



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Darius Vaitkevičius**

**KONVEJERIŲ SISTEMOS NUOLATINĖS SROVĖS VARIKLIŲ  
DIAGNOSTIKA IR GEDIMŲ PREVENCIJA NAUDOJANT  
NEURONINĮ TINKLĄ**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Lekt. dr. Jonas Vanagas

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**RIŲ SISTEMOS NUOLATINĖS SROVĖS VARIKLIŲ  
DIAGNOSTIKA IR GEDIMŲ PREVENCIJA NAUDOJANT  
NEURONINĮ TINKLĄ**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

**Vadovas**

Lekt. dr. Jonas Vanagas

**Recenzentas**

Doc. dr. Mindaugas Vaitkūnas

**Projektą atliko**

Darius Vaitkevičius

**KAUNAS, 2018**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Darius Vaitkevičius

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Konvejerių sistemos nuolatinės srovės variklių diagnostika ir gedimų prevencija naudojant neuroninį tinklą“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 18 m.           gegužės           21 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Dariaus Vaitkevičiaus** baigiamasis projektas tema „Konvejerių sistemos nuolatinės srovės variklių diagnostika ir gedimų prevencija naudojant neuroninį tinklą“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Vaitkevičius, Darius. Konvejerių sistemos nuolatinės srovės variklių diagnostika ir gedimų prevencija naudojant neuroninį tinklą. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Jonas Vanagas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos Sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *Bekontakčiai nuolatinės srovės varikliai, neuroniniai tinklai, vibracijos, srovės spektras, diagnostika, monitoringas, klasifikavimas.*

Kaunas, 2018. 74 p.

## SANTRAUKA

**Darbo tikslas:** sudaryti dirbtinį neuroninį tinklą, galintį analizuoti linijinių konvejerių sistemos bekontakčių nuolatinės srovės variklių vibracijų parametrus, aptikti juose esančius gedimus, bei juos suklasifikuoti pagal defekto pobūdį.

Darbe apžvelgiama konvejerių sistemos nuolatinės srovės nuolatiniais mangnetais variklių gedimo problematika bei jų gedimų priežastys. Sistemos gedimo imitavimui, tyrimo metu sukeliama dažniausiai pasitaikantys variklių defektai. Sukeltus defektus indikuojančios dažninės harmonikos tiriama naudojantis fazinės srovės dažnių spektro analizės metodu. Gedimų keliamų vibracijų duomenys surenkami su akcelerometru. Sukurtas neuroninio tinklo klasifikavimo modelis, leidžiantis pagal vibracijų spektro amplitudžių duomenis, gana tiksliai klasifikuoti gedimus pagal jų pobūdį, tyrimo metu pasiektas vidutinis klasifikavimo tikslumas yra 83.375 %. Papildomai su klasifikatoriumi, sudarytas ir vaizdų bei signalų atpažinimo neuroninis tinklas, kurio vidutinė kvadratinė paklaida siekia 0.1. Sudarytas tinklas 78.1 % tikslumu geba atskirti variklio gedimo pobūdį.

Vaitkevicius, Darius. Title of the final project Diagnostics and Fault Prevention of DC Motors of Conveyor System Using Neural Network: Master's thesis in Electrical Power Systems / lekt. dr. Jonas Vanagas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *Brushless DC motors, neural networks, vibrations, current spectrum, monitoring, diagnostics, classification.*

Kaunas, 2018. 74 p.

## SUMMARY

**Aim of research:** Create neural network capable of analyzing and classifying vibration data of brushless permanent magnets DC motors in linear conveyor systems.

Thesis starts with review about, how brushless DC motors are in need for diagnostics and monitoring systems, and how the faults occur in them. While doing the research, in order to simulate system failure, there were created most common faults occurring in brushless DC motors. In the first stage of the research, the fault frequencies were analyzed using motor electrical current signature analysis method, or so called MCSA method. Vibrations occurring from faulty motor were collected using accelerometer. For vibration data analysis, neural classification network model was created. The data collected from vibration spectrum allowed to classify data in quite high accuracy, average classification accuracy was 83.375 %. Together with classification network, there was another network, called pattern recognition, used to analyze vibration data. Pattern recognition network had mean square error value equal to 0.1, and overall fault type identifying network accuracy was 78.1 %.

## TURINYS

SANTRUMPŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS .....	8
ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS .....	9
ĮVADAS .....	12
1. NUOLATINĖS SROVĖS VARIKLIŲ GEDIMŲ TIPŲ IR JŲ STEBĖSENOS - DIAGNOSTIKOS METODŲ APŽVALGA.....	14
1.1. Nekontroliojamų konvejerių sistemų BNS variklių gedimų problematika.....	14
1.2. Bekontakčiai nuolatinės srovės varikliai (BNS).....	15
1.3. BNS variklių gedimų klasifikacija.....	20
1.3.1 Statoriaus gedimai.....	20
1.3.2 Rotoriaus gedimai.....	22
1.3.2.1 Rotoriaus oro tarpo ekscentricitetas.....	22
1.3.2.2 Rotoriaus magnetų ir holo daviklių pažeidimai.....	23
1.3.3 Guolių gedimai .....	24
1.4. Neuroniniai tinklai.....	25
1.4.1 Dirbtinio neuroninio tinklo veikimo principas .....	25
1.4.2 Aktyvacijos funkcijos. ....	27
1.4.3 Daugiasluoksnio neuroninio tinklo architektūra.....	29
1.4.4 Dirbtinių neuroninių tinklų mokymas.....	30
1.4.5 Dirbtinių neuroninių tinklų mokymosi funkcijos .....	32
1.4.6 Dirbtinio neuroninio tinklo klasifikatorius .....	34
1.5. Statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizė (MCSA).....	35
1.5.1 Rotoriaus ekscentriciteto aptikimas su MCSA .....	36
1.5.2 Rotoriaus magnetų gedimų aptikimas su MCSA.....	38
1.5.3 Guolių gedimų aptikimas su MCSA.....	38
2. TYRIMO ATLIKIMO METODIKA .....	41
2.1. Gedimų diagnostika naudojantis srovės spektro analizės metodika.....	41
2.2. Gedimų diagnostika metodika naudojantis vibracijos spektro analizės metodika.....	45

2.3 Eksperimento metu BNS varikliams sukelti defektai.....	50
3. TYRIMO REZULTATAI .....	53
3.1 BNS variklio gedimų diagnostika MCSA metodu .....	53
3.2 BNS variklio gedimų diagnostika analizuojant vibracijų spektrą su neuroniniais tinklais ..	58
IŠVADOS.....	65
REKOMENDACIJOS .....	67
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	68
PRIEDAI .....	72

## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

**RMS** – *angl. (root-mean-square)*; (Galios) kvadratinis vidurkis, naudojamas nusakyti vidutinę vertę.

**BNS** – Bekontaktis nuolatinės srovės.

**DC** – Standartinis šepetėlinis nuolatinės srovės.

**AC** – Standartinis šepetėlinis nuolatinės srovės .

**PLC** – *angl. (Programmable Logic Controller)* Programuojamas loginis valdiklis.

**Profinetas** – *angl. (Profinet)* industrinis techninis tinklo standartas, industrinių prietaisų surenkant duomenis iš įvairių prietaisų ir perduodant informaciją valdymo sistemoms.

**HMI** – *angl. (Human Machine Interface)* mašinos – žmogaus sąsaja suteikianti galimybę valdyti tam pritaikytus įrengimus.

**IP** – *angl. (Internet Protocol Address)* skaitinis prietaiso vardas skirtas komunikacijai internetu.

**SSE** – *angl. (Sum Squared Error)* suminė kvadratinė paklaida naudojama dirbtiniuose neuroniniuose tinkluose.

**MSE** – *angl. (Mean squared normalized error)* vidutinė kvadratinė paklaida naudojama dirbtiniuose neuroniniuose tinkluose.

**MCSA** – *angl. (Motor Current Signature Analysis)* variklio srovės spektro analizė.

**MMF** – *angl. (Winding Magnetomotive Force)* – „Magnetovara“ t.y apvijos kuriama magnetinė jėga (stūma).



## ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

- 1.1.1 Linijinė surinkimo ir perdavimo konvejerių sistema su BNS varikliais. Parengta autoriaus.
- 1.2.1 BNS Varikliai, statorius ir rotorius. Parengta autoriaus.
- 1.2.2 Vidinė įtampa trijose fazėse idealiu atveju. Parengta autoriaus.
- 1.2.3 Standartinio BNS variklio atgalinės vidinės įtampos ir fazinės srovės kreivės. Parengta autoriaus.
- 1.2.4 Principinė BNS Variklio valdymo schema. Parengta autoriaus.
- 1.2.5 Fazių srovės pastoviam BNS variklio momentui. Parengta autoriaus.
- 1.3.1 BNS variklių gedimų pasiskirstymo statistika, pagal IEEE PCIC-94-1 tyrimo rezultatus. Šaltinis - [www.pumpsandsystems.com](http://www.pumpsandsystems.com).
- 1.3.2 Sudegusi BNS variklio apvija dėl trumpojo jungimo tarp fazių. Šaltinis – [www.bruceteakle.blogspot.lt/p/burning-out-bafang-hub-motors.html](http://www.bruceteakle.blogspot.lt/p/burning-out-bafang-hub-motors.html).
- 1.3.3 Variklio oro tarpas idealiu atveju. Parengta autoriaus.
- 1.3.4 Statinis ir dinaminis oro tarpo ekscentricitetai. Parengta autoriaus.
- 1.3.5 Guolis su sulaužytu separatoriumi ir išbyrėjusiais riedėjimo kūnais. Šaltinis – [www.jackstransmissions.com](http://www.jackstransmissions.com)
- 1.4.1 Dirbtinio neuroninio tinklo neuronas. Šaltinis [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org)
- 1.4.2 Dirbtinio neuroninio tinklo architektūra. Šaltinis [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- 1.4.3 Linijinė aktyvacijos funkcija. Šaltinis [www.quora.com](http://www.quora.com)
- 1.4.4 Žingsninė (a) ir bipoliarinė (b) F aktyvacijos funkcijos. Šaltinis [www.quora.com](http://www.quora.com)
- 1.4.5 Vieno sluoksnio neuroninis tinklas. Šaltinis [www.quora.com](http://www.quora.com)
- 1.4.6 Daugiasluoksnis tiesinis vienos krypties neuroninis tinklas. Šaltinis [www.quora.com](http://www.quora.com)
- 1.4.7 Klasifikatoriaus su vaizdų atpažinimo dirbtiniu neuroniniu tinklu. Šaltinis [www.adeshpande3.github.io](http://www.adeshpande3.github.io)
- 1.5.1 BNS variklio statoriaus fazės srovės spektras. Parengta autoriaus.
- 1.5.2 Guolio sandara. Šaltinis [www.doppiaemme.it](http://www.doppiaemme.it)
- 2.1.1 Tyrimo standas Nr. 1. Parengta autoriaus.

- 2.1.2 Siemens SIMATIC Manager LAD programinis kodas. Parengta autoriaus.
- 2.1.3 Oscilografas Tektronix TDS 2004B. Parengta autoriaus.
- 2.1.4 Principinė BNS variklio schema srovės spektro analizei. Parengta autoriaus.
- 2.1.5 MATHLAB 2018a Furjė transformacijai programinis kodas. Parengta autoriaus.
- 2.2.1 Tyrimo stendas Nr. 2. Parengta autoriaus.
- 2.2.2 SM1281 modulio OB1 bloke konfigūravimas TIA Portal V15.0 Basic aplinkoje. Parengta autoriaus.
- 2.2.3 SM1281 modulio valdymo panelės vibracijų daviklių konfigūravimas TIA Portal WinCC aplinkoje. Parengta autoriaus.
- 2.2.4 SM1281 modulio adreso parametrų tinkle konfigūravimas. Parengta autoriaus.
- 2.2.5 Neapdorotų duomenų eksportavimas SM1281 modulio WEB puslapio aplikacijoje. Parengta autoriaus.
- 2.2.6 CMS X-TOOLS programinės įrangos aplinkoje atvaizduoti SM1281 surinkti duomenys. Parengta autoriaus.
- 2.2.7 MATHLAB 2018a programinis kodas vibracijų amplitudžių radimui. Parengta autoriaus.
- 2.3.1 BNS variklis su metalo plokštelėmis rotoriaus paviršiuje. Parengta autoriaus.
- 2.3.2 BNS variklis su pažeistais rotoriaus magnetais. Parengta autoriaus.
- 2.3.3 BNS variklis veikimo metu su nutraukta apvija.
- 2.3.4 BNS variklis su užterštu guolio separatoriumi.
- 3.1.1 Pateiktas eksperimento metu naudoto BNS variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai variklis veikia tvarkingai. Parengta autoriaus.
- 3.1.2 Dinaminio oro tarpo ekscentriciteto ir disbalanso srovės dažnių spektras. Parengta autoriaus.
- 3.1.3 Variklio pažeistais magnetais srovės dažnių spektras. Parengta autoriaus.
- 3.1.4 Variklio nutraukta apvija srovės dažnių spektras. Parengta autoriaus.
- 3.1.5 Skaičiuojamieji guolio parametrai SM1281 modulio aplinkoje. Parengta autoriaus.
- 3.1.6 Variklio su užterštu guoliu srovės dažnių spektras. Parengta autoriaus.

- 3.2.1 Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – variklio su oro tarpo ekscentricitetu. Parengta autoriaus.
- 3.2.2 Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – variklio su užterštu guolio separatoriumi. Parengta autoriaus.
- 3.2.3 Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – pažeistais rotorius magnetais. Parengta autoriaus.
- 3.2.4 Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – nutraukta apvija. Parengta autoriaus.
- 3.2.5 Visų skirtingų eksperimento metu sukeltų defektų vibracijų spektras. Parengta autoriaus.
- 3.2.6 Neuroninio tinklo kryžminės entropijos mokymosi eiga. Parengta autoriaus.
- 3.2.7 Neuroninio tinklo mokymosi rezultatų pateikimas sumišimo matricoje. Parengta autoriaus.

## IVADAS

Šių dienų pramonėje elektros varikliai yra naudojami beveik visose srityse, gamybos procesuose, sandėliavime, transportavime ir t.t. Dėl itin plataus jų panaudojimo elektros varikliai tampa vienu pagrindinių industrinių įmonių įrankių valdant ir palaikant produkcijos gamybos ir realizavimo procesus. Todėl atsiradus neplanuotiems elektros variklių gedimams pramonės įmonės rizikuoja patirti finansinius nuostolius. Toki nenumatyti ir nekontroliuojami gedimai ne tik sukelia gamybos proceso laiko praradimus, bet ir sukelia riziką gedimų zonose dirbančiam personalui bei gali sukelti papildomus gedimus, kituose mazguose ar net padaryti žalą gamtai.

Norint sumažinti šių rizikos faktorių tikimybę variklių gedimai turi būti pastebėti ir pašalinti laiku, gerokai iki tol, kol variklis patenka į kritinį režimą, kuriame jo darbo režimas tampa nestabilus. Norint tai pasiekti, valdymo sistemose būtina įdiegti variklių diagnostikos ir stebėsenos sistemas, kurios galėtų stebėti svarbiausius viso objekto taškus.

Kolumbijos universiteto profesorius Venkatas Venkatasubramanias apibendrina svarbiausius sistemų stebėsenos ir diagnostikos metodus ir suskirstė juos į keturias kategorijas:

- a) kokybiniai metodai;
- b) kokybiniai metodai pagal esamos sistemos modelį;
- c) kiekiniai metodai;
- d) kiekiniai metodai pagal esamos sistemos procesų istoriją;

Tačiau nei vienas iš šių metodų neturi tokių savybių, kaip greitas klaidų aptikimas ir analizavimas, patikimumas, ir adaptyvumas. Viena iš išiečių yra kartu naudoti modernius industrinius diagnostinius įrankius kartu su dirbtiniais neuroniniais tinklais, kurie geba imituoti žmogaus smegenų veiklą ir gali sudaryti prognozes apie artėjančius gedimus realiu laiku, pagal neuroninio tinklo analizę rezultatus galima informuoti įmonės pramoninę elektros sistemą prižiūrintį personalą ar net sustabdyti pačią sistemą be žmogaus intervencijos. Neuroniniai tinklai, kaupdami įvairių daviklių duomenis visoje sistemoje gali pastebėti menkiausią parametru pokytį ir nedelsiant sureaguoti, jeigu tas pokytis yra rizikos zonoje. Šiame darbe dėmesys bus skiriamas linijinių konvejerių sistemų patikimumo gerinimui, kurios yra naudojamos beveik visose industrijos šakose, bus stengiamasi surinkti kuo daugiau variklio parametru, juos apdoroti ir pateikti rezultatą nusakantį esamo BNS variklio būklę. Norint pasiekti norimų rezultatų su dideliais sunkiai apdorojamų duomenų kiekiais, būtina sukurti gana sudėtingą neuroninių tinklų modelį.

**Tyrimo objektas:** Nuolatinės srovės, bekontakčiai, nuolatiniais magnetais elektros varikliai, naudojami linijinėse konvejerių sistemose.

**Darbo tikslas:** sudaryti dirbtinį neuroninį tinklą, galintį analizuoti linijinių konvejerių sistemų bekontaktį nuolatinės srovės variklių vibracijų parametrus, aptikti juose esančius gedimus, bei juos suklasifikuoti pagal pobūdį.

**Darbo uždaviniai:**

1. Sukonstruoti laboratorinį stendą konvejerių sistemos imitavimui.
2. Sukelti mechaninius gedimus tiriamuose varikliuose ir surinkti duomenų masyvus.
3. Atlikti variklių srovės dažnių spektro analizę.
4. Sukurti neuroninį tinklą, galintį nustatyti variklio gedimo pobūdį pagal vibracijų duomenis.
5. Palyginti naudotų gedimų identifikavimo metodus.

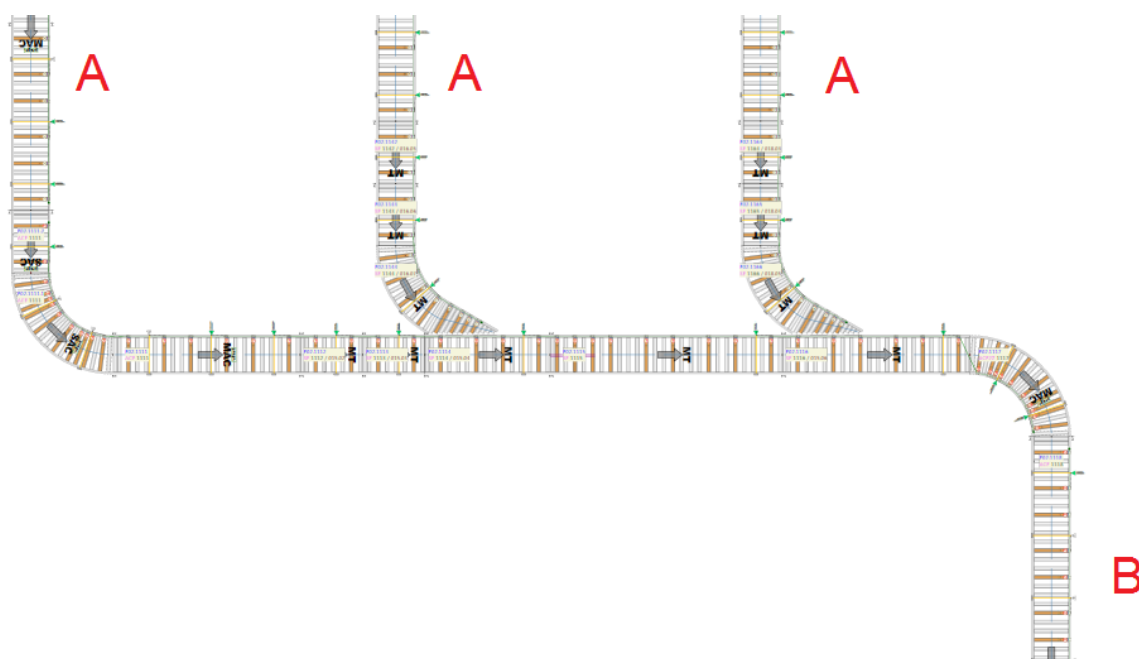
**Darbo metodai:**

1. Mokslinių straipsnių analizė.
2. Eksperimentinių duomenų analizė.
3. Neuroninio tinklo modeliavimas ir pritaikymas.

# 1. NUOLATINĖS SROVĖS VARIKLIŲ GEDIMŲ TIPŲ IR JŲ STEBĖSENOS - DIAGNOSTIKOS METODŲ APŽVALGA

## 1.1. Nekontroliojamų konvejerių sistemų BNS variklių gedimų problematika

Įvairiose moderniose pramonės įmonėse, kuriose reikalingas didelis pralaidumo srautas, sistemos stabilumas ir tikslumas, produktų transportavimui naudojami ne diržiniai konvejeriai, bet valdomi riedėjimo velenėlių konvejeriai. Didelės konvejerių sistemos turi begalę įvairių mazgų, produktų skirstymui, sistemos papildymui, rūšiavimui ir taip toliau, tačiau beveik visos iš jų veikia nuosekliai, pavyzdžiui produktas pirmiausia patenka per priėmimo liniją, toliau keliauja į paskirstymo linijas, iš jų į transportavimo liniją ir panašiai, tokie perdavimo mazgai dažniausiai turi vieną didelį transportavimo konvejerį, jam sugedus stoja visa sistema esanti už jo ir visa sistema esanti prieš jį, kadangi nebelieka vietos, kur atiduoti produkciją abiem kryptimis. 1.1.1 paveiksle pavaizduotas konvejerių sistemos pavyzdys, kuriame galima matyti, kad konvejeriai A yra priklausomi nuo konvejerio B, sustojus jam, A konvejeriai tampa nefunkcionalūs. Kadangi didelio tikslumo reikalaujančiose sistemose kiekvienas riedėjimo velenėlis yra bekontaktis nuolatinės srovės variklis, netikėtai sugedus bent vienam iš jų sustoja visa sistema, nes tolimesnis produkcijos perdavimas tampa fiziškai nebeįmanomas. Tokios sistemos paprastai turi šimtus ar net tūkstančius tokių variklių.



1.1.1 Pav. Linijinė surinkimo ir perdavimo konvejerių sistema su BNS varikliais.

BNS varikliai turi nemažai privalumų juos lyginant su standartiniais šepetėliniais DC varikliais bei su standartiniais kintamos srovės varikliais. Keli iš šių privalumų yra:

- Geresnės sukimo momento priklausomybės nuo greičio charakteristikos.
- Didesnis valdymo dinamiškumas.
- Aukštesnis efektyvumas.
- Ilgesnė tarnavimo trukmė.
- Tylesnis veikimas.
- Platesni greičio valdymo režiai.
- Geresnis variklio santykis tarp variklio galios ir jo gabaritų.

Būtent dėl šių privalumų BNS varikliai yra naudojami didelio efektyvumo ir patikimumo reikalaujančiose sistemose. BNS varikliai yra santykinai naujos technologijos varikliai, todėl jie neturi išdirbtų diagnostikos ir stebėsenos sistemų kaip standartiniai DC ir AC varikliai [6].

Įrengimo monitoringas yra apibrėžiamas kaip nuolatinis jų būklės vertinimas visos sistemos atžvilgiu per jo visą eksploataavimo laiką. Itin svarbu turėti galimybę aptikti gedimus ankstyvose stadijose. Toks gedimų aptikimas vadinamas – prognozuojamu, prevenciniu klaidos aptikimu. Laiku gautas įspėjimas apie artėjantį gedimą ir operatyviai atliktas įrenginio techninis aptarnavimas gali padėti padėti išvengti sudėtingų gedimų, dėl kurių atsiranda brangios prastovos. Todėl yra būtina, kurti ir tobulinti esamas sistemas šių motorų diagnostikai ir stebėsenai, gedimų nustatymui ankstyvose stadijose [6].

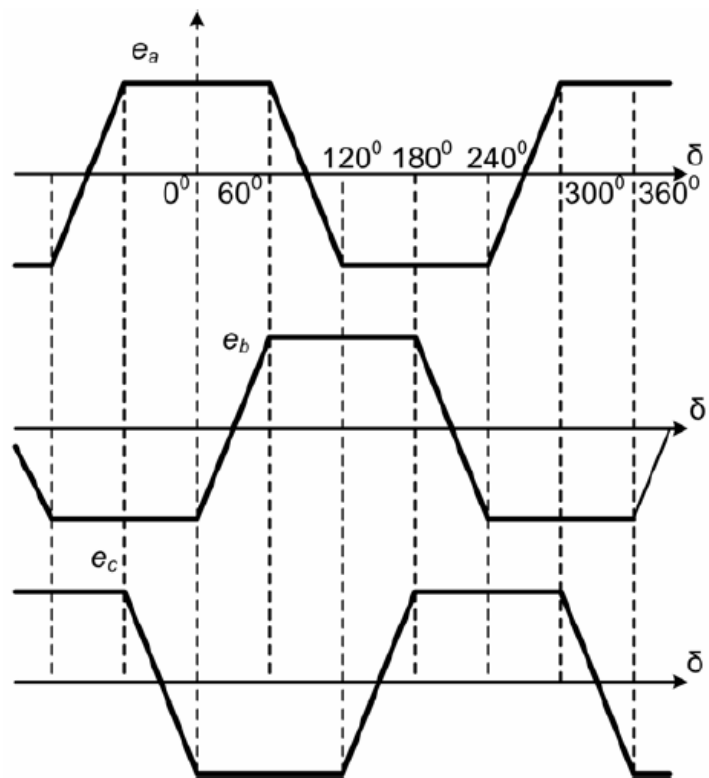
## **1.2 Bekontakčiai nuolatinės srovės varikliai (BNS)**

Platus puslaidininkinių elementų prieinamumas suteikė galimybes pašalinti komutacinių mechanizmų mechaninius perjungimus, išlaikant daugelį jų naudingų savybių. Esminis skirtumas tarp šepetėlinių nuolatinės srovės variklių ir BNS variklių, yra tas, kad pastarieji neturi šepetčių kontakto, ir rotorius sudaro nuolatinis magnetas. 1.2.1 pav. Galima matyti keletą BNS tipo variklių, jų rotorius ir statorius. Šie varikliai oro tarpe generuoja stačiakampio formos magnetinį srautą bei kuria trapecinės formos atgalinę vidinę įtampą statoriuje. Idealaus atvejo atgalinės vidinės bangos formos 1.2.2 pav. BNS varikliai yra specialiai kuriami taip, kad visada išlaikytų visada pastovų sukimo momentą, juos valdant šešių pakopų stačiakampiais srovės impulsais, kaip parodyta 1.2.3 pav. Statoriaus apvijų konstrukcija iš esmės yra tokia pati kaip sinchroninio elektros variklio, išskyrus tai, kad laidininkai yra iškloti tolygiai, pilnai užpildant griovelius, tai padeda padidinti trapecinės atgalinės vidinės įtampos magnetinio srauto plotą. Rotorių standartiškai susideda iš ant paviršiaus sumontuotų nuolatinių magnetų, kurie sukuria 180

laipsnių magnetinius laukus, kurių skirtingi poliai nepersidengia 60 laipsnių kampu fazių atžvilgiu [27].

