



**Kauno technologijos universitetas**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

# **Technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas

---

**Marius Bačelis**  
Projekto autorius

**doc. dr. Gailius Vanagas**  
Vadovas

---

**Panevėžys, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

## **Technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas  
Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Marius Bačelis**  
Projekto autorius

**doc. dr. Gailius Vanagas**  
Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

---

**Panevėžys, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Marius Bačelis

## **Technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Marius Bačelis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**TVIRTINU**

TVKC vadovė

Doc. dr. Nida Kvedaraitė

**Baigiamojo magistro projekto užduotis**

Diplomantui **Mariui Bačeliui**

---

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)      Technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, tyrimas

---

Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)      Research of Technological Failures Identification using Sound Analysis

---

Patvirtinta 2021 m. balandžio 2 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-13

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2021 m. gegužės 31 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

---

Ištirti technologinių gedimų identifikavimo sistemų galimybes naudojant garsų analizę ir sudaryti sistemą gebančią aptikti technologinius gedimus.

---

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

---

Išanalizuoti esamas garsų spektro matavimo ir analizavimo sistemas ir jų veikimo būdus.

---

Išanalizuoti esamas garsų spektro analizės metodikas, kurios naudojamos skaitmeninių signalų

---

procesorių signalų apdorojimui. Ištirti be gedimų ir gedimų turinčių technologinių įrenginių

---

garso įrašus naudojant skaitmeninių signalų procesorių *ADAUI701*. Sudaryti programą skaitmeninių signalų procesoriui *ADAUI701* gebančią aptikti ir informuoti apie ištirtus technologinius gedimus.

---

Vadovas

Doc. Gailius Vanagas

---

*(vadovo pareigos, vardas, pavardė)*

Užduotį gavau

Marius Bačelis

---

*(studento vardas, pavardė)*

2021 m.

balandžio

16 d.

Bačelis, Marius. Technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gailius Vanagas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektronikos inžinerija, technologijos mokslai (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: technologinių gedimų identifikavimas; skaitmeninis signalų procesorius; garso analizė.

Panevėžys, 2021. 68 p.

## Santrauka

Garso sistemos naudojamos ne tik informacijos apsaugai ar pramogų industrijoje, bet ir technologinių įrenginių valdyme. Šiuolaikinėse garso sistemose plačiai naudojami *DSP* (angl. *Digital Signal Processor*), signalų apdorojimo procesoriai. *DSP* realia laike atlieka matematinį signalų apdorojimą. Adaptavus *DSP* technologinių garsų analizei atsiranda galimybės projektuoti sistemas įrenginių gedimų identifikavimui.

Naudojant technologinių gedimų atpažinimo sistemas, gedimus galima pastebėti ankstyvose jų stadijose ir išvengti galimų gamybos proceso trikdžių. Informacijos apie įrenginio duomenis apie jo būseną gavimui, naudojamos įvairios sistemos, jutikliai ir metodai. Tai gali būti vibraciniai jutikliai, padidėjusių variklio vibracijų nustatymui, mikrofonai pasikeitusių įrenginio skleidžiamų akustinių bangų identifikavimui, variklio srovės pokyčių analizė. Kad šią informaciją būtų galima panaudoti procesų kontrolei reikalingas jutiklių signalų apdorojimas. Tam gali būti naudojami kompiuteriai, valdikliai ar *DSP*. Garso signalų apdorojimui ir filtrų koeficientų apskaičiavimui parinkta programinė įranga – *MATLAB*. Skaitmeninių signalų procesoriaus programavimui – *SigmaStudio*.

Tiriamosiose dalyje naudojant *FIR* filtrus išnagrinėti keturi technologiniai gedimai: grandiklinio transporterio su atsilaisvinusiu diržu tarp variklio ir reduktoriaus, valymo įrenginio su susidėvėjusiais guoliais, sklendės su ašmenų liečiama apsauga ir sklendės su nepasiekiamą galine padėtimi gedimai. Kiekvienam iš technologinių gedimų garso įrašų pritaikyta greitoji Furjė transformacija paverčianti garso signalą iš laiko srities į dažnio sritį. Taip pat ištirtas pašalinių technologinių įrenginių poveikis įrašinėjamam technologinio įrenginio garso įrašui. Tyrimas atliktas naudojant keturis technologinius įrenginius esančius 0,5 m, 3 m ir 4 m atstumais. Nustatyta, kad pašaliniai technologiniai įrenginiai neturi įtakos tiriamojo technologinio įrenginio garso įrašui.

*SigmaStudio* aplinkoje sudaryta ištirtus technologinius gedimus aptinkanti ir indikuojanti programa. Šioje programoje naudojami *FIR* filtrai, signalų užlaikymo, signalų palyginimo ir signalų generavimo funkciniai blokai. Sudaryta programa naudojanti skaitmeninį signalų procesorių *ADAUI701* gebanti identifikuoti grandiklinio transporterio atsilaisvinusio diržo tarp variklio ir reduktoriaus, valymo įrenginio susidėvėjusių guolių, sklendės ašmenų liečiamos apsaugos ir sklendės nepasiekiamos galinės padėties technologinius gedimus.

Bačelis, Marius. Research of Technological Failures Identification using Sound Analysis. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Gailius Vanagas; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Technology Sciences (Engineering Sciences).

Keywords: technological failures identification; digital signal processor; sound analysis.

Panevėžys, 2021. 68 pages.

### Summary

Sound systems are used not only in information exchange or entertainment industry but also in control of technological devices. These days audio systems widely use digital signal processors. DSP calculates mathematical signal processing in real time. Adapting the DSP for technological sound analysis makes it possible to project systems for equipment failure identification.

Using technological fault identification systems, the faults can be detected in their early stages preventing the stops in production processes. To gather the information about the equipment state various systems, sensors and methods are used. Those can be vibration sensors which detect motor vibration increases, microphones to detect the change of acoustic waves emitted by the equipment, analysis of motor current changes. To use this information for control of processes system first must process the sensor signal. Computers, controllers, or DSPs can be used for this. For sound signal processing and calculation of filter coefficients program *MATLAB* was selected. Digital signal processor programming was done by using *SigmaStudio* program.

In the research part *FIR* filters were used to investigate four technological faults: chain conveyor with loose belt between motor and reductor, grain cleaning device with worn out bearings, valve with fan blade touching the protective cover and valve with inaccessible end position faults. For each sound file of the technological fault fast Fourier transform was used to convert the signal from time domain to frequency domain. The effect of foreign technological devices on the recording of the motor emitted sound was also investigated. The study was conducted using four technological devices at distances of 0,5 m, 3 m, and 4 m. It was found that external devices do not affect the sound recording of the investigated technological device.

A program which identifies and indicates the technological faults of equipment was created in program *SigmaStudio*. In this program *FIR* filters, signal delay, signal comparison and signal generation function blocks were used. A program using digital signal processor *ADAU1701* capable of identifying the technological failures of chain conveyor with loose belt between motor and reductor, grain cleaning device with worn out bearings, valve with fan blades touching the protective cover and valve with inaccessible end position has been developed.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>14</b>
1.1. Egzistuojančių gedimus aptinkančių sistemų analizė.....	14
1.1.1. Vibracijų analizės metodas.....	15
1.1.2. Variklio srovės analizės metodas .....	16
1.1.3. Temperatūros analizės metodas.....	17
1.1.4. Garso analizės metodas .....	18
1.2. Signalų apdorojimas .....	19
1.2.1. Signalų filtrų tipų analizė .....	19
1.2.2. Furjė transformacijų analizė .....	22
1.2.3. Kelių signalų klasifikacijos analizė .....	25
1.2.4. Laiko-dažnio srities analizė .....	26
1.2.5. Baigtinio impulso atsako filtro metodas.....	27
1.2.6. Begalinio impulso atsako filtro metodas .....	28
1.3. Skaitmeninių signalų procesorių analizė .....	29
1.3.1. Skaitmeninių signalų procesorių konstrukcija.....	29
1.3.2. Skaitmeninis signalų procesorius <i>ADAUI701</i> .....	30
1.3.3. Skaitmeninis signalų procesorius <i>TMS320C5517</i> .....	30
1.3.4. Skaitmeninių signalų procesorių palyginimas.....	31
1.4. Programinės įrangos analizė .....	31
1.4.1. <i>MATLAB</i> programinė įranga.....	31
1.4.2. <i>SigmaStudio</i> programinė įranga .....	33
<b>2. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>34</b>
2.1. Tyrimo metu naudojama įranga.....	34
2.2. Tyrime naudota programinė įranga .....	35
2.3. Grandiklinio transporterio variklio garso įrašo analizė .....	38
2.3.1. Grandiklinio transporterio garso įrašai.....	38
2.3.2. Grandiklinio transporterio su gedimu signalo analizė.....	39
2.3.3. Grandiklinio transporterio be gedimo signalo analizė.....	41
2.3.4. Grandiklinio transporterio signalų analizė <i>SigmaStudio</i> programoje.....	42
2.3.5. Grandiklinio transporterio signalų filtravimas naudojant <i>FIR</i> filtrą.....	45
2.4. Valymo įrenginio variklio garso įrašo analizė.....	47
2.4.1. Valymo įrenginio variklio garso įrašai .....	47
2.4.2. Valymo įrenginio variklio su gedimu signalo analizė.....	48
2.4.3. Valymo įrenginio be gedimo garso signalo analizė .....	49
2.5. Sklendės variklio garso įrašo analizė .....	52
2.5.1. Sklendės variklio garso įrašai .....	52
2.5.2. Sklendės variklio be gedimo garso analizė .....	52
2.5.3. Sklendės variklio su mechaniniu gedimu garso analizė .....	54
2.5.4. Sklendės su nesustojančio variklio gedimu garso analizė.....	55
2.6. Aplinkinių įrenginių poveikis technologinio gedimo garso įrašui .....	56

2.7. Programa ištirtų gedimų identifikavimui.....	59
2.7.1. <i>FIR</i> filtrų palyginimas .....	59
2.7.2. Technologinius gedimus identifikuojanti programa.....	60
<b>Išvados .....</b>	<b>65</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>66</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>69</b>
1 priedas. <i>FIR</i> filtro koeficientų skaičiavimo programa.....	69
2 priedas. Greitosios Furjė transformacijos programa .....	69
3 priedas. Technologinius gedimus identifikuojančios programos funkcinė diagrama .....	71
4 priedas. Technologinius gedimus aptinkanti programa.....	73



## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Technologinius gedimus atitinkantys dažniai .....	60
---	----

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Dažnio $F_w$ amplitudės priklausomybė nuo gedimo tipo [6].....	16
2 pav. Idealizuotas variklio srovės spektras [12] .....	17
3 pav. Skaitmeninio signalo apdorojimo blokinė schema [3].....	19
4 pav. RC grandinė, žemo dažnio filtras .....	20
5 pav. RC grandinė, aukšto dažnio filtras .....	20
6 pav. RC grandinė, plačiajuostis filtras .....	21
7 pav. Plačiajuosčio filtro signalo pralaidumo grafikas [3] .....	21
8 pav. RLC grandinė, dažnių juostos filtras.....	22
9 pav. Dažnio juostos filtro signalo pralaidumo grafikas [3].....	22
10 pav. Signalu atvaizdavimo laiko ir dažnio srityse skirtumai [3].....	23
11 pav. <i>Zoom</i> greitosios Furjė transformacijos blokinė schema [16] .....	24
12 pav. Signalas apdorotas <i>CZT Z</i> srityje [19].....	25
13 pav. Diskrečiosios Vilnelės transformacijos filtravimo principas [25].....	26
14 pav. Baigtinio impulso atsako filtro struktūra [30] .....	28
15 pav. Adaptyvus begalinio impulso atsako filtro modelis [33] .....	28
16 pav. <i>MATLAB</i> programa.....	32
17 pav. <i>MATLAB Simulink</i> programos <i>DSP</i> sistemos paketas.....	32
18 pav. Programinės įrangos <i>SigmaStudio</i> aplinkoje pavyzdys.....	33
19 pav. Programinės įrangos <i>SigmaStudio Hardware Configuration</i> skiltis .....	33
20 pav. Tyrimams naudojamos įrangos struktūrinė schema .....	35
21 pav. Įrangos konfigūracija <i>SigmaStudio</i> programoje .....	36
22 pav. Procesoriaus registrų valdymas <i>SigmaStudio</i> programoje .....	37
23 pav. <i>SigmaStudio</i> programos funkcinų blokų sąrašas .....	38
24 pav. Grandiklinio transporterio garso įrašai <i>Audacity</i> programoje .....	39
25 pav. Grandiklinio transporterio variklio su gedimu dažnio srities grafikas .....	40
26 pav. Grandiklinio transporterio variklio su gedimu dažnio srities grafikas su apribota dažnio sritimi.....	40
27 pav. Grandiklinio transporterio variklio be gedimo skleidžiamo triukšmo dažnio srities grafikas .....	41
28 pav. Grandiklinio transporterio variklio be gedimo dažnio srities grafikas su apribota dažnio sritimi.....	42
29 pav. <i>SigmaStudio</i> aplinkoje sukurta dažnių filtravimo programa .....	43
30 pav. <i>SigmaStudio</i> programos <i>Crossover</i> filtras.....	43
31 pav. <i>SigmaStudio</i> programos trijų signalų <i>Crossover</i> filtras.....	44
32 pav. Grandiklinio transporterio su gedimu 100-osios eilės <i>FIR</i> filtro dažnių apribojimas.....	45
33 pav. Grandiklinio transporterio su gedimu 800-osios eilės <i>FIR</i> filtro dažnių apribojimas.....	46
34 pav. <i>FIR</i> filtras <i>SigmaStudio</i> programoje.....	46
35 pav. Valymo įrenginio variklio garso įrašai <i>Audacity</i> programoje .....	47
36 pav. Valymo įrenginio su gedimu dažnio srities grafikas .....	48
37 pav. Valymo įrenginio su gedimu dažnio srities apriboto dažnio grafikas .....	49
38 pav. Valymo įrenginio be gedimo dažnio srities grafikas.....	50
39 pav. Valymo įrenginio be gedimo apribotos dažnio srities grafikas.....	50
40 pav. Valymo įrenginio be gedimo dažnio srities 100–400 Hz grafikas .....	51

<b>41 pav.</b>	Sklendės variklio garso įrašai <i>Audacity</i> programoje .....	52
<b>42 pav.</b>	Sklendės be gedimo dažnio srities grafikas.....	53
<b>43 pav.</b>	Sklendės be gedimo grafikas su apribota dažnio sritimi .....	54
<b>44 pav.</b>	Sklendės su liečiama apsauga gedimu dažnio srities grafikas .....	55
<b>45 pav.</b>	Sklendės su nesustojančio variklio gedimu dažnio srities grafikas.....	56
<b>46 pav.</b>	Grandiklinis transporteris be gedimo ir be šalia veikiančių įrenginių.....	57
<b>47 pav.</b>	Grandiklinis transporteris be gedimo kai šalia dirba vienas papildomas įrenginys .....	57
<b>48 pav.</b>	Grandiklinis transporteris be gedimo kai šalia dirba du papildomi įrenginiai .....	58
<b>49 pav.</b>	Grandiklinis transporteris be gedimo kai šalia dirba trys papildomi įrenginiai .....	58
<b>50 pav.</b>	Grandiklinio transporterio su gedimu 150-osios eilės <i>FIR</i> filtro dažnio sritis .....	59
<b>51 pav.</b>	Gedimus identifikuojančios programos funkcinės diagramos dalis.....	61
<b>52 pav.</b>	Skaitmeninio signalų procesoriau registrų valdymas programoje <i>SigmaStudio</i> .....	62
<b>53 pav.</b>	Technologinius gedimus identifikuojančios <i>SigmaStudio</i> programos skaitmeniniam signalų procesoriui <i>ADAUI701</i> pirma dalis.....	63
<b>54 pav.</b>	Technologinius gedimus identifikuojančios <i>SigmaStudio</i> programos skaitmeniniam signalų procesoriui <i>ADAUI701</i> antra dalis .....	64
<b>55 pav.</b>	Technologinius gedimus identifikuojančios programos funkcinės diagramos pirma dalis .	71
<b>56 pav.</b>	Technologinius gedimus identifikuojančios programos funkcinės diagramos antra dalis...	72
<b>57 pav.</b>	Technologinius gedimus identifikuojanti programa <i>SigmaStudio</i> aplinkoje .....	73

## Įvadas

Garso sistemos plačiai naudojamos įvairiose srityse, tarp jų ir technologinių įrenginių valdyme. Šiuolaikinėse sistemose plačiai naudojami *DSP* (angl. *Digital Signal Processor*), signalų apdorojimo procesoriai. Naudojant šiuos procesorius gaunamus signalus iš sistemos galima apdoroti naudojant į procesorių įkeltą programą, taip palengvinant duomenų apdorojimą vartotojui. Pritaikius *DSP* gamyklinėse patalpose galima sudaryti valdymo sistemą kuri reaguoja į technologinių įrenginių gedimus.

Gedimas – tai įrenginio būseną kai jis nebeeksploatuojamas. Naudojant technologinių gedimų atpažinimo sistemą šiuos gedimus galima pastebėti anksčiausiose jų stadijose, taip išvengiant didelių gedimų ir gamybos proceso trikdžių. Šios sistemos naudoja įvairius jutiklius ir metodus gauti stebimo įrenginio duomenis apie jo būseną. Tai gali būti vibraciniai jutikliai naudojami variklio vibracijoms aptikti, kurios susidaro įvykus gedimui, mikrofonai kurie naudojami aptikti pasikeitusius įrenginio ar aplinkos garso bangų sklidimus. Taip pat gali būti naudojama variklio srovės analizė, kuri stebi variklio srovės pokyčius, pagal kuriuos nustatoma ar variklis tvarkingas. Tam kad šią informaciją būtų galima panaudoti analizei reikia gaunamus signalus iš įvairių jutiklių apdoroti. Tam naudojami įvairūs prietaisai, kaip kompiuteriai, valdikliai ar *DSP*.

Signalų apdorojimo metodai priklauso nuo to kokia sistema naudojama pradiniam signalui gauti ir nuo to kokio parametro atžvilgiu gauti duomenys apdorojami. Pagrindiniai signalo apdorojimo metodai pagrįsti laiko analize, dažnio analize, laiko-dažnio analize ir netiesinė analize. Apdorojant garso signalus taip pat gali būti taikomi ir papildomi metodai kaip vilnelės analizė, šaltinio atskyrimo, kurie padeda panaikinti išorinių garsų sukeltus trikdžius [1].

Šiame darbe nagrinėjama garso sistema, kuri nėra naudojama taip plačiai kaip kitos analizuotos gedimo aptikimo sistemos. Taip pat šiame darbe signalų apdorojimui naudojamas skaitmeninių signalų procesorius *ADAU1701*, kuris valdomas naudojant *SigmaStudio* programinę įrangą.

**Tyrimų objektas** – technologiniai gedimai.

**Projekto tikslas** – ištirti technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, galimybes.

**Projekto uždaviniai:**

1. Išanalizuoti esamas garsų spektro matavimo ir analizavimo sistemas ir jų veikimo būdus.
2. Išanalizuoti esamas garsų spektro analizės metodikas, kurios naudojamos skaitmeninių signalų procesorių signalų apdorojimui.
3. Parinkti garso analizės sistemos, skirtos garsų spektro matavimo algoritmui realizuoti, programinę įrangą.
4. Ištirti be gedimų ir gedimų turinčių technologinių įrenginių garso įrašus naudojant skaitmeninių signalų procesorių.
5. Sudaryti programą skaitmeniniam signalų procesoriui *ADAU 1701* gebančią aptikti ir informuoti apie skirtingus technologinius gedimus.

**Tyrimų metodai:** mokslinės literatūros analizė, eksperimentai su skaitmeninių signalų procesoriumi *EVAL-ADAU1701MINIZ*.

**Konferencijose skaityti pranešimai:**

Bačelis, Marius. Technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, tyrimas. 21-oji studentų mokslinių darbų konferencija „Technologijų ir verslo aktualijos“. Panevėžys: Kauno technologijos universitetas Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, 2021 m. balandžio 23 d.

**Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:**

Bačelis, Marius, Vanagas, Gailius. Technologinių gedimų identifikavimo, naudojant garsų analizę, tyrimas // Technologijų ir verslo aktualijos – 2021: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2021 m. balandžio 23 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. ISSN 2538-8045. 2021.

## 1. Literatūros analizė

Gedimas – tai įrenginio būseną kai jis neeksploatuojamas. Eksploatuojamų įrenginių technologiniai gedimai atsiranda jiems dirbant ilgą laiką arba kartojant tuos pačius judesius daug kartų. Įrenginiuose esant judančioms detalėms neišvengiamas dilimas. Dilimo mastas priklauso nuo daugelio priežasčių, kaip detalių sutepimas, detalių medžiaga, detalių judėjimo greitis, plotas, kuriuo liečiasi detalės ir kt.

Detalėms išdilus iki tam tikro lygio įrenginys pradeda veikti kitaip. Šis pokytis gali būti nepastebimas žmogaus, pavyzdžiui, pasikeitęs įrenginio vibracijų dažnis arba skleidžiami garsai dažniuose, kurių žmogus nebegirdi. Aptikus technologinį gedimą iš anksto galima išvengti nelaimingų atsitikimų, didesnių gedimų, kurie gali pažeisti įrenginį ar visą sistemą, ar mažesnių gedimų, kurie paveikia tik vieną įrenginį.

Vieni iš populiariausių technologinių įrenginių šiuolaikinėse pramonės įmonėse – asinchroniniai varikliai. Šie varikliai gali būti valdomi naudojant dažnio keitiklius, jų konstrukcija yra tinkama gamybinėse patalpose ir jie nereikalauja priežiūros. Asinchroniniuose varikliuose technologiniai gedimai išskiriami į keturias pagrindines grupes. Šios grupės yra statoriaus gedimai, rotorius gedimai, guolių gedimai ir rotorius nuokrypis [2].

Technologinių gedimų identifikavimas yra viena iš sparčiai populiarėjančių temų, susijusių su technologiniais įrenginiais, kadangi norima, kad naudojami varikliai veiktų be gedimų kuo ilgiau, naudojant mažiausias išlaidas variklio priežiūrai. Tam taikomi įvairūs variklių gedimų identifikavimo metodai: vibracijų analizės metodai, variklio srovės analizės metodai, temperatūros analizės metodai ir garso analizės metodai. Šie metodai naudoja įvairius signalų apdorojimo metodus kartu su įranga, kuri naudojama technologinių gedimų ypatumų identifikavimui. Signalų apdorojimo metodai gali būti paprasti filtrai, sudaryti iš elektronikos elementų, arba metodai, kurie naudoja įvairius mikrovaldiklius ar valdiklius sudėtingiems skaičiavimams atlikti.

### 1.1. Egzistuojančių gedimus aptinkančių sistemų analizė

Egzistuojančios variklio technologinius gedimus identifikuojančios sistemos naudoja vibracijas, garsą ir srovės pokyčius aptikti ir išanalizuoti galimas parametrų pokyčių priežastis. Vibracijas identifikuojančios sistemos naudoja įvairius vibracijos jutiklius, sumontuotus ant variklio aptikti vibracijos pokyčius. Šis būdas yra tikslus, tačiau vibracijos jutiklis turi būti montuojamas ant variklio [1]. Bet vien iš vibracinių jutiklių perduodamų signalų negalime nustatyti, ar tiriamasis variklis turi gedimą. Tam, kad būtų galima suprasti vibracinio jutiklio surinktus duomenis, reikia šią gautą informaciją apdoroti.

Gaunamai informacijai apdoroti galima naudoti įvairius metodus, tačiau plačiausiai vibracijos signalams apdoroti naudojami metodai yra susiję su laiko, dažnio arba laiko-dažnio analize [1].

Technologinį gedimą identifikuojanti garso sistema naudoja mikrofoną kaip jutiklį aptikti įrenginio parametrų pokytį. Atsiradus gedimui variklis pradeda skleisti garsus, kurių spektras yra kitoks negu normaliaame režime funkcionuojančio variklio. Išanalizavus tvarkingus ir tam tikrus gedimus turinčius variklius galima palyginimo būdu nustatyti, ar veikiantis variklis veikia tinkamai. Šios sistemos privalumas lyginant su vibracijos sistemomis – jutiklis neturi būti montuojamas tiesiogiai ant variklio. Tačiau šio tipo sistemos yra labiau veikiamos trikdžių, kadangi mikrofoną pasiekia kitų įrenginių įvairūs skleidžiami garsai [1].

Plačiai naudojamos sistemos kurios analizuoja variklio srovę. Atsiradus technologiniam gedimui pasikeičia variklio elektros srovės jėga, kuri yra tiesiogiai susijusi su statoriaus srove. Srovės pokyčiai transformuojami iš laiko srities į dažnio sritį naudojant greitąją Furjė transformaciją arba Vilnelės analizę. Šis metodas sparčiai tampa populiariesnis dėl nesudėtingo naudojimo [3], kadangi srovės matavimui užtenka išorinio jutiklio ir šių matavimų neveikia išoriniai trikdžiai.

Temperatūros analize paremtos gedimų identifikavimo sistemos naudoja infraraudonųjų spindulių temperatūros kameras variklio temperatūrai išmatuoti. Ši technologinio gedimo aptikimo sistema taip pat pasižymi tuo kad analizė atliekama neįtakojant variklio veikimo. Temperatūrą matuojanti kamera pastatoma šalia variklio ir šios kameros vaizdas perduodamas apdorojimo įrenginiams, kurie pagal gautus vaizdus nustato variklio temperatūrą. Šio tipo sistema geba aptikti guolių gedimus ir gedimus susijusius su trumpais jungimais [4], [5].

Dažniausiai naudojamos vibracijų analizės sistemos, kadangi jos gali tiksliai nustatyti vieną iš dažniausių technologinių gedimų – guolių gedimus. Technologiniams gedimams susijusiems su rotorius gedimais ir rotorius nuokrypiu vis plačiau taikomi variklio srovės analizės metodas. Šis metodas technologinių gedimų analizėje tampa vis populiariesnis, kadangi jis naudoja variklio srovę analizei atlikti ir nereikalauja jokių papildomų įrenginių ant ar prie tiriamo variklio. Garso analizės sistemos nėra labai paplitusios, tačiau sparčiai plintant skaitmeniniams signalų procesoriams jos vis plačiau analizuojamos.

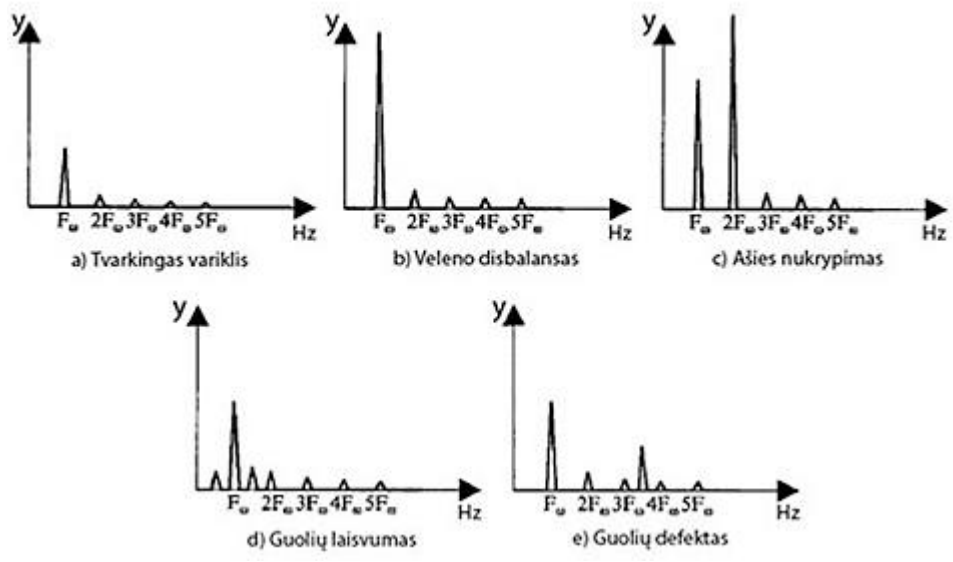
#### **1.1.1. Vibracijų analizės metodas**

Vienas iš galimų variklių technologinių gedimų aptikimo metodų yra vibracinių signalų analizė. Šie signalai gaunami iš vibracinių jutiklių kurie yra sumontuoti tiesiogiai ant variklių [1]. Šis gedimų aptikimo metodas pasižymi dideliu efektyvumu [1], [6]. Kiekvienas variklio technologinis gedimo tipas skleidžia vibracijas, kurios skiriasi priklausomai nuo gedimo tipo. Taigi naudojant šį metodą ir turint tam tikrų gedimų skleidžiamas vibracijų charakteristikas galima jas panaudoti atpažinti tiriamo variklio būseną [6].

Analizuojant vibracinius signalus gali būti naudojami ir laiko ir dažnio srities metodai. Laiko srities metodai suteikia galimybę stebėti vibracijų fizinį prigimtis. Tačiau laiko srities metodai tampa beveik neįmanomais atpažinti kai atsiranda keli skirtingų tonų vibracijų signalai. Dažnio srities metodai leidžia aptikti amplitudę ir fazės spektrą. Dėl to dažnio srities metodai, atliekant vibracijų analizę, yra taikomi vis dažniau [6].

Norint aptikti technologinį gedimą naudojant vibracijų analizę reikalingi tvarkingo veikimo ir sugedusio variklio veikimo vibracijų spektrai, tam kad juos būtų galima palyginti. Tvarkingai veikiančio variklio vibracinis spektras charakterizuojamas pagal, dažniu  $F_w$ , besisukančio veleno toną. Po šio dažnio seka harmonikos kurių amplitudė yra maždaug 3 kartus mažesnė negu  $F_w$  amplitudė [6]. Nuo to kokia variklio sistema yra naudojama gali atsirasti papildomų vibracijos tonų. Pavyzdžiui jeigu sistema naudoja pavara atsiranda mažiausiai trys papildomi tonai [6]. Taip pat tvarkingo variklio vibracijų signalų spektre gali atsirasti kitų papildomų tonų priklausančių nuo konstrukcijos ant kurios variklis yra pritvirtintas. Dažniausi variklio technologiniai gedimai kuriuos galima aptikti naudojant vibracijų analizės metodą yra veleno disbalansas, ašies nukrypimas (angl. *Misalignment*), mechaniškas laisvumas guoliuose, guolių defektas.

Kai vibracijų metodu tiriamas variklis turi veleno disbalanso gedimą vibracijų signalo spektre atsiranda didelis dažnio  $F_w$  nuokrypis lyginant su normaliaame režime funkcionuojančio variklio dažnio amplitude (žr. 1 pav., a ir b) [6]. Ašies nukrypimo gedimas pasižymi padidėjusia vibracijos signalo amplitude ties  $2F_w$  dažniu (žr. 1 pav., c). Šiuo atveju dažnio  $2F_w$  amplitudė viršija tvarkingo variklio dažnį  $F_w$  apie 75 proc., jeigu ašies nuokrypio gedimas yra didesnis šis nuokrypis gali pakilti iki 150 proc. [6]. Mechaniškas laisvumas guoliuose arba variklio atramoje pasižymi dideliu kiekiu harmonikų vibracijų spektre. Šis gedimas grafiškai pasižymi didesne dažnio  $F_w$  amplitude nei be gedimų veikiančio variklio ir didesniu skaičiumi harmonikų šio dažnio aplinkoje (žr. 1 pav., d).



1 pav. Dažnio  $F_w$  amplitudės priklausomybė nuo gedimo tipo [6]

Guolių defekto atveju (žr. 1 pav., e) variklio skleidžiami vibracijų signalo spektro tonai priklauso nuo guolių geometrinių parametrų ir variklio sukimosi greičio [6].

### 1.1.2. Variklio srovės analizės metodas

Technologinių gedimų identifikavimas naudojant variklio srovės analizę yra plačiai naudojamas metodas dėl plačios dažniausių gedimų aptikimo srities [7]. Naudojant variklio srovės analizės metodą galima nustatyti variklio statoriaus apvijų gedimus, sulūžusio rotoriaus gedimą, diržų gedimus, vibracinius gedimus, guolių gedimus ir kt. [8]. Taip pat variklio srovės analizės metodas pasižymi šiais privalumais:

- nereikalauja papildomų įrenginių ant variklio;
- srovės matavimas gali būti atliekamas nuotoliniu būdu;
- suteikia stebėjimo galimybę, neturinčią poveikio įrenginiui;
- geba atpažinti skirtingų gedimų formas;
- gedimų aptikimas atliekamas greitai ir gali būti atliktas eilinio specialisto, naudojant nebrangią įrangą [8].

Variklio srovės analizės metodo veikimo principas pagrįstas tuo kad variklio mechaniniai gedimai paveikia variklio statoriaus srovę, kuri yra matuojama. Šis poveikis atsiranda dėl to kad mechaniniai gedimai kaip rotoriaus nuokrypis, guolių gedimai ar oro tarpo ekscentricitetas daro įtaką elektrovaros jėgai, dėl ko pasikeičia statoriaus srovė. Skirtingi gedimai pasižymi skirtingais srovės harmonikų

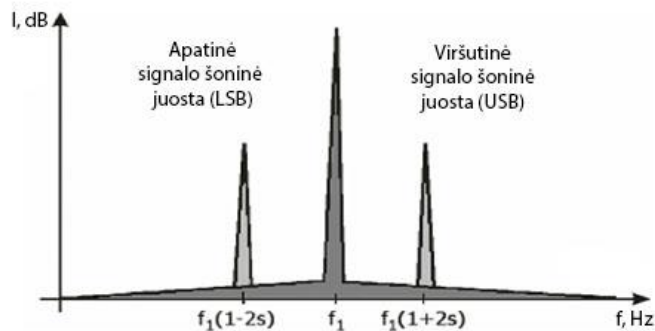


dažniais kurie gali būti išmatuojami. Kai variklyje atsiranda technologinis gedimas, virpesiai moduliuoja oro tarpelį ir indukuoja sukančio dažnio srovės harmonikas variklio indukciniam lauke [8].

