



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Mindaugas Alekna**

**ELEKTRINĖS TRAUKOS RIEDMENŲ PANTOGRAFO  
DIAGNOSTIKOS SISTEMOS ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Vytautas Gargasas

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS  
AUTOMATIKOS KATEDRA**

**ELEKTRINĖS TRAUKOS RIEDMENŲ PANTOGRAFO  
DIAGNOSTIKOS SISTEMOS ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas  
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

**Vadovas**

Doc. dr. Vytautas Gargasas

**Recenzentas**

Doc. dr. Romas Rutkauskas

**Projektą atliko**

Mindaugas Alekna

**KAUNAS, 2017**



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

**Mindaugas Alekna**

(Studento vardas, pavardė)

**Valdymo technologijos 621H66001**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Elektrinės traukos riedmenų pantografo diagnostikos sistemos analizė“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 24 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Mindaugo Alekno**, baigiamasis projektas tema „Elektrinės traukos riedmenų pantografo diagnostikos sistemos analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

Alekna, Mindaugas. Elektrinės traukos riedmenų pantografo diagnostikos sistemos analizė. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vytautas Gargasas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *pantografas, diagnostika, signalų analizė, elektrinė trauka, klasifikavimas.*

Kaunas, 2017. 67 p.

## SANTRAUKA

**Darbo aktualumas:** Ruožą pritaikius elektrinei traukai ir jį tankiai eksploatuojant – susiduriama su infrastruktūros priežiūros problemomis. Ypač aktualu tinkamai ir periodiškai prižiūrėti svarbiausias elektrinės traukos įrangos vietas, kurios visai elektrinės traukos sistemai yra gyvybiškai svarbios, tai yra tos, kurios yra svarbios visos sistemos nepertraukiamam veikimui. Viena iš tokių vietų yra pantografo būklės priežiūra. Ji yra aktuali ir labai svarbi, nes per pantografą traukinio varikliai gauna maitinimą. Kadangi elektros tiekimas traukinio varikliams vyksta ir esant dideliems traukinių greičiams dėl mechaninio poveikio neišvengiama pantografo pažeidimų. Tai atsitinka traukiniui judant dideliu greičiu, taip pat nuo trinties ir kitų priežasčių: meteorologinių reiškinių, geležinkelio kelio reljefo pokyčių, geležinkelio kelio pokrypio kampų ir kt. Pantografo būklei nustatyti reikalinga reguliari apžiūra.

**Darbo tikslas:** remiantis teorinės ir praktinės medžiagos analize ir pantografo diagnostikos galimybių tyrimų rezultatais, apdoroti pantografo sukeliamų virpesių signalą priimtą iš bandymo stendo ir jį identifikuoti, priskiriant skirtingoms pantografo būklės klasėms.

**Tyrimų objektas:** automatizuota elektrinės traukos pantografų defektų nustatymo sistema.

**Darbo uždaviniai:**

1. sukurti signalų įvertinimo ir klasifikavimo būdą, tinkamą automatizuotai pantografų defektų nustatymo sistemai;
2. parinkti signalo transformacijos algoritmą, leidžiantį tinkamai įvertinti pantografų sukeliamų virpesių signalų požymius;
3. ištirti pasiūlyto klasifikavimo būdo tikslumą identifikuojant defektą ir atskiriant defektų neturinčio pantografų signalus nuo pažeistų pantografų signalų.

**Darbo turinys ir struktūra:**

Magistro baigiamasis darbas sudarytas iš 3 dalių: literatūros šaltinių analizės, pantografo diagnostikos galimybių tyrimų ir pantografo defektų indentifikavimo tyrimų. Darbo apimtis 67 puslapiai, yra 35 paveikslai ir 17 lentelių.

Pirmoje darbo dalyje išnagrinėta literatūra, aprašanti elektrinės traukos principus, išanalizuoti pantografo būklės nustatymo tyrimai, pristatyti signalų matematinės analizės priemonės. Antroje darbo dalyje pateikta pantografo diagnostikos sistemų struktūrų idėja, parenkama matematinė signalų transformacija, tinkama diagnostikos sistemų požymiams įvertinti. Trečioje darbo dalyje aprašomas eksperimentas, kurio metu skirtingų defektų klasių signalai priskiriami iš anksto apmokytais požymių aibėms. Suformuluotos išvados patvirtinančios automatizuotų pantografų diagnostikos sistemų galimybes.

Alekna, Mindaugas. Analysis of the Diagnostic System for the Pantograph of Electric Traction Rolling-Stock: Master's Thesis in Control Systems/ supervisor Assoc. Prof. Dr Vytautas Gargasas. The Department of Automation, the Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

**Key words:** *pantograph, diagnostics, signal analysis, electric traction, classification.*

Kaunas, 2017. 67 p.

## SUMMARY

**Relevance of the research:** Having adapted a railway section to electric traction and frequently exploiting it, the problems of maintenance of the infrastructure are faced. It is highly relevant to properly and periodically maintain the most important sites of electric traction equipment, which are of vital importance to the entire system of electric traction; these are the places which are significant in ceaseless operation of the entire system. Maintenance of the condition of the pantograph is one of such sites. It is relevant and highly important because the pantograph facilitates the supply to train engines. Since electricity supply to train engines proceeds also at a high speed of the train, the mechanical impact may inevitably damage the pantograph. This happens when the train moves at a high speed; also it is impacted by friction and other causes: meteorological phenomena, alteration of railway relief, angles of railway tilt etc. Regular examination is required to identify the condition of the pantograph.

**The aim of the research:** grounding on analysis of theoretical and practical materials and the results of investigation of possibilities for diagnostics of the pantograph, to process the signal caused by oscillations of the pantograph, which is received from a testing stand, and to identify it by attributing to different classes of the condition of the pantograph.

**The object of the research:** an automated system of identification of defects in electric traction pantographs.

### **Objectives of the research:**

1. to create a method of signal identification and classification, which is suitable for the automated system of detection of defects in pantographs;
2. to select an algorithm of signal transformation, which allows proper identification of characteristics of the signals of oscillations caused by pantographs;
3. to investigate precision of a suggested method of classification in identifying a defect and separating signals of defectless pantographs from signals of damaged pantographs.

### **Content and structure of the thesis:**

The Master's Thesis consists of 3 parts: analysis of literature sources, investigation of both possibilities for diagnostics of the pantograph and identification of defects in the pantograph. The volume of the Thesis is 67 pages, including 35 figures and 17 tables.

The first part of the Thesis deals with analysis of literature describing the principles of electric traction, research on identification of the condition of the pantograph, presents the means of mathematical analysis of signals. The second part of the paper introduces the idea of structures of the diagnostic systems for the pantograph, selects the transformation of mathematical signals, which is suitable for identification of the characteristics of diagnostic systems. The third part describes an experiment during which signals of different classes of defects are attributed to the sets of characteristics instructed in advance. The conclusions proving the possibilities for automated diagnostic systems for pantographs are formulated.

## TURINYS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>TURINYS .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>ĮVADAS .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>1. ELEKTRINĖ TRAUKA IR JOS VEIKIMO PRINCIPAI.....</b>             | <b>11</b> |
| 1.1. Traukos elektrifikavimo įranga .....                            | 11        |
| 1.2. Elektrinės traukos rūšys.....                                   | 12        |
| 1.3. Kontaktinis tinklas.....  | 13        |
| 1.4. Kontaktiniam tinklui keliami reikalavimai.....                  | 14        |
| 1.5. Atliktų pantografo diagnostikos sistemų tyrimų analizė.....     | 15        |
| 1.6. Signalų spektrinė analizė.....                                  | 20        |
| 1.7. Diskriminantinė analizė.....                                    | 26        |
| 1.8. Literatūros analizės apibendrinimas .....                       | 27        |
| <b>2. PANTOGRAFO DIAGNOSTIKOS GALIMYBIŲ TYRIMAS.....</b>             | <b>28</b> |
| 2.1. Planuojamo tyrimo eiga.....                                     | 28        |
| 2.2. Kontaktinio tinklo laidas .....                                 | 29        |
| 2.3. Defektų požymius atskleidžiančio signalo parinkimas .....       | 30        |
| 2.4. Pantografo defektų imitavimo bandymo stendas .....              | 34        |
| 2.5. Pjezoelektrinio jutiklio tvirtinimo vieta bandymo stende .....  | 35        |
| 2.6. Imituojamas pantografo defektas .....                           | 36        |
| 2.7. Signalo priėmimo aparatūra .....                                | 37        |
| 2.8. Gauto signalo apdorojimas, identifikacinių požymių radimas..... | 41        |
| 2.9. Pantografo diagnostikos galimybių tyrimo apibendrinimas.....    | 46        |
| <b>3. PANTOGRAFO DEFEKTŲ IDENTIFIKAVIMO TYRIMAS .....</b>            | <b>47</b> |
| 3.1. Informatyviųjų klasifikavimo požymių radimas .....              | 49        |
| 3.2. Klasifikavimo pavyzdys .....                                    | 55        |
| 3.3. Metodo atkartojamumo tyrimas .....                              | 59        |
| 3.4. Metodo atkartojamumo tyrimo išvados.....                        | 65        |
| <b>IŠVADOS.....</b>  | <b>66</b> |
| <b>LITERATŪRA.....</b>   | <b>67</b> |

## ĮVADAS

### Darbo aktualumas

Geležinkelių elektrifikavimas yra svarbiausia techninės pažangos kryptis modernizuojant geležinkelių ūkį [1]. Pakeitus šiluminę trauką elektrine, gerėja aplinkos ekologija, didėja traukinių greitis ir krovimo masė. Ruožo pritaikymo elektrinei traukai procesą geležinkelių specialistai įvardija terminu „elektrifikavimas“. Praktiškai įrodyta, kad elektrifikuotų geležinkelio linijų pralaidumas, palyginti su šilumine trauka, bent 20 % didesnis, o energijos sąnaudos iki 5 % mažesnės. Tai labai svarbu tankiai gyvenamuose rajonuose, kuriuose yra ribotas šiluminės energijos rezervas. Naudojant elektrovežius kaip mažiau sudėtingą mašiną nei šilumvežis, mažėja lokomotyvų eksploatacijos išlaidos, o dėl didesnių traukinių greičių pakanka mažesnio ir riedmenų parko. Taigi, jeigu palyginsime savikainą, tai pamatysime, kad esant didesniai eismo intensyvumui ji yra beveik 20 % mažesnė nei naudojant šilumvežius.

Geležinkelių linijų elektrifikavimo sistema susideda iš elektros gamybos šaltinių, perdavimo tinklo ir vartojimo įrenginių. Ruožą pritaikius elektrinei traukai ir jį tankiai eksploatuojant susiduriama su infrastruktūros priežiūros problemomis. Ypač aktualu tinkamai ir periodiškai prižiūrėti svarbiausias elektrinės traukos įrangos vietas, kurios visai elektrinės traukos sistemai yra gyvybiškai svarbios, tai yra tas, kurios turi didelę reikšmę visos sistemos nepertraukiamam veikimui. Viena iš tokių vietų yra pantografo būklės priežiūra. Ji yra aktuali ir labai svarbi, nes per pantografą traukinio varikliai gauna maitinimą. Kadangi elektros tiekimas traukinio varikliams vyksta ir esant dideliems traukinių greičiams, dėl mechaninio poveikio neišvengiama pantografo pažeidimų. Tai atsitinka traukiniui judant dideliu greičiu, taip pat nuo trinties ir kitų priežasčių: meteorologinių reiškinių, geležinkelio kelio reljefo pokyčių, geležinkelio kelio pokrypio kampų ir t. t. Pantografo būklei nustatyti reikalinga reguliari apžiūra. Ji yra ypač sudėtinga, nes atliekama tik tam tikru nustatytu grafiku ir tik vizualiai, t.y. fiziškai užlipus ant traukinio stogo ir taip identifikuojant pažeidimus [2]. Šiai priežiūrai atlikti reikia ir tam tikros infrastruktūros, ir tinkamų įrenginių. Depuose turi būti numatytos pantografų apžiūros vietos, kurios turi turėti galimybę tam tikrą kontaktinio tinklo atkarpą atjungti nuo įtampos, kad aptarnaujantysis personalas galėtų saugiai atlikti apžiūros ir remonto darbus. Pantografo būklės įvertinimo apžiūra atliekama remiantis *Elektrifikuoto geležinkelio kontaktinio tinklo įrengimo techninės priežiūros ir remonto taisyklėmis*. Šių taisyklių 1.16 punkte rašoma, kad elektrinių riedmenų pantografų būklės patikrinimas (dalyvaujant lokomotyvų depo (eksploatuojančios organizacijos) atstovui) atliekamas žiemą kartą per mėnesį, o vasarą kartą per 3 mėnesius [2]. Norint tai atlikti reikia nemažai žmogiškųjų išteklių ir kitų planuojamų resursų. Be to, toks nustatyto laikotarpio tikrinimo grafikas neužtikrina reikiamo sistemos patikimumo, nes defektų ant pantografo paviršiaus gali atsirasti nepriklausomai nuo tikrinimo grafiko.

Šiai problemai spręsti užsienio mokslininkai yra publikavę mokslinius tyrimus, iš kurių matyti, kad pantografų defektams nustatyti galima pasinaudoti intelektualiomis stebėsenos ir būklės nustatymo priemonėmis. Tai palengvintų elektrinių riedmenų priežiūrą, būtų taupomos lėšos, nes būna tokių atvejų, kad pavėluotos apžiūros metu paaiškėja, jog pantografas sugadintas nepataisomai ir jį būtina keisti, o tai reikalauja didelių materialų išlaidų. Tokių įvykių būtų įmanoma išvengti įrengiant intelektualias stebėsenos ir būklės nustatymo priemones su jutikliais pantografo būklei identifikuoti. Šios sistemos jau yra naudojamos ir kitose šalyse (Vokietija, Prancūzija, Ispanija, Lenkija). Tačiau šios sistemos atsiperkamumą lemia elektrinių riedmenų srantai tam tikrais maršrutais. Šiuo metu Lietuvoje veikia dar 1975 m elektrinei traukai pritaikytas ruožas Vilnius–Kaunas. Kiekvienais metais tobulinant ir plėtojant Lietuvos geležinkelius, vis daugėja modernizavimo projektų, kurių tikslas – atnaujinti geležinkelio ruožus. Pavyzdžiui, geležinkelio ruože Naujoji Vilnia–Kyviškės–Kena–valstybės siena su Baltarusija projekto įgyvendinimas vykdomas 2016–2018 metais. Ruožui Kaišiadorys–Šiauliai 2017 metais rengiamos konkurso sąlygos projektavimui pagal FIDIC knygą. Planuojama, kad ateityje Lietuvoje bus elektrifikuota visa IX tarptautinio transporto koridoriaus dalis nuo sienos su Baltarusija iki Klaipėdos. Šiuo metu naudojamus dyzelinius lokomotyvus palaipsniui pakeis nauji elektriniai lokomotyvai. Didėjant elektrinių riedmenų ūkiui taps sudėtinga juos planingai aptarnauti, todėl pantografų būklės stebėsenos sistemų įdiegimas laikui einant taps neišvengiamas. Taip bus taupomi tiek infrastruktūriniai, tiek žmogiškieji ištekliai.

**Tyrimų objektas** – automatizuota elektrinės traukos pantografų defektų nustatymo sistema.

**Darbo tikslas:** remiantis teorinės ir praktinės medžiagos analize ir pantografo diagnostikos galimybių tyrimų rezultatais, apdoroti pantografo sukeliamų virpesių signalą, priimtą iš bandymo stendo, ir jį identifikuoti, priskiriant skirtingoms pantografo būklės klasėms.

**Darbo uždaviniai:**

1. sukurti signalų įvertinimo ir klasifikavimo būdą, tinkamą automatizuotai pantografų defektų nustatymo sistemai;
2. parinkti signalo transformacijos algoritmą, leidžiantį tinkamai įvertinti pantografų sukeliamų virpesių signalų požymius;
3. ištirti pasiūlyto klasifikavimo būdo tikslumą identifikuojant defektą ir atskiriant defektų neturinčių pantografų signalus nuo pažeistų pantografų signalų.



### **Darbo metodai:**

- mokslinės literatūros analizė;
- pantografų defektų nustatymo sprendimų analizė užsienyje;
- signalų spektrinė analizė;
- signalų autokoreliacinė analizė;
- signalų kepstro funkcija;
- Mahalanobis atstumo skaičiavimo metodika.

### **Darbo turinys ir struktūra**

Magistro baigiamasis darbas sudarytas iš 3 dalių: literatūros šaltinių analizės, pantografo diagnostikos galimybių tyrimų ir pantografo defektų indentifikavimo tyrimų. Darbo apimtis 67 puslapiai, yra 35 paveikslai ir 17 lentelių.

Literatūros šaltinių analizės dalyje nagrinėjami informaciniai šaltiniai (knygos, moksliniai straipsniai), apibendrinami tyrimų rezultatai.

Pantografo diagnostikos galimybių tyrimų dalyje taikytos transformacinės funkcijos, siekiant identifikuoti pantografo defektus: signalų spektrinė analizė, signalų autokoreliacinė analizė, signalų kepstro funkcija, spektro koreliacijos funkcija, spektro kepstro funkcija. Šių funkcijų taikymo tikslas – išskirti pantografo defekto signalo informacinius požymius, kuriais remiantis būtų įmanoma atskirti skirtingus signalus.

Pantografo defektų indentifikavimo tyrimų dalyje tiriamas spektro koreliacijos funkcijos pritaikymas kitiems būdingiems pantografo defektams nustatyti.

# 1. ELEKTRINĖ TRAUKA IR JOS VEIKIMO PRINCIPAI

## 1.1. Traukos elektrifikavimo įranga

Lietuvoje naudojama elektrinė trauka (27,5 kV/50Hz) šiuose ruožuose:

Naujoji Vilnia–Vilnius–Lentvaris–Kaunas (IX-B ir IX-D koridorių dalis), 112,5 km; Lentvaris–Trakai, 9,6 km (1.1 paveikslas).



1.1 pav. Lietuvos geležinkelių tinklo schema [3].

Kontaktinis tinklas šiuose ruožuose leidžia traukiniams išvystyti 120 km/h greitį ir yra naudojamas tik keleiviniams traukiniams. Traukos tinklas yra maitinamas dviejų 110/27,5/ kV traukos pastočių, kurios buvo pastatytos 1975 m. ir iki šiol yra naudojamos. Daugumos dalių po 30 metų eksploatacijos resursai baigiasi. Visos pastotės naudoja 110 kV perdavimo tinklą, kuris priklauso valstybinei įmonei „Litgrid“.

## 1.2. Elektrinės traukos rūšys

Nuolatinės ir kintamosios srovės elektrinės traukos įrenginiai maitinami iš energetinių sistemų, kurių 110 kV trifazė 50 Hz įtampa nuolatinės srovės traukos pastotėse pažeminama iki 3,3 kV, kintamosios – 27,5 kV. Nuolatinės srovės elektrinės traukos riedmenys maitinami išlyginta 3 kV, kintamosios – vienfazė 27,5 kV, 50 Hz dažnio įtampa.

Pasaulyje geležinkeliai elektrifikuojami jau seniai. Pirmasis pasaulyje elektrifikuotas geležinkelis buvo įrengtas 1895 m. [3] tarp Baltimorės ir Ohajo (JAV), jo ilgis 115 km. Čia buvo naudojama 650 V įtampa, kuri į elektrovežį buvo perduodama trečiuoju bėgiu (kontaktinis tinklas buvo išrastas žymiai vėliau). Maždaug tuo pačiu metu įvairiose šalyse elektrifikuojamos tramvajų linijos, gaminami elektrovežiai ir bandoma juos pritaikyti geležinkeliuose. Pasaulyje elektrifikuojant geležinkelius naudojamos nuolatinės srovės sistemos, kurių kontaktinio tinklo įtampos žemos, t. y. 750 V, 1500 V, 3000 V [3]. Šios nuolatinės srovės sistemos išliko ir iki šiol yra naudojamos: nuolatinė 1500 V (dalis Prancūzijos, Olandija), nuolatinė 750 V (artimoji kontinentui Anglijos dalis). 3000 V nuolatinės srovės sistemos naudojamos Ispanijoje, Lenkijoje, Italijoje, Belgijoje, Estijoje ir kitur. Pastaruoju metu pasaulyje geležinkeliai elektrifikuojami kintamąja srove. Danijoje, Suomijoje, Vengrijoje, Rumunijoje, Portugalijoje, Lietuvoje ir kitur naudojama vienfazė 27,5 kV, 50 Hz sistema. Lietuvos kaimyninių valstybių (Latvijos, Lenkijos, Rusijos Kaliningrado srities) geležinkeliai elektrifikuoti nuolatine srove (kontaktinio tinklo įtampa – 3 kV), Baltarusijos geležinkeliai – kintamąja srove (kontaktinio tinklo įtampa – 27,5 kV, 50 Hz) [3].

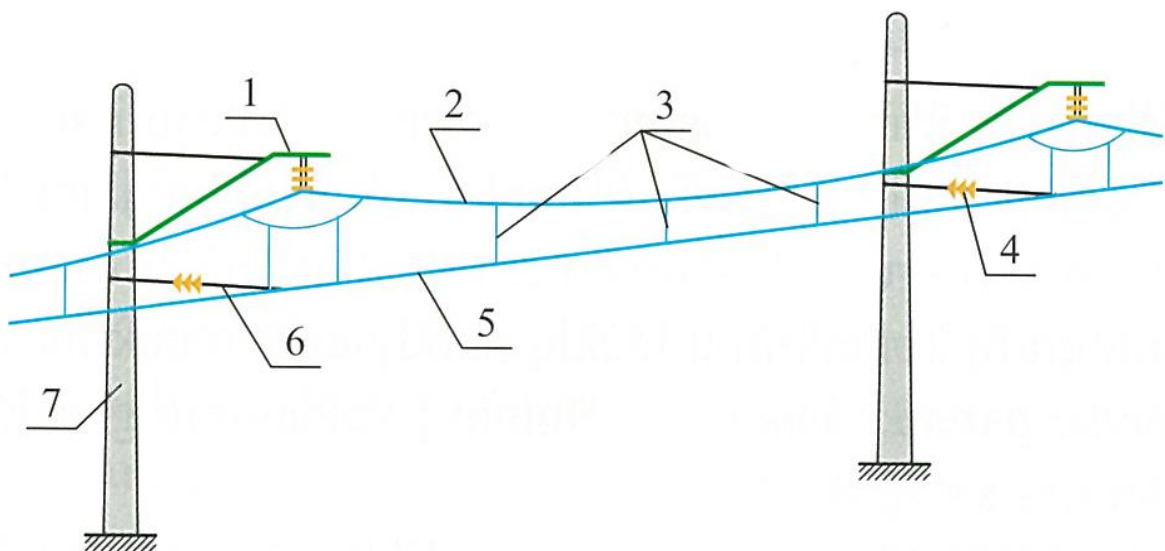
**Nuolatinės ir kintamosios kontaktinio tinklo srovės privalumai ir trūkumai.** Nuolatine srove elektrifikuotuose geležinkelio ruožuose (kontaktinio tinklo įtampa – 3 kV) gali būti eksploatuojami šiuolaikiniai elektriniai traukiniai, elektrovežiai, kurių sekcijos galia siekia 6–10 MW [3]. Dėl žemos elektrinių traukinių, elektrovežių maitinimo įtampos (3 kV) ir vartojamos minėtos galios kontaktiniu laidu teka didelės srovės, todėl kontaktinio laido (laidų) skerspjūvis turi būti ne mažesnis kaip 500 mm<sup>2</sup>. Šiuo atveju paprastai naudojami du kontaktinio tinklo laidai, sujungti lygiagrečiai. Ši aplinkybė kontaktinį tinklą daro žymiai sudėtingesnį. Didelės srovės, kurios teka per elektrinių traukinių pantografus, juose padidina kibirkščiavimą ir sukelia kitus neigiamus reiškinius. Visa tai mažina geležinkelių, elektrifikuotų nuolatine srove, visos sistemos patikimumą. Be to, tenka riboti elektrifikuoto geležinkelio ruožo apkrovas sunkiasvoriais traukiniais dėl įtampos kontaktiniame tinkle kritimo (sumažėjimo žemiau leistinų ribų). Dėl šių priežasčių nuolatine srove elektrifikuotuose geležinkelio ruožuose traukos pastotės tenka statyti kas 10–20 km.