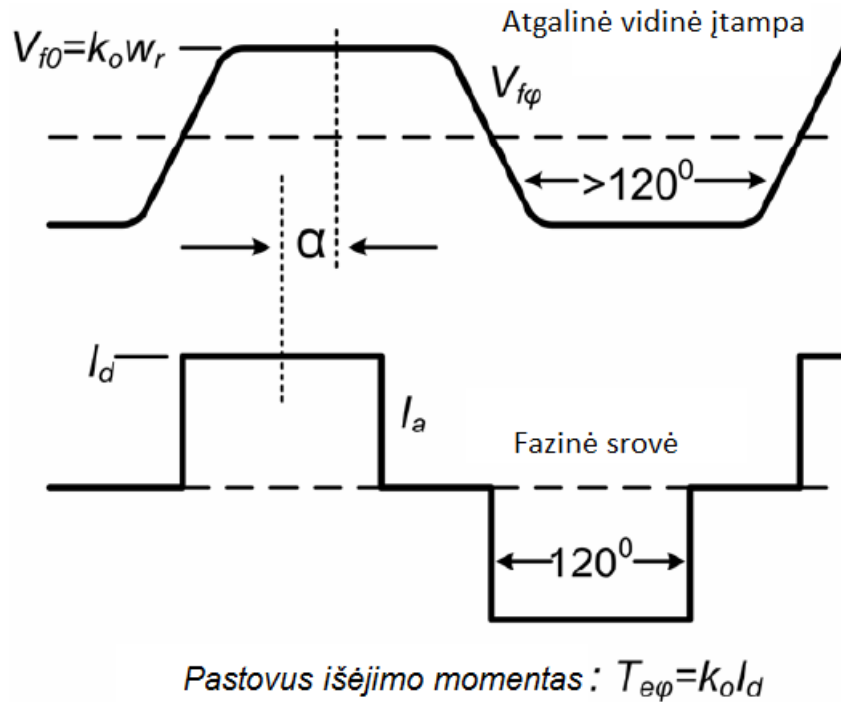


1.2.1 Pav. BNS Varikliai, statorius ir rotorius.



1.2.2 Pav. Vidinė įtampa trijose fazėse idealiu atveju.





**1.2.3 Pav.** Standartinio BNS variklio atgalinės vidinės įtampos ir fazinės srovės kreivės.

Pav. 1.2.3 matosi, kad kas 60 laipsnių intervalus, dviejų fazių atgalinės vidinės įtampos bangos yra tiesios. BNS variklio veikimo metu, kas kiekvieną 60 laipsnių intervalą, tos fazės kurių bangos forma yra tiesi linija yra sujungiamos nuosekliai, o srovės amplitudė tekanti per jas yra valdoma, trečioji fazė yra paliekama atvira. Tai sukuria elektromagnetinį momentą, kuri nesvyruoja kintant rotoriaus pozicijai. Dviejų polių BNS variklio atgalinė vidinė tarp fazių yra apskaičiuojama [27]:

$$e_{f-f} = k_E \omega_m, \text{ čia, } k_E = 4N_s B_f l_r; \quad (1)$$

Ir elektromagnetinis momentas dviejų polių BNS varikliui apskaičiuojamas:

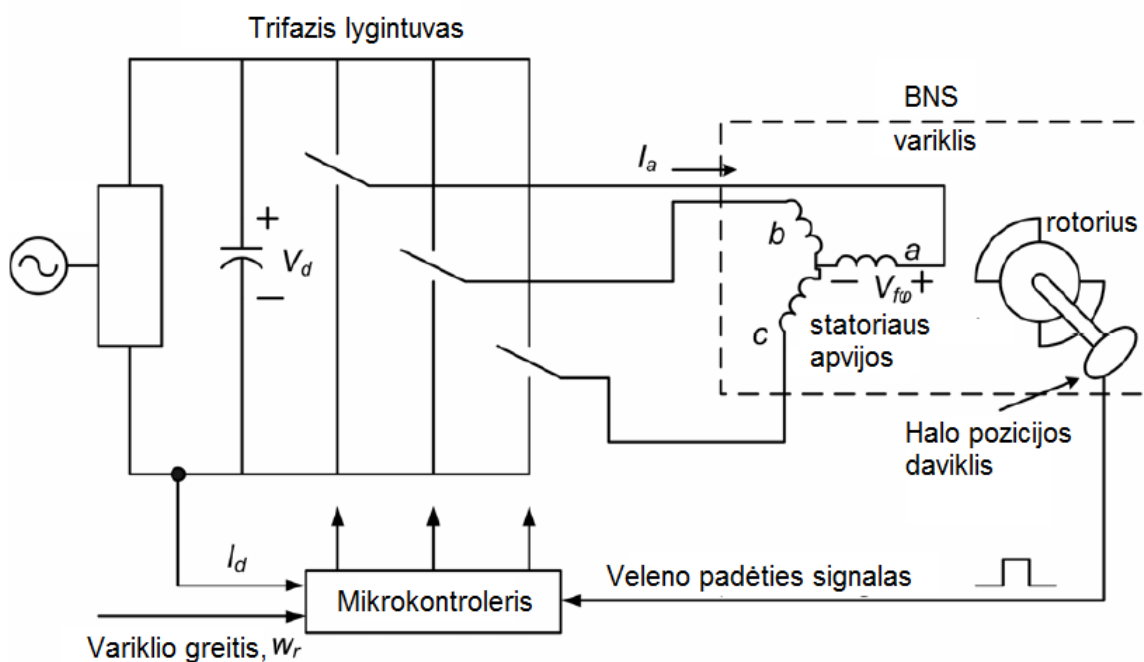
$$T_{em} = k_T I, \text{ čia, } k_T = 4N_s B_f l_r; \quad (2)$$

Čia  $k_E$  – įtampos konstanta, matavimo vnt. V/(rad/s),  $\omega_m$  – rotoriaus sukimosi greitis, matavimo vnt. (rad/s),  $N_s$  – vijų skaičius kiekvienoje apvijoje,  $B_f$  – vidutinis magnetinio srauto tankis oro tarpe teslomis,  $l$  – ilgis,  $r$  – rotoriaus spindulys metrais,  $k_T$  – sukimo momento konstanta (Nm/A),  $I$  – inverterio išėjimo nuolatinė srovė amperais, o  $k_E = k_T$ .

Antroji lygtis (2) yra itin reikšminga, kadangi ji indikuoja, kad elektros variklio kuriamas sukimo momentas gali būti tiesiogiai valdomas keičiant srovės amplitudę. Būtent dėl šio panašumo su standartiniais DC varikliais, šie varikliai yra vadinami bekontakčiais nuolatinės srovės varikliais. Nepaisant šio pavadinimo populiarumo, dėl trapezinės formos atgalinės vidinės

įtampos, BNS variklis veikimo principu yra labiau panašus į sinchroninį variklį. Visgi, BNS variklis veikia kaip komutacinis variklis. Jo tuščiosios eigos greitis yra apytiksliai proporcingas maitinimo įtampos amplitudei, greičio sumažinimas, sumažina ir sukimo momentą, kadangi esant žemesnei įtampai padidėja įtampos kritimas apvijose.

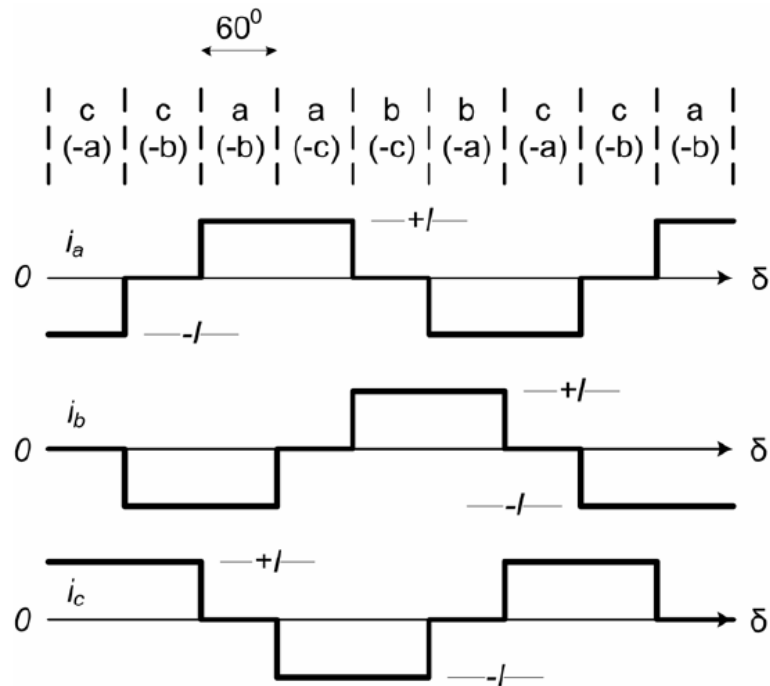
Valdymo procesas kai komutuojamos tik dvi apvijos, kas 60 rotoriaus pasisukimo laipsnių, vadinamas elektroniniu komutavimu. Motoras yra maitinimas iš trifazio inverterio. Fazių perjungimas atliekamas surenkant signalus iš pozicijos daviklių. Vieni dažniausiai naudojamų pozicijos daviklių yra halo efekto davikliai, kurie yra montuojami prie variklio oro tarpo, kad galėtų aptikti besisukančių rotoriaus magnetų magnetinį lauką. Davikliai sumontuoti 120 laipsnių intervalais ir yra tinkamai sulygiuojami su skirtingų fazių statoriaus apvijomis, atiduoda elektrinius impulsus, kurių duomenys yra panaudojami, sudaryti trijų fazių perjungimo seką. BNS variklio yra paleidimui reikalingas šešių valdymo signalų mikrokontroleris, inverteris, halo davikliai pav. 1.2.4 [27, 10].



1.2.4 Pav. Principinė BNS variklio valdymo schema

BNS varikliai dažniausiai turi uždara srovės grandinę statoriaus srovei reguliuoti ir išorinę grandinę greičiui reguliuoti. Kiekvieno ciklo metu, įvyksta šeši diskretiniai perjungimai inverteryje. Tolygūs diskretiniai perjungimai kiekvieno ciklo metu užtikrina pastovą statoriaus gnybtų porų sujungimo seką pav. 1.2.5. Paveiksle 1.2.5 komutuojančios fazės yra pavaizduotos 60 laipsnių intervalais, kurių vienos fazės srovė  $+I$  (žymėjimas  $+$ ), o kitos vienos fazės srovė yra neigiama,  $-I$  (žymėjimas  $-$ ), trečioji fazės srovės vertė yra nulis (atvira grandinė). Kol rotorius sukasi ir  $I_a = I$  bendra srovė  $I$  tekanti per visas tris fazes yra laikoma konstanta. Todėl

per kiekvieną 60 laipsnių intervalą, srovės konstanta  $I$ , kuri teka per bet kurias dvi variklio fazes sukuria sistemiškai nekintantį elektromagnetinį sukimo momentą. Todėl galima teikti, jog norint išlaikyti pastovų sukimo momentą variklyje, komutuojančių fazių perjungimo sekos turi būti itin tikslios [10].

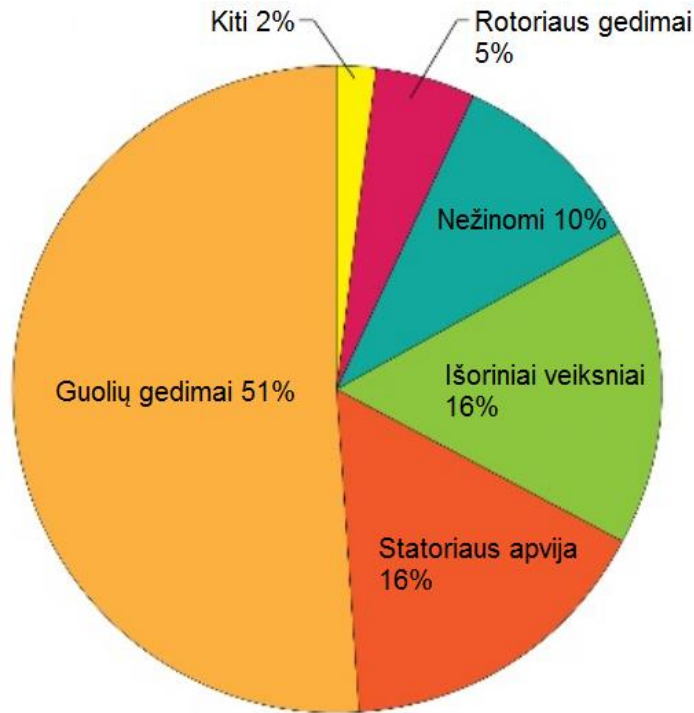


**1.2.5 Pav.** Fazių srovės pastoviam BNS variklio momentui.

Fazės pasistūmimo kampas  $\alpha$ , pavaizduotas pav. 1.2.4, standartiškai yra nustatomas pagal holo sensorių pozicijas, kurie fiziškai yra montuojami kuo arčiau rotoriaus nuolatinių magnetų magnetinių laukų užsidarymo zonų pradžių, toks mechaninis sinchronizavimas padeda išgauti maksimalią galią ir sukimo momentą. Tokia pat praktika yra taikoma ir standartiniuose šepetėliniuose nuolatinės srovės varikliuose – šepėčiai yra montuojami statmenai statoriaus magnetinio lauko jėgų linijų kryptį.

### 1.3 BNS variklių gedimų klasifikacija

Galimus BNS variklių gedimus galima klasifikuoti į statoriaus gedimus, inverterio gedimus, rotoriaus gedimus, ir guolių gedimus, žr. pav. 1.3.1 Šiame darbe didžiausias dėmesys bus skiriamas statoriaus apvijų, rotoriaus ir guolių gedimams.



**1.3.1 Pav.** BNS variklių gedimų pasiskirstymo statistika, pagal IEEE PCIC-94-1 tyrimo rezultatus.

#### 1.3.1 Statoriaus gedimai

Dažniausiai sutinkami statoriaus gedimai yra statoriaus apvijų izoliacijos pažeidimai. Tai dažnai nutinka statoriaus apvijų griovelių galuose. Statoriaus apvijų gedimus galima suskirstyti į šias gedimų grupes:

- Tarpfaziniai trumpieji sujungimai.
- Tarpapvijiniai trumpieji sujungimai.
- Trumpieji jungimai į žemę (variklio korpusą).
- Nutrūkusi apvijų ritės grandinė.

Apvijų pažeidimus gali lemti grupė veiksnių, svarbiausi iš jų yra: įtampos šuoliai, izoliacijos senėjimas, apvijų srovių kuriamos elektromagnetinės jėgos, kietųjų kūnų šiluminių charakteristikų kitimas nuo pasikartojančių šilimo ir vėsimo ciklų, mechaninės vibracijos iš vidinių ir išorinių šaltinių. Apvijų izoliacijos pažeidimai sukelia vijinius trumpuosius jungimus,

tarpvijinio trumpojo jungimo vietose pradeda tekėti žymiai didesnės srovės, dėl kurių apvijos pradeda kaisti, temperatūros kilimas. Temperatūros kilimas organinėse medžiagose, iš kurių gaminama apvijų izoliacija, sutrumpina pačios izoliacijos tarnavimo laiką, temperatūrai viršijus maksimalią leistiną vertę 5-10 laipsnių, apvijų izoliacijos tarnavimo trukmė sumažėja perpus. BNS variklių tų pačių fazių apvijos nėra izoliuojamos, tačiau dėl trumpojo jungimo tarp skirtingų apvijų gali būti nutraukiama vienos fazės vija, tokiomis sąlygomis BNS variklio darbas nenutrūksta, tačiau stipriai svyruoja variklio sukimo momentas, kadangi fazių sekų perjungimo metu, sukuria srovių disbalansą, tokį trumpąjį jungimą galima pastebėti ir likviduoti identifikavus problemą fiziškai stebint BNS variklio darbą arba naudojantis diagnostikos ir stebėsenos sistemomis. Taip galima išvengti problemos gerokai anksčiau nei įvyksta trumpas jungimas tarp korpuso ar kitos fazės apvijų pav. 1.3.2, dėl kurio sudega statoriaus apvijos, ir variklis tampa nebeeksplloatuojamu [12, 20].



**1.3.2 Pav.** Sudegusi BNS variklio apvija dėl trumpojo jungimo tarp fazių.

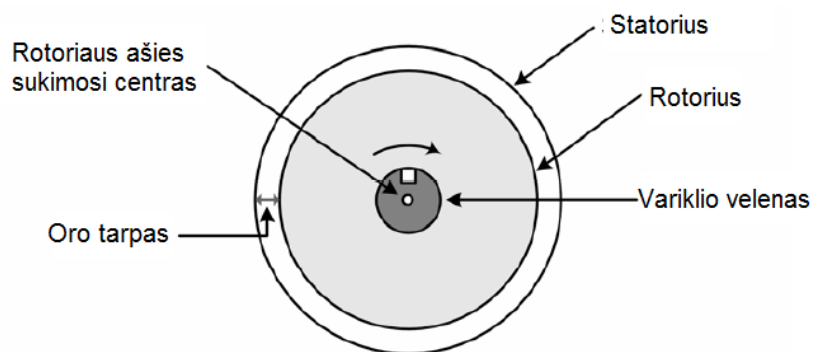
Vidines mechanines vibracijas variklio statoriuje gali sukelti ne tik guoliai, bet ir statorių veikianti elektromagnetinė jėga, šios jėgos vertė yra didžiausia variklio perkrovų metu, dėl perkrovos metu išaugusios srovės ši elektromagnetinė jėga gali sukelti mechanines statoriaus apvijų ričių vibracijas. Mechaniniai gedimai, tokie kaip pažeisti rotorius magnetai, susidėvėję guoliai, užterštumas įvairiomis kietosiomis medžiagomis, pakitęs oro tarpo ekscentricitetas gali sukurti fizinį rotorius kontaktą su statoriaus elementais – šerdimi, apvijomis, tai gali pagrindinė priežastis statoriaus apvijų izoliacijos pažeidimų atsiradimui [12].

## 1.3.2 Rotoriaus gedimai

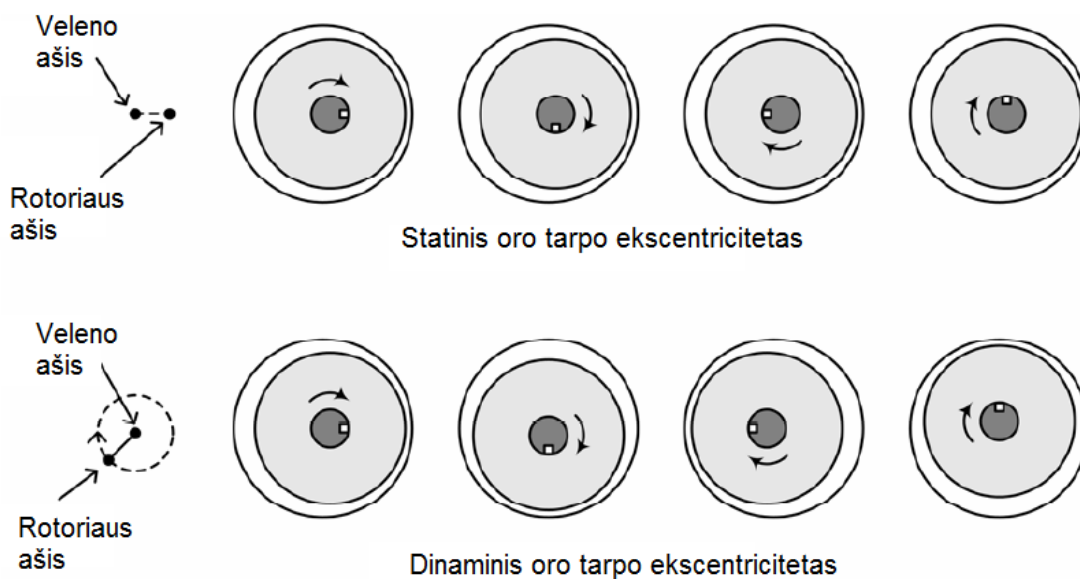
Vienos pagrindinių BNS variklių rotorių gedimų priežasčių yra rotoriaus oro tarpo ekscentricitetas, pažeisti magnetai, ir pažeisti holo davikliai. Šie gedimai sukelia mechaninį triukšmą ir vibracijas, taipogi jie sukelia ir elektrodinaminių problemų, tokių kaip rotoriaus greičio ir sukimo momento pulsacijos.

### 1.3.2.1 Rotoriaus oro tarpo ekscentricitetas

Idealiu atveju, variklio rotorius yra sulygiuotas vienodu atstumu nuo statoriaus šerdies, ir jo sukimosi ašies geometrinis centras statoriaus atžvilgiu nekinta pav. 1.3.3. Rotoriaus oro tarpo ekscentriciteto sąvoka nusako netolygų oro tarpą tarp rotoriaus ir statoriaus, ir yra skirstomą į du tipus – statinį ir dinaminį ekscentricitetus. Esant statiniam ekscentricitetui minimali oro tarpo pozicija erdvėje sukasi kartu su rotoriumi, statinis ekscentricitetas beveik visais atvejais yra stacionarus ir nekinta variklio darbo metu. Ši būseną atsiranda dėl statoriaus šerdies apvalumo (ovališkumo), paliktų mechaninių netikslumų statoriaus ir rotoriaus variklio surinkimo metu. Dinaminis ekscentricitetas yra vektorinė erdvės ir laiko funkcija, jis atsiranda kai rotoriaus centras nesutampa su jo ašies geometrinio sukimosi centru, dėl to atsiranda oro tarpo kitimas statoriaus atžvilgiu, kūno sukimosi metu. Dinaminis ekscentricitetą sukelia sulenktas rotoriaus velenas, mechaninis rezonansas, guolių susidėvėjimas. Pav. 1.3.4 iliustruoja statinį ir dinaminį ekscentricitetus[16, 7]].



1.3.3 Pav. Variklio oro tarpas idealiu atveju.



**1.3.4 Pav.** Statinis ir dinaminis oro tarpo ekscentricitetai.

Didelis dinaminis ekscentricitetas, sukuria išcentrines disbalancines radialines jėgas, dėl kurių taške, kuriame veikia didžiausia išcentrinė jėga, gali atsirasti slystantis fizinis rotoriaus ir statoriaus kontaktas, kuris gali sukelti statoriaus apvijų ir rotoriaus magneto pažeidimus. Kintant oro tarpui variklio sukimosi metu, keičiasi ir rotorijų veikiančių elektromagnetinių jėgų vertės, dėl to variklio darbas tampa nestabilus, atsiranda statoriaus srovių ir temperatūrų svyravimai. Statinio ekscentriciteto metu, dėl skirtingo oro tarpo pasiskirstymo per rotoriaus ilgį, netolygus magnetinis srautas sumažina variklio galią. Statinį ekscentricitetą aptikti yra gerokai sunkiau, kadangi šis mažiau įtakoja tiek elektrinius tiek mechaninius variklio parametrus [16,17].

### 1.3.2.2 Rotoriaus magnetų ir holo daviklių pažeidimai

Magnetinio srauto trikdžiai oro tarpe, kuriuos gali sukelti anomalijos rotoriaus nuolatiniam magnete, taipogi yra gana svarbus BNS variklių gedimas. Gerai žinoma, kad kai kurie nuolatiniai neodimio magnetai (Nd-Fe-B) koroduoja, dėl neodimio korozijos gali prasidėti viso magneto masyvo irimas. Dėl išorinių mechaninių vibracijų rotoriaus sukimosi metu gali atsirasti magneto įskilimai, ar net susidaryti atplaišos, kurios gali sukelti trintį į statoriaus apvijas ir taip pažeisti apvijų izoliaciją. Magnetinio srauto trikdžius oro tarpe gali sukelti ir dalinis nuolatinio magneto išsimagnetinimas, išsimagnetinimą gali sukelti stiprūs išorinės aplinkos magnetiniai laukai. Netolygus magnetinio srauto kitimas dėl nuolatinio magneto pažeidimų, veikia elektromagnetines jėgas tarp statoriaus ir rotoriaus, tokios elektromagnetinės pulsacijos sukelią stresą rotoriaus guoliuose ir netgi gali sukelti gedimą juose [11, 7]].

Kita specifinė BNS variklių rotorių problema yra holo daviklių gedimai. Kaip ir buvo minėta prieš tai, holo davikliai BNS varikliuose yra naudojami nustatyti rotorius pozicijos aptikimos ir statoriaus fazių grandinių komutacijai. Jeigu holo daviklis nustoja funkcionuoti variklio darbo metu, dėl netinkamo fazių komutavimų susidaro sukimo momento svyravimai.

### 1.3.3 Guolių gedimai

Beveik visų tipų varikliuose guolių gedimai yra viena dažniausia variklių gedimo priežasčių. Jų pagrindinė paskirtis yra sumažinti rotorius ašies trintį variklio korpuso atžvilgiu. Guoliai besisukantį veleno ašį išlaiko geometriškai stacionarioje padėtyje, sugeria ir perduoda veleną veikiančias apkrovas į variklio korpusą. Standartinis guolis susideda iš vidinio, išorinio žiedų, žiedai yra stacionarūs kūnai, jų tarpe yra judantys riedėjimo kūnai, riedėjimo kūnus žieduose vieną nuo kito atskiria separatorius. Besisukant rotorius riedėjimo kūnai rieda žiedų vidiniais paviršiais. Kadangi riedėjimo guoliuose slydimo trintis yra pakeičiama kūnų riedėjimo trintimi, todėl guolių trinties koeficientas yra ~25% mažesnis nei slydimo guolių taipogi jų trinties momentas mažai priklauso nuo sukimosi dažnio, todėl jie nebijo staigių veleno sukimo momento kitimų. Gedimus guoliuose dažniausiai sukelia, jų užteršimas, mechaniniai pažeidimai montavimo arba eksploatavimo metu, geometriškai netikslios guoliavietės, montavimo klaidos, korozija, užteršimas įvairiomis medžiagomis, per aukšta aplinkos ir kitų fizinių kontaktą su guolio elementais turinčių kūnų temperatūra ir t.t. Ilgalaikių perkrovų metu guolis pradeda dėvėtis, dėl metalo nuovargio viršutiniai metalo sluoksniai pradeda irti, pakinta guolio išmatavimai, tai sukelia vibracijas ir triukšmo lygio padidėjimą. Koroziją guolyje dažniausiai atsiranda kai variklis dirba chemiškai aktyvioje aplinkoje arba kai ant jo fiziškai patenka vandens. Guolis dažniausiai yra užteršiamas dėl atlaidaus prižiūrinčio personalo darbo, netinkamo montavimo, nesilaikant guolio tepimui keliamų IEEC reikalavimų. Itin dažna variklius prižiūrinčio personalo klaida yra netinkama guolio keitimo procedūra. Montuojant naujus guolius, būtina juos įkaitinti iki reikiamos temperatūros ir tiesiog užmauti guolį be jokio pasipriešinimo, padidėjus guolio temperatūrai, metalas plečiasi, todėl kol kūnas yra karštas jie yra gerokai lengviau užmauti ant veleno, vietoje to guoliai dažnai yra tiesiog užkalami šalti. Tai gali sugadinti visai naują guolį arba sutrumpinti jo tarnavimo laiką kelis kartus dėl kalimo metu sukeltų geometrinių pažeidimų, sugadinto guolio nuotrauka pav. 1.3.5[2, 11].