Variklio srovės analizės metodą iliustruoja idealizuoto variklio srovės spektro grafikas (žr. 2 pav.), kuriame pavaizduotas technologinio gedimo atpažinimo grafikas. Variklyje atsiradus gedimui srovės amplitudžių skirtumas tarp dažnių  $f_1$  ir apatinės signalo šoninės juostos (angl. *Lower Sideband*) ir viršutinės signalo šoninės juostos (angl. *Upper Sideband*) pasikeičia. Šis skirtumas gali pasireikšti dėl priešinga kryptimi besisukančio lauko, kurį sukuria gedimas [9]. Variklio srovės analizės metodas pasižymi ir keliai trūkumais. Pagrindiniai šio metodo trūkumai [10]:

- mažas signalo ir triukšmo santykis (angl. *Signal-to-Noise Ratio*);
- spektro nutekėjimas (angl. *Spectral Leakage*).

Signalo ir triukšmo santykis nustato ribą kuri nurodo kokio dydžio signalas yra priimamas kaip signalas, o signalas kuris yra žemiau šio santykio priimamas kaip aplinkinis triukšmas ir signalas nėra fiksuojamas. Mažas signalo ir triukšmo santykis lemia tai kad mažesni signalai negu šis santykis nėra priimami ir tai sumažina informacijos tikslumą.



2 pav. Idealizuotas variklio srovės spektras [12]

Spektro nutekėjimas atsiranda dėl riboto laiko tarpo kurio metu matuojama variklio srovė [11]. Matuojamos srovės spektro dažnio dalis gali išplisti į kitas spektro dalis ir paslėpti šoninės juostos duomenis. Tam kad išspręsti šią problemą naudojamas trumpas laiko tarpas prieš matavimą, kurio metu pagrindinio dažnio spektras yra išlyginamas. Naudojant šį metodą sumažinamas spektro nutekėjimas, tačiau tai sumažina spektro skiriamumą [11].

### 1.1.3. Temperatūros analizės metodas

Technologinių gedimų aptikimas naudojant variklio temperatūros analizę atliekamas matuojant variklio temperatūra infraraudonųjų spindulių temperatūros kameros, termoporos ar kitu temperatūrą gebančiu fiksuoti įrenginiu. Šie įrenginiai nesuteikia jokio neigiamo poveikio varikliui kuris yra tiriamas.

Variklio technologiniai gedimai kurie gali būti aptinkami šiuo analizės metodu yra riboti, kadangi ne visi variklio gedimai padidina variklio temperatūrą. Pagrindiniai gedimai kuriuos šis metodas gali aptikti yra elektros grandinių gedimai ir guolių gedimai [4], [7]. Variklio temperatūrai pakilus ir

išsilaikius ilgesnį laiko tarpą gedimas progresuoja, kol pasiekiami kritinė riba, kuri lemia variklio sugedimą.

Temperatūros analizės metodų signalai skirtingai negu kitų metodų signalai neturi būti transformuojami į kitus fizikinių dydžių domenų. Tačiau naudojant infraraudonųjų spindulių temperatūros kameras temperatūrai aptikti variklio temperatūra gaunama kaip nuotrauka [4]. Norint iš šios nuotraukos atpažinti gedimą reikia naudoti specialius algoritmus arba programinę įrangą, gebančią apdoroti vaizdus.

#### **1.1.4. Garso analizės metodas**

Technologinių gedimų aptikimas naudojant garso analizę pasižymi lengvu jutiklio montavimu prie tiriamo variklio. Metodas neturi įtakos variklio veikimui. Kadangi garso analizės metodas naudoja garsą fiksuojančius jutiklius – mikrofonus, tiriamo variklio viduje nereikia naudoti jokios papildomos įrangos. Mikrofonai įrašo variklio skleidžiamus garsus. Naudojant išmatuotus garsų spektrus, atliekamas spektrų palyginimas su normaliaame režime funkcionuojančio variklio skleidžiamais garsais, pagal skirtumus nustatoma ar variklis turi technologinį gedimą. Kiekvienas variklio gedimo tipas atsispindi skirtingose variklio skleidžiamo garso spektro vietose [1]. Todėl turint įvairių gedimų garsų spektrus galima palyginti su nesugedusio variklio garso spektru ir nustatyti variklio gedimo tipą.

Pramoninė aplinka pasižymi sąlygomis kurios nėra palankios garso analizės metodui kaip, pašaliniai kitų variklių veikimo garsai, įvairių mechaninių įrenginių veikimo garsai, produkcijos gabenimas ir kt. Visi šie pašaliniai garsai sudaro trikdį tiriamo variklio garso signalui. Tam kad šiuos trikdžius būtų galima pašalinti reikia tiriamą variklį perkelti į netriukšmingą zoną, kas realiai yra neįgyvendinama arba naudoti filtrus ir signalo apdorojimo priemones šiems trikdžiams sumažinti [1].

Galima naudoti paprastus aukšto ar žemo dažnio filtrus sudarytus iš varžos ir kondensatoriaus. Naudojant šiuos filtrus signalas apdorojamas ir nereikalinga signalo dalis pašalinama – nufiltruojama. Žemo dažnio filtrai geba filtruoti aukšto dažnio signalą, praleidžiant tik žemo dažnio signalus. Atvirkštinis jam yra aukšto dažnio filtras, kurio konstrukcija gali būti sudaryta iš tų pačių, vietomis sukeistų komponentų. Kiti, sudėtingesni filtrai, yra plačiajuostis filtras, dažnio juostos filtras, baigtinio impulso atsako filtras ir begalinio impulso atsako filtras.

Be filtrų taip pat naudojami signalo apdorojimo metodai pagrįsti Furjė transformacijomis. Dažniausiai naudojami algoritmai pagrįsti greitąja Furjė transformacija, įvairios laiko-dažnio srities analizės. Norint garso signalą apdoroti šiais metodais naudojamos programinės įrangos arba kita specifinė įranga, kuri geba atlikti šias funkcijas.

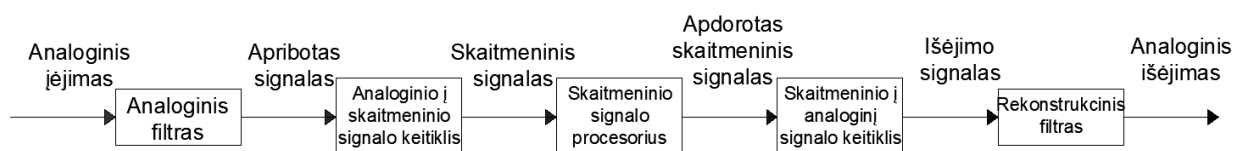
Naudojant garso analizės metodą galimas technologinių įrenginių gedimo aptikimas realiu laiku arba įrašant skleidžiamus garso įrenginio garsus ir naudojant juos vėliau. Šis garso įrašas gali būti įrašytas įvairiais įrenginiais, nuo kurių priklausys gauto garso failo kokybė ir tuo pačiu atliekamos garso signalo analizės tikslumas. Naudojant mobiliojo telefono integruotą mikrofoną užfiksuojamas technologinio įrenginio garsas pagal kurį įmanoma atpažinti technologinius gedimus, tačiau ši įrenginio analizė nebus tokia tiksli kaip naudojant tam pritaikytus specialius mikrofonus [13].

Pagrindiniai technologiniai gedimai kuriuos galima aptikti naudojant garso analizės metodą yra guolių gedimai ([14], [15]), rotorius ir statorius gedimai [1].

## 1.2. Signalų apdorojimas

Norint panaudoti matavimų duomenis variklio technologiniam gedimui identifikuoti reikalingas iš jutiklio gaunamos informacijos apdorojimas. Apdorojant signalą, siekiama išryškinti reikalingą informaciją gedimo aptikimui ir panaikinti pašalinę informaciją. Tai gali būti šalia įrenginio stovintys kalbantys žmonės, veikiantys kiti įrenginiai arba vėjo gūsiai, jeigu analizuojamas variklis stovi lauke. Visi šie garsai yra trikdžiai kurie iškraipo variklio gedimo skleidžiamus garsus. Dėl šių trikdžių analizuojamas signalas gali būti klaidingai interpretuotas.

Signalų apdorojimas naudojamas išryškinti reikiamą signalą, panaikinant trikdžius ir pašalinę informaciją. Signalų apdorojimo blokinė diagrama (žr. 3 pav.) susideda iš analoginio signalo filtro, analoginio į skaitmeninį signalą keitiklio (angl. *Analog-to-Digital Converter*, trump. *ADC*), skaitmeninio signalo procesoriaus, skaitmeninio į analoginį signalą keitiklio (angl. *Digital-to-Analog Converter*, trump. *DAC*) ir rekonstrukcinio filtro.



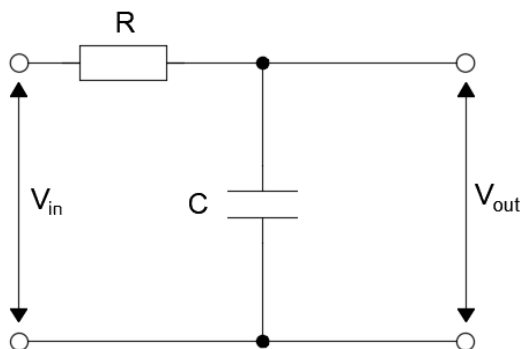
3 pav. Skaitmeninio signalo apdorojimo blokinė schema [3]

Jutiklio generuojamas analoginis signalas perduodamas įtampos ar srovės stiprio forma į analoginio signalo filtro įėjimą, kuris apriboja signalo dažnio spektrą prieš signalo nuskaitymą. Tam kad signalą suprastu procesorius gautą signalą reikia paversti iš analoginio signalo į skaitmeninį. Šiam tikslui naudojamas *ADC* keitiklis. Skaitmeninio signalo procesorius gautą skaitmeninį signalą nuskaitymo ir apdoroja naudojant į procesorių įrašytas instrukcijas. Skaitmeninio signalo procesorius gali būti kasdienio naudojimo kompiuteris, mikrovaldiklis ar paprasta mikroschema. Procesoriaus instrukcijos suformuojamos ir įrašomos naudojant atitinkamą specialią programinę įrangą. Skaitmeninio signalo procesoriui, pagal nustatytą programą, apdorojus signalą suformuojamas išeinantis skaitmeninis signalas, kuris perduodamas į skaitmeninio signalo *DAC* keitiklį. Šis keitiklis paverčia išeinamą skaitmeninį signalą į analoginį signalą, kuris toliau nukreipiamas rekonstrukciniam filteriui. Šio filtro funkcija yra suderinti skaitmeninio signalo įtampos lygius su darbinėje aplinkoje naudojamais analoginio signalo įtampos lygiais [3].

### 1.2.1. Signalų filtrų tipų analizė

Signalų filtravimas yra vienas iš pagrindinių signalų apdorojimo metodų. Signalų filtravimas naudojamas atlikti dvi funkcijas: signalų atskyrimo ir signalų rekonstrukcijos [3]. Signalų atskyrimas naudojamas kai gaunamas signalas yra užterštas pašalinių trikdžių ar kitų nereikalingų signalų. Signalų rekonstrukcija yra naudojama kai gautas signalas yra iškraipytas.

Vienas iš paprasčiausių signalų filtravimo metodų yra žemo dažnio filtras (angl. *Low-Pass Filter*). Šio tipo filtras apriboja signalo dažnį nustatytose ribose. Idealus filtras nepraleidžia signalo už nustatytų dažnio ribų ir neveikia šiose ribose esančio signalo. Tačiau realiai naudojant žemo dažnio filtrą praleidžiamas signalas bus veikiamas signalo perdavimo laiko vėlinimo [3]. Šis signalo vėlinimas sumažina visos sistemos reakcijos laiką. Vienas iš paprasčiausių žemo dažnio filtro pavyzdžių elektrotechnikoje yra lygiagrečiai RC grandinė (žr. 4 pav.).



**4 pav.** RC grandinė, žemo dažnio filtras

RC grandinė susideda iš dviejų komponentų, varžos ir kondensatoriaus, sujungtų lygiagrečiai. Kadangi kondensatorius yra reaktyvinis elementas, jo varža keičiasi, keičiantis dažniui, kaip aprašyta (1) lygtyje.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}; \quad (1)$$

čia  $X_C$  – kondensatoriaus reaktyvinė varža,  $\Omega$ ;

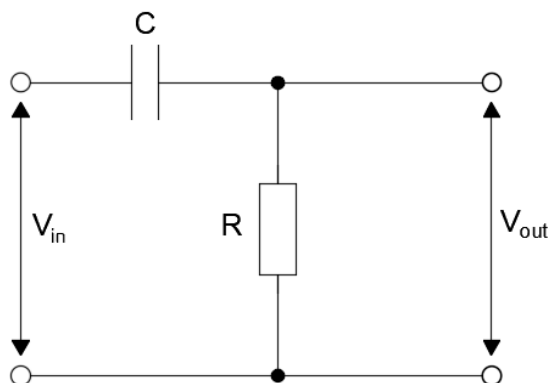
$\omega$  – kampinis pagreitis, rad/s;

$C$  – kondensatoriaus talpa, F;

$f$  – dažnis, Hz.

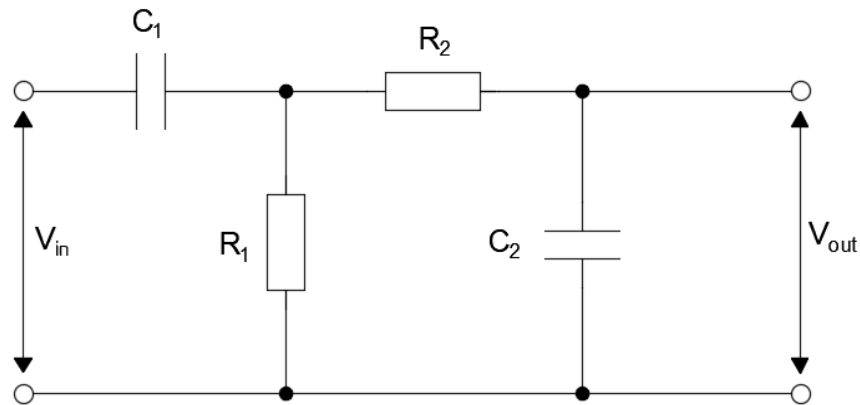
Iš (1) lygties matome kad esant mažam dažniui kondensatoriaus reaktyvinė varža yra didelė, o didėjant dažniui reaktyvinė varža mažėja. Taip RC filtras naudoja kondensatoriaus reaktyvinę varžą apriboti signalo dažnį, kadangi esant dideliame signalo dažniui kondensatoriaus reaktyvinė varža bus mažesnė negu varžos  $R$  ir signalo srovė kondensatoriaus bus šuntuojama.

Atvirkštinis variantas žemo dažnio filtrui yra aukšto dažnio filtras (angl. *High-Pass Filter*), šis filtras praleidžia aukšto dažnio signalą ir filtruoja žemo dažnio signalą. Filtras taip pat naudoja RC grandinę signalui filtruoti. Tačiau šio filtro RC grandinėje kondensatorius ir varža yra sukeisti vietomis (žr. 5 pav.).



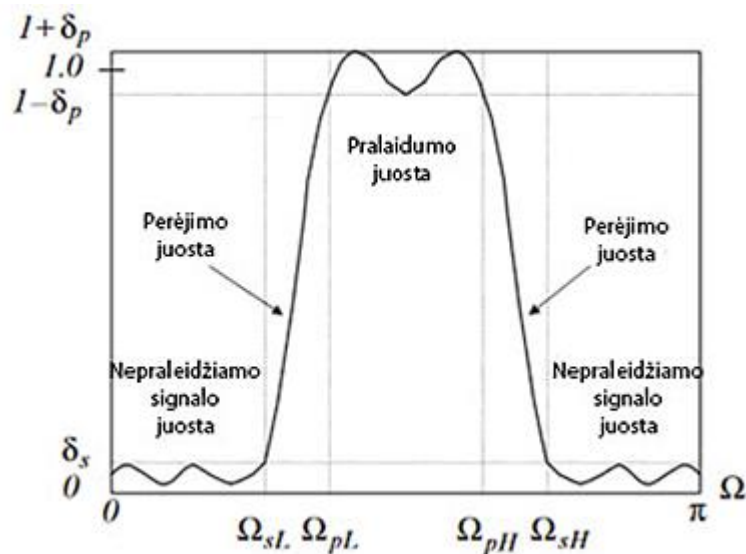
**5 pav.** RC grandinė, aukšto dažnio filtras

Žemo ir aukšto dažnio filtrai yra paprasčiausi filtrų tipai, kurie dažnį gali apriboti tik vienoje ar kitoje dažnių spektro zonoje. Filtrai kurie vienu metu apriboja aukštas ir žemas dažnio sritis, vadinami plačiajuosčiais filtrais (angl. *Bandpass Filter*) [3]. Šio tipo filtras gaunamas sujungiant žemo dažnio filtrą ir aukšto dažnio filtrą. Elektrotechnikoje šio tipo filtras būtų RC grandinė susidedanti iš dviejų varžų ir dviejų kondensatorių (žr. 6 pav.).



6 pav. RC grandinė, plačiajuostis filtras

Plačiajuostis filtras filtruoja aukšto ir žemo dažnio signalą, palikdamas tik tą signalo zoną kuri yra tarp žemo ir aukšto dažnio ribų. Šio tipo filtro veikimas iliustruojamas 7 paveiksle.

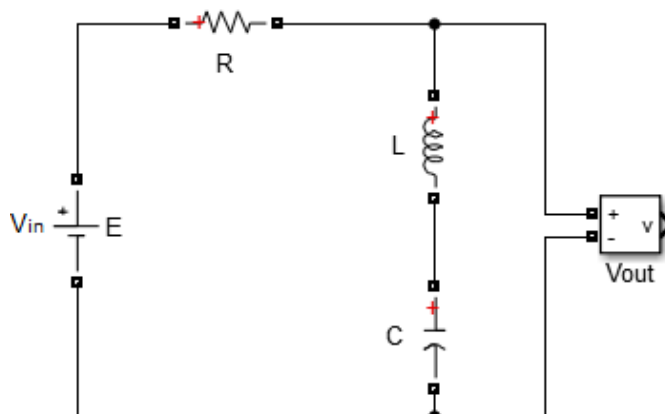


7 pav. Plačiajuosčio filtro signalo pralaidumo grafikas [3]

Pirmojoje *Stopband* zonoje pavaizduotas filtruojamas žemo dažnio signalas, *Transition* zonoje signalo dažnis pasiekia žemo dažnio filtro ribą ir filtras šį signalą praleidžia. *Passband* zonoje signalas tarp žemo ir aukšto dažnio filtro ribų yra pilnai perduodamas, pasiekus aukšto dažnio ribojimo zoną *Transition* atkarpoje signalas pradedamas filtruoti, o *Stopband* zonoje signalo dažnis yra didesnis už aukšto dažnio filtro ribą ir signalas filtruojamas.

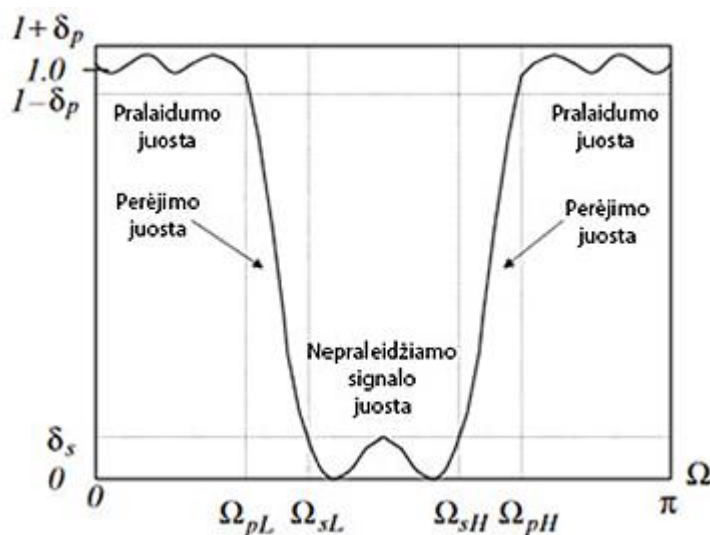
Paskutinis iš pagrindinių filtrų tipų yra dažnių juostos filtras (angl. *Band-Stop Filter*), šio tipo filtro veikimas yra atvirkštinis plačiajuosčiam filteriui. Jis praleidžia žemo ir aukšto dažnio signalą tačiau

nepraleidžia signalo esančio tarp žemo ir aukšto dažnio filtravimo ribų. Šį filtrą elektrotechnikoje galima pavaizduoti kaip RLC grandinę, kuri susideda iš varžos, ritės ir kondensatoriaus (žr. 8 pav.).



8 pav. RLC grandinė, dažnių juostos filtras

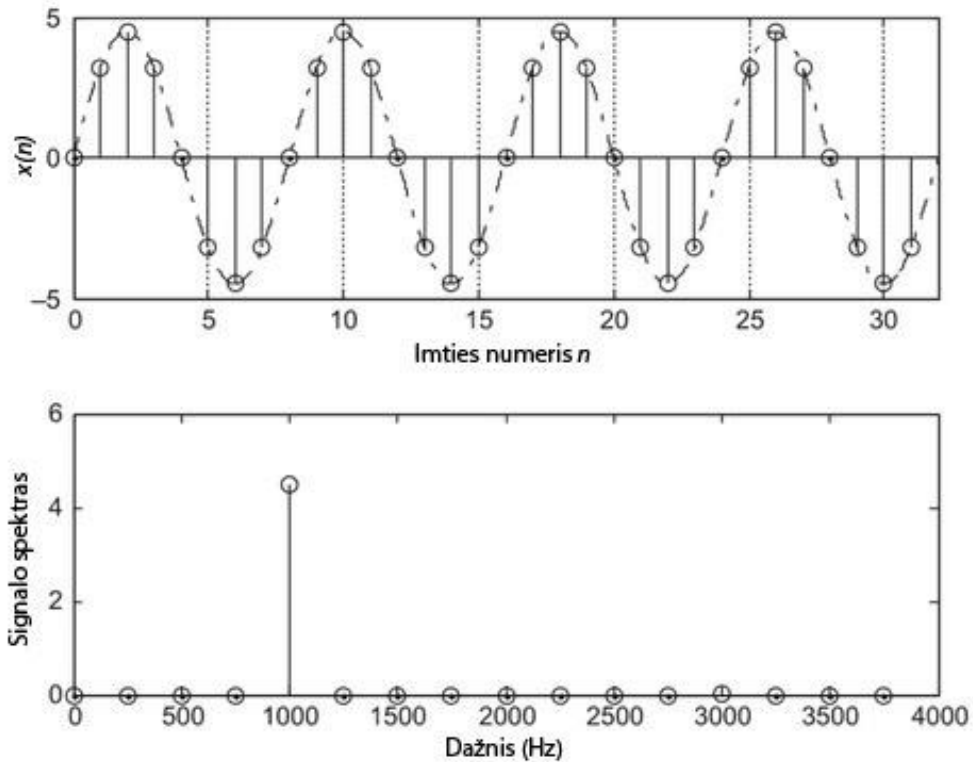
Dažnių juostos filtro veikimas iliustruotas 9 paveiksle.



9 pav. Dažnio juostos filtro signalo pralaidumo grafikas [3]

### 1.2.2. Furjė transformacijų analizė

Gaunami diskretieji signalai įprastai būna laiko srityje, šiuos duomenis pavertus į grafiką  $y$  ašyje matytume signalo amplitudę, o  $x$  ašyje matytume imties numerį arba imties laiką. Tačiau imties laikas ar numeris ne visada perduoda reikiamą informaciją. Tam, kad atpažinti technologinio gedimo signalą, signalas yra apdorojamas ir paverčiamas į dažnio sritį. Dažnio srityje vietoje imties numerio ar laiko gaunamas signalo dažnis [3]. Šis skirtumas parodytas grafike (žr. 10 pav.). Toks signalo atvaizdavimo būdas patogus, kai reikia analizuoti signalų spektrus.



10 pav. Signalas atvaizdavimo laiko ir dažnio srityse skirtumai [3]

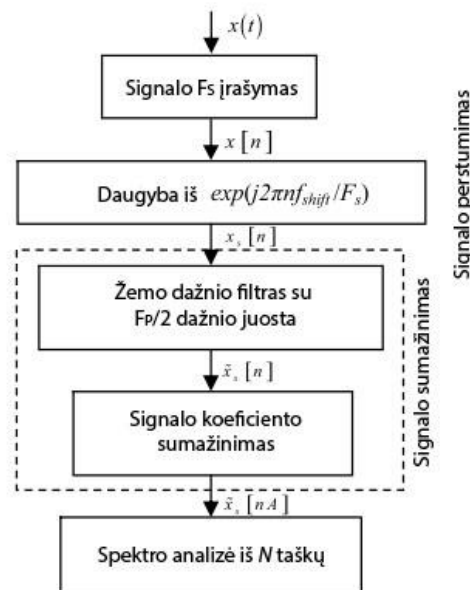
Diskrečioji Furjė transformacija yra klasikinis signalo apdorojimo metodas, atliekantis konversiją iš laiko į dažnio sritį [3]. Ši transformacija realizuojama didelio kompiuterinio skaičiavimo efektyvumo algoritmu, kuris buvo plačiai naudojamas elektrinių įrenginių būsenos stebėjimui [16]. Tačiau diskrečioji Furjė transformacija turi apribojimų kurie nepalankūs technologiniams gedimo aptikimams. Pagrindinis šio metodo apribojimas yra papildomas trikdys kuris yra pridomas prie gauto signalo. Kadangi pramoninėse patalpose dažniausiai įrenginiai stovi vienas šalia kito, tai sukelia trikdžius, kurie mažina perduodamo signalo kokybę. Prie šio signalo pridėjus papildomus trikdžius kuriuos įneša diskrečioji Furjė transformacija, gaunamas papildomai užterštas signalas, o tai sumažina gedimo aptikimo sistemos tikslumą [17]. Be pridomo trikdžio signalui diskrečioji Furjė transformacija taip pat pasižymi sudėtingais ir pakankamai didelės apimties kompiuteriniais skaičiavimais. Todėl naudojant diskrečiąją Furjė transformaciją signalo apdorojimui galutinis signalas negali būti gaunamas realiuoju laiku. Diskrečioji Furjė transformacija gali būti invertuota. Šios funkcijos invertavimas pakeičia signalą iš dažnio srities į laiko sritį. Diskrečiosios Furjė transformacijos lygtis aprašyta (2) lygtyje.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{-\frac{i2\pi}{N} * kn}; \quad (2)$$

- čia  $X_k$  – išėjimo skaičių eilutė (signalas dažnių srityje);
- $N$  – tiriamos kompleksinių skaičių eilutės ilgis;
- $n$  – skaičiaus numeris eilutėje;
- $x_n$  – įėjimo skaičių eilutė (laikinis signalas);
- $k$  – skaičius priklausantis aibei  $k \in [0, N - 1]$ .

Vienas iš plačiausiai naudojamų tradicinių signalo apdorojimo algoritmų variklių technologinių gedimų aptikimui yra greitoji Furjė transformacija (angl. *Fast Fourier Transform*, trump. *FFT*) [17], [18]. Greitoji Furjė transformacija yra diskrečiosios Furjė transformacijos algoritmas kuris sumažina reikalingų kompiuterinių skaičiavimų žingsnių skaičių. Norint apskaičiuoti  $N$  taškų, naudojant *FFT*, šis skaičius sumažėja nuo  $2 * N^2$  iki  $2 * \log_2 N$  [18]. Tai pagreitina signalo apdorojimo laikus. Tačiau norint atpažinti gedimą realiuoju laiku, naudojant tokius paprastesnius įrenginius, kaip skaitmeninis signalų procesorius, skaičiavimų laikas ir sudėtingumas gali perkrauti įrenginį. Ši perkrova gali sulėtinti procesoriaus skaičiavimus ir taip padidinti signalų apdorojimo laiką. Greitoji Furjė transformacija gali būti pritaikoma invertuotai diskrečiajai Furjė transformacijai.

Naudojant greitąją Furjė transformaciją kaip pagrindą buvo sukurti kiti signalo apdorojimo metodai, kurie pasižymi didesne signalo dažnio rezoliucija [16]. Vienas iš šių metodų yra *Zoom* greitoji Furjė transformacija (angl. *Zoom Fast Fourier Transform*, trump. *ZFFT*). Šis metodas naudoja greitąją Furjė transformaciją kaip pagrindą signalo analizei. *Zoom* greitoji Furjė transformacija signalą apdoroja tam tikroje diskrečios laiko signalo dažnio juostoje, kuri gaunama stumdant keičiant dažnį, naudojant filtravimą ir signalo mažinimą, kad gaunamą rezultatą būtų galima peržiūrėti didesne skiriamąja geba (žr. 11 pav.) [16].



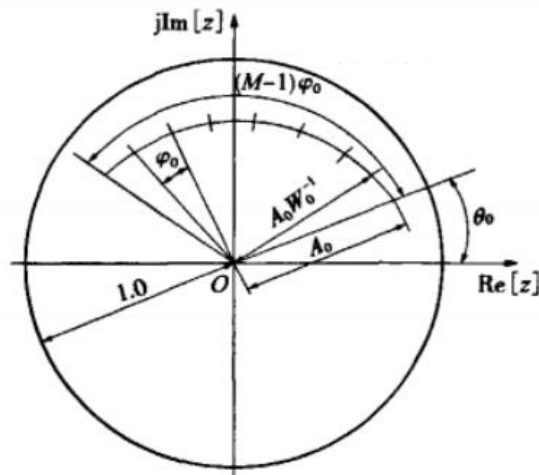
11 pav. *Zoom* greitosios Furjė transformacijos blokinė schema [16]

*Zoom* greitoji Furjė transformacija nuo greitosios Furjė transformacijos skiriasi šiomis savybėmis[16]:

- sumažintas skaičiavimų laikas;
- sumažintas įrenginio naudojamas atminties kiekis;
- padidintas tikslumas nustatytoje dažnio srityje.

Kitas signalo apdorojimo metodas kuris remiasi greitąją Furjė transformacija yra *CZT* (angl. *Chirp Z-transform*). Šis metodas taip pat naudoja greitąją Furjė transformaciją kaip signalo apdorojimo pagrindą. *CZT* metodas naudoja apdorojamų duomenų perkėlimą į  $Z$  sritį naudojant  $Z$ -transformaciją. Apdorojamo signalo duomenys yra išdėstomi apskritimu  $z$  srityje, kurioje dažnio sritis yra lanko formos (žr. 12 pav.) ir ji gali būti daloma į bet kokių skaičių segmentų [16].





12 pav. Signalas apdorotas CZT Z srityje [19]

Naudojant CZT metodą galima analizuoti dažnius norimoje dažnių srityje nekeičiant duomenų ilgio.

### 1.2.3. Kelių signalų klasifikacijos analizė

Kelių signalų klasifikacijos analizė (angl. *Multiple Signal Classification*, trump. *MUSIC*) yra algoritmas kuris apskaičiuoja signalo dažnio vertes naudojant *eigenvector* analizę. Šis metodas pagrįstas tuo kad diskretus laiko signalas  $x(n)$  gali būti priimtas kaip  $m$  skaičiaus kompleksinių sinusoidžių, kurios yra paslėptos triukšmo signalė  $e(n)$  [20]. Šio metodo matematinė formulė pateikta (3) lygtyje [21].

$$x(n) = \sum_{i=1}^m \bar{A}_i * e^{j2\pi f_i n} + e(n), n = 0, 1, 2, \dots, N - 1; \quad (3)$$

kai:

$$\bar{A}_i = |A_i| e^{j\phi_i}; \quad (4)$$

čia  $x(n)$  – diskretaus laiko signalas;

$m$  – dažnio signalo dimensijos laipsnis (angl. *Frequency Signal Dimension Order*, trump. *FSDO*);

$N$  – imties numeris;

$|A_i|$  –  $i$ -osios kompleksinės sinusoidės amplitudė;

$f_i$  –  $i$ -osios kompleksinės sinusoidės dažnis;

$\phi_i$  –  $i$ -osios kompleksinės sinusoidės fazė;

$e(n)$  – baltojo triukšmo diskretinio laiko signalas.

*MUSIC* algoritmas susideda iš trijų pagrindinių žingsnių. Pirmasis algoritmo žingsnis yra autokoreliacijos matricos dydžio nustatymas. Šios matricos dydis nustato algoritmo tikslumo lygį ir reikalingų skaičiavimų skaičių. Antrasis žingsnis yra *eigenvector* verčių išskaidymas ir trečiasis žingsnis, pseudospekto skaičiavimai žinant dažnio signalo dimensijos laipsnio  $m$  vertę [21].

Kelių signalų klasifikacijos analizė dažniausiai naudojami nustatyti kryptį iš kurios gaunamas signalas. *MUSIC* algoritmas yra šio metodo pagrindas pagal kurį yra sukurti kiti pranašesni algoritmai.

