSED .....	57
6.1. Kiire Fourier' teisenduse tulemused.....	58
6.2. Analüüsimine tehisneurovõrgustikuga.....	61
7. KOKKUVÕTE.....	64
KASUTATUD KIRJANDUS .....	66
L I S A D .....	68
Lisa 1 Ühe signaali periodogrammide loomise kood.....	69
Lisa 2 Kahe signaali periodogrammide loomise kood.....	71
Lisa 3 Failide osadeks jagamise kood .....	74
Lisa 4 Failide analüüsiks ettevalmistamise kood .....	76
Lisa 5 Tehisneurovõrgustiku loomise kood .....	79

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Elektrotehnika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. T. Lehtla.....

..... 2016

## MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Aksel Vain, üliõpilaskood 132157AAAM

Magistritöö teema: Asünkroonmasina akustiline rikkediagnostika

Ülesanne: Uurida kas on nutitelefoniga salvestatud helifailide põhjal on võimalik avastada ning diagnoosida asünkroonmasina riket.

Lähteandmed:

1. Rikkega masina helifailid
2. Elektrimasinate diagnostika teoreetilised materjalid
3. Akustiliste vibratsioonide diagnostilise kasutamise teoreetilised materjalid

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

Lahendada akustilise diagnostika ülesanne järgnevalt

1. Helifailide sagedusanalüüs
2. Analüüsi tulemuste uurimine ja võrdlemine
3. Analüüsi tulemuste kategoriseerimine edasiseks analüüsiks
4. Masinõppe süsteemi loomine rikete tuvastamiseks

Magistritöö esitada eesti keeles kahes eksemplaris koos eesti- ja kahe võõrkeelse referaadiga hiljemalt 03.06.2016.

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Vanemteadur T. Vaimann .....

Üliõpilane A. Vain .....



# 1. EESSÕNA

Antud magistri lõputöö teema sain Toomas Vaimanni käest, kelle käest sain ka analüüsitud helifailid ning ka vibratsiooni mõõtetulemused. Lõputöö koostamine toimus autori kodus. Tahan ka tänada ka oma tööandjat Stoneridge Electronics'-it kes võimaldas mul lõputööga ka töö kõrvalt tegeleda.

## 2. LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- $a_0$  – Fourier' rea alaliskomponendi kordaja  
 $a_n$  – Fourier' rea koosinuskomponendi kordaja  
 $b_n$  – Fourier' rea siinuskomponendi kordaja  
 $C$  – sumbetegur  
 $c_0$  – laine levimiskiirus või laine faasikiirus keskkonnas  
 $D$  – helienergia tihedus, vastastikku asetsevate kuullaagrite keskpunktide vaheline kaugus  
 $d_b$  – kera diameeter  
 $I$  – heliintensiivsus, elektrivool  
 $K$  – vedru jäikus  
 $k_0$  – akustiline lainenumber  
 $p$  – helirõhk  
 $p_A$  – helirõhu laine amplituud  
 $M$  – mass  
 $m$  – DFT väljundi indeks sagedusalas näiteks:  $0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$   
 $N$  – sampilite arv sisendjada ning sageduspunktide arv DFT väljundis  
 $N_b$  – veerevate elementide arv veerelaagris  
 $n$  – sisendsämplite ajamääramisala indeks,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$   
 $n_m$  – pöörlemissagedus p/min  
 $z_s$  – õhu akustiline takistus  
 $Q$  – heliallika intensiivsus  
 $r$  – magnetiliste suuruste järk  
 $X(m)$  –  $m$ -is DFT väljundkomponent näiteks:  $X(0), X(1), X(2), X(4)$ , jne  
 $x(n)$  – sisendsämplite jada,  $x(0), x(1), x(3)$ , jne,  
 $V(t)$  – nihke kiirus ajas  
 $\nabla^2$  – Laplace'i operaator  
 $\rho_0 c_0$  – keskkonna akustiline eritakistus
- DFT – diskreetne Fourier' teisendus  
FFT – *fast Fourier transform* (kiire Fourier' teisendus)

## **3. SISSEJUHATUS**

### **3.1. Teema valiku põhjendus**

Asünkroonmasina diagnostika kohta on avaldatud palju materjali, näiteks on uuritud staatori signaale [1] ja masina vibratsiooni [2]. Enamasti ongi keskendatud asünkroonmasina elektriliste signaalide uurimisele. Hetkel on akustiline diagnostika jäetud erilise tähelepanuta. Eestis tegeletakse elektrimasinate diagnostika ja akustilise diagnostika uurimisega vähe. See teema käsitleb endas erinevaid füüsika ja infotehnoloogia valdkondi:

- Heli levimine;
- Vibratsiooni ja heli seos;
- Digitaalne andmetöötlus;
- Masinõppimine.

### **3.2. Teema aktuaalsus**

Elektrimasinate diagnostika on viimaste aastakümnete jooksul populaarsust kogunud. Selle teema kohta on kirjutatud palju artikleid ja teadustöid. Asünkroonmasinad on tööstuses laialt kasutuses, kuna need on robustsed ning kuluefektiivsed. Need on samuti üldlevinud kaubanduslikult saadavates aparaatides ning on kriitilised komponendid tööstusseadmetes. Tänapäeval on arenenud riikides iga inimese kohta hinnanguliselt 3 kW elektrimootoreid ning enamuse nendest moodustavad asünkroonmasinad [1].

Viimastel aastatel on huvi elektrimasinate diagnostika vastu kiiresti tõusnud. Kuna maailm liigub tarkade võrkude, hajutatud elektritootmise ja traditsiooniliste fossiilkütuste asendamise suunas, mis on tingitud energiapoliitikast ja CO<sub>2</sub> emissiooni kvootidest, võib järeldada, et töötavate elektrimasinate seisundi jälgimise tähtsus suureneb. Elektrimasinate seisundi jälgimine muutub vajalikuks selleks, et hoida kindlat elektrikvaliteedi ja -varustuse taset uutes hajutatud elektritootmisega süsteemides, kuhu on lisatud palju väikeseid elektrijaamu nagu näiteks elektrituulikud ja hüdroelektrijaamad [1].

Kiire diagnostika teeks rikete avastamise lihtsamaks ning mõningatel juhtudel võib viia tõrgete ärahoidmiseni. Väikesed rikked võivad alguses tunduda ebaolulistena, aga kui probleemidega õigeaegselt ei tegeleta, võivad tõrgetel rängad tagajärjed olla. Elektrimasina seisundi

jälgimisega oleks võimalik rikkeid avastada sellises staadiumis, kus masina remontimine oleks veel mõistlik [1].

### 3.3. Elektrimasinate rikete põhjused

On mitmesuguseid rikkeid, mis võivad mõjutada elektrimasina tööd. Tavaliselt esinevad rikked erinevate pingete ning koormuste koosmõjul. Need on järgmised [3]:

- Soojuslikud pinged, mis on tingitud ülekoormusest, ebaühtlasest temperatuurijaotusest, nn kuumadest punktidest ja kaarleegist;
- Magnetilised pinged, mis on tingitud elektromagnetjõududest, magnetiliselt ebasümmeetrilistest jõududest, mürast ning elektromagnetilisest vibratsioonist;
- Tootmisprotsessist tingitud jääkpinged;
- Dünaamiline pinge, mis on tingitud rootori aksiaalsest jõumomendist ja tsentrifugaaljõududest;
- Pinnakihi pinged, mis on tingitud rootori materjali kulumisest ja saastumisest keemiliste ainete ja niiskuse poolt;
- Mehaanilised pinged, mis on tingitud mehaaniliste osade väsimisest, laagrite kahjustustest, lahtistest laminaadi kihtidest.

Tavaliselt on elektrimasinate rikked tingitud kehvast tootmiskvaliteedist nagu näiteks defektsest sulami valust ning ebakvaliteetsest jätkamisest. Samuti on üks põhjustest elektrimasina ebasobiv kasutamine. Näiteks liigvool, mis on tingitud rootori kinnikiilumisest, võib osutada ohtlikuks elektrimasina seisukorrale [4].

Üks teine võimalus kuidas elektrimasina rikete põhjuseid liigitada oleks selline [5]:

- Karm keskkond;
- Ebasobiv masina valik ja rakendamine;
- Ebakorrektned paigaldused;
- Mehaanilised tõrked;
- Elektrilised probleemid;
- Pinge kõikumised;
- Ebapiisav hooldus;
- Kombinatsioon ühest või enamast eelpool nimetatud probleemidest.

Kõige tavalisem rikke levimise põhjus on karm keskkond. Üks karmi keskkonna komponent on liigne temperatuur, mis on tingitud väliskeskkonnast või mootori probleemidest. Selleks, et kindlustada pikk mootori tööiga, peab see töötama nimitemperatuuri piires. Iga 10 kraadi ülekuumenemist üle nimitemperatuuri vähendab mähise isolatsiooni eluiga poole võrra ning võib viia erinevate isolatsiooni probleemideni [1].

Teine üldlevinud keskkonna tegur, mis põhjustab masina rikkeid on niiskus. Kui mingil põhjusel peaks niiskus masina isolatsiooni pinnale kogunema, siis see võib muutuda elektritjuhtivaks ning lõppeda isolatsiooni või koguni terve elektrimasina rikkega. On võimalus, et aja jooksul imendab isolatsioon niiskust enda pinnalt, mille tõttu isolatsiooni takistus langeb tasemele, kus toimub rike. Peale eelnevalt mainitud keskkondade on veel teisigi võimalusi ja ohtusid nagu näiteks ohtlikud gaasid ja aurud, soolarikas õhk, liigne tolm ning mustus jne [5].

On oluline, et sobiva suuruse ja tüübiga masin valitakse töötama õige koormusega. Lisaks on veel muid aspekte, mida peab arvestama masina valimisel. Näiteks liiga suurte koormuste tsüklid võivad tekitada masinale enneaegseid rikkeid. Kui need tsüklid on seotud lisaks veel eespool mainitud karmide keskkondadega, siis peab olema korrektselt teostatud masina valik selleks, et masina eluiga oleks maksimaalne. Muidugi võib olla olukordi, kus masina ebasobiva kasutamise mõju on piisavalt väike, et mõjutada märkimisväärselt masina eluiga. Samas peab meeles pidama, et väiksemadki vead ja rikked võivad viia tõsiste tõrgeteni, kui neid õigeaegselt ei parandata [1].

Kui masin on ebakorrektselt paigaldatud, siis tulemuseks on jällegi masina rikked. Masinad on tavaliselt seotud mingit sorti koormusega. See tähendab, et kõik ühendused ja ülekanded, näiteks rihmad ja muud sarnased peavad olema korrektselt joondatud. Vastasel juhul võib tekkida liigne vibratsioon, mis võib masinat kahjustada. Liigne vibratsioon võib tekkida ka valesti valitud või mitte piisavalt pingutatud ühenduspoltidest. Need vibratsioonid võivad olla äärmiselt ohtlikud laagritele ja masina võllile ning võivad tekitada isegi mähiste läbipõlemist [5].

Üks levinumaid elektrimasinate rikke põhjuseid on masina ülekoormamine. Kui mingil põhjusel on masin liiga koormatud, siis hakkab see liigselt voolu tarbima ning ühtlasi tõuseb ka masina temperatuur. Nimivoolu ning -temperatuuri ületamisel masina eluiga väheneb.

Mõningatel juhtudel tekitab liigvoolu tarbimist rootori kinnikiilumine ning seda võib omakorda põhjustada laagrite purunemine, mis on samuti üks levinumaid rikkeid [1].

Elektrimasina eluiga võib lühendada ka valesti valitud toitepinge. Mõningatel juhtudel, kui pinge kõikumised on liiga suured, võib see viia elektrimasina kiire purunemiseni. Vaseskadusid saab vähendada kõrgete liinipingetega, teisest küljest viib suurenenud magnetvoog kõrgemate rauaskadudeni. Katsed on näidanud, et toitepinge tõusmine üle 10% nimipingest põhjustab raua üleküllastumist, mis viib masina temperatuuri kahjulikule tõusmisele [5].

Tasakaalustamata faaside vahelised pinged võivad samuti olla elektrimasinatele kahjulikud, kuna need põhjustavad ebaühtlast voolutarbimist, mis jällegi viib masinale kahjuliku kuumenemiseni. See probleem muutub aina suuremaks tänu võrgus olevatele liigsetele harmoonikutele ja tarbijate mittelineaarsetele koormustele. Need harmoonikud ja ootamatud mittelineaarsed koormused võivad viia ebaühtlaste vooludeni, mis ei kahjusta ainult elektrimasinat vaid ka nende juurde kuuluvaid jõuelektroonika seadmeid [1].

### 3.4. Uuritav elektrimasin ja selle rikked

Järgnevalt kirjeldatakse käesolevas magistritöös kasutatud elektrimasinat ja uuritud rikkeid. Masinaks oli Soomes Aalto Ülikoolis olev kolmefaasiline asünkroonmasin, mille andmed on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Masina nimiandmed

Nimikiirus	1680 p/min@60 Hz; 1400 p/min @50 Hz
Nimivõimsus	22 kW@60 Hz; 18 kW@50 Hz
Ühendus	Täht (Y)
Võimsustegur	0.860
Pooluste arv	4
Rootori varraste arv	40
Staatore uurete arv	48

Järgnevalt on loetletud rikked, mis elektrimasinale tekitab:

- Üks katkine rootorivarras;
- Kaks järjestikust katkist rootorivarrast;
- Kaks katkist rootorivarrast, mille vahel on neli tervet varrast;
- Kolm järjestikust rootorivarrast;
- Dünaamiline ekstsentrilisus;
- Dünaamiline ekstsentrilisus kahe katkise rootorivardaga, mille vahel on neli tervet varrast;
- Dünaamiline ekstsentrilisus kahe katkise vardaga, mille vahel on neli tervet varrast ning rootori võllil vale suurusega kuullaager.

### **3.4.1. Katkised rootorivardad**

Katkiste rootorivarraste puhul suureneb vool kõrval olevates tervetes varrastes. Kuna voolutihedus on tervetes varrastes suurem kui ettenähtud, siis need hakkavad kuumenema ning võivad teatud aja jooksul ka puruneda. Olukord võib ka eskaleeruda ning viia terve rootori hävinemiseni. Katkised vardad tekitavad ebaühtlast temperatuurijaotust ning radiaalseid jõudusid, magnetvälja vähenemist ja erinevate vibratsiooni komponentide esinemist.

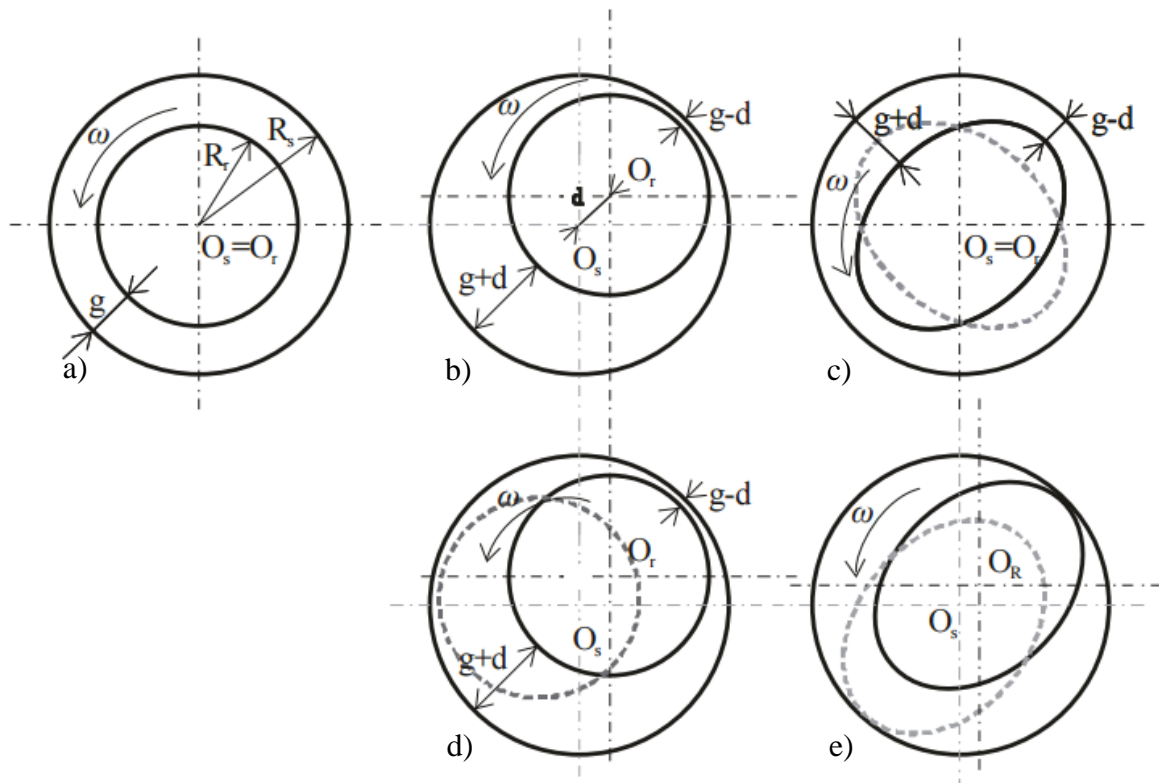
Enamasti purunevad rootori vardad järgmistel põhjustel [1]:

- Termilisest ülekoormusest tingitud termilised ülepinged, ebaühtlused, kuumad punktid, liigsed kaod, sädemed jne;
- Ebaühtlasest magnetväljast tingitud magnetilised pinged, vibratsioonid;
- Võlli jõumomendist, tsentrifugaaljõududest ja tsüklilistest pingetest tingitud dünaamilised pinged;
- Lahtistest teraslehtedest, väsinud komponentidest või laagri purunemisest tingitud mehaanilised pinged.

### **3.4.2. Õhupilu ekstsentrilisus**

Rike seisneb selles, et staatori ja rootori vaheline õhupilu on ebaühtlane. See võib olla tingitud tootmisprotsessis olevatest ebatäpsustest nagu näiteks materjali tugevusest, tootmise tolerantsidest, võlli ja laagrite väändumisest jne. Ekstsentrilisust võib leida mingil määral kõikidest elektrimasinatest ning seda teemat on väga süviti uuritud. Tegelikult on kuni 10%

ekstsentrilisust kõikides elektrimasinates lubatav. Joonisel 3.1 on illustreeritud erinevad ekstsentrilisuste tüübid [1].



Joonis 3.1. Rootori ekstsentrilisused: a) terve rootor; b) staatiline; c) elliptiline; d) ja e) dünaamiline ekstsentrilisus [6]

### Staatiline ekstsentrilisus

Juhul kui staatori pöörlemistelg langeb kokku staatori sümmeetriateljega, aga ei kattu rootori sümmeetriateljega (joonis 3.1. b) siis seda kutsutakse staatiliseks ekstsentrilisuseks. See tähendab, et õhupilu väikseim pikkus on ruumis fikseeritud.

### Elliptiline ekstsentrilisus

Joonisel 3.1. c on kujutatud elliptilist ekstsentrilisust. Sellel puhul rootori ja staatori sümmeetriapunktid kattuvad, aga rootor ise on elliptilise kujuga. Ekstsentrilisus muutub ajas sõltuvalt rootori asendist [1].

### Dünaamiline ekstsentrilisus

Dünaamilise ekstsentrilisuse puhul on rootori sümmeetriapunkt nihutatud eemale staatori keskmest. Rootori sümmeetriapunkt tiirleb ümber staatori sümmeetriapunkti. Selle tõttu muutub ka õhupilu vähim suurus [7].



### **Segu erinevatest ekstsentrilisustest**

Ekstsentrilisuste koosmõju on kõige tõsisem ekstsentrilisuste probleem. Sellel juhul on rootori ja staatori ning pöörlemise sümmeetriapunktid teineteisest nihkes. Seega eksisteerivad korraga nii staatiline kui ka dünaamiline ekstsentrilisus. Selline olukord on ajast sõltuv ning õhupilu suurus sõltub rootori mehaanilisest asendist.

### **3.4.3. Laagrite kahjustused**

Laagrite kahjustused on statistiliselt ühed enim levinumad elektrimasinate rikked. Peamised laagrite kahjustuste tekkepõhjused on järgmised:

- Saastumine ja korrosioon;
- Ebasobiva määride kasutamine;
- Ebasobiv kuullaagrite paigaldamine (laagri jõuga jooksu või võllile surumine).

Laagri defektid tekivad tavaliselt metalli väsimisest kuid ka teistel põhjustel, näiteks väärade määride kasutamine, mehaanilised tõuked või raputused, ülekuumenemine, mittevajalikud lisandid sulamites, mehaaniline ülekoormus [4].

Laagri kahjustuste korral on masina hõõrdetegur muutunud, mis mõjutab omakorda rootori voolusid ja mehaanilist kiirust. Sellest võib järeldada, et peamised laagri kahjustuste sümptomid on ebaühtlane töötalitus, vähenenud täpsus ning ebatavaline müra. Ebaühtlased mootori pöörded tekitavad masinas vibratsioone, mis võivad masinat kahjustada ning rikke levimise kiirust suurendada [1].

## 4. FÜÜSIKALISTE NÄHTUSTE KIRJELDUSED

Heli on defineeritud kui võnked, mis on edastatud läbi elastse tahkise, vedeliku või gaasi ning mille sagedus jääb vahemikku 20...20000 Hz, mida on võimeline kuulma inimkõrv. Helikõrgus on heli toon, mille määrab helilaine sagedus. Kõrge sagedusega (lühike lainepikkus) helil on kõrge helikõrgus ning samas madalasagedusega (pikk lainepikkus) helil on madal helikõrgus [8].

Vibratsioon on elastse keha või keskkonna osakeste piiratud edasi-tagasi liikumine muutuvalt vastandsuundades oma tasakaalupunktist, kui tasakaalu on häiritud. Selleks, et vibreerida peab keha või süsteem omama kahte omadust: elastsus ja mass. Vibratsiooni amplituud on vibreeriva keha või osakese suurim kõrvalekalle tasakaalupunktist [8].