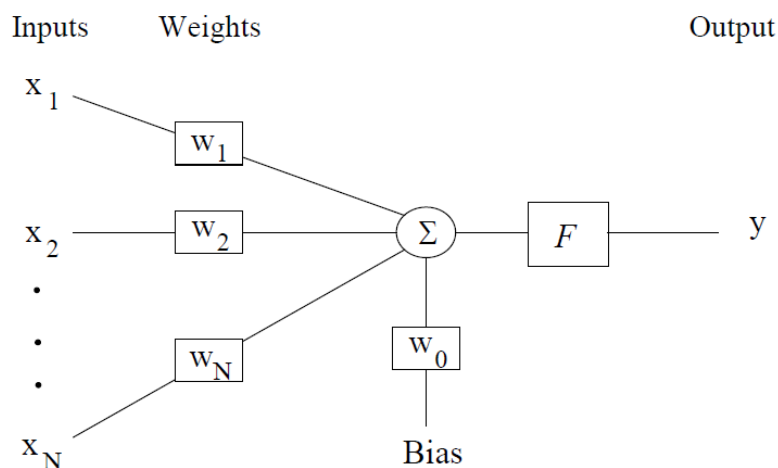
**1.3.5 pav.** Guolis su sulaužytu separatoriumi ir išbyrėjusiais riedėjimo kūnais.

## **1.4 Neuroniniai tinklai**

Dirbtiniai neuroniniai tinklai imituoja gyvo organizmo smegenų struktūrą, kurią sudaro paprasti aritmetiniai elementai (neuronai) sujungti į sudėtingą bendrą tinklą. Šie elementai, jungiasi vieni su kitais įvairaus sudėtingumo jungtimis, toks modelis primena sinapsinį biologinių neuronų modelį, kadangi aritmetiniai skaičiavimo elementai yra analogiški. Dirbtinis neuroninis tinklas kuriamas siekiant atkartoti specifines biologinių sistemų savybes, tokias kaip gebėjimas mokytis ir pasinaudojus mokymosi duomenimis – prisitaikyti.

### **1.4.1 Dirbtinio neuroninio tinklo veikimo principas**

Dirbtinių neuroninių tinklų mokymui yra naudojami pavyzdinių duomenų masyvai. Mokymo metu, dirbtiniame neuroniniame tinkle specifiniais algoritmais interaktyviai keičiasi jungčių stovio-stiprumo koeficientai. Duomenys užduočių sprendimui yra kaupiami stiprumo vertėse.



**1.4.1 Pav.** Dirbtinio neuroninio tinklo neuronas.

Neuroninis tinklas sudarytas iš daug dirbtinių neuronų, kurie yra sujungti kartu pagal specifinę architektūrą. Dirbtinio neuroninio tinklo tikslas yra transformuoti įvesties duomenis  $X_1..X_n$  (signalus), į tikslingus išėjimus ( $y$ ). Bazinė neurono architektūra pavaizduota paveiksle pav. 1.4.1, ją sudaro įvesties signalai, kurie turi svorio daugiklius  $W_n$  nurodančius signalų sinapsių stiprumą, įvesties duomenys toliau yra apdirbami matematinių funkcijų, kurios sprendžia neurono aktyvavimo sąlygas. Individualūs įėjimo signalai  $x_j$  su priskirtu jiems svoriu  $w_j$  yra susumuojami norint gauti tinkamo svorio išėjimo signalą:

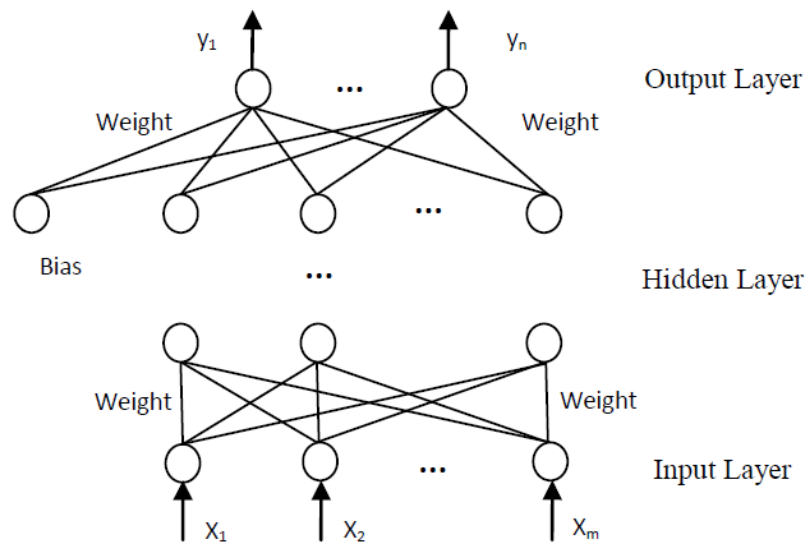
$$e = \sum_{j=0}^N w_j x_j \quad \text{čia } x_0 = 1 \quad (3)$$

$w_j$  elementai yra vadinami sinapsių svoriais, jie gali būti modifikuojami mokymosi proceso metu. Vieno neurono mazgas aprašomas funkcija:

$$y = F(e) \quad (4)$$

Čia  $F$  – aktyvacijos funkcija, kitaip dar vadinama perdavimo funkcija.

Kuo didesnis dirbtinio neurono svoris, tuo stipresnis ir įvesties signalas, priklausomai nuo signalo svorio, neurono skaičiavimai bus skirtingi. Dirbtinis neuroninis tinklas kombinuoja neuronų grupes norėdamas apdirbti informaciją, dirbtinio neuroninio tinklo architektūros pavyzdys pavaizduotas paveiksle pav. 1.4.2 [3, 15].



**1.4.2 Pav.** Dirbtinio daugiasluoksnio neuroninio tinklo architektūra.

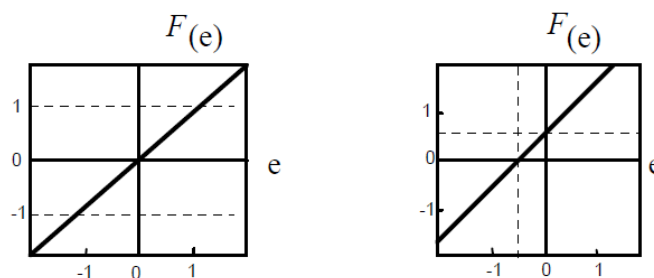
Dirbtinio neuroninio tinklo funkcijos aproksimacija pasiekama naudojama tinkamai sudarytą tinklą su tinkamais dirbtiniais neurais, ir jiems atitinkamais svoriais [4].

### 1.4.2 Aktyvacijos funkcijos.

Aktyvacijos funkcijos  $F$  narių skaičių gali sudaryti begalinis svorio sumos narių skaičius, funkcijos viena iš paskirčių sudaryti susietumą. Sistemoje  $F$  funkcijų skaičius taipogi gali būti begalinis, tačiau dažniausiai dirbtiniuose neuroniniuose tinkluose yra naudojamos penkios standartinės funkcijos: linijinė, žingsninė, bipoliarinė, riestinės (Gauso) ir hiperbolinė tangentinė. Išskyrus linijinę  $F$  funkciją, visos kitos turi daugiasluksnę architektūrą apibrėžiančią išėjimo reikšmes fiksuotuose intervaluose.

Linijinė  $F$  funkcija pav. 1.4.3 pagal įvesties signalus generuoja moduluotus linijinius išėjimus ir yra apibrėžiama lygtimi:

$$F(e) = \vartheta e \tag{5}$$



**1.4.3 Pav.** Linijinė aktyvacijos funkcija.

Čia  $e$  neuroninio tinklo verčių skaičius yra realus numeris,  $\vartheta$  – teigiamas skaliaras. Jei  $\vartheta = 1$ ,  $F$  funkcija nebetenka prasmės, todėl jos y apskaičiuojamas:

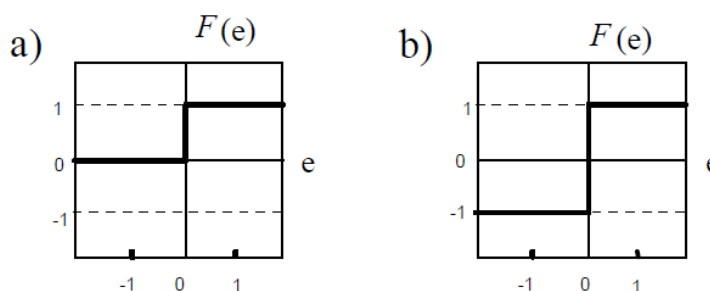
$$y = \sum_{j=0}^N w_j x_j \quad (6)$$

Žingsninė  $F$  funkcija pav. 1.4.4a pagal įvesties reikšmes generuoja tik du dvejetainius signalus, +1 jeigu  $e$  yra teigiamas arba 0 jeigu ne. Ši funkcija loginėje sistemoje aprašoma:

$$F(e) = \begin{cases} 1, & \text{if } e \geq 0 \\ 0, & \text{ELSE} \end{cases} \quad (7)$$

Nedaug nuo žingsninės  $F$  funkcijos skiriasi bipoliarinė  $F$  funkcija, žr. pav. 1.4.4b:

$$F(e) = \begin{cases} 1, & \text{if } e \geq 0 \\ -1, & \text{ELSE} \end{cases} \quad (8)$$



**1.4.4 Pav.** Žingsninė (a) ir bipoliarinė (b)  $F$  aktyvacijos funkcijos.

Riestinė Gauso  $F$  funkcija yra tęstinė, apibrėžta ir visada didėjanti funkcija, generuojanti nelinejinius signalus apibrėžtame intervale. Bendra funkcijos išraiška:

$$F(e) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta e)} \quad (9)$$

Čia  $\beta$  loginis funkcijos išėjimo signalas,  $\beta > 0$ , išėjimo verčių režiai yra nuo 0 iki 1.

Panaši į loginę Gauso riestinę  $F$  funkcija yra hiperbolinė tangentinė, kurios išėjimo verčių režiai yra nuo -1 iki 1.

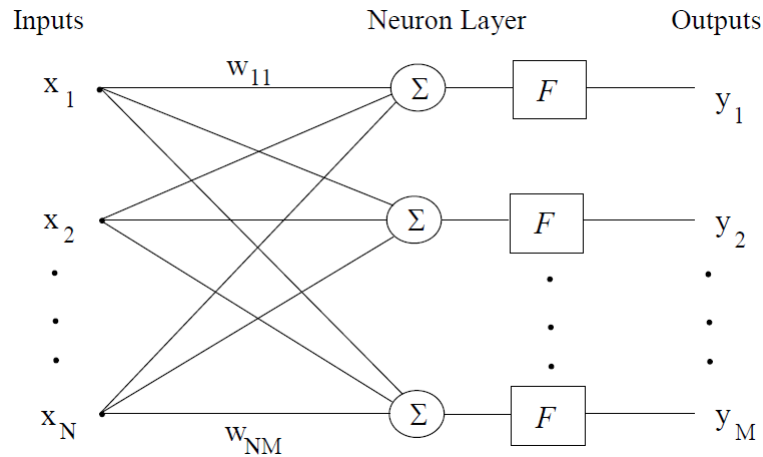
$$F(e) = \tanh(\beta e) \quad (10)$$

### 1.4.3 Daugiasluksnio neuroninio tinklo architektūra

Neuroniniai tinklai į neuronų sluoksnius skirstomi pagal du reikalavimus:

- Sluoksnį maitinanti jungtis visiems neuronams turi turėti tą patį šaltinį.
- Neuronai kiekviename sluoksnyje naudojami tokio pačio tipo jungtimis ir tomis pačiomis  $F$  aktyvacijos funkcijomis.

Vieno sluoksnio tinklas su skirtingais neuronais parodytas pav. 1.4.5



**1.4.5 Pav.** Vieno sluoksnio neuroninis tinklas.

Šioje struktūroje kiekvieno elemento įvesties vektorius  $X$  yra sujungtas su kiekvieno neurono įėjimu per svorių matricą  $W$ . Aktyvacijos  $F$  funkcijos argumentas yra visų įvesties signalų ir priskirtų svorių suma  $W \cdot X$ . Vektorius  $Y$  yra neuronų sluoksnio stulpeliniai išėjimai.

Daugiasluksnių neuroninių tinklų sluoksniai pagal neuronų sujungimą skirstomi į šiuos tipus:

- Vidiniai sujungimai, kai jungtis tarp neuronų yra tame pačiame sluoksnyje.
- Išoriniai sujungimai, kai jungtis tarp neuronų yra skirtinguose sluoksniuose.

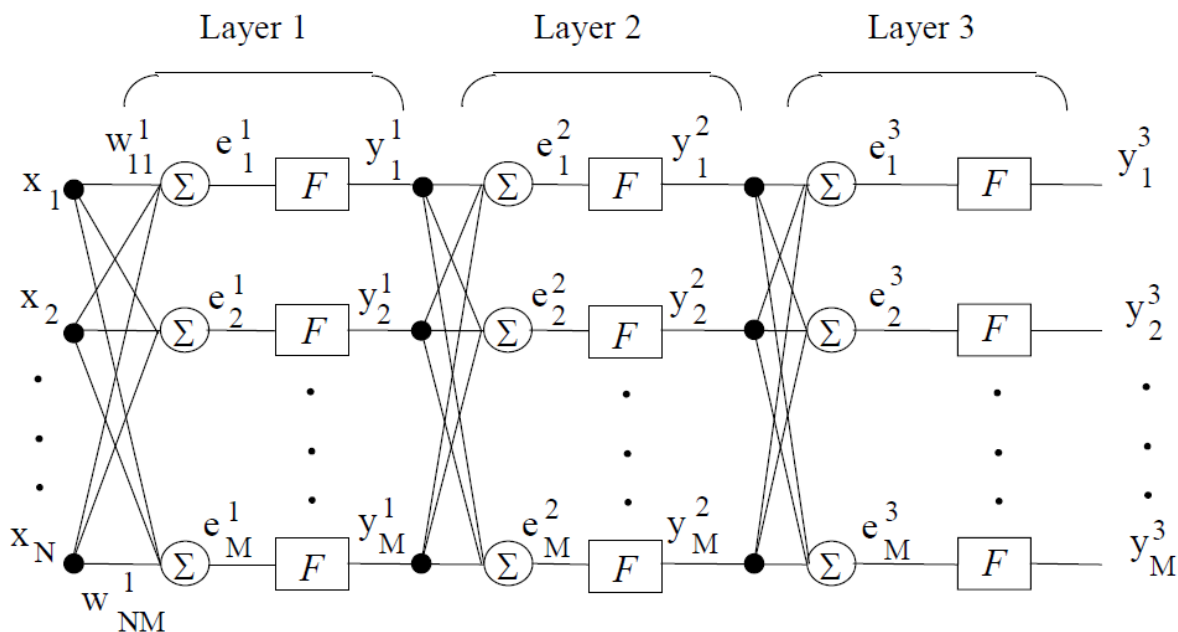
Daugiasluksnį neuroninį tinklą galima sudaryti naudojantis naudojantis tiek vieno, tiek abiejų tipų jungtis.

Daugiasluksniai neuroniniai tinklai yra klasifikuojami į dvi grupes:

- Tiesinis vienos krypties tinklas.
- Grįžtamojo ryšio tinklas.

Tiesiniu vienos krypties tinklu vadinamas toks tinklas, kai jungtis, kurios perduoda informaciją yra tik vienos krypties, tai yra kai duomenys perduodami iš įvesties į išėjimą. Tuo tarpu

grįžtamojo ryšio tinklas turi sujungimo taškus, kuriais gali informaciją perduoti, bet kuria kryptimi, toks tinklas leidžia naudoti tą patį neuroną kelis kartus su skirtingais duomenis. Daugiasluoksnio vienos krypties tinklo pavyzdys parodytas iliustracijoje pav. 1.4.6. Kiekvienas sluoksnis turi savo svorių matricą  $W_k^{(l)}$ , nustatyta svorio reikšmė įvesties signalą  $E^{(l)}$ , ir išėjimo vektorių  $Y^{(l)}$ , čia  $l$  yra sluoksnių skaičius. Sluoksniai, kuriuose yra tinklo išėjimai, vadinami išėjimo sluoksniai, visi kiti sluoksniai vadinami paslėptaisiais. Dažnai atvejais yra naudojamas ir atskiras įvesties sluoksnis turintis įvesties vektorių su visomis įėjimo reikšmėmis [3, 5].



**1.4.6 Pav.** Daugiasluoksnis tiesinis vienos krypties neuroninis tinklas.

Grįžtamojo ryšio neuroninis tinklas turi galimas jungtis su sistemoje egzistuojančiais neuronais, toks tinklas yra gana galingas, kadangi veikimas yra nuoseklus, tokio tinklo išėjimai gali svyruoti arba konverguoti. Galima pastebėti, kad daugiasluoksnis linijinis neuroninis tinklas yra funkcionaliai toks pat kaip ir vieno sluoksnio tinklas.

### 1.4.4 Dirbtinių neuroninių tinklų mokymas

Viena svarbiausia neuroninių tinklų savybių yra sugebėjimas mokytis. Mokymo sąvoka neuroniniuose tinkluose apibrėžiama, kaip sugebėjimas keisti neuronų jungčių svorių reikšmes, kurios vėliau gali būti panaudotos. Bendrai mokymosi algoritmų metodai gali būti suskirstyti į dvi kategorijas: prižiūrimas ir neprižiūrimas mokymasis.

Prižiūrimas mokymasis yra toks procesas, kuriame dalyvauja išorinis mokytojas arba globali informacija. Prižiūrimo mokymosi algoritmus sudaro klaidos korekcijos mokymasis, sustiprinimo mokymasis ir stochastinis mokymasis. Neprižiūrimas mokymasis dar dažnai

vadinamas saviorganizacija, yra procesas, kurio metu nėra reikalingas išorinis mokytojas, vietoj jo tinklas mokosi naudodamas turimus duomenų masyvus. Keli neprižiūrimo mokymosi pavyzdžiai: Hebo mokymasis, principinis komponentinis mokymasis, Hebo diferencialinis mokymasis, konkurencinis mokymasis [14].

Dažnai neuroninio tinklo mokymas vykdomas klaidos minimizavimo metodu. Pagal sprendžiamą uždavinį bei tinklo tipą parenkama klaida, kurią minimalizuojant bus mokomas tinklas. Regresijų uždavinių sprendimui gana dažnai naudojama  $F$  klaidos funkcija yra SSE – suminė kvadratinė paklaida. SSE klaidos gaunamos sudedant visas sistemos išėjimo klaidas duomenų masyvo imčiai:

$$e(F) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^c \{y_k(x^n, w) - t_k^n\}^2 \quad (11)$$

Čia  $c$  – išėjimų kiekis,  $w$  – svorio vektoriaus funkcija,  $N$  – įvesties vektorių skaičius,  $x^n$  –  $n$ -asis įėjimo vektorius,  $y_k$  –  $k$ -asis neuroninio tinklo išėjimas.

Dar viena gana dažna klaidos mokymosi funkcija yra kryžminės entropijos funkcija, jos formulė:

$$- \sum_{i=0}^n \ln(o_i) * t_i \quad (12)$$

čia,  $o_i$  – apskaičiuotoji vertė,  $t$  – atitinkama užduotoji vertė.

Kryžminė entropija ignoruoja visas suskaičiuotas išėjimų vertes, kurios neatitinka įėjimo tikslo, kuris yra lygus 1. Šios funkcijos veikimas paremtas santykiniu visų verčių nutolusių nuo 1 vertės kiekio aproksimavimu [14].

Dar vienas plačiai naudojamas klaidos minimizavimo metodas yra vidutinė kvadratinė paklaida (MSE). Be suminės kvadratinės klaidos yra ir kitų klaidos įvertinimo kriterijų, tokių kaip MSE. MSE nustato klaidų kvadratų vidurkį įvertinant nepastabėtus nuokrypius. Vidutinė kvadratinė klaida yra apibrėžiama kaip įvertinimo rodiklis, šis rodiklis yra visada teigiamas ir esant kuo arčiau nulio atspindi geresnę kokybę, t.y mažesnę skirtumą tarp klaidos ir išėjimo verčių. MSE nurodo sistemos išėjimo taškų grupės išsidėstymą regresijos linijos atžvilgiu. Atstumu tarp taškų ir regresijos linijos vertės yra sistemos klaidos ir jos yra keliamos kvadratu, toks veiksmas yra būtinas dėl to, kad būtų pašalinamos neigiamos vertės. MSE yra apskaičiuojama pagal formulę [14]:

$$\text{MSE} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (X_I - X_i)^2 \quad (13)$$

čia,  $X_I$  – nežinomas parametras,  $X_i$  – jį atitinkantis ieškomasis.

### 1.4.5 Dirbtinių neuroninių tinklų mokymosi funkcijos

Pagrindinės MATLAB programinio paketo aplinkoje naudojamos neuroninių tinklų mokymo funkcijos: standartinis jungtinis gradientas, Kvasi–Niutono metodas, Levenberg-Marquardt algoritmas, atgalinio dauginimo ir jungtinis gradientas su Powell-Beale perkrovimais.

Jungtinis gradientas – tai algoritmas, kuris gali suskaičiuoti kiekvieno išėjimo mazgo ir paslėptojo mazgo gradientą. Šie gradientai rodo, kaip toli ir kuria kryptimi (neigiama ar teigiama) yra nutolusios apskaičiuotosios vertės, išėjimų atžvilgiu. Suskaičiuoti gradientai yra naudojami keisti neuroninio tinklo verčių svorius ir nuolydžius tam, kad apskaičiuotosios vertės būtų kuo arčiau tikslų verčių. Šį metodą taipogi galima naudoti sprendžiant optimizavimo problemas, tokias kaip sunaudojamos energijos minimalizavimas.

Niutono metodas yra jungtinio gradiento alternatyva skirta greitesnei optimizacijai. Paprasčiausia Kvasi–Niutono metodo lygties išraiška:

$$x_{k+1} = x_k - A_k^{-1}g_k \quad (14)$$

Čia  $A_k^{-1}$  – Hesiano kokybės indeksavimo matrica (diferencijavimo) su turimais sistemos svoriais. Niutono metodas labai dažnai atlieka konvergencija greičiau nei skaičiuojant jungtinio gradiento metodu. Tačiau turint vienos krypties neuroninį tinklą Hesiano matrica tampa labai sudėtinga ir reikalaujanti daug resursų skaičiavimų atžvilgiu. Visgi yra eilė algoritmų, kurie remiasi Niutono dėsniumi, tačiau nereikalauja diferencialinių skaičiavimų, toki algoritmai yra vadinami Kvasi–Niutono, šie algoritmai aproksimuoja Hesiano matricą kiekvienoje algoritmo iteracijoje. Kiekviena iteracija yra apskaičiuojama kaip gradiento funkcija [13].

Kaip ir Kvasi–Niutono metodas, kaip ir Levenberg-Marquardt algoritmas buvo sukurtas greitesniam tinklo mokymui aplenkiant Hesiano matricos skaičiavimus. Jeigu kokybės funkcija susideda iš kvadratų sumos, tada Hesiano matrica gali būti išreiškiama lygtimi:

$$H = J^T J \quad (15)$$



čia gradientas apskaičiuojamas:

$$g = J^T e \quad (16)$$

Čia  $J$  yra Jacobiano matrica, kurioje yra pirmosios tinklo klaidos išvestinės su neuronams priskirtais svoriais,  $e$  – neuroninio tinklo klaidos vektorius. Jacobiano matrica lyginant su Hesiano matrica yra gerokai paprastesnė ir gali būti skaičiuojama naudojantis standartiniais atgalinio dauginimo algoritmais.

Levenberg-Marquardt algoritmo išraiška su Jacobiano matricos pritaikymu:

$$x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (17)$$

Kai skaliaras  $\mu$  yra lygus nuliui, šis metodas tampa lygus Niutono metodui su Hesiano matrica. Kai  $\mu$  yra didelė reikšmė, ši išraiška tampa siauro žingsnio gradientu. Niutono metodas yra daug greitesnis ir tikslesnis kai klaida yra artima nuliui, todėl kai  $\mu$  yra artimas nuliui būtina pereiti prie Niutono metodo, kadangi  $\mu$  ir kokybės funkcija yra mažinamos kiekvienos Levenberg-Marquardt algoritmo iteracijos metu [13].

Atgalinio dauginimo mokymo algoritmo paskirtis yra pašalinti žalingus sistemai dalinių išvestinių dydžius. Tik išvestinės skaičiavimo proceso indikacija gali nusakyti svorio parametro pakeitimą, išvestinės dydis neturi jokios įtakos svorio reikšmės pokyčiui. Svorio dydžio pokytis yra nusakomas visai kituose  $F$  funkcijos vertėse [13].

Visi jungtinių gradientų algoritmų paieškos kryptis periodiškai yra perkrauna į neigiamą gradiento reikšmę. Standartiškai perkrovimo taškas yra aktyvuojamas tada, kai iteracijų skaičius tampa lygiu tinklo parametrų skaičiui. Tačiau toks perkrovimo taško parinkimo metodas nėra labai efektyvus, tam yra naudojamas jungtinis gradientas su Powell-Beale perkrovimais. Šis metodas atlieka perkrovimus jeigu ortogonalizavimas tarp esamo gradiento ir praėjusio gradiento yra labai mažas. Gradientų nelygybė:

$$[g_{k-1}^T g_k] \geq 0.2 [g_k]^2 \quad (18)$$

Jei sąlyga yra tenkinama, paieškos kryptis yra perkraunama į neigiamą gradientą.

### 1.4.6 Dirbtinio neuroninio tinklo klasifikatorius

Klasifikatorius gali minimizuoti sistemos klasifikavimo klaidą visiems naudojamiems duomenų masyvams. Klaidos klasifikavimo tikimybė mažiausia, kai  $x$  – priskiriama klasei, turinti mažiausią sąlyginę tikimybę. Klasei  $C_k$  priskiriamas taškas  $x$  jei:

$$P(C_k|x) > P(C_j|x), \quad j \neq k \quad (19)$$

Optimalus klasifikatorius tašką  $x$  priskiria tai klasei, kuri tenkina maksimalią sąlyginę tikimybę  $P(C_k|x)$  su priklausančiu duomenų taškais  $x$ :

$$x \in C_k, \text{ jei } P(C_k|x) > P(C_j|x), \quad \forall j \neq k \quad (20)$$

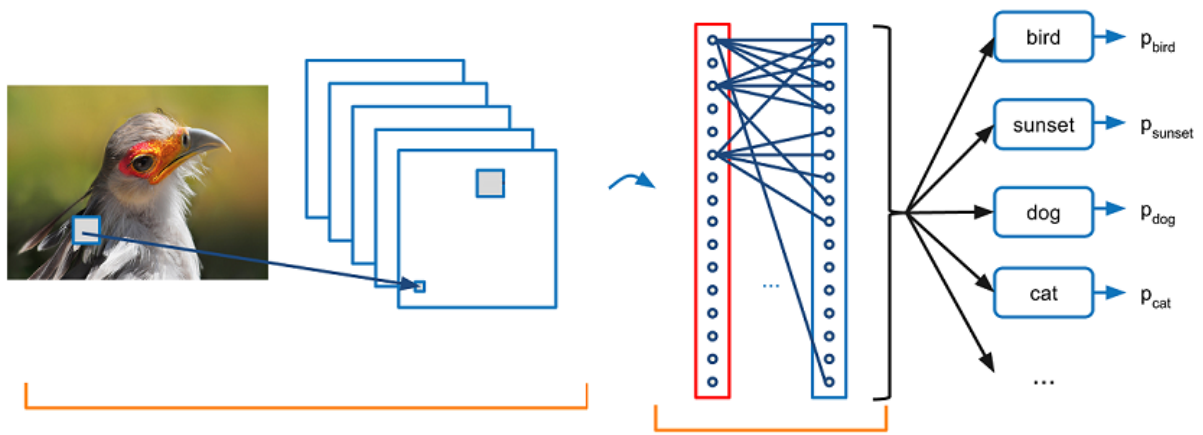
Naudojantis viršuje pateikta nelygybe atliekant klasifikaciją pasiekama mažiausia klaidos klasifikavimo tikimybė, o klasifikavimo metu atliktų skaičiavimų įvykio tikimybė yra vadinama sąlygine tikimybe ir yra apskaičiuojama pagal Bayeso teoremą:

$$P(C_k|x) = \frac{P(C_j|x)P(C_k)}{p(x)} \quad (21)$$

Čia  $p(x)$  sąlyginis duomenų tankis, taškas  $x$  priskiriamas klasei  $C_k$ , jei yra tenkinama ši nelygybė:

$$P(x|C_k)P(C_k) > P(x|C_j)P(C_j), \quad \forall j \neq k \quad (22)$$

Klasifikatorius sudaro taisykles, pagal kurias kiekvienas tinklo įvesties taškai priskiriami vienai iš  $C_k$  galimų klasių. Galima teigti, jog įvesties taškų duomenų masyvas padalijamas į  $C_k$  regionų  $R_1..R_C$  taip, kad taškai, esantys regione  $R_k$ , yra priskiriami klasėms  $C_k$ . Ribos tarp šių regionų yra vadinamos sprendimo paviršiais[3, 13].