#### 1.2.4. Laiko-dažnio srities analizė

Laiko-dažnio srityje analizuojami signalai atvaizduojami dvejose srityse: laiko ir dažnio. Šios srities signalo apdorojimo metodai naudojami tada kai signalas yra nestacionarus. Tai atliekama padalinant nestacionarų signalą į signalo stacionarias dalis ir pritaikant dažnio srities analizės metodą kiekvienai daliai [16]. Plačiausiai taikomi laiko-dažnio srities metodai yra trumpo laiko Furjė transformacijos (angl. *Short-time Fourier Transform*, trump. *STFT*), Wignerio-Villeo paskirstymas (angl. *Wigner-Ville Distribution*), Vilnelės transformacija (angl. *Wavelet Transform*) [17], [16], [22]. Laiko-dažnio sritis yra skirstoma į šias grupes: [22]

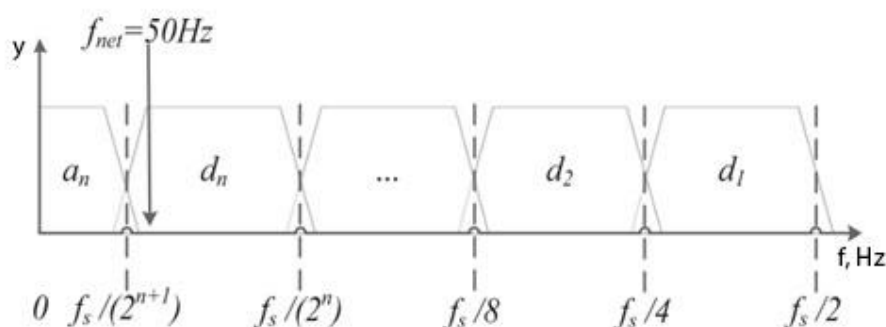
- linijinė (angl. *Linear*);
- bilinijinis (angl. *Bilinear*);
- laike kintantis aukštesnės eilės spektras (angl. *Time-varying Higher Order Spectra*).

Linijinė laiko-dažnio srities atvaizdavimas yra procesas, kurio metu signalas yra išdalinamas į tam tikro dydžio laiko ir dažnio srities gabalus, kurių suma yra pradinis signalas. Šio tipo laiko-dažnio sritis turi du pagrindinius signalo apdorojimo metodus: trumpo laiko Furjė transformacija ir Vilnelės transformacija [22], [23].

Trumpo laiko Furjė transformacija pagrįsta prielaida kad signalas trumpa laiko tarpą yra beveik stacionarioje būsenoje (angl. *Quasi-stationary*) [24]. Ši transformacija susideda iš dviejų dalių, pirmoji kai signalas yra padalijamas į laiko srities dalis ir antroji dalis, kurios metu gaunami spektrai kiekvienos laiko srities dalies naudojant Furjė transformaciją. Šis procesas leidžia atvaizduoti signalo dažnio pokyčius laike.

Kitas signalo apdorojimo metodas, priskiriamas linijinei laiko-dažnio sričiai yra Vilnelės transformacija. Šis metodas naudoja bangos formos funkcijas, vietoje sinusoidės. Vilnelės transformacija skirstoma į dvi grupes: diskrečioji Vilnelės transformacija ir tolydi Vilnelės transformacija [24].

Diskrečioji Vilnelės transformacija signalą išskiria į bangas laiko ir dažnio srityje [25]. Signalas apdorojamas filtravimo būdu (žr. 13 pav.).



13 pav. Diskrečiosios Vilnelės transformacijos filtravimo principas [25]

Diskrečiosios Vilnelės transformacijos filtravimo procesas nėra idealus, kadangi signalas ties pažymėtomis vietomis persikloja su gretima dažnio juosta. Tai gali sukelti trikdžius signalui jeigu signalo dažnis yra artimas dažnio juostos ribai. Šio tipo analizė pasižymi nedideliu skaičiavimų kiekiu ir vienu metu gali analizuoti skirtingų dažnių komponentus esančius signale.

Tolydžioji Vilnelės transformacija išskaido apdorojamą signalą į perstumdytas ir pakeisto mastelio pagrindinės bangos versijas [24]. Šis metodas pasižymi kintamos rezoliucijos savybe. Kai signalo dažnis yra aukštas laiko srities rezoliucija yra didesnė negu dažnio srities. O kai signalo dažnis yra žemas, dažnio srities rezoliucija yra didesnė negu laiko srities rezoliucija.

Bilinijinė laiko-dažnio sritis atvaizduoja signalo energijos pasiskirstymą jungtinėje laiko-dažnio srityje. Bilinijinės laiko-dažnio srities pagrindas yra Wignerio-Villeo paskirstymas. Šis metodas turi didelę laiko-dažnio rezoliuciją ir pasižymi nedideliu skaičiavimų laiku ir užimama vieta [26], [27]. Wignerio-Villeo paskirstymas neišskirsto signalo kaip trumpo laiko Furjė transformacija, tačiau šis metodas tiesiogiai realiai nenaudojamas dėl *cross terms* iškraipymų, kurie susidaro kai analizuojamas daugiau negu vienas signalas. Nors šis metodas nėra dažnai naudojamas realiose aplikacijose, jo veikimo principą naudoja kiti plačiai naudojami bilinijinės laiko-dažnio srities signalo apdorojimo metodai kaip *Cohen* klasės paskirstymas, *Affine* klasės paskirstymas ir optimalus *Kernel* metodas [22].

*Cohen* klasės paskirstymas naudoja *Kernel* funkciją išlyginti Wignerio-Villeo paskirstymą keičiant laiką ir dažnį. Naudojant šią funkciją galima pagerinti signalo rezoliuciją bei panaikinti *cross term* iškraipymus. *Kernel* funkcija naudoja *kernel* koeficientus kurie yra realizuojami kaip žemo dažnio filtrai, panaikinantys iškraipymus. Kiekvienas naudojamas *kernel* koeficientas atitinka tam tikrą paskirstymo metodą, kuriuos slopinant gerinama originalaus signalo kokybė [22].

*Affine* klasės paskirstymas taip pat naudoja *Kernel* funkciją išlyginti Wignerio-Villeo paskirstymą, tačiau šios klasės paskirstymas nuo *Cohen* klasės paskirstymo skiriasi tuo kad Wignerio-Villeo paskirstymas keičiamas tik laiko srityje [22].

*Cohen* ir *Affine* klasių paskirstymai naudoja *Kernel* funkciją, kurios yra naudojamas sumažinti ar panaikinti iškraipymus. Tačiau šios funkcijos yra nekintančios ir geba pašalinti tik vieno tipo iškraipymo signalą. Optimalus *Kernel* metodas buvo sukurtas tam kad būtų išspręstas šis funkcijos trūkumas. Naudojant šį metodą gaunamas signalas turi didesnę rezoliuciją negu naudojant *Cohen* ar *Affine* klasės paskirstymus. Tačiau šis metodas gali sumažinti iškraipymus tik artimame originalaus signalo dažnio diapazone [22].

### 1.2.5. Baigtinio impulso atsako filtro metodas

Baigtinio impulso atsako filtras (angl. *Finite Impulse Response*, trump. *FIR*) yra skaitmeninis filtro tipas, kurio išėjimas yra svertinė suma (angl. *Weighted Sum*) susidedanti iš įėjimo buvusių ir esamų verčių, naudojant ribotą buvusių verčių kiekį [28]. Šio tipo filtrai plačiai naudojami skaitmeninių signalų apdorojimo programose ir algoritmuose dėl jų stabilumo ir teisiškumo savybių [29].

*FIR* filtro struktūrą (žr. 14 pav.) atvaizduoja matematinė lygtis (5) [28].

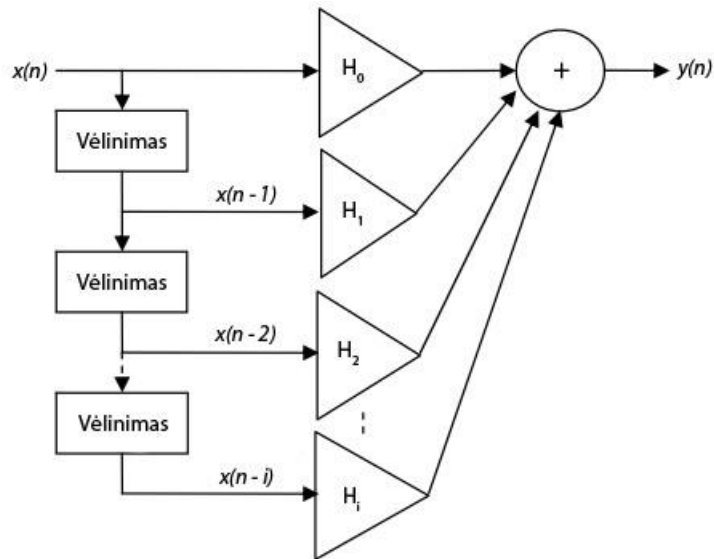
$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} H_i * X_{n-i}; \quad (5)$$

čia  $y(n)$  – perdavimo funkcija;

$N$  – imties dydis;

$H_i$  – FIR filtro koeficientai;

$X_{n-i}$  – FIR filtro įėjimo signalai.

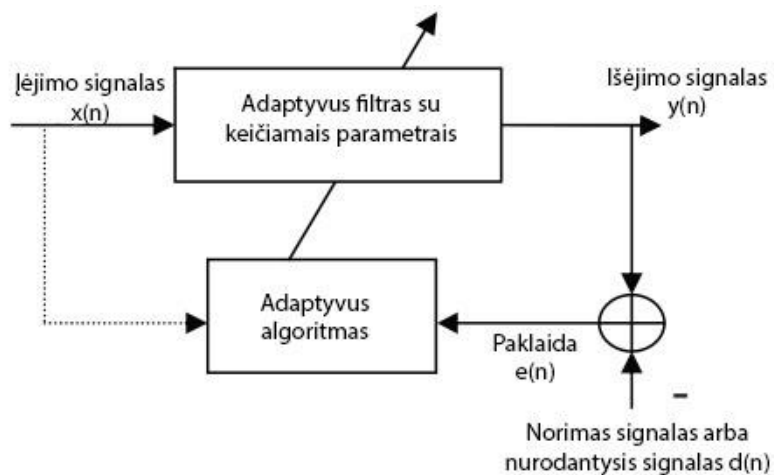


14 pav. Baigtinio impulso atsako filtro struktūra [30]

*FIR* filtras skirstomas į žemo dažnio, aukšto dažnio, plačiajuosčius ir dažnio juostos filtrus. *FIR* filtro tipą nustato koeficientas  $H_i$  [31]. *FIR* filtras neturi grįžtamojo ryšio signalo, todėl jie pasižymi dideliu signalo stabilumu ir paprastesne filtro konstrukcija lyginant su begalinio impulso atsako filtru [32]. Šio tipo filtrai naudoja įvairius *Window* metodus signalams filtruoti. Pagrindinė *Window* metodo funkcija yra išskirti begalinio ilgio signalo ruožą, kurį *FIR* filtras naudoja kaip baigtinį signalą.

### 1.2.6. Begalinio impulso atsako filtro metodas

Begalinio impulso atsako filtras (angl. *Infinite Impulse Response*, trump. *IIR*) yra skaitmeninis filtro tipas, kurio išėjimas yra priklausomas nuo buvusių išėjimų (žr. 15 pav.). Ši grįžtamojo ryšio grandinės dalis leidžia šiam filtro tipui perduoti didelį kiekį duomenų neapkraunant įrangos.



15 pav. Adaptyvus begalinio impulso atsako filtro modelis [33]

Tačiau grįžtamasis ryšys taip pat pasunkina begalinio impulso atsako filtro konstrukciją ir suteikia neigiamas savybes, kaip fazių iškraipymas ir kitus reiškinius kurie gali sukelti nestabilumą sistemoje. Tam kad būtų galima išvengti šių *IIR* filtro trūkumų reikia išsamiai išanalizuoti norimo filtro konstrukciją ir algoritmą, tam kad šie trikdžiai būtų įvertinti galiniame rezultate [33].

15 paveiksle pateiktame modelyje pavaizduotas *IIR* filtras kuris naudoja adaptyvų algoritimą signalo filtravimui. Adaptyvus filtras gavęs įėjimo reikšmę  $x(n)$ , apdoroja šį signalą ir perduoda į išėjimą. Čia signalas yra išskiriamas į dvi dalis, išėjimo signalą  $y(n)$  ir grįžtamojo ryšio signalą. Grįžtamojo ryšio signalas yra palyginamas su norimo signalo verte ir nauja vertė yra perduodama adaptyviam algoritmui, kuris nuskaito gautus duomenis ir pakeičia filtro parametrus. Naujas įėjimo signalas  $x(n)$  apdorojamas adaptyvaus filtro su pakeistais parametrais lyginant su pirmu signalu. Idealiu atveju šis ciklas kartojasi tol kol norimo signalo vertė yra lygi išėjimo signalui, tačiau realiai išėjimo signalas nebūna lygus norimam signalui dėl įvairių papildomų trikdžių.

### 1.3. Skaitmeninių signalų procesorių analizė

Skaitmeniniais signalų procesoriai yra įrenginiai kurie naudodami įvairius matematinius skaičiavimus, dideliu greičiu, realiame laike manipuliuoja skaitmenizuotais signalais. Šie signalai gali būti garsas, vaizdas, temperatūra, slėgis ir kiti panašūs parametrai. Skaitmeniniai signalų procesoriai yra skirstomi į dvi pagrindines grupes – bendro naudojimo ir specializuoti. Bendro naudojimo procesoriai naudojami įvairiose srityse ir įvairiems signalams apdoroti. Šio tipo *DSP* naudojami srityse kur nereikalinga duomenų analizė realiu laiku. Specializuoti skaitmeniniai signalų procesoriai yra naudojami specifiniams signalams apdoroti, pvz. garso signalui. Šio tipo procesorių konstrukcija yra pritaikyta tik tam tikram signalui apdoroti, todėl jie yra sudėtingesnės konstrukcijos ir brangesni.

#### 1.3.1. Skaitmeninių signalų procesorių konstrukcija

Skaitmeniniai signalų procesoriai sudaryti iš fizinės ir programinės įrangos. Fizinė įranga susideda iš tokių komponentų kaip procesorius, atmintis, įėjimų ir išėjimų blokai, jungtys ir kt. Skaitmeniniuose signalų procesoriuose programinė įranga naudojama valdant procesoriaus veiksmus. Išorinė programinė įranga naudojama komunikuoti su skaitmeninių signalų procesoriumi. Svarbiausi skaitmeninių signalų procesorių parametrai yra atminties dydis, procesoriaus greitis ir įėjimų bei išėjimų skaičius.

Skaitmeninių signalų procesoriaus atminties dydis nurodo kiek informacijos *DSP* gali sukaupti iš išorinių šaltinių. Didesnė atmintis pagerina bendros analizuojamos informacijos tikslumą. Vidinė *DSP* atmintis naudojama valdymo programai. Jeigu vidinė atmintis yra didelės talpos *DSP* gali atlikti didesnę operacijų skaičių ir sudėtingesnes funkcijas.

*DSP* procesoriaus branduolių greitis nusako koku greičiu procesorius gali atlikti veiksmus. Šie veiksmai gali būti paprasti nuskaitymo ar įrašymo veiksmai, sudėtingesni matematiniai veiksmai ar *DSP* plokštės valdymo signalai. Procesorius yra atsakingas už visą įrenginio valdymą, todėl procesoriaus branduolių greitis yra vienas iš svarbiausių parametru renkantis tinkamą skaitmeninį signalų procesorių.

Kadangi skaitmeninių signalų procesoriai gali būti naudojami kaip valdymo įrenginiai būtina atsižvelgti į *DSP* plokštės turimus įėjimo ir išėjimo signalų skaičius. Šie įėjimų ar išėjimų signalai gali būti skaitmeniniai arba analoginiai. Taip pat kai kurie *DSP* modeliai įėjime turi analoginių signalų transformavimo į skaitmeninius signalus keitiklius (*ADC*) ir skaitmeninių signalų transformavimo į analoginius keitiklius (*DAC*) išėjime. Šie kanalai leidžia gauti signalus iš įvairių įrenginių ir perduoti išeinamą apdorotą signalą kitiems įrenginiams, be papildomos aparatūrinės įrangos.

### 1.3.2. Skaitmeninis signalų procesorius ADAU1701

ADAU1701 yra skaitmeninių signalų procesorius, kuriuos gamina Analog Devices. Šis DSP yra pilna vieno mikrovaldiklio sistema naudojama garso sistemoms su 28 ar 56 bitų garso signalais, turi integruotus ADC ir DAC keitiklius. Šis procesorius turi integruotus filtrus kurie atlieka signalų išlyginimą, žemų dažnių stiprinimą, kelių signalo juostų apdorojimus, trikdžių šalinimą ir kt. Šio skaitmeninių signalų procesoriaus signalų apdorojimas gali būti naudojamas kompensuoti realias garsiakalbių, stiprintuvų ir garso įrašymo įrenginių ribas, kas pagerina garso signalo kokybę [34]. Šis skaitmeninių signalų procesorius gali būti programuojamas naudojant nemokamą programinę įrangą *SigmaStudio*.

ADAU1701 branduolys yra 28 bitų arba 56 bitų, jeigu įjungtas dvigubo tikslumo apdorojimas (angl. *Double Precision Processing*). 56 bitų režimas yra optimizuotas garso signalų apdorojimui. Procesoriaus programa ir parametrų operatyvioji atmintis gali būti užkrauta reikalingu garso signalo apdorojimo algoritmu naudojant *Analog Devices* sukurtą programinę įrangą *SigmaStudio*. Šis algoritmas valdo signalų apdorojimo blokus kaip išlyginamasis filtras, dinaminis procesorius, garso trikdžius ir kt. Ši programa gali būti išsaugota operatyvioje procesoriaus atmintyje ir užkraunama kiekviena kartą įjungus ADAU1701 procesorių.

Aprašomas DSP turi 12 bendro naudojimo jungčių, kurios gali būti naudojamos išorinių valdymo signalų gavimui ar valdymo signalų kitiems įrenginiams formavimui. Jungtys yra konfigūruojamos, jos gali būti naudojamos kaip skaitmeniniai įėjimo ir išėjimo signalai, įėjimo signalas 4 kanalų ADC keitikliui arba serijinė duomenų jungtis (angl. *Serial Data*) [34]. Naudojant šias jungtis kaip įėjimo signalus jos gali būti prijungtos prie mygtukų, jungiklių, enkoderių, potenciometrų ir kitų išorinių valdymo įrenginių. Naudojant jungtis kaip išėjimo signalus galima valdyti LED indikatorius, kitus integrinius grandynus (angl. *Integrated Circuit*) ar prijungti prie išorinių įrenginių.

ADAU1701 skaitmeninių signalų procesorius naudoja valdymo jungtį kuri palaiko visos atminties srities skaitymo ir įrašymo funkcijas. DSP gali būti konfigūruojamas naudojant I<sup>2</sup>C arba SPI ryšius arba gali veikti naudodamas vidinėje atmintyje įrašytą programą be papildomų valdymo jungčių. DSP taip pat turi vidinį osciliatorių, kuris gali būti prijungtas prie išorinio kristalo norint sinchronizuoti pagrindinį taktinių impulsų generatorių (angl. *Master Clock*).

### 1.3.3. Skaitmeninis signalų procesorius TMS320C5517

TMS320C5517 yra Texas Instruments skaitmeninių signalų procesorius, kuris yra naudojamas įvairių procesų signalams apdoroti. DSP naudoja fiksuoto taško (angl. *Fixed-Point*) procesorių, kurio instrukcijų vykdymo laikas yra nuo 13,33 iki 5 ns. Šis skaitmeninių signalų procesorius turi keletą galimų jungčių tipų kaip I<sup>2</sup>C, UART, SPI, UHPI, USB 2.0.

TMS320C5517 DSP turi keitiklį analogas - kodas, kuris aptarnauja 4 įėjimus ir 26 bendros paskirties jungtis. Šios jungtys gali būti sukongūruotos įėjimo signalų priėmimui arba išėjimo signalų formavimui. Šio skaitmeninių signalų procesoriaus dažnis ir procesų atlikimo greitis priklauso nuo maitinimo įtampos. Prie 1,05 V branduolio maitinimo šaltinio dažnis yra 75 MHz, o procesų atlikimo greitis yra 13,33 ns. Kai prie 1,4 V įtampos, procesoriaus dažnis yra 200 MHz, procesų atlikimo greitis yra 5 ns.

Šis skaitmeninių signalų procesorius turi integruotą greitųjų Furjė transformacijų aparatūros greitintuvą (angl. *FFT Hardware Accelerator*). Šis integruotas greitintuvas suteikia pranašumą, kai signalas yra apdorojamas naudojant greitosios Furjė transformacijos metodą. Šie *DSP* yra naudojami mažos galios reikalaujančiose analizės įrenginiuose (kalbos atpažinime, piršto antspaudų atpažinime, atvaizdų atpažinime), balso įrenginiuose (balso įrašymo įrenginiai, laisvų rankų įranga, balso kokybės pagerinimo sistemose), garso sistemose (aido naikinime, ausinėse, garsiakalbiuose, mikrofonuose), nešiojamuose medicinos įrenginiuose [35].

#### **1.3.4. Skaitmeninių signalų procesorių palyginimas**

*ADAU1701* ir *TMS320C5517* yra skaitmeniniai, skirtingų gamintojų, signalų procesoriai. *Analog Devices ADAU1701* procesorius yra specializuotas ir pritaikytas darbui su garso signalais, o *Texas Instruments TMS320C5517* procesorius yra bendro naudojimo *DSP* kuris dažniausiai naudojamas signalams susijusiems su garsu ar vaizdu.

*ADAU1701* skaitmeninių signalų procesorius turi integruotus filtrus kurie padeda pagerinti signalo kokybę. Su šiuo pagerintos kokybės signalu atpažinti technologinius gedimus yra paprasčiau, kadangi lyginant atraminį signalą su gedimo signalu galima geriau identifikuoti skirtumus tarp šių signalų.

*TMS320C5517 DSP* turi integruotą greitosios Furjė transformacijos aparatūros greitintuvą, kuris leidžia atlikti signalo apdorojimus naudojant šią transformaciją nuo 2,2 iki 3,8 kartų greičiau ir nuo 4 iki 6 kartų efektyviau lyginant su įprastu *DSP* [36]. Ši savybė yra aktuali ieškant technologinių gedimų įrenginiuose, realiu laiku.

Apibendrinant skaitmeninių signalų procesorius *ADAU1701* yra tinkamesnis naudoti technologinių gedimų aptikimams, kadangi jame integruoti filtrai pagerina garso signalo kokybę. Kas suteikia tikslesnį signalą naudojamą atpažinti technologinius gedimus. Didelis privalumas, kad šio *DSP* programinė įranga yra nemokama.

#### **1.4. Programinės įrangos analizė**

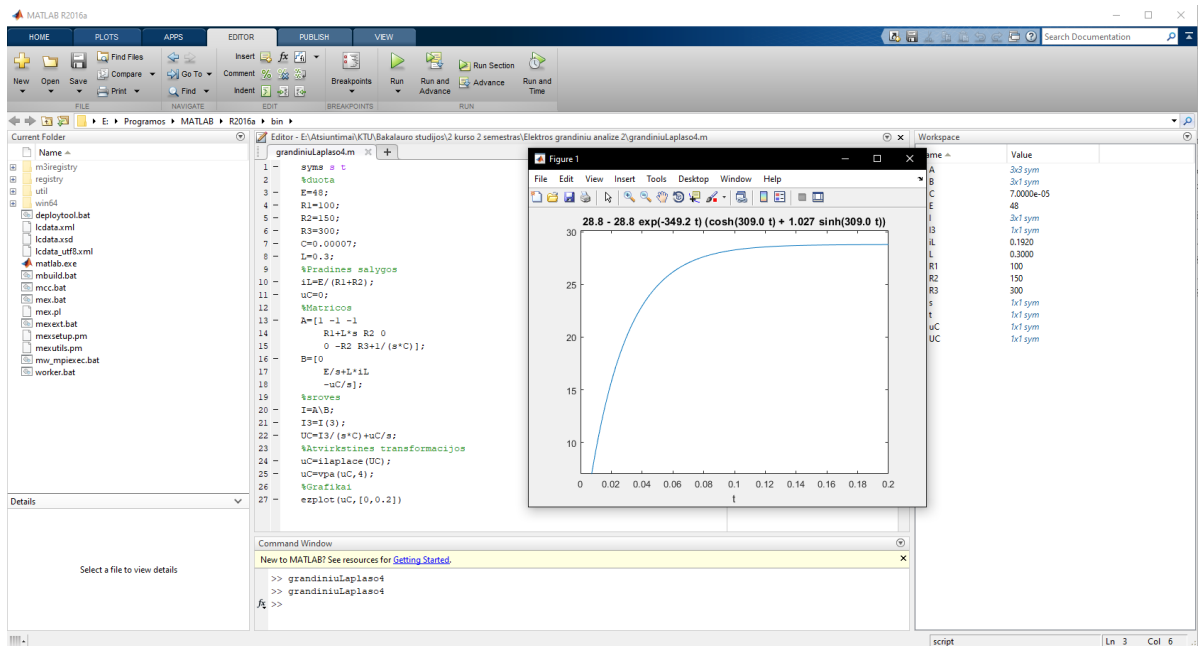
Programinė įranga gali būti naudojama signalams apdoroti, skaitmeninių signalų procesoriams programuoti ar atlikti signalų spektrinę analizę. Viena iš populiariausių programų naudojamų įvairiems tyrimams atlikti ir moduliams sukurti ir tirti yra *MATLAB* programa ir jos modeliavimo modulis *Simulink*. Ši programinė įranga taip pat turi skaitmeninių signalų apdorojimo programinius įrankius, kurie suteikia prieigą prie įvairių signalų apdorojimo algoritmų, simuliacinių modulių ir sistemų. Naudojant šią programą ir jos papildinius *Simulink* aplinkoje galima suprojektuoti ir analizuoti įvairius filtrus, naudoti Furjė transformacijas ir kitus signalų apdorojimo algoritmus.

Kita programinė įranga, kuri suteikia prieigą prie skaitmeninių signalų procesoriaus yra *SigmaStudio*. Ši programinė įranga yra nemokama ir naudojama programuoti, vystyti ir reguliuoti *SigmaDSP* garso procesorius. Ši programinė įranga yra skirta specifiskai skaitmeninių signalų procesorių programavimui ir garso signalų apdorojimui, todėl lyginant su *MATLAB* ji yra pranašesnė garso signalų analizės srityje.

##### **1.4.1. MATLAB programinė įranga**

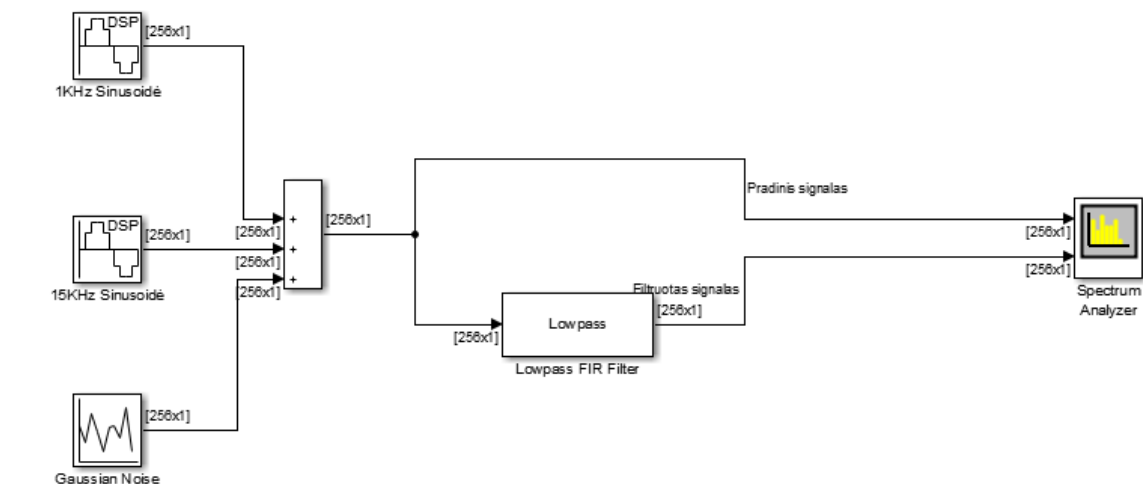
*MATLAB* programinė įranga ir jos modulis *Simulink* plačiai naudojami modeliuoti ir atlikti įvairius tyrimus neturint reikiamos įrangos ar sąlygų atlikti realų eksperimentą. Ši programa leidžia

mokslininkams analizuoti įvairius technologinius ir fizinius reiškinius naudojant tik kompiuterį. Pati *MATLAB* programinė įranga gali atlikti įvairius matematinius veiksmus su įvestais duomenimis, naudoti įvairias transformacijas ir kitas matematinės funkcijas, kurios yra šios programos funkcijų bibliotekoje (žr. 16 pav.).



16 pav. *MATLAB* programa

Naudojant šią programą modelių sudarymui, naudingas *MATLAB Simulink* modulis. Šioje paprogramėje yra integruoti įrankių paketai, leidžiantys papildyti kuriamus modelius naujomis funkcijomis ir valdymo blokais. Keletas papildomų funkcijų susijusių su technologiniais gedimais ir garso sistemomis yra integruoti garso sistemų analizės ir *DSP* sistemų modeliavimo paketai (žr. 17 pav.).



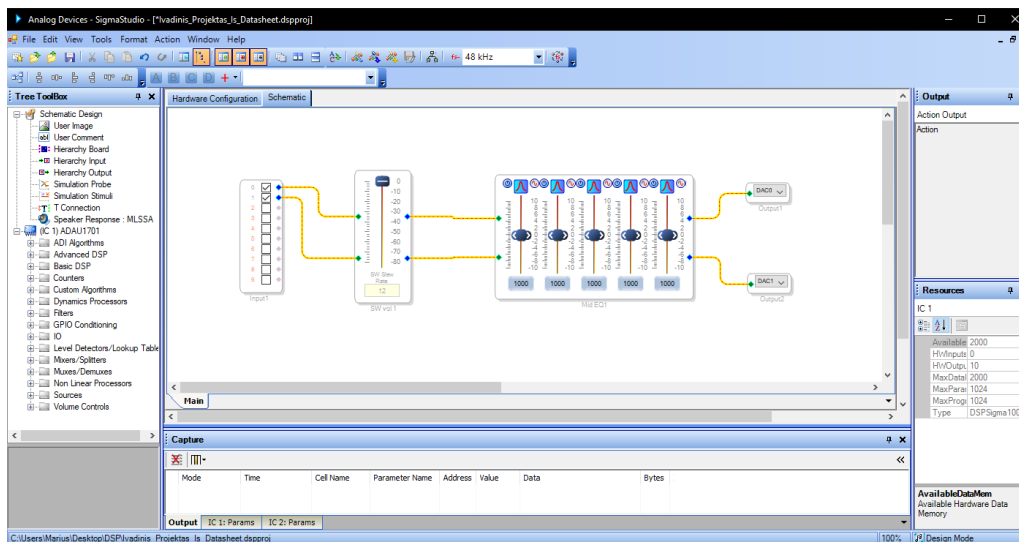
17 pav. *MATLAB Simulink* programos *DSP* sistemos paketas

Naudojant šiuos papildomus paketus kartu su *Simulink* funkcijų biblioteka galima sudaryti modelį įvairių technologinių sistemų ir jų sąveikos su garso signalais tyrimui. Modeliuoti signalų apdorojimą skaitmeninių signalų procesorių perdavimo trakte.



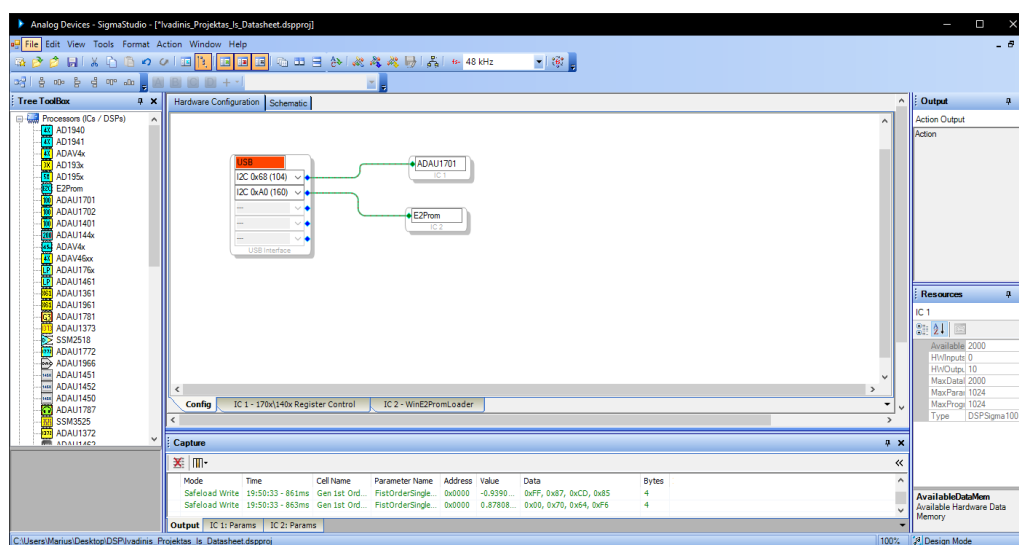
## 1.4.2. SigmaStudio programinė įranga

SigmaStudio programinė įranga palaikoma Analog Devices yra naudojama skaitmeninių signalų procesorių programavimui. Šioje programoje skaitmeninių signalų procesorių programavimas vaizduojamas blokinėmis funkcijomis. Tai yra įėjimo ar išėjimo blokai, signalų lygintuvai, filtrai ir kitos matematinės funkcijos (žr. 18 pav.). Toks programavimo stilius palengvina kokybiškos DSP programos sudarymo procesą.



