



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Darius Kuprionis

**AUKŠTO DAŽNIO VIBRACIJŲ MATAVIMO SISTEMOS KŪRIMAS IR
TYRIMAS**

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HIGH-FREQUENCY
VIBRATION MEASUREMENT SYSTEMS**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangiosios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

VILNIUS 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Darius Kuprionis

**AUKŠTO DAŽNIO VIBRACIJŲ MATAVIMO SISTEMOS KŪRIMAS IR
TYRIMAS**

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HIGH-FREQUENCY
VIBRATION MEASUREMENT SYSTEMS**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangiosios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas _____ **prof. dr. Vaidotas Barzdėnas**
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

Konsultantas _____
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

VILNIUS 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Elektronikos inžinerija

TVIRTINU

Studijų programa: Elektronikos inžinerija, valstybinis kodas 6211EX050

Katedros vedėjas

Specializacija: Pažangiosios elektronikos projektavimas

Vaidotas Barzdėnas

2025-05-23

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. PEPfm-23–11090

Vilnius

Studentas (-ė): Darius Kuprionis

Baigiamojo darbo tema: Aukšto dažnio vibracijų matavimo sistemos kūrimas ir tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo tikslas: įvertinti ar deformacijos jutiklis gali būti tinkamas įrankis aukšto dažnio mechaninių vibracijų matavimui, palyginant jo veikimo charakteristikas su akcelerometru, siekiant nustatyti tokios sistemos matavimo tikslumą, dažninį atsaką ir praktinį pritaikomumą.

Baigiamojo darbo užduotis:

1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą apie vibracijų matavimo metodus, vibracijos jutiklius, jų kalibravimą, analogines grandines bei vibracijos duomenų praktinį pritaikymą.
2. Suprojektuoti ir sukurti aukšto dažnio vibracijų matavimo sistemą, pritaikytą deformacijos jutikliui ir akcelerometru.
3. Parengti duomenų kaupimo ir analizės programinę įrangą.
4. Atlikti eksperimentinius vibracijų matavimus vibracijų stende.

Aiškinamojo rašto turinys:

Įvadas

Darbo aktualumas ir tikslas

Darbo uždaviniai

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Darbo naujumas ir praktinė nauda

1. Literatūros analizė

2. Aukšto dažnio vibracijos sistemos projektavimas

3. Vibracijų matavimai su sukurtais prietaisais

Apibendrinimas

Išvados

Literatūra

Priedai

Vadovas profesorius Vaidotas Barzdėnas

<table border="1"> <tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr> <tr><td>Elektronikos fakultetas</td></tr> <tr><td>Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra</td></tr> </table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Elektronikos fakultetas	Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra	<table border="1"> <tr><td>ISBN</td><td>ISSN</td></tr> <tr><td>Egz. sk.</td><td></td></tr> <tr><td>Data-.....-.....</td><td></td></tr> </table>		ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas												
Elektronikos fakultetas												
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra												
ISBN	ISSN											
Egz. sk.												
Data-.....-.....												
Antrosios pakopos studijų Elektronikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas												
Pavadinimas	Aukšto dažnio vibracijų matavimo sistemos kūrimas ir tyrimas											
Autorius	Darius Kuprionis											
Vadovas	Vaidotas Barzdėnas											
		Kalba: lietuvių										
Anotacija Baigiamajame magistriniame darbe sukurta aukšto dažnio vibracijų matavimo sistema, skirta mechaninių virpesių analizavimui realiuoju laiku. Sistemoje naudojamas deformacijos (svorio) jutiklis, galintis matuoti tiek dinamines vibracijas, tiek statines apkrovas. Signalas apdorojamas žemo dažnio analoginiu filtru ir skaitmeninamas 24 bitų delta-sigma tipo ASK keitikliu. Duomenis apdoroja „STM32H523“ mikrovaldiklis su ARM Cortex-M33 branduoliu, o greitoji Furjė transformacija (FFT) atliekama naudojant CMSIS-DSP biblioteką. Apskaičiuoti dažnių duomenys realiuoju laiku perduodami į kompiuterį per UART sąsają, kur MATLAB aplinkoje vizualizuojami trijų jutiklių rezultatai. Darbo metu suprojektuotos trejos keturių sluoksnių spausdintinės plokštės, parengta mikrovaldiklio programa, atlikti eksperimentiniai bandymai. Baigiamąjį darbą sudaro 7 dalys: įvadas, vibracijų matavimo principų analizė, komponentų apžvalga, spausdintinių plokščių projektavimas, programinės įrangos kūrimas, eksperimentinis tyrimas, rezultatų analizė. Darbo apimtis – 68 psl., 53 iliustracijos, 3 lentelės, 21 literatūros šaltinių.												
Prasminiai žodžiai: akcelerometras, ASK keitiklis, deformacijos jutiklis, greitoji Furjė transformacija, mikrovaldiklis, signalų apdorojimas, vibracijų matavimas, žemų dažnių filtras.												