Kintamąja srove elektrifikuotuose ruožuose dėl aukštos (27,5 kV) elektrinių traukinių, elektrovežių maitinimo įtampos kontaktiniu laidu teka mažesnės srovės, todėl kontaktinio laido skerspjūvis yra daug mažesnis, t. y. 120–140 mm<sup>2</sup>, sunaudojama beveik perpus mažiau spalvotųjų

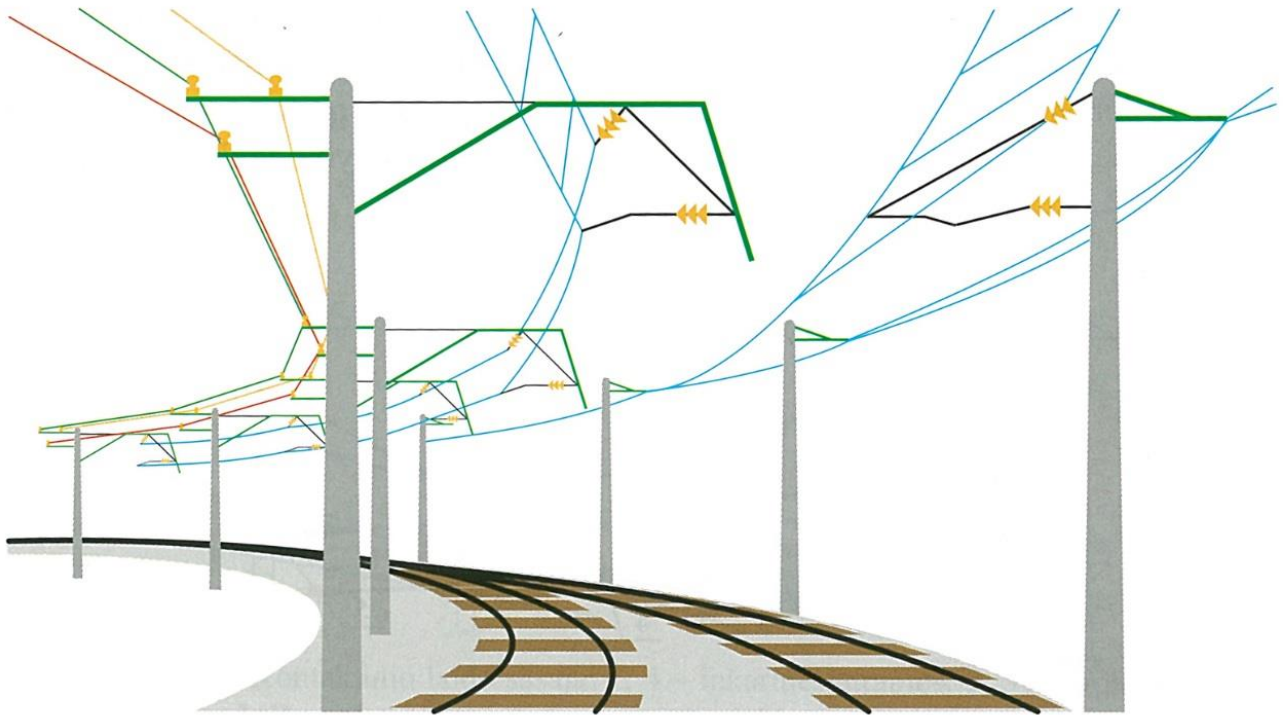
metalu, palyginti su nuolatinės srovės kontaktiniu tinklu [3]. Tokia įtampa leidžia sumažinti nuostolius elektros perdavimo linijose ir kontaktiniame tinkle, o traukos pastotės statomos kas 40–60 km. Traukos pastotės pigesnės, pigesnė ir jų eksploatacija, todėl gerokai sumažėja geležinkelio elektrifikavimo išlaidos. Kintamąją srovę elektrifikuotuose geležinkelio ruožuose beveik neribojama traukinių masė.

### 1.3. Kontaktinis tinklas

Kontaktinis tinklas (toliau – KT) – sudėtingas techninis elektrifikuotų geležinkelių įrenginys, kuriam taikomi specifiniai reikalavimai, priklausantys nuo srovės tipo, elektrovežių, elektrinių traukinių greičio, eismo intensyvumo, kelio profilio, geografinės padėties ir kitų sąlygų, lemiančių konstrukcinius sprendimus bei eksploatacijos ypatybes. KT turi užtikrinti gerą kontaktą tarp elektrovežio, elektrinio traukinio pantografo ir kontaktinio laido esant nepalankiausioms klimatinėms sąlygoms ir didžiausiam leistinam greičiui, aplinkos temperatūrai Lietuvoje svyruojant nuo  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pučiant stipriam vėjui, galimas KT „bangavimas“ [3]. Visais minėtais atvejais KT sistema turi laiduoti minimalius kontaktinio laido padėties pokyčius kelio ašies ir aukščio atžvilgiu. KT turi užtikrinti elektrovežio, elektrinio traukinio pantografo kontaktinių įdėklų vienodą dėvėjimąsi visame kontaktiniame paviršiuje; visi šie reikalavimai tiesiogiai veikia KT konstrukciją. Taikant kompensavimo sistemas, galima keisti kontaktinio laido įtempimą, koreguoti jo padėtį kelio ašies atžvilgiu priklausomai nuo aplinkos temperatūros, laidų svorio (įskaitant apledėjimo atvejus), mažinti „bangavimo“ įtaką pučiant stipriam vėjui ir kt. [3]. KT įranga skiriasi stotyse, tarpstočiuose, kreivėse, iešmuose ir tiesiame ruože. KT maitina ne tik elektrinės traukos riedmenis, bet ir kitus geležinkelio infrastruktūros vartotojus (1.2 ir 1.3 paveikslai).



**1.2 pav.** Kontaktinio tinklo grandinės pakabos: 1 – gembė; 2 – laikantysis lynas; 3 – stygos; 4 – izoliatorius; 5 – kontaktinis laidas; 6 – fiksatorius; 7 – gelžbetoninė atrama [3].



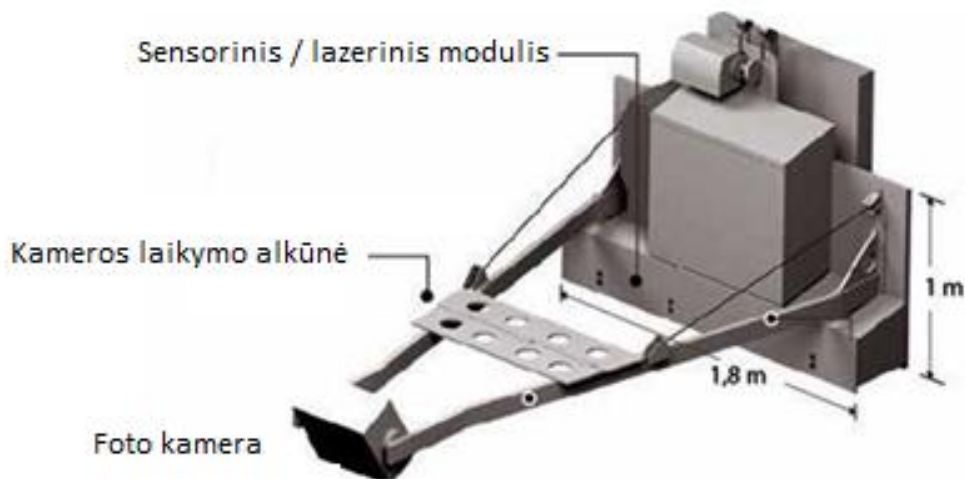
**1.3 pav.** Kontaktinio tinklo pakabos išdėstymas kreivėje [3].

#### **1.4. Kontaktiniam tinklui keliami reikalavimai**

Kontaktinis laidas turi atitikti EN 50149 reikalavimus. Tarpstočiuose ir stotyse kontaktinio tinklo laidai virš bėgio galvutės turi kabėti ne žemiau kaip 5750 mm, o pervažose – ne žemiau kaip 6000 mm [4]. Išimtiniais atvejais keliuose, kuriuose nenumatytas riedmenų stovėjimas, taip pat tarpstočiuose šis atstumas gali būti sumažintas iki 5675 mm. Kontaktinio tinklo metalinės atramos, kontaktinio tinklo oro linijų detalių tvirtinimo ant gelžbetoninių ir medinių atramų ar nemetalinių kelio statinių konstrukcijos, taip pat visos metalinės konstrukcijos (tiltai, viadukai, šviesoforai, atskirai stovinčios atramos, prožektorių bokštai, pastatų stogai, vandens kolonėlės ir t. t.), esančios arčiau kaip 5 m atstumu nuo laidų ir elementų su aukštesne kaip 1 kV darbine įtampa, turi būti įžemintos į elektrinės traukos grandinę bėgiuose. Turi būti įžeminti visi kintamosios srovės kontaktinio tinklo veikimo zonoje esantys metaliniai įrenginiai, kuriuose gali atsirasti pavojinga indukuota įtampa. Kontaktinio tinklo atramų ir netoli kontaktinio tinklo esančių statinių įžeminimas atliekamas individualiais arba grupiniais įžeminimo laidininkais, prijungiamais prie traukos bėgių arba prie kelio droselinių transformatorių vidurinių taškų.

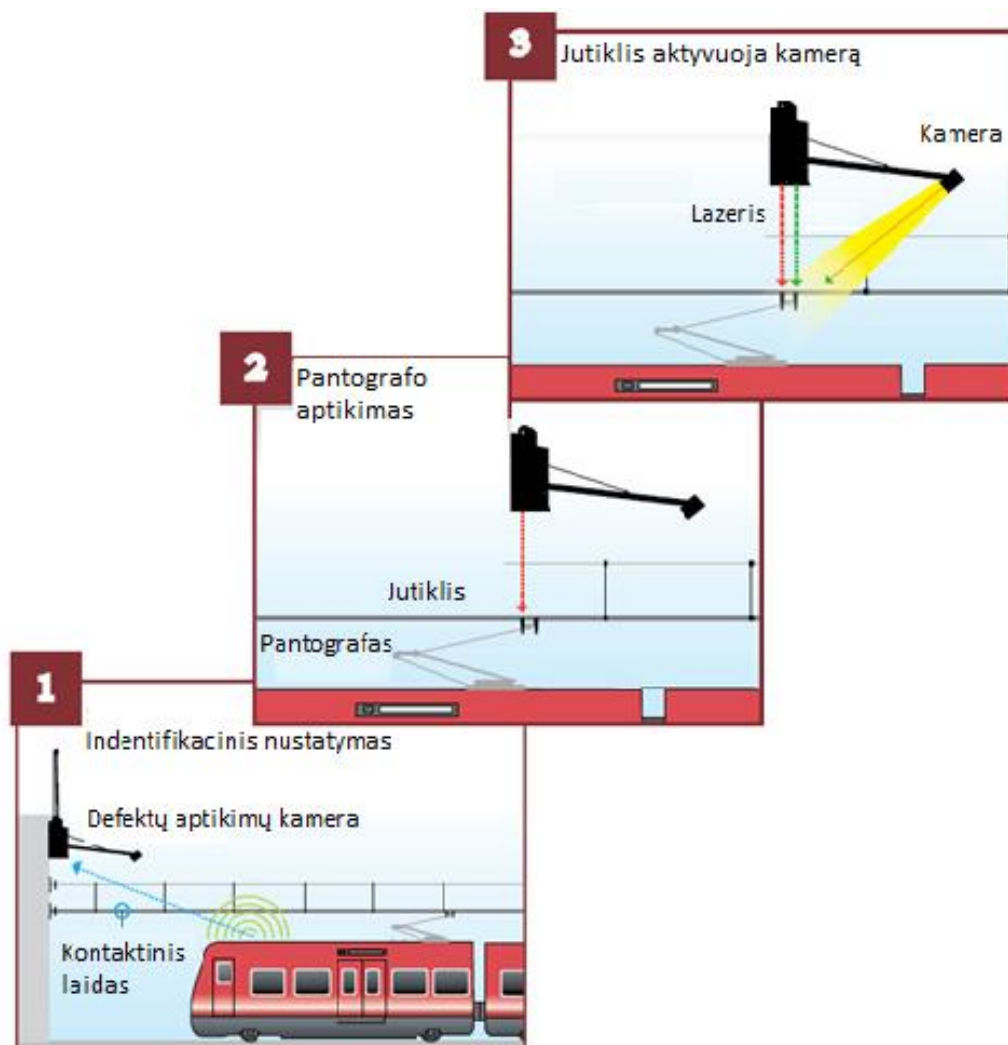
## 1.5. Atliktų pantografo diagnostikos sistemų tyrimų analizė

Šiuo metu Lietuvoje nėra plačiai išvystytas elektrifikuoto geležinkelio tinklas ir dėl to pantografų defektams nustatyti nėra taikomi jokie automatizuotos diagnostikos sprendimai. Todėl yra įdomu ir naudinga pasidomėti, kaip šias problemas sprendžia užsienio šalys, turinčios ženkliai didesnius elektrifikuoto geležinkelio linijų ilgius bei didelius elektrinių riedmenų parkus. Išanalizavus kitų šalių mokslininkų straipsnius paaiškėjo, kad šių diagnostikos sistemų reikalingumas ir įgyvendinimo sparta sparčiai plečiasi, tačiau vis dar išlieka nauja tiek mokslo, tiek pramonės sritis, kurios potencialas didelis. Iš analizuotų straipsnių pastebėta, kad mokslinių tyrimų ir darbo grupės dirba keliomis skirtingomis kryptimis. Viena tokia plačiai taikoma ir naudojama pantografų defektų nustatymo priemonė remiasi vaizdų apdorojimu [5]. Jos sudėtis ir veikimo principas yra tam tikroje vietoje, yra pritvirtinamas multikombinacinis blokas, kuriame yra kamera, kameros laikymo petys ir sensorinis lazerinis modulis, kuriam suveikus kamera fotografuoja pantografo paviršių (1.4 paveikslas).



1.4 pav. Pantografo būklės stebėsenos įrenginys [6].

Gaunamas rezultatas yra pantografo paviršiaus nuotrauka, kurią analizuoja geležinkelių transporto specialistai. Jie nustato, ar yra pažeidimų ant pantografo paviršiaus. Šio principo pantografo būklės stebėsenos sistema plačiai yra naudojama Danijos geležinkeliuose (1.5 paveikslas).



**1.5 pav.** Pantografo būklės stebėsenos įrenginio veikimo principas [6].

Analizuojant šią sistemą buvo pastebėta ir šios sistemos trūkumų. Vienas iš jų – brangi infrastruktūrinė įranga (kamera, jutikliai), taip pat būtinų tinkamų inžinerinių mechaninių konstrukcijų būtinybė šiai sistemai pritvirtinti. Straipsniuose, susijusiuose su vaizdiniu pantografo būklės indentifikavimo būdu, buvo nurodyti ir šios sistemos privalumai. Vienas iš pagrindinių šios sistemos privalumų yra gaunama rezultato forma. Ją specialistai iškart gali iširti ir priimti sprendimus (1.6 ir 1.7 paveikslas).

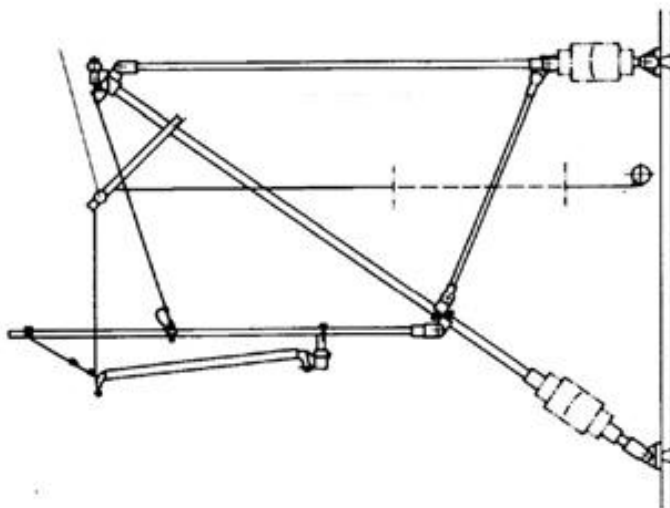


**1.6 pav.** Pantografo būklės stebėsenos įrenginio darbinis kadras [6].



**1.7 pav.** Reali nuotrauka su pantografo pažeidimais [6].

Kita tyrimų grupė koncentruojasi į signalų apdorojimą nustatant pantografo paviršiaus pažeidimus [7]. Taip pat prie šio metodo praktinės realizacijos galima rasti ir tam tikrus konstrukcinius sprendimus, kaip potenciometro jutiklis galėtų būti praktiškai realizuotas esamose darbinėse aplinkose. Taip yra todėl, kad šios srities tyrėjai ir praktikos specialistai susiduria ir su nemažais apribojimais. Jie yra indukciniai ir konstrukciniai.



**1.8 pav.** Vokietijoje paplitusi jutiklio tvirtinimo konstrukcija [8].

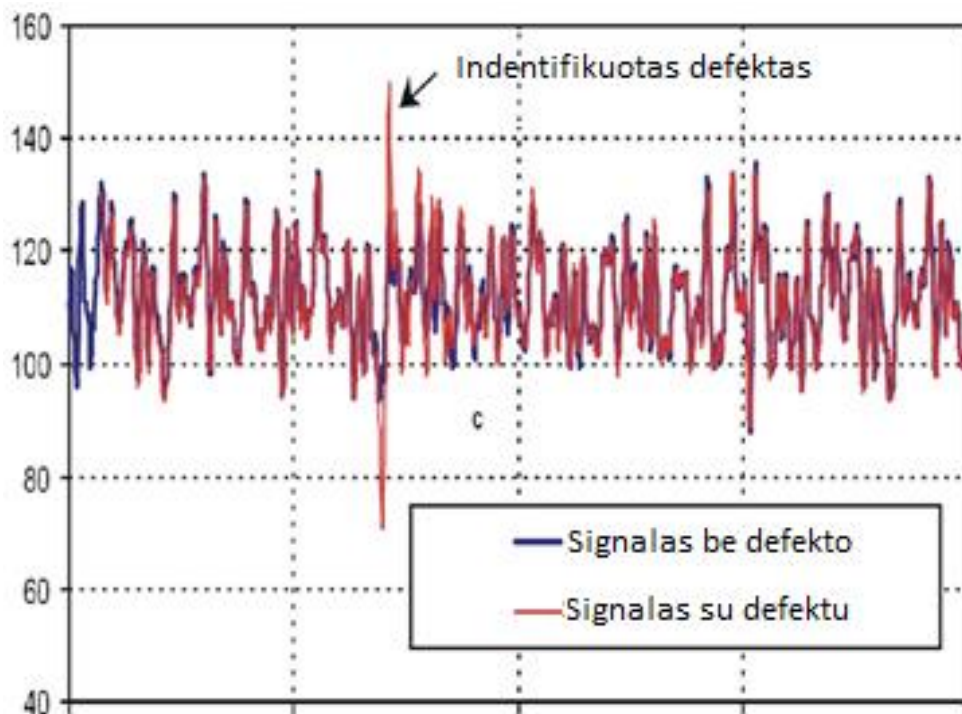
1.8 paveiksle pavaizduota siūloma strategija, kaip prie kontaktinio tinklo atramos pritvirtinti jutiklį, tinkamu atstumu jį atitraukiant iš indukuotos zonos. Šiame siūlyme jutiklį yra siūloma tvirtinti prie kontaktinio tinklo atramos per papildomus tvirtinimo elementus, o per izoliuotas vielutes yra prijungtas prie kontaktinio tinklo [8]. Taip gaunamas mechaninių virpesių signalas, kuris apdorojamas įvairiais matematiniais modeliais ir išvedama bendra rezultato forma su nustatytais dydžių įverčiais. Ji parodo, kokios nusidėvėjimo būklės yra eksploatuojamas pantografas. Išanalizavus tokius pantografo būklės indentifikavimo būdus buvo pastebėta ir trūkumų, ir privalumų. Akivaizdus šio principo privalumas yra paprasta jutiklio tvirtinimo konstrukcija. Jutiklį galima tvirtinti su tokia konstrukcija



praktiškai prie kiekvienos atramos (1.9 paveikslas). Ne mažiau svarbus pranašumas (lyginant su prieš tai analizuota pantografo defektų indentifikavimo sistema) yra maži šios sistemos įrengimo kaštai. Tačiau šioje sistemoje galima išvelgti ir tam tikrų trūkumų. Vienas iš jų yra tai, kad reikia papildomų matematinių modelių gaunamam signalui apdoroti [9] (1.10 paveikslas).



1.9 pav. Pantografo defektų nustatymo įrenginys eksploatavimo vietoje [8].



1.10 pav. Matematinio modelio apdorotas signalas, identifikuojantis defektus ant pantografo paviršiaus [9].

Išanalizavę mokslines publikacijas, galime nesudėtingai palyginti gana skirtingus pantografo defektų apdorojimo sistemų teigiamus ir neigiamus aspektus (1 lentelė).

**1 lentelė.** Vaizdų apdorojimo ir matematinio modelio metodų palyginimas.

|                   | <b>Vaizdų apdorojimo metodas</b>   | <b>Matematinio modelio metodas</b>   |
|-------------------|--|--|
| <b>Privalumai</b> | <p>Gaunama vaizdinė medžiaga apie pantografo paviršiaus būklę.</p> <p>Specialistai iškart gali iširti ir priimti sprendimus.</p>   | <p>Lengva jutiklio tvirtinimo konstrukcija.</p> <p>Jutiklį galima tvirtinti su tokia konstrukcija praktiškai prie kiekvienos atramos.</p> <p>Mažesni sistemos įrengimo kaštai.</p> <p>Tikslesnė gaunama informacija.</p> <p>Galima identifikuoti defektų tipus.</p> <p>Nereikalingas specialiai parengtas papildomas personalas.</p> |
| <b>Trūkumai</b>   | <p>Brangi infrastruktūrinė įranga (kamera, jutikliai).</p> <p>Galima klaidingai interpretuoti pateiktą vaizdinę informaciją.</p> <p>Gaunama tik apytikslė informacija apie pantografo pažeidimus.</p> <p>Smulkesni pažeidimai gali likti nepastebėti ar neįvertinti šalia didesnių pažeidimų.</p> <p>Reikalingas papildomas personalas gautai informacijai apdoroti.</p> | <p>Indukciniai ir konstrukciniai apribojimai.</p> <p>Reikalingi papildomi sudėtingi matematiniai modeliai gaunamiems signalams apdoroti ir rezultatams pateikti.</p>   |

## 1.6. Signalų spektrinė analizė

Šio darbo idėja yra paremta tiriamo objekto defektus atspindinčio signalo analize, siekiant jame aptikti informatyviuosius klasifikavimo požymius. Todėl aktualu apžvelgti matematinės analizės būdus, dažniausiai naudojamus signalams apdoroti.