18 pav. Programinės įrangos SigmaStudio aplinkoje pavyzdys

Programos sudarytos naudojant šią programinę įrangą pavyzdys pateiktas 18 paveiksle. Funkciniai blokai, sudaryti programos algoritmui, pagal kuri skaitmeninis signalų procesorius atliks veiksmus imami iš kairėje pusėje esančio funkcijų sąrašo. Prieš pradėdant programos perkėlimo į fizinę DSP procesorių, programoje SigmaStudio reikia nustatyti komunikacijos ryšius tarp kompiuterio ir procesoriaus. Tai atliekama *Hardware Configuration* skiltyje, pasirenkant kompiuterio komunikacijos ryšį ir įrenginius su kuriais bus komunikuojama (žr. 19 pav.).



19 pav. Programinės įrangos SigmaStudio Hardware Configuration skiltis

Sudarius tinkamą įrangos konfigūraciją prie DSP įrenginio prisijungiama naudojant USB jungtį.

## 2. Tiriamoji dalis

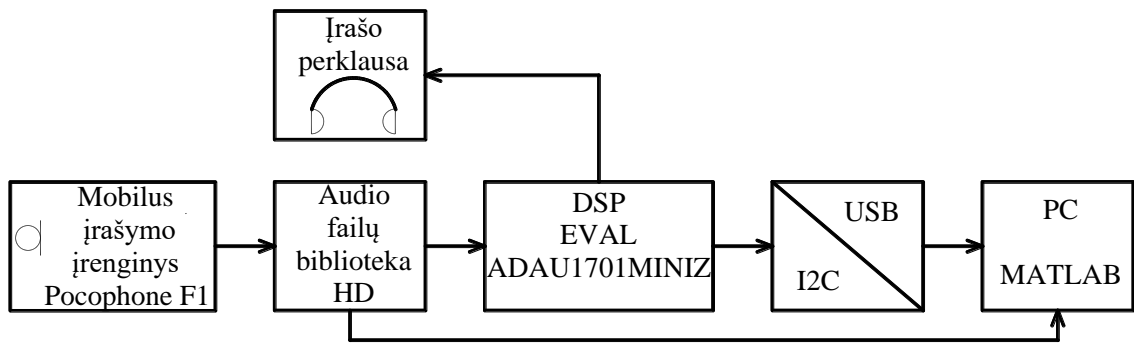
Technologinių įrenginių gedimams atpažinti naudojant garso analizės metodą naudojama keletas skirtingų garso įrašų. Norint identifikuoti technologinį įrenginį su gedimu, palyginimui naudojamas normaliai funkcionuojančio šio įrenginio ar panašaus į jį garso įrašas. Turint normaliu režimu veikiančio variklio garso įrašą, galima atlikti šio įrašo analizę ir iš jo gauti informaciją apie charakteringus dažnius, skleidžiamus įrenginių be gedimų, garso įrašo imties dydį (angl. *Sample Size*) ir imties dažnį (angl. *Sample Rate*). Ši informacija iš turimo įrašo gaunama naudojant *MATLAB* programą. Imties dydis ir dažnis randami naudojant komandą *audioinfo*. Tam, kad nustatyti garso įrašė įrašyto įrenginio skleidžiamus dažnius, reikia šį signalą paversti iš laiko srities į dažnio sritį. Tam naudojama *MATLAB* aplinkoje parašyta programa, kuri naudoja greitąją Furjė transformaciją signalui paversti į dažnio sritį. Pagal gaunamus grafikus galima nustatyti, kurie dažniai charakteringi normaliai veikiantiems ar gedimus turintiems technologiniams įrenginiams.

### 2.1. Tyrimo metu naudojama įranga

Norint ištirti technologinių įrenginių gedimus naudojant garso analizę, visų pirma reikia technologinio įrenginio su gedimu. Šio tyrimo metu buvo naudojami technologiniai įrenginiai iš gamybinių patalpų. Atraminių signalų gavimui naudotas, turimas trifazis asinchroninis variklis be gedimų. Šių įrenginių skleidžiamiems garsams įrašyti buvo naudojamas mobiliojo telefono mikrofonas. Visi garso įrašai įrašyti naudojant tą patį mobilųjį telefoną *POCOPHONE F1*. Šio telefono mikrofonas geba įrašyti dažnius iki 15 kHz. Ši riba nustatyta naudojant nemokamą programą, identifikuojančią garso įrašo skleidžiamą dažnį. Taip pat keliems garso įrašams buvo naudojamas *HyperX Cloud Flight* ausinių mikrofonas, prijungtas prie kompiuterio. Šis mikrofonas yra *Electret* tipo kondensatorinis mikrofonas, kuris geba atpažinti dažnius nuo 100 iki 7 000 Hz. Ši įranga nėra specialiai pritaikyta įrašyti tyrimui reikalingus garsus, todėl gauti garso įrašai gali būti paveikti papildomų trikdžių susijusių su naudojama įrašymo įranga ar programine įranga. Pavyzdžiui mobilus telefonas įrašymui naudoja du esamus integruotus mikrofonus, ir garso įrašas yra abiejų integruotų mikrofonų vidurkis. Tokios įrangos taikymas turi ir savų pranašumų, kadangi išmani mobili technika yra plačiai paplitusi ir analizę galima atlikti nenaudojant specialios įrangos.

Technologinių įrenginių gedimų duomenų analizė atliekama su skaitmeninių signalų procesoriumi *ADAU 1701* ir išplėtimo plokšte (angl. *Evaluation Board*) *EVAL-ADAU1701MINIZ* (žr. 20 pav.). Šis procesorius valdomas naudojant *USB* sąsają, sujungtą su *I<sup>2</sup>C* komunikacijos plokšte. Per šią jungtį procesorius taip pat gauna maitinimo įtampą. Garso įrašas šiam *DSP* yra perduodamas iš mobiliojo telefono per 3,5 mm jungtį. Aptikus tam tikrus gedimus procesorius išduoda signalą LED indikatoriams ar kitokiems signalizavimo įrenginiams, kurie perspėja apie aptiktą gedimą. Šis procesorius programą gali išsaugoti elektriškai trinamoje ir programuojamoje pastovioje atmintyje (angl. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*, trump. *EEPROM*), kuri leidžia išsaugotą programą naudoti ir neprijungus procesoriaus prie kompiuterio ir *SigmaStudio* programinės įrangos.

Technologinė įranga kurios tyrimas aprašomas šioje dalyje yra asinchroniniai varikliai. Šios technologinės įrangos garso įrašai buvo surinkti iš skirtingų vietų kaip, pramoninės aplinkos, lauke eksploatuojamų variklių ir patalpoje, kurioje veikia tik tiriamas technologinis įrenginys. Skirtingos technologinio įrenginio eksploatavimo aplinkos gali turėti įtakos tyrimo rezultatams. Kadangi pašaliniai, kitų įrenginių ar oro sąlygų sukelti garsai suteikia papildomų trikdžių garso įrašui.



20 pav. Tyrimams naudojamos įrangos struktūrinė schema

Visi tiriamieji asinchroniniai varikliai turėjo šias bendras charakteristikas:

- trifaziai įrenginiai;
- vardinė įtampa – AC 400 V;
- dažnis – 50 Hz.

Analizuoti technologiniai įrenginiai skyrėsi savo galia ir sukimosi greičiu.

## 2.2. Tyrime naudota programinė įranga

Tyrimui, kad atlikti garso signalų analizę ir filtravimą, buvo naudoti keli skirtingi programinės įrangos paketai. Tai yra *MATLAB*, *Audacity* ir *SigmaStudio*.

*MATLAB* programos pagalba buvo analizuojami gamybinėje aplinkoje padaryti garso įrašai. Analizės tikslas nustatyti gedimams būdingus dažnius ir dažnio filtrų koeficientus. *MATLAB* programa buvo nuskaitomi įrašai padaryti *wav* formate. Garso įrašas nuskaitomas naudojant *audioread* komandą. Naudojant mobiliojo telefono garso įrašymo programą ir telefone integruotą mikrofoną garsas įrašomas *mp3* formatu. Šio formato garso įrašas yra programiškai suspaustas. *mp3* formato įrašė yra prarandama informacijos dalis, kuri ištrinama negražinamai. Šio formato garso įrašai gali būti naudojami ir tyrimo metu, tačiau *wav* formato failai, naudojant įvairias priemones, leidžia pagerinti garso įrašo kokybę. Iš *mp3* formato į *wav* formatą failas konvertuojamas naudojant *MATLAB* programos *audiowrite* funkciją. Keičiant garso įrašo formatą iš *mp3* į *wav* garso įrašė esanti informacija nėra prarandama. Iš garso įrašo failo nuskaitomi tokie duomenys kaip garso signalo imties dažnis ir garso signalo duomenys laiko ašyje. *MATLAB* programoje apskaičiuojama įrašo greitoji Furjė transformacija ir nubraižomas vienos Furjė transformacijos dalies gautas grafikas. Grafike atvaizduojama tik pusė gautų skaičiavimų, kadangi antroji grafiko dalis yra identiška pirmajai daliai. Trumpa *MATLAB* programos greitosios Furjė transformacijos programos ištrauka:

```
%Nuskaityto failo duomenys
[audio_in, audio_freq_sampl]=audioread(file);
%Nustatomas įrašo ilgis
length_audio=length(audio_in);
%Apskaičiuojamas df
df=audio_freq_sampl/length_audio;
%Apskaičiuojamas garso signalo dažnis
frequency_audio=-audio_freq_sampl/2:df:audio_freq_sampl/2-df;
%Greitoji Furjė transformacija
FFT_audio_in=fftshift(fft(audio_in))/length(fft(audio_in));
%Braižomas grafikas
```

```

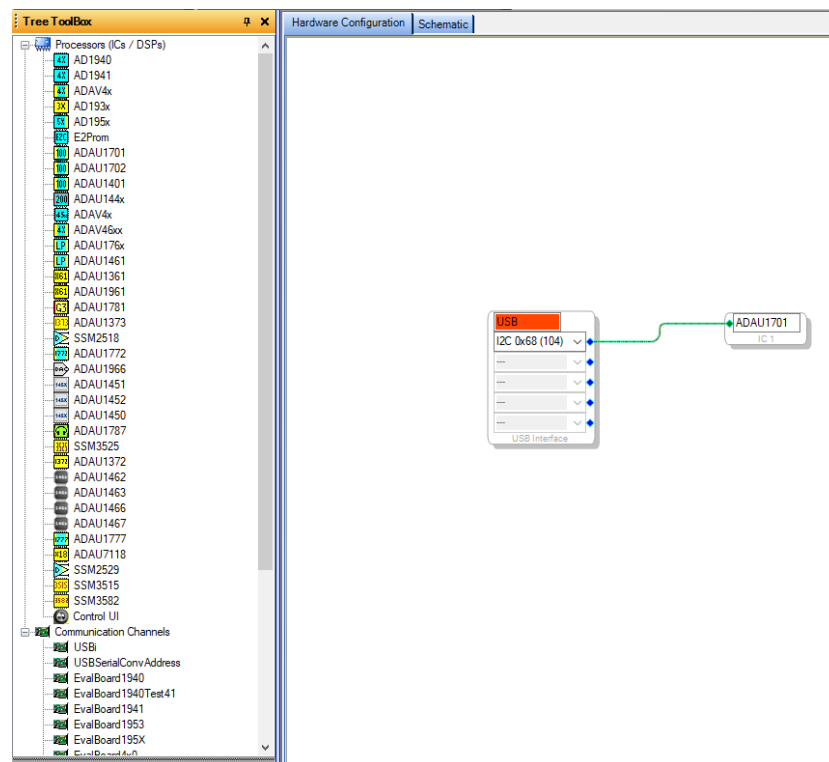
figure
plot(frequency_audio,abs(FFT_audio_in));
xlim([0,15000])
title('Grafiko pavadinimas');
xlabel('Dažnis (Hz)');
ylabel('Amplitudė');

```

*MATLAB* programa taip pat buvo naudojama apskaičiuoti *Butterworth* tipo baigtinio impulso atsako filtro koeficientus (žr. 2 priedą). Šiems koeficientams apskaičiuoti taikomos *MATLAB* funkcijos *butter* ir *designfilt*. Funkcijoje *butter* nustatomas filtro eilės numeris. *Designfilt* komanda leidžia sudaryti filtrą. Šiuo atveju sudaromi plačiajuosčiai 100-osios eilės ir 800-tosios eilės filtrai, kurių praleidžiami ir nufiltruojami dažniai keičiami priklausomai nuo gedimo garso įrašo. Naudojant šią funkciją gaunami DSP programoje naudojamo filtro koeficientai.

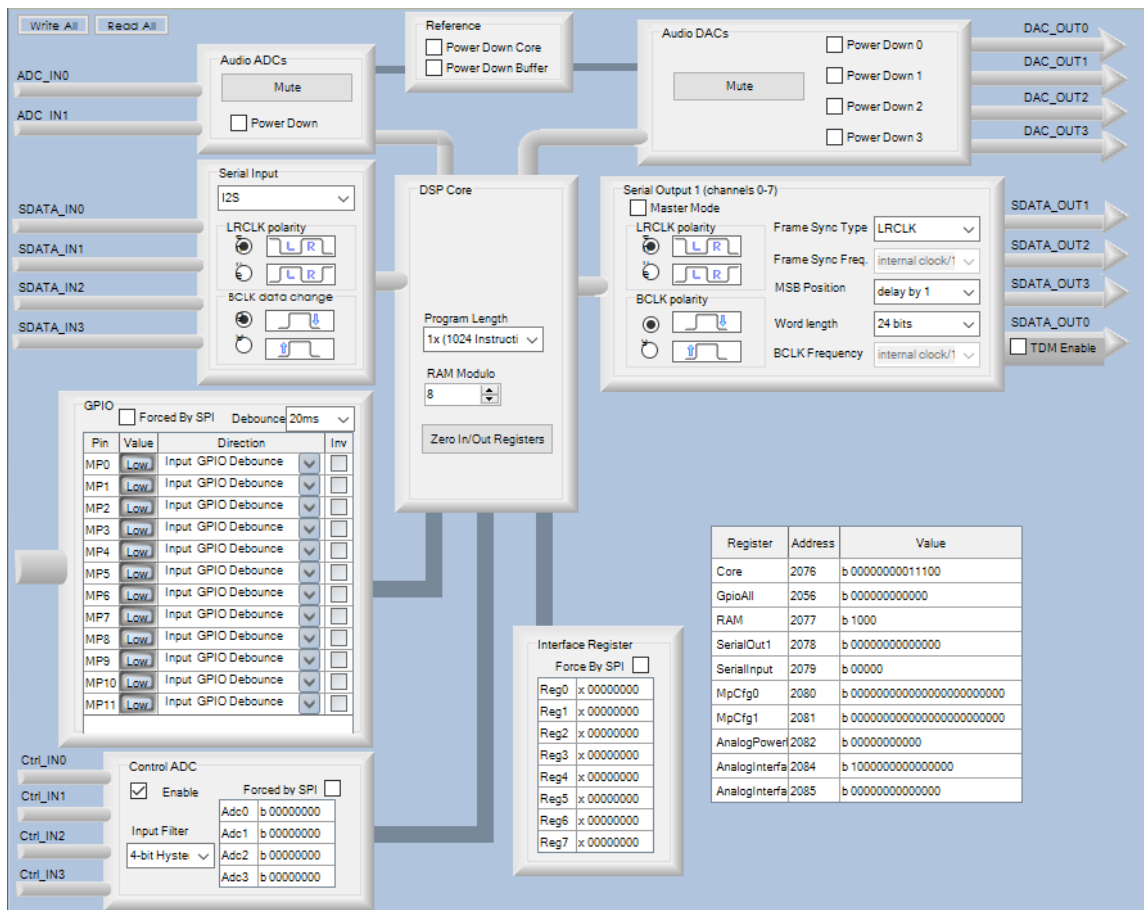
Kita tyrime naudojama programa yra *Audacity*. Ši programa leidžia įrašyti garso įrašus į kompiuterį. Taip pat ši programa naudojama peržiūrėti garso įrašo banginę formą, nustatyti garso įrašo duomenis, kaip imties dažnį ir kanalų kiekį, bei apdoroti nenaudojamas garso įrašo vietas.

Programa *SigmaStudio* naudojama skaitmeninių signalų procesoriui *ADAU1701* programuoti ir valdyti. Ši programa ryšį su naudojamu skaitmeninių signalų procesoriumi palaiko per *USB* jungtį. Prijungus procesorių prie kompiuterio *SigmaStudio* programoje suvedama turimos įrangos konfigūracija. Šiuo atveju naudojamas *ADAU1701* procesorius ir *USB* blokas (žr. 21 pav.).



21 pav. Įrangos konfigūracija *SigmaStudio* programoje

Įrangos konfigūracijos lange taip pat galima valdyti prijungto procesoriaus registrus (žr. 22 pav.). Šiame lange galima realiaime laike matyti ir valdyti procesoriuje vykstančius procesus. Galima išjungti ar laikinai prislopinti pasirinktus komponentus, pasirinkti kaip naudojami bendro naudojimo įėjimai ir išėjimai.

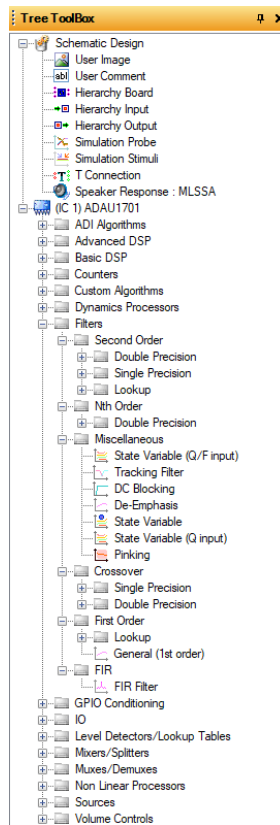


22 pav. Procesoriaus registrų valdymas *SigmaStudio* programoje

Susikonfigūravus įrangą sudaryta programa persiunčiama į *DSP* per *USB* jungtį. Programos sudaromos naudojant programoje sudarytus funkcinius blokus, kaip įėjimų ar išėjimų priskyrimas, signalų lygio matavimai, garso reguliatoriai, filtrai, ir daugelis kitų funkcijų (žr. 23 pav.). Pagrindiniai ir svarbiausi šios programos funkciniai blokai, kurie naudojami tyrime yra filtrai. *SigmaStudio* programoje filtrai skirstomi į keletą grupių pagal filtro eilės numerį ar specifinį tipą, kaip *Crossover* ar *FIR* tipo filtrai. Programoje nustačius kad naudojamas skaitmeninis signalų procesorius yra *ADAU1701* programa panaikina funkciniai blokai, kurių šis procesorius naudoti negali. Šioje programoje yra 6 filtrų tipai:

- pirmos eilės;
- antros eilės;
- n-osios eilės;
- įvairūs (funkciniai blokai su mišriais filtrais);
- *Crossover*;
- *FIR*.

Taip pat programoje yra integruoti įėjimų ir išėjimų funkciniai blokai, kurie atitinka tam tikrus *EVAL-ADAU1701MINIZ* plokštės komponentus, kaip mygtukus, lemputes ar kontaktus. Naudojami atskiri įėjimo ir išėjimo funkciniai blokai ir bendros paskirties naudojimui skirti *GPIO* funkciniai blokai.



23 pav. SigmaStudio programos funkcinių blokų sąrašas

Atskiri įėjimo ir išėjimo blokai priima ar atiduoda garso signalus, o *GPIO* blokai naudoja bendrus išėjimus ar įėjimus, kurie plokštėje yra naudojami lemputėms, mygtukams, potenciometrui ir pan. valdyti.

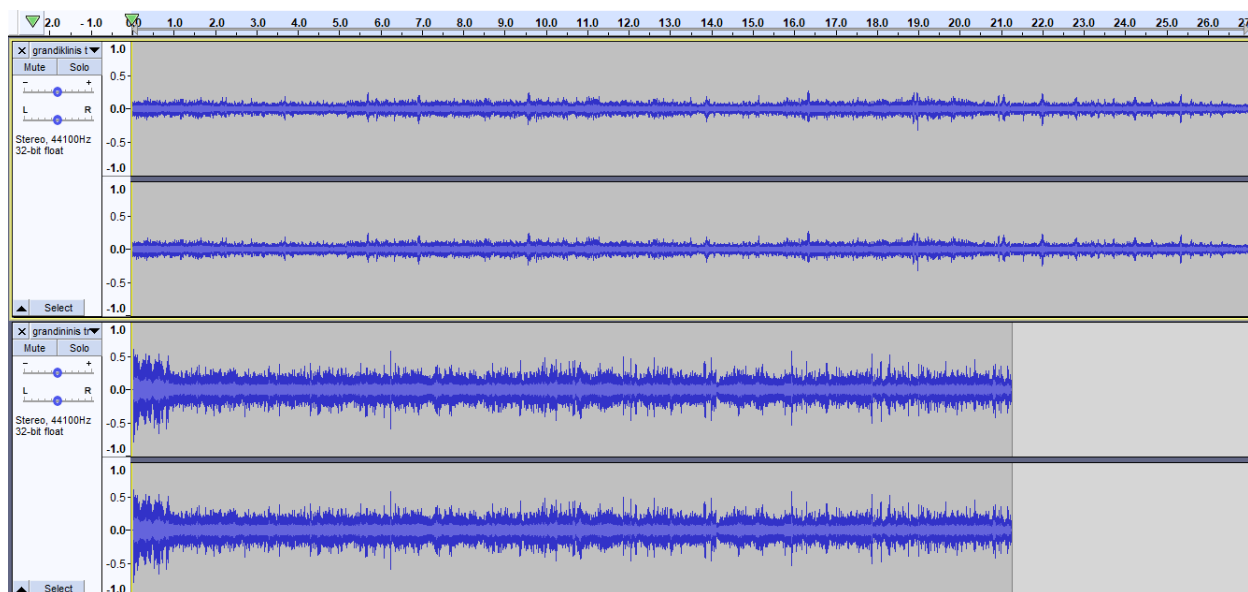
### 2.3. Grandiklinio transporterio variklio garso įrašo analizė

Grandiklinio transporterio variklio, esančio pramoninėje aplinkoje, kuriuo gabenami grūdai į talpas, skleidžiamiems garsams padaryti du garso įrašai. Įrašui naudotas mobilus įrenginys su mikrofonu. Vienas iš garso įrašų yra technologinis įrenginys su gedimu – atsilaisvinusiu diržu. Pagal variklio duomenų lentelę šio asinchroninio trifazio variklio galia yra – 7,5 kW, o sukimosi greitis – 1 480 aps./min. Šis technologinis įrenginys turi reduktorių, kuris sumažina variklio perduodamą greitį. Ant reduktoriaus veleno uždėtas diržas, kuris mechanškai veikia grandiklinio transporterio krumpliaračį, sukantį įrenginį. Atsilaisvinus šiam diržui yra galimybė, kad diržas visiškai nuslinks ir grandiklinis transporteris nebesisuks. Dėl to transporteris gali būti užpildytas grūdais, taip sustabdant visą gamybos liniją, kurioje naudojamas šis transporteris. Nuslydęs diržas taip pat gali sukelti ir technologinio įrenginio gedimą, jeigu šis diržas įsivelia į variklio veleną, variklis gali būti pažeistas.

#### 2.3.1. Grandiklinio transporterio garso įrašai

Tiriant šį technologinį įrenginį buvo įrašytos dvi garsų sekos. Pirmoji, kai technologinis įrenginys buvo su gedimu. Antroji kai gedimas buvo pašalintas. Kadangi šie įrašai buvo įrašyti skirtingomis dienomis, jų įrašymo sąlygos skyrėsi. Technologinio įrenginio garso įrašai įrašyti tik viename garso kanale. Tokiu atveju naudojamos programos sukuria antrąjį garso kanalą, kuris yra identiškas pirmajam (žr. 24 pav.). Šiame paveiksle atvaizduoti įrašai pateikti laiko srityje. Viršutiniame grafike

atvaizduotas grandiklinio transporterio įrašas su gedimu, apatinis grafikas vaizduoja normaliai funkcionuojančio įrenginio įrašą. Šių įrašų amplitudės skiriasi dėl skirtingų aplinkos sąlygų.



24 pav. Grandiklinio transporterio garso įrašai *Audacity* programoje

Taip pat iš šio paveikslėlio matome kad abiejų įrašų imties dažniai yra vienodi – 44 100 Hz. Šių garso įrašų ilgiai skiriasi, tačiau, abu garso įrašai yra pakankamai ilgi, virš 20 sekundžių, ir šiuose įrašuose kelis kartus aiškiai girdimi gedimo skleidžiami garsai. Todėl skirtumas tarp skirtingų garso įrašų trukmių neturi įtakos gautiems rezultatams.

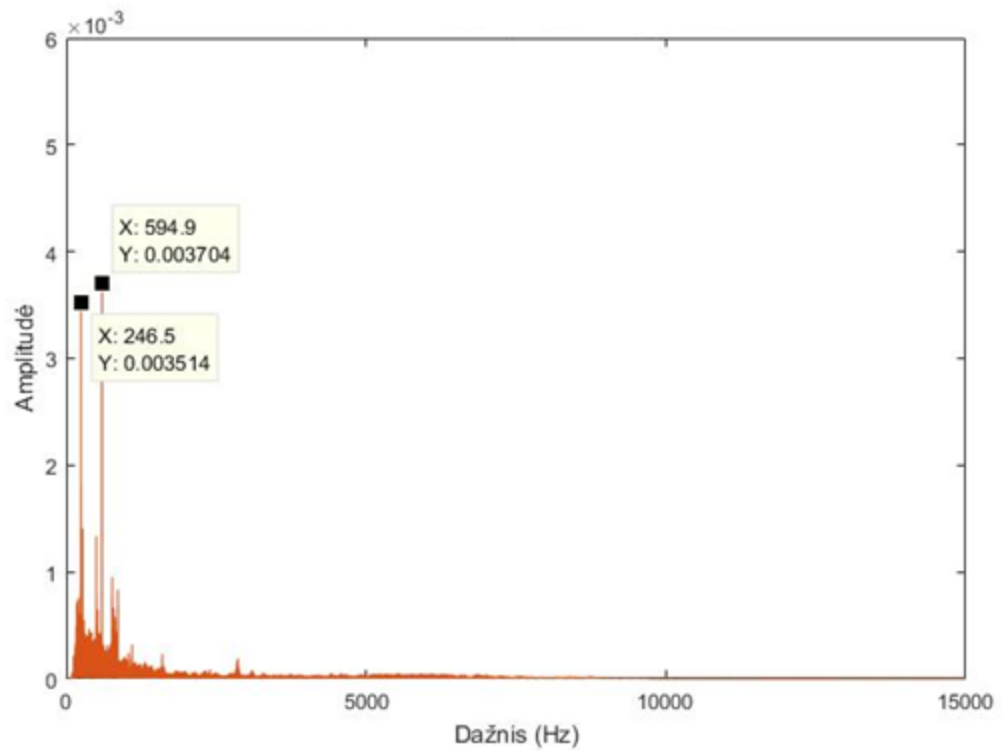
### 2.3.2. Grandiklinio transporterio su gedimu signalo analizė

*MATLAB* parašytoje programoje, šie garso įrašai paverčiami iš laiko srities į dažnio sritį. Tam naudojama greitoji Furjė transformacija (žr. 1 priedą). Iš grafikų (žr. 25–28 pav.) galime nustatyti duomenis apie grandiklinio transporterio variklio skleidžiamų garsų dažnius. Jeigu analizuojamas garso įrašas yra technologinio įrenginio su gedimu, tai tame garso įraše gedimo garso amplitudė yra didesnė. Kadangi buvo nustatyta, kad didžiausias dažnis, kurį garso įrašinėjimo įrenginys gali užfiksuoti, yra 15 kHz, todėl grafiko dažnio sritis apribota iki 15 kHz reikšmės (žr. 25 pav.).

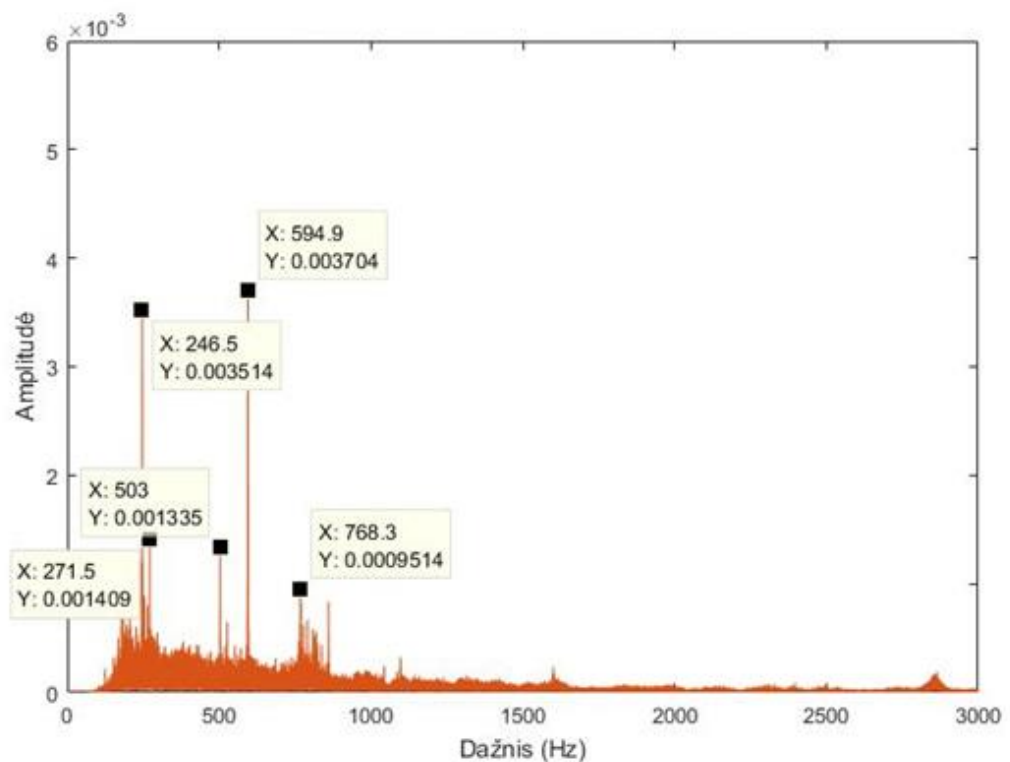
*MATLAB* programoje gautuose grafikuose  $x$  ašyje pavaizduotas dažnis Hz, o  $y$  ašyje – amplitudė, kurios reikšmė gaunama iš garso įrašo failo. Nuskaitant garso įrašą naudojant *audioread* funkciją signalo amplitudė normalizuojama. Naudojamas *double* skaičių formatas. Šis formatas priskiria  $y$  ašies reikšmes tarp -1 ir 1 verčių. Atlikus šį pertvarkymą, grafikų amplitudės maksimali vertė yra 1, o minimali vertė yra -1. Grafikuose išskirtos tik teigiamos reikšmės, kadangi garso įrašo neigiamų ir teigiamų verčių moduliai yra lygūs.

Iš 25 paveikslėlio grafiko nustatyta kad didesni šuoliai amplitudėje užfiksuoti tik iki 4 000 Hz, taigi, dažnio sritis buvo nukirsta ties šia riba (žr. 26 pav.). Iš grafikų matome kad didžiausi šuoliai matomi dviejuose dažniuose: 246 Hz ir 595 Hz. Taip pat matomi keletas mažesnių šuolių amplitudėje, jie atitinka dažnius: 271 Hz, 503 Hz ir 768 Hz.