**1.4.7 Pav.** Klasifikatoriaus su vaizdų atpažinimo dirbtiniu neuroniniu tinklu.

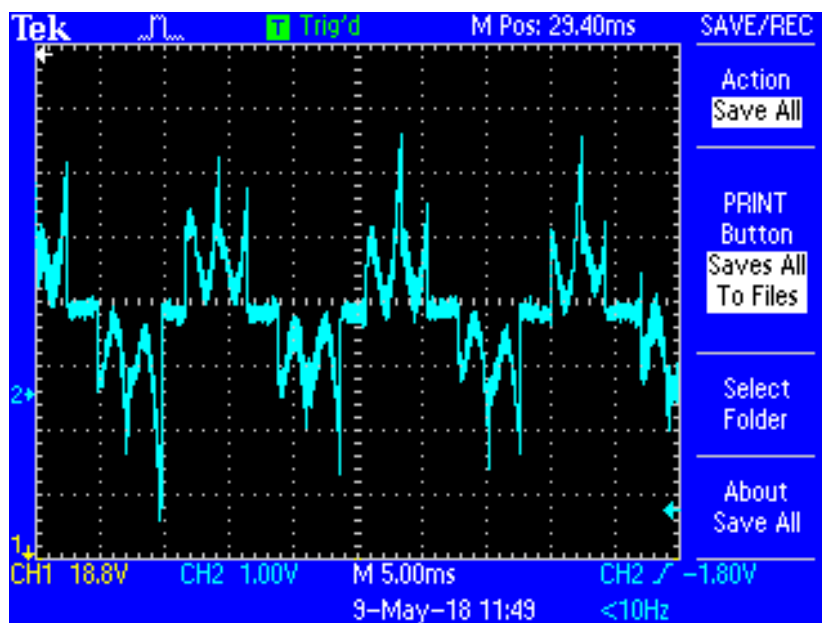
Skiriamasis paviršius laikomas optimaliausiu, kai klaidingo klasifikavimo tikimybės vertė yra mažiausia. Klasifikatorius dirba klaidingai, kada nauji nariai priklausantys vienai klasei yra priskiriami kitai, pavyzdžiui narys priklausantis klasei  $C_1$  priskiriamas klasei  $C_2$  arba atvirkščiai.

## 1.5 Statoriaus fazinės srovės dažnių spektro analizė (MCSA)

Variklio srovės dažnių spektro analizė (MCSA) yra būklės stebėsenos technika naudojama nustatyti elektros variklių gedimus. Metodo ištakos siekia 1970-uosius metus, kai pirmą kartą šis metodas buvo pasiūlytas atominėse elektrinėse esantiems varikliams stebėti, kurie yra žmogui nepasiekiamose arba kenksmingose vietose. Šių dienų pramonėje tai gana didelį populiarumą įgaunantis diagnostikos metodas, kuris leidžia stebėti variklio parametrus tiek jo tuščiojoje eigoje tiek darbo metu visiškai neįtakojant jo veikimo. MCSA gali būti naudojama problemų aptikimui ankstyvose jų stadijose išvengiant brangių ir pavojingų nekontroliuojamų gedimų. MCSA metodas yra naudingas ne tik analizuojant elektros variklius bet ir generatorius, transformatorius. Pačios populiariausios statoriaus elektrinių parametų analizės metodikos yra: srovės spektro analizė (CSA), įtampos spektro analizė (VSA) ir Parko vektoriaus analizė (EPVA) [26].

MCSA yra statoriaus fazinės srovės monitoringo metodas, dažniausiai yra matuojama tik vienos fazės srovė, ko pakanka gauti elektrinius signalus apibūdinančius tiek statoriaus tiek rotorius būklę. Variklio srovė yra fiksuojama su srovės replėmis arba srovės transformatoriumi turinčiu rezistyvinių šuntą išėjime. Gauti duomenys yra perduodami į srovės spektro analizatorių arba oscilografą, toliau analizuojant gautus signalus galima matyti įvairias elektrines ir mechanines variklio problemas sukėlusias harmonikas. Gedimai variklių komponentuose sukuria anomalijas elektromagnetiniame lauke, kurie yra matomi statoriaus srovės apvijų spektre. Pagal srovės spektro pobūdį galima identifikuoti problemos pobūdį, dažniausiai MCSA analizuojamas spektras yra 0-5 kHz dažniuose. Būtina pastebėti, kad variklio srovės spektrui įtakos gali turėti ir

išoriniai įrenginiai, kuriantys elektromagnetinius laukus tuose pačiuose dažniuose, BNS variklio srovės spektro iliustracija pav. 1.5.1[8, 9, 18, 19, 26].



1.5.1 Pav. BNS variklio statoriaus fazės srovės spektras.

### 1.5.1 Rotoriaus ekscentriciteto aptikimas su MCSA

Remiantis ankstesnių tyrimų rezultatais yra žinoma, kad rotoriaus defektai elektros varikliui dirbant pastoviu greičiu pasireiškia tam tikromis dažnio charakteristikų dedamosiomis matomomis statoriaus srovės spektre, toki rotoriaus defektai gali būti identifikuojami stebint srovės harmonikų dedamąsias. Naudojantis MCSA metodu srovės dažnių spektras išskleidžiamas su Furjė transformacija (FFT). Atlikus FFT konvertavimą identifikuojami gedimai yra pagal dažnių amplitudžių pasiskirstymą. Dinaminis ekscentricitetas generuoja srovės dedamąsias, kurių dažnai apskaičiuojami:

$$f_{de} = f_e \pm k \frac{f_e(1-s)}{P/2} \quad (23)$$

Čia  $f_{de}$  – dinaminio ekscentriciteto dažnis,  $f_e$  – srovės dažnis,  $s$  – slydimas,  $k$  teigiamas nelyginis sveikasis skaičius ( $k = 1, 3, 5, \dots$ ),  $p$  – polių porų skaičius.

Bendresnė išraiška tiek statiniam tiek dinaminiam ekscentricitetams aptikti:

$$f_{sh} = \{(kR \pm n_d) \frac{2(1-s)}{P} \pm n_{os}\} f_e \quad (24)$$

čia  $f_{sh}$  variklio srovės dažnio dedamoji ekscentriciteto aptikimui,  $n_d$  – ekscentriciteto numeris,  $s$  – slydimas,  $P$  – polių porų skaičius,  $\omega s$  – statoriaus laiko harmonikų seka ( $\omega s = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ ),  $R$  – rotorius nuolatinių magnetų sekcijų skaičius,  $k = 1, 2, 3$ , harmonikų kiekis generuojamas rotorius magnetų. Tinkamas  $n_{rt}, n_d, n_{\omega s}$  reikšmių pasirinkimas yra būtinas būtint tinkamai gauti dažnius, kuriuose galima matyti dinaminį ekscentricitetą. Kai  $n_d = 0$  galima stebėti statinį ekscentricitetą. Kadangi BNS variklio rotorius magnetinio lauko sukimosi greitis sutampa su statoriaus magnetinio lauko sukimosi greičiu, slydimas  $s = 1$ ,  $f_e$  srovės dažnis atitinka generuojamų fazių srovės grandinės komutacijų dažniui [16, 17, 8].

Lygtys (23) ir (24) pagrindžiamos faktu, kad ekscentriciteto kitimas sukelia pokyčius visoje variklio elektromagnetinėje sistemoje. Magnetinio srauto tankį oro tarpe galima išreikšti taip:

$$B_{as}(\varphi_s, \theta_{rm}) = MMF_{as}(\varphi_s)P_g(\varphi_s, \theta_{rm}) \quad (25)$$

Čia  $\varphi_s$  – kampinis statoriaus oro tarpas,  $\theta_{rm}$  – kampinė rotorius padėtis,  $P_g$  – oro tarpe esančių rotorius magnetų kuriama magnetinė jėga,  $MMF$  – statoriaus kuriama elektromagnetinė jėga. Bet koks oro tarpo kitimas veikia rotorius nuolatinių magnetų ir statoriaus elektromagnetinių jėgų balansą, šios balanso variacijos gali būti išreiškiamos Furjė eilute statiniam ekscentricitetui:

$$P_g(\varphi_s) = P_0 + \sum_n P_n \cos[n\varphi_s + \alpha_n] \quad (27)$$

Dinaminiam ekscentricitetui:

$$P_g(\varphi_s, \theta_{rm}) = P_0 + \sum_n P_n \cos[n(\varphi_s - \theta_{rm}) + \alpha_n] \quad (28)$$

Bendra oro tarpe esančių rotorius magnetų kuriamos magnetinės jėgos išraiška pagal viršuje aprašytas lygtis yra:

$$P_g(\varphi_s) = P_0 + P_1 \cos\varphi_s \quad (29)$$

čia:

$$P_g(\varphi_s, \theta_{rm}) = P_0 + P_1 \cos(\varphi_s - \theta_{rm}) \quad (30)$$

Lygtys 29 ir 30 yra naudojamos apskaičiuoti magnetinio srauto tankį oro tarpe iš 25 formulės. Suskaičiavus magnetinį srautą oro tarpe, įmanoma integruojant suskaičiuoti magnetinį srautą siejantį vieną apviją:

$$\Phi_{lsas}(\varphi_s, \theta_{rm}) = \int_{\varphi_s}^{\varphi_s + \pi} B_{as}(\xi, \theta_{rm}) r l d\xi, \quad (31)$$

Čia  $r$  – oro tarpo spindulys,  $l$  – rotoriaus ilgis ašies kryptimi, magnetinis srautas visoms apvijoms tada yra suskaičiuojamas sumuojant kiekvienos apvijos elektromagnetinį srautą [16, 17, 5].

### 1.5.2 Rotoriaus magnetų gedimų aptikimas su MCSA

Magnetiniai trikdžiai BNS variklio rotoriuje generuoja dažnius, kurie yra panašūs į tuos kuriuos generuoja rotorius esant dinaminiam ekscentricitetui. Ankstesniuose tyrimuose buvo pastebėta, kad nuolatinio magneto stiprumas gali būti nustatytas stebint, bet kurį rotoriaus regioną kas 60 laipsnių, atgalinės vidinės įtampos dviejose komutuojančiose fazėse. Tokios sistemos apskaičiuotoji momento konstantos išraiška yra:

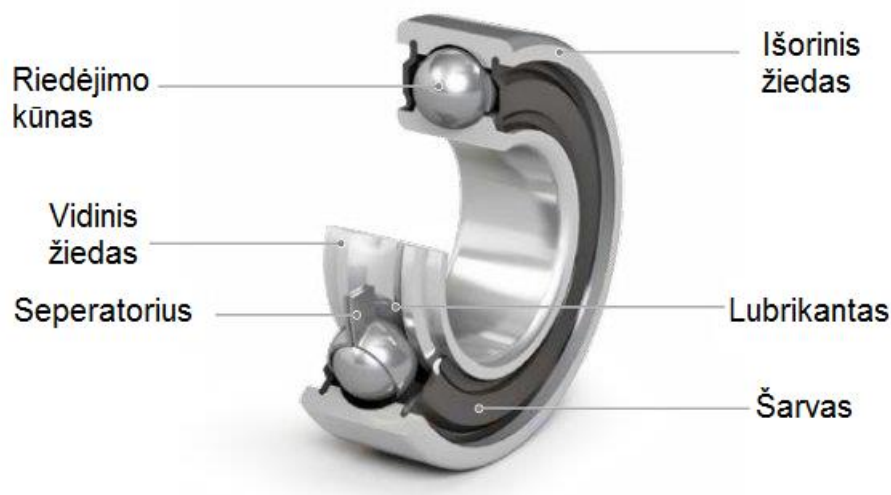
$$K_t = \frac{V - 2r_s I_{DC}}{\omega_r} = \frac{E}{\omega_r} \quad (32)$$

Čia  $V$  – maitinimo šaltinio įtampa,  $I_{DC}$  – srovė maitinanti dvi komutuojančias fazes,  $r_s$  – statoriaus apvijos vienos fazės varža,  $\omega_r$  – BNS variklio rotoriaus kampinis greitis,  $E$  – atgalinė vidinė įtampa. Ši išraiška nepaiso statoriaus induktyvumo ir puikiai veikia, jeigu atgalinės įtampos ( $E$ ) reikšmė yra naudojama tiesiogiai, tačiau neatliekant jokių fizinių variklio pakeitimų vien atgalinės vidinės įtampos dedamųjų stebėjimas yra neįmanomas. Nepaisant to, identifikavus, kad variklyje nėra jokių pažeidimų, statoriaus srovės spektro analizėje turėtų būti matomas atgalinės vidinės įtampos pokytis, tačiau jo, kaip ir minėta anksčiau išskirti iš viso spektro neįmanoma, gedimą identifikuoti galima tik stebint visą spektrą ir žinant kad variklyje nėra jokių kito pobūdžio gedimų [23, 7].

### 1.5.3 Guolių gedimų aptikimas su MCSA

MCSA metodu taipogi galima identifikuoti ir guolių gedimus. Dėl įvairių defektų guoliuose susidaro rotoriaus ašies radialinis judėjimas statoriaus komponentų atžvilgiu. Dėl radialinio judėjimo atsiranda oro tarpo kitimas, kuris sukelia magnetinio srautus svyravimus, panašiai kaip ir esant oro tarpo ekscentricitetui, kas keičia srovės, jų dažnių spektre. Šiame

spektre atsiranda papildomos harmonikų dedamosios, kurios yra nesimetriškos BNS variklio pagrindinei harmonikai. Bet kokie gedimai, kurie gali sukelti rotoriaus radialinį judėjimą, sukelia tam tikro dažnio harmonikas, kurios yra matomos statoriaus srovių dažnių spektre.



**1.5.2 Pav.** Riedėjimo guolio sandara.

Bendros formulės guolių gedimų dažniams apskaičiuoti:

$$f_o = N / 2 \cdot f_r (1 - d / D \cdot \cos \alpha) \quad (33)$$

$$f_i = N / 2 \cdot f_r (1 + d / D \cdot \cos \alpha) \quad (34)$$

$$f_c = f_r \cdot 1/2 \cdot (1 - d / D \cdot \cos \alpha) \quad (35)$$

$$f_b = D / 2d \cdot f_r (1 - (d / D)^2 \cdot \cos^2 \alpha) \quad (36)$$

$$f_B = 2 * f_b \quad (37)$$

čia  $N$  – guolyje esančių riedėjimo kūnų skaičius,  $D$  – guolio spindulys nuo guolio centro iki riedėjimo kūno centro,  $d$  – atstumas tarp riedėjimo kūnų centrų,  $\alpha$  – riedėjimo kūno kontakto kampas su separatoriumi,  $f_o$  – išorinio žiedo defektinis dažnis,  $f_i$  – vidinio žiedo defektinis dažnis,  $f_c$  – separatoriaus defektinis dažnis,  $f_b$  – riedėjimo kūno sukimosi dažnis,  $f_B$  – riedėjimo kūno defektinis dažnis,  $f_r$  – rotoriaus sukimosi dažnis. Bendra išraiška guolių gedimui identifikuoti:

$$f_p = |f_s \pm n f_v| \quad (38)$$

čia  $f_v = f_o, f_i, f_c, f_B$ ,  $f_s$  – fazių sekos perjungimo srovės dažnis, Hz.

Standartiškai riedėjimų kūnų skaičius yra tarp 6 ir 12, tokiu atveju galima naudoti supaprastintas išraiškas:

$$f_o = 0.4 \cdot N \cdot (1 - s) f_r \quad (39)$$

$$f_i = 0.6 \cdot N \cdot (1 - s) f_r \quad (40)$$

$$f_B = (0.4n_1 + 0.6n_2) \cdot (1 - s) f_r \quad (41)$$

čia  $n_1$  ir  $n_2$  sveikieji teigiami skaičiai (1, 2, 3...), kadangi BNS variklių slydimas lygus 1, gaunamos šios išraiškos:

$$f_o = 0.4 \cdot N \cdot f_r \quad (42)$$

$$f_i = 0.6 \cdot N \cdot f_r \quad (43)$$

$$f_B = (0.4n_1 + 0.6n_2) \cdot f_r \quad (44)$$

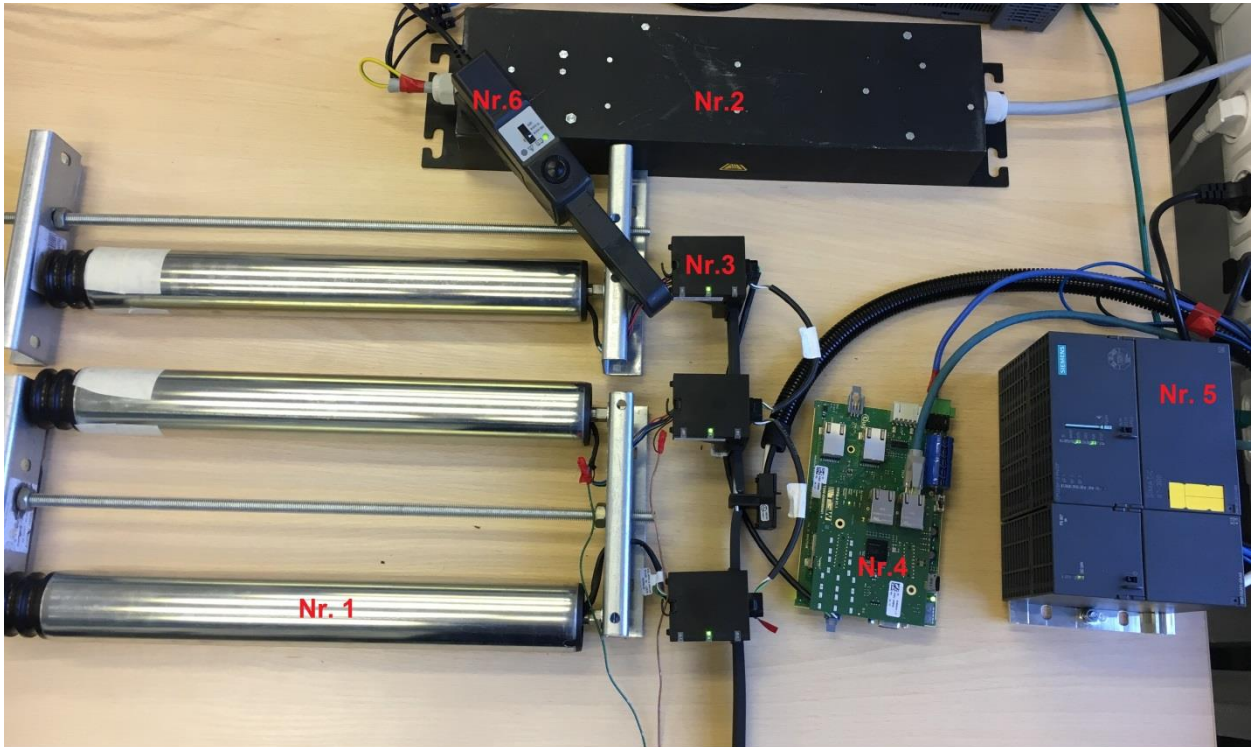
Kadangi BNS variklių srovės spektras susideda iš daugiau dedamųjų, mažiems varikliams specifinius guolių gedimus identifikuoti gali būti sunku, todėl skaičiuojami visi dažniai ir identifikavus bent vieną spektro pokytį viename iš dažnių laikoma, kad guolis yra defektinis neskirstant į guolio defekto pobūdį [2, 9, 24, 26].



## 2. TYRIMO ATLIKIMO METODIKA

### 2.1 Gedimų diagnostika naudojantis srovės spektro analizės metodika

Pirmu atveju buvo nuspręsta naudotis variklio statoriaus srovės spektro analizės metodu (MSCA) visų sukeltų gedimų identifikavimui.



2.1.1 Pav. Tyrimo stendas Nr. 1.

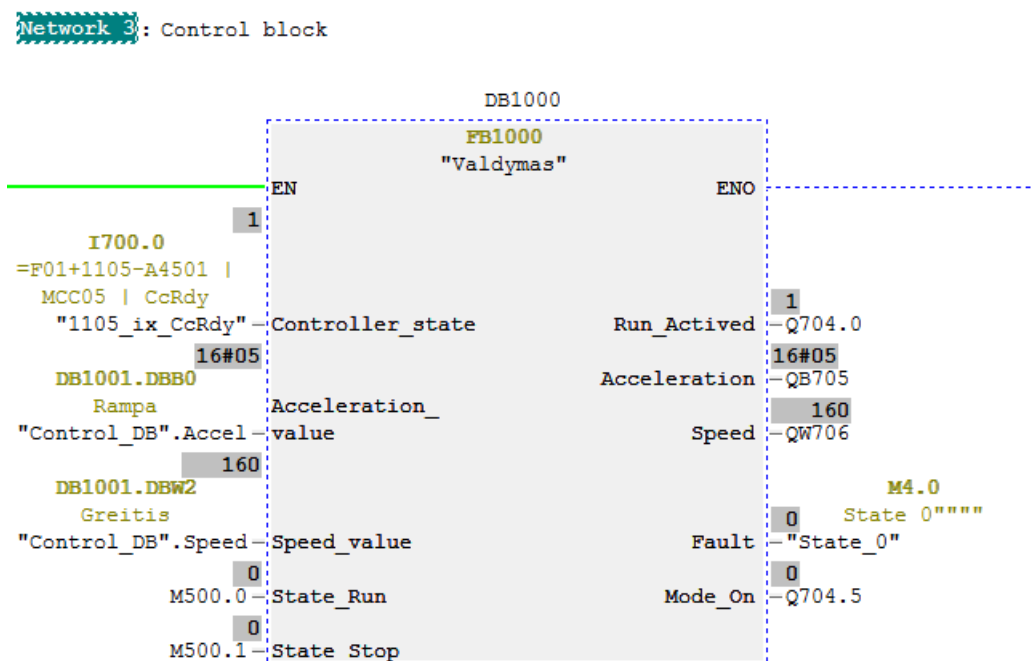
Tyrimo objektu pasirinkti trys BNS varikliai. Tyrimo stendo elementai ir jų parametrai:

- Nr.1 - BNS elektros varikliai, vardinė įtampa – 48 V, Galia – 100 W, vardinė srovė 2A, guolių tipas: NSK 6202 Z, variklių konstrukcinis ypatumas: rotorius išorėje, sukimosi greitis 615 aps/min, rotoriaus magnetų sekcijų skaičius – 2, polių skaičius – 6.
- Nr.2 – Trifazis inverteris (Lygintuvas), parametrai: įėjimo įtampa 400 V, maksimali įėjimo srovė 10 A, išėjimo įtampa 48 V, maksimali išėjimo srovė 30 A.
- Nr.3 – PWM modulatorius srovės grandinėms komutuoti.
- Nr.4 – Mikrokontroleris PLC valdymo signalų konvertavimui ir srovės grandinės valdymo signalų generavimui į PWM moduliatorių.
- Nr.5 – Siemens PLC, modelis – S7-300, tipas – CPU319F-3, signalams į mikrokontrolerį siųsti Profinet tinkle.
- Nr.6 – Tektronix A622 srovės matavimo replės fazės srovės matavimui.

BNS variklio fazinės srovės matavimui buvo atliekami Tektronix A622 srovės matavimo replėmis (Nr. 6). Tektronix A622 specifikacijos:

- Veikimo principas: Holo efektas.
- Matuojami parametrai: AC/DC srovės.
- Veikimo diapazonas: iki 100 kHz dažnio, nuo 50 mA iki 100 A srovės.
- Veikimo režimai: 10mV/A – 10mV atitinka 1 A matuojamos srovės vertės, arba 100mV/A, 100mV atitinka 1 A srovės vertę.

PLC valdymo logika buvo parašyta LAD programavimo kalba Siemens STEP7 SIMATIC Manager PLC programavimo aplinkoje. Programoje buvo sukurtas valdymo funkcinis blokas (FB1000), duomenų blokas (DB1001) startavimo pagreičio ir sukimosi greičio vertėms nustatyti. Programa buvo vykdoma organizaciniame bloke (OB1), programos kodas OB1 bloke:



2.1.2 Pav. Siemens SIMATIC Manager LAD programinis kodas.

Bloko įėjimo (kairėje) parametrai:

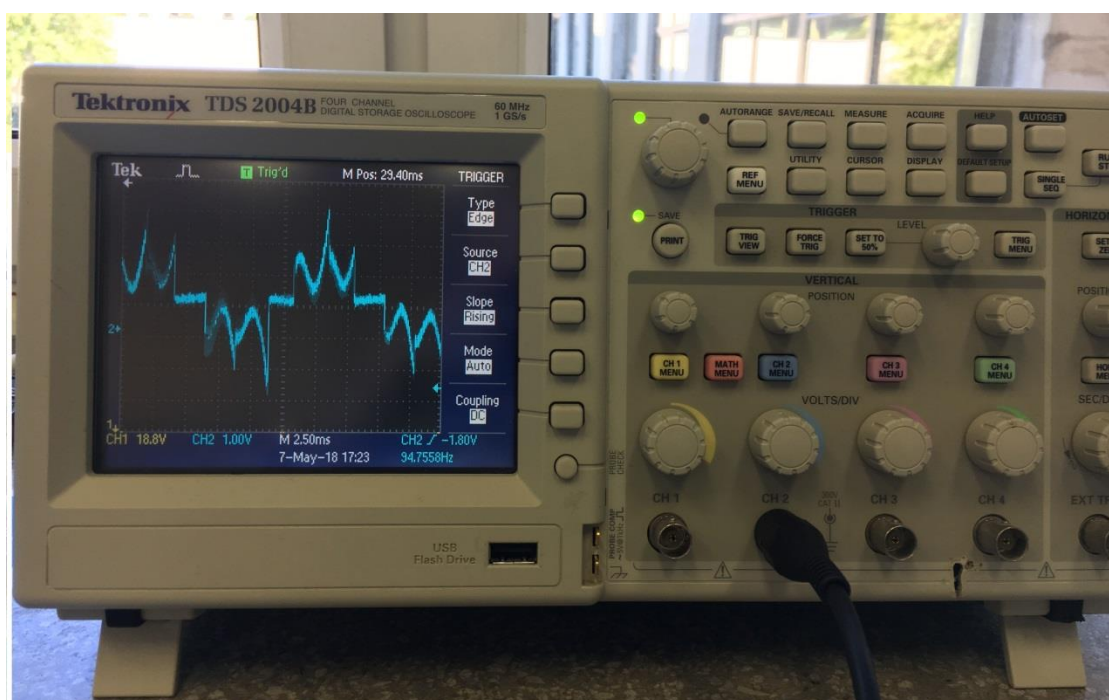
- Controller state – mikrokontrolerio būsenos signalas.
- Acceleration\_value – įsibėgėjimo pagreičio vertė (rampa) iš DB1001, duomenų formatas REAL.
- Speed\_value – greičio vertė iš DB1001, duomenų formatas REAL, 160 = 574 aps/min.
- State\_Run – Atminties (Memory) signalas sistemos paleidimui.
- State\_Stop – Atminties (Memory) signalas sistemos sustabdymui.