Signalų ir sistemų analizei naudojami du metodai:

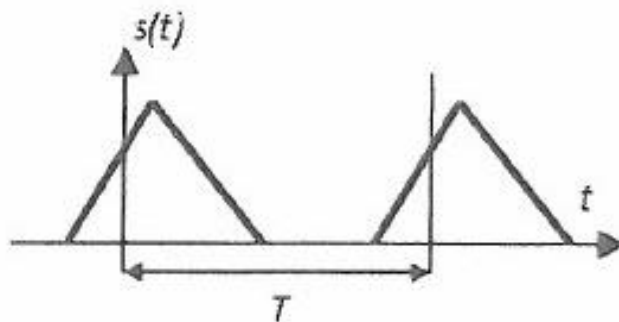
- laikinis;
- spektrinis.

Laikiniu metodu tiriamos signalo formos, antruoju metodu – signalo spektro pasikeitimas sistemos išėjime. Abiem metodais gaunami tie patys rezultatai, todėl vieno ir kito metodo pasirinkimas priklauso nuo įėjimo signalo formos [10].

Periodiniu signalu vadiname signalą, aprašomą funkcija  $s(t)$  (1.11 paveikslas), kuri intervale  $-\infty < t < +\infty$  patenkina sąlygą:

$$S(t) = s(t \pm nT), \quad (1.1)$$

kur  $T$  – funkcijos periodas;  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  – sveikasis skaičius. Periodu  $T$  vadinamas mažiausias laiko tarpas, po kurio kartojasi momentinės funkcijos reikšmės.



1.11 pav. Periodinis signalas [10].

Dydis  $f_1 = \frac{1}{T}$  – pagrindinis pasikartojimo dažnis. Įvairios formos periodinių funkcijų, kurių pagrindinis dažnis  $fn = nf_1$  ( $n$  – sveikasis skaičius), suma taip pat bus periodinė funkcija su pagrindiniu dažniu  $f_1$ .

Norint išryškinti signalo dažnines charakteristikas, naudojama spektrinė signalo aprašymo forma. Periodinių signalų dažninėms charakteristikoms atvaizduoti naudojamos Furjė eilutės. Periodinį signalą Furjė eilute galima užrašyti taip [11]:

$$u(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin k\omega_1 t, \quad (1.2)$$

kur  $k\omega_1$  – k-tosios harmonikos kampinis dažnis, nuolatinė dedamoji:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} s(t) d\omega_1 t, \quad (1.3)$$

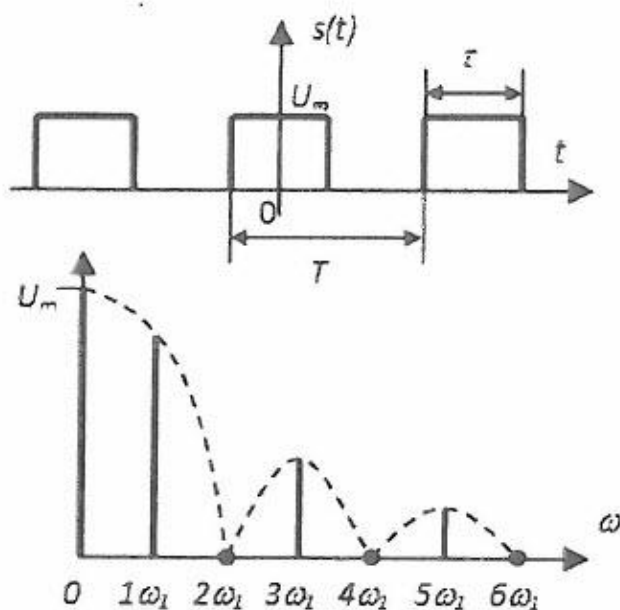
o harmonikų amplitudės:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos k\omega_1 t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} s(t) \cos k\omega_1 t d\omega_1 t, \quad (1.4)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin k\omega_1 t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} s(t) \sin k\omega_1 t d\omega_1 t. \quad (1.5)$$

Pasinaudojus šiomis formulėmis galima rasti įvairių formų periodinių signalų spektrus. Pavyzdžiui, stačiakampių impulsų periodinio signalo spektras (1.12 paveikslas) randamas taip – iš (1.2) formulės randama nuolatinė dedamoji:

$$d_0 = a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} U_m dt = U_m \frac{\tau}{T}. \quad (1.6)$$



1.12 pav. Stačiakampių impulsų spektras;  $T = \frac{\tau}{2}$  [10].

Harmonikų amplitudės:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} U_m \cos k\omega_1 t dt = \frac{4U_m}{Tk\omega_1} \sin k \frac{\omega_1 \tau}{2}, \quad b_k = 0. \quad (1.7)$$

Įrašius šias išraiškas į (1.2), stačiakampis impulsas išskaidomas į harmonines dedamąsias:

$$s(t) = U_m \left[ \frac{\tau}{T} + \frac{4}{T} \left( \frac{1}{\omega_1} \sin \frac{\omega_1 \tau}{2} \cos \omega_1 t + \frac{1}{2\omega_1} \sin \frac{2\omega_1 \tau}{2} \cos 2\omega_1 t + \frac{1}{3\omega_1} \sin \frac{3\omega_1 \tau}{2} \cos 3\omega_1 t + \dots \right) \right]. \quad (1.8)$$

Furjė transformacija:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (1.9)$$

Įrašę formulę gausime:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} dt. \quad (1.10)$$

Lygtys (1.9) ir (1.10) sudaro vadinamąją Furjė transformacijos porą: (1.9) išraiška vadinama tiesiogine Furjė transformacija, o (1.10) išraiška – atvirkštine Furjė transformacija. Tiesioginė Furjė transformacija susieja funkciją laiko srityje  $t$  su dažnių sritimi  $\omega$ , o atvirkštinė Furjė transformacija transformuoja funkcijos dažnio sritį  $\omega$  į laikinę sritį  $t$ .

#### Autokoreliacinė ir tarpusavio koreliacinė funkcijos

Dažnai praktikoje vietoje spektrinės signalų analizės yra naudojama taip pat laikinė signalų analizė, nes kartais reikia turėti duomenis apie signalų kitimo greitį, signalo trukmę, neskaidant signalo į harmonines dedamąsias. Tokiomis laikinėmis charakteristikomis yra signalo autokoreliacinė funkcija ir tarpusavio koreliacinė funkcija.

#### Signalų autokoreliacinė funkcija

Kiekybiniam signalo  $s(t)$  ir suvélinto signalo  $s(t - \tau)$  skirtumui įvertinti naudojama autokoreliacinė funkcija (AKF), kuri lygi signalo ir jo perstumtos laike dydžiu  $\tau$  kopijos skaliarinei sandaugai:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s(t - \tau) dt. \quad (1.11)$$

AKF įvertina signalo ir jo perstumtos laike kopijos tarpusavio ryšį (koreliaciją). Kai  $\tau=0$ , tai autokoreliacinė funkcija įgauna maksimalią reikšmę, kuri yra lygi signalo energijai [12]:

$$R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)^2 dt = W. \quad (1.12)$$

#### Tarpusavio koreliacijos funkcija

Tarpusavio koreliacijos funkcija įvertina dviejų skirtingų signalų  $v(t)$  ir  $s(t)$  panašumą (ryšį tarp jų) ir aprašoma taip:

$$K_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot s(t - \tau) dt, \quad (1.13)$$

čia  $v(t)$  ir  $s(t)$  – signalai, aprašomi begaliniame laiko intervale  $[-\infty, \infty]$  ir turintys baigtinę energiją. (1.13) formulė gali būti užrašyta kaip dviejų signalų kompozicija:

$$K_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot s(t - \tau) dt = v(t) \cdot s(-t). \quad (1.14)$$

Tarpusavio koreliacinės funkcijos reikšmė nesikeis, jei vietoje suvélinto signalo  $s(t)$  paankstinsime signalą  $v(t)$ :

$$K_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot s(t - \tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} v(t + \tau) \cdot s(t) dt. \quad (1.15)$$

Tarpusavio koreliacinę funkciją galima skaičiuoti suvélinus signalą  $v(t)$ . Tuomet tarpusavio koreliacinė funkcija žymima kitais indeksais:

$$K_{21}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t - \tau) \cdot s(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot s(t + \tau) dt. \quad (1.16)$$

Sulyginę pastarąsias formules matome, kad  $K_{12}(\tau) = K_{21}(-\tau)$ , tačiau  $K_{12}(\tau) \neq K_{21}(-\tau)$ . Bendru atveju koreliacinė funkcija  $K_{12}(\tau)$  nėra lyginė funkcija ir gali įgauti maksimalią reikšmę esant bet kokiam  $\tau$  reikšmei. Jei laiko postūmis bus lygus nuliui  $\tau = 0$ , tai  $K_{12}(0)$  išreiškia dviejų signalų tarpusavio energiją:

$$K_{12}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot s(t) dt = W_{12}. \quad (1.17)$$

Dažnai yra naudojama normuota tarpusavio koreliacinė funkcija, leidžianti tiesiogiai palyginti įvairių signalų koreliacines funkcijas tarpusavyje. Ji apskaičiuojama pagal formulę:

$$k(\tau) = \frac{K_{12}}{\sqrt{W_1 W_2}}, \quad (1.18)$$

čia  $w_1, w_2$  – signalų energijos.

Normuota tarpusavio koreliacinė funkcija kinta ribose nuo  $-1$  iki  $+1$ . Jei  $k(\tau) = -1$ , tai funkcijos yra priešingų fazių. Jei  $k(\tau) = 0$ , tai reiškia, kad funkcijos tarpusavyje bus ortogonalios. Kadangi tarpusavio koreliacinė funkcija apskaičiuojama kaip skaliarinė dviejų dydžių sandauga, tai atitinka ortogonalinių funkcijų apibrėžimą. Jei  $k(\tau) = +1$ , tai abu signalai yra identiškai (AKF atvejis). Taigi, AKF yra dalinis tarpusavio koreliacinės funkcijos atvejis, kai  $v(t) = s(t)$ .

Atrodo, kad koreliacinis integralas ir tarpusavio koreliacinė funkcija yra skaičiuojami pagal tas pačias formules. Tačiau atkreipsime dėmesį į esminį jų skirtumą, todėl palyginkime kompozicijos integralo ir koreliacinio integralo formules:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau = x(t) \cdot h(t), \quad (1.19)$$

$$K_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot s(t - \tau)dt = v(t) \cdot s(-t). \quad (1.20)$$

Sulyginę formules matome, kad tarpusavio koreliacinės funkcijos kompozicijos išraiškoje signalas laiko atžvilgiu pažymėtas  $s(-t)$ . Sakykime, kad  $s(-t) = w(t)$ . Tuomet koreliacijos integralą apskaičiuojame:

$$v(t) \cdot s(-t) = v(t) \cdot w(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)w(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)s(\tau - t)d\tau = K_{12}(\tau). \quad (1.21)$$

Tai reiškia, kad koreliacinės funkcijos atveju kompozicija yra plotas, kurį apriboja  $v(t)$  funkcija ir signalas  $s(\tau - t)$ , perstumtas laiko ašyje dydžiu  $t$ , tačiau jis nėra invertuotas laiko ašies atžvilgiu. Priminsime, kad kompozicinio integralo atveju impulsinė charakteristika yra invertuojama laiko ašies atžvilgiu [13].

### Kepstro funkcija

Nagrinėkime seką  $\{x(n)\}$ , turinčią  $z$  transformaciją  $X(z)$ . Tarkime, kad  $\{x(n)\}$  yra stabili seka, taigi  $X(z)$  konverguoja ant vienetinio apskritimo. Sekos  $\{x(n)\}$  kompleksinis kepstras yra apibrėžiamas kaip seka  $\{c_x(n)\}$ , kuri yra  $C_x(z)$  atvirkštinė  $z$  transformacija:

$$C_x(z) = \ln X(z). \quad (1.22)$$

Kompleksinis kepstras egzistuoja, jei  $C_x(z)$  konverguoja žiede  $r_1 < |z| < r_2$ , kur  $0 < r_1 < 1$  ir  $r_2 > 1$ . Konvergencijos srityje  $C_x(z)$  galima pavaizduoti Lorencio eilute:

$$C_x(z) = \ln X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_x(n)z^{-n}, \quad (1.23)$$

kur

$$c_x(n) = \frac{1}{2\pi j} \oint_C \ln X(z)z^{n-1}dz. \quad (1.24)$$

ir  $C$  yra uždaras kontūras, apimantis pagrindą ir esantis konvergencijos srities viduje. Jei  $C_x(z)$  galima pavaizduoti Lorencio eilute (1.23), kompleksinio kepstro seka  $\{c_x(n)\}$  yra stabili. Taip pat, jei kompleksinis kepstras egzistuoja,  $C_x(z)$  konverguoja ant vienetinio apskritimo ir galima surasti kompleksinio kepstro Furjė transformaciją:

$$C_x(\omega) = \ln(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_x(n) e^{-j\omega n}, \quad (1.25)$$

kur  $\{c_x(n)\}$  yra seka, gauta iš  $\ln X(\omega)$  atvirkštinės Furjė transformacijos:

$$C_x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \ln X(\omega) e^{j\omega n} d\omega. \quad (1.26)$$

Išreiškę  $X(\omega)$  per modulį ir fazę:

$$X(\omega) = |X\omega| e^{j\theta(\omega)}, \quad (1.27)$$

gauname:

$$\ln X(\omega) = \ln|X(\omega)| + j\theta(\omega). \quad (1.28)$$

Irašę (1.33) į (1.31), gauname kompleksinį kepsrą:

$$c_x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\ln|X\omega| + j\theta(\omega)] e^{j\omega n} d\omega. \quad (1.29)$$

(1.29) atvirkštinę Furjė transformaciją galima padalinti į  $\ln|X\omega|$  ir  $\theta(\omega)$  atvirkštines Furjė transformacijas:

$$c_m(c) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \ln|x(\omega)| e^{j\omega n} d\omega, \quad (1.30)$$

ir

$$c_\theta(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \theta(\omega) e^{j\omega n} d\omega. \quad (1.31)$$

Taigi gauname:

$$c_x(n) = c_m(n) + jc_\theta(n). \quad (1.32)$$

Kompleksinio kepsro  $c_x(n)$  komponentė  $c_m(n)$  vadinama tiesiog kepsru. Tuo atveju  $X(\omega)$  fazė yra ignoruojama ir seka  $\{x(n)\}$  negali būti atstatyta iš  $c_m(n)$ , t. y. transformacija iš  $\{x(n)\}$  į  $c_m(n)$  nėra invertabili.



Pagrindinis kompleksinio kepstro privalumas yra tas, kad kai yra dviejų signalų kompozicija:

$$y(n) = x(n) \cdot z(n), \quad (1.33)$$

tai

$$Y(\omega) = X(\omega)Z(\omega), \quad (1.34)$$

ir iš (1.26) gauname, kad:

$$c_y(n) = c_x(n) + c_z(n). \quad (1.35)$$

Matome, kad dviejų signalų kompozicija virto jų kompleksinių kepstų suma kepstro srityje. Taigi atlikome dviejų signalų dekompoziciją, kepstro srityje pavertėme juos signalų suma [14].

### 1.7. Diskriminantinė analizė

Diskriminantinės analizės tikslas – nustatyti požymius, padedančius atskirti tiriamų objektų grupes ir įvertinti diskriminavimo kokybę. Taigi diskriminavimas susijęs su priklausomybės struktūros analize. Klasifikavimo tikslas – remiantis požymių matavimais, objektus priskirti vienai iš grupių ir įvertinti klasifikavimo patikimumą.

Remiantis vektoriaus ilgio apibrėžimu atstumas tarp vektorinių taškų yra:

$$AB = |\overline{AB}| = |\overline{AB}|. \quad (1.36)$$

Jei taškai  $A$  ir  $B$  yra plokštumoje, o  $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2)$ , tuomet analogiškai įrodoma, jog  $\overline{AB} \{x_2 - x_1, y_2 - y_1\}$ .

Pagal vektoriaus ilgio išraišką koordinatėmis gauname [15]:

$$|\overline{AB}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (1.37)$$

## 1.8. Literatūros analizės apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo išanalizuota literatūra apie elektrinių riedmenų pantografo defektų diagnostikos sistemas. Nors šios sistemos šiuolaikinėje Europoje tik dabar yra pradamos taikyti, akivaizdu, kad didėjant elektros mašinų skaičiui šių sistemų reikalingumas tikrai didės. Iš surinktų duomenų galime teigti, kad šių defektų indentifikavimas dažniausiai atliekamas keliais metodais. Dažniausiai yra taikomi vaizdų apdorojimo ir matematinių modelių apdorojimo metodai. Šiame darbe aprašyti ir išanalizuoti abiejų metodų teigiami ir neigiami aspektai (1 lentelė).

Modernizuojant geležinkelio ruožus pagal 2017–2027 metų strateginį planą, Europos traukos sistemos turės būti pertvarkytos ir modernizuotos. Modernizuojant geležinkelių linijas šiluminės traukos lokomotyvų mažės, juos pakeis elektrinė trauka. Šitaip modernizuojant geležinkelio linijas ir jas pritaikant ne tik keleiviniam geležinkelių transportui, bet taip pat naudojant ir kroviniams vežti būtų gaunamas teigiamas ekonominis efektas. Smarkiai didėjant riedmenų parkui be automatizuotų defektų aptikimo sistemų būtų neįmanoma tinkamai prižiūrėti elektrinių riedmenų pantografų.

Analizuojant literatūrą, surinkta techninė informacija, kuria galima naudotis priimant elektrinių riedmenų pantografo defektų analizės sprendinius pažeistam pantografui identifikuoti.

Elektrinių riedmenų pantografų defektų aptikimas ir analizė turi didžiulę ateitį, todėl domėjimasis šia sritimi yra vis didesnis ir bandymas pritaikyti esamoms geležinkelio sistemoms jas modernizuojant yra vis aktualesnis.

## **2. PANTOGRAFO DIAGNOSTIKOS GALIMYBIŲ TYRIMAS**

Kiekvienais metais tobulinant ir vystant Lietuvos geležinkelius, vis daugėja projektų, kurių tikslas – modernizuoti atskirus geležinkelio ruožus. Pavyzdžiui, geležinkelio ruože Naujoji Vilnia–Kyviškės–Kena–valstybės siena su Baltarusija projektas jau įgyvendinamas, vyksta ruožo Kaišiadorys–Radviliškis projektavimo darbai. Planuojama, kad ateityje Lietuvoje bus elektrifikuota visa IX tarptautinio transporto koridoriaus dalis nuo sienos su Baltarusija iki Klaipėdos. Šiuo metu naudojamus dyzelinius lokomotyvus palaipsniui pakeis nauji elektriniai riedmenys. Pastarieji neteršia aplinkos, yra greitesni, tylesni ir galingesni už dyzelinius, tad kelionės geležinkeliais bus patrauklesnės. Tačiau eksploatuojant elektrinius riedmenis yra būtina svarbiausių sistemos komponentų automatizuota priežiūra.

Iš pirmame skyriuje atliktos literatūros analizės nustatyti pantografų defektų aptikimo, indentifikavimo būdai. Todėl antrame šio darbo skyriuje pateikiami ir plačiau aprašomi bendros pantografų defektų aptikimo sistemos svarbiausi punktai. Taip pat pristatoma idėja ištirti pantografų defekto aptikimo ir indentifikavimo galimybes naudojant pjezoelektrinį jutiklį.

### **2.1. Planuojamo tyrimo eiga**

Siekiant geriau suprasti pasaulyje vis sparčiau populiarėjančius elektrinių riedmenų defektų nustatymo būdus, reikia pasirinktam defektų nustatymo būdui sudaryti tyrimo planą. Šiame poskyryje bus siekiama aprašyti mokslinio tyrimo inžinerinius sprendimus, kurie būtini bendrai pantografų defektų aptikimo sistemai. Siekiant, kad šis darbas būtų kuo detalesnis, o inžineriniai sprendimai realiai pritaikomi, atliekant šį darbą konsultuotasi su AB „Lietuvos geležinkeliai“ filialu „Vilniaus geležinkelių infrastruktūra“, Kauno kontaktinio tinko depu ir su AB „Lietuvos geležinkeliai“ filialo „Kauno geležinkelių infrastruktūros“ inžinieriais. Deja, neturint galimybių realiai gauti defektuoto pantografo išmatuoto signalo bus kuriamas artimas tikrovei kontaktinio tinklo ir pantografo fizinis modelis.

## 2.2. Kontaktinio tinklo laidas

Kontaktinio tinklo laidu, kuris yra kabinamas virš bėgių, traukinio varikliams yra tiekama elektros srovė. Eksploatuojant šią sistemą turi būti užtikrinamas geras elektrinis kontaktas tarp elektrinio traukinio pantografo ir kontaktinio tinklo laido. Kad šis kontaktas būtų geresnis, pantografo konstrukcinėje dalyje yra specialūs pakabos elementai, kurie nuolat laiko prispaudę pantografą prie kontaktinio tinklo. Eksploatuojant elektrinius riedmenis įvairiomis klimatinėmis sąlygomis ir dideliais greičiais prispaudimo vieta pakinta ir nusidėvi skirtingai. Jeigu pantografo nelygumai tampa pakankamai dideli, pastebimas pantografo šokinėjimas ir elektrinis kibirkščiavimas. Jis susidaro dėl didelės tekančios srovės iš kontaktinio tinklo laido į elektrinio traukinio variklius.

Siekiant, kad pantografo kontaktinis paviršius dėvėtųsi kuo tolygiau, kontaktinio tinklo laidas yra tiesiamas palaikant nedidelį kampą (kelio ašies atžvilgiu) horizontalioje plokštumoje. Todėl pantografo atžvilgiu kontaktinis laidas juda ne tik skersai (traukinio judėjimo kryptimi ir greičiu), bet ir išilgai, nors ir palyginti mažu greičiu. Atkreiptinas dėmesys, kad pantografas montuojamas vertikalioje plokštumoje, skersai kelio ašies, todėl skersinis kontaktinio tinklo braukimas atitinka braukimą traukinio judėjimo kryptimi, o išilginis braukimas – statmena kelio ašiai kryptimi, vertikalioje plokštumoje. Todėl kontaktinio laido prisilietimo taško vieta, važiuojant traukiniui, nuosekliai juda nuo vieno pantografo kontaktinio paviršiaus galo iki kito (pantografui išilgai, kelio ašiai – skersai), o tada pradeda judėti atgal. Kadangi dauguma pantografo nusidėvėjimų ar defektų labiausiai išryškėja išilginiame pantografo paviršiaus profilyje, paviršiumi judantis kontaktinis laidas pantografo defekto atveju ne taip sklandžiai judės išilgai ir tikrai klius už paviršiuje susidariusių nelygumų.

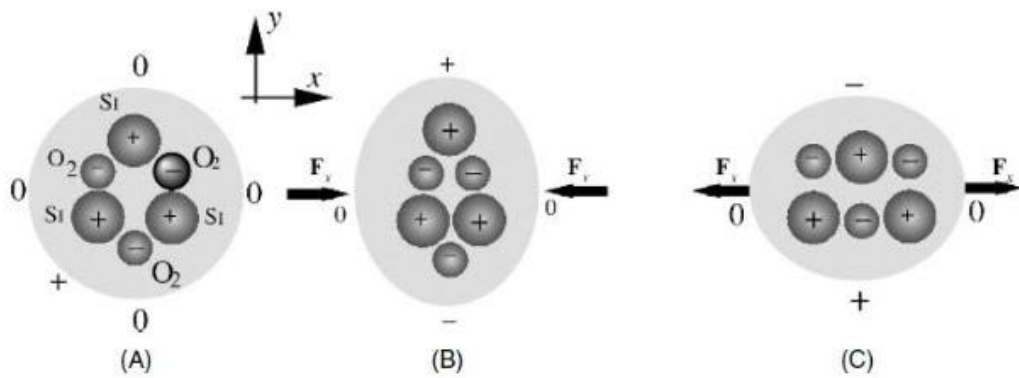
### 2.3. Defektų požymius atskleidžiančio signalo parinkimas

Kuriant diagnostikos sistemą, labai svarbu išanalizuoti signalus, atskleidžiančius objekto būklę. Dažnai tai būna akustiniai, mechaninių virpesių, cheminio proceso, elektros srovės ar elektromagnetinio lauko pokyčius atspindintys signalai. Akivaizdu, kad elektriniam traukiniui važiuojant ir pantografu braukiant per kontaktinį tinklą, šis braukimo procesas kels tam tikrą garsą aplinkoje ir mechaninius virpesius kontaktinio tinklo tvirtinimo sistemoje. Pantografe atsiradęs nusidėvėjimas, kontaktinio paviršiaus formos pasikeitimas kels papildomus, defektui būdingų požymių virpesius, o dėl pablogėjusio kontakto atsiradęs kibirkščiavimas taip pat girdėsis ir atsispindės bendrame kontaktinio tinklo mechaninių virpesių signale.