Müra on ebameeldiv või mittevajalik heli. Tehakse vahet õhumüral ja müral, mis levib läbi tahkise. Õhus tekkinud müra on tekitatud suurte õhuhulkade liikumise poolt ja ka kõrgsurve kasutamise poolt. Tahkise müra on müra, mida kannavad edasi tahkete objektide vibratsioonid [8].

Magnetväljaks nimetatakse voolude vastastikmõju. Nimetus põhineb H. C. Oerstedil poolt 1820. aastal tehtud avastusel, et voolu tekitatud väli avaldab magnetnõelale orienteerivat mõju. Seega muudavad liikuvad laengud ümbritseva ruumi omadusi – tekitavad temas magnetvälja. See väli avaldub temas liikuvatele laengutele mõjuvate jõududena [9].

### 4.1. Heli

Helilaine on tekitatud võnkumise objekti poolt ning seda võib vaadata kui mehaanilist häiringut, mis levib lõpliku kiirusega läbi keskkonna. Helilained on väikese amplituudiga adiabaatilised võnkumised, mida iseloomustab laineikiirus, lainepikkus, sagedus ja amplituud. Õhus on helilained pikilained, see tähendab, et võnkumine toimub laine levimise suunas. Teiste sõnadega osakeste liikumise suund on paralleelne energia levimise sihiga. Ristilained on lained, mille võnked on risti laine levimise suunaga ning eksisteerivad elastses keskkonnas. Näiteks elektromagnetlained on ristilained [8].

Kõik helilained omavad standardolukordadel ühist teguviisi nagu näiteks [8]:

- Peegeldumine – nähtus, kus leviv laine lüüakse kahe erineva mehaaniliste omadustega keskkondade vahel olevalt pinnalt tagasi;
- Refraktsioon – leviva laine suuna muutumine, kui see läheb ühest keskkonnast teise;
- Difraktsioon – nähtus, mille korral lained painduvad, näiteks painduvad ümber väikeste takistuste või levivad väikesest avast välja;
- Hajumine – liikumissuuna muutumine;
- Interferents – kahe laine teineteise mõjutamine, näiteks lained liituvad kui need kokku sattuvad;
- Neeldumine – nähtus, kui lainet ei peegeldata pinnalt tagasi;
- Dispersioon – laine murdumine sõltuvalt sagedusest.

#### 4.1.1. Helivälja muutujad ja lainevõrrandid

Akustikas ei ole helilained piiratud mitte ainult kuulmismeelega, vaid on üldiselt määratletud kui väikesed võnkumised rõhus, keskkonna tiheduses, temperatuuris ja osakeste kiiruses lainet kandvas keskkonnas nagu näiteks õhk. Häiringud, mis keskkonnas võnkumist tekitavad on näiteks tahked vibreerivad pinnad või kiired õhuvoolud. Sellised võnkumised moodustavad ruumilises keskkonnas helivälja. Akustikas iseloomustavad rõhku ja kiirust keskkonnas muutujad õhurõhk  $p$  ja õhuosakeste võnkekiirus  $v$ . Valem, mida kutsutakse akustilise liikumise võrrandiks või lainevõrrandiks ning mis iseloomustab laine levimist homogeenes keskkonnas on järgmine [8], [10]:

$$\nabla^2 p(\vec{r}, t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (4.1)$$

kus  $\vec{r}$  – elemendi tasakaalupunkt,

$c_0$  – helilaine levimiskiirus või laine faasikiirus keskkonnas (õhu puhul  $c_0 = 344$  m/s 20°C temperatuuri juures),

$t$  – aeg,

$p$  – helirõhk,

$\nabla^2$  – Laplace'i operaator.

Näiteks oletame, et ühemõõtmeline helilaine (tasalaine) liigub suunas  $x$ . Sel juhul oleks selle võrrand [8]:

$$\nabla^2 p(x, t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (4.2)$$

Üldine lahendus sellele võrrandile oleks siis

$$p(x, t) = g_1\left(t - \frac{x}{c_0}\right) + g_2\left(t + \frac{x}{c_0}\right), \quad (4.3)$$

kus  $g_1(\cdot)$  ja  $g_2(\cdot)$  on suvalised funktsioonid, kus  $g_1(t - x/c_0)$  iseloomustab laine levimist  $+x$  suunas ja  $g_2(t + x/c_0)$  iseloomustab  $-x$  suunal. Tasalaine jaoks, mis muutub ajas sinusoidaalselt ning liigub  $+x$  suunas võib võrrandit kirjutada

$$p(x, t) = p_A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c_0}\right), \quad (4.4)$$

kus  $p_A$  – helirõhu laine amplituud,  
 $\omega = 2\pi f$ .

Tihti peale kasutatakse teoreetilistel õpingutel seda valemit komplekstasandil

$$p(x, t) = p_A e^{j(\omega t - k_0 x)}, \quad (4.5)$$

kus  $k_0$  – akustiline lainenumber, mille väärtus on  $\omega/c_0$ .

Akustilist lainepikkust  $\lambda_0$ , mis on pöördvõrdeline lainenumbriga, saab avaldada funktsioonina, mis on sõltuv  $c_0$ -ist ja  $f$ -ist [8]

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0} = \frac{2\pi c_0}{\omega} = \frac{c_0}{f} [m], \quad (4.6)$$

kus  $f$  – lainesagedus hertsides.

Praegu käsitletava tasalaine helivälja osakeste liikumise kiiruse saab tuletada helirõhust [10]:

$$v(x, t) = - \frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \frac{p_A}{\rho_0 c_0} e^{j(\omega t - k_0 x)}, \quad (4.7)$$

kus  $\rho_0$  – õhu tihedus,  
 $\rho_0 c_0$  – keskkonna akustiline eritakistus.

Akustikas nimetatakse helirõhu ja osakeste võnkekiiruse vahelist suhet õhu akustiliseks takistuseks:

$$z_s = \frac{p}{v} [Ns/m^3]. \quad (4.8)$$

Õhu akustiline takistus on üldiselt kompleksarv, mis iseloomustab energia levimise võimalikkust kõrvalkeskkonna osakestele laine levimise suunas. See on analoogne elektrotehnikas tuntud Ohmi seadusele [11]. Tasalaine puhul, mille levimine on täielik, kehtib  $z_s = \rho_0 c_0$ . Iseäraliselt kutsutakse muutujat  $\rho_0 c_0$  keskkonna akustiliseks eritakistuseks. Kui akustilise takistuse ja eritakistuse vahel ilmneb levimisteedkonnal katkevusi või ebakõlasid, siis see põhjustab heli peegeldumist ja energia hajumist [10].

Helilainete poolt edastatud energiat  $I$  nimetatakse heliintensiivsuseks ja helitugevuseks. Heliintensiivsus on energia hulk, mida kannab helilaine ajaühiku jooksul läbi ühikpinna, mis on risti laine levimissuunaga [11]:

$$I = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} p v dt \quad [W/m^2], \quad (4.9)$$

kus  $T_p$  – signaali periood.

Kui helirõhku ja osakeste võnkekiirust kirjeldada kompleksarvuna, siis heliintensiivsuse võrrand tasalaine puhul oleks [8]:

$$I = \frac{1}{2} \Re(p v^*) = \frac{p_A^2}{2\rho_0 c_0}, \quad (4.10)$$

kus  $\Re(\cdot)$  ja  $*$  tähendavad vastavalt kompleksarvu reaalosa ja kaaskompleksi.

Kiirgusvõimsus  $\Pi$  on kogu energia, mis on ajaühiku jooksul suunatud läbi pinna  $S_p$ , mis on risti laine levimissuunaga [8]:

$$\Pi = \int_{S_p} I dS \quad [W], \quad (4.11)$$

kus  $S$  – kiirgava objekti pindala.

Allika poolt kiiratud helitugevuse sõltuvust iseloomustab võrrand, mis seob allika pinna võnkekiiruse ümbritseva keskkonna akustilise eritakistusega [8]:

$$\Pi = \rho_0 c_0 S \langle v^2 \rangle \sigma, \quad (4.12)$$

kus  $\langle v^2 \rangle$  – heli võnkekiiruse efektiivväärtus,  
 $\sigma$  – heli kiirguse efektiivsus.

Heli energiatihedus ühe keskkonna ühiku kohta on

$$D = \frac{p_A^2}{\rho_0 c_0^2} = \frac{p_A^2}{\gamma P_0}, \quad (4.13)$$

kus  $P_0$  – keskkonna staatiline rõhk,

$\gamma$  – keskkonna adiabaatliline tegur (soojusmahtuvus tegur), mis õhu puhul on 1,4.

#### 4.1.2. Helikiirgus punktallikast

Oletame, et sfääriliselt sümmeetriline allikas, näiteks pulseeriv kera raadiusega  $a$  ja pinna võnkekiirusega  $u(t)$ . Kui kasutada sfäärilist koordinaatsüsteemi, kus allikas asub algpunktis saab lainevõrrandit kirjutada [8]:

$$\frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p(r, t)}{\partial r} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (4.14)$$

kus helirõhk  $p(r, t)$  heliväljas on funktsioon radiaalsest kaugusest  $r$  ja ajast  $t$ . Oletame, et kera pulseerib ajas sinusoidaalselt  $u(t) = u_0 e^{j\omega t}$ . Samuti muutub ka helirõhk siis sinusoidaalselt  $p(r, t) = p_A(r) e^{j\omega t}$ . Seega saab lainevõrrandit kirjutada järgmisel kujul [8]:

$$\frac{d^2 p_A(r)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dp_A(r)}{dr} - k_0^2 p_A(r) = 0. \quad (4.15)$$

Üldiselt võib võrrandi 3.15 lahendiks pidada

$$p_A(r) = \frac{A}{r} e^{-jk_0 r} + \frac{B}{r} e^{jk_0 r}, \quad (4.16)$$

kus  $A$  – konstant, mis tähistab allikast eemalduvat lainet,

$B$  – konstant, mis tähistab allika sissepoole liikuvat lainet.

Vabas heliväljas  $B = 0$  kuna puudub sissepoole liikuv helilaine, sest akustiliselt sidumata piirtingimused lähenevad lõpmatusle. Kera pinnal nõuavad akustilised piirtingimused, et pinna normaalkiirus  $u_0$  oleks võrdne keskkonna võnkekiiruse vastava komponendiga, mis on

$$v_A(r)|_{r=a} = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \left. \frac{dp_A(r)}{dr} \right|_{r=a} = u_0. \quad (4.17)$$

Seega saab konstanti  $A$  tuletada valemist 4.17 ning helivälja helirõhk on:

$$p_A(r) = \frac{j\rho_0 c_0 k_0 Q}{4\pi r} \frac{1 - jk_0 a}{1 + k_0^2 a^2} e^{-jk_0 r}, \quad (4.18)$$

kus  $Q$  – allika intensiivsus, mida saab kirjeldada valemiga  $4\pi a^2 u_0$ .

Võrrand 4.18 näitab, et kera poolt tekitatud helirõhu amplituud on vabas väljas pöördvõrdeline vastuvõtja ja allika vahelise kaugusega ning on samuti sõltuv allikaintensiivsusest, sagedusest, allika mõõtmetest ja keskkonna omadustest. Võib märkida, et madalatel sagedustel, kui allika raadius on palju väiksem akustilisest lainepikkusest, näiteks kui  $k_0 a \ll 1$  siis  $|p_A| = (\rho_0 c_0 a u_0)(k_0 a)/r$ . Kõrgetel sagedustel, kui allika raadius palju suurem halilainepikkusest, näiteks  $k_0 a \gg 1$  siis  $|p_A| = (\rho_0 c_0 a u_0)/r$ . Seega näib, et antud võnkeamplituudi  $u_0$  puhul on helirõhul heliväljas madalamatel sagedustel väiksem võnkeamplituud, seega näidates madalat helikiirgamise efektiivsust. Tavaliselt on vaja suurt allikat ( $a \uparrow$ ) või suurt allika võnkeamplituudi ( $u_0 \uparrow$ ) selleks, et madalate sageduste akustiline reageering oleks samal tasemel kõrgete sageduste reageeringuga. Eriti hästi on seda näha ja kuulda kõlarite puhul [8].

Kui allikas vastab tingimusele  $k_0 a \ll 1$ , siis seda kutsutakse punktallikaks ning selle helirõhku iseloomustab võrrand

$$p_A(r) = \frac{j\rho_0 c_0 k_0 Q}{4\pi r} e^{-jk_0 r}. \quad (4.19)$$

Keskkonna osakeste võnkekiiruse võrrand on

$$v_A(r)|_{r=a} = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{dp_A(r)}{dr} = \frac{p_A}{\rho_0 c_0} \left(1 - \frac{1}{jk_0 r}\right). \quad (4.20)$$

Laine akustiline takistus on

$$z_s = \frac{p}{v} = \rho_0 c_0 \cdot \left(\frac{jk_0 r}{jk_0 r - 1}\right). \quad (4.21)$$

On näha, et nii õelda lähivälja puhul on välja punkt väga lähedal allikale kui võrrelda seda lainepikkusega (näiteks  $k_0 r \ll 1$ ), siis osakeste võnkekiiruse ja helirõhu vaheline faasinurk on  $90^\circ$  ning allika ja keskkonna vahel liikuv energia hulk nii suur, et jääb mulje nagu osa keskkonda liiguks koos allikaga [10].

Kaugväljas, kus  $k_0 r \gg 1$ , osakeste võnkekiirus ja helirõhk võnguvad teineteisega samas faasis nagu tasalaine. Sel juhul on akustiline takistus võrdne keskkonna akustilise eritakistusega. Seega on energia keskkonna poolt edasi kantud ja levib keskkonna osakeste liikumise kaudu lõpmatusse. Heliintensiivsust ( $+r$  suunas) saab igas välja punktis määrata valemiga:

$$I = \frac{1}{2} \Re e(p_a v_a^*) = \frac{\rho_0 c_0 k_0^2 Q^2}{32\pi^2 r^2}. \quad (4.22)$$

Tihti pakub huvi allika poolt kiiratud energia hulk, sest see näitab kui palju allikas mõjutab keskkonda. Seega on helitugevus kogu energia, mis on kiiratud läbi kera pinna, mis ümbritseb allikat, ajaühikus ning seda iseloomustab valem

$$\Pi = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi I r^2 \sin\theta d\theta d\varphi = \frac{\rho_0 c_0 k_0^2 Q^2}{8\pi}. \quad (4.23)$$

Nagu on näha on kogu kiirgusvõimsus radiaalsest kaugusest sõltumatu.

## 4.2. Vibratsioon

### 4.2.1. Mass-vedru-summuti ostsillaator

Väga lihtne võnkuv süsteem on klassikaline ostsillaator, mis koosneb kahest lihtsast elemendist: massist ja vedrust [12]. Kui seda segada, siis see hakkab vabalt vibreerima ja jääb püsiolekusse võnkuma ilma, et võnkeamplituud väheneks, sest ühtegi energia hajutamismehhanismi ei ole süsteemi lisatud. Reaalselt on kõikides võnkesüsteemides mitmeid energiat hajutavaid mehhanisme nagu näiteks hõõrdumine ja materjali erinevad viskoossused. See tähendab, et kui süsteemi pidevalt uut energiat ei lisata siis võnkumine aja jooksul sumbib. Näiteks joonisel 4.1 on kujutatud mass-vedru-summuti süsteemi mida mõjutatakse pidevalt jõuga  $F(t)$ . Selle süsteemi võrrand on [8]:

$$M \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + C \frac{dX(t)}{dt} + KX(t) = F(t), \quad (4.24)$$

kus  $M$  – mass,

$C$  – sumbetegur,

$K$  – vedru jäikus

Oletame, et süsteemi mõjutab sinusoidaalne jõud  $F_0 e^{j\omega t}$ . Püsioleku lahenduste jaoks võime oletada, et massi nihkumine allub seaduspärasusele  $X_0 e^{j\omega t}$ . Seega muutub võrrand 4.24

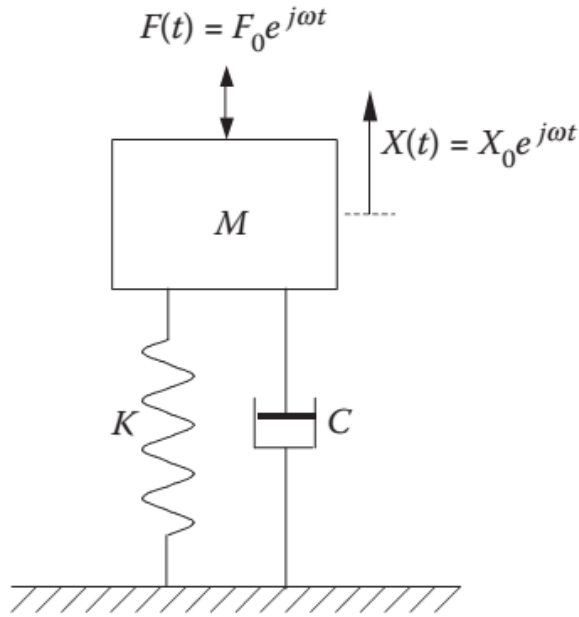
$$X_0(-\omega^2 M + j\omega C + K)e^{j\omega t} = F_0 e^{j\omega t}. \quad (4.25)$$

Seeg saab nihkumist kirjeldada

$$X_0 = \frac{F_0}{K - \omega^2 M + j\omega C} = \frac{F_0 e^{j\varphi}}{\omega \sqrt{(K/\omega - \omega M)^2 + C^2}} \quad (4.26)$$

kus  $\tan\varphi$  on  $\frac{K/\omega - \omega M}{C}$ .





Joonis 4.1. Mass-vedru-summuti ostsillaator [8]

On näha, et süsteemi tagasiside, amplituud ja faasinihe, on üldiselt sõltuvuses sagedusest ja süsteemi parameetritest. Kuna massi liikumise kiirus on seotud nihkega võrrandi  $V(t) = j\omega X_0 e^{j\omega t}$ , siis saab süsteemi takistust arvutada valemiga [8]

$$Z(\omega) = \frac{F(t)}{V(t)} = C + j\left(\frac{K}{\omega} - \omega M\right). \quad (4.27)$$

Kui seada takistuse imaginaarosaks nulli, siis süsteemi resonantssageduse võib leida valemiga  $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ . See sagedus on vastavuses mass-vedru ostsillaatori vabade võngetega kuhu ei ole summutusmehhanismi lisatud. Seega võrrandi 4.24 saab ümber kirjutada kujule [8]

$$X(t) = \frac{F_0}{M} \frac{e^{j\omega t}}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\eta\omega_0\omega}, \quad (4.28)$$

kus  $\eta = C/(\omega_0 M)$ , süsteemi efektiivsustegur.

On huvitav uurida süsteemis energia hajuvust. Aja suhtes on keskmine sisendvõimsus:

$$\langle P_i \rangle = \frac{1}{2} \Re e(FV^*) = \frac{1}{2} \Re e(Z)|V|^2 = \frac{1}{2} C\omega^2 |X_0|^2. \quad (4.29)$$

On näha, et sisendvõimsus on otseses seoses süsteemi sumbeteguri  $C$ -ga. Siit ei ole keeruline tuletada, et sumbeteguri  $C$  poolt tarbitud võimsus on võrdne süsteemi poolt tarvitatud

võimsusega  $\langle P_d \rangle = \langle P_i \rangle$ . See ei ole üllatav, sest energia bilanss on vibratsiooniprotsessi püsioleku vältimatu tagajärg [8].

Keskmise aja suhtes koosneb kogu süsteemi vibratsioonienergia summa keskmisest kineetilisest ja potentsiaalsest energiast. Seega

$$\langle E \rangle = \frac{1}{4} M \Re(VV^*) + \frac{1}{4} K \Re(XX^*) = \frac{1}{4} (\omega^2 M + K) |X_0|^2. \quad (4.30)$$

Kui  $\omega = \omega_0$ , see tähendab et süsteem on resonantsis ning ajasuhtes keskmine kineetiline energia on võrdne aja suhtes keskmise potentsiaalse energiaga. Seega

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} K |X_0|^2 = \frac{1}{2} \omega^2 M |X_0|^2. \quad (4.31)$$

Siit võib järeldada hajutatud võimsuse ja süsteemi vibratsiooni energia suhet

$$\langle P_d \rangle = \frac{1}{2} C \omega_0^2 |X_0|^2 = \omega_0 \eta \langle E \rangle. \quad (4.32)$$

#### 4.2.2. Liidetud parameetritega süsteem

Liidetud parameetritega süsteemi all mõeldakse lihtsustatud modelleerimisprotsessi, kus ei arvestata vaadeldava muutuja ruumilist sõltuvust. See tähendab, et mehaaniliste struktuuride hajutatud mass või inerts on asendatud lõplike arvu liidetud masside või jäikade kehadega, mida ühendavad massita elastsed ja summutavad elemendid nagu näiteks vedru ja hõõrdetakistus. Sellise lihtsustuse põhimõte seisneb selles, et muutuja muutumine, näiteks vibratsiooni amplituud või kiirus, on iga elemendi jaoks võrdne ja üheaegne. See samas määrab ka selle, et see lähenemine kehtib ainult madalatel sagedustel, kus lainepikkus on palju pikem modelleeritava objekti mõõtmetest nii, et ruumilised muutused muutujas on väikesed [8].

Sõltuvalt struktuuri ja modelleerimise eesmärkide keerukusest võib liidetud parameetritega mudel olla lihtne nagu mass-vedru-summuti ostsillaator või koosneda mitmest massist/jäigast kehast, vedrust, summutuselemendist, mis on omavahel keeruliselt ühendatud. Matemaatiliselt määrab iga liidetud massi või jäiga keha kirjeldamiseks vajalik koordinaatide arv süsteemi vabadusastmete arvu. Igale vabadusastmele vastab üks harilik diferentsiaalvõrrand. On näha, et üks liidetud parameetritega süsteemi eeliseid on, et peab lahendama ainult harilike

diferentsiaalvõrrandite süsteemi, mitte pideva süsteemi osatuletistega diferentsiaalvõrrandeid [8].