Bloko išėjimo (dešinėje) parametrai:

- Run\_Activated – Q704.0 skaitmeninis išėjimo signalas mikrokontrolerio paleidimui.
- Acceleration – QB705 skaitmeninis įsibėgėjimo pagreičio išėjimo signalas.
- Speed – QB705 skaitmeninis greičio išėjimo signalas.
- Fault, Mode\_On – eksperimentiniai signalai testavimo tikslams.

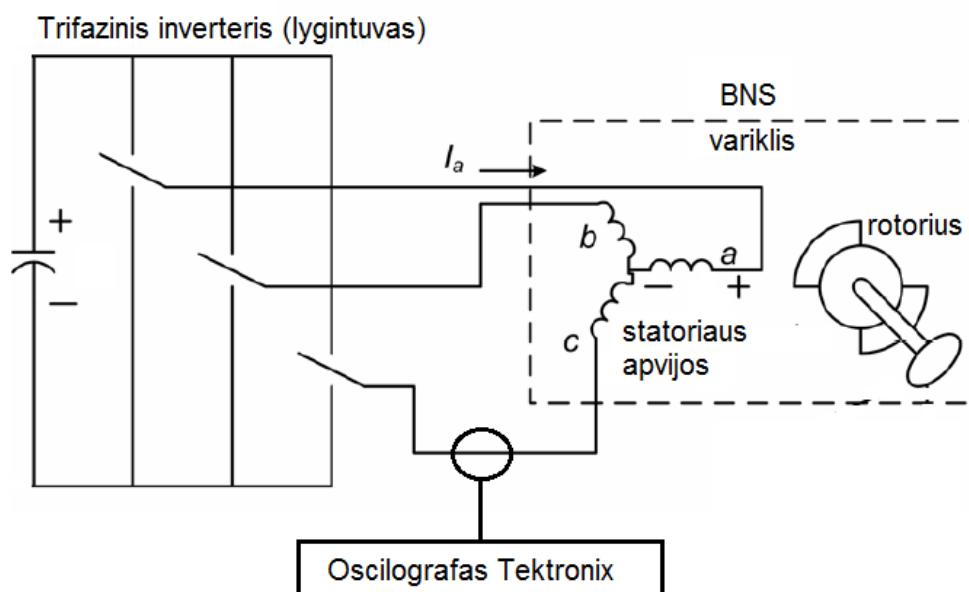
Duomenų bloko DB1001, DB1000 ir valdymo funkcinio bloko FB1000 struktūra prieduose Nr. 1. ir Nr. 2.

Tektronix A622 srovės replės buvo prijungiamos prie skaitmeninio oscilografo Tektronix TDS 2004B. Tai keturių kanalų (CH1-CH4), 60 MHz, 1 GS/s oscilografas, galintis užfiksuoti oscilografo ekrane rodomus duomenis ir įrašyti juos į USB raktą. Duomenų įrašymo tikslumas 2500 taškų ekrane matomo signalo. USB rakte išsaugomi duomenys .CSV formatu kartu su nuotrauka .JPEG formatu.



**2.1.3 Pav.** Oscilografas Tektronix TDS 2004B.

Varikliai dirbo tuščiaja veika, jiems buvo sukelti guolių ir rotoriaus gedimai žr. skyrių 2.3 apie eksperimento metu sukeltus gedimus ir jų pobūdį. Principinė schema srovės analizei:



2.1.4 Pav. Principinė BNS variklio schema srovės spektro analizei.

Iš oscilografo Tektronix TDS 2004B nuskaityti duomenys su USB raktu .CSV formatu perkelti į MATLAB 2018a programinio paketo aplinką. MATLAB aplinkoje parašytas kodas gautos fazinės srovės signalų spektrui laike konvertavimui su Furjė transformacija į dažninį spektrą. MATLAB programinis kodas:

```
clear all
clc
fidi = fopen('ALL0000_Specter.txt', 'rt');
T_EMG = textscan(fidi, '%f%f', 'Delimiter',' ');
t = T_EMG{1};
EMG = T_EMG{2};
L = length(t);
Ts = mean(diff(t));
Fs = 0.25/Ts;
Fn = Fs/2;
FEMG = fft(EMG)*2/L;
Fv = linspace(0, 1, fix(L/2)+1)*Fn;
Iv = 1:length(Fv);
figure(1)
plot(Fv, abs(FEMG(Iv)))
xlim([25 550])
ylim([0 0.6])
xlabel('Dažnis (Hz)');
ylabel('Amplitude (dB)');
title('FFT')
grid
```

2.1.5 Pav. MATLAB 2018a Furjė transformacijai programinis kodas.

Duomenys buvo matuojami keturis kartus:

1. BNS varikliui dirbant tuščiaja eiga be pažeidimų.
2. Varikliui sudarius sukimosi ekscentricitetą, rotoriaus išorėje pridėjus papildomą sukimosi kūną.
3. Pažeidus guolio separatorių.
4. Pažeidus rotoriaus magnetus.

Gauti duomenys buvo lyginami su vibracijų spektro duomenis neuroniniame tinkle ir sprendžiama, kuris tyrimo metodas yra efektyvesnis žr. antrą tyrimo dalį.

## 2.2 Gedimų diagnostika metodika naudojantis vibracijos spektro analizės metodika

Antra eksperimento dalis buvo atliekama surenkant vibracijų duomenis esant skirtingo pobūdžio defektams. Gauti duomenys toliau analizuoti su neuroniniu tinklu naudojantis klasifikatorių ir signalų bei vaizdų atpažinimo algoritmą.



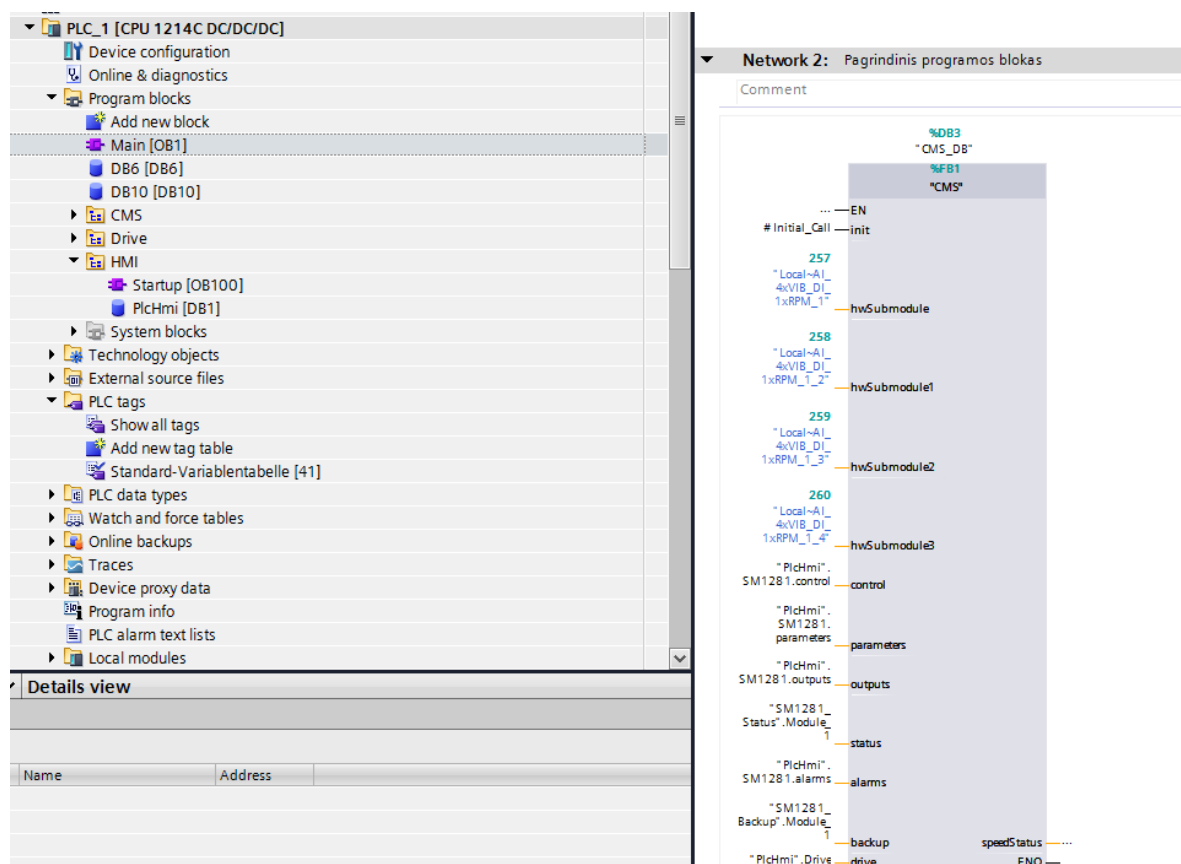
2.2.1 Pav. Tyrimo stendas Nr. 2.

Tyrimo stendo Nr. 2 elementai ir jų parametrai:

- Nr.1 – Siemens PLC, modelis – S7-1200, tipas – 1214C DC/DC/DC rėlinis, vibracijų monitoringo prietaiso (Nr.2) valdymui.

- Nr.2 – Siemens SM1281 penkių kanalų diagnostikos ir monitoringo modulis variklio vibracijoms tirti. Modulis realiu laiku pateikti vibracijų greičio ir pagreičio duomenis. Autonomiškai nustatyti defektų pobūdį. Duomenų išsaugojimo trukmė iki 10 metų.
- Nr.3 – Du Siemens LOGO 24 V įtampos, 2 A srovės maitinimo šaltiniai.
- Nr.4 – Siemens SCALANCE XB008 aštuonių kanalų Profinet tinklo komutatorius. Visų eksperimente naudotų įrenginių sujungimui į vieną tinklą.
- Nr.5 – Siemens SIMPLUS CMS2000 vibracijų akcelerometras, vibracijoms tirti. Jautrumas 96.59mV/g.
- Nr.6 – Siemens MindConnect Nano, tipas – SIMATIC IPC227E. Duomenų talpinimas ir monitoringas Siemens daiktų interneto debesyje.

Prieš pradėdant rinkti BNS variklio vibracijų duomenis buvo konfigūruojamas PLC programinis kodas vibracijų modulio konfigūravimui ir valdymui. Valdiklio S7-1200 programiniam kodui rašyti buvo naudojamas Siemens TIA Portal V15.0 Basic programinis paketas. Bazinis SM1281 modulio valdymo kodas ir HMI panelė buvo parsųsti iš industry.siemens internetinio puslapio, bibliotekos pavadinimas: LSM1281\_V355\_TIAV15.



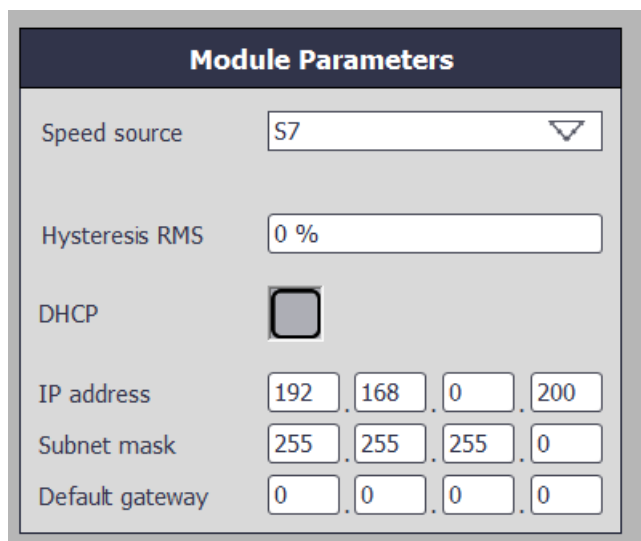
**2.2.2 Pav.** SM1281 modulio OB1 bloke konfigūravimas TIA Portal V15.0 Basic aplinkoje.

OB1 programos bloke buvo nustatomi vibracijų modulio valdymo, duomenų gavimo ir siuntimo adresai FB1 bloko jėjimuose hswSubmodule, hswSubmodule1 ir t.t., *Device configuration* lange sudėti visi fiziškai Profinet tinkle egzistuojantys prietaisai: PLC, SM1281 modulis, MindConnect Nano, HMI panelė. HMI panelė buvo naudojama virtualiai Siemens TIA Portal WinCC plėtinyje, skirtame parametrų vizualizacijai. Virtualios panelės paleidimui buvo naudojamas dar vienas Siemas TIA Portal plėtinys pavadinimu PLCSIM. Šio plėtinio paskirtis – Simuliuoti PLC ir HMI prietaisus, šiuo atveju buvo simuliuojama tik HMI panelė.

Parameters	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4
Enable	Activated ▾	Activated ▾	Deactivate ▾	Deactivate ▾
Sensitivity	96.59 mV/g	101.66 mV/g	100.00 mV/g	100.00 mV/g
Speed ratio	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>vRMS</b>				
Evaluation time	3 rotations ▾	3 rotations ▾	3 rotations ▾	3 rotations ▾
Highpass filter	10 Hz ▾	10 Hz ▾	10 Hz ▾	10 Hz ▾
Warning level	1.0 mm/s	4.5 mm/s	1.0 mm/s	1.0 mm/s
Alarm level	4.0 mm/s	7.1 mm/s	4.0 mm/s	4.0 mm/s
<b>aRMS</b>				
Evaluation time	3 rotations ▾	3 rotations ▾	3 rotations ▾	3 rotations ▾
Highpass filter	1,000 Hz ▾	1,000 Hz ▾	1,000 Hz ▾	1,000 Hz ▾
Lowpass filter	10,000 Hz ▾	10,000 Hz ▾	10,000 Hz ▾	10,000 Hz ▾
Warning level	1.0 m/s <sup>2</sup>	1.0 m/s <sup>2</sup>	1.0 m/s <sup>2</sup>	1.0 m/s <sup>2</sup>
Alarm level	4.0 m/s <sup>2</sup>	4.0 m/s <sup>2</sup>	4.0 m/s <sup>2</sup>	4.0 m/s <sup>2</sup>

**2.2.3 Pav.** SM1281 modulio valdymo panelės vibracijų daviklių konfigūravimas TIA Portal WinCC aplinkoje.

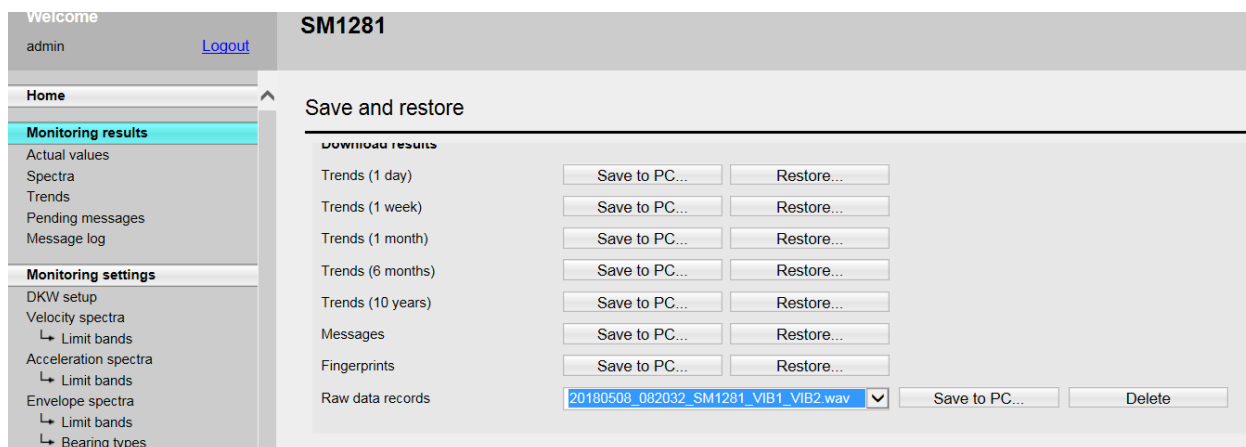
HMI valdymo panelėje parametrų lange buvo nustatomi vibracijų daviklių parametrai, bei fiziniai SM1281 tinklo parametrai pav. 2.2.3 ir pav. 2.2.4.



Module Parameters				
Speed source	S7			
Hysteresis RMS	0 %			
DHCP	<input type="checkbox"/>			
IP address	192	168	0	200
Subnet mask	255	255	255	0
Default gateway	0	0	0	0

**2.2.4 Pav.** SM1281 modulio adreso parametrų tinkle konfigūravimas.

Sukonfigūravus prietaiso parametrus ir nusiųtus programinį kodą į PLC, asmeninio kompiuterio LAN nustatymuose nustačius to pačio potinklio parametrus su IP adresu 192.168.0.xxx, ir interneto naršyklėje suvedus IP 192.168.0.200, buvo tiesiogiai prisijungta prie SM1281 realioms neapdirbtiems vibracijų duomenims gauti. Neapdirbti (Raw) duomenys yra išsaugomi .WAV formatu tiesiai į asmeninio kompiuterio kietąjį diską, pav. 2.2.5. Nustačius 60 sekundžių įrašymo intervalą buvo nuskaityta 2812500 vibracijų reikšmės, nuskaitytų reikšmių formatas mV/ns.

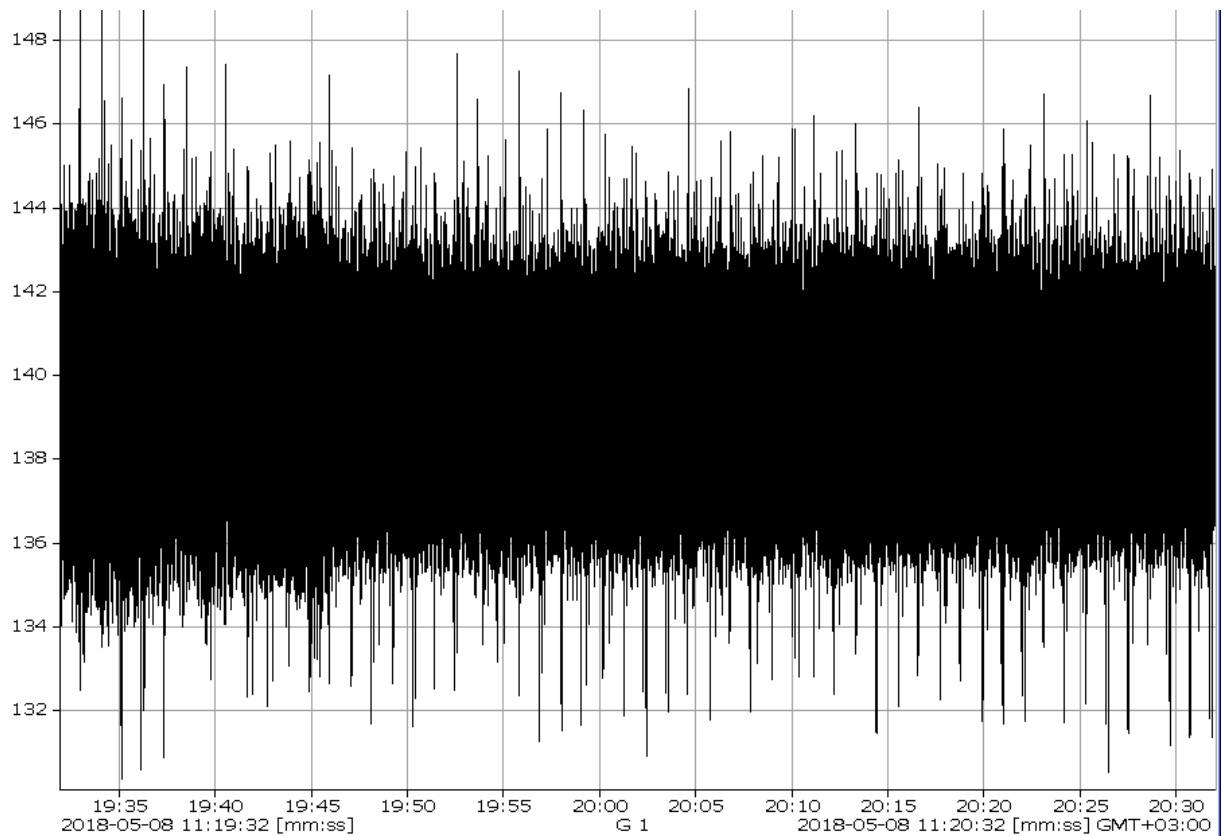


SM1281	
Welcome admin <a href="#">Logout</a>	
Home	
Monitoring results	
Actual values	
Spectra	
Trends	
Pending messages	
Message log	
Monitoring settings	
DKW setup	
Velocity spectra	
↳ Limit bands	
Acceleration spectra	
↳ Limit bands	
Envelope spectra	
↳ Limit bands	
↳ Bearing types	
Save and restore	
Download results	
Trends (1 day)	Save to PC... Restore...
Trends (1 week)	Save to PC... Restore...
Trends (1 month)	Save to PC... Restore...
Trends (6 months)	Save to PC... Restore...
Trends (10 years)	Save to PC... Restore...
Messages	Save to PC... Restore...
Fingerprints	Save to PC... Restore...
Raw data records	20180508_082032_SM1281_VIB1_VIB2.wav Save to PC... Delete

**2.2.5 Pav.** Neapdorotų duomenų eksportavimas SM1281 modulio WEB aplikacijoje.

Neapdoroti vibracijų duomenų .wav failo nuskaitymui ir konvertavimui į .CSV formato failą, kuris būtų prieinamas MATLAB programinei įrangai, buvo patalpinti Siemens CMS X-TOOLS V4.0.4 programinio paketo „Monitoring system“ plėtinyje. CMS X-TOOLS programinė įranga yra skirta įvairių elektrinių ir mechaninių parametrų analizavimui.





**2.2.6. Pav.** CMS X-TOOLS programinės įrangos aplinkoje atvaizduoti SM1281 surinkti duomenys. X-ašis laikas, sekundėmis, y-ašis įtampiniai vibracijų duomenys, mV/g.

Atitinkamai duomenų vertės buvo matuojamos keturis kartus, tokiose pačiose BNS variklio darbo sąlygose, kartu su srovės spektro analizės duomenimis. Kadangi reikšmių kiekis yra labai didelis, buvo atliekamas amplitudinių reikšmių suradimas, MATLAB kodas pav. 2.2.7.

```

6 clc
7 clear all
8 [d,s] = xlsread('Normal_data.csv');
9 t = d(:,1)
10 v = d(:,2);
11 L = length(t);
12 Ts = mean(diff(t));
13 Fs = 1/Ts;
14 Fn = Fs/2;
15 FTv = fft(v)/L;
16 Fv = linspace(0, 1, fix(L/2)+1)*Fn;
17 Iv = 1:length(Fv);
18 [Xm Im] = findpeaks(v, 'MinPeakHeight', 148)
19 iVals = reshape([ Im - 1 ; Im ; Im + 1 ], 1, [])
20 xVals = Fv(Xm)
21 yVals = v(Im)

```

**2.2.7 Pav.** MATHLAB 2018a programinis kodas vibracijų amplitudžių radimui.

Gauti duomenys pagal defektus buvo sugrupuojami į kategorijas:

1. Normalus darbo režimas – oro tarpo ekscentricitetas.
2. Normalus darbo režimas – Guolio separatoriaus užteršimas.
3. Normalus darbo režimas – Pažeisti magnetai.
4. Normalus darbo režimas – Nutraukta apvija.

Toliau suklasifikuoti duomenys perkeliama į MATLAB 2018a programinio paketo papildinį „Classifier Learner“ defektų klasifikavimui. Pasirenkamas „Ensemble – Bagged Trees“ klasifikavimo algoritmas. Klasifikatorius mokomas keturis kartus su kiekviena kategorija.

Su tais pačiais duomenimis, kurie buvo naudojami klasifikavimui, su priede Nr. 3 pateiktu kodu, paleidžiamas kitas MATLAB programinio paketo papildinys „Pattern Recognition“ – neuroninis tinklas signalų ir vaizdų atpažinimui. Tinklo testavimo ir mokymo metu buvo keičiami šie kode esantys parametrai:

```
net=patternnet(30); % Neuronų skaičius tinkle  
net.trainParam.max_fail=200; % Patvirtinimų skaičius  
net.trainParam.epochs=400; % Iteracijų skaičius  
net.divideParam.trainRatio = 0.8; % Naudojama duomenų dalis  
net.divideParam.valRatio = 0.20; % Reikalinga duomenų dalis patvirtinimui  
net.divideParam.testRatio = 0.15; % Reikalinga duomenų dalis testavimui
```

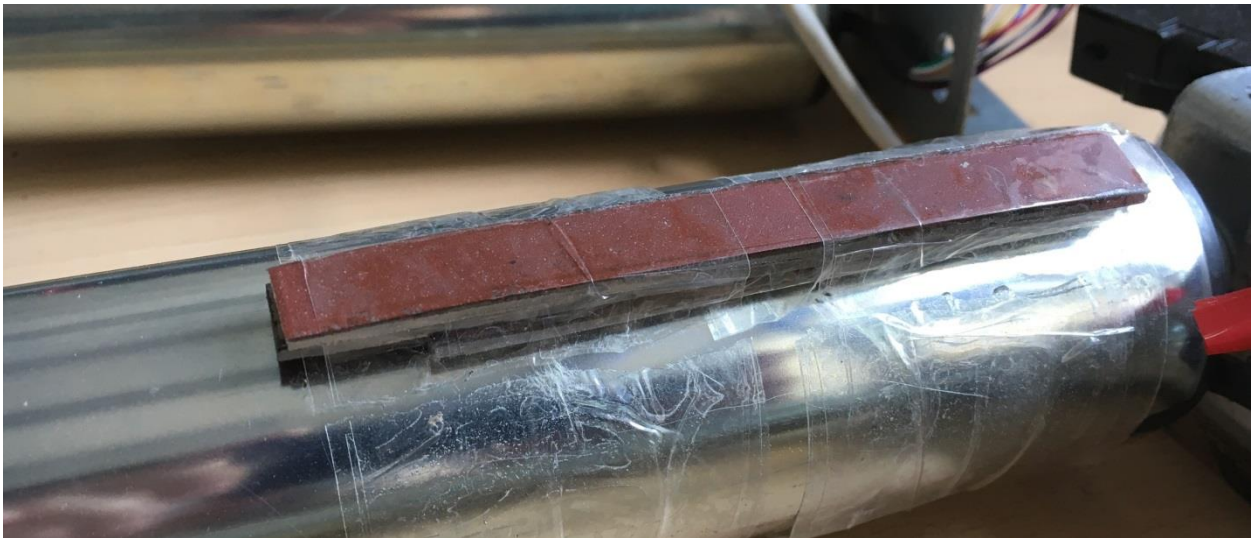
Tikslus iteracijų ir neuronų skaičius tinkle pasirenkamas atliekant testavimus pačiame tinkle.