Beje, aplinkos garsas, važiuojant traukiniui, yra lydimas ir kitų didelės galios garso šaltinių. Tuo tarpu kontaktinio tinklo mechaniniai virpesiai daugiausia veikiami vien kontakto su pantografu sukeltų virpesių. Elektromagnetinio lauko matavimas būtų tinkamas kontaktinio tinklo kibirkščiavimui identifikuoti, tačiau kai kurie potencialiai pavojingi defektai, atsiradę pantografo paviršiuje, kurį laiką dar neturi įtakos elektriniam kontaktui ir nekibirkščiuoja. Tokiems defektams aptikti elektromagnetiniu principu paremti metodai nėra tinkami. Kartu dera pažymėti, kad dėl didelių traukos srovių ir elektromagnetinių laukų, susidariusių aplink traukos pantografo ir kontaktinio tinklo lietimosi tašką, būtų komplikauta tinkamai pritaikyti elektrinių parametrų matavimo sistemą. Analizuojamo pantografo defektų signalui gauti reikėtų taikyti būdus, kurie būtų kuo mažiau veikiami elektromagnetinių laukų.

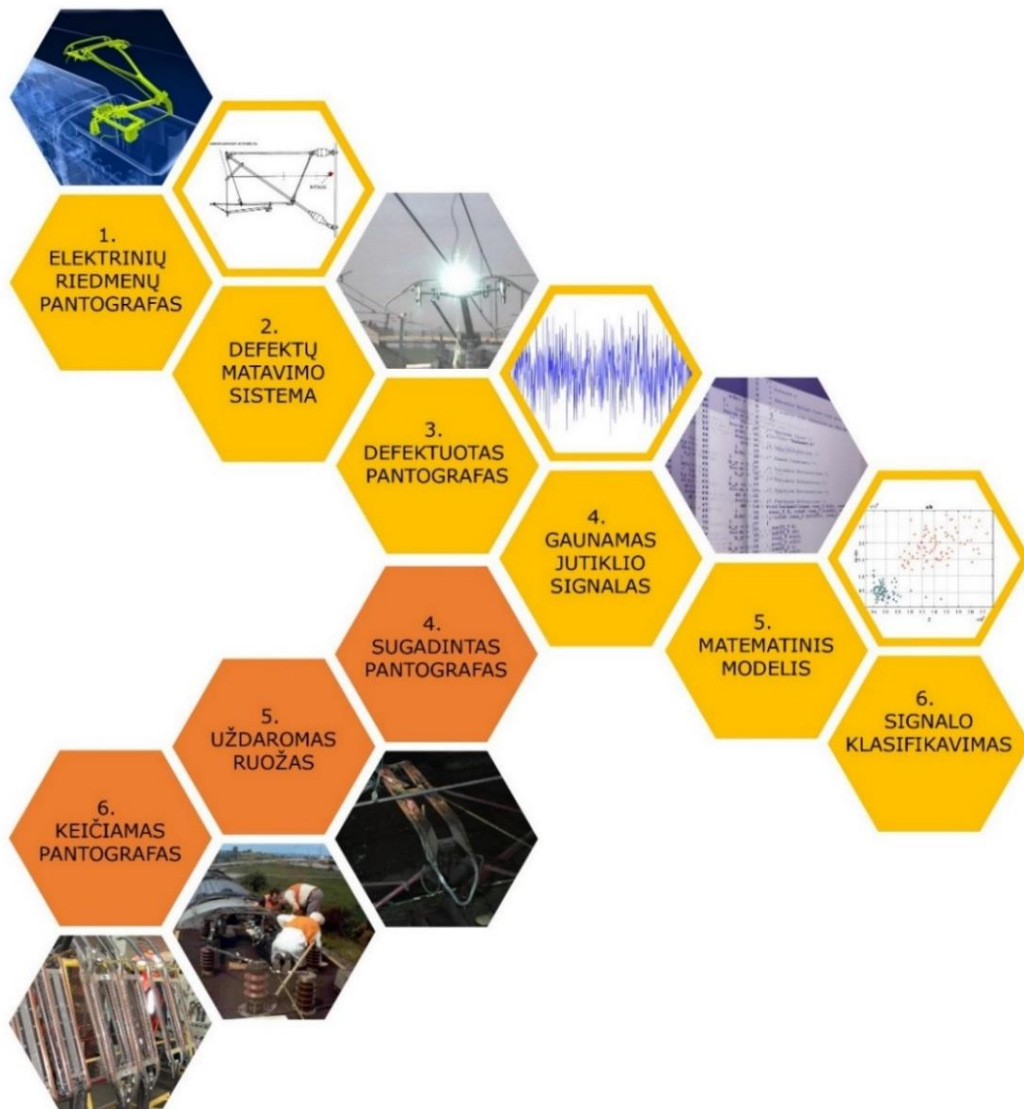
Dėl šių priežasčių pantografo diagnostikos signalui labiausiai tiktų kontaktinio tinklo virpesių signalas. Tokiu atveju galima būti kurti stacionarios diagnostikos sistemos koncepciją, kuri tirtų kontaktinio tinklo virpesius pasirinktame taške traukinio pravažiavimo metu. Traukinio pantografu sukelti mechaniniai virpesiai būtų užfiksuojami vibracijų jutikliais, skaitmenizuojami ir analizuojami, siekiant identifikuoti pravažiuojančio traukinio pantografo būklę.

Plačiau panagrinėkime planuojamus naudoti pjezoelektrinius jutiklius pantografo defektams nustatyti. Šie jutikliai paverčia vieną energijos formą kita ir yra plačiai naudojami matavimams. Pjezjutikliai konvertuoja virpesius į elektrinį signalą. Susidūrę su mechaniniais smūgiais, pjezoelektriniai keitikliai sukuria pakankamą elektrinę iškrovą, kuri pakeičia molekulių išsidėstymo kryptį skystuosiuose kristaluose (2.1 paveikslas). Elektrinis signalas, elektros įtampa ar elektros krūvis, kurį generuoja jutiklis, yra proporcingas jį veikiančiam jėgos dydžiui arba virpesių poslinkiui. Jutiklis generuoja elektrinį signalą, kurį toliau yra įmanoma matematiškai apdoroti matematinės analizės būdais.







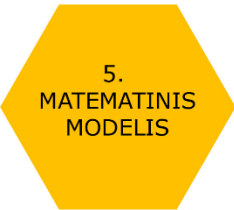

2.1 pav. Pjezoelektrinis efektas kvarco kristale [16].

Iš anksto sunku būtų atsakyti, ar užfiksuotos vibracijos tinkamai atspindi pantografo kontaktinio paviršiaus defektus ir ar galėtų būti pritaikytos automatizuotai diagnostikos sistemos. Šio darbo tikslas yra išanalizuoti pjezoelektriniu mechaninių virpesių jutikliu priimamo signalo pritaikymą pantografo diagnostikos sistemai. Šiuo tikslu sudarytas koncepcinis modelis (2.2 paveikslas) ir suplanuoto tyrimo eiliškumo planas (2 lentelė).

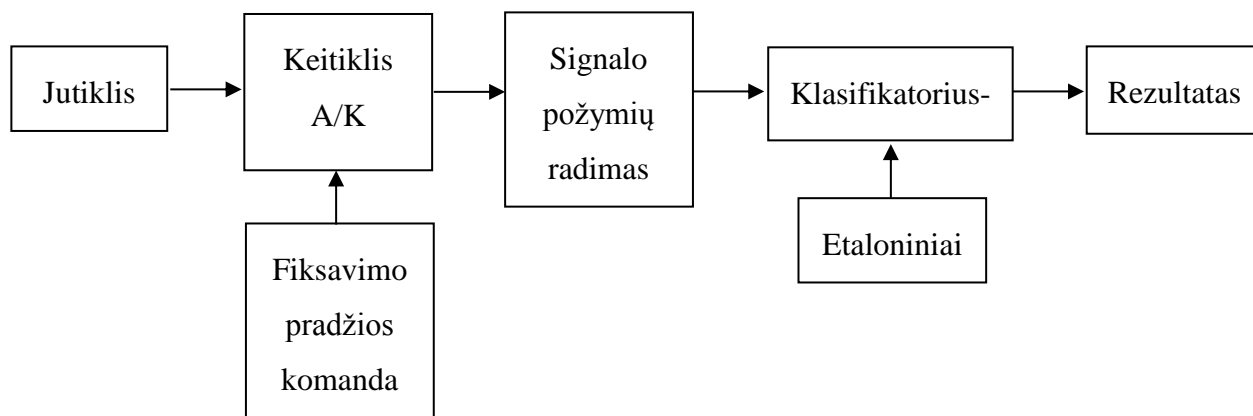


2.2 pav. Koncepcinio modelio schema.

2 lentelė. Suplanuoto tyrimo eiliškumo planas.

| Objektas  | Aprašymas  |
|---|--|
|    | <p>Elektrinių riedmenų pantografo būna kelių rūšių:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• variniai,</li> <li>• grafitiniai,</li> <li>• metalo keramikos.</li> </ul> <p>Šiam tyrimui atlikti pasirinktas varinio pantografo atitikmuo.</p> |
|    | <p>Šio tyrimo metu bus analizuojama galimybė aptikti pantografo defektus su pjezoelektriniu jutikliu.</p>  |
|   | <p>Atliekant tyrimus pantografo defektui nustatyti bus naudojami variniai defektuoti pantografo atitikmenys (pažeistu paviršiumi).</p>   |
|  | <p>Gautas jutiklio signalas bus priimamas su Arduino Uno valdikliu (kaip analoginis įėjimas) ir skaitmeniniu oscilografu.</p>  |
|  | <p>Gauto signalui apdoroti planuojama naudoti matematinių modelių metodus, kurie aprašyti literatūros analizės dalyje.</p>   |
|  | <p>Ištyrus gauto signalo informatyviuosius požymius, bus bandoma signalus priskirti tam tikrai naudotai pantografo rūšiai (su defektu ir be defekto).</p>  |

Siekiant įgyvendinti pasiūlytą koncepcijos modelį, reikalingos techninės priemonės tarpusavyje susietos 2.3 paveiksle pateiktu principu.



**2.3 pav.** Diagnostikos sistemos funkcinė schema.

Siekiant ištirti virpesių signalus, pirminis tyrimo etapas numatomas ne realiomis (eksploatavimo), o laboratorinėmis sąlygomis išnaudoti galimybes jas kiek įmanoma priartinant prie realių.



## 2.4. Pantografo defektų imitavimo bandymo stendas

KTU Automatikos katedros transporto automatikos laboratorijoje sumontuotas stendas (2.4 paveikslas), kuriame panaudotas kontaktinio tinklo laido fragmentas, įtemptas tarp jį laikančių atramų kartu su originaliais kontaktinio tinklo laido tvirtinimo laikikliais. Šis stendas sukurtas siekiant maksimaliai tiksliai atkartoti realias pantografo eksploataavimo sąlygas. Kuriant stendą buvo svarbu numatyti ir galimus jutiklio tvirtinimo taškus, ir pritvirtinimo metodus, siekiant gauti kuo geresnės kokybės diagnostikos signalą iš jutiklio.



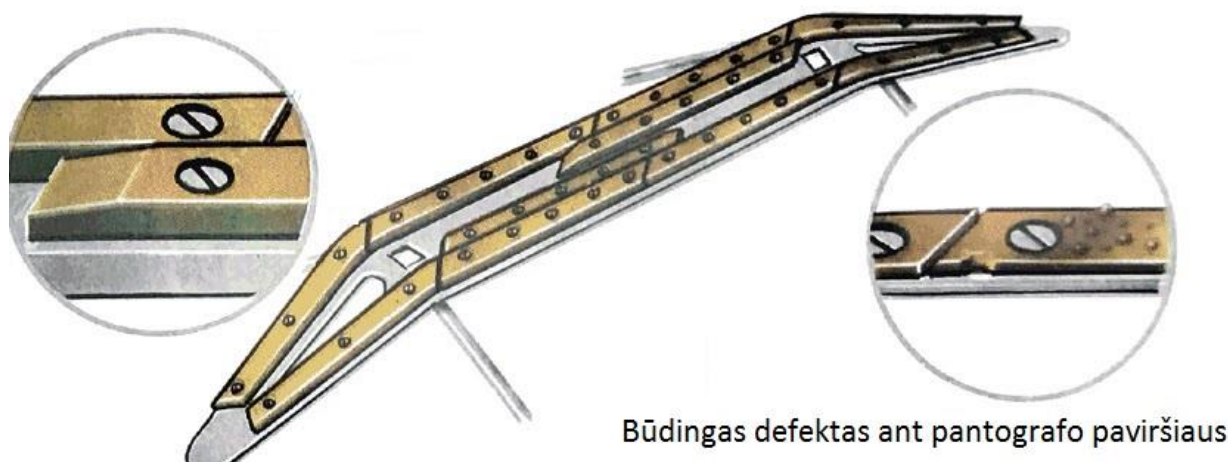
2.4 pav. Bandymo stendas su signalo priėmimo aparatūra.

## **2.5. Pjezoelektrinio jutiklio tvirtinimo vieta bandymo stende**

Surinktame bandymo stende reikia numatyti tinkamą vietą pjezoelektriniam jutikliui. Jutiklis turi būti tvirtinamas prie bandymo stendo taip, kad jutiklio sąlyčio su kontaktinio tinklo laidu kontaktas vibracijoms būtų kuo geresnis. Kad pavyktų išpildyti šias sąlygas, reikia atsisakyti mechaninio tvirtinimo elementų (suveržimų, prisukimų). Buvo priimtas sprendimas jutiklį magnetu pritvirtinti prie kontaktinio tinklo laido laikiklio suveržimo varžto. Tiesa, originalios komplektacijos kontaktinio tinklo laido laikiklio varžtas buvo netinkamas (nepalaikė magnetinės traukos) dėl varžto fizikinių savybių. Jis yra pagamintas iš vario, dengtas cinko sluoksniu. Tokios kontaktinio tinklo laido tvirtinimo elemento varžto savybės neleido patikimai pritvirtinti jutiklio, todėl buvo priimtas sprendimas jį pakeisti. Buvo pasirinktas varžtas M8, pagamintas iš geležies lydinio, dengtas cinko sluoksniu. Toks sprendimas leido patikimai pritvirtinti jutiklį prie bandymo stendo. Bandymų metu buvo pastebėta, kad jutiklio jautrumas dėl šio mechaninio tvirtinimo elemento nenukentėjo.

## 2.6. Imituojamas pantografo defektas

Iš atliktos literatūros analizės matyti, kad pantografo defekto rūšių nėra labai daug. Literatūroje yra minimi 5–6 defektų tipai, kurie dažniausiai pasitaiko eksploatuojant elektrinės traukos riedmenis. Absoliuti dauguma defektų pasireiškia pantografo medžiagos trūkumais pantografo kontaktiniame paviršiuje (2.5 paveikslas). Dažniausiai susiduriama su vienu arba keliais šalia esančiais įdubimais ant pantografo paviršiaus. Buvo pastebėtas vienas neįprastas defekto tipas. Tai ant varinio pantografo paviršiaus atsirandantis vario prieaugis. Taip nutinka dėl termodinaminių savybių pantografo paviršiuje. Esant tam tikroms aplinkybėms dėl mechaninio, termodinaminio poveikio eksploatuojant elektrinius riedmenis pantografo paviršiuje susiformuoja oro burbuliukai, kurie pantografo paviršių padaro nelygų.



2.5 pav. Analizuotoje literatūroje pavaizduota dažniausiai aptinkama defekto forma [17]

Siekiant imituoti defektuotą pantografą buvo pasigaminta imitacinė varinė plokštelė, kurioje yra vienas iš būdingiausių pantografų defektų. Šiam bandymui buvo naudojama varinė šyna, kurioje yra vienas gilus paviršiaus įdubimas (2.6 paveikslas).



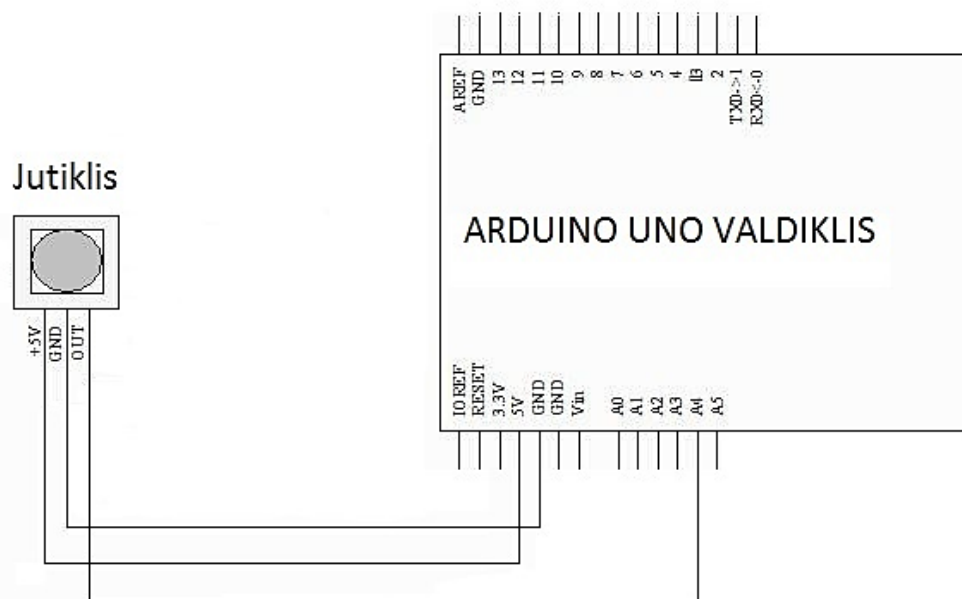
2.6 pav. Imituojama pantografo defekto forma.

## 2.7. Signalo priėmimo aparatūra

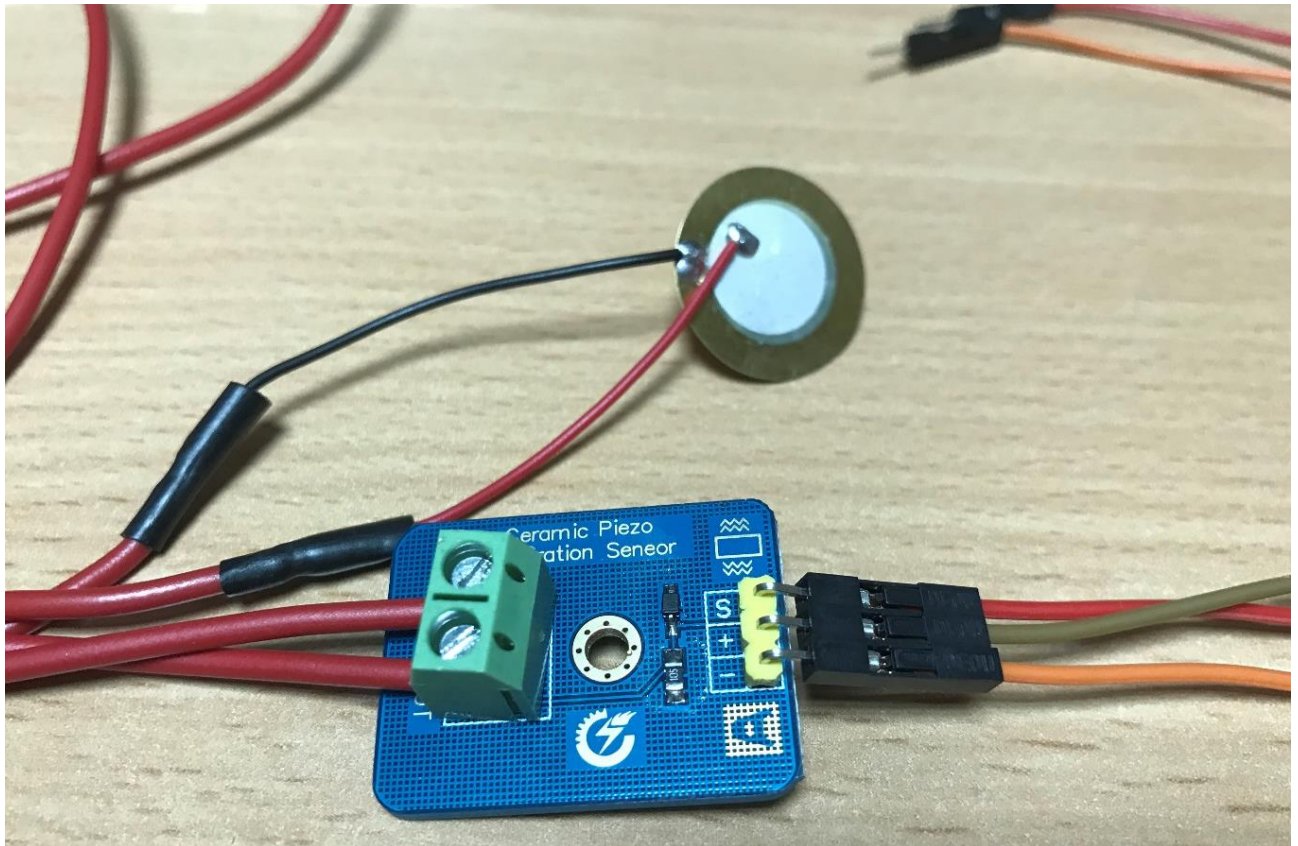
Atliekant šį tyrimą suplanuota signalą priimti keliais būdais. Vienas iš jų yra signalo priėmimas valdikliu, tam naudojamas analoginis įėjimas į valdiklį. Šiam bandymui buvo pasirinktas Arduino kompanijos gaminys Arduino UNO (2.7 paveikslas). Šio valdiklio specifikacijos:

- 14 skaitmeninių įėjimų,
- 14 skaitmeninių išėjimų,
- 6 analoginiai įėjimai,
- 16 MHz procesorių,
- USB jungtis.

Taip pat analizuojant literatūrą apie šį Arduino gaminį buvo pastebėta, kad jis turi galimybę analoginį įėjimo signalą atvaizduoti Matlab aplinkoje. Šio bandymo metu į analoginį įėjimą buvo prijungtas pjezoelektrinis jutiklis (2.8 paveikslas).



2.7 pav. Arduino UNO prijungimo schema.



**2.8 pav.** Darbe naudojamas pjezoelektrinis jutiklis.

Tokiu būdu priimtas signalas galėtų būti užfiksuotas ir apdorojamas realiu laiku ir programinėje įrangoje realizuotas klasifikatorius galėtų iš karto duoti automatizuotos diagnostikos sistemą rezultatą.