Liidetud parameetritega süsteemi võrrandi saab leida Newtoni teisest seadusest. Oletame, et  $x_i$  ja  $\theta_i$  tähistavad süsteemi risti- ja pöördliikumise üldiseid koordinaate. Seega oleks liikumisvõrrandid järgmised [8]:

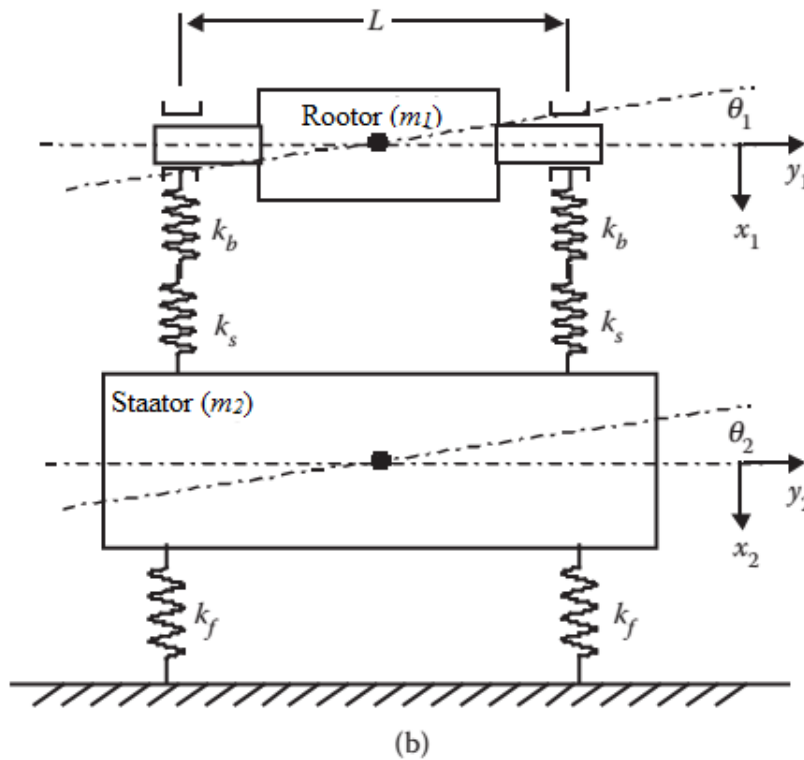
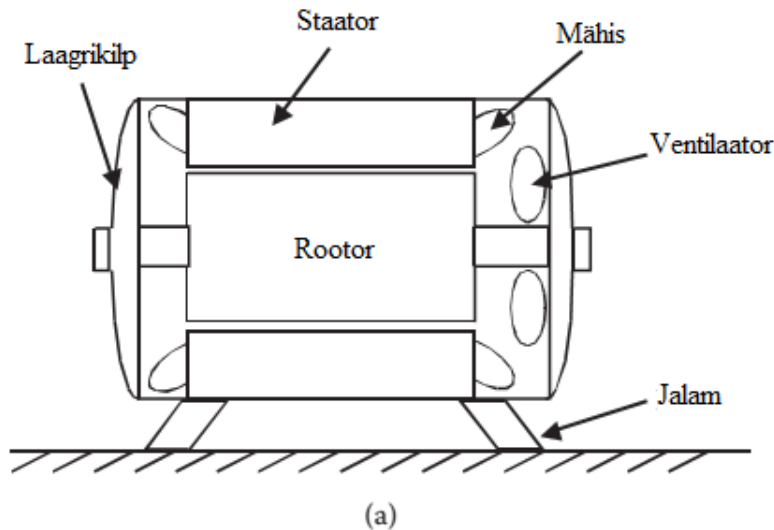
$$\begin{cases} m_i \ddot{x}_i = \sum_j F_{ij} \\ J_i \ddot{\theta}_i = \sum_j M_{ij} \end{cases} \quad (4.33)$$

kus  $\sum_j F_{ij}$  – massile  $m_i$  mõjuvate jõudude summa,

$\sum_j M_{ij}$  – massi inertsile  $J_i$  mõjuvate jõumomentide summa.

Teised meetodid, mida saab kasutada liikumise võrrandite leidmiseks on näiteks Lagrange'i võrrand ja elektro-mehaanilised analoogiad. Tuginedes liikumisvõrranditele, saab nendest tuletada süsteemi omaväärtused ja omavektorid, mille abil saab leida omavõnkesageduse ja võnke mudeli [8].

Lihne näide liidetud parameetritega mudeli kasutamisest on joonisel 4.2 (a) kujutatud masina mehaanilise struktuuri dünaamiline analüüs. Liidetud parameetritega mudelit, mis arvestab ainult kahte jäika liikumist, nimelt staatori ja rootori risti- ja pöördliikumist  $xy$  tasandil on kujutatud joonisel 4.2 (b). Mudelis on näha kuidas mootori jalad on lihtsustatud kahe jäiga elemendina  $k_f$  ning staator ja rootor on kujutatud massi elementidena  $m_1$  ja  $m_2$ . Reaalses mootori struktuuris asuvad mõlemad rootori otsad laagrites, mida toetavad laagrikilbid.



Joonis 4.2. Asünkroonmasin ja selle liidetud parameetritega mudel: (a) masin; (b) mudel

Liidetud parameetritega mudelis ühendavad kaks jadamisi seotud vedru elementi  $k_b$  ja  $k_s$  rootorit ja staatorit ning kujutavad laagri ja laagrikilpide jäikust. Kuna igal jäigal elemendil on võimalik liikuda risti  $x$  suunas ja pöörelda  $z$  telje ümber, siis seega on vaja nii rootori kui ka staatori liikumise kirjeldamiseks kahte muutujat. See tähendab, et sellel süsteemil on 4 vabadusastet. Kogu süsteemi liikumisvõrrandi saaks kirjutada kui [8]:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_1 & -2k_1 & 0 & 0 \\ -2k_1 & 2(k_1 + k_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 L^2/2 & -k_1 L^2/2 \\ 0 & 0 & -k_1 L^2/2 & (k_1 + k_2)L^2/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.34)$$

kus  $k_1 = k_s k_b / (k_s + k_b)$ ,  
 $k_2 = 2k_f$ .

Võrrandist 4.33 on näha, et risti- ja pöördliikumine ei ole omavahel seotud. See on sellepärast, et süsteem on lihtsustamise mõttes modelleeritud geomeetrias sümmeetriliselt. Selle tulemusena saab risti- ja pöördliikumise vibratsioone lahendada eraldi. Näiteks ristiliikumise võrrandid on [8]:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_1 & -2k_1 \\ -2k_1 & 2(k_1 + k_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.35)$$

Harmoniliste lahenduste jaoks:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 e^{j\omega t} \\ A_2 e^{j\omega t} \end{bmatrix}, \quad (4.36)$$

kus  $A_1$  – rootori vibratsiooni amplituud,  
 $A_2$  – staatori vibratsiooni amplituud.

Kui võrrand 4.35 panna võrrandisse 4.34 saame:

$$\begin{bmatrix} 2k_1 - \omega^2 m_1 & -2k_1 \\ -2k_1 & 2(k_1 + k_2) - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.37)$$

Selleks, et  $A_1$  ja  $A_2$  vastused nulliga ei võrduks, peab determinant võrduma nulliga see tähendab:

$$\begin{bmatrix} 2k_1 - \omega^2 m_1 & -2k_1 \\ -2k_1 & 2(k_1 + k_2) - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.38)$$

Teisisõnu on võrrandi ruutjuured võrdsed süsteemi omaväärtustega:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4\omega_{11}^2 \omega_{22}^2}}{2}, \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} \text{kus } B &= \omega_{11}^2 + \omega_{22}^2 + 2k_1/m_2, \\ \omega_{11}^2 &= 2k_1/m_1, \\ \omega_{22}^2 &= 2k_2/m_2. \end{aligned}$$

Kaks omavõnke sagedust võib leida valemiga:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4\omega_{11}^2\omega_{22}^2}}{2}}. \quad (4.40)$$

Pöördliikumise puhul kehtib sama moodi võrrand 4.39. Kuid erinevus seisneb muutujate teistes väärtustes:

$$\begin{aligned} B &= \omega_{11}^2 + \omega_{22}^2 + k_1L^2/(2J_2), \\ \omega_{11}^2 &= k_1/L^2/(2J_1), \\ \omega_{22}^2 &= k_2L^2/(2J_2). \end{aligned}$$

### 4.3. Magnetism

Elektromagnetvälja käitumist saab kirjeldada Maxwelli võrranditega [13]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (4.41)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (4.42)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (4.43)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (4.44)$$

kus  $\mathbf{E}$  – elektrivälja tugevus,  
 $\mathbf{B}$  – magnetvootihedus,  
 $\mathbf{H}$  – magnetväljatihedus,  
 $\mathbf{J}$  – voolutihedus,  
 $\mathbf{D}$  – elektrinihe (elektriline induksioon),  
 $\rho$  – laengu tihedus.

Võrrandid eelpool toodud muutujate jaoks on:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (4.45)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (4.46)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (4.47)$$

kus  $\varepsilon$  – elektriline läbitavus,

$\sigma$  – elektriline juhtivus,

$\mu$  – magnetiline läbitavus.

Ülaltoodud parameetrid on isotroopsete materjalide jaoks skalaarsed. Anisotroopsete materjalide puhul on tegemist tensoritega. Materjali parameetrid võivad olla sõltuvad välja muutujatest, näiteks magnetväli ferromagnet materjalis võib põhjustada küllastumist, mis oma korda vähendab magnetilist läbitavust [13].

Maxwelli võrrandite üldiseks lahenduseks on elektromagnetlaine. Mõningatel juhtudel võivad võrrandid olla lihtsustatud. Kui huvipakkuv sagedusala on madal või probleemi mõõtmed on lainepikkusega võrreldes väikesed, siis polarisatsioon ja nihkevoolud muutuvad mitteamestatavaks ning elektrivoolu tiheduse tuletis on võrrandis 4.42 võrdne nulliga. Selline lihtsustus sobib elektrimasinatele. See lihtsustus viib kvaasistaatiliste Maxwelli võrranditeni, mis aitavad lihtsustada arvutuskäiku [13].

## 4.4. Heli ja vibratsioon asünkroonmasinas

Vibratsiooni jaoks jääb huvipakkuv sagedusala 0 ja 1000 Hz vahele ning müra puhul on see üle 1000 Hz. Elektrimasina poolt tekitatud vibratsioon ja müra võib jagada kolme kategooriasse [8], [14]:

- Elektromagnetiline vibratsioon ja müra, mis on tingitud elektrimasinas eksisteerivatest erinevatest magnetilistest jõududest.
- Mehaaniline vibratsioon ja müra, mis on seotud masina mehaanilise koostega, eriti just laagrite koostega;
- Aerodünaamiline vibratsioon ja müra, mis on tingitud ventileerimiseks kasutatava õhu voolamisega läbi või üle elektrimasina.

### 4.4.1. Elektromagnetilise müra allikad

Elektrimasinas eksisteerib põhiliselt kolme tüüpi magnetilisi jõudusid [13]:

1. Reluktantsjõud (Maxwelli pinge), mis mõjub erinevate magnetiliste omadustega materjalide piiridele.
2. Lorentzi jõud, mis mõjub magnetväljas olevatele vooludele.
3. Magnetroktiivne jõud, mis toimib masina südamikus.

#### Reluktantsjõud

Rootori ja staatori vaheline õhupilu on ala, kus mõjub reluktantsjõud. Hammaste tipud on põhilised parasiitenergia edastajad masina korpusele. Jõudude suurus sõltub uurete geomeetriast, õhupilu pikkusest, mähise paigutusest, küllastumise astmest jne. Reluktantsjõud on kõige tähtsam ergutustüüp, sest selle mõju on võrreldes ülejäänud jõududega suurim [13].

Hambale mõjuvat jõudu saab arvutada Maxwelli pinge tensori abil ( $\boldsymbol{\tau}$ ). Selleks on vaja teada elektrimasina magnetvoo tihedusi ( $\mathbf{B}$ ). Neid saab leida kui muuta magnetiline vektorpotentsiaal ( $A$ ) Cartesiuse koordinaadistikus magnetvoo tiheduseks ning need on määratud valemiga [2]:

$$\mathbf{B} = \frac{\partial A}{\partial y} \mathbf{u}_x - \frac{\partial A}{\partial x} \mathbf{u}_y. \quad (4.48)$$

Rakendades neid magnetvoo tihedusi saab Maxwelli pinge tensori määrata Cartesiuse koordinaadistikus [2]:



$$\boldsymbol{\tau} = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}B^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2}B^2 & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{1}{2}B^2 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Selleks, et leida hambale mõjuvat jõudu rakendame Gaussi teoreemi, mille abil saab keha ruumalale  $V$  mõjuv jõud muuta keha pindalale  $S$  mõjuvaks jõuks. Seda saab kirjeldada kui [2]:

$$\mathbf{F} = \int_V f dV = \int_V \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} dV = \int_S \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} dS. \quad (4.50)$$

Kus  $f$  – jõu tihedus

$\mathbf{n}$  – ühiknormaalvektor pinnal  $S$ .

Tihti peale on füüsikaliselt magnetvoo tihedust tähendusrikkam esitada normaal- ja tangentsiaalkomponentidena [13].

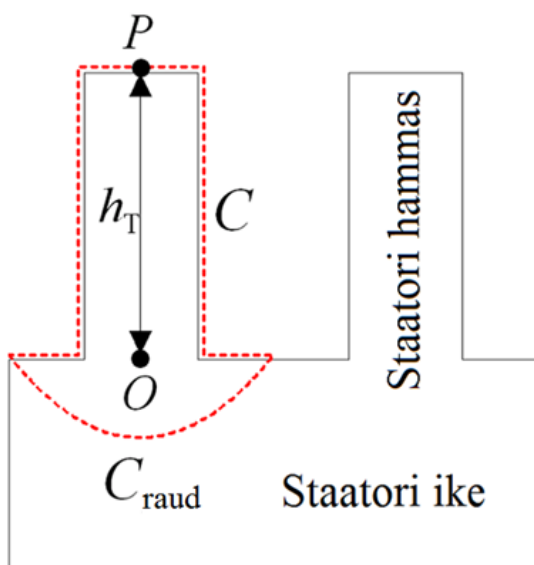
$$\mathbf{B} = B_n \mathbf{u}_n - B_t \mathbf{u}_t \quad (4.51)$$

Kus  $B_n$  – magnetvoo tiheduse normaalkomponent,

$\mathbf{u}_n$  – ühik normaalvektor integreerimise pinnal,

$B_t$  – magnetvoo tiheduse tangentsiaalkomponent,

$\mathbf{u}_t$  – ühik tangentsiaalvektor  $B_t$  suunas.



Joonis 4.3. Integreerimise teekond  $C$  kahemõõtmelises hamba läbilõikes

Magnetvoo tihedused on arvatud elementide servas ning integreeritud mööda teekonda  $C$  (Joonis 4.3) ning seega hambale mõjuv jõud on [2]:

$$\mathbf{F}_T = L \int_C \left[ \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \mathbf{u}_n + \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \mathbf{u}_n \right] dC, \quad (4.52)$$

kus  $L$  – Staatori südamiku aksiaalne pikkus.

### Lorentzi jõud

Lorentzi jõudu, mis mõjub elektrimasina mähisele võib jätta arvestamata, kuna selle magnetvootihedus uures on väga väike [2], [13].

### Magnetostriktiivne jõud

Magnetostriktsioon on materjali füüsiliste mõõtmete ja kristallide muutus, mis on tingitud neile mõjuva magnetvälja muutumisest. Kui magnetostriktiivne materjal paigutatakse vahelduvasse magnetvälja, siis selle kuju ja mõõdud muutuvad. Enamuse ferromagnet materjalide magnetostriktiivsust on võimalik mõõta [8].

Magnetostriktiivsuse koefitsent  $\Lambda$  on defineeritud kui pikkuse  $l$  suhet pikkuse muutuse  $\Delta l$  suhtes kui magnetisatsioon suureneb nullist selle küllastus väärtuseni:

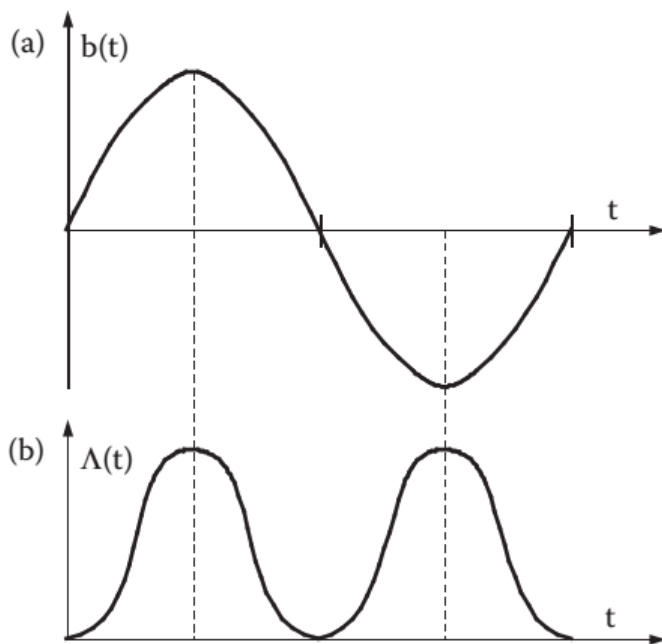
$$\Lambda = \frac{\Delta l}{l}. \quad (4.53)$$

Vahelduvas magnetväljas olev elektrimasina või trafo südamik muudab oma mõõtmeid tsükliliselt. Joonisel 4.4 on näha sinusoidaalselt muutuv magnetvootihedust ning sellele vastavat magnetostriktiivsuse koefitsendi muutumist ajas. Kui teha joonisel 4.4 olevale kõverjoonele  $\Delta(t)$  Fourier' analüüs, siis tekib põhiharmoonik ja harmooniliste funktsioonide jada. Need harmoonikud võimaldavad ligikaudu visualiseerida vibratsioone keskmise positsiooni suhtes, mille määrab põhiharmoonik. Vibratsioonide põhiharmooniku sagedus on kaks korda suurem magnetvoo tiheduse sagedusest  $f$  ning on määratud valemiga [8]

$$f_{ms} = 2f. \quad (4.54)$$

Vahelduvvoolu pöörlevate masinate puhul määrab magnetostriktsiooni jõu põhiharmooniku järgu pooluspaaride arv. Seega

$$r_{ms} = 2p. \quad (4.55)$$



Joonis 4.4. Magnetostriksiiooni koefitsendi muutus sõltuvalt magnetvoo tihedusest: (a) magnetvoo tihedus kui ajast sõltuv funktsioon; (b) magnetostriktiivne koefitsent kui ajast sõltuv funktsioon

Staatiliste elektromehaaniliste energia muundurite puhul nagu trafod, induktiivpoolid, luminofoorlampide elektromagnetilised ballastid, jne, on magnetostriksiioon põhiline akustilise müra tekitaja. Pöörlevate vahelduvvoolu masinate puhul võib magnetostriksiioon tekitada märkimisväärset akustilist müra. Eriti just kahepooluselise masina puhul on magnetostriksiiooni jõud kaks liinisagedusest kaks korda suurema sagedusega ning tekitab mittevajalikku akustilist müra.

#### 4.4.2. Mehaanilise müra allikad

Mehaaniline vibratsioon ja müra on põhiliselt tingitud laagritest, laagri defektidest, võllikaela ovaalsusest, väändest võllist, rootori tasakaalustamatusest, võlli valest joondumisest, ühendustest jne. Rootor peaks olema täpselt tasakaalustatud, sest see võib märkimisväärselt vähendada vibratsiooni. Rootori tasakaalustamatus tekitab dünaamilist vibratsiooni ja ekstsentrilisust, mis omakorda tekitab müra emissioone staatorist, rootorist ja rootori kande struktuurilt [8].

## Veerelaager

Veerelaagrid tekitavad mehaanilisi impulsse kui laager veereb üle defekti. See tekitab väikest rootori radiaalset liikumist. Isegi siis kui nende mehaaniliste impulsside sagedus on erinev elektrimasina omavõnke sagedusest, võivad need tekitada märkimisväärset vibratsiooni [8].

Kera möödumissagedus on sagedus, kus sisemises või välises veeretes olev defekt tekitab impulsi kui laager sellest üle veereb. Välise veerete möödumissagedus on [8]

$$f_{vv} = \frac{N_b}{2} n_m \left( 1 - \frac{d_b}{D} \cos \alpha \right), \quad (4.56)$$

kus  $f_{vv}$  – välise veerete möödumissagedus,

$D$  – vastastikku asetsevate kuullaagrite keskpunktide vaheline kaugus,

$n_m$  – pöörlemissagedus p/min,

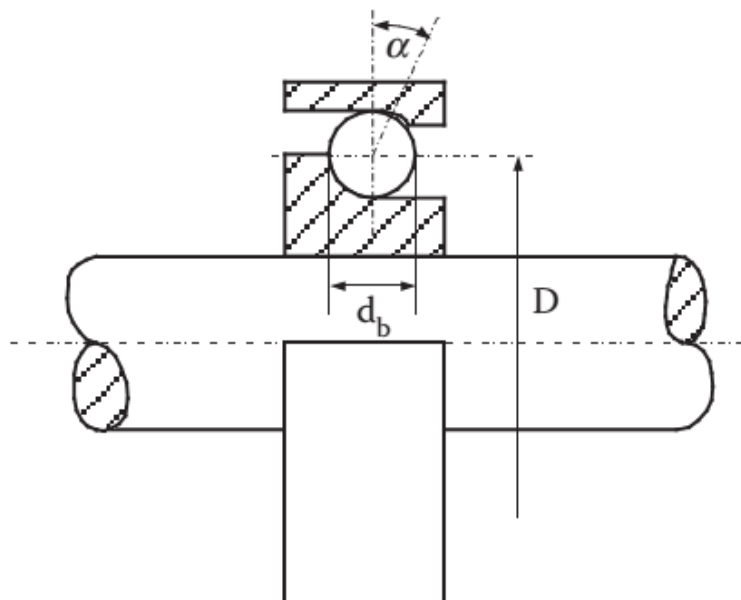
$N_b$  – veerevate elementide arv,

$d_b$  – kera diameeter,

$\alpha$  – veereva elemendi kontaktnurk (joonis 4.5).