Vilnius Gediminas Technical University		ISBN	ISSN
Faculty of Electronics		Copies No.	
Department of Computer Science and Communications Technologies		Date-.....-.....	

Master Degree Studies Electronics Engineering study programme Master Graduation Thesis	
Title	Development and Research of High-Frequency Vibration Measurement Systems
Author	Darius Kuprionis
Academic supervisor	Vaidotas Barzdėnas

	Thesis language: Lithuanian
--	------------------------------------

Annotation This master's thesis presents the development of a high-frequency vibration measurement system designed for real-time analysis of mechanical oscillations. The system utilizes a strain (load) sensor capable of measuring both dynamic vibrations and static loads. The analog signal is processed using a low-pass filter and digitized by a 24-bit delta-sigma ADC. The data is processed by an STM32H523 microcontroller based on the ARM Cortex-M33 core, with Fast Fourier Transform (FFT) calculations performed using the CMSIS-DSP library. The calculated frequency-domain data is transmitted in real time to a computer via a UART interface, where results from three sensors are visualized in the MATLAB environment. During the project, three four-layer printed circuit boards (PCBs) were designed, firmware was developed for the microcontroller, and experimental testing was conducted. The thesis consists of seven sections: introduction, analysis of vibration measurement principles, component overview, PCB design, software development, experimental study, and results analysis. The thesis comprises 68 pages, includes 53 figures, 3 tables, and references 21 literature sources.

Keywords: accelerometer, ADC converter, Fast Fourier Transform, low-pass filter, microcontroller, signal processing, strain sensor, vibration measurement.
--

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Darius Kuprionis
(Studento vardas ir pavardė)

Elektronikos fakultetas
(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, PEPfm-23
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2025 m. gegužės 26 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Aukšto dažnio vibracijų matavimo sistemos kūrimas ir tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas profesorius daktaras Vaidotas Barzdėnas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

Darius Kuprionis
(Vardas ir pavardė)

Turinys

ĮVADAS. UŽDUOTIES ANALIZĖ	8
1. LITERATŪROS ANALIZĖ	10
1.1. Vibracijų jutiklių tipai ir veikimo principai.....	10
1.2. Kontaktinių vibracijų jutiklių tvirtinimo įtaka matavimo rezultatams	12
1.3. Vibracijos jutiklio kalibravimas ir paklaidos	13
1.4. Svorio jutiklių prijungimo būdai	15
1.5. ASK keitiklių tipų analizė	17
1.6. Greitoji Furjė transformacija, naudojant STM32 mikrovaldiklį	18
1.7. Vibracijos duomenų interpretavimas.....	19
1.8. Vibracijų matavimo sistemų apžvalga.....	22
1.9. Literatūrinės analizės išvados	25
2. AUKŠTO DAŽNIO VIBRACIJOS SISTEMOS PROJEKTAVIMAS	26
2.1. Svorio jutiklio pasirinkimas	26
2.2. ASK keitiklio pasirinkimas	27
2.3. Analoginio filtro projektavimas.....	28
2.4. Prietaiso elektrinė schema	35
2.5. Prietaisų spausdintinių plokščių projektavimas.....	40
2.6. Prietaisų programinės įrangos kūrimas	45
2.7. Aukšto dažnio vibracijos sistemos projektavimo išvados	50
3. VIBRACIJŲ MATAVIMAI SU SUKURTAIS PRIETAISAIŠ	51
Išvados	57
Literatūros sąrašas	59
PRIEDAI	61