## **2.3 Eksperimento metu BNS varikliams sukelti defektai.**

BNS varikliai buvo tiriami dviem skirtingais jų veikimo atvejais: a) be defektų, b) sukėlus defektus gedimų imitavimui. Buvo sukelti keturių skirtingų pobūdžių defektai:

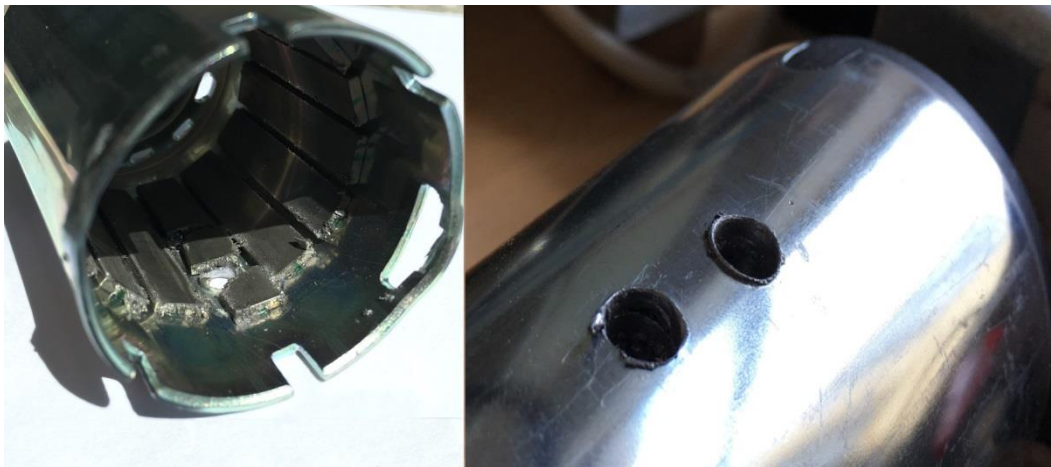
- Rotoriaus oro tarpo ekscentricitetas – disbalansas.
- Pažeisti rotoriaus magnetai.
- Nutraukta statoriaus apvija darbo metu.
- Užterštas guolio separatorius – guolio susidėvėjimas.

Kadangi rotorius pagal tiriamo BNS variklio konstrukciją yra išorėje, oro tarpo ekscentricitetas buvo sukeliama papildomai rotoriaus paviršiuje, išilgai rotoriaus, užklijuojant metalines plokšteles, žr. Pav. 2.3.1. Esant disbalansui oro tarpo ekscentricitetas susidaro ne iškart, todėl variklis su disbalansu buvo paliktas sukintis 24 valandas, eksperimento duomenys vibracijoms ir srovės spektrui buvo renkami du kartus, bandymo pradžioje ir praėjus anksčiau minėtam laiko tarpui, norint užtikrinti ar fiziškai susidarė oro tarpo ekscentricitetas.



**2.3.1 Pav.** BNS variklis su metalo plokštelėmis rotoriaus paviršiuje.

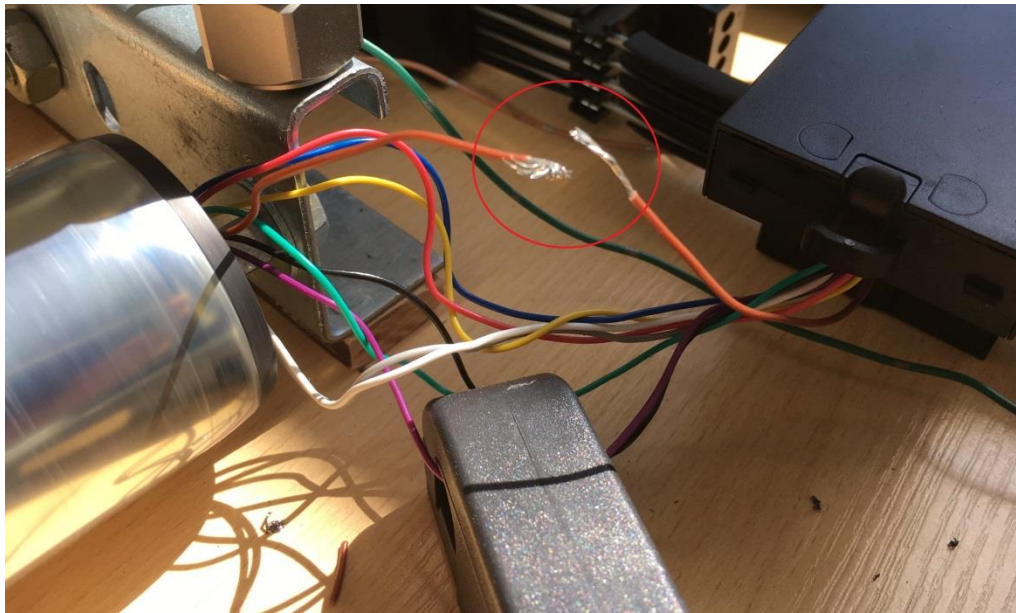
Tyrimo metu sekančio BNS variklio rotoriaus magnetai buvo pažeidžiami juos gręžiant 6mm grąžtu. Sukeliant šį pažeidimą buvo stengiamasi išvengti apvijų pažeidimo, gręžimo vietos buvo kruopščiai valomos, kad į statoriaus apvijas nepatektų metalo drožlių atsiradusių po gręžimo. Viso buvo gręžiamos dvi skylės, abiejų skylių trajektorija sutapo su magnetų plokštelių pozicija.



**2.3.2 Pav.** BNS variklis su pažeistais rotoriaus magnetais.

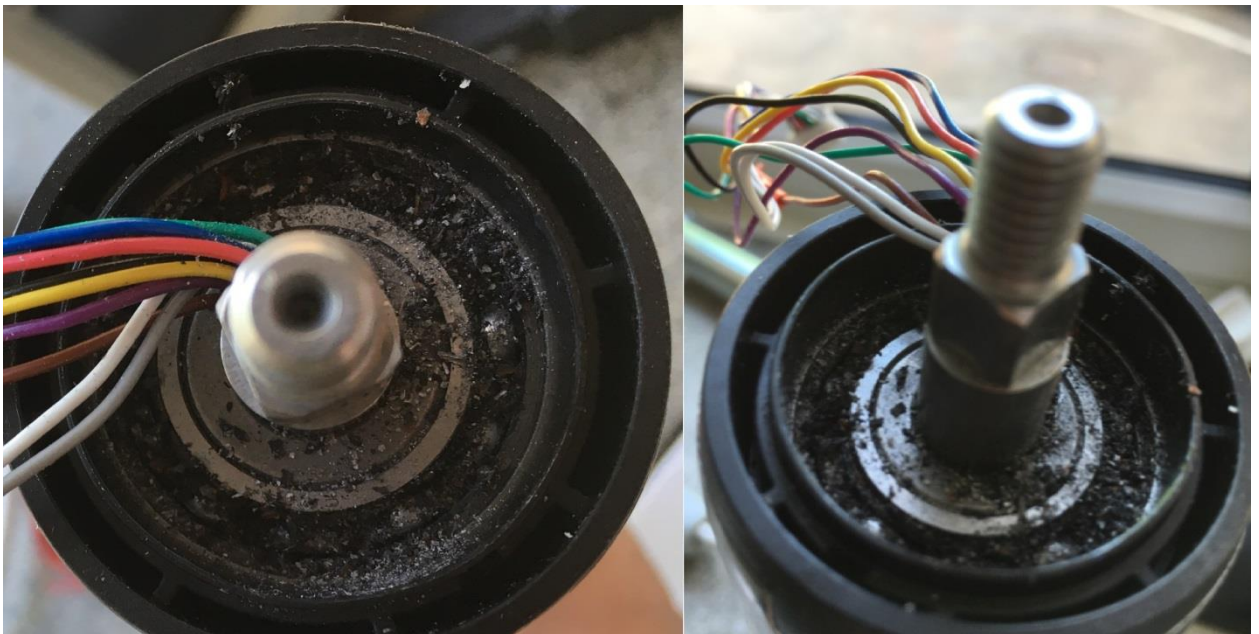
Šio gedimo sukėlimo tikslas imituoti rotoriaus nuolatinių magnetų sudarytų iš neodimio irimo procesą ir kaip jis įtakoja variklio veikimą.

Trečiojo eksperimento metu buvo nutraukiama, nuo dar kito BNS variklio (be defektų), apvija veikimo be apkrovos metu žr. pav. 2.3.3 Variklis maitinamas iš trijų fazių, fazių laidų indikavimui naudojamos šios spalvos: ruda –  $U$ , violetinė –  $V$ , raudona –  $W$ , tyrimo metu buvo nutraukiamas tik vienos fazės  $U$  laidas, o srovės spektras matuojamas  $V$  fazėje.



**2.3.3 Pav.** BNS variklis veikimo metu su nutraukta apvija.

Paskutinio, ketvirtojo bandymo metu buvo dirbinau sukeliamas guolio susidėvėjimas, jo separatorių užteršiant pelenais. Užteršus guolio separatorių variklis buvo sukamas apie 36 valandas, kad kietosios dalelės užteršusios guolio tepalą, pablogintų tepalo slydimo charakteristikas ir sukurtų trintį tarp riedėjimo kūnų ir vidinio bei išorinio guolio žiedų žr. pav. 2.3.4. Duomenys vibracijoms ir srovės spektrui buvo renkami du kartus, bandymo pradžioje ir praėjus anksčiau minėtam laiko tarpui, norint pamatyti pažeidimo pokytį laiko atžvilgiu.



**2.3.4 Pav.** BNS variklis su užterštu guolio separatoriumi.

Guolio tipas - 6904Z, duomenys:

Riedėjimo kūnų skaičius guolyje – 12;

Atstumas tarp riedėjimo kūnų centrų  $D = 24$  mm;

Riedėjimo kūno diametras  $d = 1.2$  mm;

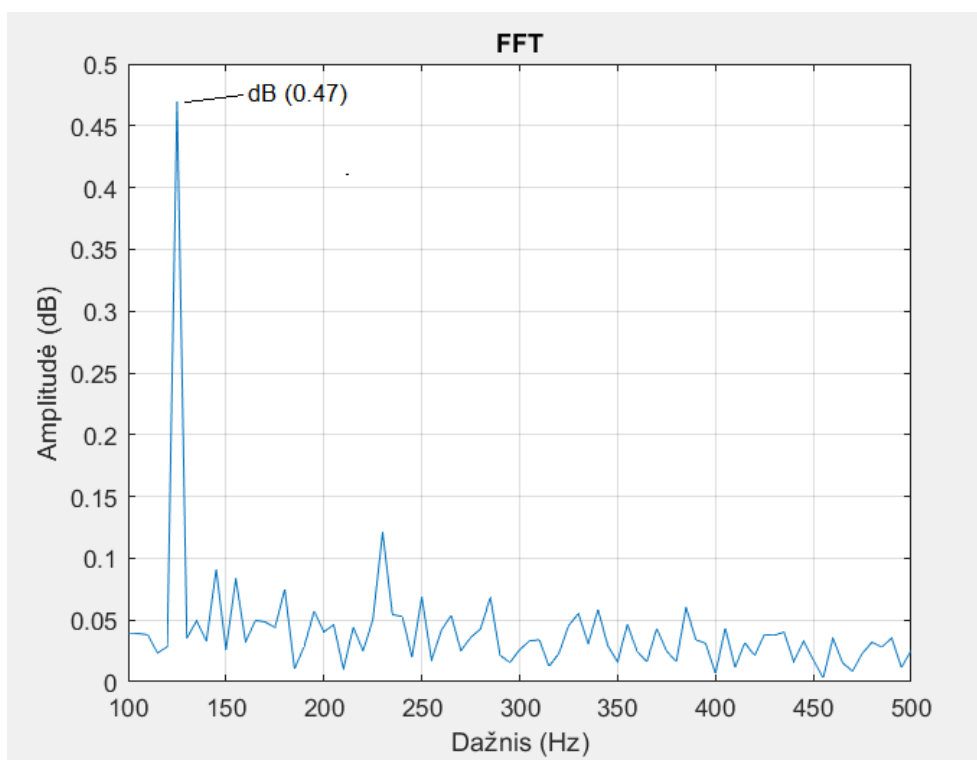
Kontakto kampas  $\alpha = 0^\circ$ .

### 3. TYRIMO REZULTATAI

#### 3.1 BNS variklio gedimų diagnostika MCSA metodu

Variklio srovės spektro analizės metu buvo lyginami srovės spektrai atliekant Furjė transformaciją, gedimų identifikavimui buvo taikoma dažnių pokyčio sąlyga pagal naujo variklio duomenis.

Kadangi BNS variklyje komutacija atliekama kas 60 laipsnių, todėl per vieną apsisukimą viso atliekami 6 perjungimai, tarp jų gaunasi dvigubai daugiau pereinamųjų procesų indikuojančių srovės kitimą, taigi vieno apsisukimo metu gaunami 12 pereinamųjų procesų žr. 3.1.1 pav. Variklio greitis  $v = 615$  aps/min, arba  $v = 10.25$  aps/sec, iš to gauname, kad per vieną sekundę įvyksta  $10.25 \cdot 12 = 123$  pereinamieji procesai, todėl galima teigti, kad komutacijos metu esančio pereinamojo proceso dažnis yra 123 Hz, šis dažnis parodytas pav. 4.7 (dB 0.47).



**3.1.1 Pav.** Pateiktas eksperimento metu naudoto BNS variklio statoriaus fazinės srovės dažnių spektras, kai variklis veikia tvarkingai.

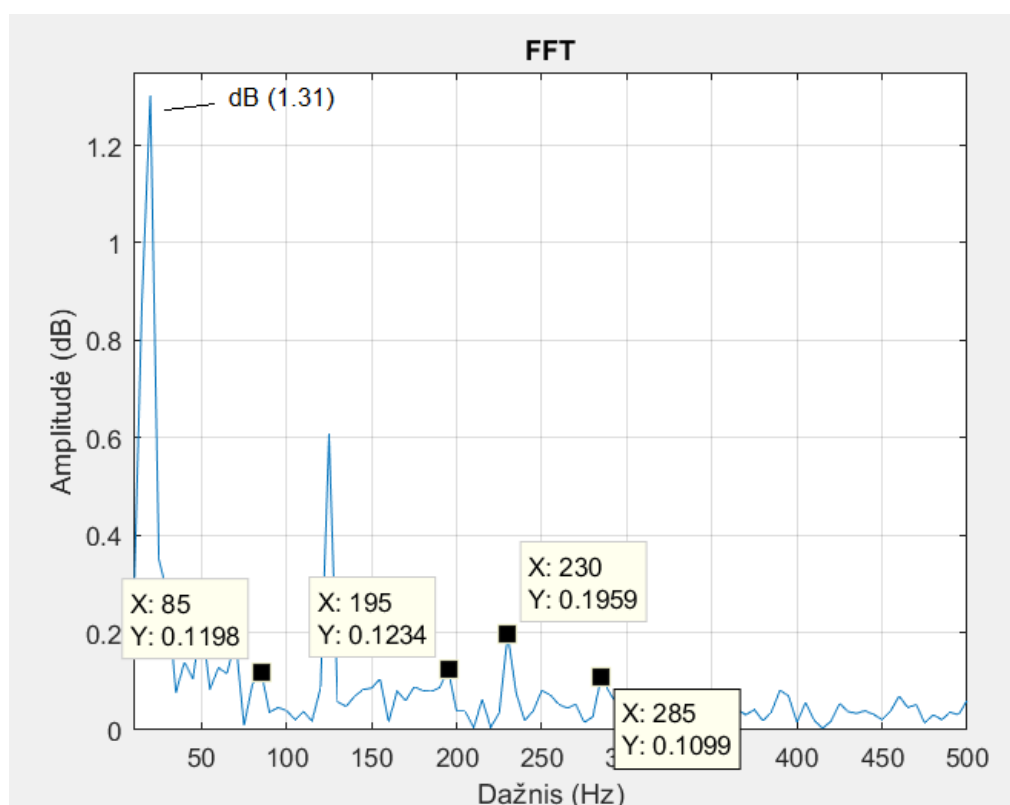
Dinaminio oro tarpo ekscentriciteto srovės harmonikų dažniai apskaičiuojami pagal formulę (23):

$$f_{de} = 61.5 + 1 \frac{61.5(1 - 1)}{6/2} = 81.92 \text{ Hz}$$

čia srovės dažnis yra apsisukimų skaičius per sekundę padaugintas iš komutacijų skaičiaus per sekundę  $10.25 \cdot 6 = 61.5$ .

**Lentelė 3.1** oro tarpo ekscentriciteto srovės harmonikų dažniai.

$k$	$f_{de}, \text{ Hz}$	FFT indikuojantys dažniai, Hz
1	81.92	85
2	102.34	-
3	122.76	-
4	143.18	-
5	163.60	-
6	184.02	195
7	204.44	-
8	224.88	230
9	245.30	-
10	265.70	-
11	285.42	285
12	305.82	-



**3.1.2 Pav.** Dinaminio oro tarpo ekscentriciteto ir disbalanso srovės dažnių spektras.

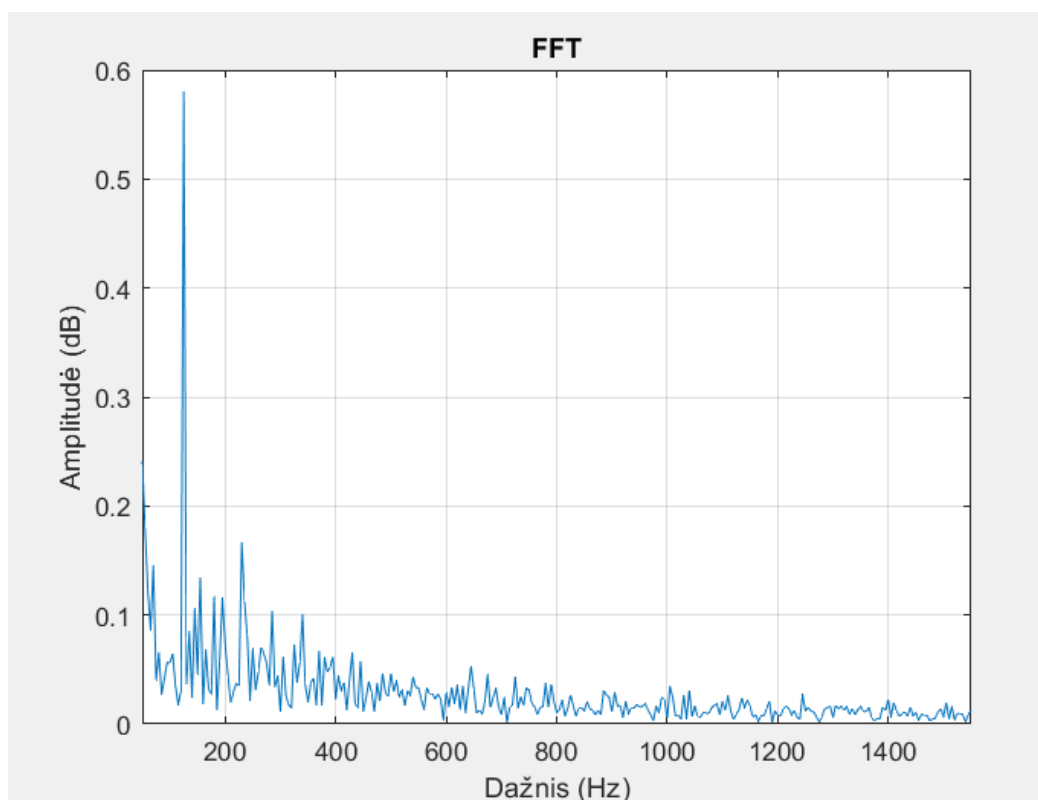
Grafike matomas bendras amplitudžių padidėjimas dėl magnetinio oro srauto oro tarpe kitimo. Pirmą amplitudę Hz 10.25 (dB 1.31) indikuoja disbalanso dažnį, kuris susidarė uždėjus plokšteles ant rotoriaus paviršiaus, ši harmonika sutampa su variklio sukimosi greičiu.

Amplitudės 85, 195, 230, 285 indikuoja dinaminio oro tarpo ekscentriciteto harmonikas, ir yra artimos apskaičiuotiesiems dažniams. Teorinis statinis oro tarpo ekscentricitetas yra apskaičiuojamas pagal (24) formulę:

$$f_{sh} = \left\{ (1 \cdot 2 + 1) \frac{2(1 - 1)}{6} + 1 \right\} \cdot 61.5 = 181.5 \text{ Hz}$$

Toliau kitos harmonikos statiniui oro tarpo ekscentricitetui neskaičiuojamos, nes bandymo metu nebuvo susidaręs statinis ekscentricitetas, todėl jo harmonikų nesimato srovės spektro analizėje.

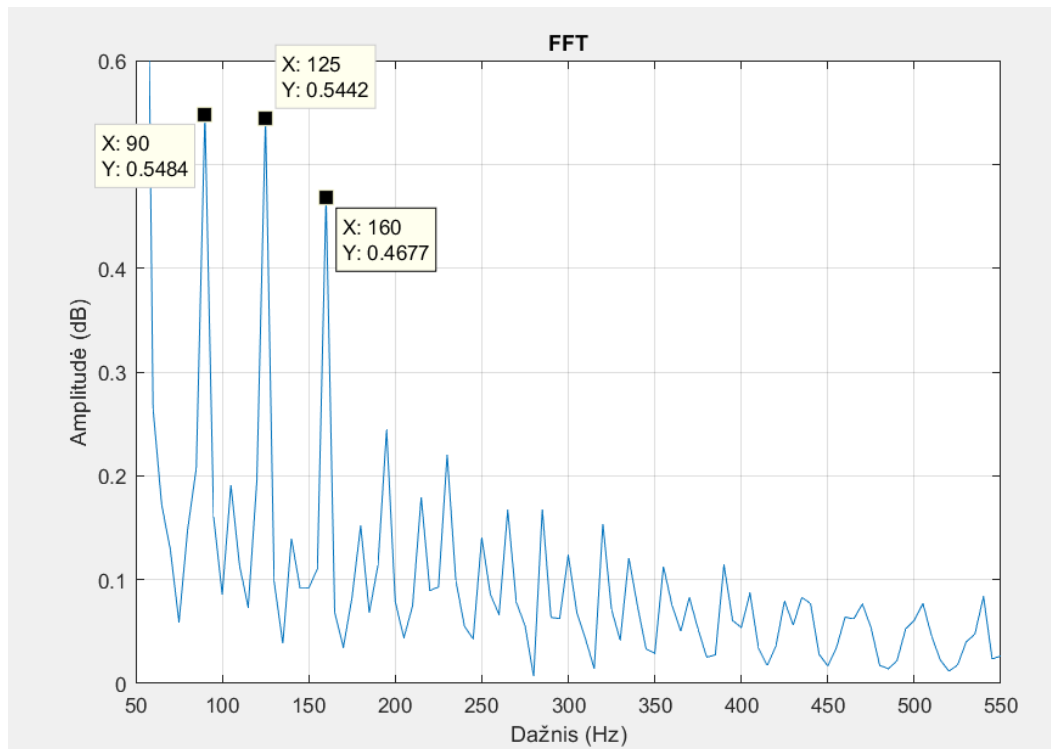
Sukėlus pažeidimus rotoriaus magnetuose gana sunku konstatuoti defektą vien iš srovės spektro dažninės charakteristikos, tai matyti grafike pav. 3.3, grafike galima matyti atsiradusių papildomų harmonikų amplitudžių kiekį ir nežymiai išaugusias jų vertes, tačiau vien iš to teikti, kad magnetai yra pažeisti nebūtų tikslu.



**3.1.3 Pav.** Variklio pažeistais magnetais srovės dažnių spektras.

Nutraukus vienos fazės apviją variklio darbu metu, atsiranda komutacijų dažnio sumažėjimas, kadangi iš komutacijos grandinės eliminuoja vienos fazės komutacija, todėl anksčiau apskaičiuotas pereinamojo proceso dažnis komutacijos metu, pakinta atitinkamai 1/3 buvusio dažnio, kuris buvo ~123 Hz. Dėl magnetovaros sumažėjimo dviejuose 60 laipsnių segmentuose, sumažėjo ir sukimosi greitis, kuris išmatavus buvo lygus ~598 aps/min, arba 9.96 aps/sec. Fiziškai vyko tik 4 srovės grandinės komutacijos vieno apsisukimo metu, iš ko gauname 8 pereinamuosius procesus, kurių dažnis  $(9.96 \cdot 8) = 79.68 \text{ Hz}$ . Pereinamojo proceso dažnis

svyruoja nuo 80 Hz iki 95 Hz, kurio amplitudė pavaizduota grafike pav. 3.1.4. Pagal tai galima spręsti, kad gedimą indikuojančių harmonikų dažnių amplitudės yra 90 Hz, 125 Hz ir 160 Hz, žingsnis 35 Hz.



**3.1.4 Pav.** Variklio nutraukta apvija srovės dažnių spektras.

Variklio guolio gedimus identifikuojantys dažniai buvo skaičiuojami naudojantis (33 – 37) formulėmis.  $f_r = 10.25 \text{ Hz}$  veleno sukimosi dažnis, kai sukimosi greitis 615 aps/min.

$$f_o = \frac{12}{2} \cdot 10.25 \left( 1 - \frac{1.2}{24} \cdot \cos 0 \right) = 58.425 \text{ Hz.}$$

$$f_i = \frac{12}{2} \cdot 10.25 \left( 1 + \frac{1.2}{24} \cdot \cos 0 \right) = 64.575 \text{ Hz.}$$

$$f_c = 10.25 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{1.2}{24} \cdot \cos 0 \right) = 4.865 \text{ Hz.}$$

$$f_b = \frac{24}{1.2 \cdot 2} \cdot 10.25 \left( 1 - \left( \frac{1.2}{24} \right)^2 \cdot \cos^2 0 \right) = 101.985 \text{ Hz.}$$

$$f_B = 2 \cdot 101.985 = 203.975 \text{ Hz.}$$

Apskaičiuoti parametrai yra artimi SM1281 vibracijų modulio skaičiuojamiems guolio parametrams pav. 3.1.5.