Lihtsustatult võib seda võrrandit esitada ka kujul [8]

$$f_{vv} = 0,4N_b n_m. \quad (4.57)$$



Joonis 4.5. Kuullaagri läbilõige

Sisemise veerete möödumissagedus on

$$f_{sv} = \frac{N_b}{2} n_m \left( 1 + \frac{d_b}{D} \cos \alpha \right) \quad (4.58)$$

või lihtsustatuna

$$f_{sv} = 0,6 N_b n_m. \quad (4.59)$$

Laagri pöörlemissagedus on

$$f_{ps} = \frac{1}{2d_b} n_m \left[ 1 - \left( \frac{d_b}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right]. \quad (4.60)$$

Veerelaagri separaatori rikke sagedus on

$$f_{rs} = \frac{1}{2} n_m \left( 1 + \frac{d_b}{D} \cos \alpha \right). \quad (4.61)$$

Teised vibratsiooni ja müra sagedused, mis on veerelaagrite poolt tekitatud on [8]:

- Veerelaagri separaatori poolt tekitatud sagedused

$$f_{ss} = n_m \frac{d_i}{d_i + d_0}; \quad (4.62)$$

- Veerelaarite ebaregulaarsest kujust tingitud sagedused

$$f_{es} = n_m \frac{d_i d_0}{d_r (d_i + d_0)}; \quad (4.63)$$

- Laagri jäikuse variatsioonist tingitud sagedused

$$f_{js} = N_b k n_m \frac{d_i}{d_i + d_0}. \quad (4.64)$$

Kus  $d_i$  – sisemise kontaktpinna läbimõõt,

$d_0$  – välimise kontaktpinna läbimõõt,

$d_r$  – ebaregulaarse laagri läbimõõt,

$k$  – 1, 2, 3 ... positiivne täisarv

Veerelaagrite tõrked ei tekita kindla sagedusega vibratsiooni. Sagedus ja amplituud sõltub paljudest teguritest nagu näiteks kulumise aste, määrumine, defektide asukoht ja tüüp. Teisesõnaga on veerelaagril esinev tõrge ainulaadne [8].

## Liuglaager

Liuglaagrid koosnevad kahest silindrilisest pinnast, millel on õli jaotavad sooned. Sisemine pind võib olla kaetud babiidiga, pronksiga või mõne muu materjaliga, mis on pehmem kui pöörlev võlliipea [8].

Isemäärivate laagrite puhul sisaldab laagrite pind tavaliselt tahket määret, mida vabastab laagrite hõõrdumine. Väikeste liuglaagrite puhul on määredeõli immutatud poorsesse pronksist laagrisse ning õli toimetatakse võllini väikeste poorsete avauste kaudu. Pöörlemine põhjustab õlikelme tekkimist, mille peal võll keerleb. Ideaalse laagri puhul takistab see kelme metallide vahelist kontakti ning eemaldab peaaegu enamuse laagrite mürast. Kuna võlli ja laagri pinnad on mikroskoopilisel tasandil karedad, siis võib laager tekitada kriuksuvat või krigisevat heli. Samuti peab arvestama, et tasakaalustamatust ja mootori ajami sagedustest tekitatud vibratsioonid võivad põhjustada laagris võlli kõikumist ning tekitada laagriotstega kontakti. Seda tüüpi kontakt tekitab koputavat või lõgisevat müra [8].

Liuglaagri müra on tavaliselt laiaribaga ning mõnevõrra vahelduv. Liuglaagrite puhul on helirõhu tase madalam kui veerelaagrite tase. Enamus liuglaagreid on väga vaiksed kuni neil hakkab määre otsa saama [8].

Liuglaagri poolt tekitatud vibratsioon ja müra sõltub libisevate pindade karedusest, määrest, stabiilsusest, õlikelme pöörlemisest laagris, tootmisprotsessist, kvaliteedist ja paigaldusest. Kõige tähtsamad liuglaagrite mõjuvate jõudude sagedused on tingitud järgmistest olukordadest [8]:

- Ovaalne või ebahürtlane võlliipea

$$f_{ov} = kn_m, k = 1, 2, 3, \dots; \quad (4.65)$$

- Aksiaalsed sooned

$$f_{gr} = N_g n_m, \quad (4.66)$$

kus  $n_m$  – rootori pöörlemiskiirus p/min,

$N_g$  – soonte arv;

- Laagris pöörleva õli sagedus on tavaliselt 0,43 kuni 0,48 korda suurem rootori pöörlemiskiirusest seega  $f_{õli} = (0,43 \dots 0,48)n_m$ .

### 4.4.3. Aerodünaamilise müra allikad

Põhiline aerodünaamilise müra allikas on ventilaator. Ükskõik milline õhuvoolus asetsev takistus tekitab müra. Avatud mootorites on heli kiirgajaks sisemise ventilaatori ventilatsiooni avad. Suletud mootori puhul on ülekaalus välimise ventilaatori poolt tekitatud heli [8].

Kui vaadata ventilaatori müra sagedus jaotust siis jaguneb kaheks: lairiba müraks (100 Hz kuni 10 kHz) ning sireeni müraks. Sireeni müra on puhas toon, mis on tekitatud ventilaatori labade, rootori uurete või ventilatsiooni avade ja takistuste koostoimel. Ventilaatorist tingitud puhta tooni sagedus on [8]

$$f_v = kN_{bl}n_m, \quad (4.67)$$

kus  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,

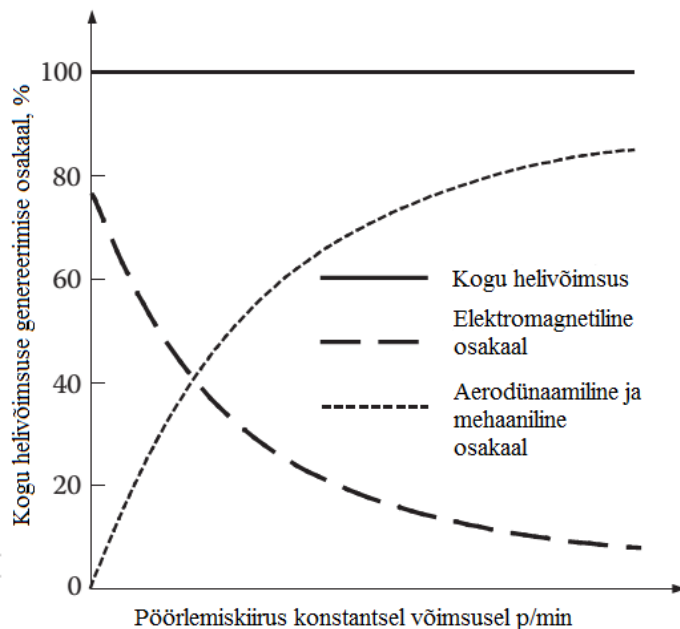
$N_{bl}$  – ventilaatori labade arv,

$n_m$  – ventilaatori labade pöörlemise kiirus p/min.

Puhta tooni sagedus kui jahutus õhk voolab läbi rootori aksiaalsete ventilatsiooni avade (juhul kui need on olemas) on

$$f_{rd} = kN_d n_m. \quad (4.68)$$

kus  $N_d$  – avade arv.



Joonis 4.6. Müra allikate osakaalu sõltuvus masina pöõretest [8]

Elektrimasina pöõrlemiskiiruse suurenedes suureneb aerodünaamilise müra võimsuse osakaal ning elektromagnetilise võimsuse osakaal väheneb (joonis 4.6).

## 5. INFOTEHNOLOOGILISED JA MATEMAATILISED LAHENDUSED

### 5.1. Kasutatud nutitelefonid ja heliformaadid

Siin alapeatükis kirjeldatakse ning võrreldakse mõõtmise läbiviimisel kasutatud nutitelefone ning heliformaate.

#### 5.1.1. Nutitelefonid

Nutitelefonid olid mõlemad Androidi operatsiooni süsteemiga ning nende andmeid saab võrrelda tabelis 5.1.

Tabel 5.1 Kasutatud nutitelefonid [15], [16]

Nutitelefoni	Samsung Galaxy S4	Sony Xperia GO
Väljalaske kuupäev	Aprill 2013	Mai 2012
Mõõdud	136.6 x 69.8 x 7.9 mm	111 x 60.3 x 9.8 mm
Kaal	130 g	110 g
Ekraani suurus	5,0 tolli	3,5 tolli
Resolutsioon	1080 x 1920 pikslit	320 x 480 pikslit
OS	Android v4.2.2 võimalik uuendada v4.4.2	Android v2.3 võimalik uuendada v4.1.2
CPU	Neljatuumaline 1.9 GHz Krait 300	Kahetuumaline 1,0 GHz Cortex-A9
GPU	Qualcomm APQ8064T Snapdragon 600	Mali-400
Kiibistik	Exynos 5410 Octa	NovaThor U8500
Mälukaardi pesa	microSD, kuni 64 GB	microSD, kuni 32 GB
Sisemine mälu	16/32/64 GB, 2 GB RAM	8 GB (4 GB kasutajale), 512 MB RAM
Kaamera	13 MP	5 MP

Võrreldes Sonyga on Samsung tunduvalt võimekam ning paremate näitajatega. Samsungil on audiosignaalide vastuvõtmiseks, saatmiseks ning töötlemiseks eraldi mikrokiip WCD9310. Sonyl eraldi audio kiipi ei ole, kogu audio töötlemise tegeleb süsteemikiip NovaThor U8500 [17], [18].



Ära peab ka mainima, et tänapäeva nutitelefonidel on kasutusel taustamüra filter. Ei ole teada kas see oli katsete lindistamisel telefonidel sisse lülitatud või mitte.

### 5.1.2. Audioformaadid

Audio failid salvestati kahte formaati. Samsungiga salvestati need mp4 formaati ning Sonyga WAV formaati.

WAV on lühend väljendist *Waveform Audio File Format*. See arendati Microsofti ja IBM poolt personaalarvutite jaoks. WAV on algupärase allika heli täpne koopia, see tähendab, et tegemist on pakkimata heliformaadiga ning see tõttu võtab püsivalt palju ruumi. Kuna WAV formaati on lihtne töödelda ning muuta, on see helitööstuses ning ringhäälingus laialt levinud [19].

MP4 on lühend nimetusest *MPEG-4 Part 14* ning see põhineb Apple MOV failitüübil. MP4 on konteinerformaad, see tähendab, et seda saab kasutada audio ja/või video andmete salvestamiseks. MP4 videot ja audiot saab üle interneti voogedastada. Kuna see on konteinerformaad ei ole selle audio ja video andmete standardset kodeerimismeetodit [19].

Nende formaatide erinevused on ära toodud tabelis 5.2 MP4 võib olla kadudega formaad sõltuvalt kasutatavast kodekist, osa infot võib kaduma minna.

Tabel 5.2. Heliformaatide võrdlus [19]

	WAV	MP4
Kasutusala	Kõrge kvaliteediga audio fail, mida kasutatakse kõrget kvaliteeti nõudvates rakendustes nagu näiteks CD	Tarkvara on mõeldud andmevoogude edastamiseks reaajas vastuvõtvasse seadmesse.
Lühend	Waveform Audio File Format	MPEG-4 Part 14
Faililaiend	.wav	.mp4, .m4a, .m4p
Arendaja	Microsoft ja IBM	Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon
Heli kvaliteet	Parem kui MP4	Ei ole WAV-ist parem

## 5.2. Fourier' teisendus

Selles alampeatükis tuleb juttu Fourier ridadest, teisendusest ning nende rakendustest digitaalses signaalitöötluses.

### 5.2.1. Fourier' rida

Fourier' rea põhimõtte seisneb selles, et pidevaid signaale on võimalik esitada siinuste ja koosinuste summana. Tänapäeva digitaaltehnikas kasutatakse seda heli-, pildi- ja videotöötluses [20].

Fourier' rida põhineb trigonomeetrilisel real. Võrrandis 5.1 kirjeldatud funktsionaalrida nimetatakse trigonomeetriliseks reaks [20].

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)), \quad (5.1)$$

kus  $a_n$  ja  $b_n$  – arvjadad.

Siis Fourier' rea definitsioon oleks [20]:

Olgu järgnevalt funktsioon  $f$  määratud kas lõigus  $[-\pi, \pi]$ , vahemikus  $(-\pi, \pi)$  või olgu ta  $(2\pi)$ -perioodiline vahemikus  $(-\infty, \infty)$ .

Kui kordajad  $a_0$ ,  $a_n$  ja  $b_n$  on määratud valemitega

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx, \quad (5.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx, \quad (5.3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx, \quad (5.4)$$

kus  $n = 1, 2, 3, \dots$ , siis trigonomeetrilist rida (5.1) nimetatakse funktsiooni  $f$  Fourier reaks.

Kordajaid  $a_n$ ,  $b_n$  nimetatakse funktsiooni  $f$  Fourier kordajateks. Kirjutame

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)). \quad (5.5)$$

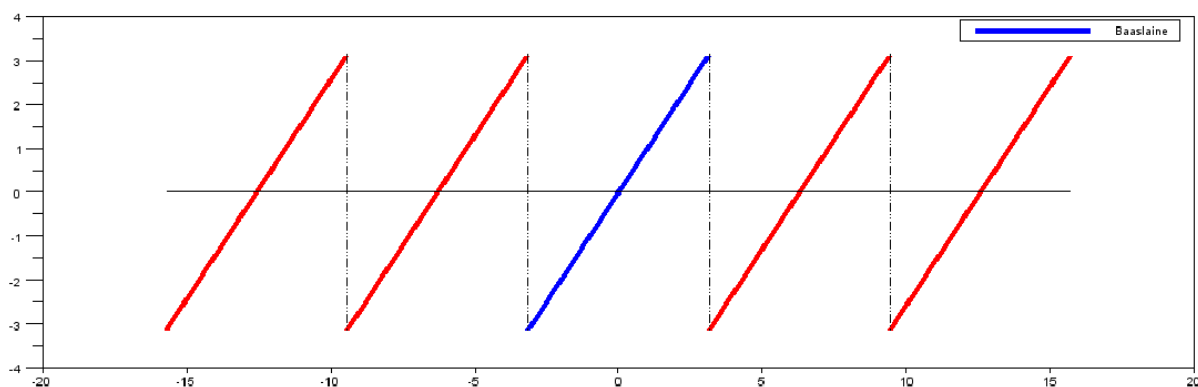
Tuletame toodud kordajate valemid, eeldades hetkeks võrdsuse kehtimist.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)), \quad (5.6)$$

kus kordajad  $a_0$  ja  $a_1, a_2, \dots$  ning  $b_1, b_2, \dots$  on tundmatud reaalarvud. Lisaks eeldame järgnevalt, et lõpmatu summa ja integraali leidmise järjekord võib muutuda.

Lõpuks taandub Fourier' rea lahendamine integraalide lahendamisele.

Näiteks kui meil on tegemist saehamba signaaliga (joonis 5.1), selle võrrandiks oleks  $f(x) = x$  ning piirkonnaks oleks  $-\pi < x \leq \pi$ .



Joonis 5.1. Saehamba võnkumine [20]

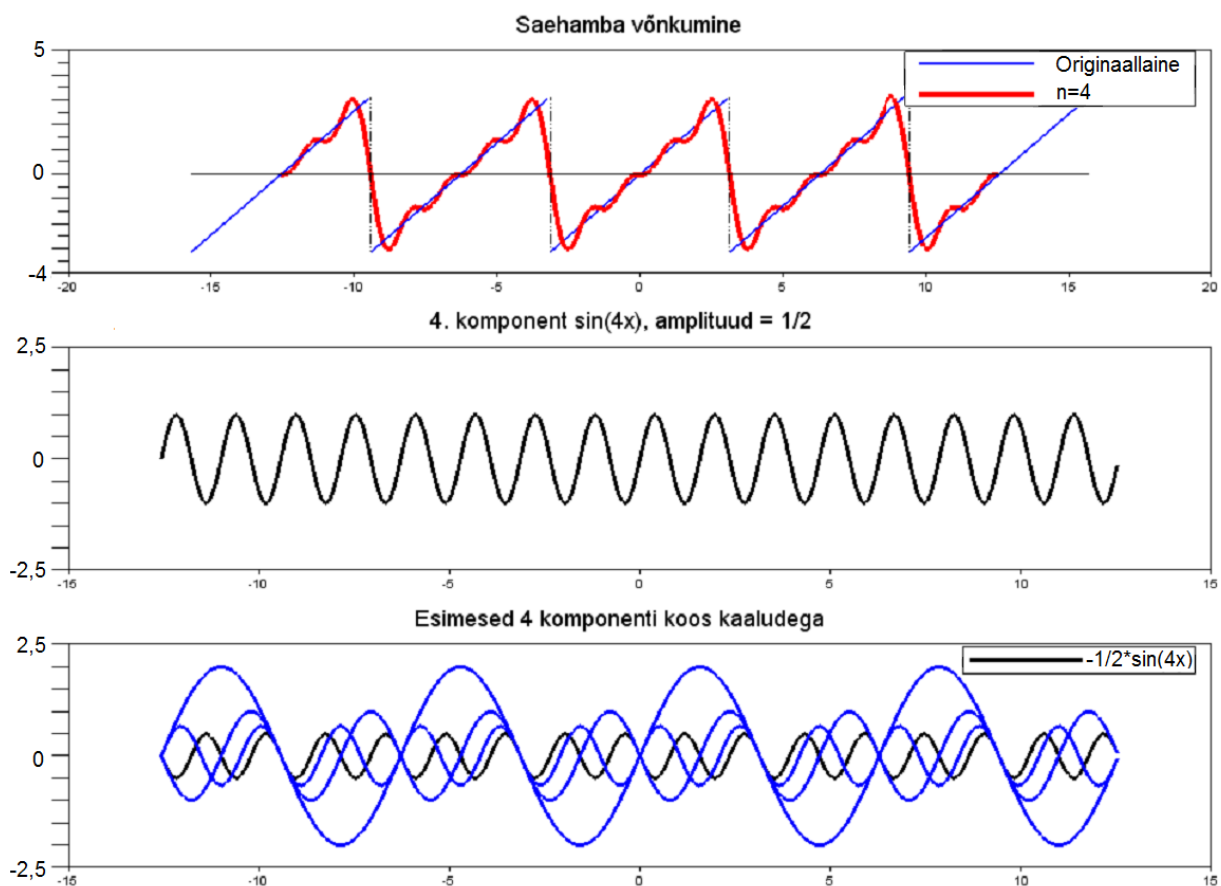
Selle signaali lahendatud Fourier' rida on:

$$f(x) \sim 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sin(nx)}{n} = 2 \left[ \sin(x) - \frac{\sin(2x)}{2} + \frac{\sin(3x)}{3} - \dots \right]. \quad (5.7)$$

Kui kirjutada välja selle 4 esimest liiget ehk  $n = 4$  siis saame võrrandi

$$f(x) = 2\sin(x) - \sin(2x) + \frac{2}{3}\sin(3x) - \frac{1}{2}\sin(4x). \quad (5.8)$$

Võrrandit 5.8 kirjeldab joonis 5.2, kus on ära toodud ka kõikide komponentide signaalid.



Joonis 5.2. Saeahamba võnkumise esimesed 4 komponenti [20]

## 5.2.2. Fourier' teisenduse põhimõte

### Fourier' rida komplekskujul

Euleri valemist on teada, et kompleksitasandil saab ühikringjoont kujutada funktsiooniga [21]

$$e^{jt} = \cos(t) + j \sin(t), \quad j^2 = -1. \quad (5.9)$$

Kuna avaldis sisaldab nii siinus kui ka koosinust, saab seda kasutada Fourier' rea esitamiseks kompleks tasandil.

Lähtume, et Fourier' rea funktsioon  $f$  on perioodiga  $2\pi$ . Kui kordajad  $c_n$  on määratud valemiga [21]

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-jnx} dx, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (5.10)$$

siis trigonomeetrilist rida

$$f(x) \sim \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jnx} \quad (5.11)$$

nimetatakse funktsiooni  $f$  Fourier' reaks komplekskujul. Kordajaid  $c_n$  nimetatakse funktsiooni  $f$  Fourier' komplekskordajateks.

Oletame, et funktsioon  $f$  on perioodiga  $T = 2L$ . Siis [21]

$$c_n = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(x) e^{-j(n\pi/L)x} dx, \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (5.12)$$

ja

$$f(x) \sim \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j(n\pi/L)x}. \quad (5.13)$$

Olgu sündmuse sagedus  $\sigma = \frac{1}{T}$  perioodiga  $T = 2L$ . Tähistame nurksageduse

$$\omega = \frac{\pi}{L} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\sigma. \quad (5.14)$$

Ühikringi elemente

$$e^{jn\omega t} \quad (5.15)$$

nimetatakse harmoonikuteks ja arve

$$n\omega = n2\pi\sigma = \frac{n\pi}{L} = n \frac{2\pi}{T}, \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (5.16)$$

funktsiooni

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} \quad (5.17)$$

lainearvudeks. Lainearvude hulka nimetatakse spektriiks. Kordajaid

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega t} dt, \quad n \in \mathbb{Z}, \quad (5.18)$$

nimetatakse kompleksamplituudideks. Elektro- ja raadiotehnika alastes töödes nimetatakse amplituudide moodulite  $|c_n|$  hulka samuti funktsiooni  $f$  spektriiks [21].

### Fourier' teisendus

Olgu antud ajast  $t$  sõltuv reaalarvuline signaal  $f = f(t)$ , mis koosneb sagedusest  $\sigma = (-\infty, \infty)$ . Funktsiooni  $f$  Fourier' teisenduseks  $F_f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$  nimetatakse kompleksarvuliste väärtustega funktsiooni

$$(F_f)(\sigma) = C(\sigma), \quad C(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j2\pi\sigma x} dx \quad (5.19)$$

Funktsiooni  $C$  Fourier' pöördteisenduseks  $F_f^{-1}: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$  nimetatakse võrdusega

$$(F_f^{-1})(t) = f(t), \quad f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\sigma) e^{j2\pi\sigma t} d\sigma \quad (5.20)$$

määratud reaalarvulist funktsiooni  $f$ . Teisisõnu, Fourier' teisendus  $F_f$  seab signaalile  $f$  vastavusse spektraalfunktsiooni  $C$  (millest saab välja lugeda funktsiooni  $f$  spektri) ja pöördteisendus  $F_f^{-1}$  seab spektraal funktsioonile  $C$  vastavusse signaali  $f$ .