IVADAS. UŽDUOTIES ANALIZĖ

Tyrimo aktualumas. Mechaninė vibracija – tai objekto periodinis padėties kitimas aplink jo pusiausvyros tašką. Vibracijų analizė yra inžinerinė priemonė, leidžianti įvertinti konstrukcijų, įrenginių ar mechanizmų būklę bei veikimo charakteristikas. Remiantis vibracijos duomenimis, galima nustatyti masės centro poslinkį nuo sukimosi ašies, identifikuoti rezonanso modas bei aptikti mechanizmų susidėvėjimo požymius. Tokie metodai plačiai taikomi ir buitinėje technikoje ir sudėtingose aviacijos ar kosmoso sistemose. Pagrindinis mechaninės energijos dedamųjų keitimas tarp sukimo momento ir greičio yra atliekamas naudojant skirtingų tipų dantračius. Šių energijų keitimo pagrindinis trūkumas yra energijos nuostoliai. Jie atsiranda dėl gamybos procese atsiradusių gaminimo tolerancijų, išbalansavimo, mechanizmų dėvėjimosi ir t. t. [1]. Veikiant mechanizmams, sukurtas vibracijų ultragarsas, esantis 20–40 kHz dažnių juostoje, gali pašalinti tepalą nuo kontaktuojančių mechanizmų sienelių ir padidinti trintį. To pasekmė, išskiriama papildoma šiluma, sumažėjęs efektyvumas ir svarbiausia – sukurtas papildomas triukšmas. Be to, kompleksiniai mechanizmai tam tikromis sąlygomis gali rezonuoti, sukeliant galimas katastrofiškos pasekmes. Vienas iš būdų sumažinti vibracijoms yra mechanizmų balansavimas, išgręžiant skylutes ar pridėdant masės tam tikrose vietose. Laikui bėgant minėtos pasekmės vis labiau intensyvėja ir trumpėja judančių mechanizmų efektyvi veikimo trukmė. Tokių pasekmių prevencija – laiku atlikti prietaisų priežiūros ar remonto darbus (pvz., laiku sutepti įrenginius, sumažinti atsiradusį laisvumą tarp mechanizmų suveržiant arba net pakeičiant susidėvėjusias detales naujomis).

Tyrimo objektas – deformacijos (svorio) jutiklio vibracijų charakteristikų nustatymas ir jų palyginimas su akcelerometru.

Tyrimo tikslas – įvertinti, ar deformacijos jutiklis gali būti tinkamas įrankis aukšto dažnio mechaninėms vibracijoms matuoti, palyginant jo veikimo charakteristikas su akcelerometru. Siekiama nustatyti tokios sistemos matavimo tikslumą, dažninį atsaką ir praktinį pritaikomumą.

Tyrimo uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą apie vibracijų matavimo metodus, vibracijos jutiklius, jų kalibravimą, analogines grandines bei vibracijos duomenų praktinį pritaikymą.
2. Suprojektuoti ir sukurti aukšto dažnio vibracijų matavimo sistemą, pritaikytą deformacijos jutikliui ir akcelerometrui.
3. Parengti duomenų kaupimo ir analizės programinę įrangą.
4. Atlikti eksperimentinius vibracijų matavimus vibracijų stende.