Norint atvaizduoti analoginio signalo įėjimą Matlab aplinkoje reikia atlikti kelis veiksmus, kad gaunamas signalas būtų atvaizduotas šiame programiniame pakete. Pirmiausia Matlab komandiniame lange rašomas programinis kodas, kad programinis paketas susijungtų su valdikliu. Matlab komandiniame lange parašoma kreipties funkcija į valdiklį kartu nurodant ir prisijungimo COM portą, kuriuo valdiklis yra prisijungęs prie kompiuterio (2.9 paveikslas).

```
= arduino('COM3', 'Uno')
```

**2.9 pav.** Komanda Matlab komandiniame lange prisijungti Arduino Uno mikrovaldiklį.

Gaunama valdiklio nustatymų informacija pateikta 2.10 paveiksle.

a =

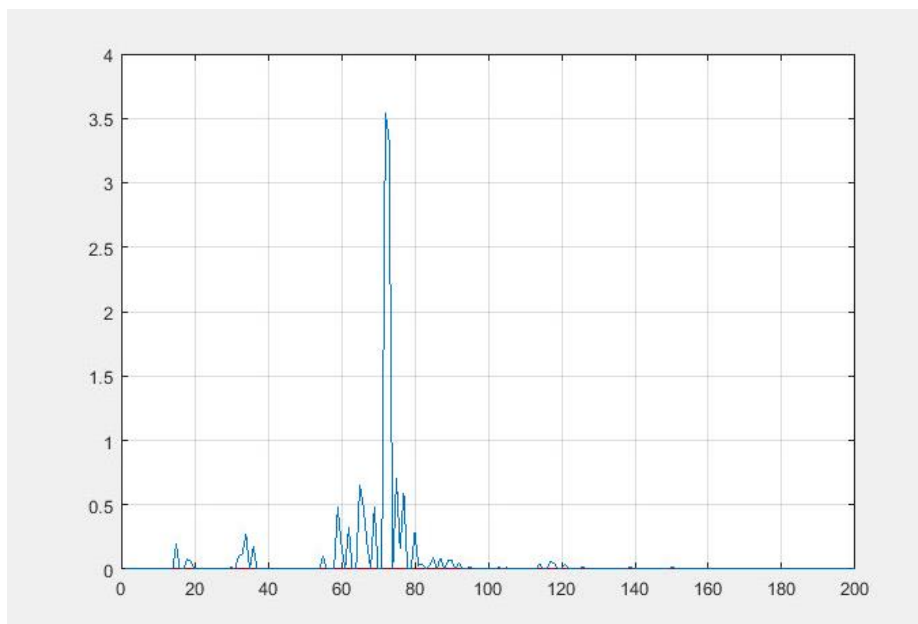
arduino with properties:

```
Port: 'COM3'  
Board: 'Uno'  
AvailableAnalogPins: [0 1 2 3 4 5]  
AvailableDigitalPins: [2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13]  
Libraries: {'I2C' 'SPI' 'Servo'}
```

**2.10 pav.** Prijungus valdiklį prie Matlab paketo atvaizduojama informacija apie įrenginį.

Gavus informaciją apie prijungtą valdiklį prie Matlab paketo rašomas programinis kodas analoginiam signalui nuskaityti:

```
clc  
clear all  
a = arduino('COM3', 'Uno')  
  
for i= 1:200  
eile(i,1)=i*1;  
Sign1(i,2)= readVoltage(a, 'A4');  
plot(eile ,Sign1); hold on;  
pause (0.0001);  
grid on;  
end  
eile;  
Sign1;  
arduino2=[eile Sign1];
```



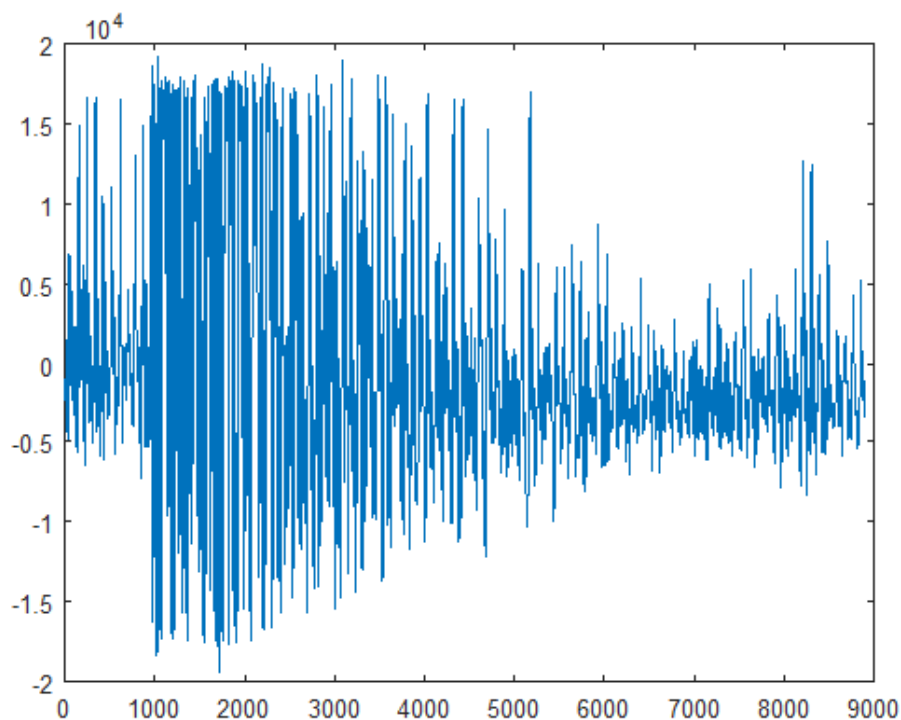
**2.11 pav.** Užfiksuotas defekto sukeltų virpesių signalas.

Galime padaryti išvadą, kad gautas signalas yra defekto signalo gaubtinė (2.11 paveikslas).

Alternatyviam signalui gauti buvo nutarta naudoti oscilografą FLUKE ScopeMeter 19xC su signalo įrašymo funkcija. Šio prietaiso charakteristikos:

- 100 MHz dažnių juosta,
- 4 įėjimo kanalai,
- 1,25 GS/s diskretizacija,
- 2 mV/div ... 100 mV/div jautrumo zona.

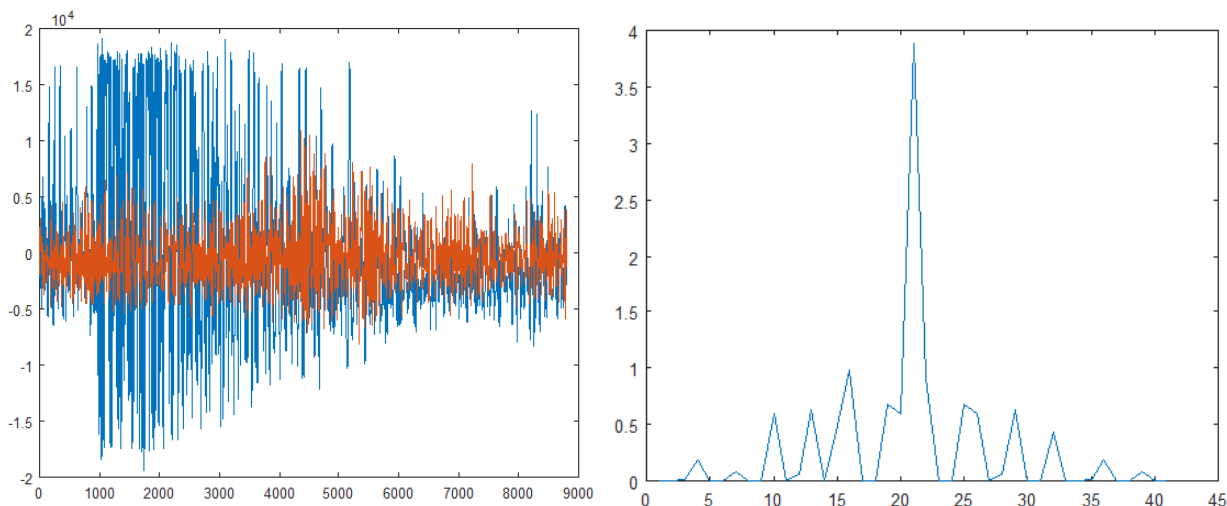
Atliekant eksperimentą su šiuo signalų atvaizdavimo prietaisu buvo pasitelkta ScopeMeter prietaiso galimybė įrašyti eksperimento rezultatus į šio prietaiso vidinę atmintį, o paskui su šiam prietaisui skirtu programiniu paketu „SW90W“ per USB/RS-232 sąsają perkelti gautus eksperimento signalus į kompiuterį. Per programinį paketą „SW90W“, atvaizduojantį įrašytą signalą, buvo pasitelkta komanda, kuri signalą perrašo į txt failus, o su MATLAB paketu nesudėtingai galime atvaizduoti ir apdoroti txt failuose aprašytus signalus. Išanalizavus priimamo signalo dažnines charakteristikas, buvo pasirinktas 44 kHz fiksuojamo signalo diskretizavimo dažnis. Oscilografo analogas/kodas keitiklis veikia 8 bitų tikslumu (2.12 paveikslas).



**2.12 pav.** Atvaizduotas signalas, gautas „FLUKE ScopeMeter“ oscilografu.

## 2.8. Gauto signalo apdorojimas, identifikacinių požymių radimas

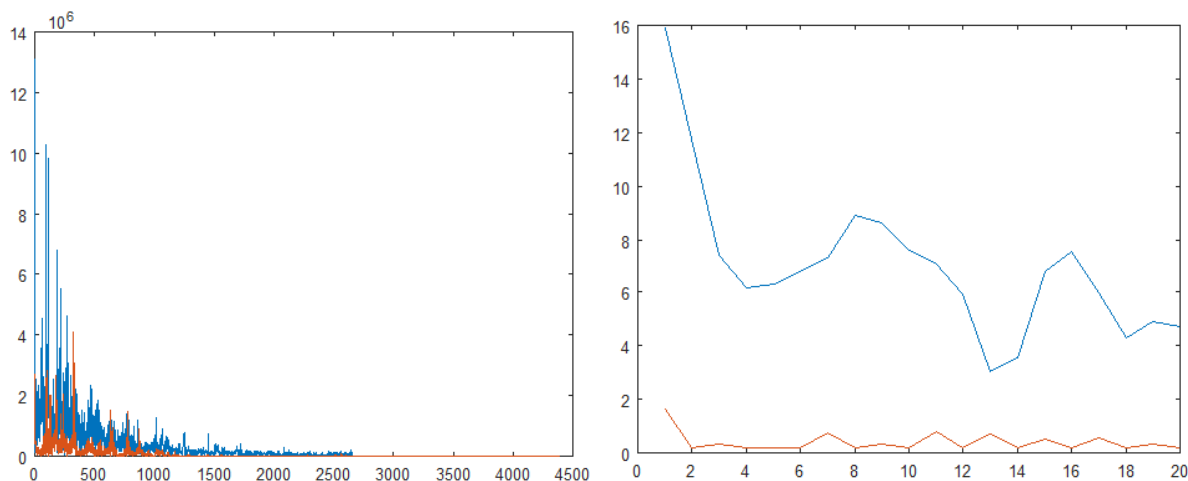
Atlikus eksperimentus KTU Automatikos katedroje surinktame bandymo stende su dviem skirtingais signalo priėmimo būdais (oscilografu ir Arduino valdikliu), gauti tokie pirminiai signalai. Abiejuose grafikuose atvaizduoti du gauti signalai (raudona spalva atvaizduotas sveiko pantografo signalas, o mėlyna spalva defektuoto pantografo signalas) (2.13 paveikslas).



**2.13 pav.** Gautas originalus signalas (kairėje pusėje signalas, gautas su oscilografu, dešinėje su valdikliu).

Iš gauto signalo negalime nustatyti signalo identifikacinių požymių, todėl šiems signalams taikome spektro funkciją (2.14 paveikslas):

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} dt. \quad (1.10)$$



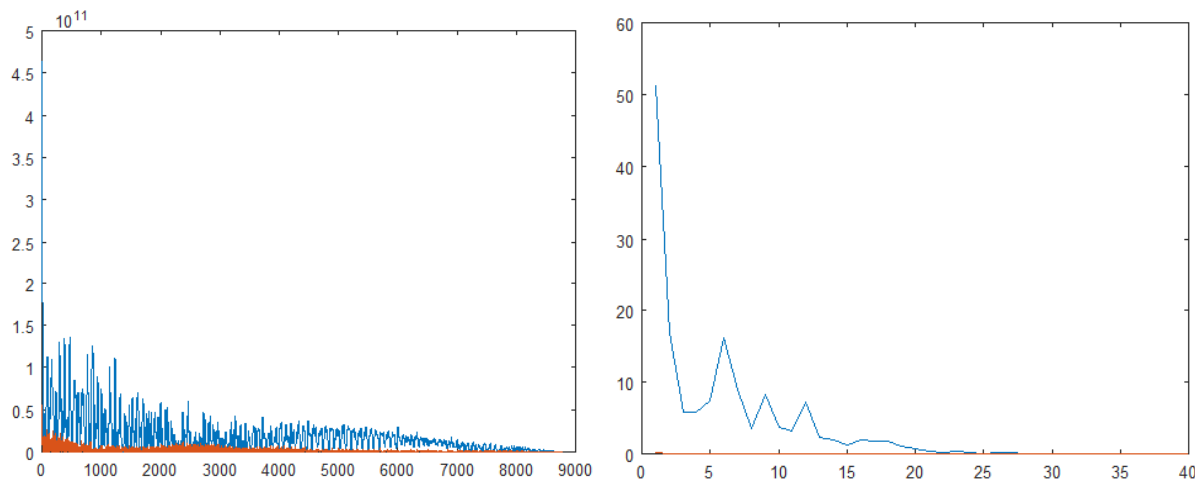
**2.14 pav.** Signalų spektrinė analizė (kairėje pusėje signalas, gautas su oscilografu, dešinėje su valdikliu).

Iš gautų duomenų galime matyti, kad signalų informacinių požymių nustatyti negalime. Dažnai praktikoje vietoje spektrinės signalų analizės yra naudojama taip pat laikinė signalų analizė. Iš jos galime



nustatyti duomenis apie signalų kitimo greitį, signalo trukmę, neskaidant signalo į harmonines dedamąsias. Tai taikome signalų autokoreliacinę funkciją (2.15 paveikslas), kurios išraiška yra:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s(t - \tau) dt. \quad (1.11)$$

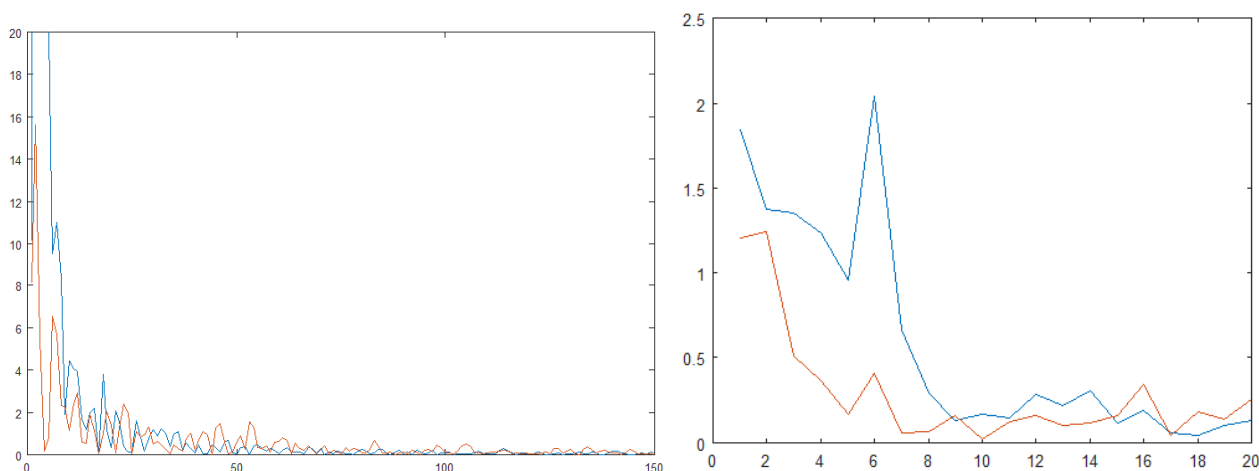


**2.15 pav.** Signalų autokoreliacinė analizė (kairėje pusėje signalas, gautas su oscilografu, dešinėje su valdikliu).

Iš gautos signalų autokoreliacinės funkcijos negalime identifikuoti signalo kaip defektuoto ar sveiko, todėl taikome kepstro funkciją. Iš šios funkcijos galime atlikti dviejų signalų kompoziciją, kuri bus jų kompleksinių kepstrų suma kepstro srityje.

$$c_x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\ln|X\varpi| + j\theta(\varpi)] e^{j\varpi n} d\varpi. \quad (1.29)$$

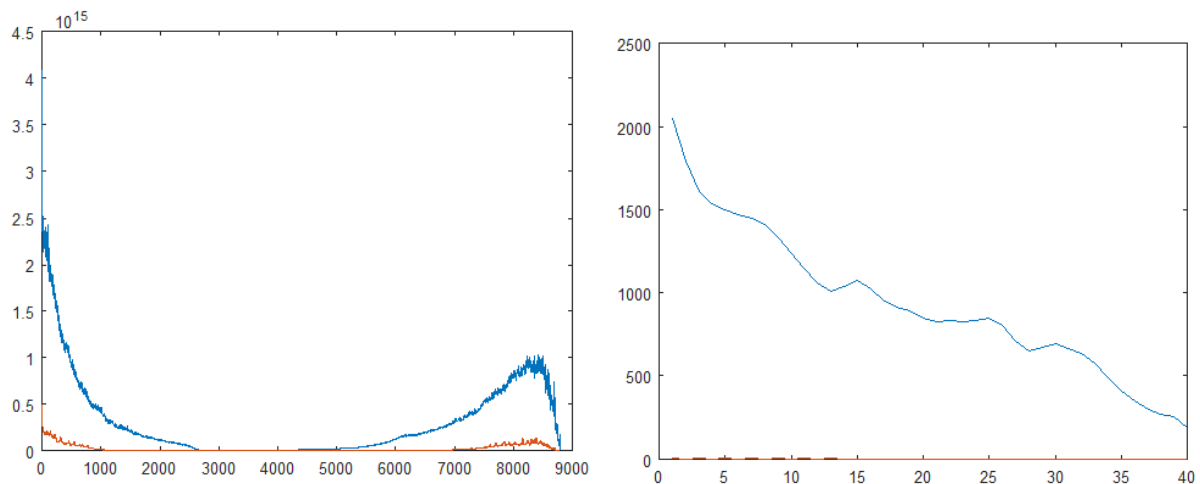
Literatūroje minima, kad kepstro funkcija dažnai taikoma kalbos atpažinimo sistemose, todėl įdomu paanalizuoti, ar ši funkcija suteiks informatyvių požymių iš pantografo defekto nustatymo signalo.



**2.16 pav.** Signalų kepstro funkcijos taikymas (kairėje pusėje signalas, gautas su oscilografu, dešinėje su valdikliu).

Kaip galime pastebėti, kepstro funkcijos taikymas pantografų defektų nustatymo signaluose neduoda norimų rezultatų (2.16 paveikslas). Šios funkcijos taikymas apdorojant defektuoto ir sveiko pantografo signalus duoda nepastoviai kintantį neapibrėžtą signalą. Deja, pantografų defekto nustatymo tyrime gautas signalas yra neinformatyvus.

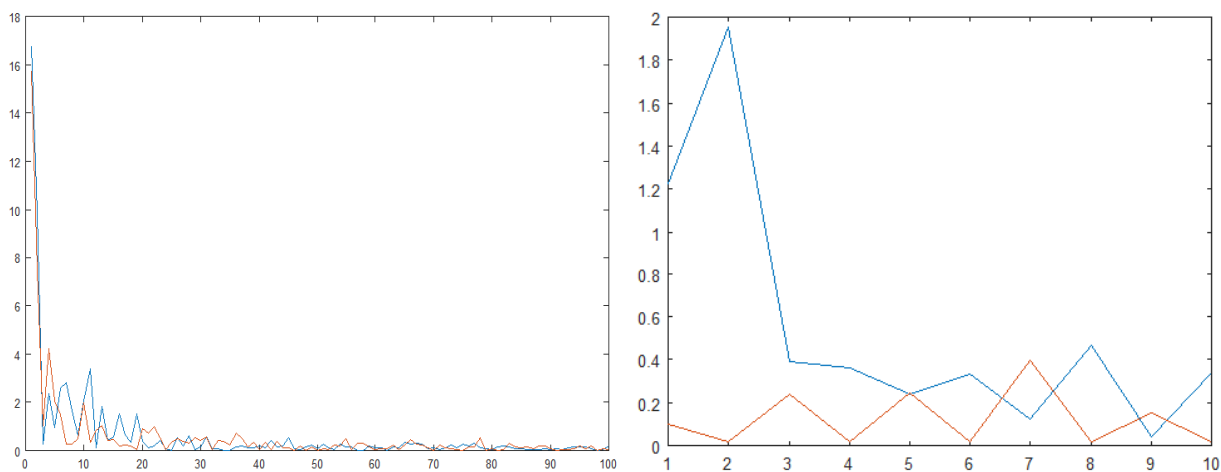
Apibendrinant iki šiol pantografo defekto nustatymo tyrime taikytas funkcijas, galima padaryti išvadas, kad nei signalo spektras, nei signalo kepstras ir signalo koreliacija norimų rezultatų atliktuose tyrimuose neduoda. Šio tyrimo metu yra ieškoma funkcijų transformacijų, kurias pritaikius pantografo defekto signalui būtų gauta kuo labiau apibrėžta funkcija. Kadangi iš jau taikytų funkcijų nepavyko gauti apibrėžto signalo, todėl tyrimą tęsiame taikydami transformacines funkcijas ne pantografo defekto signalui, o pantografo defekto signalo spektro funkcijai, kuriai taikome skirtingas transformacijas. Spektro funkcijai taikome spektro koreliacijos funkciją (2.17 paveikslas).



**2.17 pav.** Spektro koreliacijos funkcijos taikymas (kairėje pusėje signalas, gautas su oscilografu, dešinėje su valdikliu).

Iš pritaikytos funkcijos ir gautų rezultatų galime pastebėti, kad signalas yra determinuotas ir lengvai aprašomas. Taip pat galima matyti, kad akivaizdžiai skiriasi sveiko ir defektuoto signalo spektro koreliacijos signalų funkcijos vertės. Taikydami šią funkciją jau galime pastebėti gautų funkcijų informatyvius požymius, kurie apibūdintų signalo rūšį (sveikas ar defektuotas).

Tai pačiai spektro funkcijai taikome spektro kepstro funkciją (2.18 paveikslas).



**2.18 pav.** Spektro kepstro funkcijos taikymas (kairėje pusėje signalas, gautas su oscilografu, dešinėje su valdikliu).

Iš gautos spektro kepstro funkcijos rezultatų galime matyti, kad gautas signalas yra nedeterminuotas. Sunku pastebėti sveiko ir defektuoto signalo skirtumus vienas kito atžvilgiu. Deja, iš tokių gautų šio tyrimo rezultatų negalime išskirti signalo informatyvių požymių.

Atlikdami tyrimus taikėme:

- signalų spektrinę analizę;
- signalų autokoreliacinę analizę;
- signalų kepstro funkciją;
- spektro koreliacijos funkciją;
- spektro kepstro funkciją.

Apibendrinti rezultatai pateikti 3 lentelėje.