### 5.2.3. Diskreetne Fourier' teisendus

Kui eelneval puhul, nõ. „tavalise“ Fourier' teisenduse käigus käsitleti pidevaid signaale, siis diskreetse Fourier' teisenduse (DFT) puhul uuritakse pideva signaali diskreetseid väärtusi. See võimaldab näiteks digitaaltehnikas analoog-digitaal muunduriga sãmplitud signaali sagedusspektrit uurida [22].

DFT võrrand sagedusalas eksponent kujul on

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{j2\pi nm/N}. \quad (5.21)$$

Võttes arvesse Euleri võrrandit saab selle teisendada kujule [22]

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) [\cos(2\pi nm/N) - j \sin(2\pi nm/N)]. \quad (5.22)$$

Kus  $X(m)$  –  $m$ -is DFT väljund komponent näiteks:  $X(0), X(1), X(2), X(4)$ , jne,

$m$  – DFT väljundi indeks sagedusalas näiteks:  $0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$ ,

$x(n)$  – sisendsãmplite jada,  $x(0), x(1), x(3)$ , jne,

$n$  – sisendsãmplite ajamããramisala indeks,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$ ,

$N$  – sãmplite arv sisendjadas ning sageduspunktide arv DFT väljundis.

## DFT näide

Järgneva näite puhul läheb vaja sãmplimissagedusest  $f_s$ , mille ùhikus on sãmplit/sekundis. Nendest sisendsãmplitest valitakse  $N$  arv sageduspunkte analüüsimiseks. Ning need sagedused oleksid määratud valemiga [22]

$$f_{analüüs}(m) = \frac{mf_s}{N}. \quad (5.23)$$

Oletame, et meil on sisendsignaali, millele tahame 8 punktilist DFT teha ning mis koosneb kahest sageduskomponendist, kus üks on 1 kHz ning teine on 2 kHz ning neid kirjeldab võrrand [22]

$$x_{in}(t) = \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t) + 0,5\sin(2\pi \cdot 2000 \cdot t + 2\pi/4). \quad (5.24)$$

Selleks, et sisendsignaali  $x_{in}(t)$  kompleksemaks teha nihutame 2 kHz komponenti  $135^\circ$  võrra 1 kHz komponendi suhtes. Sãmplimissagedusega  $f_s$  sãmplime sisendit igal  $1/f_s = t_s$  sekundil. Kuna  $N = 8$  on meil vaja 8 sisendsãmplit, millega sooritada DFT. Seega 8 elemendiline jada  $x(n)$  on võrdne sisendjadaga  $x_{in}(t)$ , mida on sãmplitud  $nt_s$  korda. Seega kehtib võrrand [22]

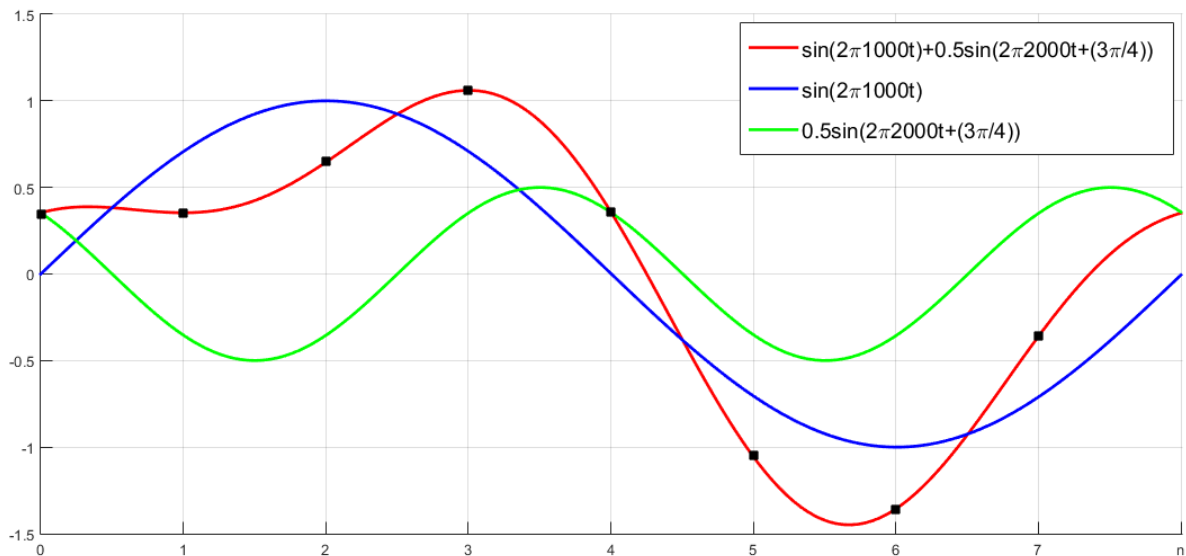
$$x(n) = x_{in}(t) = \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot nt_s) + 0,5\sin(2\pi \cdot 2000 \cdot nt_s + 2\pi/4). \quad (5.25)$$

Kui me sãmplime  $x_{in}(t)$  sagedusega  $f_s = 8000$  sãmplit/sekundis siis võrrandist 5.23 saab jãreldada, et uuritavad sagedused on 0 kHz, 1 kHz, 2 kHz, . . . , 7 kHz. Ning kaheksa  $x(n)$  sãmplit oleks

$$\begin{aligned} x(0) &= 0,3535; & x(1) &= 0,3535; \\ x(2) &= 0,6464; & x(3) &= 1,0607; \\ x(4) &= 0,3535; & x(5) &= -1,0607; \\ x(6) &= -1,3535; & x(7) &= -0,3535. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Need  $x(n)$  sãmpli vãrtused on nãha joonisel 5.3 mustade ruututena punasel joonel.

Selleks, et leida sisendi  $x(n)$  DFT tuleb rakendada võrrandit 5.22. Alustame  $m = 0$  juhuga. See iseloomustab alaliskomponendi vãrtust. Kuna on teada, et selles sisendsignalis puudub 0 komponent tuleb  $X(0)$  vãrtuseks 0 [22].



Joonis 5.3. DFT näite sisendsignaal oma komponentide ja sãmplimis punktidega [22]

Kasutame  $m = 1$  võit 1 kHz ( $mf_s/N = 1 \cdot 1000/8$ ) DFT sagedus terminit võrrandis 5.22 saame tulemuseks

$$X(1) = \sum_{n=0}^7 x(n)[\cos(2\pi n \cdot 1/N) - j \sin(2\pi n \cdot 1/N)]. \quad (5.27)$$

Rakendades seda kaheksale sãmplimistulemusele saame vastuseks

$$\begin{aligned} X(1) &= 0,3535 \cdot 1,0 & -j(0,3535 \cdot 0,0) \\ &+ 0,3535 \cdot 0,707 & -j(0,3535 \cdot 0,707) \\ &+ 0,6464 \cdot 0,0 & -j(0,6464 \cdot 1,0) \\ &+ 1,0607 \cdot -0,707 & -j(1,0607 \cdot 0,707) \\ &+ 0,3535 \cdot -1,0 & -j(0,3535 \cdot 0,0) \\ &- 1,0607 \cdot 0,707 & -j(1,0607 \cdot -0,707) \\ &- 1,3535 \cdot 0,0 & -j(1,3535 \cdot -1,0) \\ &- 0,3535 \cdot 0,707 & -j(0,3535 \cdot -0,707) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 0,3535 & -j0,0 \\ &+ 0,250 & -j0,250 \\ &+ 0,0 & -j0,6464 \\ &-0,750 & -j0,750 \\ &-0,3535 & -j0,0 \\ &-0,750 & -j0,750 \\ &-0,0 & -j1,3535 \\ &-0,250 & -j0,250 \end{aligned}$$

$$= 0,0 - j4,0 = 4\angle -90^\circ$$



Rakendades võrrandit 5.22 ülejäänud punktidele saame vastusteks

$$X(2) = 1,414 - j1,414 = 2\angle 45^\circ$$

$$X(3) = 0,0 - j0,0 = 0\angle 0^\circ$$

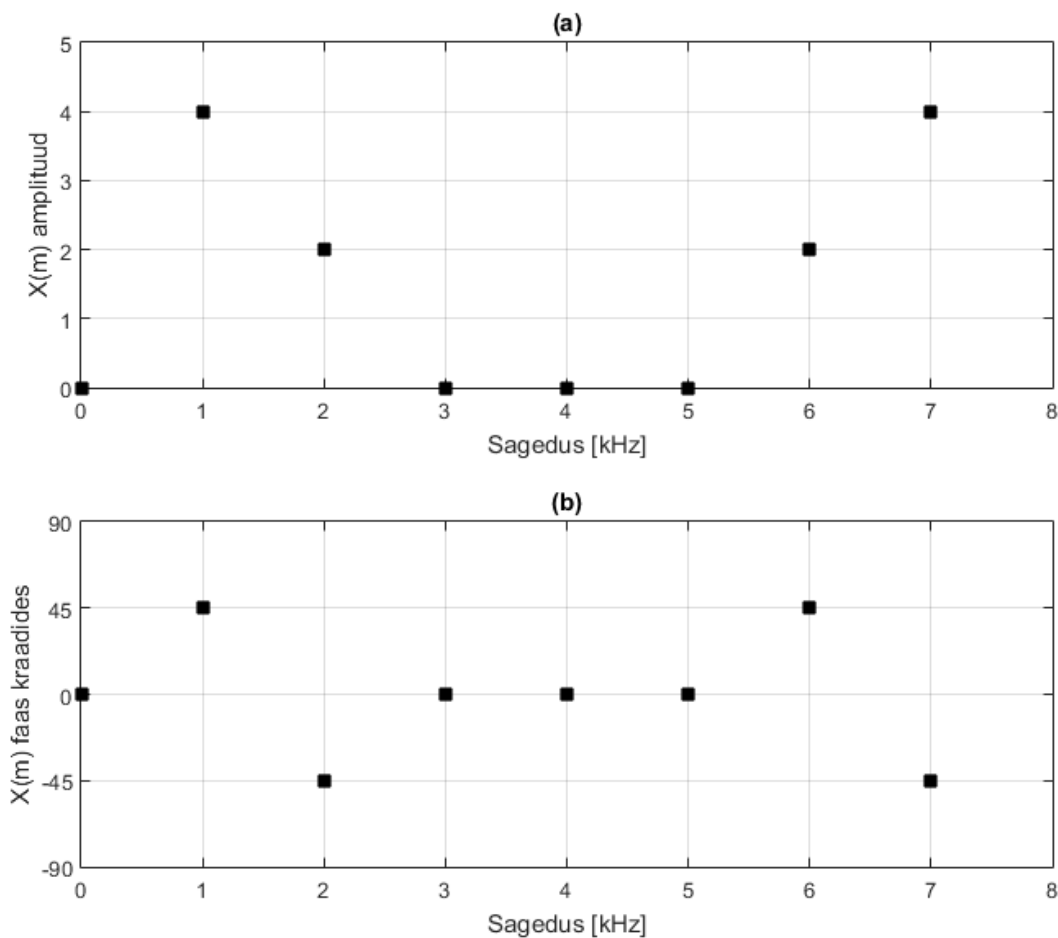
$$X(4) = 0,0 - j0,0 = 0\angle 0^\circ$$

$$X(5) = 0,0 - j0,0 = 0\angle 0^\circ$$

$$X(6) = 1,414 - j1,414 = 2\angle -45^\circ$$

$$X(7) = 0,0 - j4,0 = 4\angle 90^\circ$$

Jooniselt 5.4 on näha DFT tulemused. Kui selle joonise (a) osa vaadata siis on näha ilmselget sümmeetriat. Kuigi DFT on mõeldud aktsepteerima sisendis ka kompleksjadasid, on praktikas enamus DFT sisendeid reaalarvud (näiteks pideva signaali digitaliseeritud väärtused) see tähendab, et realsisendid omavad mitte-nullist reaalkomponenti ning oletatakse, et imaginaarosa on null. Kui sisendjada on reaalne, siis kompleks DFT väljundid vahemikus  $m = 1$  kuni  $m = (N/2) - 1$  on samad, mis vahemikus  $m > (N/2)$ . Näiteks  $m$ -indal DFT väljundil on sama väärtus, mis  $(N - m)$ -ndal DFT väljundil. DFT  $m$ -is faasinurk omab võrreldes  $(N - m)$  faasinurgaga vastas märgiga väärtust [22].



Joonis 5.4. DFT tulemused; (a) signaali amplituud; (b) signaali faasid [22]

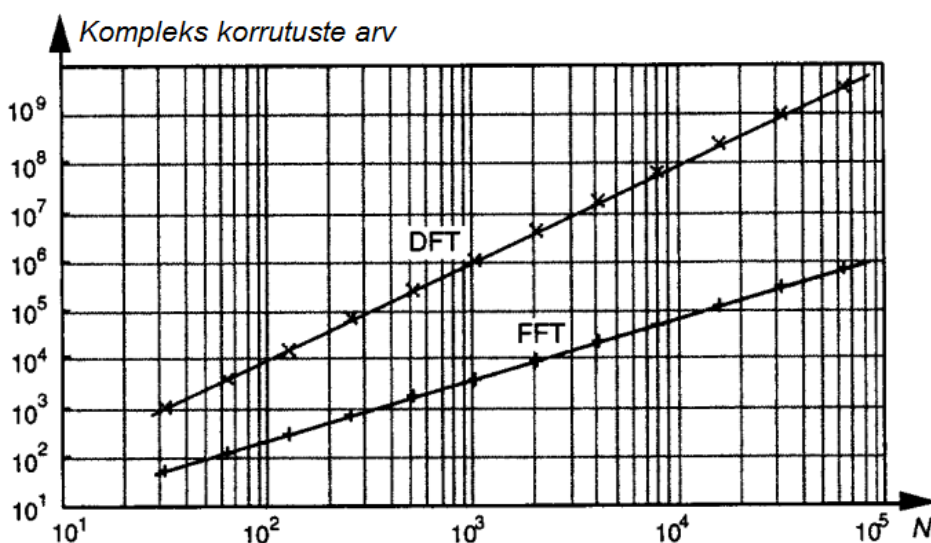
### 5.2.4. Kiire Fourier' teisendus

Kuigi DFT on matemaatiliselt lihtne protseduur leidmaks sagedusspektrit, on see tohutult ebaefektiivne algoritm. Mida suuremaks kasvab DFT punktide arv seda suuremaks kasvab ka arvutusmaht. Näiteks  $N$  punktide arvuga DFT tuleb sooritada  $N^2$  kompleks-korrutustehet. Eelmises alampeatükis kasutatud näite puhul  $N = 8$  ning seega on vaja sooritada 64 tehet [22].

Selleks, et arvutuste hulka vähendada arendati välja kiire Fourier' teisenduse algoritm (inglise k. *fast Fourier' transform*) (FFT). Kuigi FFT algoritme on mitmeid, on enim levinum radix-2 FFT algoritm. Selle kitsendus on, et DFT punktide arv peab olema kahe astendus, teisesõnaga  $N = 2^k$ , kus  $k$  on positiivne täisarv. FFT ei soorita liigseid aritmeetilisi operatsioone, näiteks kui eelmises alampeatükis kasutatud näide täielikult välja kirjutada, siis on näha, et tehet  $1,0607 \cdot -0,707$  arvutatakse neljal erineval korral. FFT puhul sooritatakse see tehe ainult üks kord. Komplekskorrutuste arv  $N$ -punktiga FFT jaoks on ligikaudu [22]

$$\frac{N}{2} \log_2 N. \quad (5.28)$$

Kasutame sõna ligikaudu sellepärast, et osad korrutustehet on tegelikult lihtsad märgi muutused. Näiteks, kui kasutada FFT-d kahe miljoni punkti analüüsimiseks ( $N = 2\,097\,152$ ) siis see võtaks arvutil aega 10 sekundit, DFT puhul võtaks see aega üle kolme nädala. Joonisel 5.5 on näha DFT ja FFT arvutustehete hulga sõltuvus sãmplite arvust [22].



Joonis 5.5. DFT ja radix-2 FFT korrutuste arvu sõltuvus sãmplimispunktidest  $N$  [22]

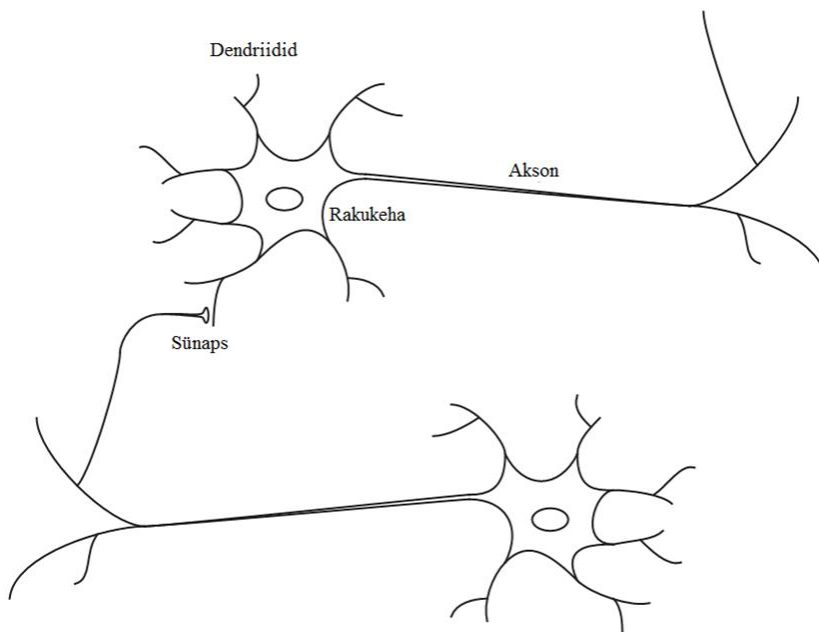
FFT ei ole DFT ligikaudne arvutus. See ei ole võrdne DFT-ga, see ongi DFT. Kõik DFT karakteristikud nagu näiteks sümmeetria, amplituud, lineaarsus, jne kehtivad ka FFT puhul [22].

### 5.3. Tehisneurovõrgustik

Tehisneurovõrgustikud on, nagu nende nimi vihjab, arvutusvõrk, mis üritab simuleerida bioloogilise kesknärvisüsteemi närvirakkude (neuronite) otsuse tegemise protsessi. Simulatsioon toimub üldiselt raku haaval (neuroni ja elemendi haaval). See laenab oma töö põhimõtte bioloogilistelt neuronitelt ja neurovõrkudelt. Seega erineb tehis-neurovõrgustik üldlevinud (digitaalsetest või analoogsetest) arvutusmasinatest, mille ülesanneteks on inimaju arvutusvõime asendamine, täiustamine või kiirendamine, kuna nendes ei pöörata tähelepanu arvatavate elementide ja nende võrkude paigutusele. Tänapäeval kasutatakse tehis-neurovõrgustikke masinõppesüsteemides [23].

#### 5.3.1. Bioloogiline neurovõrgustik

Aju koosneb väga suurest arvust (ligikaudu  $10^{11}$ ) omavahel ühenduses olevatest neuronitest (iga neuroni kohta on ligikaudu  $10^4$  ühendust). Lihtsustatult võib öelda, et neuron koosneb põhiliselt kolmest komponendist: dendriitidest, rakukehast ja aksonist. Lihtsustatud bioloogilist neurovõrku on kujutatud joonisel 5.6 [24].



Joonis 5.6. Bioloogiline neurovõrgustik [24]

Dendriidid on puu-laadsed närvi kiudude retseptorvõrgud, mis kannavad elektri signaale rakukehasse ning rakukeha summeerib ja hoiab sisendsignaale. Akson on üks suur pikk kiud, mis kannab signaale rakukehast teiste neuroniteni. Ühe raku aksoni ja teise raku dendriidi vahelist kontakti nimetatakse sünapsiks. Neuronite korralduse ja individuaalsete sünapside tugevuse määrab keeruline keemiline protsess, mis loob neurovõrgustikule ülesande [24].

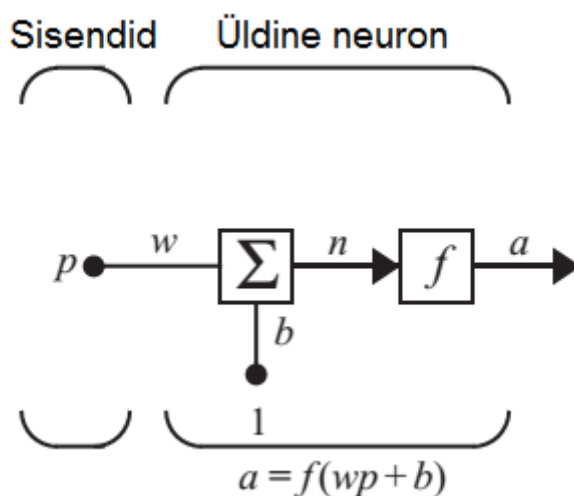
Neuronite struktuurid muutuvad elu jooksul. Need muutused seisnevad sünapside liitekohtade tugevuse suurenemises või vähenemises. Näiteks usutakse, et uued mälestused tekivad sünapside tugevuse muutmisel. Tehisneurovõrgud ei lähene aju kompleksssusele.

### 5.3.2. Tehisneurovõrgustiku mudel

#### Ühe sisendiga neuron

Joonisel 5.7 on kujutatud ühe sisendiga tehisneuronit. Skalaarsisend  $p$  on korrutatud skalaarvõrraga  $w$  selleks, et moodustada  $wp$ , mis on üks terminitest, mis saadetakse summeeriasse. Teine sisend 1 korrutatakse tendentsiga  $b$  ning saadetakse summeeriasse. Summeerija väljund  $n$ , mida nimetatakse võrgusisendiks, saadetakse ülekandefunktsiooni  $f$ , mille tulemiks on neuroni skalaarväljund  $a$  [24].

Kui võrrelda seda lihtsat mudelit eelmises alampeatükis kirjeldatud neuroniga, siis kaal  $w$  vastab sünapsi tugevusele, summeerimine ning ülekande funktsioon vastab rakukehale ning tehisneuroni väljund  $a$  vastab aksoni signaalile.