**25 pav.** Grandiklinio transporterio variklio su gedimu dažnio srities grafikas



**26 pav.** Grandiklinio transporterio variklio su gedimu dažnio srities grafikas su apribota dažnio sritimi

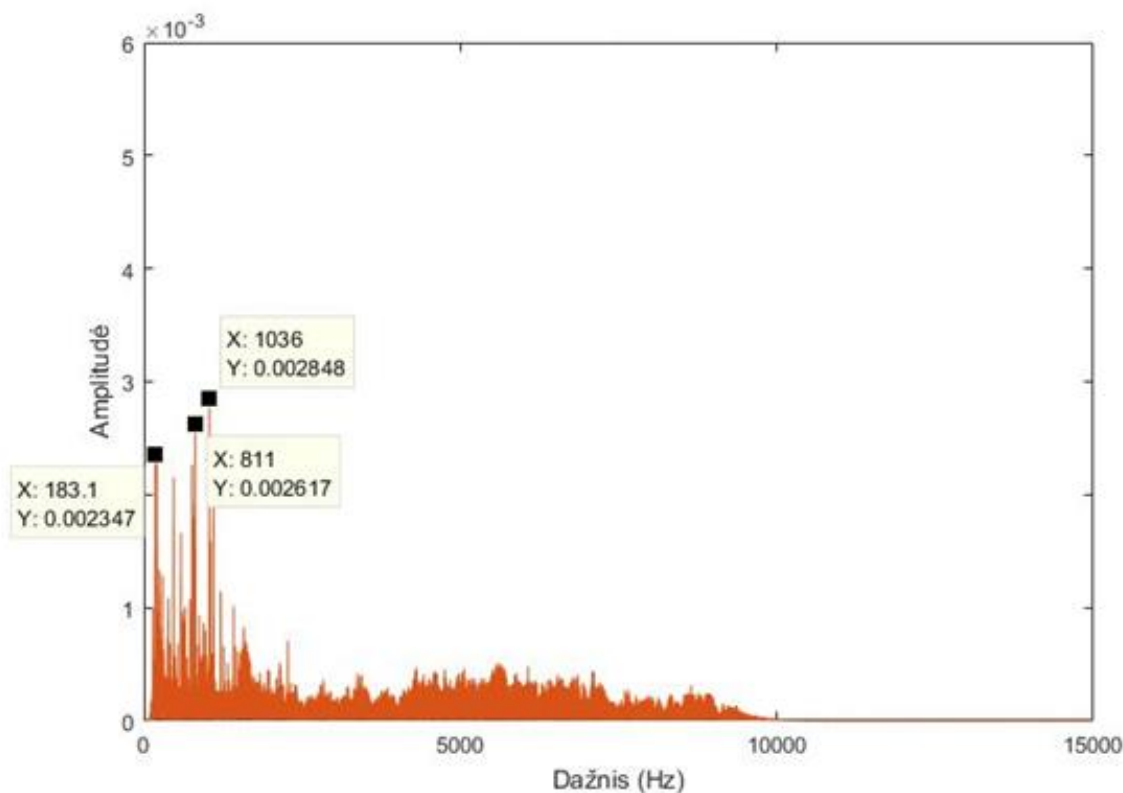
Norint sužinoti ar šie dažniai nurodo tiriamo technologinio įrenginio gedimą, reikia šiuos duomenis palyginti su nesugedusio technologinio įrenginio įrašo duomenimis (žr. 27, 28 pav.).



### 2.3.3. Grandiklinio transporterio be gedimo signalo analizė

27 paveiksle pateikta informacija taip pat ribojama iki 15 kHz, kadangi šis įrašas buvo padarytas naudojant tą patį įrenginį kaip ir įrašo su gedimu atveju. Šie garsai įrašyti skirtingomis dienomis ir kitokiomis sąlygomis. Šalia technologinio įrenginio dirbo mažiau įrenginių, tačiau patalpose buvo kitų papildomų pašalinių garsų, tokių kaip šalia analizuojamo įrenginio, juostiniu transporteriu kraunami grūdai.

Grandiklinio transporterio variklio be gedimo dažnio srities grafike aukščiausia amplitudė yra mažesnė nei grandiklinio transporterio variklio su gedimu grafikuose, tačiau aiškiai matomas didesnės amplitudės prie kitų dažnių. Šiame grafike vaizduojama informacija atitinka tai kas buvo parodyta 21 paveiksle. Pagrindinis skirtumas yra kad normaliai veikiančio variklio garso įrašo amplitudė buvo kelis kartus didesnė negu įrašo su gedimu. Šis amplitudžių skirtumas gaunamas dėl skirtingų aplinkos sąlygų įrašinėjant analizuojamus garso įrašus. Kadangi didžiausias amplitudes turintys dažniai taip pat yra iki 4 000 Hz ribos, grafiko dažnio sritis yra apribojama iki 4 000 Hz (žr. 28 pav.).

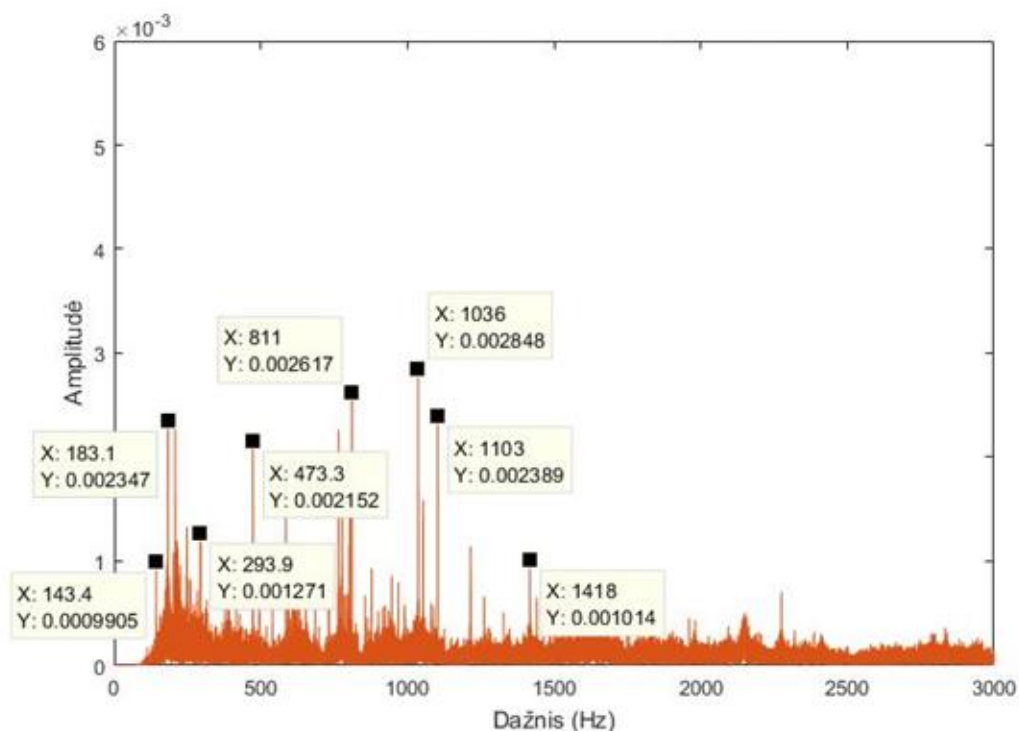


27 pav. Grandiklinio transporterio variklio be gedimo skleidžiamo triukšmo dažnio srities grafikas

Grafike taip pat matosi kokį poveikį turi įvairūs papildomi garsai gauti įrašant technologinio įrenginio kuriamo triukšmo foną. Palyginus dažnius ir jų amplitudes tarp 22 paveikslo ir 24 paveikslo matoma pašalinių triukšmų įtaka. 24 paveiksle dažnių amplitudės virš 1 000 Hz siekia  $0,5 * 10^{-3}$  ir nėra mažesnės nei  $0,2 * 10^{-3}$  amplitudės iki 10 kHz dažnio, kai įrašymo įrenginys nebegali įrašyti tokių dažnių. Pagal 22 paveikslo duomenis amplitudės virš 1000 Hz maksimaliai siekia  $0,3 * 10^{-3}$  amplitudės, tačiau didžioji dalis dažnių iki 10 kHz, kai įrenginys nebegali įrašyti dažnių, siekia apie

$0,1 * 10^{-3}$  amplitudės. Šį skirtumą tarp dažnių amplitudžių sukelia byrantys ir gabenami grūdai, kadangi 22 paveiksle įrašo įrašymo metu grūdai nebuvo transportuojami.

Iš 27 ir 28 paveiksluose pateiktų grafikų nustatyti dažniai su didžiosiomis amplitudėmis: 1 036 Hz, 811 Hz, 183 Hz ir 1 103 Hz. Palyginus grandiklinio transporterio variklio įrašus su gedimu ir be gedimo, galima teigti, kad atsilaisvinusio diržo gedimas aptinkamas žemuose ir žemuose-vidutiniuose dažniuose. Tiriamojo variklio atveju tai būtų dažniai 246 Hz ir 595 Hz. Variklio su gedimu atveju didesnės negu  $0,5 * 10^{-3}$  amplitudės dažnių virš 1 000 Hz nėra.



**28 pav.** Grandiklinio transporterio variklio be gedimo dažnio srities grafikas su apribota dažnio sritimi

Variklio be gedimo grafikuose yra matoma daugiau dažnio sričių, ties kuriomis yra amplitudės šuoliai.

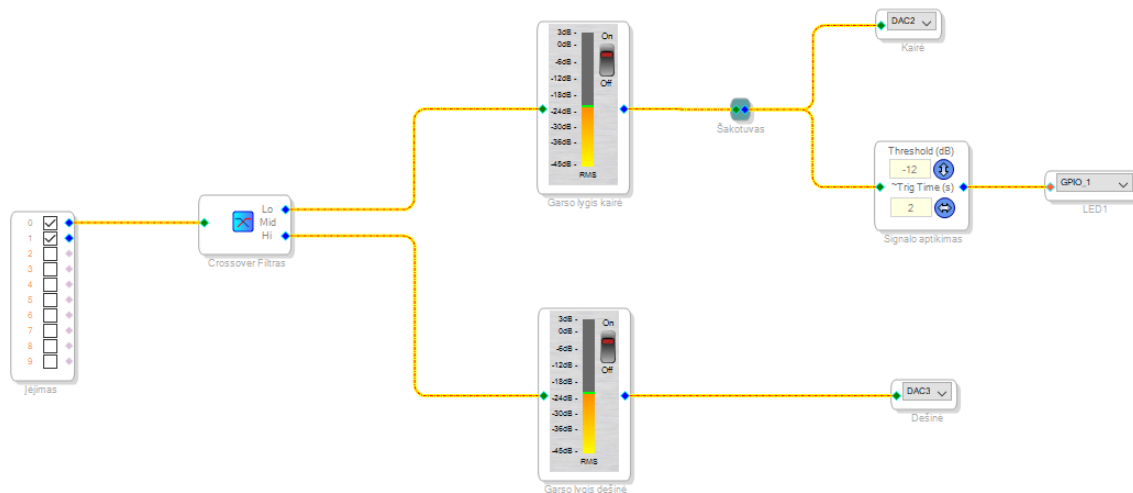
#### 2.3.4. Grandiklinio transporterio signalų analizė *SigmaStudio* programoje

Analizuojant garso įrašus galima išskirti keletą dažnio juostų, kuriose naudojant filtrus galima identifikuoti gedimą simbolizuojančius duomenis. Šios dažnių juostos gali būti naudojamos identifikuoti gedimo skleidžiamus dažnius ir atsiradus šiems dažniams perduoti signalą apie nustatytą gedimą. Tam kad būtų galima pritaikyti skirtingus filtrus technologinio įrenginio garso įrašui naudojamas skaitmeninis signalų procesorius ir šio įrenginio programinė įranga *SigmaStudio*.

*SigmaStudio* aplinkoje sukurta programa (žr. 29 pav.), kuri naudojama nustatyti charakteringus gedimo dažnius iš garso įrašo. Tai atliekama naudojant programoje esančius funkcinis blokus. Kadangi kairysis ir dešinysis kanalai yra vienodi, iš įėjimų nuskaitymo bloko išeina tik vienas signalas, šiuo atveju pirmojo kanalo. Šis signalas patenka į *Crossover* tipo filtrą (žr. 30 pav.), kuriame yra nustatomi dažniai, kuriuos filtras turi praleisti ir kuriuos slopinti. Šio bloko išėjime gaunami du signalai *Lo* ir *Hi*, tai yra žemi dažniai ir aukšti dažniai, kurie išsiskiriami į skirtingus išėjimus. Žemo

ir aukšto dažnių signalų amplitudėms atvaizduoti naudojamas lygio stebėjimo funkcinis blokas. Šis blokas naudoja vidutinę kvadratinės šaknies vertę (angl. *Root Mean Square*, trump. *RMS*) atvaizduoti signalo amplitudės dydžiu.

Šis blokas naudojamas nustatyti signalo amplitudės dydį tam tikrame dažnio diapazone. Žemo dažnio signalė toliau naudojamas šakotuvas, kuris padalina signalą į dvi dalis: vieną į skaitmeninių signalų procesoriaus garso išėjimą, kuriame prijungtos ausinės, kitą į signalo identifikavimo funkcinį bloką.



29 pav. *SigmaStudio* aplinkoje sukurta dažnių filtravimo programa



30 pav. *SigmaStudio* programos *Crossover* filtras

Signalo identifikavimo blokui nustatoma amplitudinė vertė, šiuo atveju -12 dB, jeigu bloko įėjime gaunamo signalo amplitudė viršija nustatytą riba, signalas perduodamas toliau. Taip pat šiame bloke galima nustatyti išjungimo vėlinimo laiką.

Jeigu signalų aptikimo blokas gauna signalą su jame nurodyta amplitude, signalas praleidžiamas į sekantį funkcinį bloką, bendruosius įėjimus ar išėjimus (angl. *General Purpose Input Output*, trump. *GPIO*). Šiame bloke galima pasirinkti skaitmeninių signalų procesoriaus įėjimą ar išėjimą. Šiuo atveju pasirinktas bendrasis išėjimas 1, kuris valdo LED indikatorius, tačiau šį signalą galima atiduoti kaip išėjimo signalą ir naudoti kartu su kitu valdymo įrenginiu, kuris pagal bloko išėjimo signalo lygį inicijuoja valdymo sistemos tolesnius veiksmus.

Naudojant žemų ir aukštų dažnių *Crossover* filtrą praleidžiamas paltus dažnių diapazonas. Kadangi pagal gautus grafikus žinomi dažniai, kurie galimai atitinka technologinio įrenginio gedimo signalą, šis signalas filtruojamas tik žinomuose dažniuose. Dviejų išėjimų *Crossover* filtras to padaryti negali, todėl naudojamas trijų išėjimų signalų *Crossover* filtras. Šiame filtro funkciname bloke galime nustatyti keturias ribas, pagal kurias filtras riboja signalą (žr. 31 pav.).



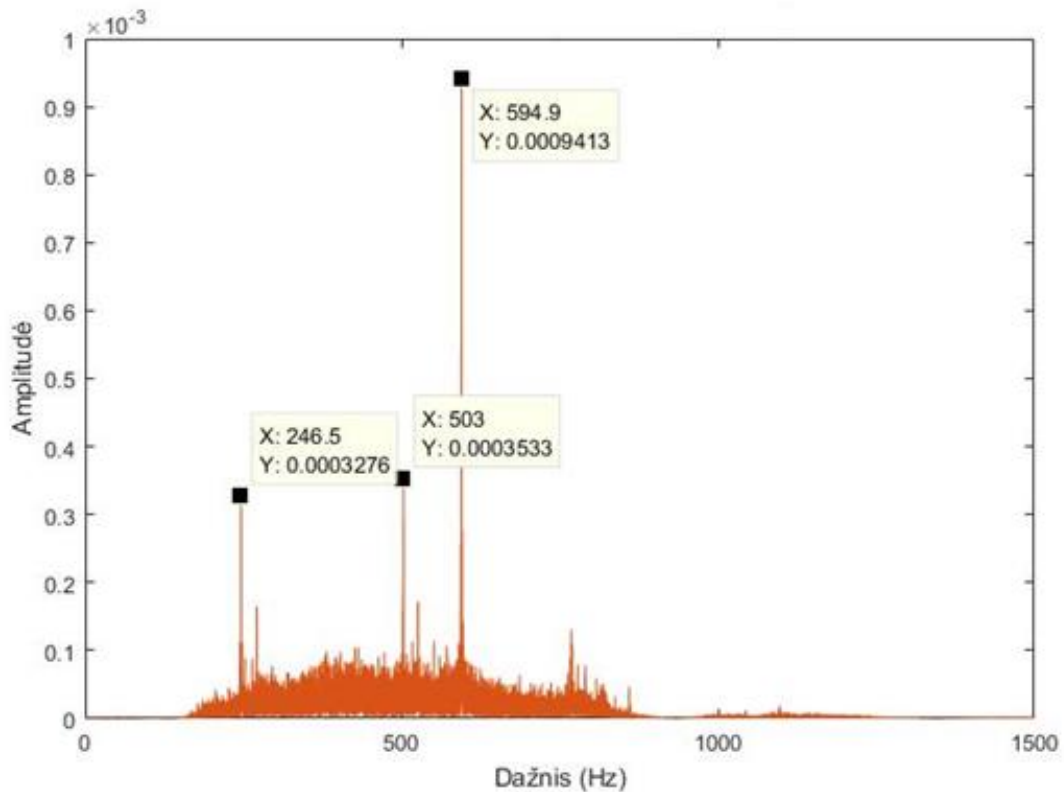
**31 pav.** *SigmaStudio* programos trijų signalų *Crossover* filtras

Filtre nustatius viršutines ir apatines ribas pro kurias nepraleidžiami dažniai žemesni nei 10 Hz ir aukštesni nei 19 500 Hz, apribojamas visas signalo dažnių spektras. Tačiau naudojant trijų išėjimų tipo funkcinį bloką programa leidžia pasirinkti dažnius kurie yra praleidžiami. Taigi naudojant šį filtrą galima nustatyti iš grafikų gautus atitinkamus dažnius ir išbandyti ar gauti dažniai atitinka technologinio įrenginio gedimus, ar tai yra tik pašalinių garsų signalai. Naudojant *Crossover* filtrą nustatyta, kad sveiko grandiklinio transporterio įrašo dažniai – 183 Hz, 294 Hz, 1 036 Hz, 1 103 Hz, 1 418 Hz ir 2 275 Hz yra pašalinių įrenginių signalai. Taigi šiame garso įrašė normaliai veikiančių grandiklinių transporterių galima atskirti pagal šiuos dažnius – 246 Hz, 473 Hz, 765 Hz ir 811 Hz.

Naudojant šį filtrą taip pat buvo patikrinti garso įrašė su gedimu gauti dažniai. Pašaliniai dažniai yra – 271 Hz, 768 Hz. Dažniai 503 Hz ir 595 Hz atitinka technologinio įrenginio gedimo dažnius.

### 2.3.5. Grandiklinio transporterio signalų filtravimas naudojant *FIR* filtrą

*FIR* filtras naudojamas sistemose, kurios neturi didelės atminties. Didesnis procesoriaus atminties kiekis leidžia atlikti didesnę veiksmų skaičių. *SigmaStudio* programoje *FIR* filtro funkcinis blokas gali priimti iki 800 filtro koeficiento reikšmių. Kuo didesnis skaičius *FIR* filtro koeficiento reikšmių skaičius tuo filtras yra tikslesnis, bet kartu ir padidėja jo sunaudojamos atminties kiekis. Filtro tikslumas pasireiškia didesniu nurodytų dažnių apribojimu. *MATLAB* programoje gaunamų grafikų pavyzdžiai pavaizduoti 32 ir 33 paveiksluose. Šiuose grafikuose taikomas *FIR* filtras, yra plačiajuosčio tipo filtras, kurio pralaidumo juosta nustatyta nuo 510 Hz iki 600 Hz.



**32 pav.** Grandiklinio transporterio su gedimu 100-osios eilės *FIR* filtro dažnių apribojimas

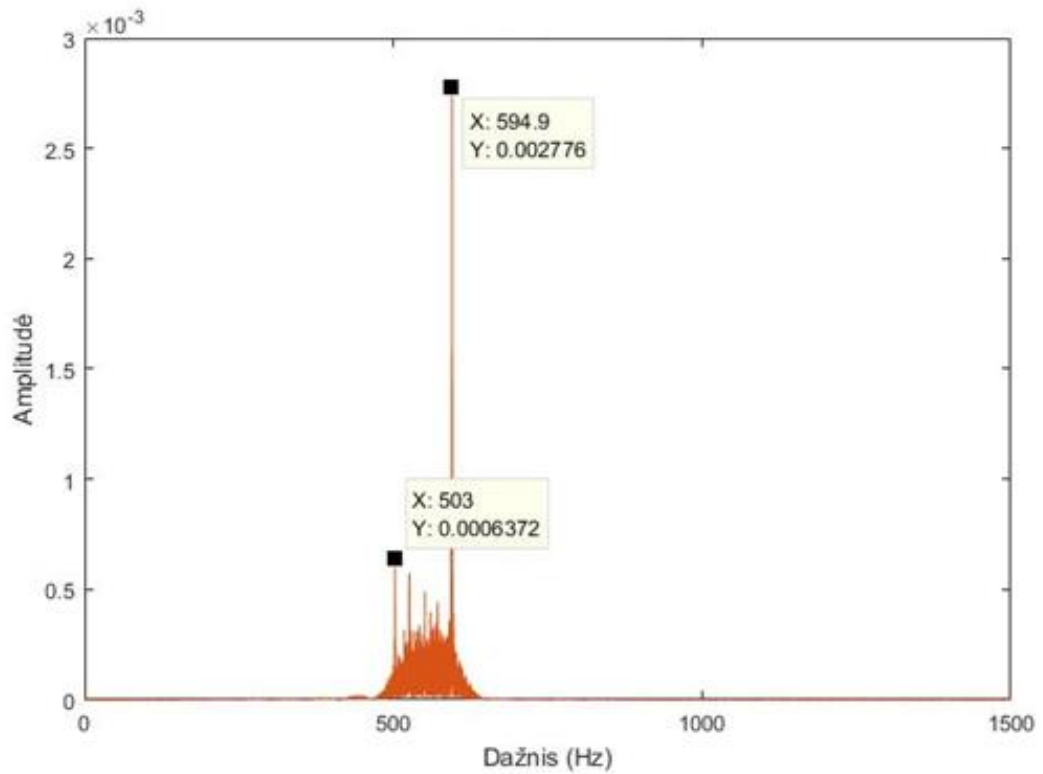
Naudojant 100-osios eilės filtrą, dažniai pradedami praleisti nuo 180 Hz iki 870 Hz. Šis filtras yra netinkamas, nes skirtumas tarp užduoto praleisti signalo dažnio ir mažiausio praleidžiamo dažnio yra 330 Hz. Praleidžiamas signalas šioje riboje gali būti pašalinis signalas ar kitokio gedimo tipo signalas, o sistema tai užfiksuoja kaip laisvos juostos gedimą, taip pateikiant klaidingą informaciją.

Naudojant 800-osios eilės *FIR* filtrą, dažniai yra apribojami daugiau lyginant su 100-osios eilės filtru. Šiame filtre mažiausias praleidžiamas dažnis yra 480 Hz, o didžiausias praleidžiamas dažnis yra 633 Hz. Nuo užduotos užduoties šis filtras skiriasi tik 20-30 Hz riboje. Lyginant tai su 100-osios eilės filtro 330 Hz, matomas 150 Hz skirtumas tarp mažiausių praleidžiamų dažnių.

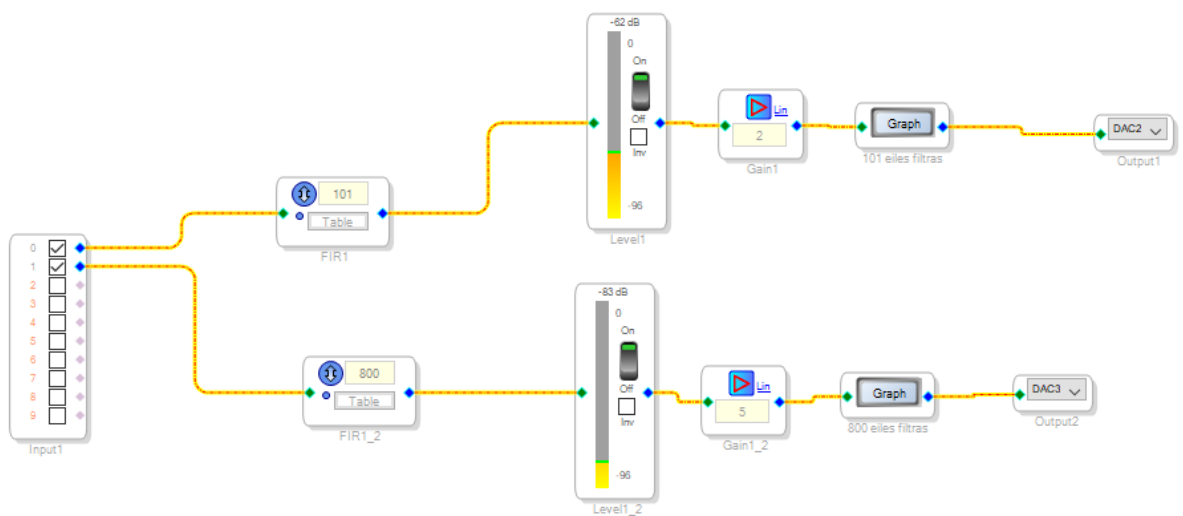
Šis *FIR* filtras taip pat gali būti naudojamas *SigmaStudio* aplinkoje (žr. 34 pav.). Šioje programoje naudojami du *FIR* filtrų funkciniai blokai, *FIR1* filtras ir *FIR1\_2* filtras. Pirmasis filtras yra 101-osios eilės, jis prijungtas prie signalo lygio stebėjimo bloko, stiprintuvo, grafikų braižymo bloko ir kairiojo kanalo išėjimo. Antrasis filtras yra 800-osios eilės, jis taip pat prijungtas prie signalo lygio stebėjimo bloko, stiprintuvo, grafikų braižymo bloko ir dešiniojo kanalo išėjimo. Šis kanalų paskirstymas

leidžia vienoje ausinių pusėje girdėti vieno filtro apdorotą signalą, kitoje ausinių pusėje girdėti kito filtro paveiktą signalą ir juos palyginti. Lyginant girdimus signalus didesnės eilės filtras pašalina didžiąją dalį pašalinių triukšmų ir palieka nurodytos dažnių zonos signalus.

Panaudojus 800-osios eilės filtrą išėjimo signalas buvo sunkiai girdimas, todėl buvo pridėti stiprintuvai, kurie padidina signalo amplitudę.



33 pav. Grandiklinio transporterio su gedimu 800-osios eilės *FIR* filtro dažnių apribojimas



34 pav. *FIR* filtras *SigmaStudio* programoje

Naudojant 800-osios eilės *FIR* filtrą nustatyta, kad 503 Hz signalas yra pašalinio įrenginio skleidžiamas garsas, o 595 Hz signalas yra panašus į laisvo diržo skleidžiamus garsus. Palyginus *FIR* filtro ir *Crossover* filtro rezultatus galima teigti, kad šio grandiklinio transporterio laisvo diržo gedimas atitinka 595 Hz dažnį. Naudojant *Crossover* tipo filtrą ir nustatant jo praleidžiamų dažnių ribojimus analogiškus *FIR* filtrui, gaunamas prastesnis rezultatas negu naudojant 800-osios eilės *FIR* filtrą.

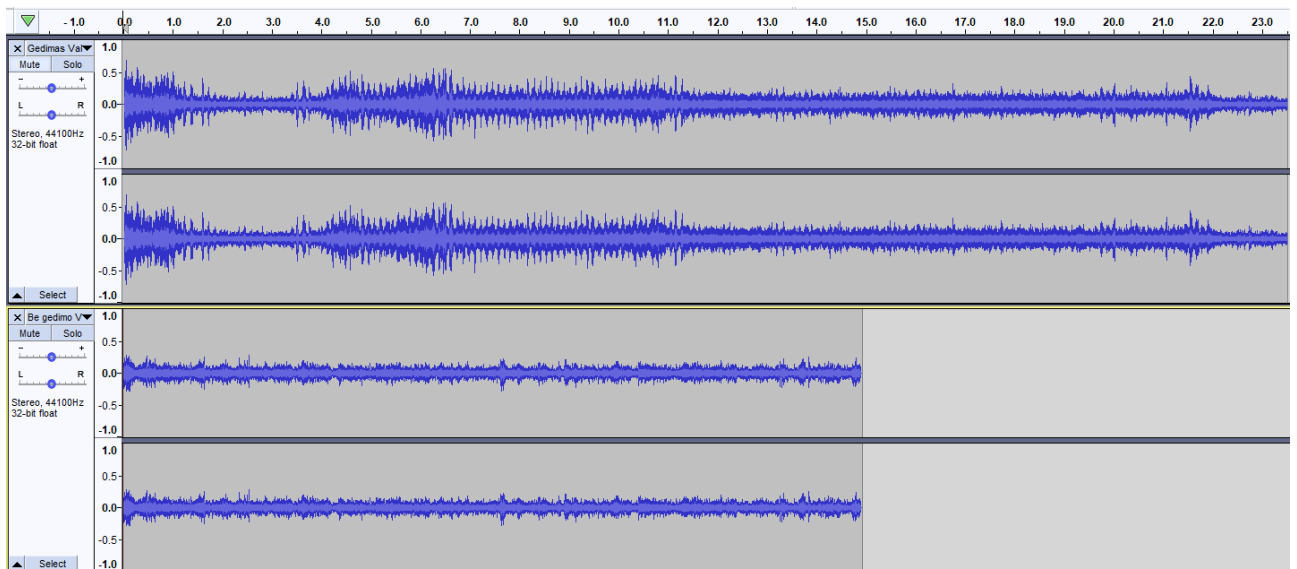
*Crossover* tipo filtras praleidžia didesnio diapazono dažnius negu tokių pat užduotų parametrų *FIR* filtras, kas lemia papildomus pašalinius triukšmus, dėl kurių galimas klaidingas technologinio įrenginio gedimo atpažinimo rezultatas.

## 2.4. Valymo įrenginio variklio garso įrašo analizė

Valymo įrenginio, skirto grūdų valymui, 2,2 kW galios variklis įrengtas gamyklinėse patalpose, kuriose gabenami grūdai kaušiniais elevatoriais ir juostiniais transporteriais. Šio variklio sukimosi greitis – 1 465 aps/min. Garso įrašas įrašytas su mobiliojo įrenginio mikrofonu. Įrašo įrašymo metu aplinka buvo triukšminga, 1 metro atstumu nuo analizuojamo valomosios variklio, buvo įrengtas kaušinis elevatorius. Valymo įrenginys yra naudojamas priimant nupirktus grūdus, tam kad iš atvežtų grūdų būtų pašalintos šiukšlės, kaip akmenys, žemės, stiebai ir kiti produktai, kurie gali pakenkti produktui ar įrangai. Dėl ilgo technologinio įrenginio naudojimo laiko, variklyje esantys guoliai susidėvėjo ir variklis pradėjo skleisti papildomus garsus. Garso įrašo įrašymo metu variklio guolių skleidžiami garsai buvo girdimi visą darbo laiką ir šie garsai trukdė dirbti aplinkoje kurioje yra daug skirtingų technologinių įrenginių skleidžiamų garsų.

### 2.4.1. Valymo įrenginio variklio garso įrašai

Šiam technologinio įrenginio variklio gedimui identifikuoti buvo įrašyti du garso įrašai su mobiliojo įrenginio vidiniu mikrofonu. Garsai įrašyti skirtingomis dienomis, todėl įrašuose gali būti skirtingas kiekis pašalinių garsų. Pirmasis įrašas padarytas kai technologinis įrenginys veikia su susidėvėjusiais guoliais, antrasis įrašas įrašytas kai variklis buvo sutvarkytas. Abiejų įrašų signalus įkėlus į *Audacity* programą matome bangos formos signalus laiko srityje (žr. 35 pav.).



35 pav. Valymo įrenginio variklio garso įrašai *Audacity* programoje

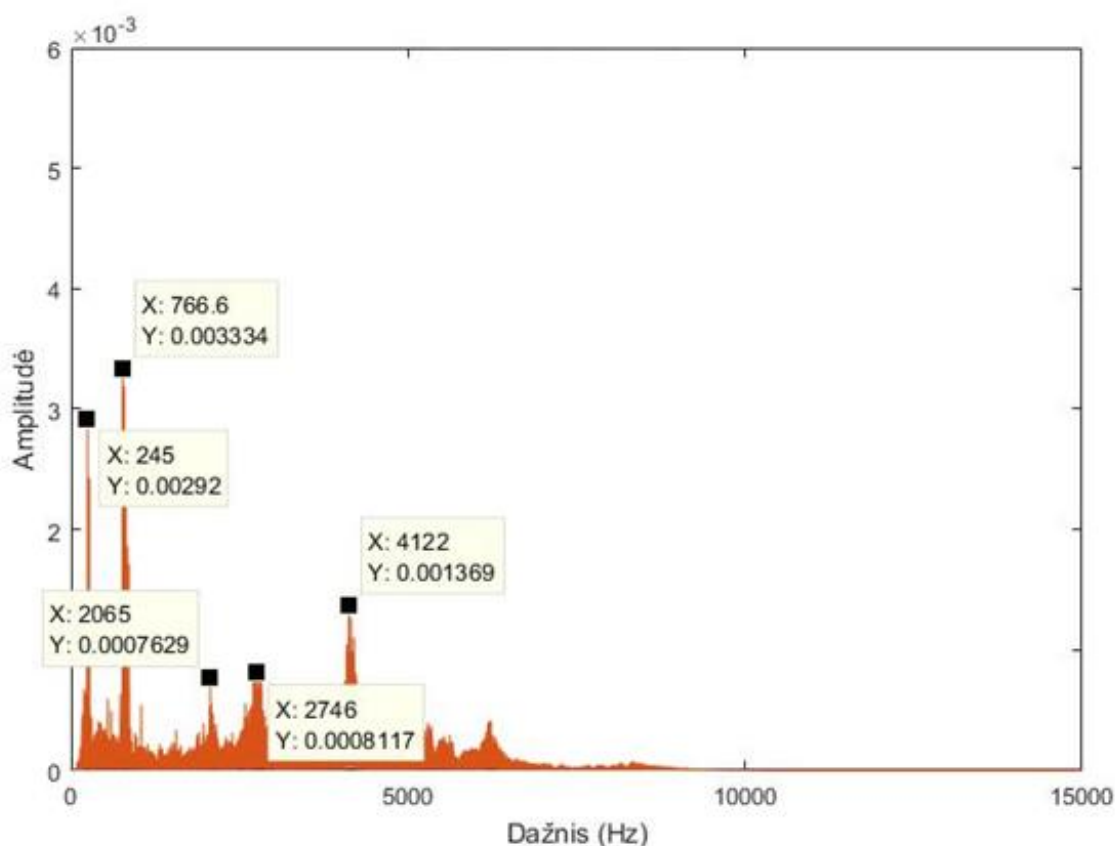


Viršutinėje paveikslėlio dalyje pateiktas variklio su gedimu garso įrašas. Šiame garso įrašė matomas didelis signalo išsikraipymas lyginant su garso įrašu be gedimo, esančiu apačioje. Šis iškraipymas yra technologinio įrenginio, variklio guolių skleidžiamas garsas.