5. Palyginti deformacijos jutiklio ir akcelerometro gautus vibracijų matavimo rezultatus.

Tyrimo metodai: mokslinės literatūros analizė, esamų sistemų ir komponentų analizė, modeliavimo ir projektavimo metodai, eksperimentiniai matavimai, duomenų analizė ir rezultatų palyginimas.

Darbo mokslinis naujumas. Darbe nagrinėjamas nestandartinis vibracijos matavimo būdas – aukšto dažnio vibracijų stebėjimas naudojant deformacijos jutiklį, kuris įprastai nėra naudojamas atliekant tokius matavimus.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė. Darbo metu sukurta sistema gali būti panaudota pramoninėse diagnostikos sistemose, ypač ten, kur svarbu vienu metu stebėti ir statines, ir dinamines apkrovas (pvz., orlaivių sparnų bandymai, vibracijų diagnostika gamybos įrenginiuose). Naudojant deformacijos jutiklį kaip vibracijos matavimo priemonę galima sumažinti komponentų skaičių ir padidinti matavimo sistemos universalumą.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1. Vibracijų jutiklių tipai ir veikimo principai

Vibracijos jutiklis – tai keitiklis iš mechaninio reiškinio į elektrinį. Kiekviena sritis reikalauja skirtingų matavimo parametrų, todėl vibracijoms išmatuoti svarbu pasirinkti teisingo tipo vibracijos jutiklį. Vibracijų jutikliai yra skirstomi į kontaktinius ir bekontakčius [2].

Kontaktiniai jutikliai yra tiesiogiai montuojami prie tiriamo objekto. Pagrindinės jų sudedamosios dalys yra trys (žr. 1 pav.): korpusas montuojamas prie objekto, masė, turinti inerciją ir tarp jų sujungta lanksti medžiaga (spyruoklė). Kontaktinio tipo jutikliai: seismografas, pjezoelektrinis jutiklis, talpinis jutiklis, akcelerometras (MEMS), linijinis kintamojo skirtumo transformatorius (LVDT). Jutiklio rezonansinį dažnis atsiranda tada, kai tarp masės ir korpuso atsiranda amplitudžių poslinkis per 180 laipsnių [3]. Apskaičiuoti rezonansą galima su 1 formule, įvertinant maksimalų dažnį, iki kurio jutiklis gali teisingai matuoti. Naudojant 2 formulę galima nustatyti, kokia jėga yra veikiamas korpusas tam tikru laiko momentu, ir apskaičiuoti pagreitį. Verta paminėti, kad ne visada įmanoma apskaičiuoti jutiklio rezonansinį dažnį, todėl formulės tampa kaip orientacinės modeliuojant jutiklį. Siūloma Siūloma pasitelkti simuliacijų programas (pvz., „Ansys“ ar „Solidworks Simulation“).

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1)$$

čia:

k – spyruoklės tamprumo koeficientas (N/m);

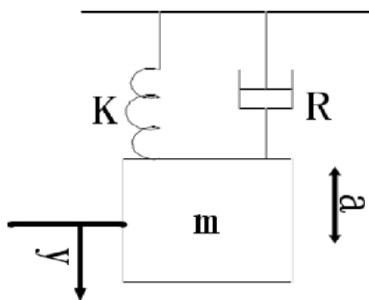
m – kūno masė (kg).

$$F(t) = ma(t) = m \frac{d^2y}{dt^2} + R \frac{dy}{dt} + ky, \quad (2)$$

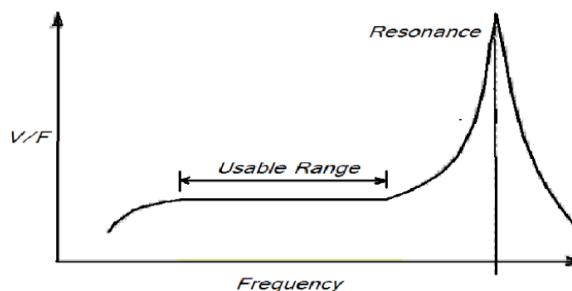
čia:

R – slopinimo jėga (N/m);

y – poslinkis (m).