Joonis 5.7. Ühe sisendiga neuron [24]

Neuroni väljundit arvutatakse valemiga

$$a = f(wp + b). \quad (5.29)$$

Neuroni väljund sõltub ülekandefunktsiooni tüübist ning selle valib neurovõrgu disainer vastavalt ülesande tüübile. Tendents on nagu kaal ainult, et selle sisend on alati võrdne ühega. Kui neuronis ei taheta seda kasutada siis võib selle välja jätta [24].

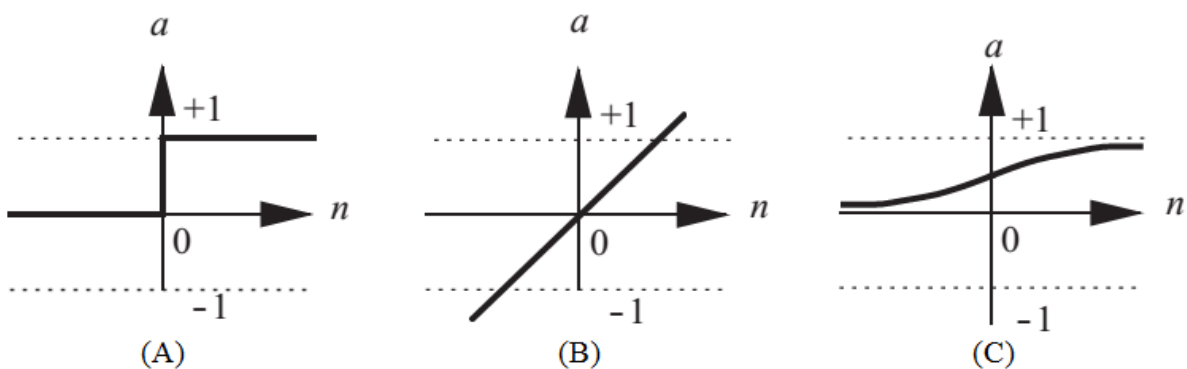
Parameetrid  $w$  ja  $b$  on mõlemad reguleeritavad. Nende reguleerimiseks on mõeldud omaette õppimisreeglid, mis on määratud sisend/väljund suhte eesmärgi poolt [24].

### Ülekandefunktsioonid

Ülekandefunktsioon võib olla lineaarne või mittelineaarne. Sobiv ülekande funktsioon valitakse selle järgi, et see rahuldaks probleemi iseärasust, mida neuron üritab lahendada [24].

Kolm enim levinumat ülekandefunktsiooni tüüpi on:

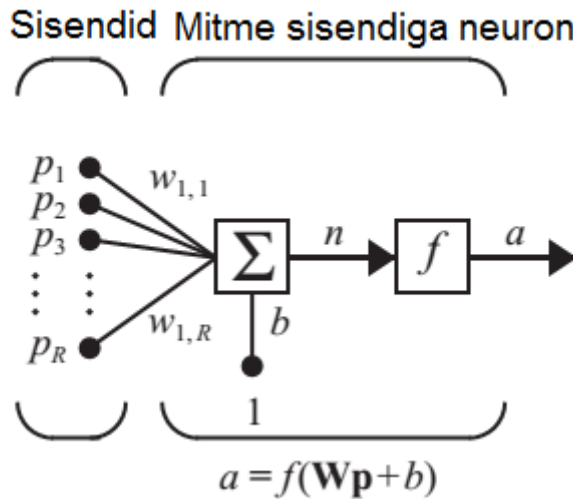
- Kindla piiriga ülekandefunktsioon, mida kasutatakse tuvastamisülesannete puhul (joonis 5.8 (A));
- Lineaarne ülekandefunktsioon, mida kasutatakse adaptiivsete lineaarsete elementidega (ADALINE) neurovõrkude puhul (joonis 5.8 (B));
- Log-Sigmoid ülekandefunktsioon, mida kasutatakse mitmekihilistes neurovõrkudes, mida treenitakse tagasilevimisalgoritmiga (joonis (C)).



Joonis 5.8. Ülekandefunktsioonide karakteristikud. (A) Kindla piiriga ülekandefunktsioon; (B) Lineaarne ülekandefunktsioon; (C) Log-Sigmoid ülekandefunktsioon [24]

### Mitme sisendiga neuron

Tavaliselt on neuronil rohkem kui üks sisend.  $R$  sisendite hulgaga neuron on kujutatud joonisel 5.9. Individuaalsed sisendid  $p_1, p_2, \dots, p_R$  on kaalutud vastava elemendiga  $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$  mis on pärit kaalumatriksist  $\mathbf{W}$  [24].



Joonis 5.9. Mitme sisendiga neuron [24]

Neuronil on tendents  $b$ , mis on summeeritud kaalutud sisenditega ning moodustab võrgu sisendi  $n$ :

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b. \quad (5.30)$$

Võrrandit 5.30 saab maatriks kujul kirjutada:

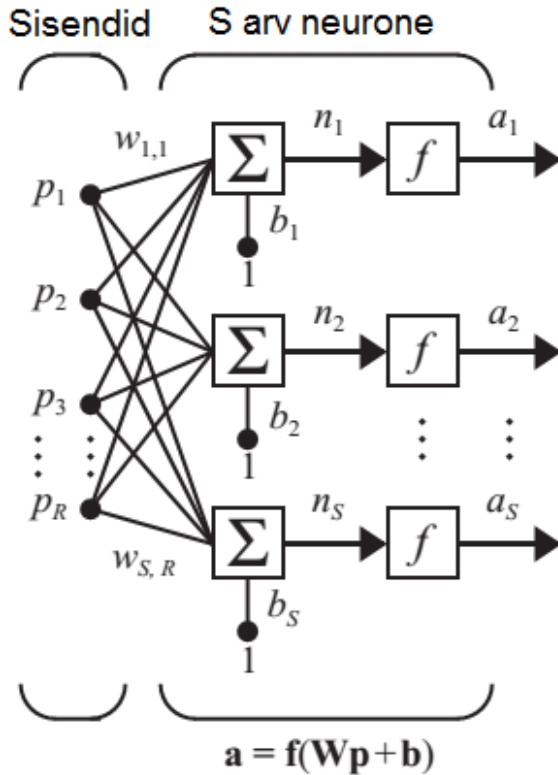
$$n = \mathbf{W}\mathbf{p} + b, \quad (5.31)$$

kus maatriksil  $\mathbf{W}$  on ühe neuroni jaoks ainult üks rida.

### Mitme neuroniga võrk

Ühekihiline  $S$  neuronite arvuga võrgustikku on kujutatud joonisel 5.10. Iga üks  $R$  arv sisenditest on ühenduses iga neuroniga ning kaalumatriksil on nüüd  $S$  arv ridasid [24].

Ühes kihis on kaalumatriks, summeerijad, tendentsi vektor  $\mathbf{b}$ , ülekande funktsioonid ning väljundvektor  $\mathbf{a}$ . Iga sisendvektori  $\mathbf{p}$  element on iga neuroniga ühenduses läbi kaalumatriksi  $\mathbf{W}$ . Igal neuronil on tendents  $b_i$ , summaator, ülekandefunktsioon  $f$  ning väljund  $a_i$ . Kokku moodustavad väljundid väljundvektori  $\mathbf{a}$ . On tavaline, et sisendite arv ei ole võrdne neuronite arvuga (näiteks  $R \neq S$ ) [24].



Joonis 5.10.  $S$  neuronite arvuga neurovõrgustik [24]

Kõikidel ühes kihis olevatel neuronitel ei pea olema sama ülekandefunktsioon. Põhimõtteliselt saab kaks ülaltoodud neurovõrku paralleelselt tööle panna. Mõlemal võrgul oleks samad sisendid kuid mõlemad loovsid ainult osa väljunditest [24].

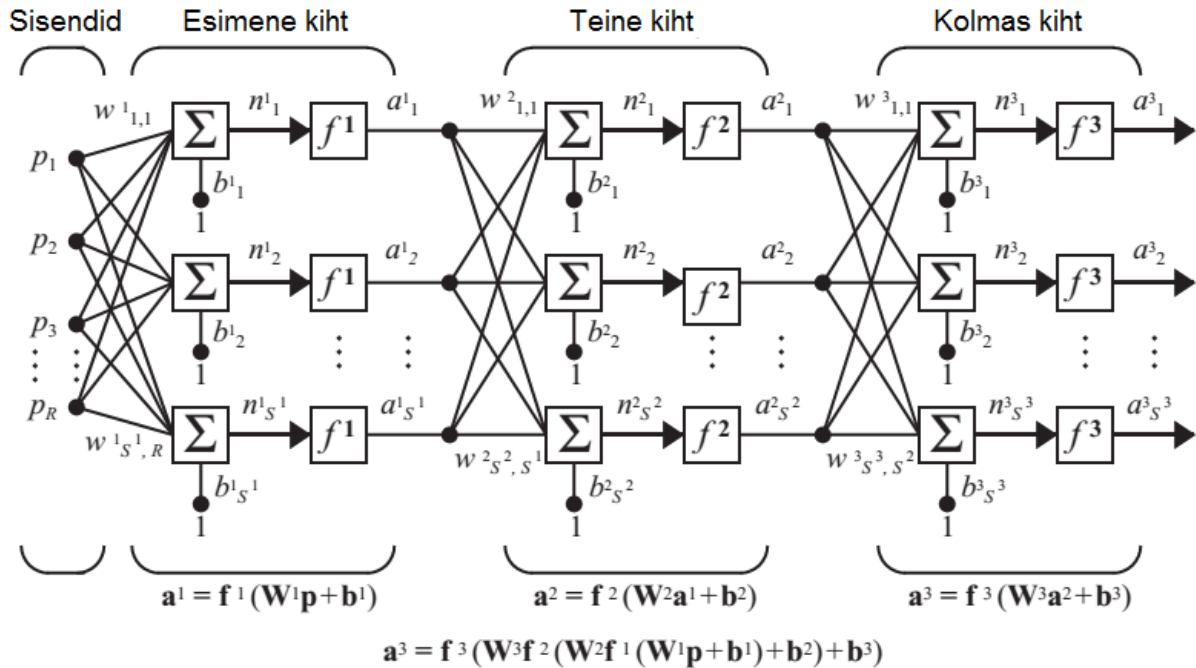
Sisendvektori elemendid sisenevad võrku läbi kaalumatriksi  $\mathbf{W}$ :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S,1} & w_{S,1} & \cdots & w_{S,R} \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

Nagu eelpool oli mainitud, näitab iga matriksi  $\mathbf{W}$  rida, millisele neuronile, mis kaal on määratud ning veerg näitab, mis allikas on kaalule määratud. Näiteks kui meil on kaal  $w_{3,2}$ , siis need indeksid numbrid ütlevad, et see on ühendatud kolmanda neuroniga ning on pärit teisest allikast [24].

### Mitme neuronilised kihid

Joonisel 5.11 on kujutatud kolmekihilist neurovõrku. Igal kihil on oma kaalumaatriks  $\mathbf{W}$ , tendentsi vektor  $\mathbf{b}$ , võrgu sisendvektor  $\mathbf{n}$  ja väljund vektor  $\mathbf{a}$ . Selleks, et joonisel 5.11 erinevatel kihtidel vahet teha kasutame elementide tähistuses ülakirja näiteks esimese kihi kaalumaatriks on  $\mathbf{W}^1$  ning teise kihi kaalumaatriks on  $\mathbf{W}^2$  [24].



Joonis 5.11. Kolmekihiline neurovõrk [24]

Nagu joonisel 5.11 on näha on sisendiks  $R$  arv elemente, esimeses kihis on  $S^1$  arv neuroneid, teises kihis  $S^2$  arv neuroneid, jne. Erinevates kihtides võib olla erinev arv neuroneid [24].

Esimese ja teise kihi väljundid on teise ja kolmanda kihi sisenditeks. Seega teist kihti saab vaadelda kui ühekihilist neurovõrku, millel on  $R = S^1$  sisendit,  $S = S^2$  neuronit ja  $S^1 \times S^2$  kaalumaatriks  $\mathbf{W}^2$ . Teise kihi sisend on  $\mathbf{a}^1$  ning väljund on  $\mathbf{a}^2$  [24].

Kihti, mille väljund on terve võrgustiku väljund, nimetatakse väljundkihiks. Ülejäänud kihte kutsutakse peidetud kihtideks. Joonisel 5.11 kujutatud võrgustikul on väljundkihiks kolmas kiht ning 1. ja 2. kiht on peidetud kihid [24].

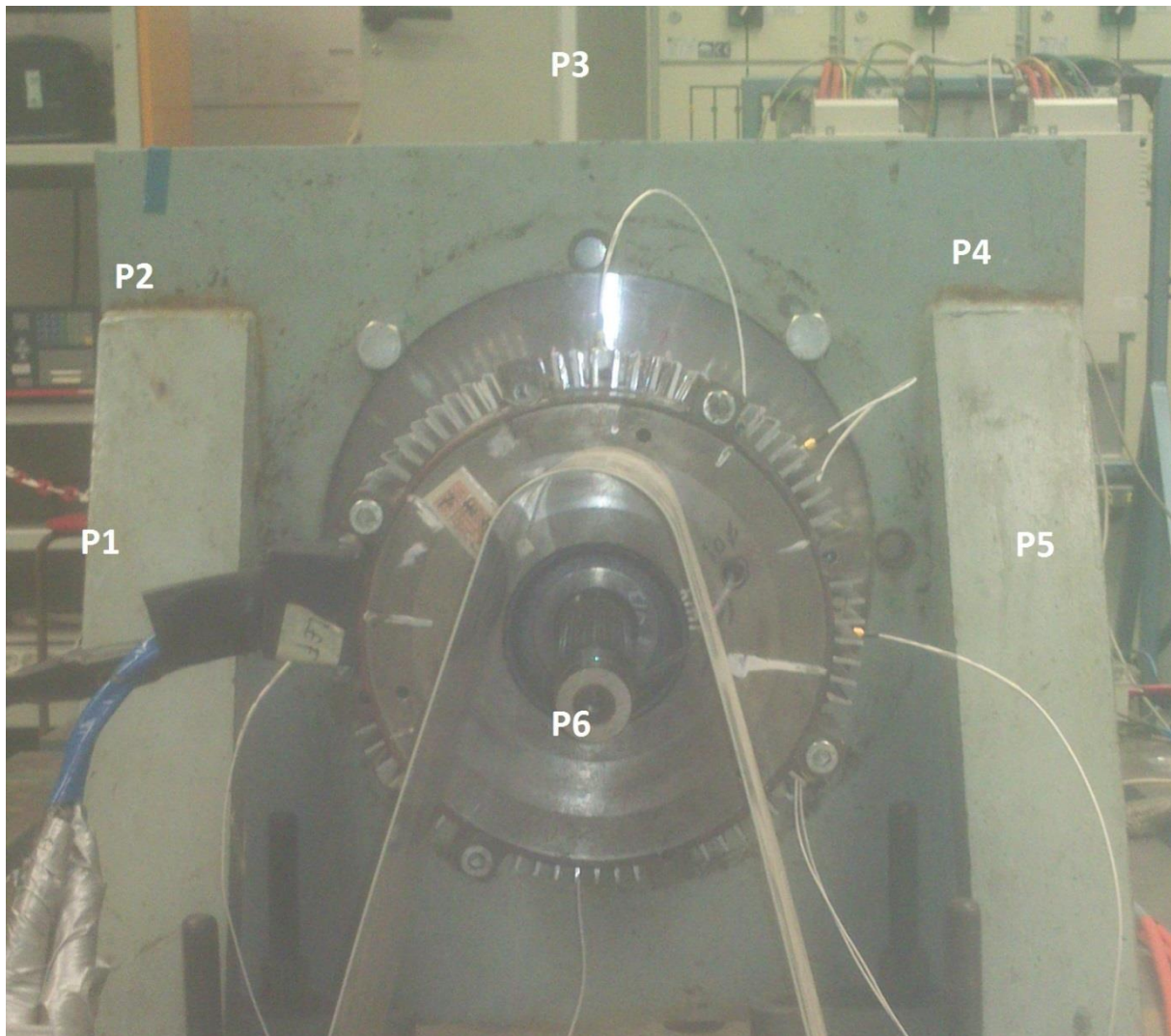
Mitmekihilised neurovõrgud on võimsamad kui ühekihilised võrgud. Näiteks kahekihilist võrgustikku, mille esimene kiht on sigmoid ülekandefunktsiooniga ning teine on lineaarse funktsiooniga, saab trennida ligikaudselt lahendama enamuse funktsioone [24].



## 6. ANALÜÜSI TULEMUSED

Analüüsimiseks kasutasin matemaatikapaketti MATLAB 2015a. Kasutasin seda helifailide sisse lugemiseks ning spektraalanalüüsi tegemiseks. Samuti on ka tehisneurovõrk MATLAB-is koostatud.

Joonisel 6.1 on kujutatud asünkroonmasina heli mõõtepunkte. Igast punktist mõõdeti ühe meetri kaugusel masinast alampunktis 5.5.1 mainitud nutitelefoni masina käivitamise ja väljalülitamise heli ning masina heli püsitalitluses kolme erineva koormusega (tühijooks, poolikkoormus ning täiskoormus). Lisaks oli masinal ka vibratsiooni andurid.



Joonis 6.1. Heli mõõtepunktid

## 6.1. Kiire Fourier' teisenduse tulemused

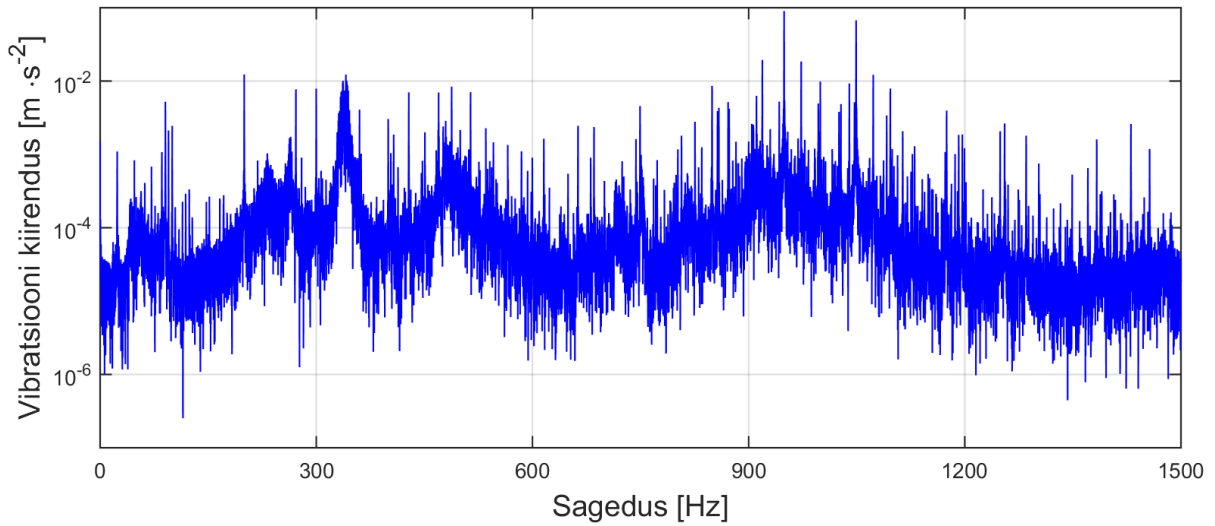
Analüüsimiseks otsustasin kasutada püsitalitluse mõõtetulemusi, kuna sellel juhul oli signaal kõige stabiilsem. Sisse- ja väljalülumine tekitab harmoonikuid, mis segavad andmete analüüsimist.

Joonisel 6.2 on kujutatud kiirendusanduriga mõõdetud vibratsiooni kiirenduse sagedusspekter. See on nn "puhas" signaal, mis peaks sellisel kujul helilainetena levima ning mida peaks olema võimalik salvestada nutitelefoni. Joonistel 6.3 ja 6.4 on näha vastavalt Sony Xperia Go-ga ning Samsung Galaxy S4-ga joonisel 6.1 punktis 3 salvestatud heli sagedusspekter. Selle graafiku loomiseks kasutatud MATLAB-i kood on ära toodud lisas 1. Nagu joonistelt näha, on kõige lähedasem vibratsiooni spektrile Xpria GO-ga salvestatud heli. Selline olukord kehtib enam-vähem kõikide mõõtetulemuste puhul.

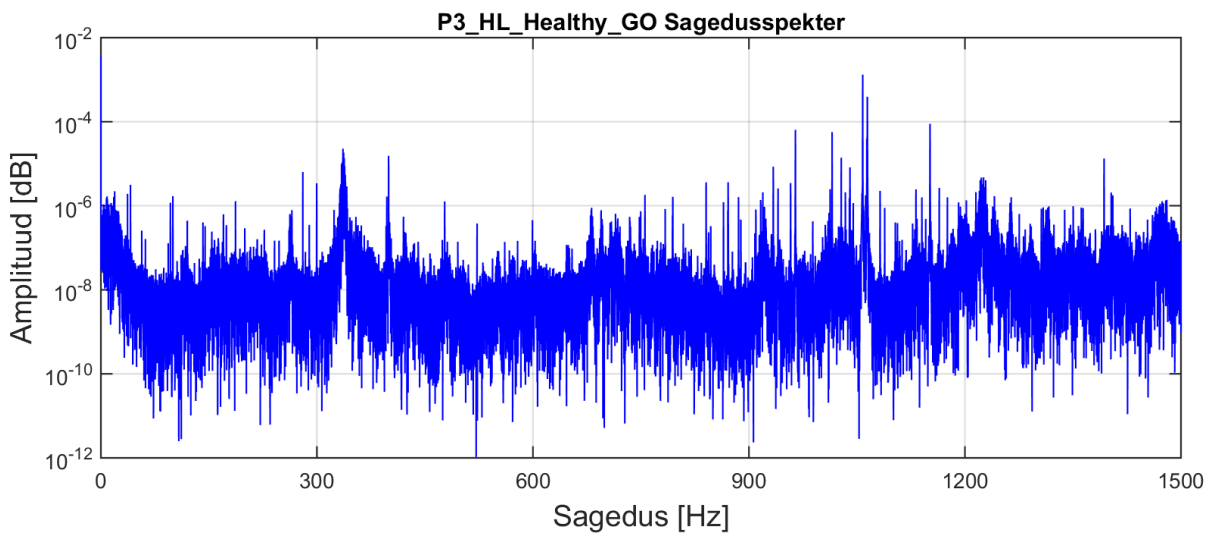
See võib olla tingitud peatükis 5.1 mainitud asjaolude pärast. Mõlemal nutitefonil on sisse ehitatud taustamüra filter. Suure tõenäosusega on tegemist digitaalfiltriga ning ei ole teada, milline on selle filtri algoritm ja parameetrid. Samas võib ka oletada, et kuna Galaxy S4 on uuem nutitefon ja sellel on eraldi audiotöötamiseks mikrokiip ning tegemist on ka Samsungi omaaegse lipulaevaga, on sellel parem ning võimekam helifiltri süsteem. Kuna Sonyl tegeleb helifiltreerimisega süsteemikiip siis seega ei pruugi olla selleks ülesandeks masinale palju ressursi antud.