Abiejų garso įrašų imties dažnis yra vienodas – 44 100 Hz. Skiriasi įrašų ilgiai, įrašo su gedimu ilgis yra 23 sekundės, o įrašo be gedimo ilgis yra 15 sekundžių.

#### 2.4.2. Valymo įrenginio variklio su gedimu signalo analizė

Naudojant *MATLAB* aplinkoje parašytą programą, variklio su gedimu garso įrašas paverčiamas iš laiko srities į dažnio sritį (žr. 36 pav.).



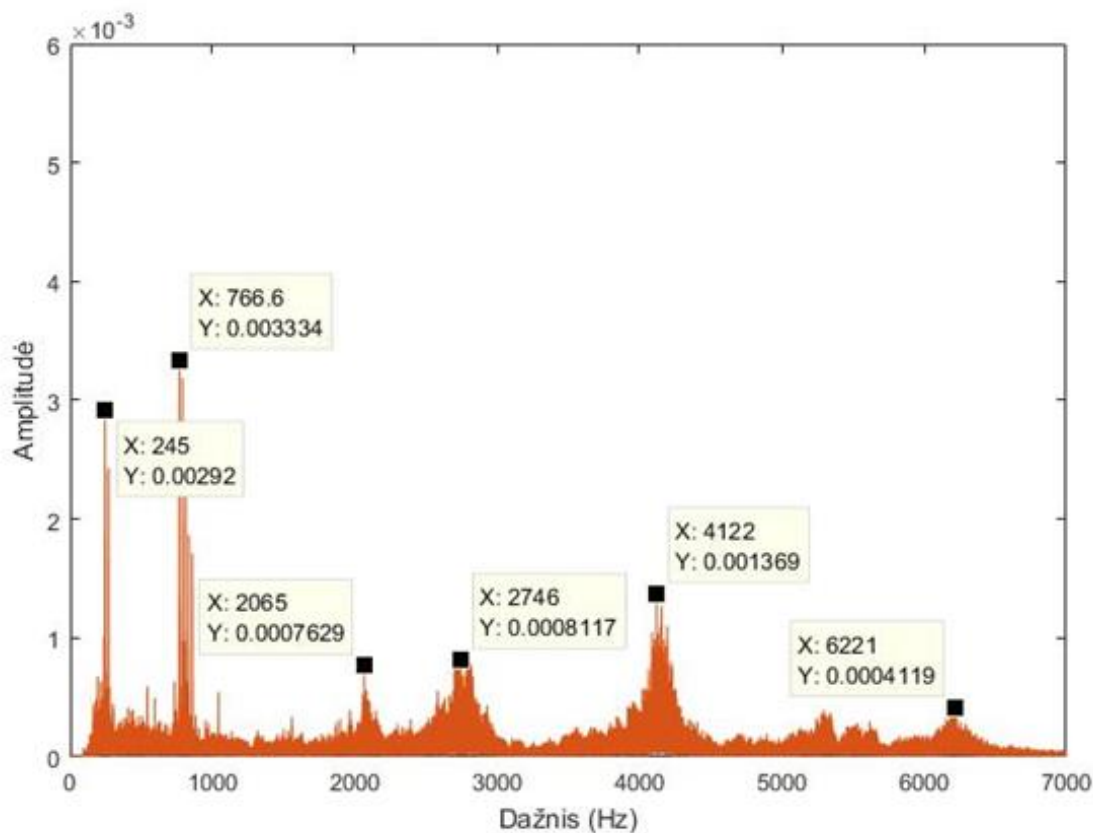
36 pav. Valymo įrenginio su gedimu dažnio srities grafikas

Grafike matome, kad dažnių po 6 500 Hz amplitudės yra mažesnės nei  $0,5 * 10^{-3}$  amplitudės ir šie dažniai įtakos tyrime neturi, todėl variklio su gedimu įrašų grafikai apribojami iki 7 000 Hz diapazono (žr. 37 pav.). Gautame dažnio srities grafike pažymėti 7 taškai, kurie atitinka grafike matomus dažnių šuolius. Šie taškai atitinka 245 Hz, 767 Hz, 2 065 Hz, 2 746 Hz, 4 122 Hz, 5 298 Hz ir 6 221 Hz. Didžiausios amplitudės dažnio šuolis yra ties 767 Hz.

Ištyrus šį garso įrašą naudojant skaitmeninį signalų procesorių ir sudarytą programą su 800-osios eilės *FIR* filtru nustatyti garsai, kurie sukelia dažnio šuolius. Programoje pritaikius *FIR* filtro koeficientą, kuris praleidžia dažnį į 245 Hz identifikuota, kad šis dažnis atitinka įrašymo patalpoje esančiam juostinio transporterio sukimosi garsui. Esant 767 Hz dažniui girdimas ryškus variklio guolio cypimo garsas. 2 065 Hz dažnyje vis dar girdisi guolio cypimas, tačiau jis yra vos girdimas, ryškiau girdimi patalpoje esantys didesnio dažnio garsai, kurie nėra skleidžiami variklių. 2 746 Hz dažnyje aiškiau



girdimi didesnio dažnio garsai, kurie buvo aptikti 2 065 Hz ribose. Daugiau kaip 4 122 Hz girdimi garsai nėra panašūs į variklio skleidžiamus garsus.



37 pav. Valymo įrenginio su gedimu dažnio srities apriboto dažnio grafikas

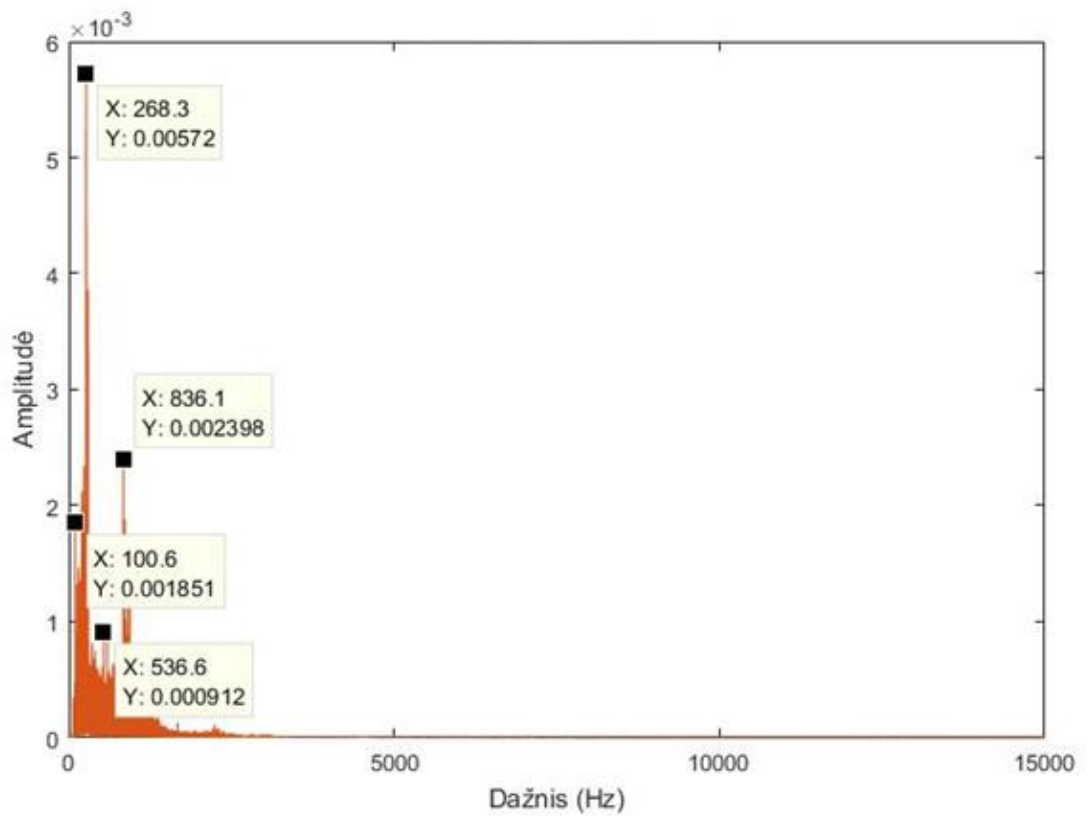
Taigi, naudojant *MATLAB* programoje gautą garso signalo dažnių spektrą ir naudojant skaitmeninį signalo procesorių su suprogramuotu *FIR* filtru nustatyta, kad variklio susidėvėjusių guolių gedimas gali būti aptinkamas apie 766 Hz garso dažnyje.

#### 2.4.3. Valymo įrenginio be gedimo garso signalo analizė

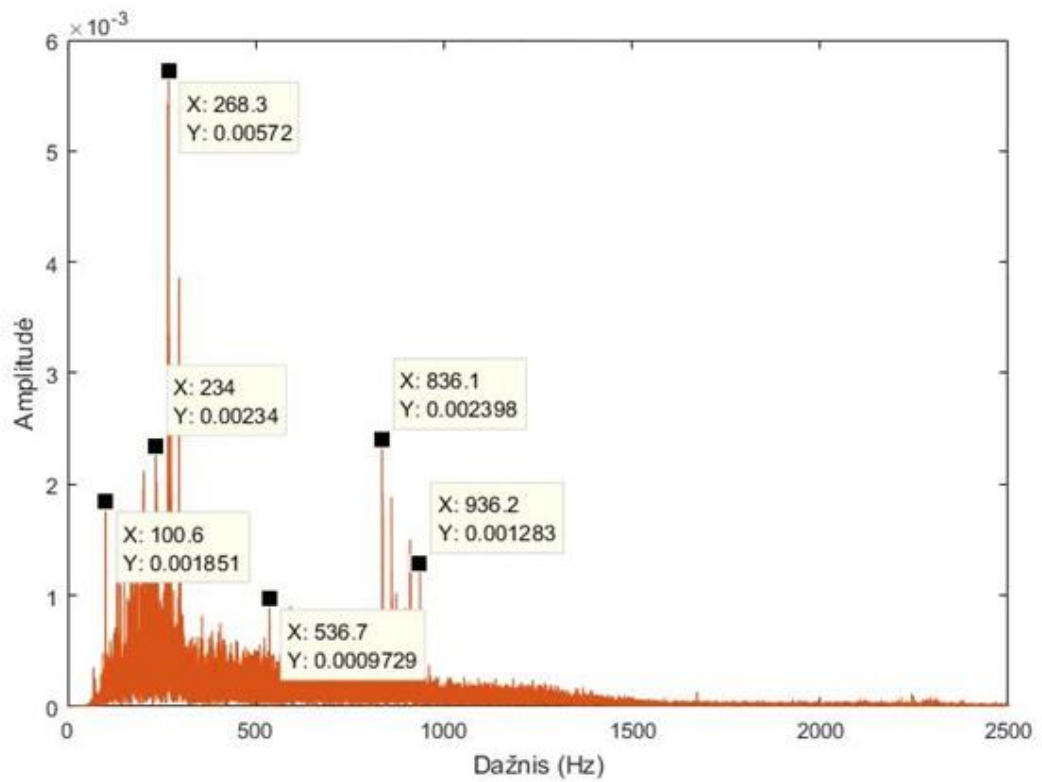
Valymo įrenginio be gedimo garso įrašas buvo įrašytas po dviejų mėnesių laiko nuo pirmojo garso įrašo datos. Todėl variklio be gedimo garso įrašė gali girdėtis daugiau ar mažiau pašalinių įrenginių ir gali skirtis įrašymo sąlygos, kaip skirtingas mikrofono ir variklio atstumas ar įrašymo kampas.

Lyginant *MATLAB* programoje gautus su gedimu ir be gedimo garso įrašų dažnių sritis matoma kad abiejuose grafikuose yra amplitudės šuolis 240–260 Hz dažnio srityje kurių skirtumas yra 9,4 proc. (žr. 38 pav.). Toks dažnio nuokrypis galimas dėl skirtingų įrašo įrašymo sąlygų, tokių kaip skirtingas įrašymo įrenginio atstumas nuo technologinio įrenginio.

Iš valymo įrenginio be gedimo dažnio srities grafiko išskiriami 6 pagrindiniai dažniai: 100 Hz, 234 Hz, 268 Hz, 536 Hz, 836 Hz ir 936 Hz. Šių dažnių amplitudės šuoliai yra matomi grafike (žr. 39 pav.) Pakeitus *FIR* filtro parametrus, kad garso įrašas būtų filtruojamas minėtuose dažniuose buvo nustatyta, kad 100 Hz dažnio spektre girdimas garsas yra šalia besisukančio juostinio transporterio juostos ir jo mechaninių dalių skleidžiami garsai.



38 pav. Valymo įrenginio be gedimo dažnio srities grafikas

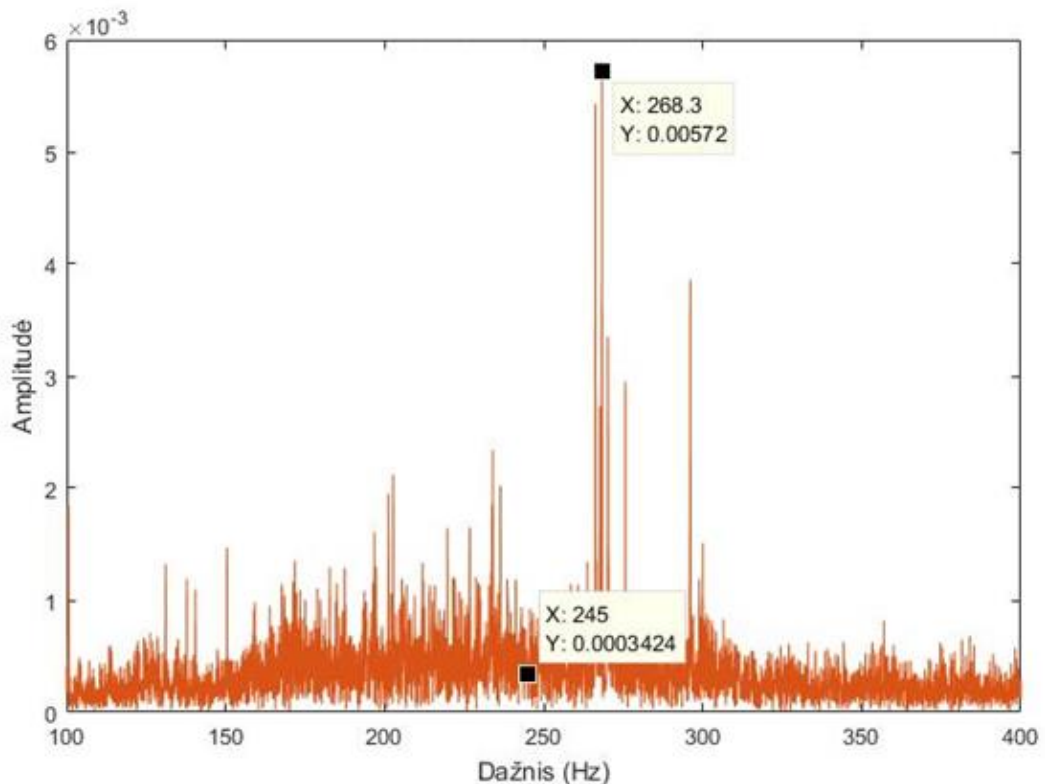


39 pav. Valymo įrenginio be gedimo apribotos dažnio srities grafikas

Esant 234 Hz dažniui vis dar girdimas juostinio transporterio garsas. 268 Hz dažnyje girdimas variklio sukimosi garsas. 536 Hz dažnyje girdimas nedidelis cypimas, tačiau jo amplitudė yra nedidelė todėl tai gali būti pašalinio įrenginio skleidžiamas garsas. Naudojant stiprinimo bloką programoje 836 Hz dažnyje girdimas nežymus cypimo garsas. 936 Hz dažnyje nebesigirdi valymo įrenginio skleidžiamų garsų, lieka tik pašalinių įrenginių skleidžiami garsai.

Lyginant valymo įrenginio su gedimu ir be gedimo grafikuose pateiktus dažnius matomi du dažniai kurie yra  $\pm 10$  proc. srityje. Šios dažnių sritys yra 245 Hz, 268 Hz ir 767 Hz, 836 Hz. Lyginant dažnių 245 Hz ir 268 Hz amplitudes pastebimas  $3 * 10^{-3}$  amplitudžių skirtumas tarp įrašų dažnio srities grafikų. Amplitudė yra didesnė įrenginio be gedimo įrašė. Kadangi dažnis 268 Hz nustatytas kaip valymo įrenginio variklio skleidžiamas garsas, galima teigti kad įrenginio su gedimu garso įrašė technologinis gedimas skleidžia didesnės amplitudės garsą nei pačio variklio sukimosi garsas. Dažnių 767 Hz ir 836 Hz amplitudžių skirtumas  $1 * 10^{-3}$ , tačiau panaudojus *FIR* filtrą ir perklausius garso įrašą pastebimas skirtumas tarp šiuos dažnius atitinkančių garsų.

Apribojus valymo įrenginio be gedimo dažnio srities grafiką nuo 100 Hz iki 400 Hz (žr. 40 pav.), pastebimas valymo įrenginio su gedimu garso įrašė nustatytas 245 Hz dažnis. Įrašė su gedimu šis dažnis identifiktuotas kaip besisukančio variklio skleidžiamo garso dažnis, kurio amplitudė įrašė –  $2,9 * 10^{-3}$ . Valymo įrenginio be gedimo garso įrašė 245 Hz dažnio amplitudė –  $0,3 * 10^{-3}$ . Tačiau šiame garso įrašė dažnio 268 Hz amplitudė –  $5,72 * 10^{-3}$ . Šis dažnių neatitikimas gali būti skirtingų garso įrašė sąlygų sukeltas pokytis. Šių dažnių skirtumas yra 23 Hz arba 8 proc.



40 pav. Valymo įrenginio be gedimo dažnio srities 100–400 Hz grafikas

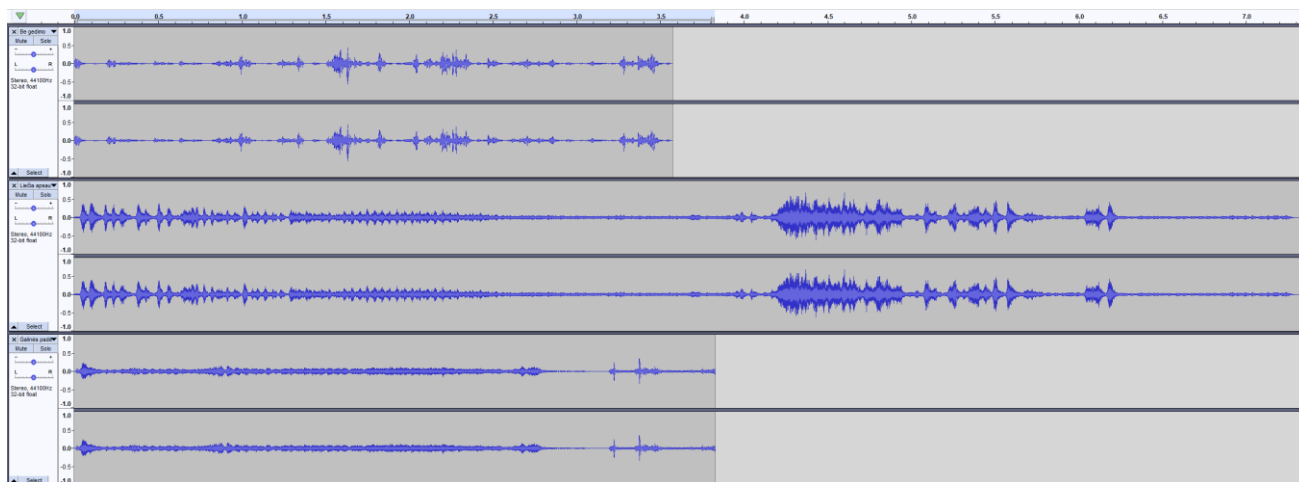
Taigi, palyginus valymo įrenginio variklio be gedimo ir su gedimu tyrimo duomenis galima teigti, kad šio valymo įrenginio technologinis gedimas, susidėvėjusio guolio gedimas, gali būti aptiktas 767 Hz dažnio srityje.

## 2.5. Sklendės variklio garso įrašo analizė

Sklendė naudojama sausų grūdų laikymo talpos apačioje ir valdoma iškraunant sausus grūdus į grandiklinį transporterį, kuris grūdus transportuoja į kaušinį elevatorių. Sklendės variklio galia – 0,18 kW, sklendė eksploatuojama lauko sąlygomis. Šio variklio sukimosi greitis – 1 380 aps./min. Garso įrašo įrašymo metu buvo vėjuota, vėjo greitis siekė iki 10 m/s, todėl garso įrašuose galimai prisidėjo trikdžių dėl oro sąlygų. Įrašymo metu kiti pašaliniai įrenginiai nedirbo. Šiam technologiniam įrenginiui įrašytos trys skleidžiamų garsų sekos – variklio be gedimo, variklio su mechaniniu gedimu ir variklio su pašaliniu gedimu.

### 2.5.1. Sklendės variklio garso įrašai

Garso įrašas įrašytas naudojant mobilųjį įrenginį *POCOPHONE F1* ir integruotą mikrofoną. Variklio su mechaniniu gedimu įrašas įrašytas, kai sklendės variklio vėdinimo ašmenys lietė metalinę apsaugą. Variklio su pašaliniu gedimu įrašas padarytas, kai sklendės galinės padėties jutiklis buvo nenuspaudžiamas, dėl ko sklendė pasiekusi galinę padėtį nesustojo ir toliau užsidarinėjo. Sklendės be gedimo garso įrašas įrašytas, kai buvo pašalinti visi sklendės technologiniai gedimai. *Audacity* programoje (žr. 41 pav.) viršuje pavaizduotas garso įrašas yra sklendės variklio be gedimo garso įrašas, antrasis įrašas yra sklendės su mechaniniu gedimu garso įrašas, trečiasis įrašas yra sklendės, kai nebuvo pasiekta galinė padėtis skleidžiamas garsas.

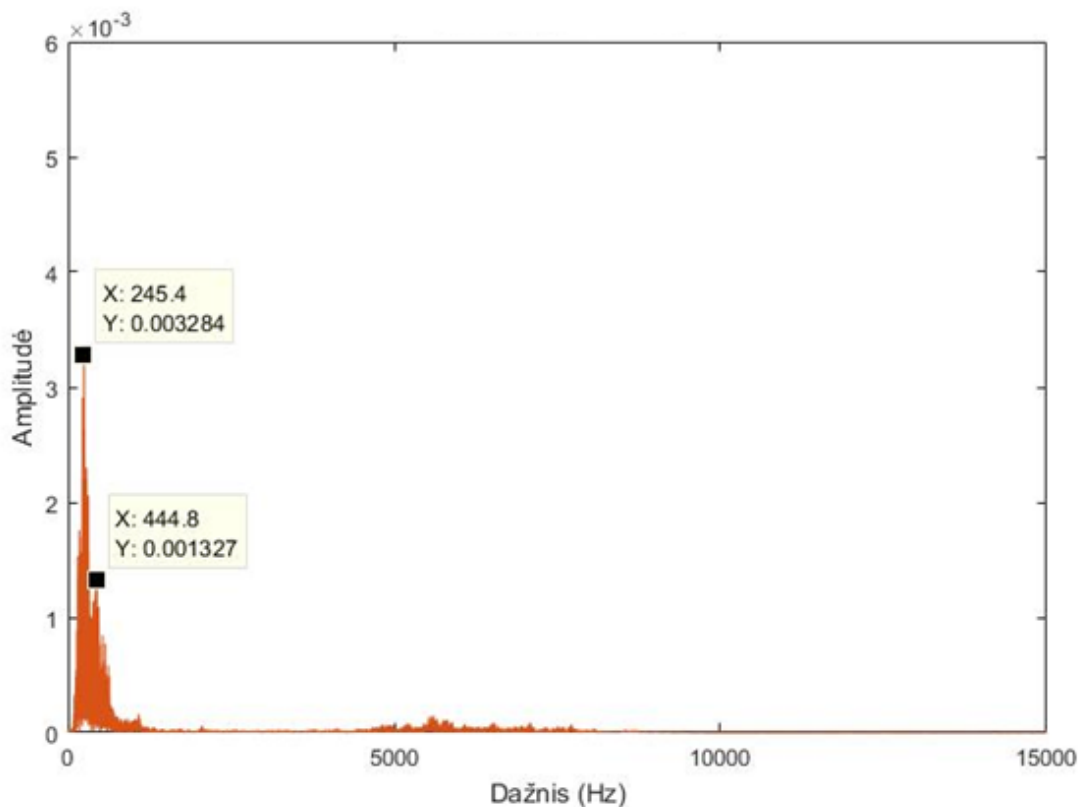


41 pav. Sklendės variklio garso įrašai *Audacity* programoje

Variklio be gedimo ir su nepasiekta sklendės galine padėtimi įrašai yra trumpi, apie 4 sekundžių ilgio, o sklendės su mechaniniu gedimu įrašo ilgis siekia 8 sekundes. Šie įrašai yra trumpesni nei kitų technologinių įrenginių, kadangi sklendės atidarymo ir uždarymo darbo laikai yra trumpi.

### 2.5.2. Sklendės variklio be gedimo garso analizė

Naudojant *MATLAB* aplinkoje parašytą programą, sklendės variklio be gedimo garso įrašas yra paverčiamas iš laiko srities į dažnio sritį (žr. 42 pav.). Šiame grafike pastebimas didelis amplitudės šuolis, viršijantis  $3 \cdot 10^{-3}$  amplitudę, 200–300 Hz garso dažnių srityje.

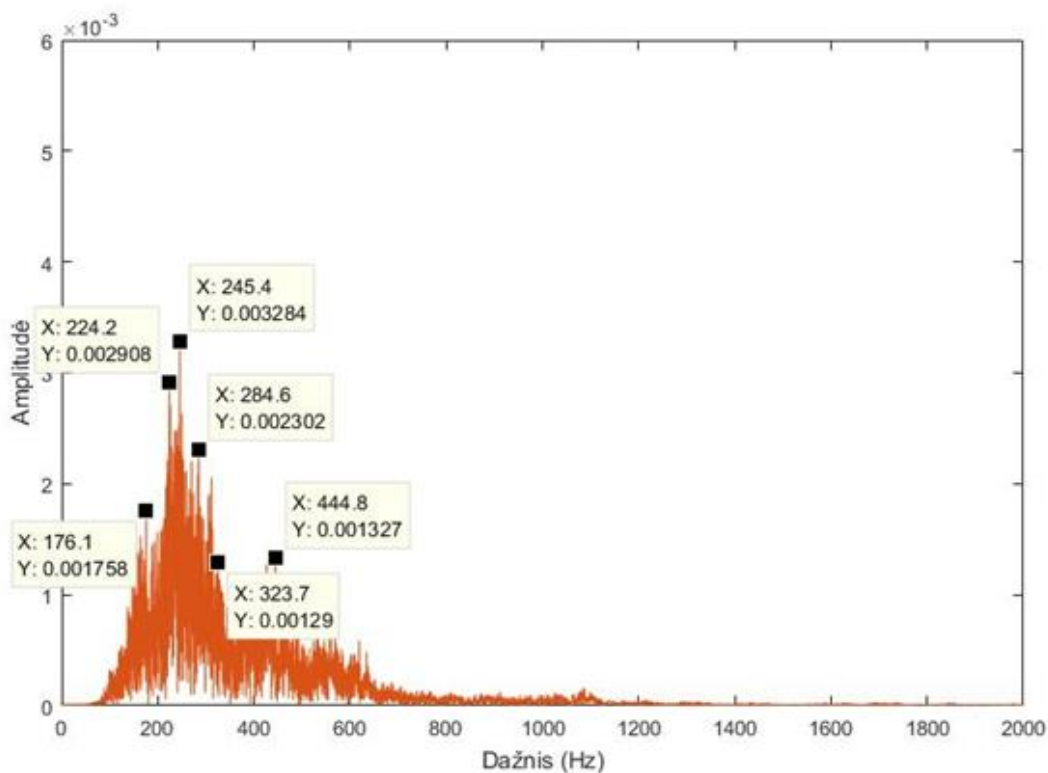


**42 pav.** Sklendės be gedimo dažnio srities grafikas

Kadangi virš 2 000 Hz dažnio srityje dažnių amplitudės yra mažos, dažnis apribojamas iki 2 000 Hz (žr. 43 pav.). Apribojus dažnio sritį išskiriami dažniai su grafike matomais amplitudės šuoliais. Išskirti dažniai – 153 Hz, 176 Hz, 224 Hz, 245 Hz, 285 Hz, 324 Hz ir 445 Hz. Visų šių dažnių amplitudės grafike viršija  $1 \cdot 10^{-3}$  ribą.

Ištyrus garso įrašą panaudojus skaitmeninį signalų procesorių su *FIR* filtru nustatyta, kad dažniuose 153 Hz, 176 Hz, 224 Hz ir 245 Hz girdimas tik į mikrofoną pučiamo vėjo garsas. 285 Hz dažnyje girdimas stiprus vėjo garsas ir nežymus variklio sukimosi garsas, tačiau vėjo sukiamas garsas yra kelis kartus ryškesnis nei variklio sukimosi garsas, todėl skaitmeninis signalų procesorius nesugebėtų identifikuoti sklendės variklio be gedimo garso. Dažniuose 324 Hz ir 445 Hz variklio sukimosi garso nebesigirdi. Girdisi tik vėjo sukiamas garsas.

Technologiniams įrenginiams eksploatuojamiems lauko sąlygomis gedimų nustatymas priklauso nuo garso įrašo įrašymo metu esamų sąlygų. Jeigu garso įrašo įrašymo įrenginį veikia išoriniai veiksniai, kaip vėjas, garso įrašas yra iškraipomas ir technologinis gedimas gali būti nepastebėtas, ar dėl vėjo sukeltų trikdžių normaliai funkcionuojantis įrenginys gali būti identifikuotas kaip įrenginys su gedimu.



**43 pav.** Sklendės be gedimo grafikas su apribota dažnio sritimi

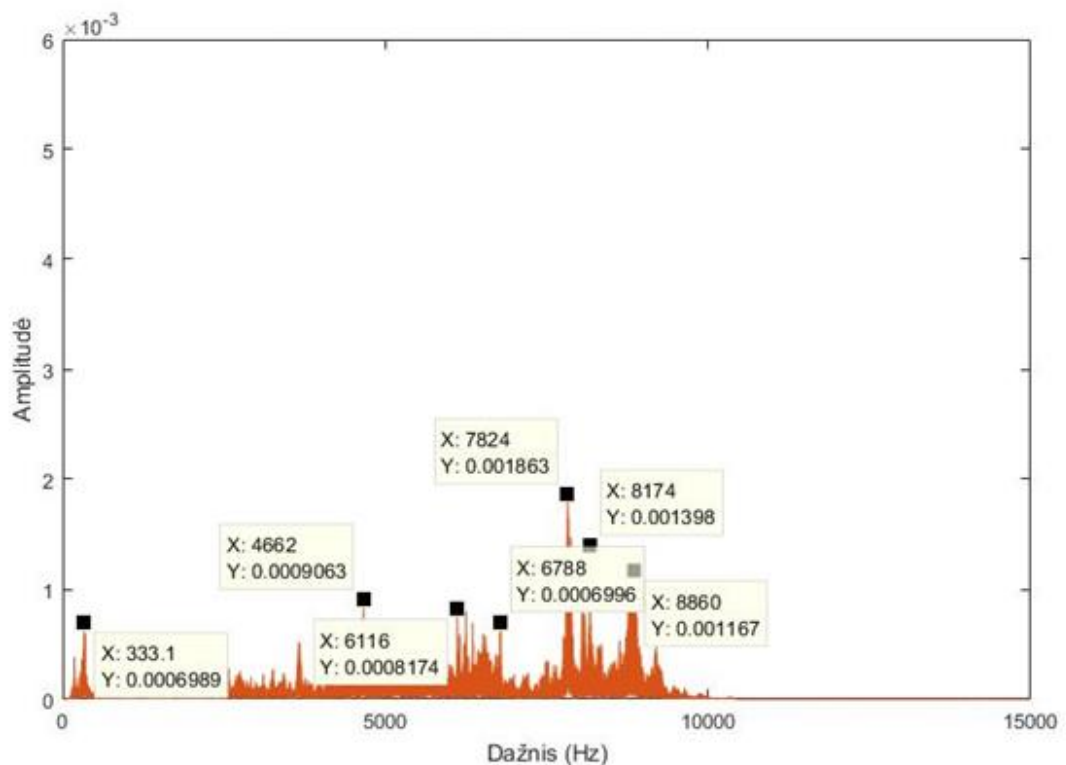
Tam kad to išvengti technologinius įrenginius ir garso įrašų įrašymo įrangą reikia apsaugoti nuo išorinių lauko veiksnių.