**3 lentelė.** Atliktų pantografo defektų nustatymo tyrimo taikytų transformacinių funkcijų apibendrinimas.

| <b>Eilės Nr.</b> | <b>Taikytos transformacijos</b> | <b>Signalų forma</b> | <b>Ar galima pastebėti skirtumus tarp signalų (sveiko ir defektuoto)?</b> | <b>Ar su taikyta transformacija galima nustatyti signalo tipą?</b> |
|------------------|---------------------------------|----------------------|---|--|
| 1.               | Signalų spektrinė analizė       | Nedeterminuotas      | Ne  | Ne   |
| 2.               | Signalų autokoreliacinė analizė | Nedeterminuotas      | Ne  | Ne   |
| 3.               | Signalų kepstro funkcija        | Nedeterminuotas      | Ne  | Ne   |
| 4.               | Spektro koreliacijos funkcija   | Determinuotas        | Taip  | Taip   |
| 5.               | Spektro kepstro funkcija        | Nedeterminuotas      | Ne  | Ne   |

## 2.9. Pantografo diagnostikos galimybių tyrimo apibendrinimas

Šiame tiriamajame skyriuje pantografo defekto signalas buvo priimamas:

- valdikliu Arduino UNO (kaip analoginis įėjimas),
- oscilografu FLUKE ScopeMeter 19xC.

Iš gautų eksperimento duomenų galime teigti, kad moksliniams tyrinėjimams atlikti tikslesni rezultatai yra gaunami naudojant oscilografą. Taip yra todėl, kad gautas signalas yra sudarytas iš daugiau eksperimento reikšmių (signalas fiksuotas didesniu taktavimo dažniu) nei su kitu šiame darbe naudojamu signalo priėmimo prietaisu. Gautiems pantografo defekto signalams apdoroti buvo taikomos įvairios matematinės funkcijos. Šių funkcijų taikymo tikslas išskirti pantografo defekto signalo informacinius požymius, kuriais remiantis būtų įmanoma atskirti skirtingus signalus.


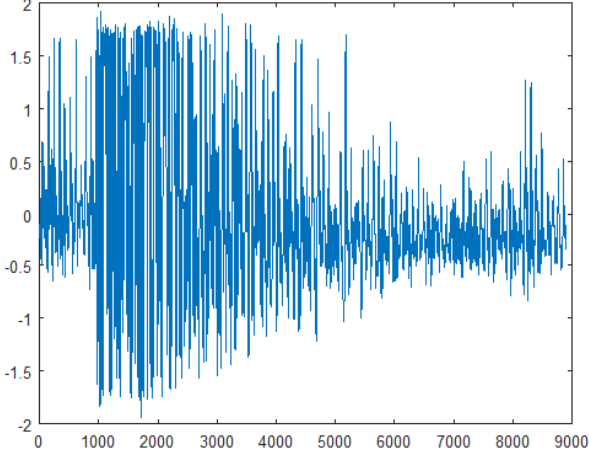
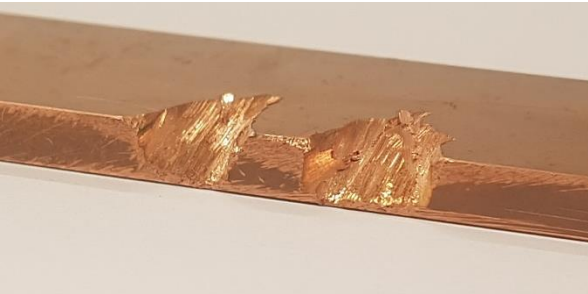
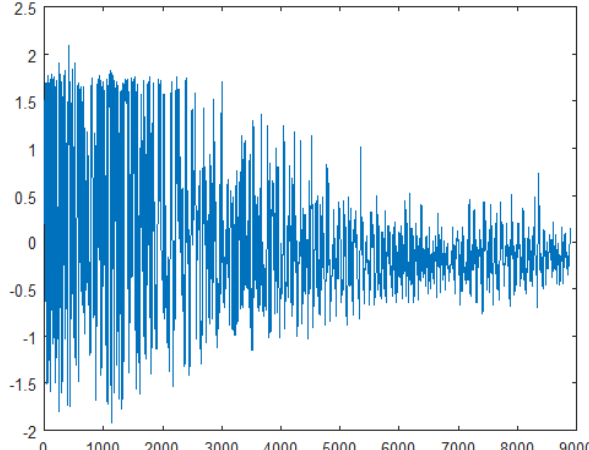
Taikant šiame darbe jau minėtas funkcijas buvo gauti rezultatai, parodantys, kad iš pantografo defekto signalui apdoroti naudotų funkcijų vienintelės spektro koreliacijos funkcijos taikymas defekto signalui davė informatyvią ir pritaikomą transformacijos funkciją. Šią funkciją taikydami pirminiam signalui galime nustatyti signalo informatyvius požymius. Tolesniame darbo skyriuje nagrinėsime spektro koreliacijos funkcijos taikymą skirtingiems pantografų defektams identifikuoti. Kadangi signalų defektų priėmimas Arduino Uno valdikliu davė mažiau tikslius rezultatus nei signalo priėmimas oscilografu FLUKE ScopeMeter, tęsiant tyrimą signalui gauti bus naudojamas tikslesnis prietaisas.

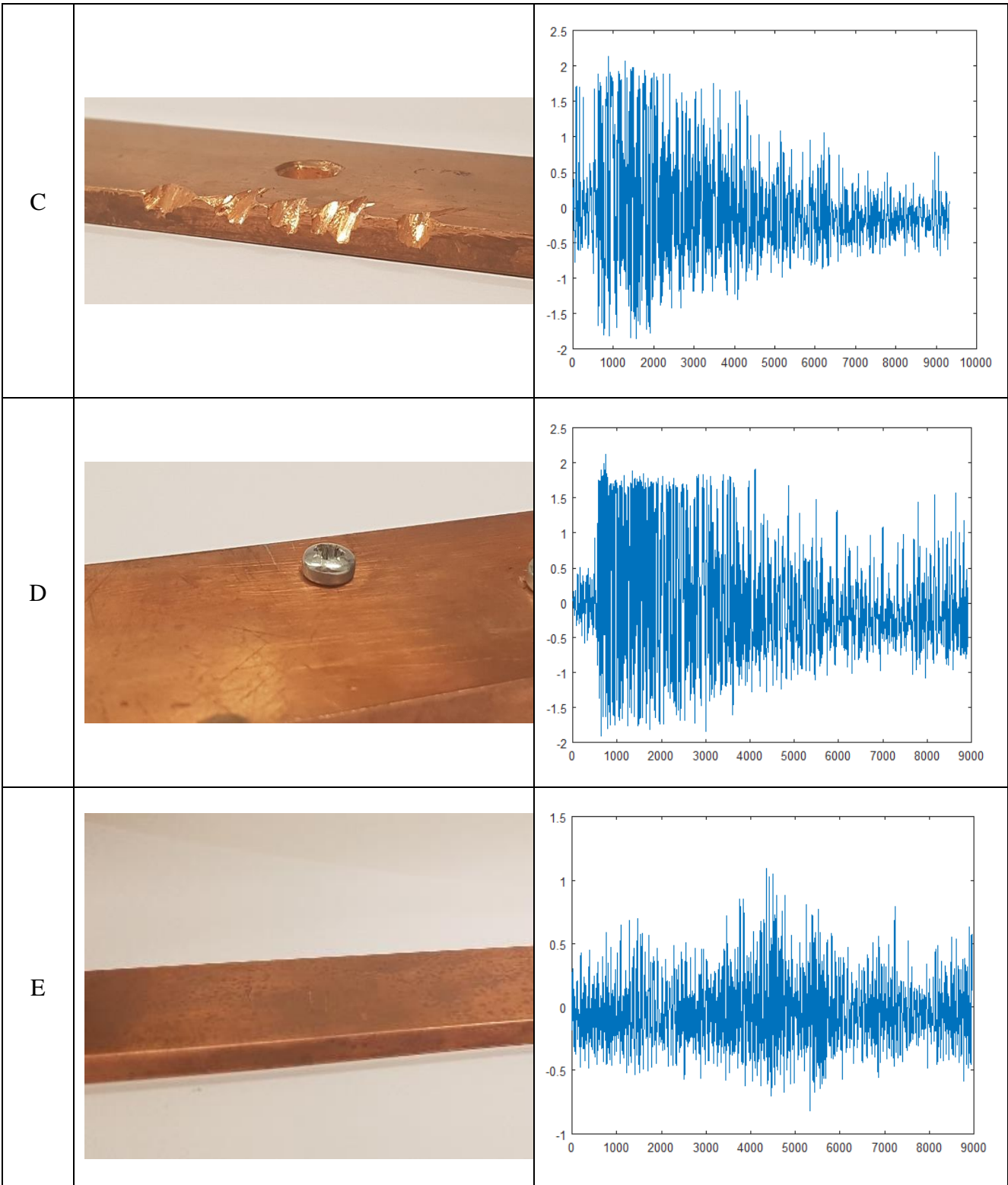
### 3. PANTOGRAFO DEFEKTŲ IDENTIFIKAVIMO TYRIMAS

Iš antrame šio darbo skyriuje atlikto defektų tyrimo nustatėme, kad taikant spektro koreliacijos funkciją defektuotiems signalams apdoroti gaunami informaciniai požymiai iš pirminio signalo apie defektus, esančius pantografo paviršiuje.

Trečiame skyriuje bus tiriamas spektro koreliacijos funkcijos pritaikymas kitiems būdingiems pantografo defektams nustatyti. Absoliuti dauguma defektų pasireiškia pantografo medžiagos paviršiaus deformacija. Dažniausiai aptinkami vienas arba šalia esantys keli įdubimai ant pantografo paviršiaus. Tačiau yra užfiksuotų atvejų, kad ant pantografo paviršiaus būna ne medžiagos trūkumas, o prieaugis. Siekiant imituoti visus šiuos dažniausiai pasikartojančius pantografo defektų tipus, tyrimui atlikti buvo pagamintos varinės plokštelės su skirtingus defektus imituojančiais paviršiais (4 lentelė).

4 lentelė. Dažniausi pantografo paviršiaus defektų tipai ir jų signalai.

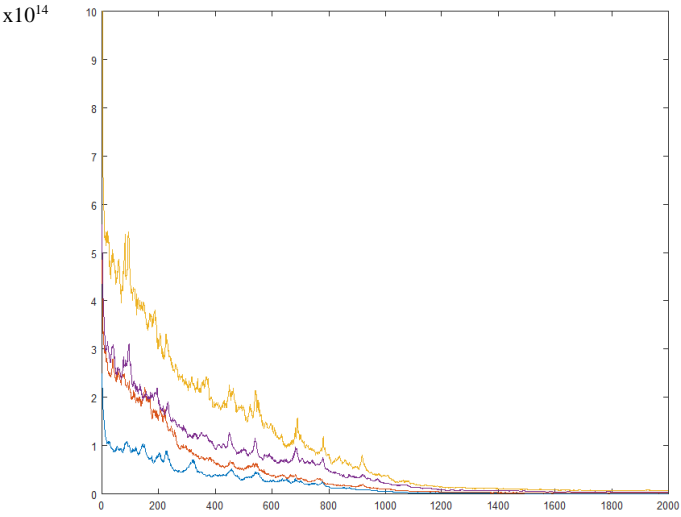
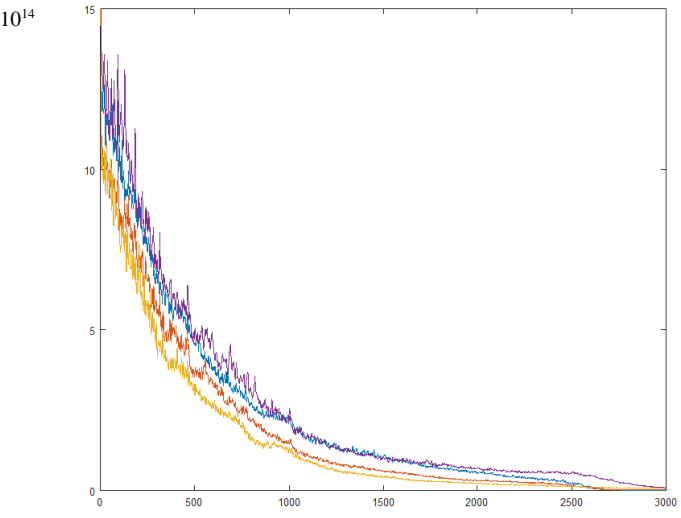
| Klasės pavadinimas | Defekto vaizdas   | Defekto pirminis signalas  |
|--------------------|---|--|
| A                  |  |  |
| B                  |  |  |



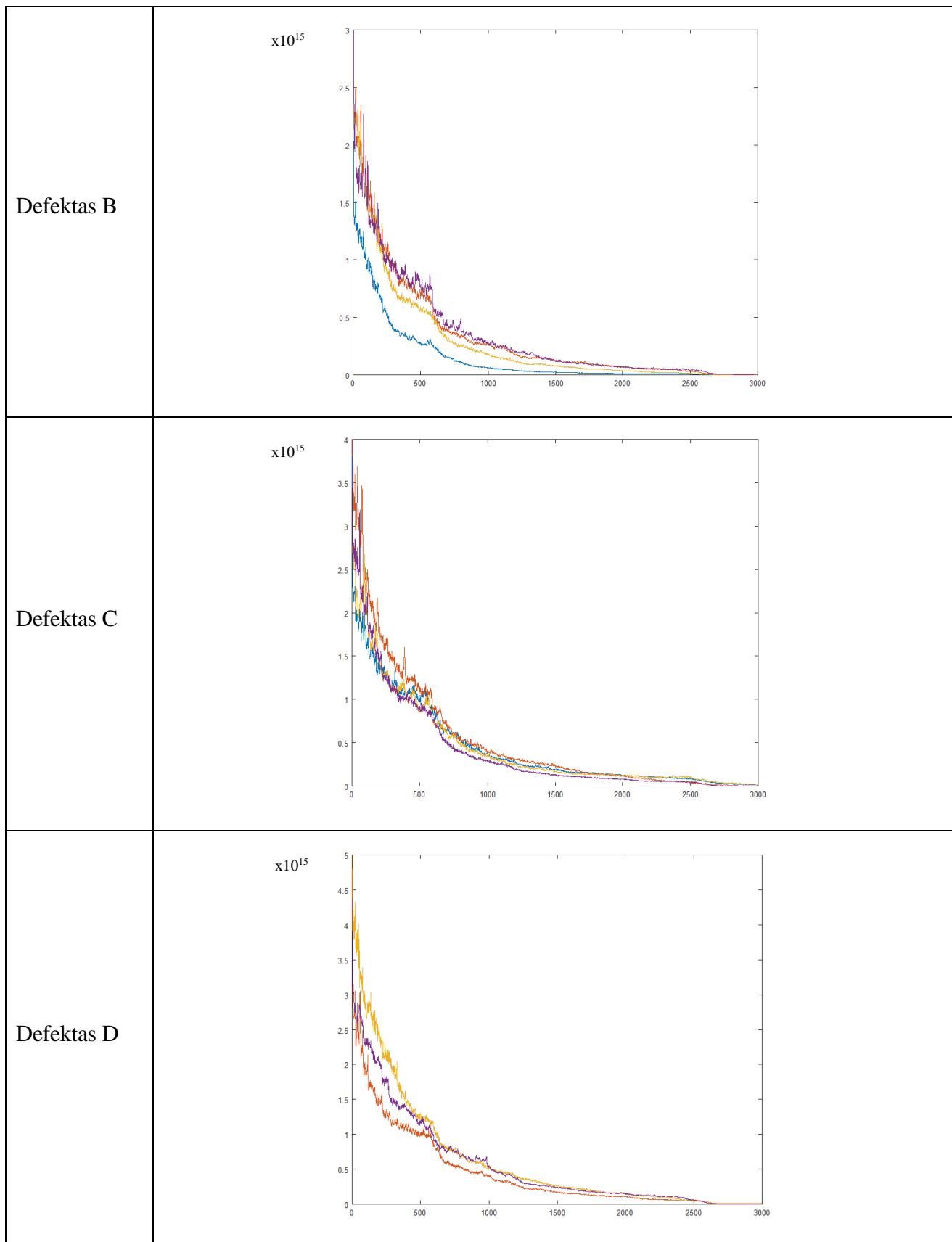
### 3.1. Informatyviųjų klasifikavimo požymių radimas

Siekdami, kad tiriamasis darbas būtų detalesnis, tirsime galimybę automatizuotai identifikuoti skirtingus defektų tipus. Eksperimento metu buvo užfiksuoti kiekvienos rūšies defekto signalai (sveiko signalo ir a, b, c, d defektų signalai) – po keturis skirtingus kiekvieno defekto sukeltus signalus. Šiems visiems signalams apdoroti taikome spektro koreliacijos funkciją. Duomenys pateikiami 5 lentelėje.

5 lentelė. Skirtingiems signalams pritaikytos spektro koreliacijos funkcijos.

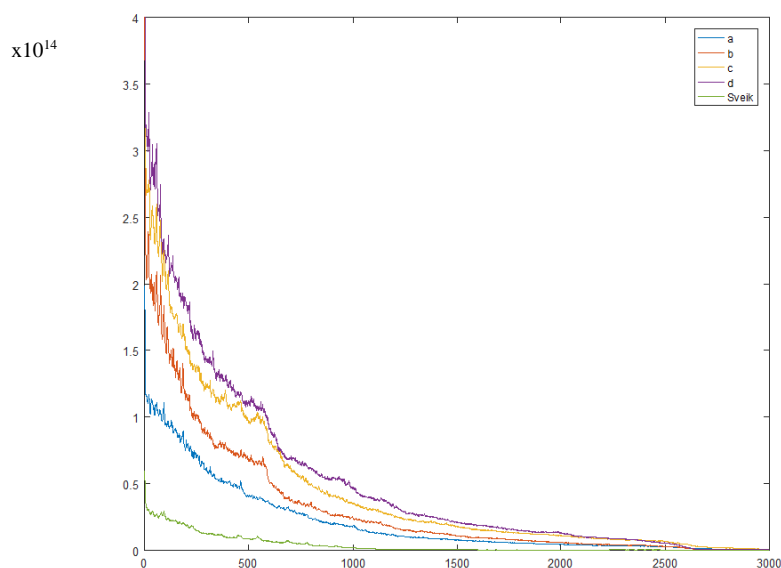
| Signalų pavadinimas | Šiems signalams pritaikytos spektro koreliacijos funkcijos                           |
|---------------------|--|
| Sveikas             |   |
| Defektas A          |  |





Iš gautų funkcijų formos ir rezultatų galime teigti, kad signalai yra determinuoti. Taip pat galime pastebėti, kad akivaizdžiai skiriasi skirtingų klasių defektų signalų vertės pasirinktuose ordinatės taškuose, taikant spektro koreliacijos funkcijas. Kadangi 5 lentelėje kiekviename defektų tipe grafikuose

yra atvaizduota po 4 skirtingus tos defektų rūšies bandymus, pasitelkdami geometrinių klasifikatorių principus, galima teigti, kad klasifikavimo požymiams rasti būtų tikslinga naudoti kiekvienos klasės signalų vidurkį (kurį sudaro keturi skirtingi tos rūšies signalų variantai) (3.1 paveikslas).



**3.1 pav.** Signalų vidurkiai pritaikius spektro koreliacijos funkcijas skirtingiems signalų tipams.

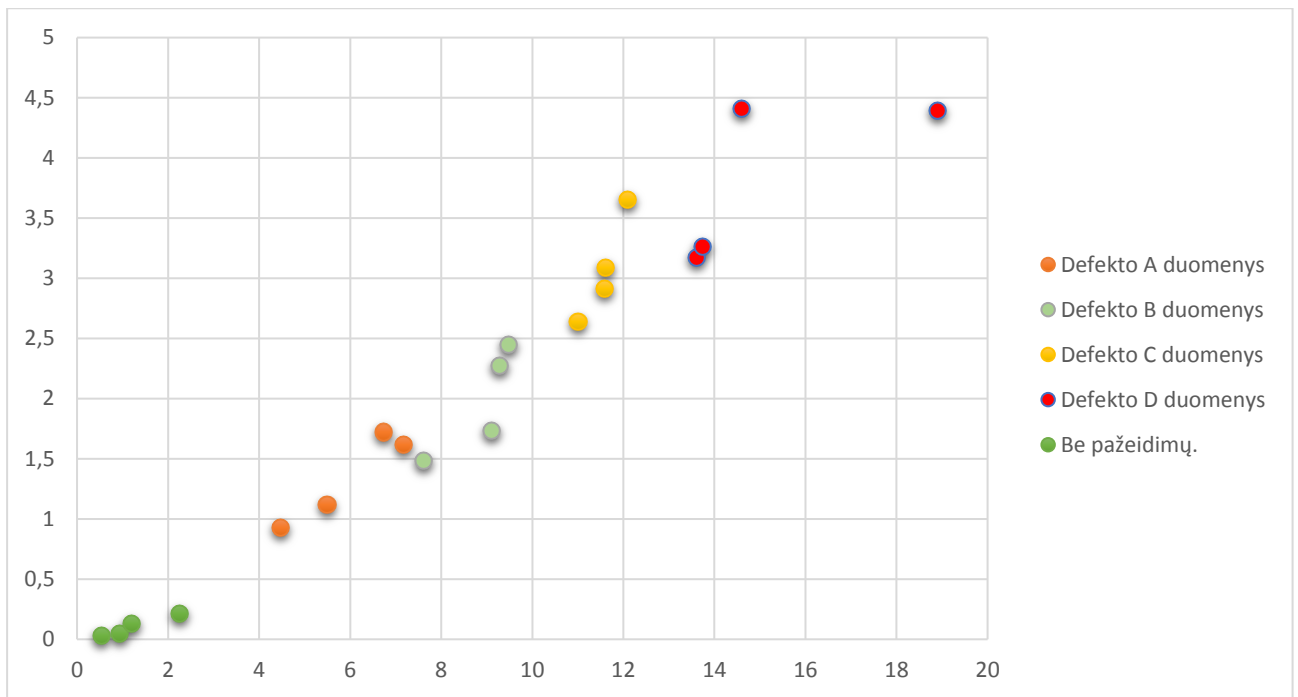
Iš gautų duomenų, kurie pavaizduoti 3.1 paveiksle, galime teigti, kad skirtingų klasių funkcijų vidurkiai išsiskiria skirtingai. Labiausiai skiriasi sveiko signalo funkcija – jos reikšmė mažiausia (grafike pavaizduota funkcija žalia spalva). Kitų skirtingų klasių defektų identifikavimo funkcijos yra arčiau vienos kitų, tačiau skiriasi tarpusavyje. Iš to galime daryti išvadą, kad, pjezoelektriniu jutikliu užfiksuotam kontaktinio tinklo virpesių signalui pritaikius spektro koreliacijos funkciją, galima ne tik nustatyti defekto buvimo faktą (sveikas signalas ar su defektu), bet ir defekto klasę (kurios rūšies defektas sukėlė signale užfiksuotus virpesius).

Prenkant tiriamų signalų informatyviuosius klasifikavimo taškus, galima įsivaizduoti, kad klasifikavimui taikysime geometrinius klasifikatorius. Tada klasifikavimo požymiais turėtų būti tokie taškai, kurių kiekvienos klasės vidurkiai metrinėje erdvėje bus kuo labiau nutolę vieni nuo kitų, o skirtingų klasių požymių aibės turėtų nepersidengti arba persidengti kuo mažiau. Tam tikslui klasifikavimo požymiais galima parinkti koreliacijos funkcijos taškus tokiose ordinatėse, kuriose skirtingų klasių funkcijos labiausiai išsiskiria vienos nuo kitų. Šiuo atveju parenkami 300 ir 1100 taškai. Šių funkcijų reikšmės tuose taškuose yra pavaizduotos 6 lentelėje.