Mõlemad kasutavad ka erinevaid heliformaate. Kuna MP4 on nii öelda kadudega formaat, siis see võib ka omalt poolt lisada Samsungi suurele erinevusele. Analüüsimiseks oleks WAV formaat kõige parem.

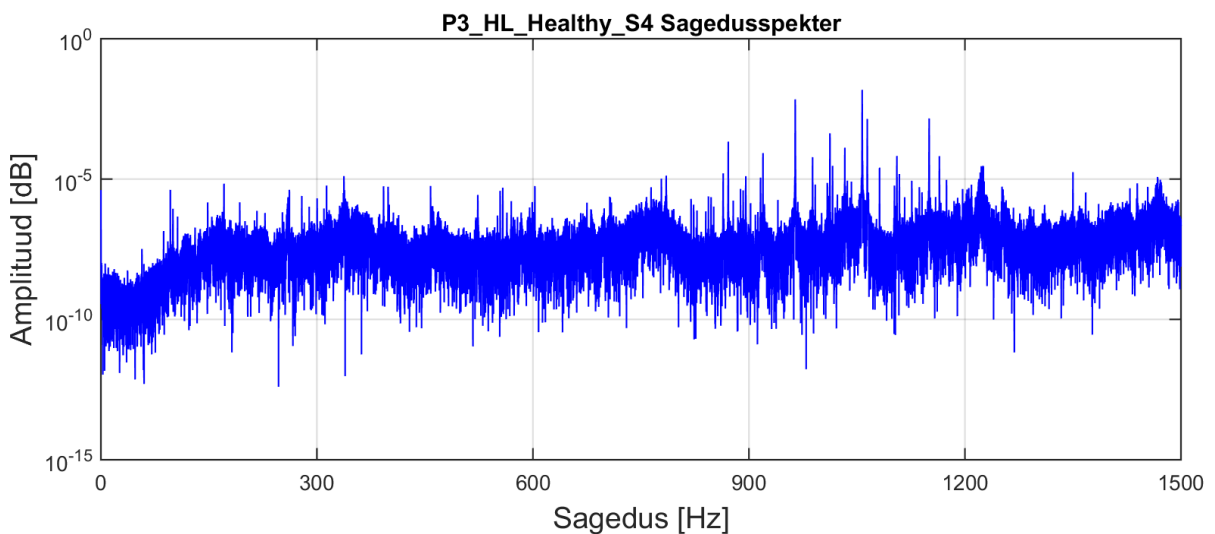
Joonistel 6.6 ja 6.7 on näha punktist 6 suure koormusega mõõdetud tervemasina ning 2 katkise rootori vardaga masina sagedusspektri võrdlust ning joonisel 6.5 on näha selle rikke vibratsiooni kiirenduse sagedusspektrit. Nendelt joonistelt on võimalik näha kuidas erinevad nutitefonidega mõõdetud signaalide sagedusspektrid rikke ning terve mootori puhul. Jooniste 6.6 ja 6.7 tegemiseks loodud MATLAB-i kood on ära toodud lisas 2.



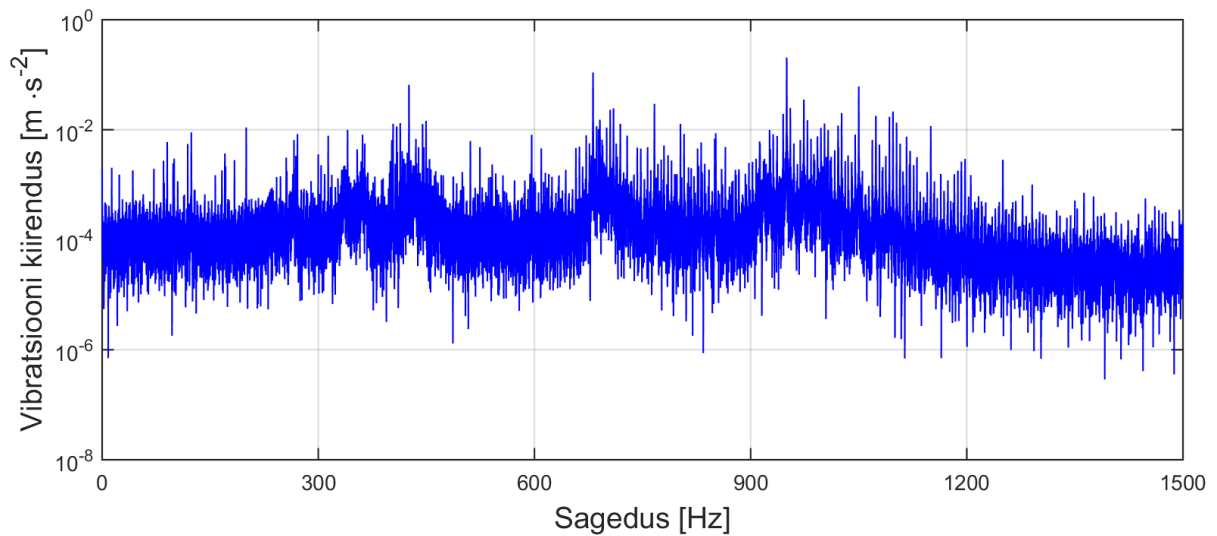
Joonis 6.2. Poole koormusega, terve masina vibratsioonikiirenduse sagedusspekter



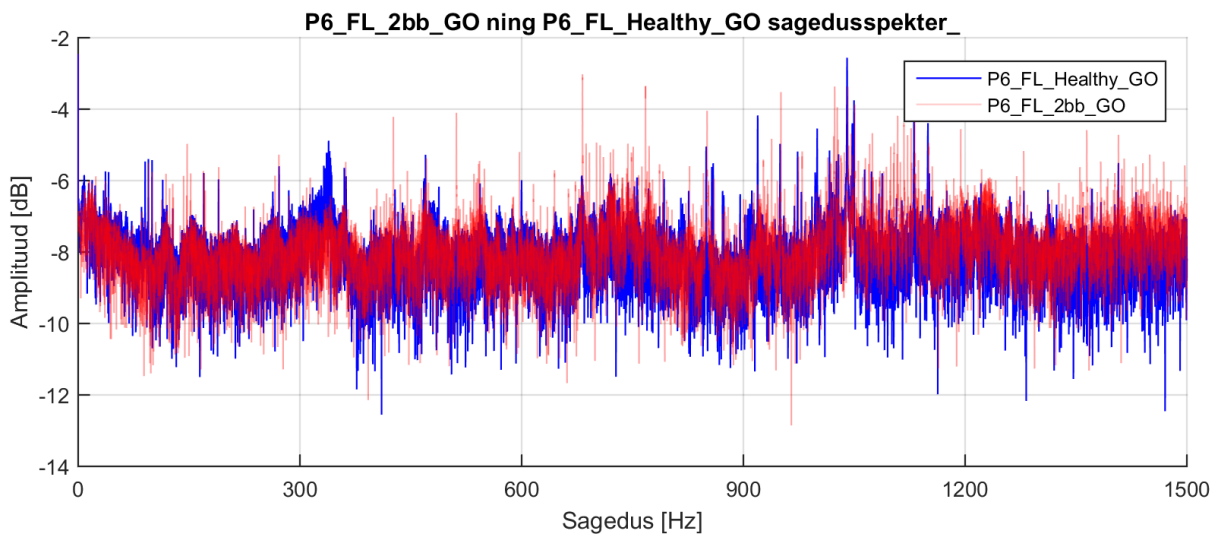
Joonis 6.3. Poole koormusega, terve masina Xperia GO-ga punktist 3 salvestatud heli sagedusspekter



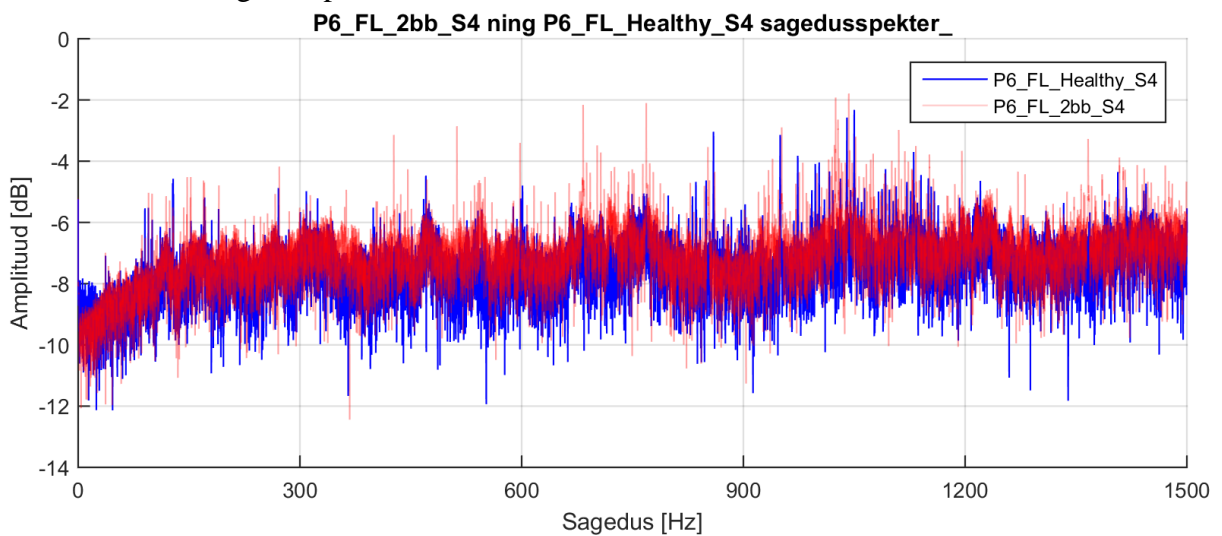
Joonis 6.4. Poole koormusega, terve masina Galaxy S4-ga punktist 3 salvestatud heli sagedusspekter



Joonis 6.5. Suure koormusega, kahe katkise vardaga masina vibratsiooni sagedusspekter



Joonis 6.6. Suure koormusega, kahe katkise vardaga masina Xperia GO-ga punktist 6 salvestatud heli sagedusspekter



Joonis 6.7. Poole koormusega, kahe katkise vardaga masina Galaxy S4-ga punktist 6 salvestatud heli sagedusspekter

## 6.2. Analüüsimine tehisneurovõrgustikuga

Otsustasin helifailide klassifitseerimiseks luua mustri tundmisvõrgustiku. Uurimiseks oli mul kokku 284 helifaili, millest jäi väheks, et rahuldava tulemuseni jõuda. Seega otsustasin iga faili lõigata veel lisaks 10 tükiks (selleks loodud kood on lisas 3). Seega oli tehisneurovõrgustiku loomiseks mul kokku 3124 helifaili.

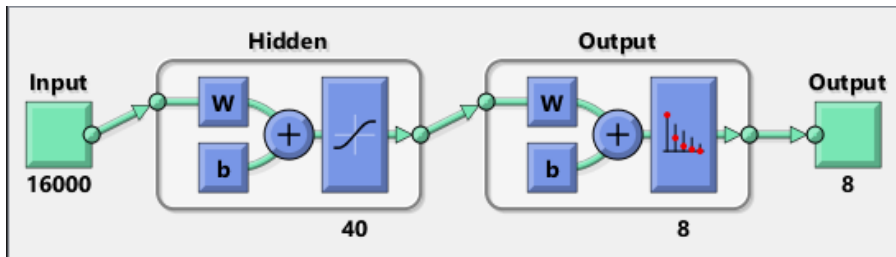
Mustrituvastusvõrgustiku tegemise jaoks läheb vaja kahte andmete maatriksit: sisendmaatriksit ning sihtmaatriksit. Selle ülesande puhul koosnes sisendmaatriks  $3124 \times 16\,000$  elemendist ja sihtmaatriks  $3124 \times 8$  elemendist (sagedus ulatus on seega 0 Hz kuni 16 kHz, suur sagedusulatus võimaldab täpsemat klassifitseerimist). Nende maatriksite puhul tähistab iga rida helifaili. Sisendmaatriksi puhul koosneb iga rida FFT tulemuse elementidest. Sihtmaatriksi puhul määrab rida asünkroonmasina rikke tüübi. Iga rida koosneb nullidest ja number ühest, näiteks ühe katkise varda puhul on rida 1, 0, 0, 0, 0, 0 ning järgmise rikke tüübi juures on 1 ühevõrra edasi liikunud. Maatriksite loomiseks tehtud kood on lisas 4. Enne neurovõrgustiku loomist tuleb need maatriksid transponeerida, sest FFT loob andmeid ridade kaupa, aga neurovõrgustik tahab neid saada teisel kujul. Kokku klassifitseerisin ma sihtmaatriksi jaoks 8 tüüpi riket:

1. Üks katkine rootori varras;
2. Kaks järjestikust katkist rootori varrast;
3. Kaks katkist rootori varrast, millede vahel on 4 tervet varrast;
4. Kolm järjestikust katkist rootori varrast;
5. Dünaamiline ekstsentrilisus kahe järjestikuse rootori vardaga;
6. Dünaamiline ekstsentrilisus kahe katkise rootori varda ning lahtise kuullaagriga;
7. Dünaamiline ekstsentrilisus;
8. Terve masin.

Neurovõrgustiku treenimise puhul seotakse sisendmaatriks kaalude ja tendentside optimaalsete väärtuste leidmisel sihtmaatriksiga. Mustrituvastus neurovõrgustike treenimiseks kasutatakse kaalutud paariga gradiendi tagasilevimisalgoritmi (ingl. k. *scaled conjugate gradient back-propagation*).

Helifailide FFT mustrituvastamiseks lõin kahekihilise neurovõrgustiku, mida kujutatud joonisel 6.8 ning selle programmi kood on ära toodud lisas 5. Esimene kiht koosneb 40 neuronist ning väljundkiht koosneb 8 neuronist, sest nii palju ridu on transponeeritud siht-

maatriksis. Kõik esimeses kihis olevad ülekandefunktsioonid on Log-Sigmoid tüüpi ning väljundkihi omad on Soft Max tüüpi.



Joonis 6.8. Kahekihiline mustrituvastus neurovõrgustik

Üks võimalus kuidas hinnata treenitud neurovõrgustiku klassifitseerimise oskust on kasutada segadusmaatriksit, mida on kujutatud joonisel 6.9. Segadusmaatriksi koostamiseks kasutatakse testimiseks eraldatud andmeid, mida lastakse analüüsida valmistreenitud neurovõrgul, ning sihtmatriksit. Õigesti klassifitseeritud andmed asuvad peadiagonaalil ning valesti klassifitseeritud andmed asuvad sellest väljaspool. Mida suurem on diagonaalil asuvate andmete hulk seda kindlamalt saame veenduda võrgustiku klassifitseerimise täpsuses. Joonisel 6.9 olev segadusmaatriks kirjeldab neurovõrgustiku, mis suudab 96,4% täpsusega sisendsignaali klassifitseerida.

**Confusion Matrix**

1	116 12.4%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 0.4%	1 0.1%	0 0.0%	95.1% 4.9%
2	0 0.0%	106 11.3%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	1 0.1%	1 0.1%	0 0.0%	97.2% 2.8%
3	3 0.3%	2 0.2%	116 12.4%	3 0.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	92.8% 7.2%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	124 13.2%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	99.2% 0.8%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	117 12.5%	0 0.0%	1 0.1%	1 0.1%	97.5% 2.5%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	118 12.6%	4 0.4%	0 0.0%	96.7% 3.3%
7	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	107 11.4%	2 0.2%	96.4% 3.6%
8	2 0.2%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	99 10.6%	96.1% 3.9%
	95.9% 4.1%	95.5% 4.5%	100% 0.0%	95.4% 4.6%	100% 0.0%	95.2% 4.8%	93.0% 7.0%	96.1% 3.9%	96.4% 3.6%
	1	2	3	4	5	6	7	8	

**Target Class**

Joonis 6.9. Segadusmaatriks

Näiteks, kui praegu anda treenitud neurovõrgule analüüsimiseks sisendsignaal siis, selle väljundiks on:

1.0000  
0.0000  
0.0000  
0.0000  
0.0000  
0.0000  
0.0000  
0.0000

See tähendab, et neurovõrgustiku arvates on 100% tegemist rikkega, mida põhjustab üks katkine varras.

Kuna klassifitseerimise kogu täpsus oli 96,4%, ei tähenda see, et võrgustik suudab rikke alati kindlalt tuvastada. Näiteks võib vähestel juhtudel olla selline väljund:

0.3973  
0.1149  
0.0025  
0.1138  
0.0496  
0.1271  
0.0058  
0.1890

Praegune mustrituvastus neurovõrgustik suudab enamuse rikestest õigesti tuvastada. Vajadusel saab seda neurovõrgustiku veel täiendada, näiteks lisada veel kihte ja neuroneid. Kõik see aga suurendab vajaliku arvutusvõimsuse hulka.

## 7. KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö ülesandeks on uurida, kas nutitelefonidega salvestatud helifailide abil on võimalik teha asünkroonmasinale rikke diagnostikat. Selle käigus uurisin, millised rikked võivad asünkroonmasinal tekkida ning mis neid tekitavad. Uuritud sai ka kuidas need rikked mõjutavad masina poolt tekitatud heli. Samas sai ka uuritud helilevimise ja vibratsiooni seost ning ka nende füüsikalisi põhimõtteid.

Helifailide spektraalanalüüsiks sai tehtud MATLAB-is kiire Fourier' teisendusega, mille abil võimalik oli näha sageduse spektri jaotus. Saadud sagedusjaotusi sai võrreldud elektrimasina vibratsiooni kiirendusega ning oli näha kuidas salvestatud signaalid erinesid allikast. Nende FFT tulemuste klassifitseerimiseks otsustasin kasutada tehisneurovõrgustikku, mis on üks masinõppe meetoditest. Klassifitseerimiseks sai samuti MATLAB-is loodud mustrituvastus võimekusega neurovõrk, mida treeniti klassifitseerima FFT tulemusi. Loodud tehisneurovõrk on võimeline tuvastama rikkeid 96,4% täpsusega. Selle meetodiga on põhimõtteliselt võimalik tuvastada elektrimasina rikkeid.

Need vähesed juhud kui neurovõrgustik sisendi valesi klassifitseerib on tingitud rikke keerukusest ning ka sellest, kui palju rike võib sarnaneda mõnele muule rikkele. Joonisel 6.9 asuval segadusmaatriksil on näha kuidas kõige rohkem on valesi klassifitseeritud riket, kus on kaks katkest rootori varrast, millede vahel on 4 tervet varrast (rikke tüüp nr 3). Selle rikke puhul klassifitseeris tehisneurovõrgustik seda kõige rohkem valesi ühe katkise vardaga rikkeks (rikke tüüp nr 1) ning kolme järjestikuse katkise vardaga rikkeks (rikke tüüp nr 4). See võib olla tingitud sellest, et need rikkesignaalid võisid mõnedel olukordadel teineteisele sarnaneda. Näiteks dünaamilist ekstsentrilisust, kus on ka muid rikkeid (rikke tüüp nr 6) klassifitseeriti neljal korral lihtsaks dünaamiliseks ekstsentrilisuseks (rikke tüüp nr 7).

Klassifitseerimise tulemusi võib ka mõjutada heli salvestamise asukoha punkt ning ka heliformaadi tüüp. Kui kuulata neid helifaile, siis sama koormuse puhul on erinevatest punktides salvestatud heli erinev. See võib olla tingitud sellest, mis heliharmonik on just selles punktis ülekaalus ning samas võib salvestatavat heli mõjutada ka helilainete peegeldumine, sest mõningatel juhtudel on graafikutel näha kuidas harmoonikute kuju on sarnane kuid nende asukoht on liikunud vasakule või paremale.



Kuigi praegusi tulemusi võib lugeda edukaks, vajab see teema veel edasist uurimist. Oleks vaja teha veel katseid, kus kasutatakse korralikku helisalvestustehnikat. Nii saaks võrrelda, kuidas erinevad erinevate seadmetega salvestatud helide sagedusspektrid teineteisest ning oleks näha, kas oleks vaja digitaalfiltreid, selleks, et eemaldada signaalist mittevajalik müra. Samuti võiks elektrimasinat toita paljude erinevate sagedustega ning katseid sooritada ka erinevate elektrimasinatega. Katsetada võiks ka nutitelefonidega, millel on teistsugune operatsiooni süsteem, näiteks kasutada Apple iPhone'i, millel on iOS operatsioonisüsteem ning proovida Windows Phone'i Nokiat. Üldse võiks kasutada rohkem erinevaid nutiseadmeid helide salvestamiseks.

Samuti oleks võimalik ka uurida ja katsetada keerulisemaid analüüsimeetodeid. Näiteks arendada suuremaid ning keerulisemaid tehisneurovõrgustikke. Võib ka uurida kas geneetilist algoritmi ja hägusloogikat oleks võimalik kasutada diagnostikaks, sest need moodustavad tänapäeval samuti olulise osa masinõppe algoritmide ning meetodite välja töötlemisel.