### 2.5.3. Sklendės variklio su mechaniniu gedimu garso analizė

Naudojant *MATLAB* aplinkoje sudarytą programą, sklendės variklio su mechaniniu gedimu garso įrašas yra paverčiamas iš laiko srities į dažnio sritį (žr. 44 pav.). Sklendės su liečiama apsauga gedimu dažnio srities grafikas skiriasi nuo prieš tai nagrinėtų gedimų grafikų. Šio garso įrašo dažnio srities grafike amplitudės šuoliai fiksuojami aukštesniuose dažniuose nei kitų gedimų.

Didžiausias amplitudės šuolis šio technologinio gedimo grafike matomas ties 7 824 Hz dažniu. Iš grafiko išskiriami amplitudės šuoliai ties šiais dažniais – 333 Hz, 4 662 Hz, 6 116 Hz, 6 788 Hz, 7 824 Hz, 8 174 Hz, 8 860 Hz. Lyginant šiuos dažnius su sklendės be gedimo grafiko duomenis matoma tik viena dažnio sritis kuri sutampa abiejuose grafikuose – 333 Hz dažnis. Kiti amplitudės šuoliai matomuose dažniuose gali būti technologinį gedimą identifikuojantys dažniai.

Panaudojus skaitmeninį signalų procesorių su programa naudojančia *FIR* filtrą nustatyta kad, 333 Hz dažnyje girdimas variklio sukimosi garsas ir nežymus liečiamos apsaugos skleidžiamas garsas. Dažniuose 4 662 Hz ir 6 116 Hz nebegirdimas variklio sukimosi garsas, girdimas ryškesnis variklio liečiamos apsaugos garsas. 6 788 Hz dažnyje išryškėja liečiamos apsaugos skleidžiamas garsas, tačiau šis garsas yra tylus. Kad identifikuoti šį garsą, programoje naudojamas stiprintuvo blokas. Dažnyje 7 824 Hz girdimas ryškus variklio liečiamos apsaugos skleidžiamas garsas, kuriam programoje nenaudojamas stiprintuvas.



**44 pav.** Sklendės su liečiama apsauga gedimu dažnio srities grafikas

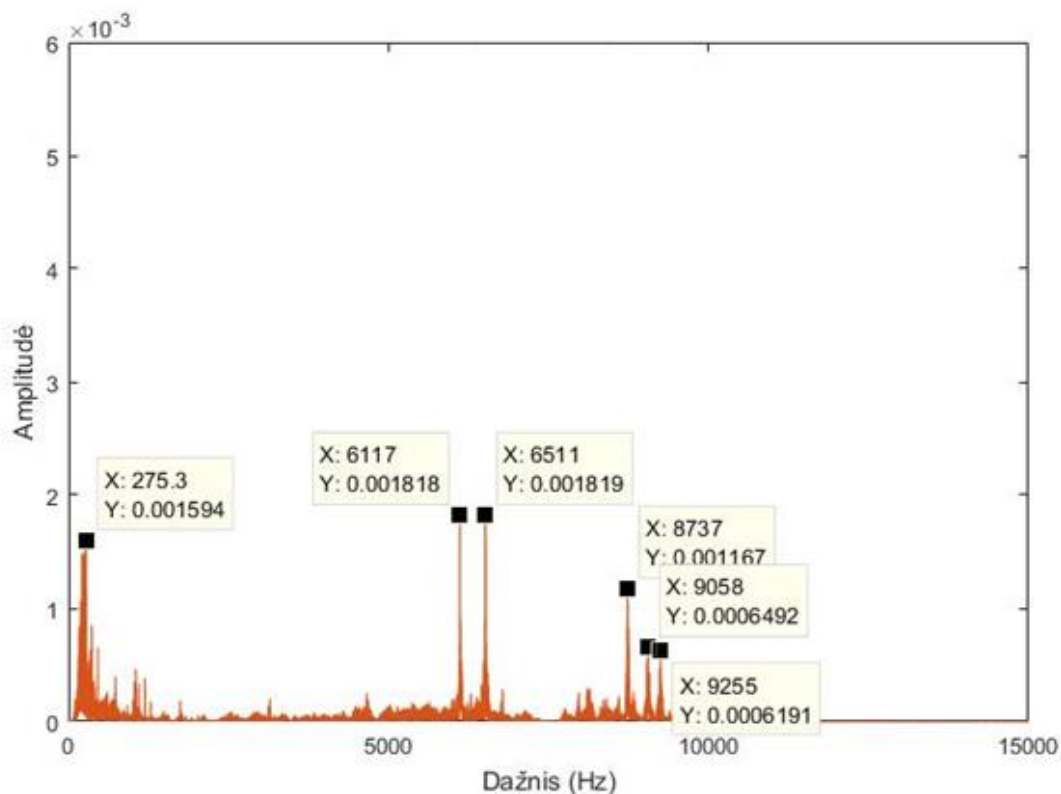
Dažniuose 8 174 Hz ir 8 860 Hz nebesigirdi ašmenų lietimosi prie apsaugos, lieka tik aukštesnio dažnio cypiantys garsai. Šio įrašo įrašymo metu vėjas nepūtė, todėl perklausant filtruotus garso įrašus girdimi aiškūs technologinio gedimo skleidžiami garsai.

#### 2.5.4. Sklendės su nesustojančio variklio gedimu garso analizė

Naudojant *MATLAB* aplinkoje parašytą programą, sklendės variklio su nepasiekiamą galine padėtimi gedimu garso įrašas paverčiamas iš laiko srities į dažnio sritį (žr. 45 pav.). Šiame grafike pavaizduota technologinio gedimo dažnio sritis taip pat išsiskiria iš kitų tirtų technologinių gedimų, kadangi amplitudės šuoliai matomi dažnių srityse daugiau kaip 5 000 Hz. Amplitudės šuoliai fiksuojami dažniuose 191 Hz, 275 Hz, 6 117 Hz, 6 511 Hz, 8 736 Hz, 9 058 Hz, 9 255 Hz. Lyginant šio technologinio gedimo dažnio srities grafiką su sklendės be gedimo dažnio srities grafiku, matomos dvi dažnio sritys – 191 Hz ir 275 Hz, kurių amplitudės šuoliai matomi abiejuose grafikuose. Tačiau, kaip ir grafike su liečiama apsauga amplitudės šuoliai aukštesniuose dažniuose atsiranda tik technologinio gedimo.

Kai sklendės variklis nesustoja galinėje padėtyje variklis toliau bando sukti sklendę, tačiau atsiranda mechaninis pasipriešinimas, todėl variklis pradeda skleisti garsą, kuris yra garsesnis ir kitokio dažnio nei normalaus darbo režimo metu skleidžiamas garsas. Naudojant skaitmeninį signalų procesorių ir programą su *FIR* filtru nustatyta, kad 190 Hz dažnyje yra girdimas į mikrofoną pučiamo vėjo garsas. Esant 275 Hz dažniui girdimas variklio sukimosi garsas. Dažniuose 6 117 Hz ir 6 511 Hz girdimas garsas, kurį skleidžia variklis kai atsiranda mechaninis pasipriešinimas, dažnyje 6 511 Hz šis garsas yra ryškesnis ir didesnės amplitudės. Dažniuose 8 736 Hz, 9 058 Hz ir 9 255 Hz girdimas tik vis didesnis cypimo garsas.





45 pav. Sklendės su nesustojančio variklio gedimu dažnio srities grafikas

Taigi, sklendės su variklio liečiamos apsaugos technologiniu gedimu skleidžiamo garso dažnis – 7 824 Hz. Sklendės su nepasiektos galinės padėties gedimu skleidžiamo garso dažnis – 6 511 Hz. Tačiau, tiriant sklendės variklio technologinius gedimus nustatyta kad, eksploatuojant įrangą lauko sąlygomis skaitmeninis signalų procesorius naudodamas *FIR* filtrą gali neaptikti dažnių esančių 100 – 300 Hz srityje. Tai lemia, kad šios įrangos naudojimas lauko sąlygomis yra nerekomenduojamas dėl pašalinių trikdžių sukeliamų netinkamų oro sąlygų.

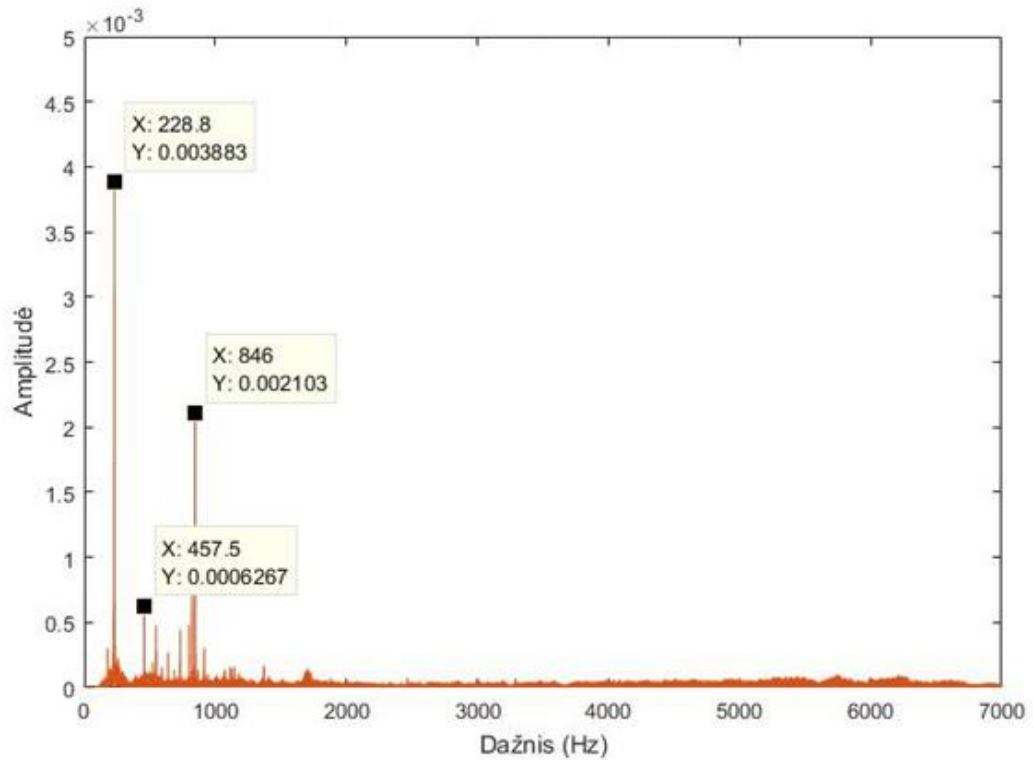
## 2.6. Aplinkinių įrenginių poveikis technologinio gedimo garso įrašui

Norint nustatyti ar tiriamąjį technologinį įrenginio garso signalą veikia pašaliniai veiksniai, kaip šalia veikiančių variklių garsai ar veikiančių variklių perduodamos vibracijos, buvo atliktas tyrimas su keturiais skirtingais garso įrašais. Šie garso įrašai įrašyti vienodomis sąlygomis, tą pačią dieną, toje pačioje vietoje. Garso įrašai įrašyti naudojant mobiliojo įrenginio integruotą mikrofoną ir įrašymo programą, mikrofonas buvo laikomas tokioje pačioje pozicijoje ir panašiu, 5 cm atstumu visų garso įrašų įrašymo metu. Garso įrašai įrašyti lauke, esant nestipriam vėjui. Tiriamas įrenginys – grandiklinis transporteris gabenantis nedidelį kiekį grūdų. Šio transporterio darbo eigoje buvo atidaryta viena papildoma sekcija, todėl grandiklinio transporterio grandinės garsas buvo didesnis nei įprastai. Atidaryta sekcija yra nutolusi apie 2 m atstumu nuo garso įrašymo vietos. Visi keturi šioje tyrimo dalyje naudojami technologiniai įrenginiai neturėjo gedimų, kuriuos būtų galima identifikuoti iš jų skleidžiamų garsų ar stebint jų veikimą darbo metu.

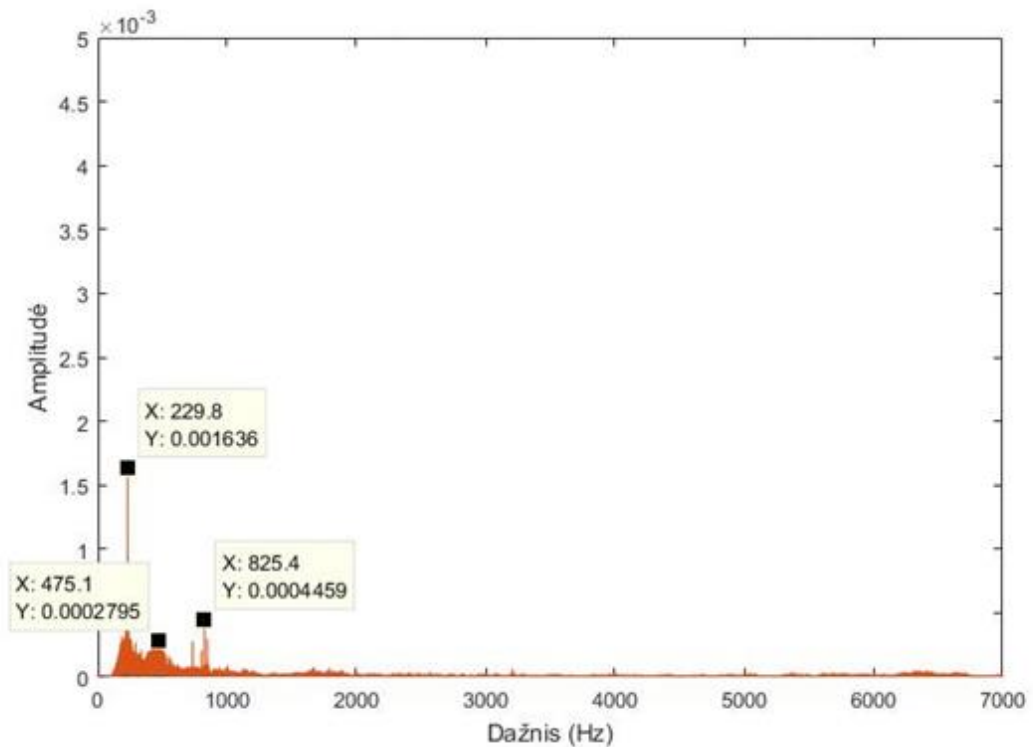
Pirmasis garso įrašas įrašytas, kai dirba tik vienas technologinis įrenginys, grandiklinis transporteris (žr. 46 pav.). Išnagrinėjus šį garso įrašą gauname garso įrašą užfiksuotų dažnių spektrą, kai garso įrašymo metu tiriamas įrenginys veikė vienas, aplinkoje nebuvo pašalinių technologinių įrenginių.



Šiame garso įrašė fiksuojami amplitudės šuoliai dažniuose 229 Hz, 457 Hz ir 846 Hz. Antrasis garso įrašas įrašytas, kai dirba du technologiniai įrenginiai, grandiklinis transporteris ir kaušinis elevatorius esantis 0,5 m atstumu nuo garso įrašymo vietos (žr. 47 pav.).

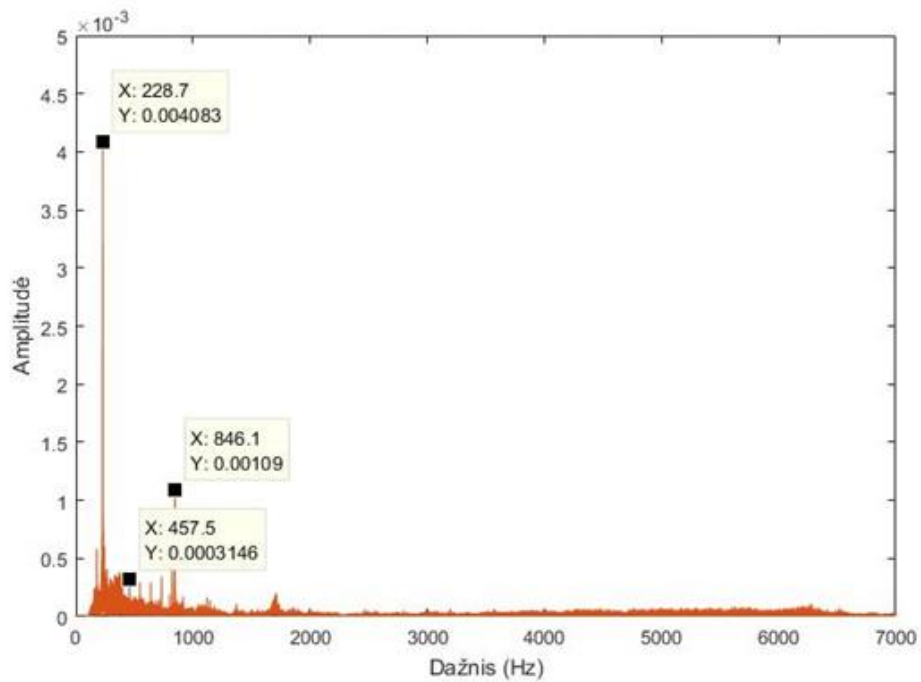


46 pav. Grandiklinis transporteris be gedimo ir be šalia veikiančių įrenginių



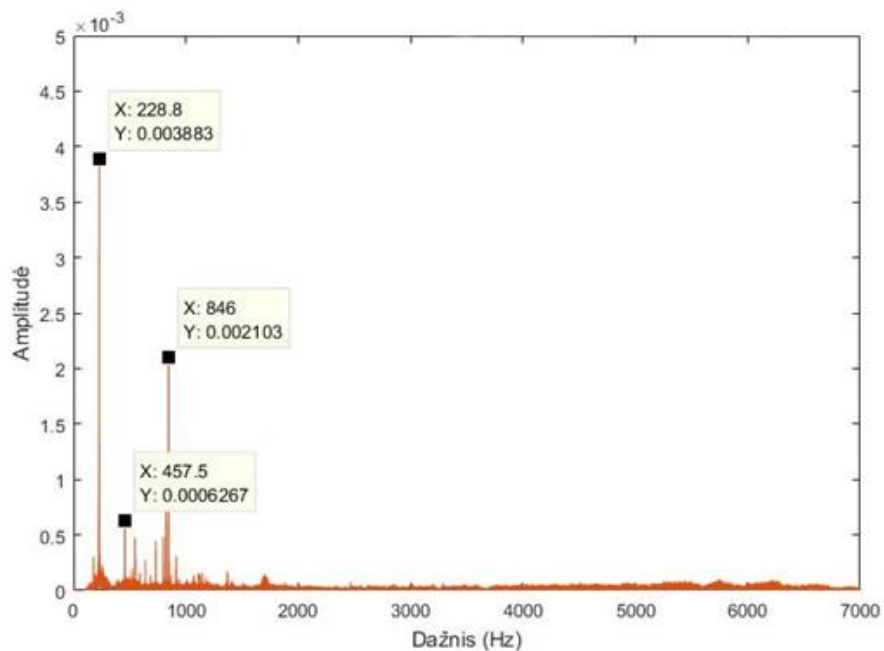
47 pav. Grandiklinis transporteris be gedimo kai šalia dirba vienas papildomas įrenginys

Trečiame garso įrašė girdėti, kaip dirba trys technologiniai įrenginiai: grandiklinis transporteris, kaušinis elevatorius ir sraigtinis transporteris, kuris nuo įrašo įrašymo vietos yra nutolęs 3 m atstumu (žr. 48 pav.).



48 pav. Grandiklinis transporteris be gedimo kai šalia dirba du papildomi įrenginiai

Ketvirtasis garso įrašas įrašytas, kai dirba keturi technologiniai įrenginiai, grandiklinis transporteris, kaušinis elevatorius, sraigtinis transporteris ir šalia sraigtinio transporterio esantis antrasis kaušinis elevatorius. Antrasis kaušinis elevatorius nuo garso įrašymo vietos yra nutolęs 4 m atstumu (žr. 49 pav.).



49 pav. Grandiklinis transporteris be gedimo kai šalia dirba trys papildomi įrenginiai

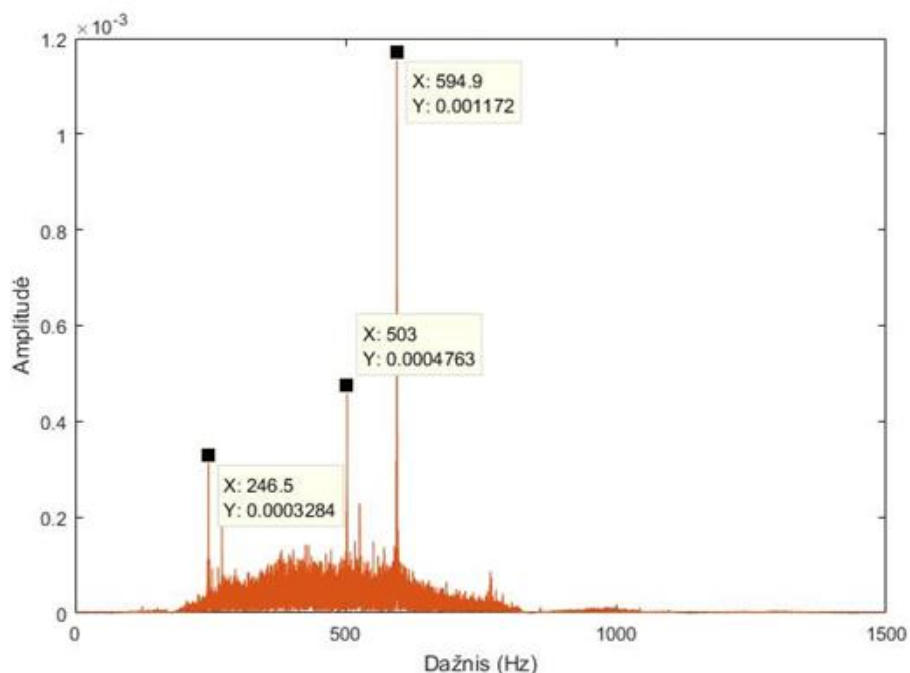
Palyginus ištirtų garso įrašų *MATLAB* programoje gautus grafikus ir pritaikius *FIR* filtrus, buvo nustatyta kad, įrašytas garsas atitinkantis 228 Hz grafike yra variklio sukimosi skleidžiamo garso dažnis. 457 Hz ir 475 Hz dažniai yra pašalinio variklio skleidžiamo garso dažnis, o 846 Hz dažnis yra grandiklinio transporterio besisukančios grandinės skleidžiamo garso dažnis. Atlikus tyrimą naudojant keturis skirtingus technologinius įrenginius, kurie yra nutolę skirtingais atstumais nuo garso įrašo įrašymo vietos ir panaudojus *MATLAB* ir *FIR* filtrus išanalizuoti šiems garso įrašams, nustatyta, kad pašaliniai šalia esantys technologiniai įrenginiai be gedimų neturi įtakos garso įrašui, pagal kurį aptinkamas įrenginio technologinis gedimas.

## 2.7. Programa ištirtų gedimų identifikavimui

Sudarant programą gebančią nustatyti praeituose tyrimuose aprašytus technologinius gedimus, susidurta su per mažu skaitmeninio signalo procesoriaus leidžiamų instrukcijų skaičiumi. *ADAU1701* leidžia užduoti iki 1 024 instrukcijų. Kiekvienas 800-osios eilės *FIR* filtras reikalauja 800 instrukcijų, kai programoje naudojami penki 800-osios eilės *FIR* filtrai ir kiti papildomi komponentai. Sudarius programą iš visų šių komponentų programa reikalauja 4 100 instrukcijų. Tam, kad išvengti šio apribojimo galimi du variantai. Keisti skaitmeninį signalų procesorių į galingesnį įrenginį, gebanti apdoroti daugiau instrukcijų, arba sumažinti *FIR* filtro eilę iki 150-osios eilės. Sumažinant *FIR* filtrų eilę programa praranda dažnių filtravimo tikslumą, tačiau sumažinus filtrų eiles programa veikia *ADAU1701* skaitmeninio signalų procesoriaus bazėje.

### 2.7.1. *FIR* filtrų palyginimas

Norint nustatyti skirtumą tarp 800-osios, 150-osios ir 100-osios eilės *FIR* filtrų atliktas tyrimas naudojant grandiklinio transporterio su gedimu garso įrašą. 100-osios ir 800-osios eilės *FIR* filtrų grafikai pateikti 32 ir 33 paveiksluose. Grandiklinio transporterio su atsilaisvinusiu diržu garso įrašui pritaikius 150-osios eilės *FIR* filtrą apribojantį dažnį ties 595 Hz riba, sudarytas dažnio srities grafikas (žr. 50 pav.).



50 pav. Grandiklinio transporterio su gedimu 150-osios eilės *FIR* filtro dažnio sritis

Skirtumas tarp 800-osios ir 100-osios eilės *FIR* filtrų yra 30 Hz virš nustatytos dažnio ribos ir 150 Hz skirtumas tarp mažiausių praleidžiamų dažnių. 150-osios eilės *FIR* filtras praleidžia tos pačios srities dažnius kaip ir 100-osios eilės *FIR* filtras, tačiau skiriasi šių dažnių amplitudės. 150-osios eilės *FIR* filtras praleidžia 595 Hz dažnį su amplitude  $1,172 * 10^{-3}$ , o 100-osios eilės *FIR* filtro amplitudė –  $0,94 * 10^{-3}$ .

### 2.7.2. Technologinius gedimus identifikuojanti programa

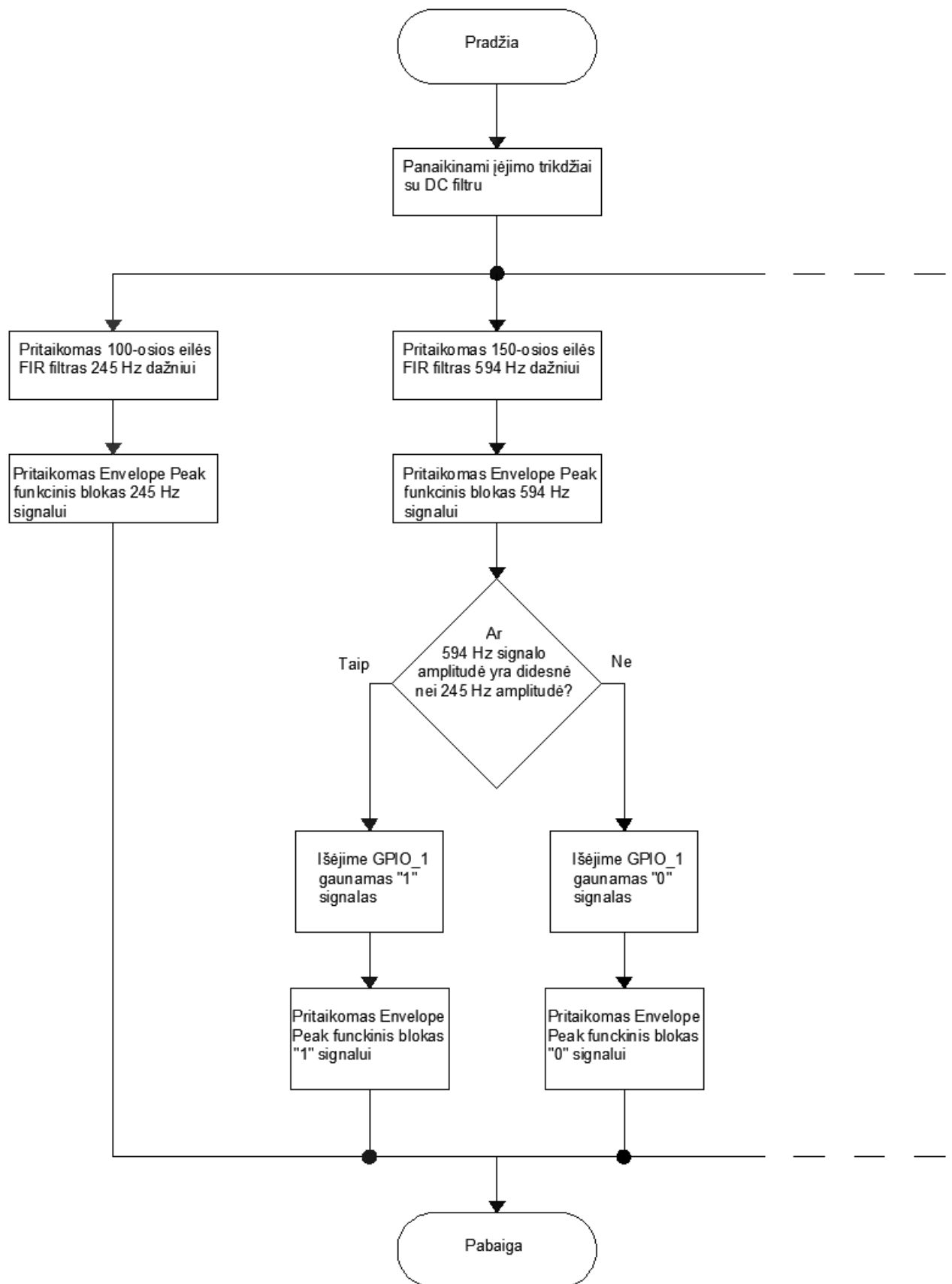
Iš atliktų tyrimų rezultatų (žr. 1 lentelę) sudaryta programos funkcinė diagrama (žr. 3 priedą). Šioje funkcinėje diagramoje pavaizduotas technologinius gedimus identifikuojančios programos algoritmas. Algoritmą galima išskirti į dvi grupes: technologinio gedimo dažnio filtravimas ir įrenginio be gedimo dažnio filtravimas. Turint šiuos duomenis galima sudaryti dviejų signalų amplitudžių palyginimus. Technologinio įrenginio su gedimu garso signalo amplitudei viršijus įrenginio be gedimo signalo amplitudę tam tikram laiko tarpui yra išduodamas signalas į skaitmeninio signalų procesoriaus išėjimą, kuris įjungia LED indikatorius, atitinkantį vieną iš gedimų (žr. 51 pav.).

**1 lentelė.** Technologinius gedimus atitinkantys dažniai

Technologinis gedimas	Įrenginio be gedimo skleidžiamo garso dažnis, Hz	Įrenginio su gedimu skleidžiamo garso dažnis, Hz
Grandiklinio transporterio atsilaisvinusio diržo tarp variklio ir reduktoriaus gedimas	183	595
Valymo įrenginio su susidėvėjusiais guoliais gedimas	245	767
Sklandės su liečiama metaline apsauga gedimas	245	7 824
Sklandės su nepasiekiamo gale padėtimi gedimas	229	6 511

Be lentelėje pateiktų tyrimų rezultatų taip pat nustatyta, kad pašaliniai įrenginiai esantys nuo 0,5 m iki 4 m atstumu, neturi įtakos technologinio įrenginio garso įrašui. Atliktuose tyrimuose sistemos atsikartojimas dėl pašalinių gedimų retumo nebuvo atliktas.

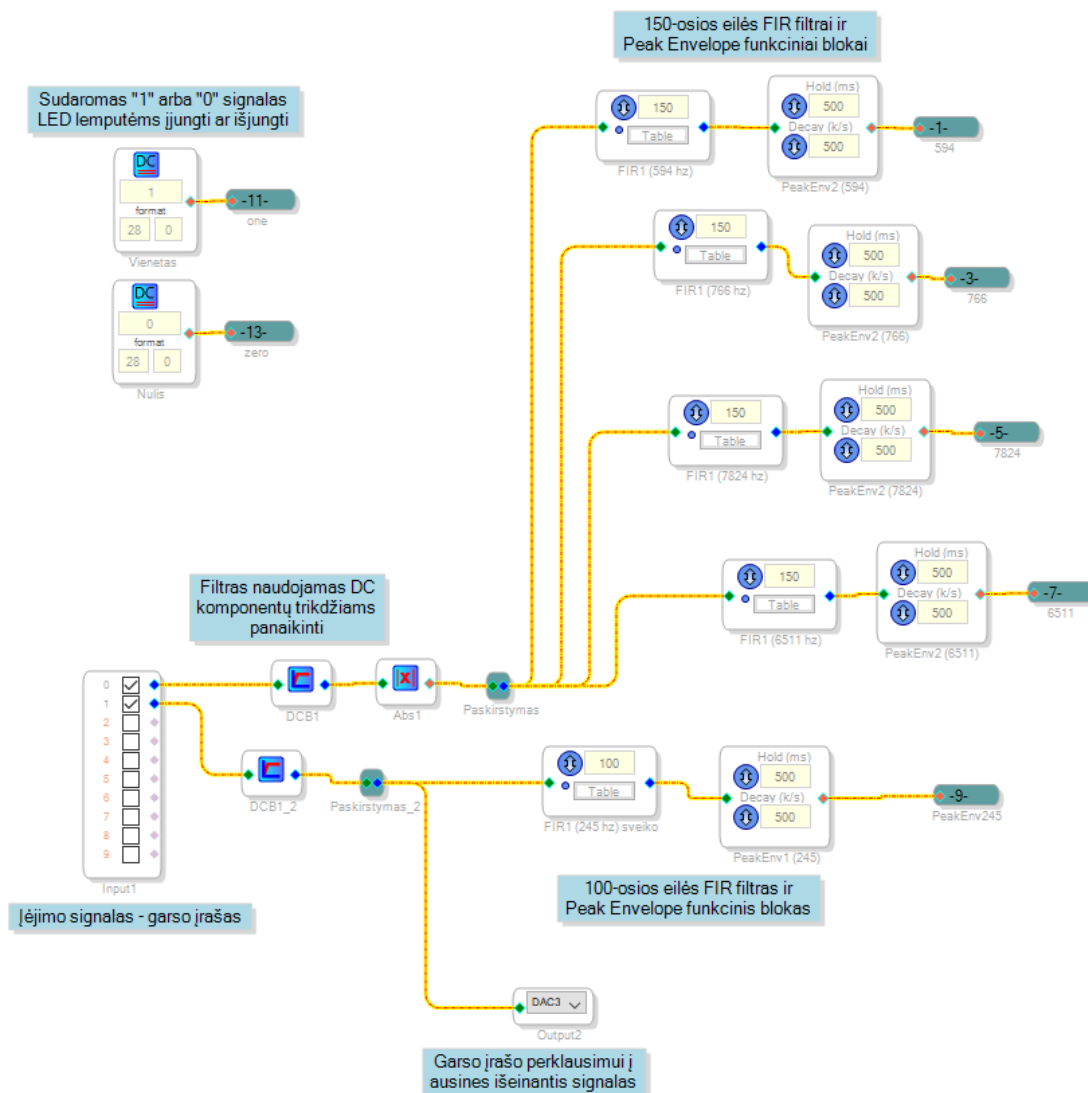
Naudojant šią programą skaitmeninis signalų procesorius apdoroja įėjime gautą garso signalą ir aptikus gedimą paduoda signalą į pasirinktą *GPIO* išėjimą. Kadangi tyrimams buvo naudojama išplėtimo plokštė *EVAL-ADAU1701MINIZ* *GPIO* išėjimai priskirti plokštėje naudojamiems komponentams. Todėl programoje naudojami 3 išėjimai į LED indikatorius ir 1 išėjimas į garso išėjimą (žr. 52 pav.).