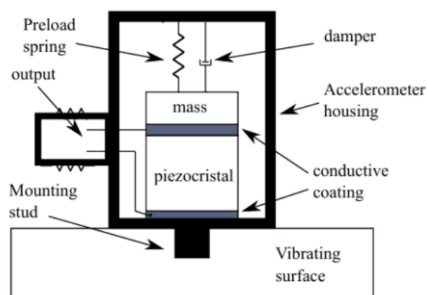


1 pav. Mechaninis jutiklio modelis [3]



2 pav. Pjezoelektrinio jutiklio jautrumas nuo dažnio [4]

Anksčiau minėti jutikliai veikia matuodami sukurtą jėgą tarp masės ir korpuso. Pavyzdžiui, seismografas – naudoja deformacijos jutiklį matuoti jėgą, kuris primontuotas tarp korpuso ir spyruoklės. Svorio jutiklis taip pat naudoja keturis deformacijos varžinius jutiklius, sujungtus „Wheatstone“ tilto konfigūracija, konstrukcijos deformacijai išmatuoti. Įdėjus cilindrinį svorio jutiklį (žr. 4 pav.) tarp dviejų konstrukcijų, galima išmatuoti ne tik pagreitį, bet ir statinę jėgą. Tokie jutikliai naudojami matuojant aerodinaminių jėgų poveikį tiriamam objektui, pavyzdžiui, sparnų keliamosios jėgos testavimui arba fiuzeliažo apkrovoms vertinti keičiant oro srauto kryptį. Toks privalumas leidžia surinkti daugiau informacijos tyrimo metu ir detalesnei analizei. MEMS akcelerometrai matuoja pagreitį fiksuodami talpos pokytį tarp mikromechaninių plokštelių. Viena iš plokštelių tvirtinama prie elastingos konstrukcijos, kuri veikia kaip spyruoklė – būtent jos mechaninis nuokrypis nuo pusiausvyros padėties sukelia talpos pasikeitimą, proporcingą veikiamai inercinei jėgai. Pjezoelektrinis jutiklis susidaro iš pjezoelektrinės medžiagos (pvz., kvarco, galio fosfato ar turmalino), pritvirtintos prie svarelio ir integruotos spyruoklė, slopinančios natūralų rezonansinį dažnį (žr. 3 pav.). Pastoviai deformuota pjezoelektrinė medžiaga sukuria potencialą, tačiau esant žemam dažniui, jutiklis veikia netiesinio režimo sąlygomis, o dideliame dažniui – pradeda rezonuoti [4] (2 pav.). Verta paminėti, kad pjezoelektrinis jutiklis veikia, kai yra bent minimali vibracija (santykinis matavimas), o akcelerometras gali matuoti ir esant rimties sąlygomis (absoliutus matavimas). LVDT jutiklis susideda iš trijų ričių: vienos pirminės ir dviejų antrinių, kurios sujungtos priešingai. Pirminė ritė, esanti centre, sužadinama kintamosios srovės šaltinio. Ši kintama sužadinimo srovė sukuria magnetinį lauką, kuris skverbiasi į antrines rites. Tarp šių ričių įdėta šerdis yra pagaminta iš magnetiškai laidžios medžiagos. Ją judinant, keičiasi magnetinis laukas tarp pirminio ritinėlio ir antrinių ritinėlių. Talpiniai jutikliai matuoja talpos pokyčius tarp jutiklio ir objekto. Veikiamas panašus į akcelerometro. Mechaninės konstrukcijos gali būti įvairios, tačiau mechaninės dalies veikimo principas išlieka toks pat.