Lõputöö ülesanne on täidetud, kuid antud teema tervikliku perspektiivikuse väljaselgitamiseks tuleb seda veel edasi uurida.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] T. Vaimann, *Asünkroonmasina rootori diagnostika staatorisignaaside uurimise meetodil*, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2014, p. 120.
- [2] M. F. Far, A. Belahcen, A. Arkkio and J. Roivainen, "Vibration as Fault Indicator in Electrical Machines," in *Doctoral School of Energy and Geotechnology II*, Pärnu, 2015.
- [3] J. Faiz, B. Ebrahim and M. Sharifian, "Time stepping finite element analysis of broken bars fault in a three-phase squirrel-cage induction motor," *Progress in Electromagnetic Research*, no. 68, pp. 53-70, 2007.
- [4] T. Lindh, *On the Condition Monitoring of Induction Machines*, Lappeenranta Tehnikaülikool, 2003, p. 148.
- [5] R. J. Lawrie, *Electric motor manual: application, installation, maintenance, troubleshooting*, New York: McGraw-Hill, 1987, p. 129.
- [6] A. Kallaste, *Low Speed Permanent Magnet Slotless Generator Development and Implementation for Windmills*, Tallinn: Tallina Tehnikaülikool, 2013, p. 141.
- [7] D. Campos-Delgado, D. Espinoza-Trejo and E. Palacios, "Fault-tolerant control in variable speed drives: a survey," *IET Electric Power Applications*, vol. 2, no. 2, p. 121134, 2008.
- [8] J. F. Gieras, C. Wang and J. C. Lai, *Noise of Polyphase Electric Motors*, Boca Raton: CRC Press, 2005, p. 392.
- [9] I. Saveljev, *Füüsika ülldkursus 2*, Tallinn: Valgus, 1978, p. 327.
- [10] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens ja J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 4th Edition, New York: John Wiley & Sons, 2000, p. 560.
- [11] I. Eiskop ja A. Sillart, *Akustika ja helitehnika*, Tallinn: Valgus, 1988, p. 240.
- [12] S. Kelly, *Fundamentals of Mechanical Vibrations*, 2nd edition, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2000, p. 672.
- [13] J. Roivainen, *Unit-wave response-based modeling of electromechanical noise and vibration of electrical machines*, Espoo: Aalto University, 2009, p. 186.
- [14] A. J. Ellison and C. J. Moore, "Acoustic noise and vibration of rotating electric machines," *Proc. of the Institution of Elect. Eng.*, vol. 115, no. 11, pp. 1633-1640, 1968.

- [15] „GSMarena,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
[http://www.gsmarena.com/samsung\\_i9505\\_galaxy\\_s4-5371.php](http://www.gsmarena.com/samsung_i9505_galaxy_s4-5371.php). [Kasutatud 06 04 2016].
- [16] „GSMarena,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.gsmarena.com/sony\\_xperia\\_go-4782.php](http://www.gsmarena.com/sony_xperia_go-4782.php). [Kasutatud 06 04 2016].
- [17] „IFIXIT,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<https://www.ifixit.com/Teardown/Samsung+Galaxy+S4+Teardown/13947>. [Kasutatud 06 04 2016].
- [18] „SPECOUT,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://system-on-a-chip.specout.com/1/352/ST-Ericsson-NovaThor-U8500>. [Kasutatud 06 04 2016].
- [19] „Difference between,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<http://www.differencebetween.info/difference-between-wav-and-mp4-audio-file-format>. [Kasutatud 06 04 2016].
- [20] M. Kolk, Tartu Ülikool, [Võrgumaterjal]. Available:  
<http://kodu.ut.ee/~mkolk243/2013/KM/loeng-22/KM-22.pdf>. [Kasutatud 07 04 2016].
- [21] M. Kolk, Tartu Ülikool, [Võrgumaterjal]. Available:  
<http://kodu.ut.ee/~mkolk243/2013/KM/loeng-23/KM-23.pdf>. [Kasutatud 07 04 2016].
- [22] R. G. Lyons, Understanding Digital Signal Processing - 2nd ed., New Jersey: Prentice Hall, 2004, p. 666.
- [23] D. Graupe, Principles of Artificial Neural Networks 3rd ed., Singpur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2013, p. 383.
- [24] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. H. Beale ja O. D. Jesús, Neural Network Design 2nd Edition, Oklahoma: Martin Hagan, 2014, p. 800.

**LISAD**

## Ühe signaali periodogrammi loomise kood

```
% Kood loob periodogrammi kõikide helifailide kohta

clc, clear

% Kõikide analüüsitavate failide kataloog
dirName = 'D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto';

folders = subdir(fullfile(dirName)); % Kõik kataloogis olevad kaustad
nrOfFolders = numel(folders); % Kataloogis olevate kaustade arv

failedFiles = {}; % Vigasete helifailide salvestamiseks mõeldud muuruja

for j = 1 : nrOfFolders

    subFolder = folders{1, j};
    if j <= 59 %Number tuleb kaustade struktuurist
        dataType = '*.m4a'; %# kasuta m4a puhul
    else
        dataType = '*.wav'; %# kasuta wav puhul
    end
    %Loendame valitud laiendiga helifailid
    filesF = dir(fullfile(subFolder, dataType));
    %Kaustas olevate failide nimede loetelu
    filesF = {filesF.name};

    if (numel(filesF) == 0)
        continue
    end

    for i=1:numel(filesF)

        %Loeme faili kogu kataloogi aadressi
        fnameF = fullfile(subFolder, filesF{i});
        try %Selleks, et tsüklil ei katkeks vigase faili puhul
            [xF, fsF] = audioread(fnameF); %Loeme masina audio faili sisse
        catch exception %Salvestame vigase faili aadressi
            failedFiles = [failedFiles; {fnameF}];
            continue
        end
        %Jagame faili kogu aadressi osadeks: aadress , failinimi, laiend
        [pathstrF, nameF, extF] = fileparts(fnameF);

        %Teeme FFT masina heli failile
        mF = length(xF);
        nF = pow2(nextpow2(mF));
        xdftF = fft(xF);
        xdftF = xdftF(1:mF/2+1);
        psdxF = (1/(fsF*mF)) * abs(xdftF).^2;
        psdxF(2:end-1) = 2*psdxF(2:end-1);
        freqF = 0:fsF/mF : fsF/2;

        %Joonistame graafiku
        figure('Name', nameF, 'NumberTitle', 'off'); % , 'visible', 'off'

        semilogy(freqF, psdxF, 'b');
        set(gca, 'XLim', [0 1500])
    end
end
```

```

set(gca, 'XTick', 0:300:1500)
set(gca, 'LooseInset', get(gca, 'TightInset'));

xlabel('Sagedus [Hz]', 'FontSize', 14);
ylabel('Amplituud [dB]', 'FontSize', 14)
title([nameF, ' Sagedusspekter'], 'Interpreter', 'none');

grid on;
box on;
name = strcat('Sagedusspekter_', nameF, '.png');

fullname=fullfile(subFolder, name);

%Seadistame väljundpildi resolutsiooni ja tervuse
set(gcf, 'PaperUnits', 'inches', 'PaperPosition', [0 0 1600 700]/200);
%Salvestame pildi
print('-dpng', '-r200' ,fullname)
close;

end
end

```

## Kahe signaali periodogrammide loomise kood

```

%# Kood loob periodogrammi kahest signaalist: rikkega masina signaalist
%# ning terve masina signaalist, mõlemad signaalid on ühel graafikul
%# logaritmilisel skaalal. Musta värvi signaal terve masina oma, punane
%# rikkega maina oma.

clc, clear

% Kõikide analüüsitavate failide kataloog
dirName = 'D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto';

folders = subdir(fullfile(dirName)); % Kõik kataloogis olevad kaustad
nrOfFolders = numel(folders); % Kataloogis olevate kaustade arv

%.m4a failide võrdluse puhul
compareDirSamsung = ['D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto\'...
                    'Samsung Galaxy S4\Healthy machine'];

%.wav failide võrdluse puhul
compareDirSony = ['D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto\'...
                  'Sony Xperia Go\Healthy machine'];

failedFiles = {};%Vigasete helifailide salvestamiseks mõeldud muuruja
k = 0; %Indeks kaustas olevate helifailide loendamiseks

for j = 1 : nrOfFolders

    subFolder = folders{1, j};
    if j <= 59 %Number tuleb kaustade struktuurist
        %Kasutame .m4a failide võrdluse puhul
        compareDirName = compareDirSamsung;
        dataType = '*.m4a';
    else
        % .wav failide võrdluse puhul
        compareDirName = compareDirSony;
        dataType = '*.wav';
    end

    compareFolders = subdir(fullfile(compareDirName));

    %Loendame valitud laiendiga helifailid
    filesF = dir(fullfile(subFolder, dataType));
    %Kaustas olevate rikkega masina failide nimede loetelu
    filesF = {filesF.name};

    if (numel(filesF) == 0)
        continue %Kui kaustas pole vastava laiendiga faile, hüppame
    end %järgmisesse tsükli iteratsiooni

    k = k + 1;
    if (k == 2)
        k = k + 1;
    end

    subCompareFolder = compareFolders{1, k};
    filesH = dir(fullfile(subCompareFolder, dataType));%Loenda helifailid

```

```

filesH = {filesH.name};

for i=1:numel(filesF)

    %Loeme rikkega faili kogu kataloogi aadressi
    fnameF = fullfile(subFolder,filesF{i});
    try %Selleks, et tsükkel ei katkeks vigase faili puhul
        [xF, fsF] = audioread(fnameF);%Loeme rikkega masina audio faili sisse
    catch exception %Salvestame vigase faili aadressi
        failedFiles = [failedFiles; {fnameF}];
        continue
    end
    %Jagame faili kogu aadressi osadeks: aadress , failinimi, laiend
    [pathstrF, nameF, extF] = fileparts(fnameF);

    %Teeme FFT rikkega masina heli failile
    mF = length(xF);
    nF = pow2(nextpow2(mF));
    xdftF = fft(xF);
    xdftF = xdftF(1:mF/2+1);
    psdxF = (1/(fsF*mF)) * abs(xdftF).^2;
    psdxF(2:end-1) = 2*psdxF(2:end-1);
    freqF = 0:fsF/mF : fsF/2;

    %Loeme terve masina failid nimekirja
    fnameH = fullfile(subCompareFolder,filesH{i});
    try %Selleks, et tsükkel ei katkeks vigase faili puhul
        [xH, fsH] = audioread(fnameH);%Loeme terve masina audio faili sisse
    catch exception %Salvestame vigase faili aadressi
        failedFiles = [failedFiles; {fnameH}];
        continue
    end
    %Jagame faili kogu aadressi osadeks: aadress , failinimi, laiend
    [pathstrH, nameH, extH] = fileparts(fnameH);

    % Teeme FFT terve masina failile
    mH = length(xH);
    nH = pow2(nextpow2(mH));
    xdftH = fft(xH);
    xdftH = xdftH(1:mH/2+1);
    psdxH = (1/(fsH*mH)) * abs(xdftH).^2;
    psdxH(2:end-1) = 2*psdxH(2:end-1);
    freqH = 0:fsH/mH : fsH/2;

    %Joonistame graafiku
    figure('Name', nameF, 'NumberTitle', 'off');

    hold 'on';
    plot(freqH, log10(psdxH), 'b');
    plt = plot(freqF, log10(psdxF), 'r');
    plt.Color(4) = 0.2;
    hold 'off';

    set(gca, 'XLim', [0 1500])
    set(gca, 'XTick', [0:300:1500])
    set(gca, 'LooseInset', get(gca, 'TightInset'));

    xlabel('Sagedus [Hz]');
    ylabel('Amplituud [dB]')
    title([nameF, ' ning ' nameH, ' sagedusspekter_'],...

```



```

        'Interpreter', 'none');
legend({nameH, nameF}, 'Interpreter', 'none');
grid on;
box on;
name = strcat('Periodogramm_', nameF, '_ning_terve');

fullname=fullfile(subFolder, strcat(name, '.png'));

%Seadistame väljundpildi resolutsiooni ja tervuse
set(gcf, 'PaperUnits', 'inches', 'PaperPosition', [0 0 1600 700]/200);
%Salvestame pildi
print('-dpng', '-r200', fullname)
close;
end

if (k == 6)
    k = 0;
end
end
end

```

## Failide osadeks jagamise kood

```

%# Kood jagab iga püsitalitluse helifaili 10 tükiks

clc, clear

% Kõikide analüüsitavaite failide kataloog
dirName = 'D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto';

folders = subdir(fullfile(dirName)); % Kõik kataloogis olevad kaustad
nrOfFolders = numel(folders); % Kataloogis olevate kaustade arv

%.m4a failide võrdluse puhul
compareDirSamsung = ['D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto\'...
                    'Samsung Galaxy S4\Healthy machine'];

% .wav failide võrdluse puhul
compareDirSony = ['D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto\'...
                 'Sony Xperia Go\Healthy machine'];

failedFiles = {};%Vigasete helifailide salvestamiseks mõeldud muuruja
k = 0; %Indeks kaustas olevate helifailide loendamiseks

for j = 1 : nrOfFolders
    subFolder = folders{1, j};
    if j <= 59 %Number tuleb kaustade struktuurist
        %Kasutame .m4a failide võrdluse puhul
        compareDirName = compareDirSamsung;
        dataType = '*.m4a'; %# kasuta m4a puhul
    else
        % .wav failide võrdluse puhul
        compareDirName = compareDirSony;
        dataType = '*.wav'; %# kasuta wav puhul
    end

    %Kontrollime, et kas on tegemist püsitalitluse kaustaga
    subFolder = folders{1, j};
    gg = strfind(subFolder, 'Steady state operation');
    if ( isempty(gg) == 1)
        continue
    end

    %Loendame valitud laiendiga helifailid
    files = dir(fullfile(subFolder, dataType));
    %Kaustas olevate helifailide nimede loetelu
    files = {files.name};

    if (numel(files) == 0)%Kui kaustas pole vastava laiendiga faile, hüppame
        continue %järgmisesse tsükli iteratsiooni
    end

    for i=1:numel(files)

        %Loeme faili kogu kataloogi aadressi
        fname = fullfile(subFolder,files{i});
        try %Selleks, et tsükkel ei katkeks vigase faili puhul
            [x, fs] = audioread(fname);%Loeme audio faili sisse
        catch exception %Salvestame vigase faili aadressi

```

```

        failedFiles = [failedFiles; {fname}];
        continue %Lähme järgmisesse tsükli iteratsiooni
    end

    %Jagame faili kogu aadressi osadeks: address , failinimi, laiend
    [pathstrF, nameF, extF] = fileparts(fname);

    %Arvutame heli pikkuse
    soundLenght = x/fs;
    %Arvutame 1/10 heli pikkusest
    oneTenth =round(numel(x)/10) ;

    %Alustame jupitamist
    for k = 1:10
        tmp_x = x(1 : oneTenth);
        name = strcat(nameF , '_track_');
        s = num2str(k);
        name = strcat(name , s);

        if j <= 59 %Number tuleb kaustade struktuurist
            %Kasutame .m4a failide võrdluse puhul
            name = strcat(name , '.m4a');
        else
            %kautame .wav failide võrdluse puhul
            name = strcat(name , '.wav');
        end
        audiowrite(fullfile(subFolder, name), tmp_x, fs);
        tmp_x = circshift(tmp_x, oneTenth);
        clearvars name s;
    end

end

end
end

```

**Failide analüüsiks ettevalmistamise kood**

```

%# Programm loob andmefailid, mille põhjal luuakse nurovõrgustik. Kasutab
%# faile kaustadest nimega 'Steady state operation'.
clc, clear

% Kõikide analüüsitavaite failide kataloog
dirName = 'D:\Audible noise diagnostics Aalto\Tests_Aalto';

folders = subdir(fullfile(dirName)); % Kõik kataloogis olevad kaustad
nrOfFolders = numel(folders); % Kataloogis olevate kaustade arv

frange = 16000;%FFT sagedus ulatus
samples = 3124;%FFT sãmplite arv

%Loomes vastavad maatriksid
fftInputs = zeros(samples, frange); %Sisendmaatriks
fftTargets = zeros(samples, 8); %Sihtmaatriks

%Loomes maatriksi sihtmaatriksi vããrtused.
BB_1 = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; % 1katkine rootori varras
BB_2 = [0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; % 2katkist rootori varrast
BB_2_4 = [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]; % 2katkist rootori varrast,mille
% vahel on 4 tervet varrast
BB_3 = [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]; % 3katkist rootori varrast
DE_2BB = [0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]; % dũnaamiline ekstsentrilisus
% kahe katkise vardaga
DE_2BB_LB = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0]; % dũnaamiline ekstsentrilisus kahe
% katkise vardaga ning lahtise kuul-
% laagriga
DE_HR = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0]; % dũnaamiline ekstsentrilisus
% terve rootoriga
HM = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]; % terve masin

failedFiles = {};
l = 1;

for j = 1 : nrOfFolders

    subFolder = folders{1, j};
    gg = strfind(subFolder, 'Steady state operation');
    if ( isempty(gg) == 1)
        continue
    end

    if j <= 59 %Number tuleb kaustade struktuurist
        %Kasutame .m4a failide võrdluse puhul
        dataType = '*.m4a';

```

```

else
    % .wav failide võrdluse puhul
    dataType = '*.wav';
end

%Loendame valitud laiendiga helifailid
filesF = dir(fullfile(subFolder, dataType));
%Kaustas olevate rikkega masina failide nimede loetelu
filesF = {filesF.name};

if (numel(filesF) == 0)%Kui kaustas pole vastava laiendiga faile,
hüppame
    continue          %järgmisesse tsükli iteratsiooni
end

for i=1:numel(filesF)

    %Loeme faili kogu kataloogi aadressi
    fnameF = fullfile(subFolder,filesF{i});
    try %Selleks, et tsükkel ei katkeks vigase faili puhul
    [xF, fsF] = audioread(fnameF);%Loeme masina audio faili sisse
    catch exception %Salvestame vigase faili aadressi
        failedFiles = [failedFiles; {fnameF}];
        continue    % Hüppame järgmisesse tsükli iteratsiooni
    end

    %Jagame faili kogu aadressi osadeks: address , failinimi, laiend
    [pathstrF, nameF, extF] = fileparts(fnameF);

    %Teeme FFT
    mF = length(xF);          % Algne faili pikus
    nF = pow2(nextpow2(mF));  % Teisenduse pikkus
    yF = fft(xF,mF);         % DFT
    fF = (0 : nF-1)*(fsF / nF); % Sagedusulatus
    powerF = yF.*conj(yF)/nF; % DFT Võimsus

    %Salvestame FFT tulemused sisend maatriksisse
    fftInputs (1, :) = 10*log10(powerF(1:frange));

    %Valime õige sihtmaatriksi rea
    if j <= 59
        if (j >= 5 && j <= 7 )
            fftTargets (1, :) = BB_1;
        elseif (j >= 12 && j <= 14 )
            fftTargets (1, :) = BB_2;
        elseif (j >= 19 && j <= 21 )
            fftTargets (1, :) = BB_2_4;
        elseif (j >= 26 && j <= 28 )
            fftTargets (1, :) = BB_3;
        elseif (j >= 34 && j <= 36 )
            fftTargets (1, :) = DE_2BB;
        elseif (j >= 41 && j <= 43 )
            fftTargets (1, :) = DE_2BB_LB;
        elseif (j >= 48 && j <= 50 )
            fftTargets (1, :) = DE_HR;
        elseif (j >= 55 && j <= 57 )
            fftTargets (1, :) = HM;
        else fftTargets (1, :) = j;
        end
    else

```

```

if (j >= 63 && j <= 65 )
    fftTargets (l, :) = BB_1;
elseif (j >= 70 && j <= 72 )
    fftTargets (l, :) = BB_2;
elseif (j >= 77 && j <= 79 )
    fftTargets (l, :) = BB_2_4;
elseif (j >= 84 && j <= 86 )
    fftTargets (l, :) = BB_3;
elseif (j >= 92 && j <= 94 )
    fftTargets (l, :) = DE_2BB;
elseif (j >= 99 && j <= 101 )
    fftTargets (l, :) = DE_2BB_LB;
elseif (j >= 106 && j <= 108 )
    fftTargets (l, :) = DE_HR;
elseif (j >= 113 && j <= 115 )
    fftTargets (l, :) = HM;
else fftTargets (l, :) = j;
end
end

l = l + 1;

end

end

%Salvestame muutujad eraldi failidesse
save('fftInputs.mat','fftInputs');
save('fftTargets.mat','fftTargets');

```

## Tehisneurovõrgustiku loomise kood

```

%# Programm mustrituvastus tehisneurovõrgu loomiseks

clear;
clc;

% Laeme eelnevalt koostatud sisend- ning sihtmaatriksid
load('fftInputs.mat');
load('fftTargets.mat');

%Transponeerime maatriksid
inputs = fftInputs.';
targets = fftTargets.';

%Looime neurovõrgustikku
neuro_net = patternnet(40);           %Määrame võrgustiku tüübi ning
                                       %neuronide arvu kihis
neuro_net.trainFcn = 'trainscg';     %Treenimise funktsioon
neuro_net.numLayers = 2;             %Kihtide arv

%Andmete hulga jagamine treenimiseks, valideerimiseks ja testimiseks
neuro_net.divideParam.trainRatio = 60/100;
neuro_net.divideParam.valRatio = 10/100;
neuro_net.divideParam.testRatio = 30/100;

%Treenime võrgustikku, kasutame arvutamiseks ka graafikaprotsessorit
[neuro_net,tr] = train(neuro_net, inputs, targets, 'useGPU','yes',...
                       'showResources','yes');

%Testime võrgustikku
outputs = neuro_net(inputs);
errors = gsubtract(outputs,targets);
performance = perform(neuro_net,targets,outputs);

testX = inputs(:,tr.testInd);
testT = targets(:,tr.testInd);
testY = neuro_net(testX);

%Looime segadusmaatriksi
[c,cm] = confusion(testT, testY);

%Looime segadusmaatriksi graafiku
plotconfusion(testT, testY)

%Kuvame neurovõrgustiku klassifitseerimise täpsuse MATLAB-i käsureale
fprintf('Õige klassifitseerimise protsent   : %f%%\n', 100*(1-c));
fprintf('Vale klassifitseerimise protsent  : %f%%\n', 100*c);

%Salvestame loodud neurovõrgustikku
save('neuro_net.mat', 'neuro_net');

```