6 lentelė. Signalų reikšmės 300 ir 1100 taškuose.

| Signalų pavadinimas      | 300 taško reikšmė signale | 1100 reikšmė signale |
|--------------------------|---------------------------|----------------------|
| Be pažeidimų signalas 1  | 0,53                      | 0,03                 |
| Be pažeidimų signalas 2  | 0,93                      | 0,05                 |
| Be pažeidimų signalas 3  | 2,26                      | 0,21                 |
| Be pažeidimų signalas 4  | 1,21                      | 0,13                 |
| Defektuotas signalas A 1 | 6,73                      | 1,72                 |
| Defektuotas signalas A 2 | 5,49                      | 1,12                 |
| Defektuotas signalas A 3 | 4,4                       | 0,93                 |
| Defektuotas signalas A 4 | 7,16                      | 1,62                 |
| Defektuotas signalas B 1 | 9,29                      | 2,27                 |
| Defektuotas signalas B 2 | 7,62                      | 1,48                 |
| Defektuotas signalas B 3 | 9,49                      | 2,45                 |
| Defektuotas signalas B 4 | 9,12                      | 1,73                 |
| Defektuotas signalas C 1 | 11,62                     | 3,09                 |
| Defektuotas signalas C 2 | 12,1                      | 3,65                 |
| Defektuotas signalas C 3 | 11,6                      | 2,91                 |
| Defektuotas signalas C 4 | 11,01                     | 2,64                 |
| Defektuotas signalas D 1 | 13,62                     | 3,17                 |
| Defektuotas signalas D 2 | 13,74                     | 3,26                 |
| Defektuotas signalas D 3 | 18,9                      | 4,39                 |
| Defektuotas signalas D 4 | 14,6                      | 4,41                 |

Šiuos taškus, kurie pateikti 6 lentelėje, atvaizduojame grafiškai 3.2 paveiksle.



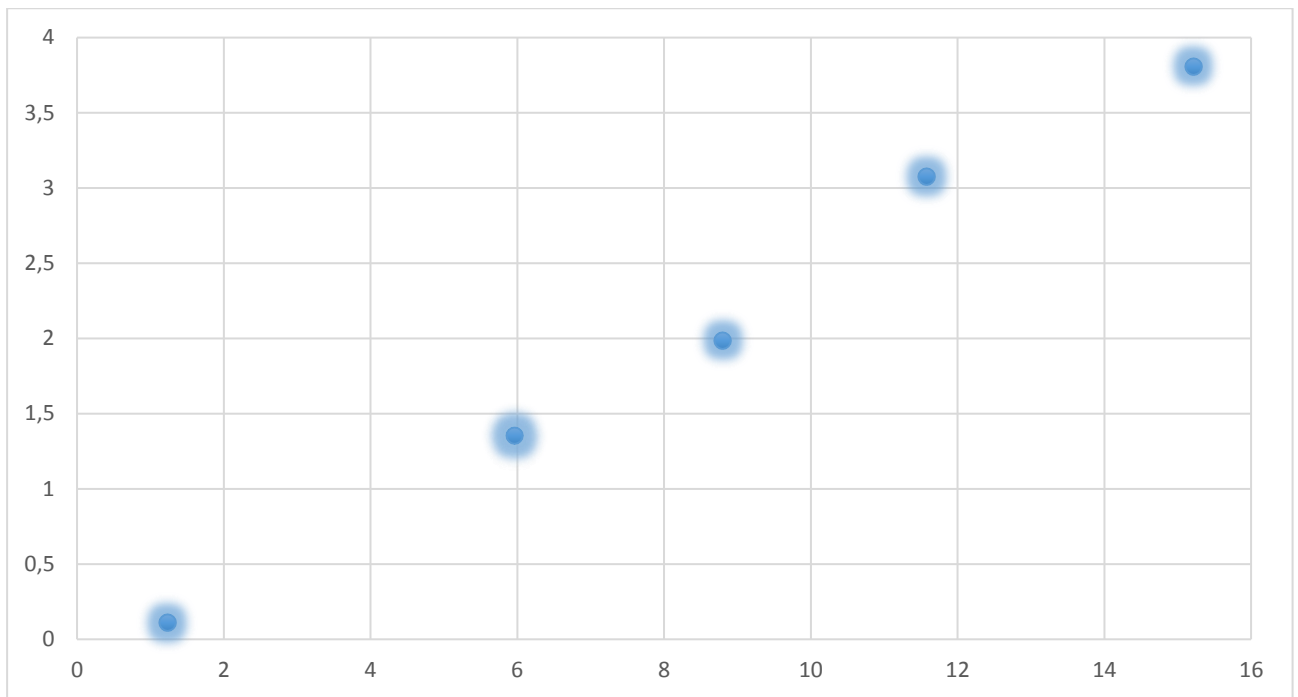
**3.2 pav.** Signalų reikšmės 300 ir 1100 taškuose.

Remiantis geometrinųjų klasifikatorių principais galima teigti, kad duomenims klasifikuoti tikslingiausia yra naudoti atskirų signalų vidutinį dydį, todėl suskaičiuojame vidurkio reikšmes A, B, C ir D defektų klasių signalams, gautiems užfiksavus gedimų neturinčio pantografo virpesius. Šių signalų požymių vidurkių reikšmės pateikiamos 7 lentelėje.

**7 lentelė.** Signalų vidurkių reikšmės 300 ir 1100 taškuose.

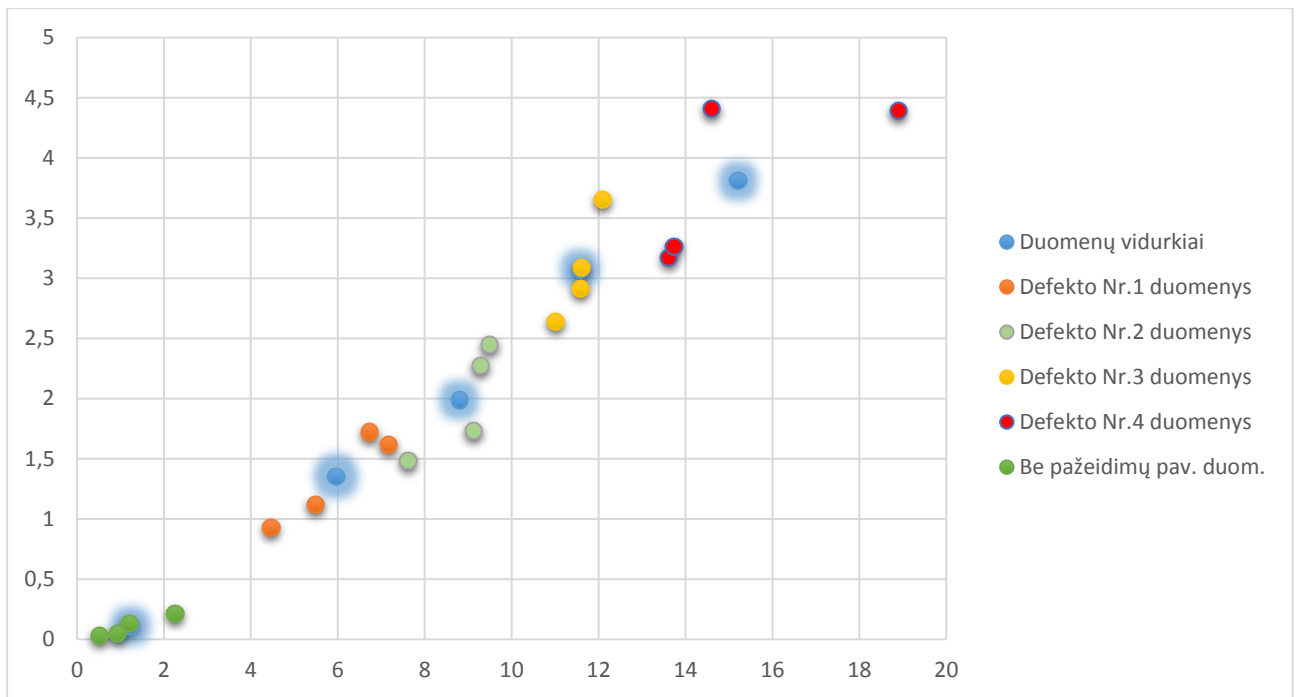
| Signalų klasės pavadinimas    | Vidurkis taškų 300 taške | Vidurkis taškų 1100 taške |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Be pažeidimų signalo vidurkis | 1,23                     | 0,10                      |
| Defekto A signalo vidurkis    | 5,96                     | 1,35                      |
| Defekto B signalo vidurkis    | 8,8                      | 2,07                      |
| Defekto C signalo vidurkis    | 11,58                    | 3,80                      |
| Defekto D signalo vidurkis    | 15,215                   | 3,80                      |

7 lentelėje pateiktus duomenis galima atvaizduoti grafiškai metrinėje erdvėje 3.3 paveiksle.



**3.3 pav.** Signalų vidurkių reikšmės 300 ir 1100 taškuose.

Pateiktame grafike atvaizduoti skirtingų signalų taškų vidurkiai. Iš gautų duomenų galime matyti, kad skirtingų klasių požymių vidurkiai yra išsidėstę tam tikru atstumu vieni nuo kitų. Vertinant vien vidurkius, galima teigti, kad atstumai tarp artimiausių (gretimų) klasių požymių yra labai panašūs, didesniu atstumu nuo kitų yra atsiskyres defekto neturinčios klasės požymių vidurkis. Pagal tai galima vertinti, kad defekto neturinčio pantografo signalas bus atskiriamas su didesniu patikimumu nei atskirų defektų tipų identifikavimo patikimumas. Siekiant ištirti gedimo identifikavimo galimybę, reikia įvertinti, kaip išsidėstę kiekvienos klasės požymiai, kiek jie nutolę nuo klasės požymių vidurio taško ir ar nėra pavojingai priartėję prie kitos klasės požymių vidurkio.



**3.4 pav.** Skirtingų signalo taškų išsidėstymas apie vidurkį.

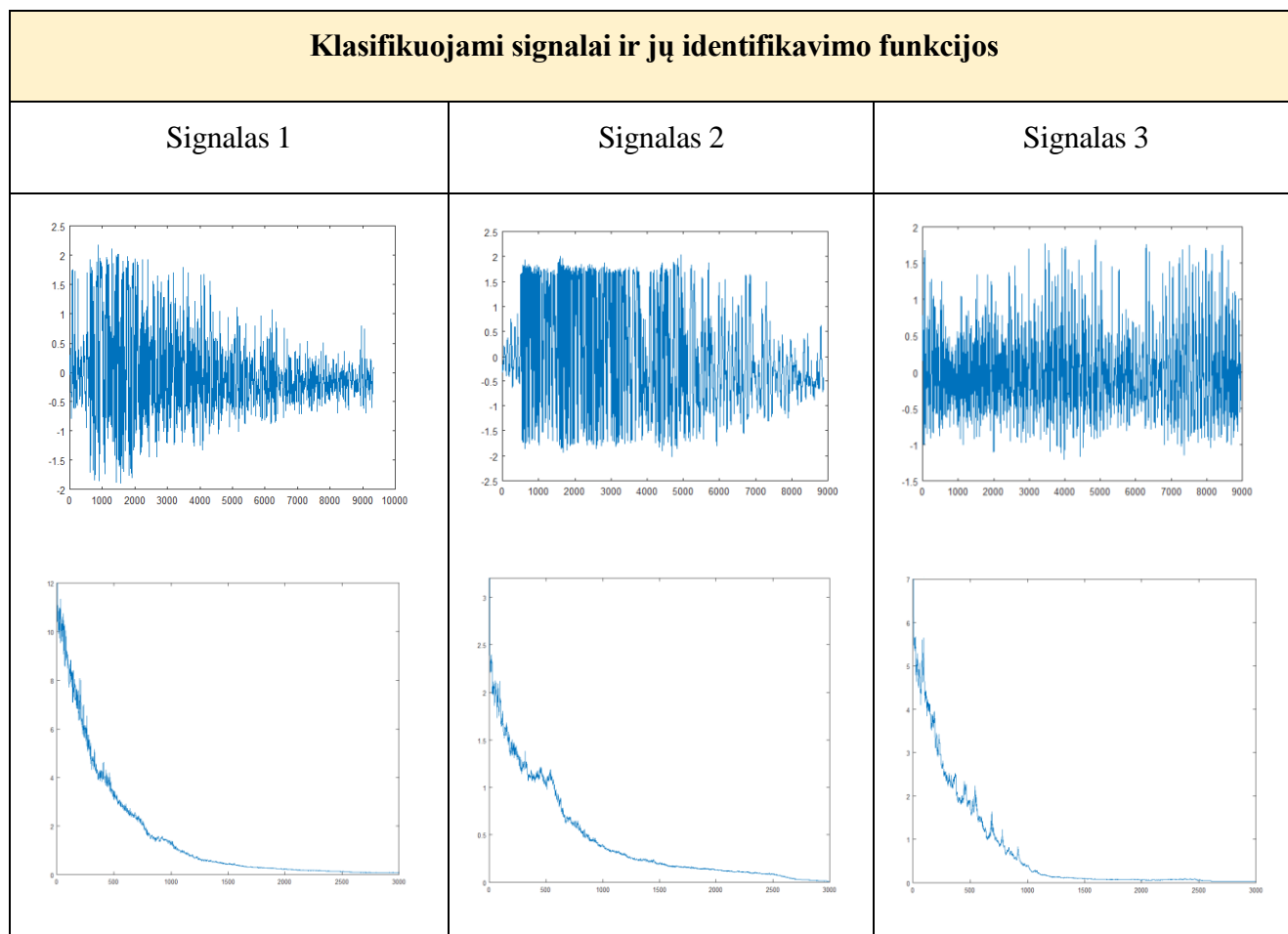
3.4 paveiksle matoma, kad skirtingos defektų signalų požymių aibės nedengia viena kitos. Tačiau labiausiai nuo vidurkio nutolę požymiai yra palyginti vienodu atstumu nutolę nuo gretimų klasių požymių vidurkių. Tai reiškia, kad geometriniai klasifikatoriai gali duoti ne patį aukščiausią klasifikavimo patikimumo rezultatą. Kituose darbuose būtų tikslinga neapsiriboti geometriniais klasifikatoriais ir išanalizuoti kelis duomenų klasifikavimo būdus bei parinkti tinkamiausią šiai užduočiai.

Iš surinktų duomenų apie vidutines taškų vertes 300 ir 1100 taškuose galime teigti, kad, bandymų metu gavus kontaktinio tinklo virpesių signalą ir jam pritaikius spektro koreliacijos funkcijos transformaciją, tiriamąjį signalą galima klasifikuoti ir taip nustatyti pantografo defekto tipą.

### 3.2. Klasifikavimo pavyzdys

Klasifikavimo bandymui atlikti buvo gauti 3 nepriklausomi (nepriklausomi – užfiksuoti atskirų bandymų metu) bandymų signalai. Du signalai imituoti su skirtingų defektų plokštėmis (fiziniais pantografo defekto imitatoriais), o vienas – su sveika plokšte. Šio skyriaus tyrimo tikslas yra priskirti metrinėje erdvėje atskiroms klasėms tiriamų nežinomų klasių signalų požymius, gautus naudojant spektro koreliacijos funkcijos transformaciją. Priskyrus galima įvertinti, ar nežinomos klasės signalas yra priskirtas tai klasei, kurią atitinka ją sukėlusio pantografo defektas. Tyrimui naudoti skirtingų klasių signalai atvaizduoti 8 lentelėje.

8 lentelė. Nepriklausomai gauti signalai klasifikavimo tyrimui.

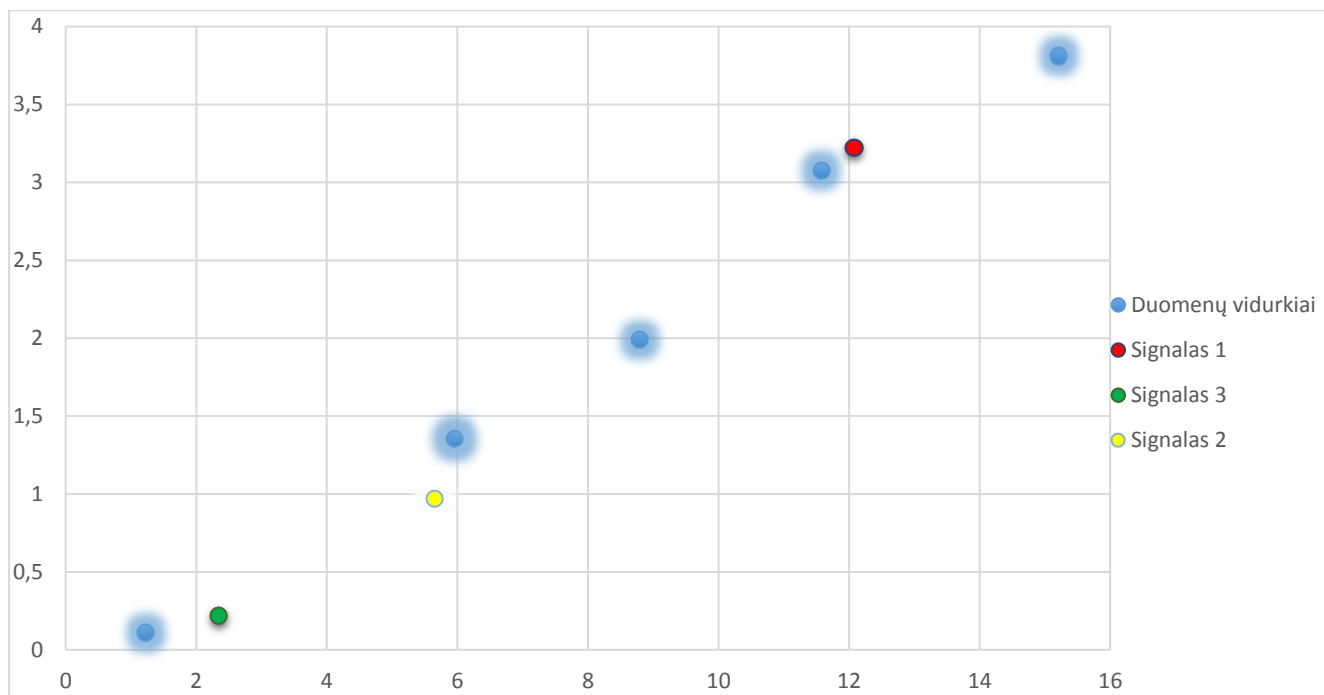


Eksperimento metu užfiksuotiems signalams taikoma spektro koreliacijos funkcijos transformacija ir klasifikavimo požymiai įvertinami registruojant ankstesniame skyriuje pasiūlytą būdą: įvertinant funkcijos reikšmes 300-ajame ir 1100-ajame taškuose. Šių taškų vertės pateikiamos 9 lentelėje.

9 lentelė. Gautų signalų spektro koreliacijos funkcijų vertės 300 ir 1100 taškuose.

| Signalų pavadinimas | 300-ojo taško reikšmė | 1100-ojo taško reikšmė |
|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Signalas1           | 12,08                 | 3,22                   |
| Signalas2           | 5,65                  | 0,97                   |
| Signalas3           | 2,35                  | 0,21                   |

Apskaičiuotas taškų vertes atvaizduojame viename grafike su klasių vidurkių reikšmėmis. Šio tyrimo apimtis dar neatsako, kokio tipo klasifikatorius geriausiai tiktų šiam klasifikavimo uždaviniui. Pavyzdžiu parenkamas geometrinis klasifikatorius, kuris požymius klasėms priskiria pagal trumpiausią geometrinį atstumą iki klasių požymių vidurkio taškų. Iš grafiškai atvaizduotų klasių vidurkių (3.5 pav.) ir tiriamųjų signalų požymių metrinėje erdvėje matyti, kad kiekvienas iš tiriamųjų signalų yra labai arti vienos iš klasių požymių vidurkio taško.



**3.5 pav.** Klasifikavimo pavyzdžio duomenys.

Signalui klasifikuoti taikome Mahalanobis atstumo skaičiavimo metodiką. Šiuo metodu apskaičiuojame tiriamojo taško atstumą iki kiekvieno duomenų vidurkio taško. Duomenų vidurkių koordinatės pateikiamos 10 lentelėje.

**10 lentelė.** Duomenų vidurkių koordinatės.

| Pavadinimas                             | X koordinatė | Y koordinatė |
|---|--------------|--------------|
| Be defektų signalo vidurkio koordinatės | 1,23         | 0,10         |
| 1 defektų signalo vidurkio koordinatės  | 5,96         | 1,35         |
| 2 defektų signalo vidurkio koordinatės  | 8,8          | 2,07         |
| 3 defektų signalo vidurkio koordinatės  | 11,58        | 3,07         |
| 4 defektų signalo vidurkio koordinatės  | 15,21        | 3,80         |

Skaičiuojame gautų koordinatėms atstumą iki vidurkio taškų (11 lentelė).



**11 lentelė.** Suskaičiuoti identifikuojamo signalo atstumai iki signalo vidurkių taškų.

| Signalo pavadinimas | Koordinatės taškų X | Koordinatės taškų Y | Atst. iki sveiko. | Atst. iki A defek. | Atst. iki B defek. | Atst. iki C defek. | Atst. iki D defek. |
|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Signalas 1          | 12,08               | 3,22                | 11,2841           | 6,3918             | 3,4758             | 0,5206             | 4,4941             |
| Signalas 2          | 5,65                | 0,973               | 4,5003            | 0,4941             | 3,3356             | 6,2915             | 9,9766             |
| Signalas 3          | 2,35                | 0,219               | 1,1218            | 3,7905             | 6,7103             | 9,6618             | 13,3565            |

Iš gautų duomenų reiktų suprasti, kad kur atstumas iki defektų vidurkio taško yra mažiausias, tai defektų klasei arčiausias yra tiriamas signalas. Mažiausi atstumai iki tiriamo signalo 11 lentelėje atvaizduoti raudona spalva, didžiausi žalia.

Kaip galime pastebėti iš atlikto klasifikavimo eksperimento, bandymo metu užfiksuoti skirtingų klasių signalai klasifikuoti tiksliai. Būtent su priskirtomis defektų rūšimis buvo imituojami nepriklausomi signalai. Iš atlikto tyrimo galime nustatyti ne tik tai, ar apdorotas signalas yra priskirtas sveikam ar defektuotam signalui, bet ir atskirti defektus atspindinčių signalų klases. Pagal klasių suskirstymą sistemą eksploatuojant realiomis sąlygomis būtų galima realiu laiku užfiksuoti pantografo gedimą, identifikuoti defekto tipą ir, reitingavus defektų klases pagal pavojingumą eismui, spręsti, kokio svarbumo pažeidimas yra užfiksuotas, ir priimti reagavimo į situaciją skubos sprendimus, t. y. elektrinį traukinį stabdyti nedelsiant ar suplanuoti aptarnavimo darbus artimiausioje stotyje.

### 3.3. Metodo atkartojamumo tyrimas

Siekiant iširti, ar pasirinkti tyrimo metodai yra veiksmingi ir pritaikomi praktiškai, eksperimentus pakartojome su kitu visiškai nauju jutikliu. Bandymo stendą ir jutiklio tvirtinimo sprendinius naudojome tuos pačius. Tačiau pakartotinius eksperimentus atlikome transporto laboratorijoje 2017 m. balandžio 26 dieną. Šiais eksperimentais siekėme sudaryti klasifikavimo duomenų aibę, sudarytą iš skirtingų bandymų vidurkių. Kaip buvo minėta, klasifikavimui naudoti vidurkių taškai buvo sudaryti iš 4 skirtingų signalų. Šiuo nauju tyrimu siekiame apmokyti klasifikatorių pantografo diagnostikos sistemai. Klasifikavimo pavyzdžiu pasirinkę Euklido geometrinį klasifikatorių, kuris įvertina tiriamų požymių atstumą iki apmokymo metu sukauptų požymių vidurkio, tyrimo vidurkių taškus suskaičiavome iš 30 kiekvieno signalo rūšies bandymų ir tirsime, kaip klasifikatorius identifikuoja 20 nepriklausomų kiekvienos signalo rūšies požymių duomenis. Šie duomenys pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Duomenų vidurkių taškai, sudaryti iš 30 signalų.

| Klasės pavadinimas | X koordinatės požymių vidurkių reikšmės | Y koordinatės požymių vidurkių reikšmės |
|--------------------|---|---|
| Sveikas            | 0,037                                   | 0,004                                   |
| A                  | 0,81                                    | 0,097                                   |
| B                  | 1,81                                    | 0,574                                   |
| C                  | 3,27                                    | 0,76                                    |
| D                  | 4,52                                    | 0,966                                   |

Pasitelkę 12 lentelėje pateiktus duomenis, naudodami tuos pačius indentifikavimo sprendinius tirsime klasifikatoriaus patikimumą. Pirmiausiai klasifikuojame signalus, kurie buvo be defektų.