3 pav. Pjezoelektrinis jutiklio sandarac [16]



4 pav. Cilindrinis svorio jutiklis

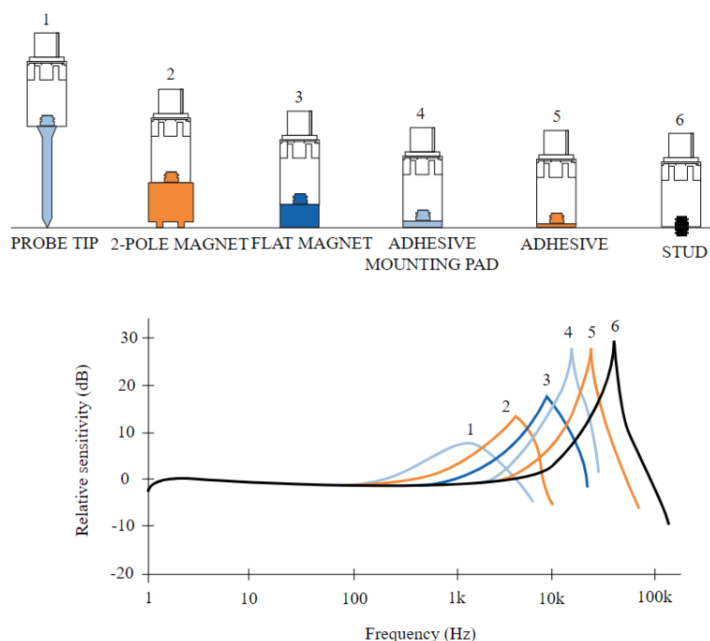
Bekontakčiai jutikliai matuoja vibracijas nekontaktuodami su tiriamu objektu. Šie jutikliai yra naudingi tais atvejais, kai tiesioginis kontaktas su objektu yra neįmanomas, pavojingas ar gali iškreipti matavimo rezultatus. Pavyzdžiui lazeriniai jutikliai naudoja lazerio spindulį, kad aptiktų vibracijas ant objekto paviršiaus. Spindulys atsispindi nuo paviršiaus ir yra analizuojamas interferometrijos principu. Tai leidžia išgauti labai didelį tikslumą ir pasižymi dideliu matavimo spartumu. Paviršinių srovių (angl. *Eddy current*) jutikliuose, veikimas apsiriboja tik metaliniais objektais arba objektais su metaliniu paviršiumi. Jutiklis susideda iš ritės, kuri prijungta prie kintamosios srovės šaltinio. Ši ritė sukuria elektromagnetinį lauką, kuris indukuoja srovės metaliniame objekte. Šios srovės trukdo elektromagnetiniam laukui, dėl ko patiriamas išmatuojamas energijos nuostolis. Galimi atstumo matavimai yra tarp 0,5 ir 80 mm, o raiška svyruoja tarp nanometrų ir mikrometrų. Dažnių juosta svyruoja nuo 1 Hz iki 100 kHz.

1.2. Kontaktinių vibracijų jutiklių tvirtinimo įtaka matavimo rezultatams

Mechaninės vibracijos gali atsirasti visomis trejomis ašimis, todėl prieš pradedant matuoti svarbu įsiverti, kurioje objekto vietoje reikėtų montuoti vienos ašies jutiklį. Akcelerometro tvirtinimo būdas prie matavimo taško yra vienas svarbiausių veiksnių, užtikrinančių tikslų rezultatų gavimą praktiniuose matavimuose. Netinkamas tvirtinimas sumažina natūralų rezonanso dažnį ir dėl to gali būti stipriai apribotas naudingas akcelerometro dažnių plotis (žr. 5 pav.). Varžto tvirtinimo metodas – kai ant objekto yra išgręžiama skylė, prisukamas strypas, užsukamas vibracijos jutiklis ir priveržiamas pagal gamintojo nurodytą sukimo momentą. Toks būdas yra invazinis ir gali būti nepriimtinas, kai objektas negali būti mechaniškai deformuotas. Klijavimo metodas gali būti atliekamas naudojant ploną dvipusę lipnią juostą, kuris sugeria aukšto dažnio vibracijas ir rezonansinis dažnis yra mažesnis nei varžto tvirtinimo metodas. Taip pat dvipusė lipni juosta turi ribotą efektyvų temperatūros diapazoną. Magneto metodas – labai paplitęs tvirtinimo būdas mašinų diagnostikoje, kai jutiklis su magnetine dalimi priglunda prie metalo. Tokio metodo rezonansinis dažnis yra dar mažesnis