**51 pav.** Gedimus identifikuojančios programos funkcinės diagramos dalis



palyginimo pasirinkimai – didesnis, mažesnis, didesnis ir lygus, mažesnis ir lygus, lygūs signalai. Šioje programoje naudojamas didesnio signalo funkcinis blokas.

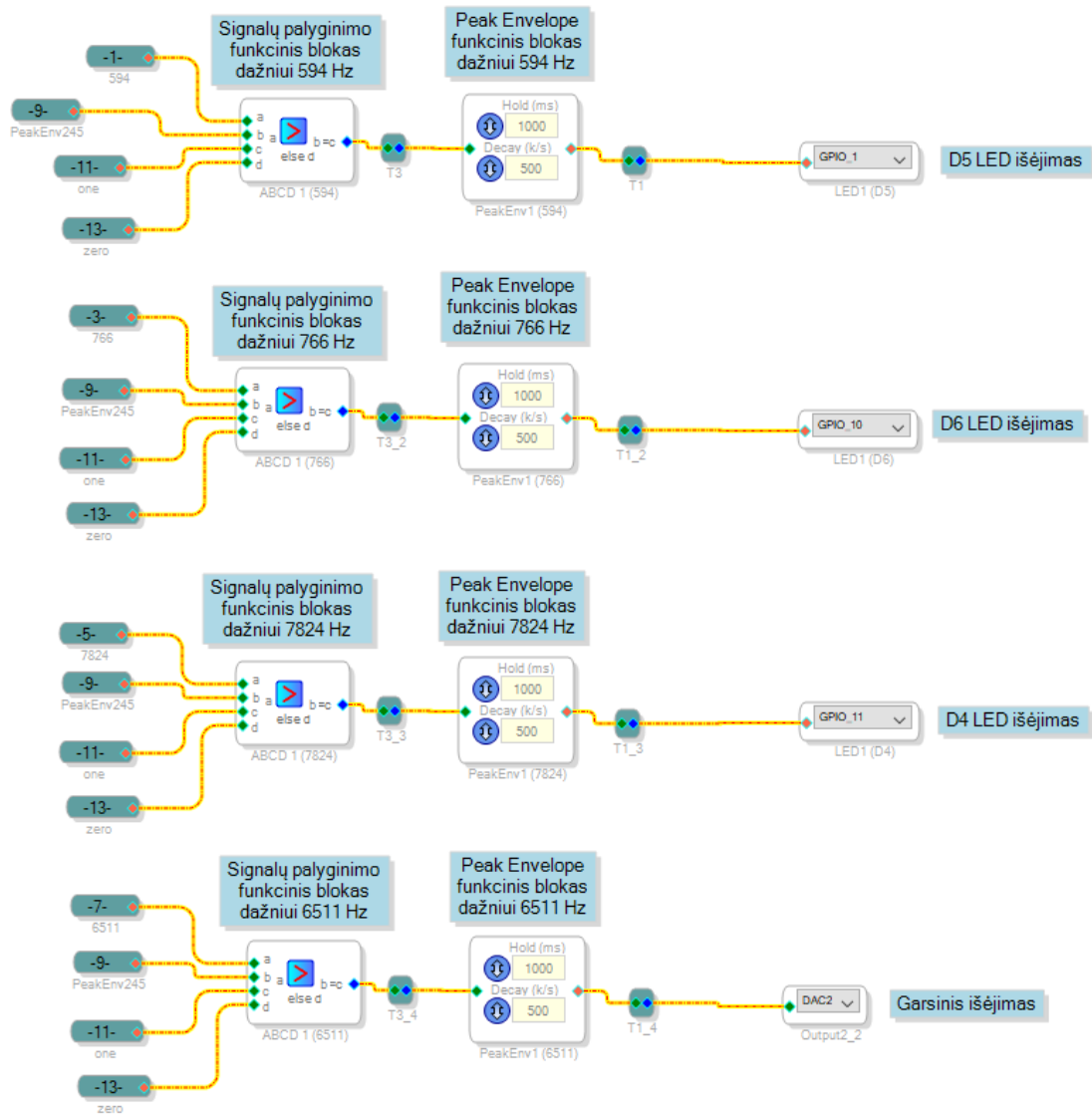


**53 pav.** Technologinius gedimus identifikuojančios *SigmaStudio* programos skaitmeniniam signalų procesoriui *ADAU1701* pirma dalis

Į bloko *a* įėjimą perduodamas 150-osios eilės *FIR* filtro užlaikytas technologinio gedimo signalas, o į *b* įėjimą perduodamas 100-osios eilės *FIR* filtro užlaikytas įrenginio be gedimo signalas. Į bloko *c* įėjimą perduodamas signalo generatoriaus išėjimas, kuris generuoja signalą „1“, o į bloko *d* įėjimą perduodamas generuojamas signalas „0“. Palyginimo blokui aptikus, kad signalas *a* yra didesnis už signalą *b* į bloko išėjimą, perduodamas *c* signalas, kuris užlaikomas nustatytam laikui naudojant *Peak Envelope* funkciją ir perduodamas į vieną iš išėjimų (žr. 54 pav.). Jeigu signalas *a* yra mažesnis už signalą *b*, perduodamas signalas *d*, sugeneruotas signalas „0“.

Iš šių funkcinių blokų sudaryta programa (žr. 4 priedą) gebanti aptikti tyrime ištirtus technologinius gedimus naudojant garso įrašus. Ši sistema geba aptikti keturis skirtingus technologinius gedimus: atsilaisvinusio diržo, susidėvėjusių guolių, ašmenų liečiamos apsaugos ir nepasiekiamos galinės padėties technologinius gedimus. Naudojant skaitmeninių signalų procesorių *ADAU1701* be išplėtimo plokštės *EVAL-ADAU1701MINIZ* aptiktų gedimų signalus galima perduoti į valdymo

įrenginio diskretinį įėjimą, pagal kurį valdymo programa atliktus tolimesnius veiksmus, kaip aptikto gedimo informacijos perdavimas ar technologinio įrenginio stabdymas.



**54 pav.** Technologinius gedimus identifikuojančios *SigmaStudio* programos skaitmeniniam signalų procesoriui *ADAU1701* antra dalis

Norint aptikti ir indikuoti daugiau technologinių gedimų ar turėti tikslesnę, sistemą skaitmeninių signalų procesorius apdorojamų instrukcijų kiekis turi viršyti 1 024. Tam reikalingas galingesnis DSP, pvz. *ADAU1466*.



## Išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę nustatyta, kad technologinių gedimų identifikavimas, naudojant veikiančių įrenginių skleidžiamų garsų pokyčius gali būti naudojamas kaip bekontaktis gedimų analizės metodas. Taip pat išanalizuoti technologinius gedimus identifikuojančios sistemos naudojančios: vibracijų analizės, variklio srovės analizės ir temperatūros analizės metodus.
2. Išanalizavus esamus signalų analizės būdus, naudojamus procesorių skaitmeniniams signalams apdoroti, išskirtos šešios pagrindinės metodikos: filtrai, Furjė transformacijos, kelių signalų klasifikacijos, laiko-dažnio srities, baigtinio impulso atsako filtro ir begalinio impulso atsako filtro metodai.
3. Analizuotų *MATLAB* ir *SigmaStudio* paketų bazėje, galima kurti programinę įrangą *ADAUI701* skaitmeniniams signalų procesoriams. Šioje programoje esantys filtrai suteikia galimybę pašalinti garso signale esančius trikdžius, pakeliant signalo kokybę. *MATLAB* programinė įranga yra naudojama papildomiems skaičiavimams ir sistemos modelio analizei.
4. Ištyrus grandiklinio transporterio su atsilaisvinusio diržo technologinius gedimų garso įrašą, nustatytas šio technologinio gedimo skleidžiamo charakteringo garso dažnis yra 595 Hz. Atitinkamai identifikuotas sudilusių guolių skleidžiamo triukšmo dažnis – 767 Hz, sklendės su ašmenų liečiančių apsaugą dažnis – 7 824 Hz, sklendės su nepasiekiamą galine padėtimi dažnis – 6511 Hz. Taip pat ištyrus keturių šalia stovinčių technologinių įrenginių garso įrašus ir nustatčius jų darbo režimo sukeltamų garsų dažnius konstatuota, kad pašaliniai technologiniai įrenginiai neturi įtakos tiriamo technologinio įrenginio garso įrašui.
5. *SigmaStudio* aplinkoje sudaryta programa skaitmeniniam signalų procesoriui *ADAUI701* gebanti identifikuoti stebėtus atsilaisvinusio diržo, susidėvėjusių guolių, ašmenų liečiamos apsaugos ir nepasiekiamos galinės padėties technologinius gedimus.

## Literatūros sąrašas

1. HENRIQUEZ, P. et al. Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*. 2014, 44(5):642–652.
2. LIU, Y., BAZZI, A. M. A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art. *ISA Transactions* [interaktyvus]. 2017, 70:400–409 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057816302932?via%3Dihub>.
3. TAN, L., JIANG, J. *Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications*. Third Edit. Ed. Sud. Steve Merken. [s.l.]: Katey Birtcher, 2019. ISBN 978-0-12-815071-9.
4. GLOWACZ, A., GLOWACZ, Z. Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging. *Infrared Physics and Technology* [interaktyvus]. 2017, 81:7–16 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.003>.
5. SINGH, G. et al. Induction motor inter turn fault detection using infrared thermographic analysis. *Infrared Physics and Technology* [interaktyvus]. 2016, 77:277–282 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2016.06.010>.
6. BETTA, G. et al. A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis. *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 2001, 1:572–577.
7. MEHALA, N. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis. *Electrical Engineering*. 2010, 2:175.
8. LAU, E. C. C., NGAN, H. W. Detection of motor bearing outer raceway defect by wavelet packet transformed motor current signature analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2010, 59(10):2683–2690.
9. MISRA, R., PAHUJA, G. L. An Experimental study of rotor fault detection using motor current signature analysis based on neural network. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2015, 79:25–36.
10. DELGADO-ARREDONDO, P. A. et al. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing* [interaktyvus]. 2017, 83:568–589 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.032>.
11. PINEDA-SANCHEZ, M. et al. Diagnosis of induction motor faults using a DSP and advanced demodulation techniques. *Proceedings - 2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2013*. 2013, 69–76.
12. KUMARA, R. S. et al. Fault diagnosis of industrial drives using MCSA techniques. *2009 International Conference on Control Automation, Communication and Energy Conservation, INCACEC 2009*. 2009, 1–7.
13. RZESZUCINSKI, P. et al. A signal processing approach to bearing fault detection with the use of a mobile phone. *Proceedings - SDEMPED 2015: IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*. 2015, 310–315.
14. LU, S. et al. Fault diagnosis of motor bearing with speed fluctuation via angular resampling of transient sound signals. *Journal of Sound and Vibration* [interaktyvus]. 2016, 385:16–32 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.09.012>.

15. HIREMATH, N. Bearing fault detection using acoustic emission signals analyzed by empirical mode decomposition. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014, 03(15):426–431.
16. KIA, S. H. et al. Some digital signal processing techniques for induction machines diagnosis. *SDEMPED 2011 - 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*. 2011, 322–329.
17. CHOI, S. et al. Implementation of a fault-diagnosis algorithm for induction machines based on advanced digital-signal-processing techniques. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011, 58(3):937–948.
18. WANG, H. P., WANG, Z. K. The embedded VSR system design based on ARM and frequency spectrum analysis. *Proceedings - 2008 Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA 2008*. 2008, 2:488–492.
19. WANG, J. et al. An analysis method of gear fault diagnosis based on Chirp-Z transform and local mean decomposition. *Chinese Control Conference, CCC*. 2015, 6218–6223.
20. TREJO-CABALLERO, G. et al. Multiple signal classification based on automatic order selection method for broken rotor bar detection in induction motors. *Electrical Engineering*. 2017, 99(3):987–996.
21. KIA, S. H. et al. A high-resolution frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007, 54(4):2305–2314.
22. FENG, Z. et al. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples. *Mechanical Systems and Signal Processing* [interaktyvus]. 2013, 38(1):165–205 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.01.017>.
23. LOPEZ-RAMIREZ, M. et al. Detection and diagnosis of lubrication and faults in bearing on induction motors through STFT. *2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers, CONIELECOMP 2016*. 2016, 13–18.
24. BOUCHIKHI, E. H. et al. A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*. 2011, 3584–3589.
25. TALHAOUI, H. et al. Fast Fourier and discrete wavelet transforms applied to sensorless vector control induction motor for rotor bar faults diagnosis. *ISA Transactions* [interaktyvus]. 2014, 53(5):1639–1649 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2014.06.003>.
26. CLIMENTE-ALARCON, V. et al. Induction motor diagnosis by advanced notch FIR filters and the wigner-ville distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, 61(8):4217–4227.
27. QUINDE, I. R. et al. Bearing fault diagnosis based on optimal time-frequency representation method. *IFAC-PapersOnLine* [interaktyvus]. 2019, 52(11):194–199 [žiūrėta 2020-05-01]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.140>.
28. RAZAK, A. H. A. et al. Implementing digital finite impulse response filter using FPGA. *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings, APACE2007*. 2007, 1–5.
29. BADAVE, S. Multiplierless FIR filter implementation on FPGA. *International Journal of Information and Electronics Engineering*. 2012, 2(2):185–188.

30. PAN, S. T. A canonic-signed-digit coded genetic algorithm for designing finite impulse response digital filter. *Digital Signal Processing: A Review Journal* [interaktyvus]. 2010, 20(2):314–327 [žiūrėta 2020-06-19]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2009.06.024>.
31. MANDAL, S. et al. Design of optimal linear phase FIR high pass filter using craziness based particle swarm optimization technique. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* [interaktyvus]. 2012, 24(1):83–92 [žiūrėta 2020-07-13]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksuci.2011.10.007>.
32. CHAKRABORTY, S. Advantages of blackman window over hamming window method for designing FIR filter. *International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSET)* [interaktyvus]. 2013, 4(08):1181–1189 [žiūrėta 2020-06-02]. Prieiga per: <http://ijcset.com/docs/IJCSET13-04-08-030.pdf>.
33. GAO, Z. et al. FPGA implementation of adaptive IIR filters with particle swarm optimization algorithm. *2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, ICCS 2008*. 2008, 1364–1367.
34. *Analog Devices, ADAU1701 Technologicalinė Informacija „Adau1701“* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2020-05-27]. Prieiga per: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAU1701.pdf>.
35. *Texas Instruments. TMS320C5517 Technologicalinė Informacija, „TMS320C5517 Fixed-Point Digital Signal Processor“* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2020-05-27]. Prieiga per: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320c5517.pdf?ts=1590643477076>.
36. MCKEOWN, M. FFT implementation on the TMS320VC5505, TMS320C5505, and TMS320C5515 DSPs. *TI Application Report* [interaktyvus]. 2010, 1–23 [žiūrėta 2020-06-02]. Prieiga per: <http://www.ti.com/lit/an/sprabb6b/sprabb6b.pdf>.

## Priedai

### 1 priedas. FIR filtro koeficientų skaičiavimo programa

```
%% Nuskaitomas failas
%% 1 tyrimas, Grandiklinis transporteris
%Su gedimu, telefono
%file = 'grandiklinis transporteris 3_su gedimu.wav';
%Be gedimo, telefono
%file = 'grandininis trans. 3_sveikas_wav.wav';
%% 2 tyrimas, valymo irenginys
%Su gedimu, telefono
%file = 'valymo variklis_su gedimu.wav';
%Be gedimo, telefono
%file = 'valomoji prie vezimo juosta_sveikas.wav';
%% 3 ir 4 tyrimas, sklendė
%Be gedimo, telefonas
%file = 'sklende_be gedimo_21-03-06.wav';
%Su gedimu, telefonas, liečia apsauga
%file = 'sklende_Uzsidarineja_liecia_apsauga_3.wav';
%Su gedimu, telefonas, nepasiekia galinės padėties
%file = 'sklende_su gedimu_nepasiekia padeties_21-03-06.wav';
%% Šalia esančios įrangos poveikio tyrimas
%Objekto įrašai
%Tik transporteris
%file = '22 Jan, 15.23 konv. prie norijos k.wav';
%Transporteris ir šalia esanti norija (~0.5m atstumu)
%file = '22 Jan, 14.27 konv. prie norijos n+k.wav';
%Transporteris, šalia esanti norija (0.5m) ir valomosios snekas (3m atstumu)
%file = '22 Jan, 15.22konv. prie norijos k+n+val. šnek.wav';
%Transporteris, šalia esanti norija (0.5m) valomosios snekas (3m atstumu) ir
norija prie valomosios sneko (3.5m nuo transp.)
file = '22 Jan, 15.23 konv. prie norijos k+n+šnek.+norija.wav';
[A,B,C,D] = butter(20, [500 560]/22050);
d = designfilt('bandpassfir',...
    'FilterOrder',800, ...
    'StopbandFrequency1',500, ... % Dažnių apribojimas
    'PassbandFrequency1',510, ...+
    'PassbandFrequency2',600, ...
    'StopbandFrequency2',630, ...
    'DesignMethod','ls', ... % Filtro metodas
    'StopbandWeight1',1, ... % Metodo pasirinkimai
    'PassbandWeight', 2, ...
    'StopbandWeight2',3, ...
    'SampleRate',44100);
koef = d.Coefficients;
%% Grafikų braižymas
dataOut = filter(d, audio_in);
FFT_audio_in=fftshift(fft(dataOut))/length(fft(dataOut));
figure
plot(frequency_audio,abs(FFT_audio_in));
xlim([0,1500])
title('Grandiklinis transporteris su gedimu');
xlabel('Dažnis (Hz)');
ylabel('Amplitudė');
```

### 2 priedas. Greitosios Furjė transformacijos programa

```
%% Nuskaitomas failas
%% 1 tyrimas, Grandiklinis transporteris
%Su gedimu, telefono
%file = 'grandiklinis transporteris 3_su gedimu.wav';
```

```

%Be gedimo, telefono
%file = 'grandininis_trans. 3_sveikas_wav.wav';

%% 2 tyrimas, valymo irenginys
%Su gedimu, telefono
%file = 'valymo_variklis_su_gedimu.wav';
%Be gedimo, telefono
%file = 'valomoji_prie_vezimo_juosta_sveikas.wav';

%% 3 ir 4 tyrimas, sklendė
%Be gedimo, telefonas
%file = 'sklende_be_gedimo_21-03-06.wav';

%Su gedimu, telefonas, liečia apsauga
%file = 'sklende_Uzsidarineja_liecia_apsauga_3.wav';

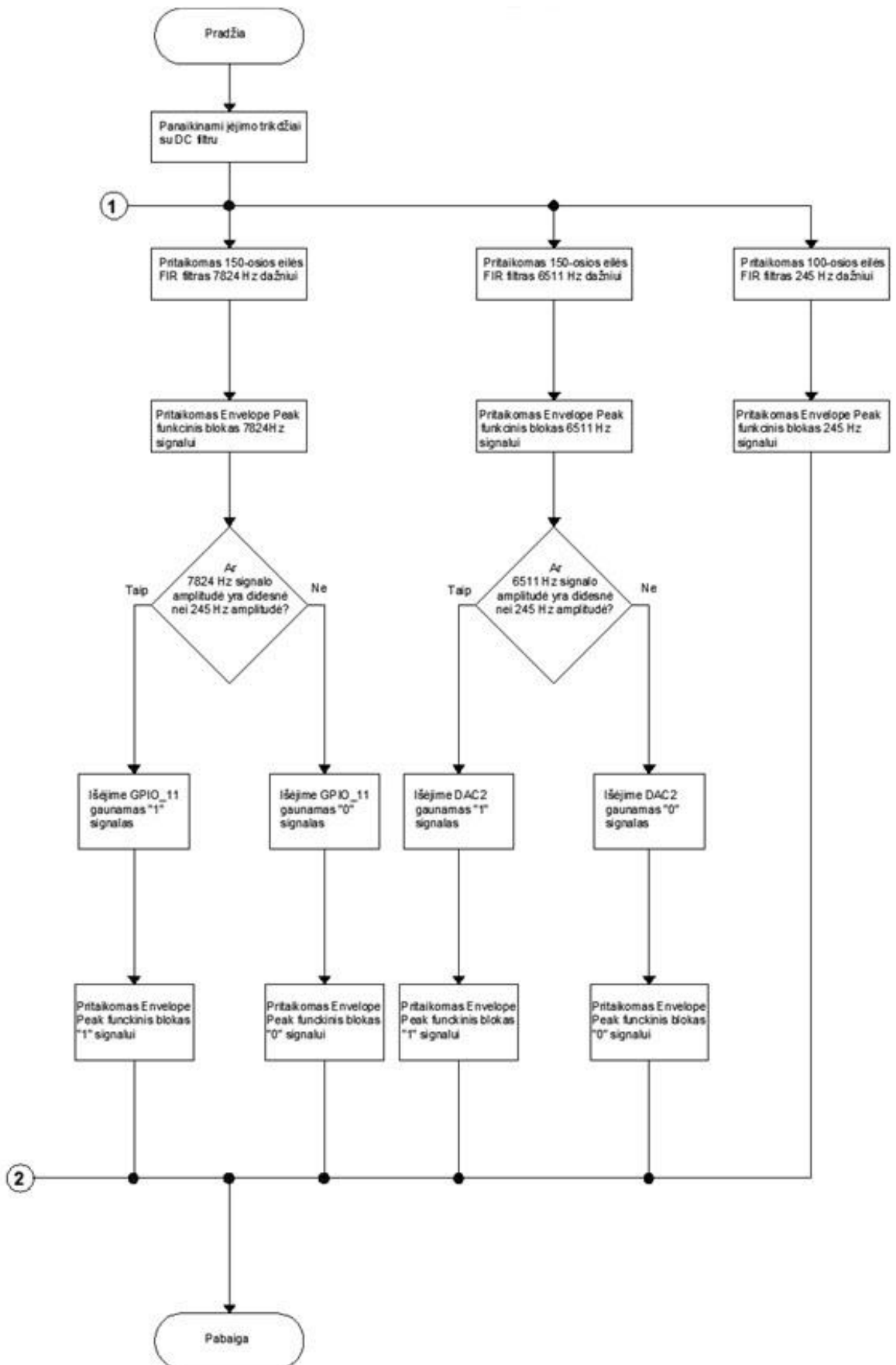
%Su gedimu, telefonas, nepasiekia galinės padėties
%file = 'sklende_su_gedimu_nepasiekia_padeties_21-03-06.wav';

%% Salia esancios irangos poveikio tyrimas
%Obejko irasai
%Tik transporteris
%file = '22_Jan, 15.23_konv. prie_norijos_k.wav';
%Transporteris ir salia esanti norija (~0.5m atstumu)
%file = '22_Jan, 14.27_konv. prie_norijos_n+k.wav';
%Transporteris, salia esanti norija (0.5m) ir valomosios snekas (3m atstumu)
%file = '22_Jan, 15.22konv. prie_norijos_k+n+val. snek.wav';
%Transporteris, salia esanti norija (0.5m) valomosios snekas (3m atstumu) ir
norija prie valomosios sneko (3.5m nuo transp.)
file = '22_Jan, 15.23_konv. prie_norijos_k+n+snek.+norija.wav';

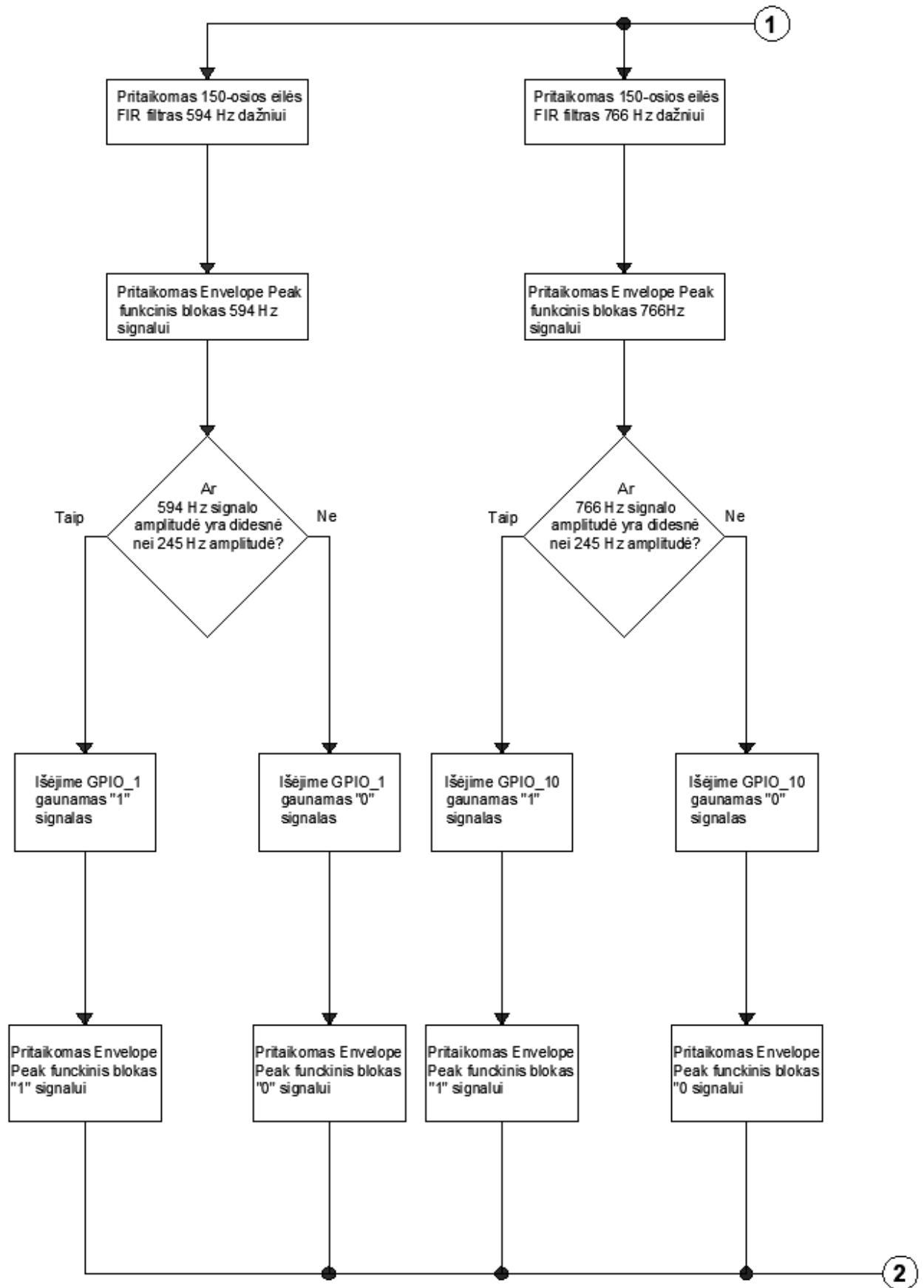
%Nuskaityto failo duomenys
[audio_in, audio_freq_sampl]=audioread(file);
%Nustatomas įrašo ilgis
Length_audio=length(audio_in);
%Apskaičiuojamas df
df=audio_freq_sampl/Length_audio;
%Apskaičiuojamas garso signalo dažnis
frequency_audio=-audio_freq_sampl/2:df:audio_freq_sampl/2-df;
%Greitoji Furjė transformacija
FFT_audio_in=fftshift(fft(audio_in))/length(fft(audio_in));
%Braižomas grafikas
figure
plot(frequency_audio,abs(FFT_audio_in));
xlim([0,7000])
ylim([0,5*10^-3])
title('Grandiklinis transporteris be gedimo kai šalia dirba 3 įrenginiai');
xlabel('Dažnis (Hz)');
ylabel('Amplitudė');

```

### 3 priedas. Technologinius gedimus identifikuojančios programos funkcinė diagrama



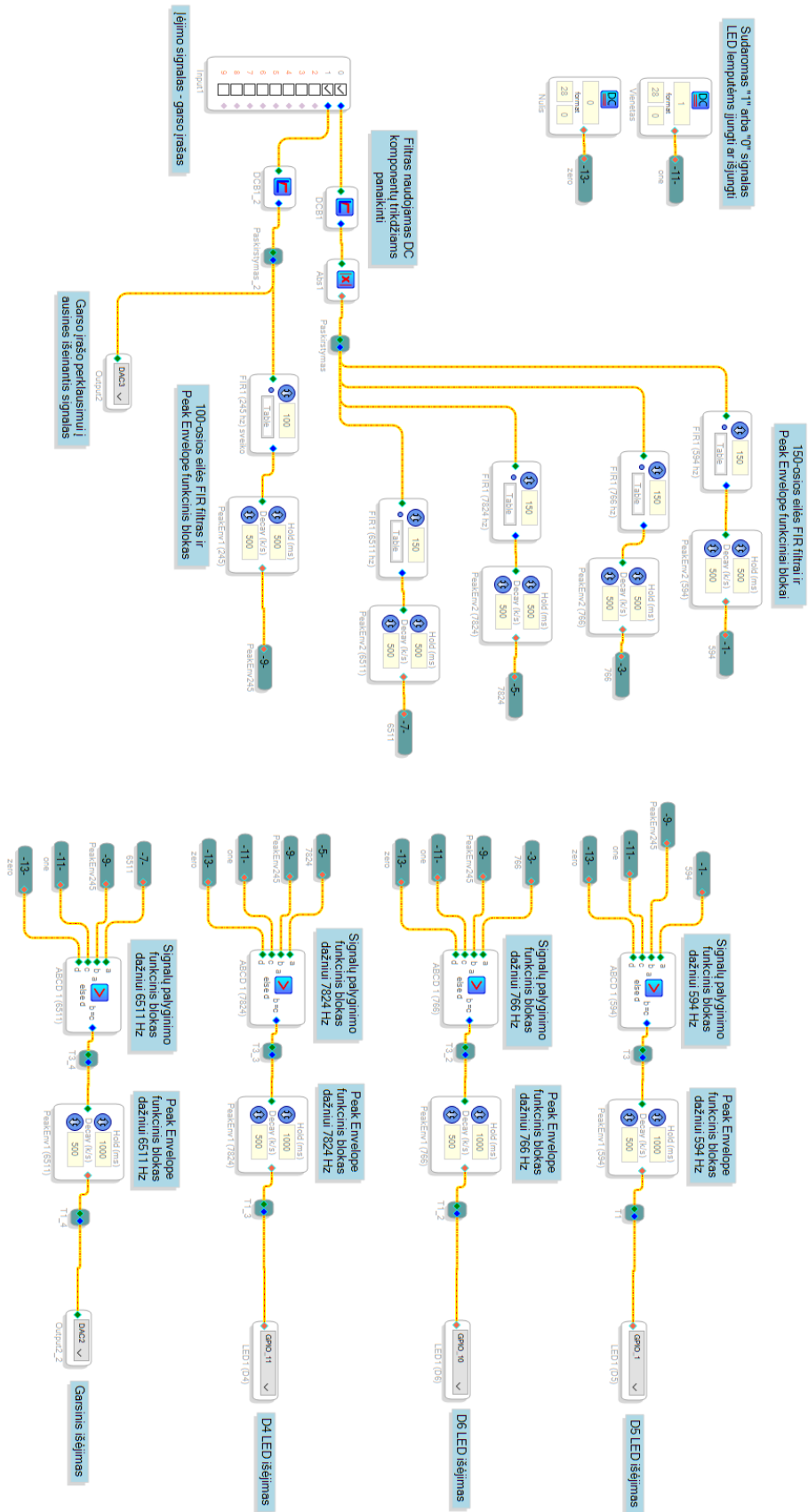
55 pav. Technologinius gedimus identifikuojančios programos funkcinės diagramos pirma dalis



56 pav. Technologinius gedimus identifikuojančios programos funkcinės diagramos antra dalis



#### 4 priedas. Technologinius gedimus aptinkanti programa



57 pav. Technologinius gedimus identifikuojanti programa *SigmaStudio* aplinkoje