**Define bearing type via**

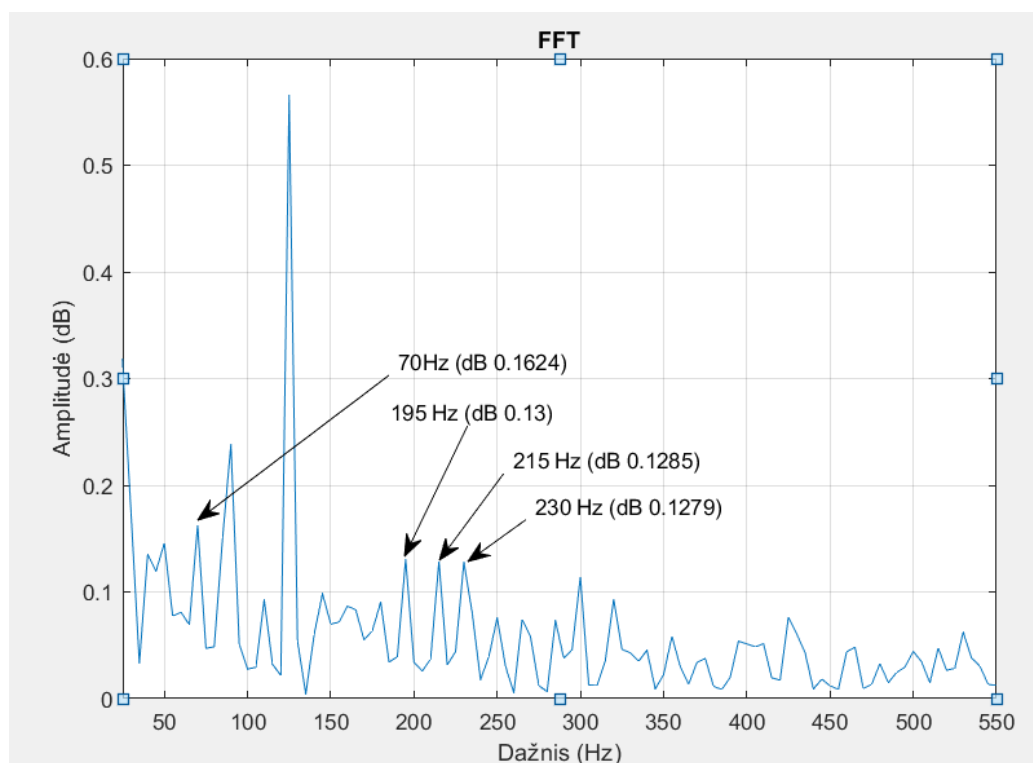
Contact angle $\alpha$	<input type="text" value="0.0"/>	°
Pitch circle diameter $D_{PW}$	<input type="text" value="24.00"/>	mm
Ball diameter $D_W$	<input type="text" value="1.20"/>	mm
Number of rolling elements Z	<input type="text" value="12"/>	

**Calculate fault frequencies for this bearing type**

Speed for fault frequencies	<input type="text" value="615"/>	rpm
Ball passing frequency outer race	<input type="text" value="58.4"/>	Hz
Ball passing frequency inner race	<input type="text" value="64.6"/>	Hz
Ball spin frequency	<input type="text" value="102.2"/>	Hz
Fundamental train frequency	<input type="text" value="4.9"/>	Hz

**3.1.5 Pav.** Skaičiuojamieji guolio parametrai SM1281 modulio aplinkoje.

Guolių vibracijų srovės dažnių spektre 3.1.6 pav. Matomi guolių defektus identifikuojantys dažniai. Esam pažeistam riedėjimo kūnui susidaro papildomos harmonikos dažniuose 195 Hz, 215 Hz ir 230 Hz, kurių dažnių reikšmės yra artimos riedėjimo kūno gedimą indikuojančių harmonikų apskaičiuotoju dažniui (203.975 Hz). Srovės dažnių spektre taipogi matoma ir harmonika 70 Hz, kuri gali nurodyti žiedo defektą, kadangi guolis yra labai mažų išmatavimų, jo išorinio ir vidinio žiedų defektiniai dažniai yra labai panašūs, todėl juos identifikuoti atskirai yra labai sunku. Šiuo atveju srovės dažnių spektre matoma 70 Hz (dB 0.1624) vertė yra artima apskaičiuotų harmonikų dažniams (58.425 Hz, 64.575 Hz).

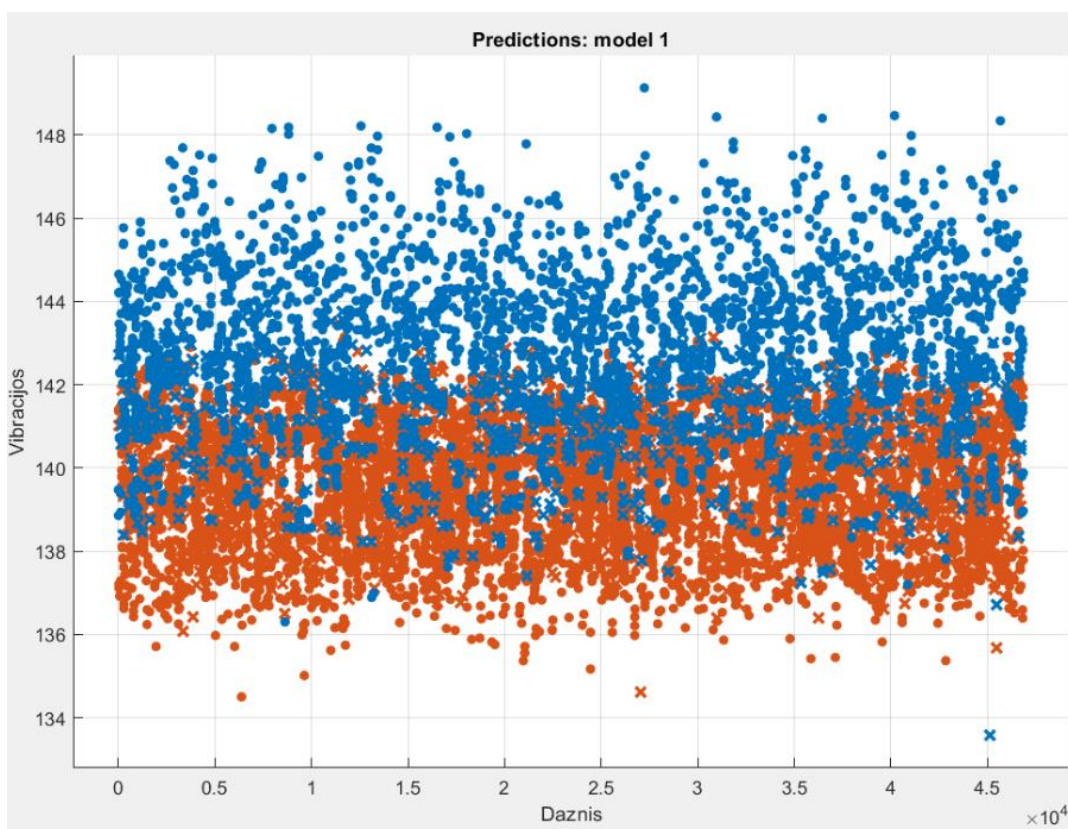


**3.1.6 Pav.** Variklio su užterštu guoliu srovės dažnių spektras.

Visus šiuos guolio gedimus nurodančios harmonikos srovės dažnių spektre yra santykinai mažos, kadangi guolio gedimai, turi pakankamai mažą įtaką magnetinio srauto oro tarpe kitimui, Kadangi šios vibracijos yra ganėtinai žemuose dažniuose, jos gali sutapti su kitų elektros įrenginių spinduliuojamu dažniu ar netgi tinklo dažniu. Guolio gedimą naudojanti statoriaus fazinės srovės dažnių spektru nustatyti galima, tačiau guolio gedimo pobūdį identifikuoti sudėtinga.

### 3.2 BNS variklio gedimų diagnostika analizuojant vibracijų spektrą su neuroniniais tinklais

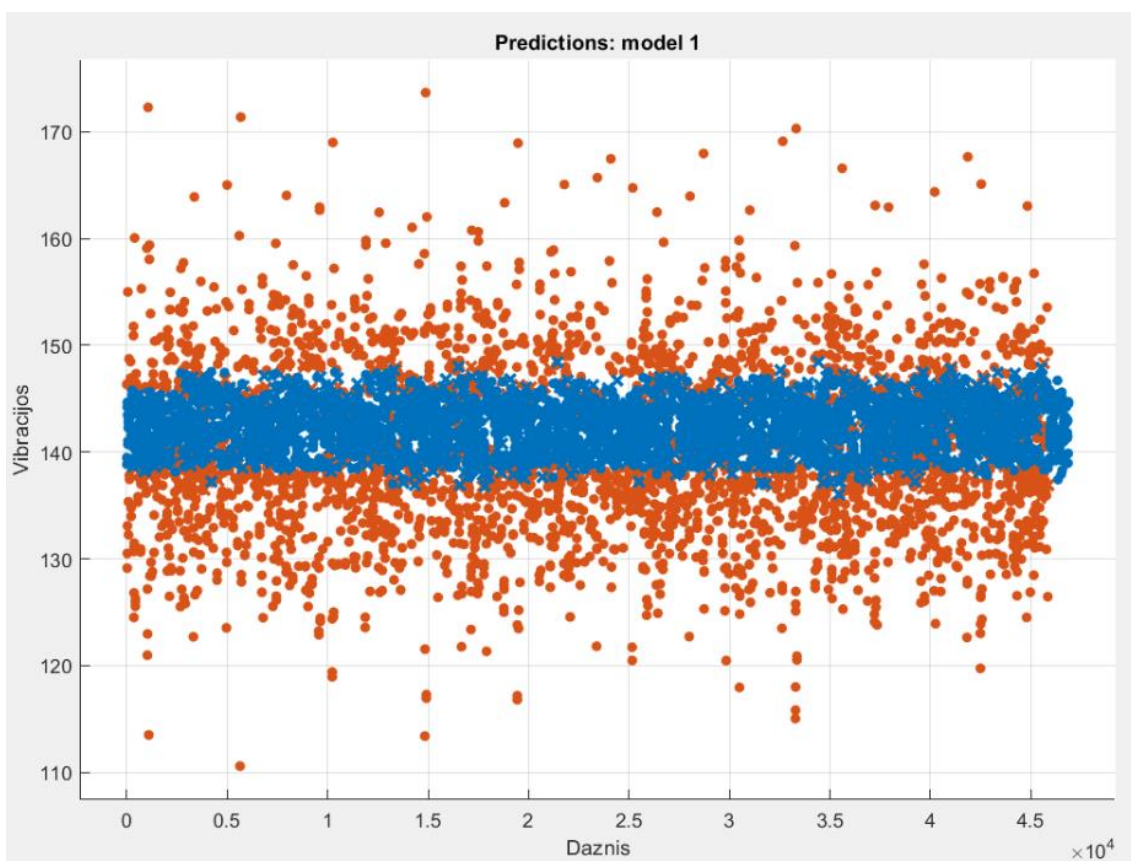
Tiriant vibracijas neuroniniu tinku buvo naudojami surinkti neapdirbti daliniai vibracijų duomenys, pirmu etapu naudojantis MATLAB klasifikatoriumi, siekiant išskirti skirtingas gedimų klases jas lyginant su sveiko variklio vibracijų vertėmis. Geriausi rezultatai buvo gauti naudojantis „Ensemble – Bagged Trees“ mokymosi klasifikatorių. Pirmu atveju buvo suklasifikuoti normaliai veikiančio variklio duomenys ir variklio turinčio oro tarpo ekscentricitetu žr. Pav. 3.2.1.



**3.2.1 Pav.** Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – variklio su oro tarpo ekscentricitetu.

Atlikus klasifikatoriaus mokymą oro tarpo ekscentricitetui aptikti, buvo gautas klasės 83.3% identifikavimo tikslumas. Paveiksle aiškiai matyti, kad esant oro tarpo ekscentricitetui vyrauja žemos amplitudės vibracijos. Viso buvo naudojamos 95282 normaliai veikiančio variklio amplitudinės vertės dažnio spektre ir 135002 variklio su oro tarpo ekscentricitetu. Atskirų mokymo modulių („Trees“) skaičius 30. Gauti didesnę klasifikavimo tikslumą šiuo atveju yra gana sudėtinga, nes esant oro tarpo ekscentricitetui, susidaro ir daug žemos amplitudės vibracijų, kurios gali sutapti su išorinėmis vibracijomis, arba su pačio variklio sukimosi metu kuriamomis vibracijomis.

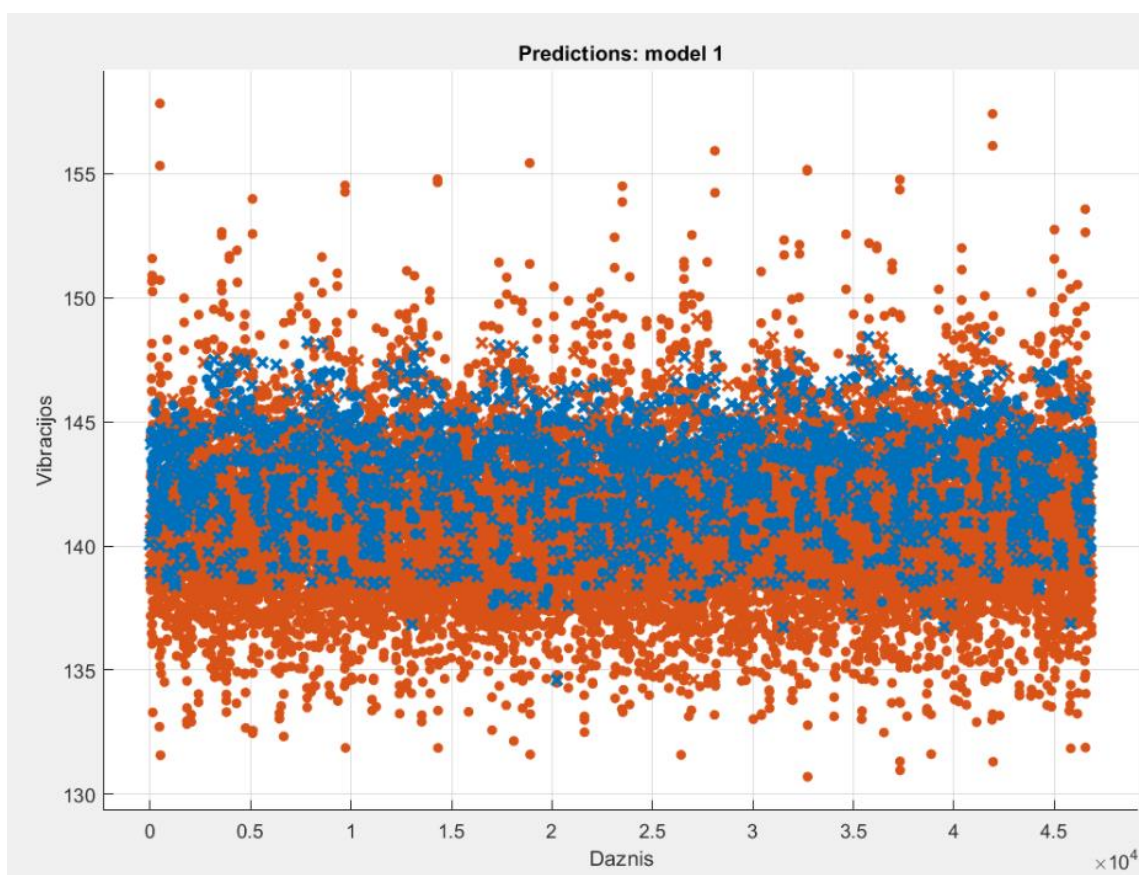
Sekančiu etapu buvo klasifikuojami sveiko variklio duomenys ir variklio su užterštu guolio separatoriumi žr. Pav. 3.2.2. Sveiko variklio duomenų masyvas buvo toks pat kaip ir pirmojo klasifikavimo metu, esant pažeistam guoliui, eksperimentu metu naudojamų amplitudinių verčių skaičius buvo lygus 79422.



**3.2.2 Pav.** Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – variklio su užterštu guolio separatoriumi.

Šiuo atveju gautas klasės identifikavimo tikslumas yra šiek tiek mažesnis ir yra lygus 82.0%, naudojamų mokymų modulių skaičius taipogi yra 30. Matomas didesnis amplitudžių išsibarstymas, kadangi užteršus guolio separatorių atitinkamai yra pažeidžiami ir riedėjimo kūnai bei guolio žiedai, kiekvienas toks pažeidimas sukelia skirtingos amplitudės ir skirtingo dažnio vibracijas.

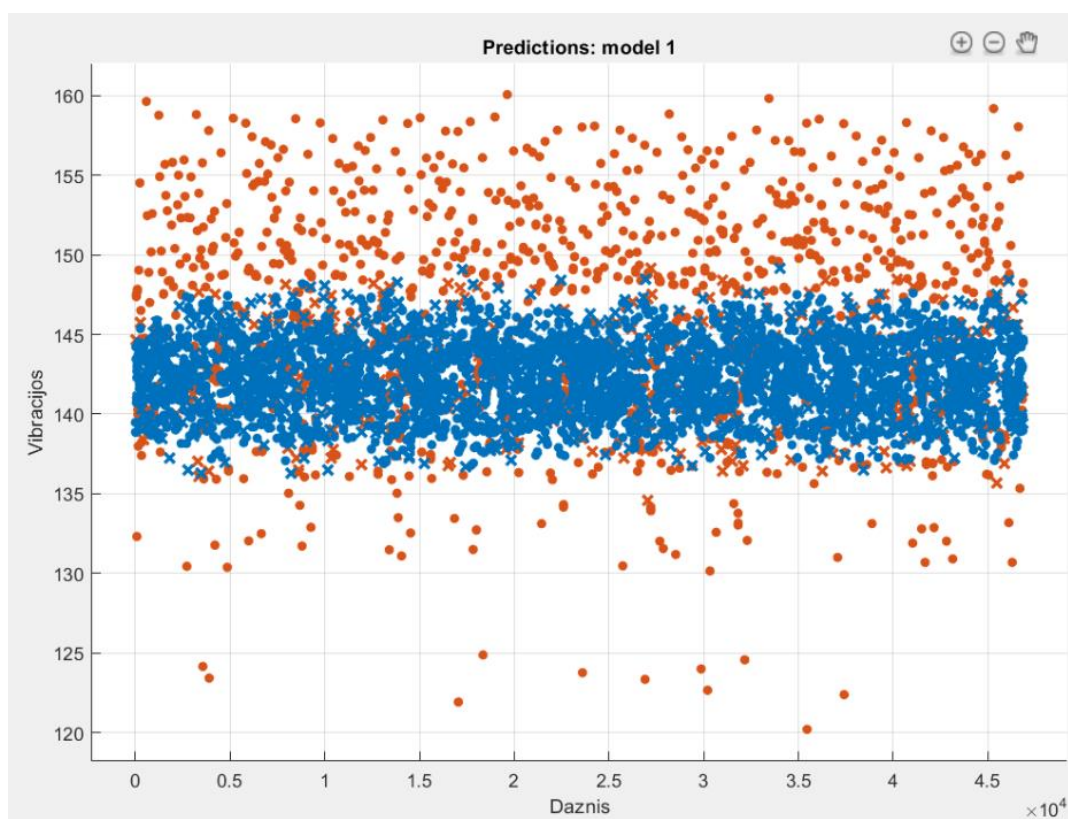
Trečiuoju atveju buvo klasifikuojami variklio pažeistais rotoriaus magnetais duomenys žr. Pav. 3.2.3. Naudotų masyve esančių duomenų kiekis – 345849.



**3.2.3 Pav.** Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – pažeistais rotoriaus magnetais.

Šiuo atveju gautas defekto klasifikavimo tikslumas yra tik 79.8%. Nes pažeidus rotoriaus nuolatinis magnetus, atsiranda, ne tik oro srauto kitimas oro tarpe, bet susidaro ir disbalansas bei guolio pažeidimai dėl neodimio dalelių patekimo į separatorių. Magnetinio srauto kitimas sudaro žemos amplitudės, bet aukšto dažnio vibracijas, guolio užteršimai dėl mažo guolio gabarito taipogi sukelia žemos amplitudės vibracijas, tačiau jos tai pat yra ir žemo dažnio. Atsiradęs disbalansas, kuria aukštos amplitudės žemo dažnio vibracijas.

Paskutinis klasifikavimas buvo atliekamas naudojantis duomenų masyvu gautu nutraukus statoriaus apviją variklio darbo metu žr. Pav. 3.2.4.



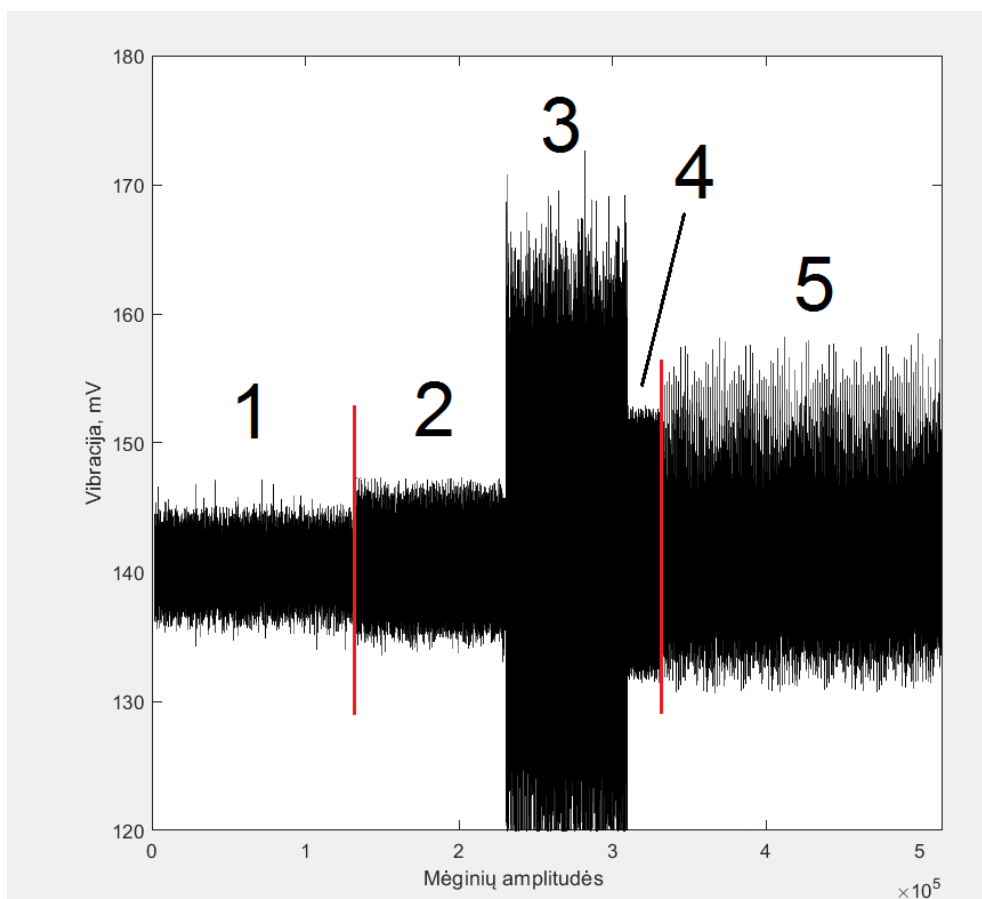
**3.2.4 Pav.** Neuroninio tinklo klasifikatorius, mėlyni – variklio be defektų vibracijų amplitudės, raudoni – nutraukta apvija.

Amplitudinių verčių skaičius duomenų masyve - 42805. Šiuo atveju gautas „Ensemble – Bagged Trees“ klasifikatoriaus algoritmo tikslumas yra 88.4 %. Grafike matoma, kad dėl magnetovaros pulsacijos fazių komutacijų metu esant atvirai grandinei, susidaro aukštos amplitudės vibracijos, kurios gana tolygiai apima visą dažnių spektrą. Dėl to klasifikavimo uždavinio tikslumas šiuo atveju yra gerokai aukštesnis.

Antroji eksperimento dalis buvo atliekama naudojantis signalų ir vaizdų atpažinimo neuroninį tinklą, visų skirtingų defektų duomenis analizuojant kartu. Pav. 3.2.5 pateiktas duomenų masyvą sudarančių vibracijų amplitudžių ir dažnių grafikas, kai visų gedimų pobūdžių dažniai yra tolygiai išdėstyti laike, čia:

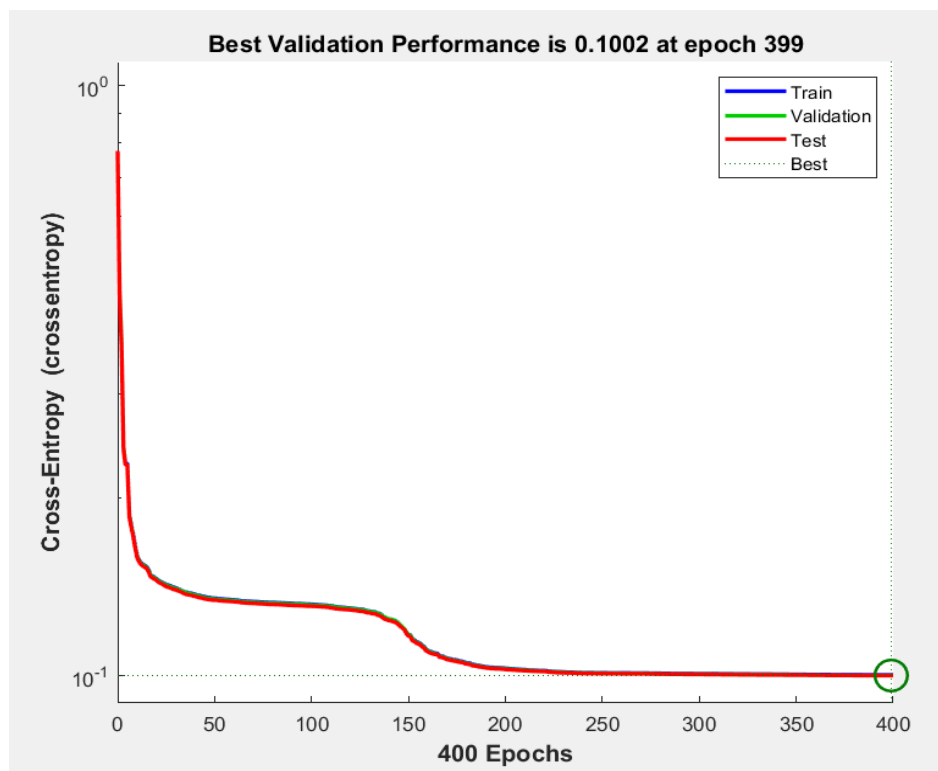
1. Tvaringas variklis.
2. Dinaminis oro tarpo ekscentricitetas.
3. Užterštas guolis po 24 valandų darbo ciklo.
4. Nutraukta statoriaus apvijia.
5. Pažeisti rotoriaus nuolatiniai magnetai.

Šio neuroninio tinklo mokymo metu buvo pasiekta 0.316 vidutinė kvadratinė paklaida. Tinklas yra laikomas gerai apmokintas, nes sugeba skaidyti beveik visų vibracijų defektų kategorijų duomenis. Pav. 3.2.6 pateikta neuroninio tinklo mokymosi proceso eiga.



**3.2.5 Pav.** Visų skirtingų eksperimento metu sukeltų defektų vibracijų spektras.

Pav. 3.2.6 pateikta neuroninio tinklo mokymosi proceso eiga su kryžminės entropijos algoritmu. Šis algoritmas yra automatiškai parenkamas neuroninio tinklo mokymosi metu pagal duomenų pobūdį. Mokymosi duomenų masyvų apimtis buvo tokia pati, kaip ir klasifikavimo metu, viso sudaranti 698 361 amplitudinių reikšmių.