dvipusės lipnios juostos montavimo metodą. Taip pat tiriamo objekto paviršius turi būti feromagnetinis (ne aliuminis ar plastikas). Be to, paviršiai turi būti plokšti ir lygūs, didinant kontakto paviršiaus plotą.

Svorio jutiklių kokybiškas tvirtinimas taip pat svarbus kaip ir akcelerometrų. Jų įprastas tvirtinimo metodas yra varžtinis, nes svorio jutikliai dažniausiai būna pailgi ir apkrauti didele jėga.



5 pav. DACH priklausomai nuo jutiklio tvirtinimo metodo [5]

1.3. Vibracijos jutiklio kalibravimas ir paklaidos

Kalibravimas yra esminis žingsnis, siekiant užtikrinti vibracijos jutiklių tikslumą ir patikimumą. Jutikliai kalibruojami, kad būtų galima nustatyti jų atsako charakteristikas remiantis ISO 16063 standartais, siekiant atlikti tikslius matavimus. Šis standartas susidaro iš 8 dalių (metodikų). Pavyzdžiui ISO 16063-11 – jutiklio kalibravimą lyginant su lazerio interferometrija nuo 1 Hz iki 10 kHz, o ISO 16063-21 – jutiklio kalibravimo būdą lyginant su atskaitiniu jutikliu nuo 0,4 Hz iki 10 kHz. Verta paminėti, kad jeigu jutiklis buvo numestas ar neteisingai atplėšiamas nuo objekto, įprastai reikalingas naujas jautrumo kalibravimas per visą dažnių diapazoną.

„Agate AT2040“ nešiojamas vibracijų jutiklių kalibravimo stendas (žr. 6 pav.) naudoja kvarcinį akcelerometrą kaip atskaitą, kuris yra sukalibruotas su anksčiau minėtu lazeriniu metodu. Stendo maksimalus generuojamas vibracijos dažnis yra 10 kHz ir maksimalia akceleracija 196 m/s^2 . Stendas turi du veikimo būdus, pirmasis – vibravimas ant nustatyto dažnio ir amplitudės, antrasis – prijungto vibracijos jutiklio jautrumo matavimas lyginant su

integruotu atskaitiniu jutikliu. Antrasis veikimo būdas, leidžia sugeneruoti kalibravimo sertifikatą nurodantį jutiklio matuotus dažnius, jutiklio jautrumą, paklaidą ir fazės poslinkį.



6 pav. Vibracijos jutiklio kalibravimo stendas [17]

Skersinis jautrumas (angl. *transverse sensitivity*) yra reiškinys, kai jutiklis ar įrenginys reaguoja į vibracijas, kurios yra statmenos pagrindinei jautrumo ašiai ar kryptčiai (žr. formulę 3). Pavyzdžiui, vibracijos jutiklis, kuris yra skirtas matuoti vertikalias vibracijas, taip pat gali reaguoti į horizontalias vibracijas ir iškraipyti matavimo duomenis. Toks reiškinys priklauso nuo jutiklio vidinės konstrukcijos ir mechaninių struktūrų tolerancijų.

$$\text{Skersinis jautrumas (\%)} = \frac{\text{skersinis jautrumas} \left(\frac{\text{mV}}{\text{g}} \right)}{\text{ašinis jautrumas} \left(\frac{\text{mV}}{\text{g}} \right)} * 100 \quad (3)$$