13 lentelė. Klasifikavimo tyrimas, tiriami 20 nepriklausomų signalų.

| Koordinatės taškų X | Koordinatės taškų Y | Atstumas iki sveiko | Atstumas iki A def. | Atstumas iki B def. | Atstumas iki C def. | Atstumas iki D def. |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0,038               | 0,0049              | 0,0013              | 0,7775              | 1,8611              | 3,3190              | 4,5839              |
| 0,029               | 0,0029              | 0,0081              | 0,7866              | 1,8703              | 3,3283              | 4,5931              |
| 0,042               | 0,0035              | 0,0050              | 0,7737              | 1,8578              | 3,3155              | 4,5803              |
| 0,041               | 0,001               | 0,0050              | 0,7750              | 1,8595              | 3,3170              | 4,5818              |
| 0,0166              | 0,0005              | 0,0207              | 0,7992              | 1,8829              | 3,3409              | 4,6057              |
| 0,0093              | 0,00067             | 0,0279              | 0,8065              | 1,8898              | 3,3479              | 4,6128              |
| 0,0265              | 0,0019              | 0,0107              | 0,7893              | 1,8730              | 3,3309              | 4,5958              |
| 0,019               | 0,0012              | 0,0182              | 0,7968              | 1,8804              | 3,3384              | 4,6032              |
| 0,0614              | 0,00288             | 0,0244              | 0,7545              | 1,8395              | 3,2967              | 4,5614              |
| 0,0297              | 0,00413             | 0,0073              | 0,7858              | 1,8693              | 3,3273              | 4,5922              |
| 0,025               | 0,0032              | 0,0120              | 0,7906              | 1,8740              | 3,3321              | 4,5970              |
| 0,17                | 0,0202              | 0,1340              | 0,6446              | 1,7310              | 3,1871              | 4,4516              |
| 0,0104              | 0,00057             | 0,0268              | 0,8054              | 1,8888              | 3,3469              | 4,6118              |
| 0,0018              | 0,00073             | 0,0354              | 0,8139              | 1,8969              | 3,3552              | 4,6202              |
| 0,0398              | 0,00459             | 0,0029              | 0,7757              | 1,8595              | 3,3174              | 4,5822              |
| 0,0365              | 0,00677             | 0,0068              | 0,7787              | 1,8620              | 3,3201              | 4,5850              |
| 0,0163              | 0,00161             | 0,0208              | 0,7994              | 1,8828              | 3,3409              | 4,6058              |
| 0,00869             | 0,000792            | 0,0285              | 0,8071              | 1,8903              | 3,3485              | 4,6134              |
| 0,00883             | 0,0004767           | 0,0284              | 0,8070              | 1,8903              | 3,3484              | 4,6133              |
| 0,00983             | 0,0005767           | 0,0274              | 0,8060              | 1,8893              | 3,3475              | 4,6123              |
| 0,038               | 0,0049              | 0,0013              | 0,7775              | 1,8611              | 3,3190              | 4,5839              |

Kaip galime pastebėti iš 13 lentelėje pateiktų duomenų, naudotas klasifikatorius visus 20 skirtingų ir nepriklausomų signalų klasifikavo teisingai, todėl bendras klasifikavimo tikslumas yra 100 procentų. Galime teigti, kad naudojami būdai sveikiems signalams tirti yra tikslūs.

Toliau identifikuojame 20 nepriklausomų A grupės signalų. A grupės atstumai iki vidurkio taškų pateikiami 14 lentelėje.

**14 lentelė.** Klasifikavimo tyrimas, tiriami 20 nepriklausomų A grupės signalų.

| Koordinatės taškų X | Koordinatės taškų Y | Atstumas iki sveiko | Atstumas iki A def. | Atstumas iki B def. | Atstumas iki C def. | Atstumas iki D def. |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0,832               | 0,117               | 0,8030              | 0,0297              | 1,0795              | 2,5214              | 3,7845              |
| 1,12                | 0,124               | 1,0896              | 0,3112              | 0,8238              | 2,2421              | 3,5027              |
| 0,79                | 0,0949              | 0,7585              | 0,0201              | 1,1269              | 2,5676              | 3,8304              |
| 0,77                | 0,129               | 0,7436              | 0,0512              | 1,1312              | 2,5784              | 3,8423              |
| 1,072               | 0,146               | 1,0447              | 0,2665              | 0,8531              | 2,2821              | 3,5442              |
| 0,626               | 0,0567              | 0,5914              | 0,1884              | 1,2921              | 2,7359              | 3,9988              |
| 0,957               | 0,13                | 0,9286              | 0,1507              | 0,9616              | 2,3973              | 3,6598              |
| 0,8252              | 0,1                 | 0,7940              | 0,0155              | 1,0929              | 2,5323              | 3,7949              |
| 0,822               | 0,1034              | 0,7913              | 0,0136              | 1,0944              | 2,5345              | 3,7973              |
| 0,527               | 0,0715              | 0,4946              | 0,2841              | 1,3779              | 2,8281              | 4,0920              |
| 1,23                | 0,21                | 1,2107              | 0,4349              | 0,6848              | 2,1128              | 3,3757              |
| 0,615               | 0,0471              | 0,5796              | 0,2013              | 1,3060              | 2,7490              | 4,0117              |
| 0,912               | 0,122               | 0,8829              | 0,1050              | 1,0053              | 2,4428              | 3,7054              |
| 0,658               | 0,05356             | 0,6230              | 0,1581              | 1,2641              | 2,7058              | 3,9683              |
| 0,746               | 0,112               | 0,7172              | 0,0657              | 1,1600              | 2,6059              | 3,8694              |
| 0,5143              | 0,06                | 0,4811              | 0,2980              | 1,3939              | 2,8432              | 4,1069              |
| 0,849               | 0,0678              | 0,8145              | 0,0487              | 1,0862              | 2,5180              | 3,7793              |
| 0,659               | 0,0481              | 0,6236              | 0,1587              | 1,2655              | 2,7063              | 3,9686              |
| 1,001               | 0,095               | 0,9683              | 0,1910              | 0,9402              | 2,3644              | 3,6252              |
| 0,449               | 0,0627              | 0,4162              | 0,3626              | 1,4539              | 2,9059              | 4,1700              |

Iš 14 lentelėje pateiktų duomenų galime pastebėti, kad ir A defektų grupė identifikuota taip pat tiksliai. Visi 20 signalų priskirti prie tos grupės vidurkio. Tiesa, A grupės 20-ojo eksperimentinio signalo atstumo skirtumas iki be defektų grupės tėra 0,0536. Lyginant su kitais šio eksperimento rezultatais yra tikimybė, kad šis signalas gali būti identifikuotas klaidingai. Tačiau šio eksperimento metu šis signalas priskirtas teisingai.

Tiriame B grupės 20 nepriklausomų signalų iki grupės vidurkio taško. Duomenys pateikiami 15 lentelėje.

15 lentelė. Klasifikavimo tyrimas, tiriami 20 nepriklausomų B grupės signalų.

| Koordinatės taškų X | Koordinatės taškų Y | Atstumas iki sveiko | Atstumas iki A def. | Atstumas iki B def. | Atstumas iki C def. | Atstumas iki D def. |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1,91                | 0,57                | 1,9567              | 1,1974              | 0,1001              | 1,3732              | 2,6399              |
| 2,69                | 0,76                | 2,7586              | 1,9935              | 0,8994              | 0,5800              | 1,8416              |
| 2,02                | 0,608               | 2,0729              | 1,3135              | 0,2127              | 1,2592              | 2,5255              |
| 2,19                | 0,53                | 2,2163              | 1,4463              | 0,3825              | 1,1042              | 2,3704              |
| 1,78                | 0,62                | 1,8486              | 1,1020              | 0,0549              | 1,4966              | 2,7618              |
| 2                   | 0,687               | 2,0784              | 1,3282              | 0,2211              | 1,2721              | 2,5354              |
| 2,14                | 0,58                | 2,1805              | 1,4150              | 0,3301              | 1,1442              | 2,4111              |
| 2,26                | 0,786               | 2,3565              | 1,6054              | 0,4974              | 1,0103              | 2,2672              |
| 2                   | 0,6                 | 2,0515              | 1,2919              | 0,1918              | 1,2800              | 2,5464              |
| 1,9                 | 0,65                | 1,9718              | 1,2223              | 0,1178              | 1,3744              | 2,6390              |
| 1,8                 | 0,365               | 1,7996              | 1,0256              | 0,2092              | 1,5221              | 2,7856              |
| 1,74                | 0,54                | 1,7854              | 1,0301              | 0,0778              | 1,5457              | 2,8125              |
| 1,89                | 0,577               | 1,9396              | 1,1819              | 0,0801              | 1,3921              | 2,6586              |
| 1,28                | 0,43                | 1,3140              | 0,5760              | 0,5492              | 2,0172              | 3,2840              |
| 1,19                | 0,46                | 1,2399              | 0,5255              | 0,6304              | 2,1015              | 3,3682              |
| 1,54                | 0,502               | 1,5846              | 0,8348              | 0,2794              | 1,7491              | 3,0159              |
| 1,08                | 0,42                | 1,1229              | 0,4210              | 0,7461              | 2,2162              | 3,4831              |
| 1,735               | 0,51                | 1,7718              | 1,0130              | 0,0986              | 1,5552              | 2,8221              |
| 1,89                | 0,468               | 1,9102              | 1,1419              | 0,1328              | 1,4106              | 2,6767              |
| 1,762               | 0,48                | 1,7895              | 1,0262              | 0,1055              | 1,5338              | 2,8005              |

Išnagrinėję gautus duomenis, kurie pateikiami 15 lentelėje, galime pastebėti, kad 3 signalai priskirti ne tai defektų klasei. Visi šie signalai, kurie interpretuoti klaidingai, buvo priskirti A signalų klasei. Tačiau svarbiausia, kad klasifikavimas sumaišo tik defektų rūšių klases, o ne defektuotą signalą su sveiku.

Tiriame C grupės 20 nepriklausomų signalų. Šios klasės duomenis pateikiame 16 lentelėje.

16 lentelė. Klasifikavimo tyrimas, tiriami 20 nepriklausomų C grupės signalų.

| Koordinatės taškų X | Koordinatės taškų Y | Atstumas iki sveiko | Atstumas iki A def. | Atstumas iki B def. | Atstumas iki C def. | Atstumas iki D def. |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 2,73                | 0,767               | 2,7990              | 2,0335              | 0,9400              | 0,5400              | 1,8010              |
| 2,91                | 0,867               | 2,9998              | 2,2367              | 1,1384              | 0,3756              | 1,6130              |
| 2,83                | 0,767               | 2,8953              | 2,1282              | 1,0381              | 0,4401              | 1,7017              |
| 2,78                | 0,711               | 2,8326              | 2,0635              | 0,9796              | 0,4924              | 1,7586              |
| 3,24                | 0,867               | 3,3172              | 2,5491              | 1,4597              | 0,1111              | 1,2838              |
| 2,93                | 0,762               | 2,9907              | 2,2219              | 1,1357              | 0,3400              | 1,6030              |
| 3,11                | 0,967               | 3,2204              | 2,4590              | 1,3581              | 0,2616              | 1,4100              |
| 3,25                | 0,71                | 3,2897              | 2,5158              | 1,4464              | 0,0539              | 1,2955              |
| 3,01                | 0,777               | 3,0718              | 2,3027              | 1,2170              | 0,2606              | 1,5218              |
| 3,31                | 0,69                | 3,3441              | 2,5694              | 1,5045              | 0,0806              | 1,2411              |
| 3,19                | 0,767               | 3,2440              | 2,4725              | 1,3934              | 0,0803              | 1,3448              |
| 3,77                | 0,81                | 3,8190              | 3,0447              | 1,9742              | 0,5025              | 0,7661              |
| 3,43                | 0,71                | 3,4657              | 2,6908              | 1,6257              | 0,1676              | 1,1197              |
| 3,14                | 0,614               | 3,1624              | 2,3867              | 1,3306              | 0,1955              | 1,4242              |
| 3,44                | 0,77                | 3,4881              | 2,7147              | 1,6417              | 0,1703              | 1,0976              |
| 2,95                | 0,73                | 3,0031              | 2,2317              | 1,1506              | 0,3214              | 1,5876              |
| 3,16                | 0,71                | 3,2018              | 2,4286              | 1,3568              | 0,1208              | 1,3839              |
| 3,69                | 0,72                | 3,7225              | 2,9466              | 1,8857              | 0,4219              | 0,8657              |
| 3,5                 | 0,61                | 3,5156              | 2,7385              | 1,6904              | 0,2746              | 1,0803              |
| 3,12                | 0,57                | 3,1345              | 2,3579              | 1,3100              | 0,2421              | 1,4549              |

Iš pateiktų duomenų galime teigti, kad C grupės defektų klasė nustatyta tiksliai. Atstumai iki B ir D defektų klasių pakankamai tolimi, o tolimiausi iki sveiko signalo.

Tiriame D grupės 20 nepriklausomų signalų. Šios klasės defektas buvo ypatingas tuo, kad ant plokštelės paviršiaus buvo ne medžiagos trūkumas, o prieaugis. Šios rūšies signalų duomenys pateikiami 17 lentelėje.

17 lentelė. Klasifikavimo tyrimas, tiriami 20 nepriklausomų D grupės signalų.

| Koordinatės taškų X | Koordinatės taškų Y | Atstumas iki sveiko | Atstumas iki A def. | Atstumas iki B def. | Atstumas iki C def. | Atstumas iki D def. |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 4,39                | 0,742               | 4,4151              | 3,6376              | 2,5855              | 1,1201              | 0,2590              |
| 4,166               | 0,896               | 4,2243              | 3,4498              | 2,3779              | 0,9063              | 0,3609              |
| 4,61                | 0,837               | 4,6482              | 3,8714              | 2,8123              | 1,3422              | 0,1573              |
| 4,11                | 0,89                | 4,1683              | 3,3939              | 2,3216              | 0,8500              | 0,4170              |
| 4,41                | 0,83                | 4,4503              | 3,6739              | 2,6126              | 1,1421              | 0,1749              |
| 4,51                | 1,01                | 4,5847              | 3,8110              | 2,7350              | 1,2650              | 0,0451              |
| 3,73                | 0,87                | 3,7932              | 3,0206              | 1,9427              | 0,4730              | 0,7958              |
| 4,05                | 0,805               | 4,0922              | 3,3165              | 2,2519              | 0,7813              | 0,4968              |
| 4,55                | 0,997               | 4,6210              | 3,8468              | 2,7725              | 1,3018              | 0,0431              |
| 4,57                | 0,873               | 4,6155              | 3,8392              | 2,7761              | 1,3049              | 0,1056              |
| 4,34                | 0,862               | 4,3877              | 3,6119              | 2,5463              | 1,0749              | 0,2079              |
| 3,91                | 0,9252              | 3,9810              | 3,2087              | 2,1292              | 0,6610              | 0,6114              |
| 4,83                | 0,821               | 4,8621              | 4,0847              | 3,0301              | 1,5612              | 0,3422              |
| 3,95                | 0,881               | 4,0101              | 3,2364              | 2,1619              | 0,6907              | 0,5763              |
| 4,03                | 0,839               | 4,0794              | 3,3044              | 2,2358              | 0,7641              | 0,5062              |
| 4,26                | 0,844               | 4,3065              | 3,5299              | 2,4648              | 0,9936              | 0,2872              |
| 4,68                | 0,838               | 4,7173              | 3,9403              | 2,8821              | 1,4122              | 0,2049              |
| 4,64                | 0,847               | 4,6796              | 3,9027              | 2,8431              | 1,3728              | 0,1690              |
| 4,34                | 0,847               | 4,3848              | 3,6088              | 2,5447              | 1,0735              | 0,2158              |
| 4,36                | 0,799               | 4,3955              | 3,6187              | 2,5599              | 1,0907              | 0,2313              |

Iš klasifikuotų D grupės defektų signalų galima pastebėti, kad vienas signalas klasifikuotas klaidingai. Šis signalas turėjo būti priskirtas D grupės signalams, tačiau buvo priskirtas C grupės signalui. Taip pat galima atkreipti dėmesį, kad 12 signalas buvo arti klaidingo priskyrimo, tačiau dar buvo priskirtas tinkamai defektų klasei.

### **3.4. Metodo atkartojamumo tyrimo išvados**

Iš atliktų eksperimentinių tyrimų galime teigti, kad pasiūlytas ir ištirtas signalų klasifikavimo būdas yra tinkamas pantografo diagnostikos sistemai. Atlikus klasifikatoriaus apmokymą, iš visų defektų grupių signalų, kurių buvo 5 grupės (sveikas, A, B, C, D grupės), buvo klasifikuoti 100 signalų. Iš 100 klasifikuotų signalų klaidingai priskirti buvo tik 4 signalai. Nesunku nustatyti, kad naudoto klasifikatoriaus tikslumas buvo 96 %. Tačiau svarbu atkreipti dėmesį, kad šie 4 signalai buvo priskirti klaidingai gedimo klasei. Tirtas klasifikatorius defektuotą pantografą nuo defekto neturinčio pantografo atskyrė 100 % tikslumu.



## IŠVADOS

1. Pantografo diagnostikos sistemai tinka pjezoelektriniu jutikliu užfiksuoto kontaktinio tinklo vibracijų signalų analizė.
2. Ištyrus aibę galimų signalo transformacijos algoritmų, nustatyta, kad pantografo sukeliamų virpesių signalo klasifikavimo požymiams įvertinti geriausiai tinka spektro autokoreliacijos funkcija.
3. Esant pantografo sukeliamų virpesių signalo duomenų bazės ilgiui 8800, informatyviaisiais klasifikavimo požymiais geriausiai tinka spektro autokoreliacijos funkcijos 300 ir 1100 taškai. Funkcijų reikšmės šiuose taškuose tiksliausiai apibūdina kiekvieną iš tiriamų klasių.
4. Pasiūlytas diagnostikos sistemos veikimas patikrintas ir patvirtintas tiriant pasikartojamumą, naudojant kitų parametru pjezoelektrinius jutiklius. Tyrimai atlikti klasifikuojant pantografo sukeliamų virpesių signalus į 5 klases: defekto neturinčio pantografo klasė ir 4 skirtingų pantografo defektų klasės.
5. Sukaupus kiekvienų pantografo defektų tipo sukeliamų virpesių signalo duomenų bases (po 30 signalų kiekvienai klasei), klasifikavimo tikslumas iširtas klasifikuojant 100 pantografo sukeliamų virpesių signalų (po 20 kiekvienai iš 5 klasių). Bendras klasifikavimo tikslumas gautas 96 %. Nedefektuoto pantografo klasės požymiai nuo defektuotų pantografų signalų klasių atskirti 100 % tikslumu.
6. Šiame darbe pasiūlytas pantografo defektų tyrimo būdas gali būti pritaikytas kuriant automatizuotą geležinkelių elektrinės traukos pantografų defektų indentifikavimo sistemą.

## LITERATŪRA

1. SAKALAUSKAS, Kazys, 2012. *Geležinkelių projektavimas: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 176 p. ISBN: 9786094570742.
2. Specialios paskirties akcinė bendrovė „LIETUVOS GELEŽINKELIAI“, 1999. *Elektrifikuoto geležinkelio kontaktinio tinklo įrengimo, techninės priežiūros ir remonto taisyklės*. Vilnius: Informacijos ir leidybos centras.
3. LIUDVINAČIUS, Lionginas, Leonas Povilas LINGAITIS, Stasys DAILYDKA, 2010. *Traukos riedmenų elektros pavaros ir jų valdymas*. Vilnius: Technika. 320 p. ISBN: 978-9955-28-559-5.
4. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS, 2014. *Lietuvos standartas: Geležinkelio taikmenys. Stacionarieji įrenginiai. Apsauga nuo elektros, įžeminimas ir grįžtamosios srovės grandinė. 1 dalis. Apsaugos nuo elektros smūgio priemonės*“.
5. KIESSLING, Friedrich, Rainer PUSCHMANN, Axel SCHMIEDER, Egid SCHNEIDER, 2012. *Contact Lines for Electric Railways*. Erlangen: Publicis Publishing. 994 p. ISBN: 978-3-89578-322-7.
6. *Automated and Real-time Wayside Pantograph Monitoring* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-02-18]. Prieiga per: <http://m.pantoinspect.dk/upl/mobile/technique/Pantofolder20154pages1.pdf>.
7. KIESSLING, Friedrich, Rainer PUSCHMANN, Axel SCHMIEDER, Egid SCHNEIDER, 2012. *Contact Lines for Electric Railways*. Erlangen: Publicis Publishing. 994 p. ISBN: 978-3-89578-322-7.
8. MÖLLER, H., H. MALY, B. SARNES. *Stationary uplift measurement as a diagnostic tool for pantograph monitoring* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-02-23]. Prieiga per: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/038.pdf>.
9. KOLBE, Michael, Dr.-Ing. Wilhelm BALDAUF. *Compact contact force measurement system - online diagnosis of the overhead line system with regular trains* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-02-23]. Prieiga per: [http://uic.org/cdrom/2001/wcrr2001/pdf/sessions/2\\_3\\_3/068.pdf](http://uic.org/cdrom/2001/wcrr2001/pdf/sessions/2_3_3/068.pdf).
10. DAMBRAVA, Vytautas, 2001. *Signalai ir sistemos: vadovėlis*. Kaunas: Technologija. 278 p. ISBN: 9789955254645.
11. ŠVĖGŽDA, Otonas, 1980. *Taikomoji informacijos teorija: mokymo priemonė aukštųjų mokyklų elektroninių skaičiavimo mašinų, automatizuotų valdymo sistemų, taikomosios matematikos, automatikos ir telemechanikos specialybėms*. Vilnius: Mokslas. 160 p.
12. БЕКОНОВ, Л. А., 1973. *Теоретические основы электротехники*. Москва: Высшая школа.
13. LIPEIKA, A., J. LIPEIKIENĖ, 1997. *Diskretinio laiko signalų ir sistemų analizė*. Vilnius: Technika.

14. LIPEIKA, A., 2003. *Signalų ir sistemų dažninė analizė: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika. 157 p. ISBN: 9986056233.
15. ČEKANAČIUS, Vydas, Gediminas MURAUSKAS, 2004. *Statistika ir jos taikymai: vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams*. Vilnius: TEV. 272 p. ISBN: 9955-491-16-7.
16. *Pjezoelektrinis efektas kvarco kristale* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-03-01]. Prieiga per: [http://techno.su.lt/~valiulis/dokai/Elmat3\\_fizika\\_2012.pdf](http://techno.su.lt/~valiulis/dokai/Elmat3_fizika_2012.pdf)
17. БОПЦ, Ю. В., В. Е. М. ЧЕКУЛАЕВ, 1981. *Контактная сеть*. Москва: Транспорт.
18. LIETUVOS RESPUBLIKOS SUSISIEKIMO MINISTERIJA, 1996. *Techninio geležinkelių naudojimo nuostatai*. Vilnius: Informacijos ir leidybos centras.
19. BUBULIS, Algimantas, Vytautas JŪRĖNAS, 2008. *Pjezomechanika: mokomoji knyga*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla. 140 p. ISBN: 9789955202967.