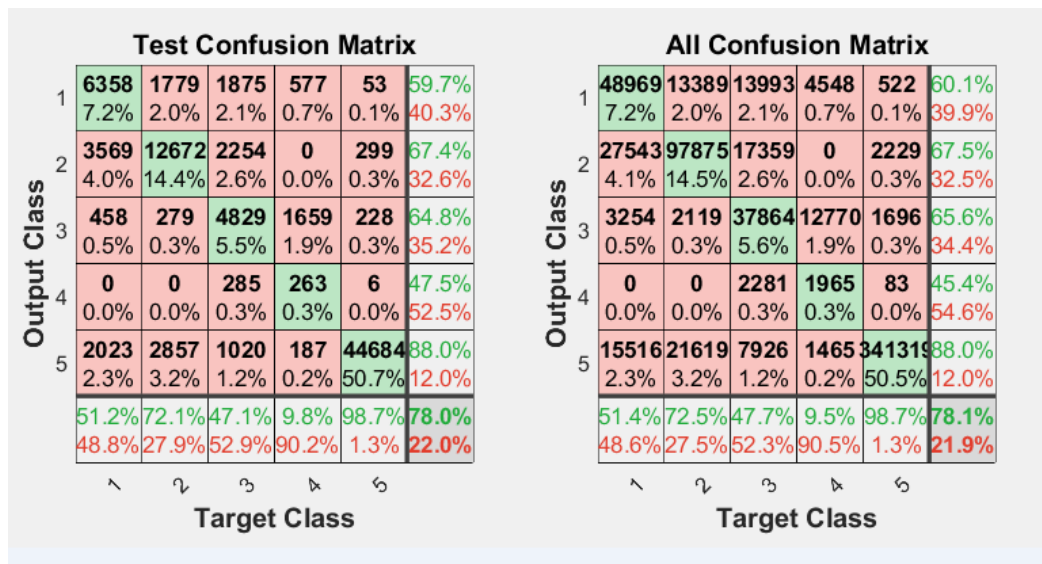


**3.2.6 Pav.** Neuroninio tinklo kryžminės entropijos mokymosi eiga.

Grafike matyti, kad mokymosi klaida, maždaug ~240 iteracijoje (epochoje) pasiekia mažiausią vertę, ir tolimesni skaičiavimai tampa nebereikalingi. Tačiau mokymo metu buvo naudojama daugiau iteracijų, viso 400, tam, kad būtų galima aiškiai matyti, kada neuroninio tinklo mokymasis yra užbaigtas. Tinklo mokymo metu buvo naudojamas 30 neuronų tinklas, būtent su tokiu neuronų kiekiu buvo pasiektas geriausias rezultatas, tai yra mažiausia vidutinė kvadratinė paklaida. Signalų ir vaizdų atpažinimo neuroninio tinklo rezultatai pateikiami pav. 3.2.7a ir 3.2.7b sumišimo matricioje.

Training Confusion Matrix						Validation Confusion Matrix									
Output Class	Target Class					Accuracy	Precision	Recall	F1	Support	Accuracy	Precision	Recall	F1	Support
	1	2	3	4	5										
1	34097 7.2%	9324 2.0%	9657 2.1%	3155 0.7%	380 0.1%	60.2%	39.8%	8514 7.2%	2286 1.9%	2461 2.1%	816 0.7%	89 0.1%	60.1%	39.9%	8514
2	19222 4.1%	68174 14.5%	12041 2.6%	0 0.0%	1553 0.3%	67.5%	32.5%	4752 4.0%	17029 14.5%	3064 2.6%	0 0.0%	377 0.3%	67.5%	32.5%	4752
3	2210 0.5%	1487 0.3%	26398 5.6%	8910 1.9%	1178 0.3%	65.7%	34.3%	586 0.5%	353 0.3%	6637 5.6%	2201 1.9%	290 0.2%	65.9%	34.1%	586
4	0 0.0%	0 0.0%	1596 0.3%	1367 0.3%	54 0.0%	45.3%	54.7%	0 0.0%	0 0.0%	400 0.3%	335 0.3%	23 0.0%	44.2%	55.8%	0
5	10870 2.3%	15090 3.2%	5502 1.2%	1023 0.2%	237184 50.4%	88.0%	12.0%	2623 2.2%	3672 3.1%	1404 1.2%	255 0.2%	59451 50.5%	88.2%	11.8%	2623
	51.4%	72.5%	47.8%	9.5%	98.7%	78.1%	48.6%	51.7%	73.0%	47.5%	9.3%	98.7%	78.2%	48.3%	
	48.6%	27.5%	52.2%	90.5%	1.3%	21.9%		48.3%	27.0%	52.5%	90.7%	1.3%	21.8%		

**3.2.7a Pav.** Neuroninio tinklo mokymosi rezultatų pateikimas sumišimo matricioje.



**3.2.7b Pav.** Neuroninio tinklo mokymosi rezultatų pateikimas sumišimo matricioje.

Matricioje matomi tiek tinklo mokymosi (*Training*) rezultatai, tiek savęs testavimo (*Test*) tik patvirtinimo (*Validation*), kurie galiausiai pateikiami bendroje matricioje (*All Confusion Matrix*). *Target Class* ašyje pateikiamos visos defektų kategorijų tikslų klasės, o ašyje *Output Class* pateikiami rezultatai gauti mokymo metu. Žalia spalva žymimos teisingai tikslą pasiekusios vertės, o raudona spalva indikuoja, kai vienos klasės duomenys klaidingai patenka į kitą klasę. Dešiniausiame apatiniame langelyje nurodoma galutinis neuroninio tinklo pasiektas tikslumas, kuri šio eksperimento metu pasiektas tikslumas yra 78.1 %, o klaidingai priskirtų verčių kiekis 21.9 %. Neuroniniam tinklui sunkiai sekėsi atskirti ketvirtą klasę nuo trečios, tik 9.5% nutrauktos apvijų vibracijų verčių tinklo buvo teisingai priskirta tinkamai klasei. Tai yra dėl to, kad guolio vibracijų kuriamų vibracijų amplitudžių dydžiai ir dažniai yra panašūs į tuos, kurie atsiranda pažeidus rotoriaus magnetus. Eksperimento metu galimai į variklio guolį su pažeistais nuolatiniams magnetais galėjo patekti neodimio drožlių. Didžiausias tikslumas buvo pasiektas su oro tarpo ekscentriciteto defektu (72.5%) ir su pažeistais rotoriaus magnetais (98.7 %). Vidutinis tikslumas buvo pasiektas identifikuojant gero variklio duomenis (51.4%), didelė duomenų dalis buvo klaidingai priskirta oro tarpo ekscentricitetui, kadangi kaip ir buvo minėta anksčiau, esant oro tarpo ekscentricitetui vyrauja ir daug žemo dažnio harmonikų atsiradusių dėl variklio konstrukcinių ypatumų. Mažiau nei vidutinis tikslumas buvo pasiektas identifikuojant guolio separatoriaus pažeidimus (47.7%), tai yra dėl to, kad dalinai guolio vibracijas įtakoja bet koks kitas variklio defektas.



## IŠVADOS

1. Tyrimo metu nustatyta, jog šalia esantys elektromagnetinį lauką ir mechanines vibracijas kuriantys įrengimai, sukuria 10% matavimo paklaidą, tiriant vibracijų ir fazinės srovės spektro matavimo duomenis. Kad gautos matavimų vertės būtų artimos realiomis sąlygomis dirbančių elektros variklių vertėms, buvo nuspręsta, jog atliekant eksperimentus su nutraukta statoriaus apvija, užterštu separatoriumi, pažeistais rotorius magnetais ir esant oro tarpo ekscentricitetui, bus sistemingai paleidžiami papildomi varikliai, sujungti kartu su tiriamuoju varikliu tuo pačiu nerūdijančio plieno profiliu. Atlikus srovės spektro dažnių harmonikų analizę, nustatyta, jog dėl minėtų veiksnių susidaro žemos amplitudės trikdžiai, kurių dažnių spektras prasideda dažniuose 50-150 Hz, dalis jų persidengia su aukštesnės amplitudės harmonikomis, todėl ne visada gali būti pastebimi.

2. Pagal IEEE PCIC-94-1 (1.3.1 pav.) statistinius duomenis, nuspręsta variklio defektus suklasifikuoti į keturias kategorijas : statoriaus gedimai (16%), rotorius gedimai (5%), guolių gedimai (51%), nuolatinių magnetų gedimai (10%), čia PCIC-94-1 tyrime neodimio gedimai kategorizuojami kaip „*Nežinomi*“ defektai. Eksperimento metu gauti matavimo duomenys MatLab aplinkoje sėkmingai transponuoti į duomenų masyvus sukategorizuotus pagal defektų pobūdį. Atlikus tyrimą buvo nuspręsta, kad duomenys surinkti buvo tinkamai.

3. Išanalizavus surinktus duomenis srovės dažnių spektro analizės metodu kiekvienam gedimo pobūdžiui, nustatyta, kad šis metodas gali būti efektyviai naudojamas oro tarpo ekscentricitetui bei disbalansui aptikti. Teoriškai apskaičiuotas dinaminis oro tarpo ekscentricitetas (81.92 Hz) atitinka realiai gautus duomenis srovės spektre (85 Hz), kurių amplitudės kartojasi 195 Hz, 230 Hz, 285 Hz dažniuose. Disbalanso kuriama srovės amplitudė dažnių spektre taipogi atitinka su apskaičiuotu variklio fazių sekos komutacijos dažniu (10.25 Hz). Tyrimo rezultatai sukėlus rotorius magnetų pažeidimus rodo, kad naudojantis srovės spektro analizės metodu, gedimą identifikuoti labai sunku, kadangi nesusidaro jokių gedimą identifikuoti galinčių didelės amplitudės harmonikų, susidaro tik mažos amplitudės harmonikos (140 - 160 Hz ( $\text{dB} \leq 0.2$ ), 240 - 260 Hz ( $\text{dB} \leq 0.1$  ir t.t.) kurios gali dubliuotis ir su kito pobūdžio gedimų keliamomis harmonikomis ar trikdžiais tinkle. Gauti fazinės srovės spektro analizės tyrimo rezultatai nutraukus variklio apviją jo darbo metu rodo, staigų aukštos amplitudės žemo dažnio harmonikų atsiradimą (90 Hz, 125 Hz ir 160 Hz), kurių pirmoji sutampa sutampa su sumažėjusiu srovės dažniu. Išanalizavus srovės spektro duomenis esant užterštam guolio separatoriui galima teikti, jog guolio gedimo pobūdžio gedimą identifikuoti šiuo metodu yra gana sudėtinga dėl mažo guolio gabarito, nepaisant to, pagal apskaičiuotas vertes ir srovės spektro duomenis gedimą nustatyti galima neklasifikuojant jo pobūdžio.

4. Naudojantis neuroninio tinklo klasifikatoriumi, gedimų klasės gana tiksliai klasifikuojamos pagal gedimo pobūdį tinkamai veikiančio variklio atžvilgiu. Tyrimo rezultatai rodo, kad mažiausias klasifikavimo tikslumas gautas nepažeisto variklio vibracijų duomenis lyginant su pažeistais rotorius magnetais (79.8 %), galimai dėl variklio komponentų užteršimo neodimio drožlėmis. Tuo tarpu didžiausias tikslumas gautas su nutrauktos apvijos duomenimis (88.4 %). Užteršus guolio separatorių kietosiomis dalelėmis gautas 82 % klasifikavimo tikslumas, o esant oro tarpo ekscentricitetui – 83.3 %. Bendras visų gedimų klasifikavimo tikslumas yra 83.375 %, tai gana aukštas rodiklis, rodantis, kad neuroninio tinklo klasifikatorius gali gana tiksliai nurodyti gedimo pobūdį.

Sekančiu etapu sudarytas ir apmokintas signalų ir vaizdų atpažinimo neuroninis tinklas geba 78.1 % tikslumu identifikuoti gedimo pobūdį apdorojant visų skirtingų gedimų duomenis kartu, ju neskaidant grupėmis. Tyrimo metu naudotas modeliui panaudotas 30 neuronų tinklas, neuroninio tinklo vidutinė kvadratinė paklaida 0.1, kryžminės entropijos klaida 0.158, iteracijų skaičius 400, duomenų masyvas su 698 361 amplitudėmis. Sudarytam neuroniniam tinklui sunkiausiai sekėsi atskirti nutrauktos apvijos duomenis, tikslumas tik 9.5 %. Geriausi rezultatai pasiekti analizuojant pažeisto magneto duomenis (98.7 %). Sudarytas modelis lengvai gali būti naudojamas ir kitų gedimų identifikavimui, turint tų gedimų duomenų masyvus.

## REKOMENDACIJOS

Tyrimo rezultatų gerinimui rekomenduotina naudoti didesnio įrašymo taškų diapazoną turintį osciloskopą, arba papildomą srovės spektro analizatorių galintį išsaugoti žymiai didesnius duomenų kiekius. Didesnius duomenų kiekius būtų tiesiogiai galima analizuoti su neuroniniu tinklu nenaudojant grafinio analizavimo su Furjė transformacija. Defektų identifikavimo tikslumą taipogi galima padidinti ir atliekant apvijų temperatūros matavimus esant skirtingo pobūdžio gedimams.

Remiantis statistiniais duomenimis, guolių gedimai pasitaiko dažniausiai ir sudaro 51% visų variklio gedimų. Pagal tyrimo rezultatus, galima teikti, kad tiek fazinės srovės vibracijų dažnio spektro analizės metodu tiek vibracijų analizės metodu su neuroniniu tinklu galima gana tiksliai nustatyti, ar guolis yra su defektu. Todėl galima daryti išvadą, jog norint stebėti konvejerių sistemos bekontaktus nuolatinės srovės variklius užtenka ant kiekvieno variklio sumontuoti po vieną srovės matavimo ritę. Toks sprendimas finansiškai yra palankesnis, kadangi 2.5 A srovės ritės kaina yra apie ~3-4 mažesnė lyginant su vibracijų daviklio kaina, be to sistemos realizavimo darbai yra gerokai paprastesni. Papildomai statistiškai statoriaus gedimai sudaro 16 % visų gedimų, įtraukant ir dalį išorinių gedimų, galima daryti išvadą, kad naudojantis srovės spektro analizės metodu galima gana tiksliai nustatyti ~70 % visų bekontaktų nuolatinės srovės variklių gedimų.

Didelėse sistemose, kur tokių variklių skaičius siekia dešimtis tūkstančių vienetų, diegiant diagnostikos ir monitoringo sistemas, kaina tampa vienu svarbiausių faktorių. Nepaisant to tyrimo metu, aiškiai buvo pastebėti ir vibracijų analizės su neuroniniu tinklu pranašumas analizuojant pažeisto rotorius duomenis, neuroniniu tinklu daug tiksliau pavyko identifikuoti rotorius gedimus. Kadangi konvejerių sistemoje, vyksta dažnas rotorius kontaktas su jo paviršiumi judančiais kūnais, išauga ir tikimybė, kad jis bus pažeistas. Tyrimo rezultatai atskleidžia, kad nei vienas iš naudotų tyrimo metodų negali tiksliai identifikuoti visų variklio gedimų, todėl itin didelės svarbos mazguose būtų rekomenduotina naudoti tiek srovės spektrą tiek vibracijas apimančias neuroninių tinklų diagnostikos ir stebėsenos sistemas.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Shrinathan Esakimuthu Pandarakone, Yukio Mizuno, Hisahide Nakamura. *Distinct Fault Analysis of Induction Motor Bearing Using Frequency Spectrum Determination and Support Vector Machin*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 53, NO. 3. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7782788/>
2. Siliang Lu and Xiaoxian Wang. *A New Methodology to Estimate the Rotating Phase of a BLDC Motor With Its Application in Variable-Speed Bearing Fault Diagnosis*, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 33, NO. 4, APRIL 2018. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7926453/>
3. Abd Kadir Mahamad, Takashi Hiyama. *Fault Classification Performance of Induction Motor Bearing Using AI Methods*, 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5514772/>
4. Abd Kadir Mahamad and Takashi Hiyama. *Development of Artificial Neural Network Based Fault Diagnosis of Induction Motor Bearing*, 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4762695/>
5. Arif Musthofa, Dimas Anton Asfani, I Made Yulistya Negara, Daniar Fahmi, Nirma Priatama. *Vibration Analysis for the Classification of Damage Motor PT Petrokimi Gresik Using Fast Fourier Transform and Neural Network*, 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7828690/>
6. Michael Steinegger, Martin Melik-Merkumians, Johannes Zajc, and Georg Schitter. *A Framework for Automatic Knowledge-Based Fault Detection in Industrial Conveyor Systems*, Automation and Control Institute, Vienna University of Technology. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8247705/>
7. Satish Rajagopalan, José M. Aller, José A. Restrepo. *Detection of Rotor Faults in Brushless DC Motors Operating Under Nonstationary Conditions*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 42, NO. 6, NOVEMBER 2006. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4012305/>
8. Mariana Iorgulescu, Robert Beloiu. *Study of DC Motor Diagnosis Based on the Vibration Spectrum and Current Analysis*, Electrical Engineering Department, University of Pitesti. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6403430/>

9. Subir Bhattacharyya<sup>1</sup>, Deepro Sen, Shreya Adhvaryu, Chiranjib Mukherjee. *Induction Motor Fault Diagnosis by Motor Current Signature Analysis and Neural Network Techniques*, Journal of Advanced Computing and Communication Technologies (ISSN: 2347 - 2804) Volume No. 3 Issue No.1, February 2015. Šaltinis: <https://www.slideshare.net/JACOTECH/induction-motor-fault-diagnosis-by-motor-current-signature-analysis-and-neural-network-techniques>
10. M.Sc. Dariusz L. Sobczuk. *Application of ANN for Control of PWM Inverter Fed Induction Motor Drives*, Warsaw University of Technology Institute of Control and Industrial Electronics. Šaltinis: <https://www.isep.pw.edu.pl/icg/english/people/dsobczuk.html>
11. Rudra Narayan Dash, Sangeeta Sahu. *Condition Monitoring of Induction Motors*, Department of Electrical Engineering NIT Rourkela Odisha. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7955800/>
12. C. J. VERUCCHI, G. G. ACOSTA and F. A. BENGER. *A REVIEW ON FAULT DIAGNOSIS OF INDUCTION MACHINES*, Latin American Applied Research 38:113-121 (2008). Šaltinis: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0327-07932008000200003](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932008000200003)
13. Antanas Verikas, Adas Gelžinis „*Neuroniniai tinklai ir skaičiavimai*“, KTU, 2008
14. MatLab Dokumentacija. *Daugiasluoksnių neuroninių tinklų mokymo funkcijos*. Šaltinis: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ug/choose-a-multilayer-neural-network-training-function.html>
15. Tai-hoon Kim. *Pattern Recognition Using Artificial Neural Network*, Multimedia Engineering Department Hannam University Daejeon. Šaltinis: [https://www.researchgate.net/publication/220850031\\_Pattern\\_Recognition\\_Using\\_Artificial\\_Neural\\_Network\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/220850031_Pattern_Recognition_Using_Artificial_Neural_Network_A_Review)
16. Daeyeon Kim, Myounggyu D. Noh, and Young-Woo Park, Daeyeon Kim, Myounggyu D. Noh, and Young-Woo Park. *Unbalanced Magnetic Forces Due to Rotor Eccentricity in a Toroidally Wound BLDC Motor*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 52, NO. 7, JULY 2016. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7398051>
17. Jun-Kyu Park and Jin Hur. *Detection of Inter-Turn and Dynamic Eccentricity Faults Using Stator Current Frequency Pattern in IPM-Type BLDC Motors*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 63, NO. 3, MARCH 2016. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7322254/>

18. G Sreedhar Babu, Lingamurthy A.S. Sekhar. *Condition monitoring of brushless DC motor-based electromechanical linear actuators using motor current signature analysis*. Šaltinis: [https://www.researchgate.net/publication/233484228\\_Condition\\_monitoring\\_of\\_brushless\\_DC\\_motorbased\\_electromechanical\\_linear\\_actuators\\_using\\_motor\\_current\\_signature\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/233484228_Condition_monitoring_of_brushless_DC_motorbased_electromechanical_linear_actuators_using_motor_current_signature_analysis)
19. Vittaya Tipsuwanporn, Mongkol Leawsoong, Arjin Numsomran, and Chanwit Wongratanapornkul. *Fault Detection In compressor Using FFT Algorithm*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013 Vol I. Šaltinis: [http://www.iaeng.org/publication/WCECS2013/WCECS2013\\_pp259-264.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCECS2013/WCECS2013_pp259-264.pdf)
20. L. FROSINI, M. MAGNAGHI, A. ALBINI. *An Improved Diagnostic System to Detect Interturns Short Circuits in Low Voltage Stator Windings*, Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, IEEE Workshop. Šaltinis: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7194533/>
21. Nicholas Nechval, Konstantin Nechval, and Irina Bausova. *New Procedures of Pattern Classification for Vibration-Based Diagnostics via Neural Network*, University of Latvia, EVF Research Institute, Statistics Department, 2014. Šaltinis: <https://books.google.lt/books?isbn=3319082019>
22. P. Wygonik. *An analysis of influence of open-winding faults on properties of brushless DC motor with permanent magnets*, The Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautic Rzeszow University of Technology. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8090776/>
23. Ferhat ÇIRA, Müslüm ARKAN and Bilal GÜMÜ. *A New Approach to Detect Stator Fault in Permanent Magnet Synchronous Motors*. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7303708/>
24. W. F. Godoy, I. N. da Silva, A. Goedel, R. H. C. Palácios, W. S. Gongora. *Neural Approach for Bearing Fault Classification in Induction Motors by Using Motor Current and Voltage*, 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6889664/>
25. Sukhjeet Singh, Amit Kumar, Navin Kumar. *DETECTION OF BEARING FAULTS IN MECHANICAL SYSTEMS USING MOTOR CURRENT SIGNATURE AND ACOUSTIC SIGNATURES*, School of Mechanical, Materials and Energy Engineering, Indian Institute of Technology. Šaltinis: [https://www.iiav.org/icsv21/content/papers/papers/full\\_paper\\_813\\_20140426181140288.pdf](https://www.iiav.org/icsv21/content/papers/papers/full_paper_813_20140426181140288.pdf)
26. D. MILKOVIĆ. *Brief Review of Motor Current Signature Analysis*, CrSNDT Journal, Vol.5 No.1, 2015. Šaltinis: <http://hrcak.srce.hr/148715>

27. Adnan Mohammad , Md. Anwarul Abedin , and Md. Ziaur Rahman Khan.  
*Implementation of a Three Phase Inverter for BLDC Motor Drive*, 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering 20-22 December, 2016, Dhaka, Bangladesh. Šaltinis: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7853925/>

# PRIEDAI

## Priedas Nr.1 (FB1000):

Interface		Name
IN	Controller_state	IN
	Acceleration_value	OUT
	Speed_value	IN_OUT
	State_Run	STAT
	State_Stop	TEMP
OUT	Run_Actived	
	Acceleration	
	Speed	
	Fault	
	Mode_On	
IN_OUT	IN_OUT	
STAT	Run_Command	
TEMP	TEMP	

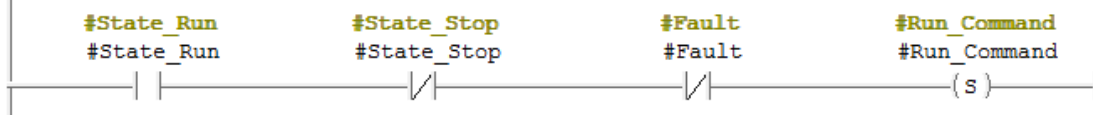
FB1000 : Title:

Comment:

Network 1: Fault from Controller

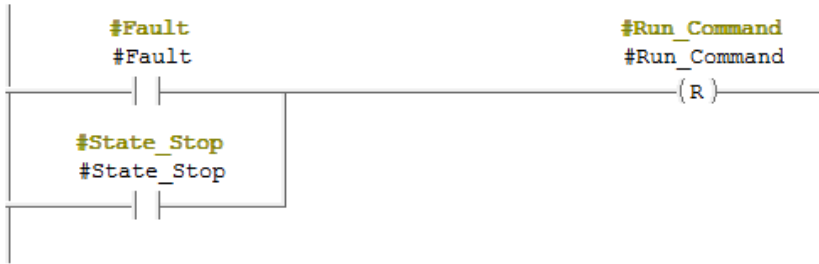


Network 2: State Run Active





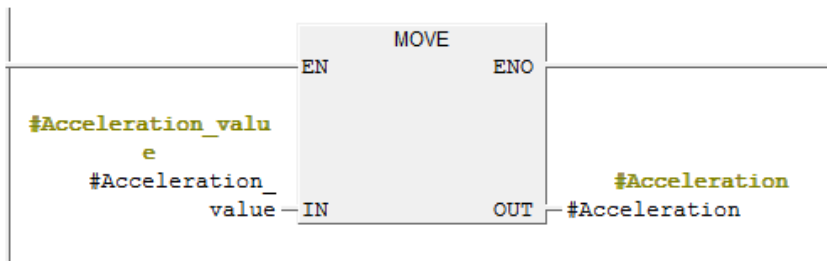
▣ Network 3 : State Run reset



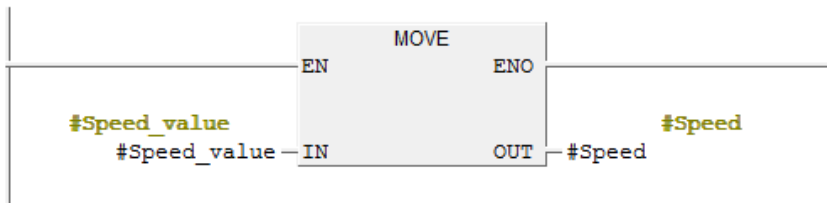
▣ Network 4 : Title:



▣ Network 5 : Set Acc



▣ Network 6 : Set Speed



▣ Network 7 : Mode\_ON



**Priedas Nr.2 (DB1001):**

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	Accel	BYTE	B#16#0	Rampa
+2.0	Speed	INT	160	Greitis
=4.0		END_STRUCT		

DB1000:

	Address	Declaratio	Name	Type	Initial valu	Actual value
1	0.0	in	Controller_state	BOOL	FALSE	FALSE
2	1.0	in	Acceleration_value	BYTE	B#16#0	B#16#0
3	2.0	in	Speed_value	INT	0	0
4	4.0	in	State_Run	BOOL	FALSE	FALSE
5	4.1	in	State_Stop	BOOL	FALSE	FALSE
6	6.0	out	Run_Actived	BOOL	FALSE	FALSE
7	7.0	out	Acceleration	BYTE	B#16#0	B#16#0
8	8.0	out	Speed	INT	0	0
9	10.0	out	Fault	BOOL	FALSE	FALSE
10	10.1	out	Mode_On	BOOL	FALSE	FALSE
11	12.0	stat	Run_Command	BOOL	FALSE	FALSE

### Priedas Nr.3

```
load Pattern_duomenys_visi.txt % Amplitudžių duomenų masyvo failo užkrovimas
load klases.txt % Klasių duomenų masyvo failo užkrovimas

figure(1); % Grafiko iškvietimo komanda
plot(Pattern_duomenys_visi(:,2), 'black'); % Vibracijų grafiko braižymas
hold on; % Brėžinio laikymas ON
xlim([0 676000]); % X Ašies ribos
ylim([120 180]); % Y Ašies ribos
xlabel('Mėginių amplitudės'); % X Ašies pavadinimas
ylabel('Vibracija'); % Y Ašies pavadinimas

ind = klases'; % Transponuojamos klasės į masyvą
vec = ind2vec(ind); % Vertės keičiamos į vektorius
target_var = full(vec); % Formuojama matrica

net=patternnet(30); % Neuronų skaičius tinkle
net.trainParam.max_fail=200; % Patvirtinimų skaičius
net.trainParam.epochs=400; % Iteracijų skaičius
net.divideParam.trainRatio = 0.9; % Naudojama duomenų dalis
net.divideParam.valRatio = 0.20; % Reikalinga duomenų dalis patvirtinimui
net.divideParam.testRatio = 0.10; % Reikalinga duomenų dalis testavimui

x=Pattern_duomenys_visi(); % Duomenų priskyrimas kintamajam X
t=target_var;
[net,tr]=train(net,x',t); % Mokymo funkcija
Dtr = sim(net,x');
perf = mse(net,t,Dtr); % Vidutinės kvadratinės paklaidos apskaičiavimas
```