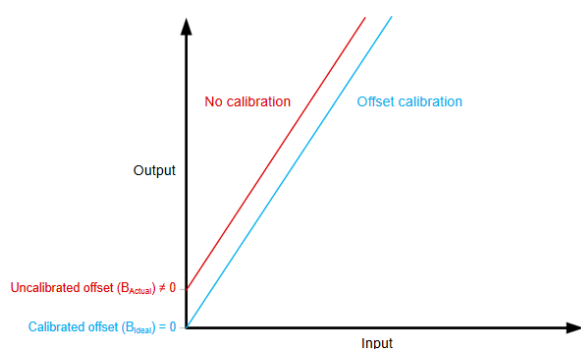
Svorio jutikliai turi įvairių paklaidų (žr. 1 lentelę). Pagrindinės paklaidos, kurias galima kompensuoti programinėje įrangoje. Svorio jutiklio jautrumas turi net 15 % paklaidą, kuri atsiranda iš korpuso gaminimo ir metalo elastingumo netikslumų. Kompensavimo metodas yra pamatuoti išėjimo įtampą, esant maksimaliai apkrovai ir padalinti iš jutiklio žadinimo įtampos (žr. 9 pav.). Nulio poslinkis gali turėti iki 10 % matavimo paklaidos, kuri atsiranda iš užklijuotų varžinių plėvelių įveržimų gaminimo metu. Ją kompensuoti galima pašalinus išorinę apkrovą ir esamą išėjimo įtampą naudoti kaip poslinkį, kurį reikia atimti iš tolimesnių matavimų (žr. 8 pav.). Jutiklio nulio poslinkis turi paklaidą 2 %/°C, kuri atsiranda dėl tiltelių esančių deformacijos varžų skirtumų dėl nevienodos temperatūros. Kompensuoti šią paklaidą galima priklijavus išorinį temperatūros jutiklį ir apskaičiuoti tikrąją išėjimo įtampą naudojant 4 ir 5 formules [6].

$$K_{\text{temp. kompensavimo}} = \frac{U_{\text{auštos temp.}} - U_{\text{žemos temp.}}}{T_{\text{auštos temp.}} - T_{\text{žemos temp.}}} \quad (4)$$

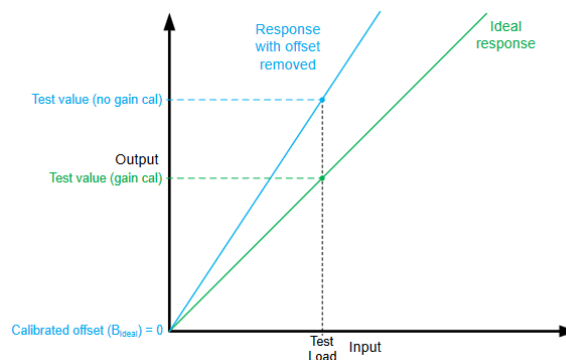
$$F_{kompesuota} = (U_{dabartinis} - U_{nulio poslinkis}) - (T_{dabartinis} - T_{nulio poslinkio}) * K_{temp}. \quad (5)$$

1 lentelė. 2 kg svorio jutiklio paklaidų lentelė [7]

Specification Description	Specification Value	Specification Value for a Load Cell With a 2-kg Capacity
Bridge Sensitivity	2.0 ±15% mV/V	
Safe Overload	150 %FS	3 kg
Maximum Overload	200 %FS	4 kg
Non-linearity	±0.05 %FS	±1 g
Non-repeatability		
Hysteresis		
Creep (5 min.)		
Temperature Effect on Output	±0.05 %FS/°C	±1 g/°C
Temperature Effect on Zero	±2.0 %FS/°C	±40 g/°C
Zero Balance	±10 %FS	±0.2 kg
Bridge Resistance	1000 ± 10 Ω	
Excitation Voltage	≤ 15 V	
Operating Temperature Range	-10°C to +40°C	



8 pav. Sistemos nulio poslinkio nustatymas [7]



9 pav. Sistemos jautrumo nustatymas [7]

1.4. Svorio jutiklių prijungimo būdai

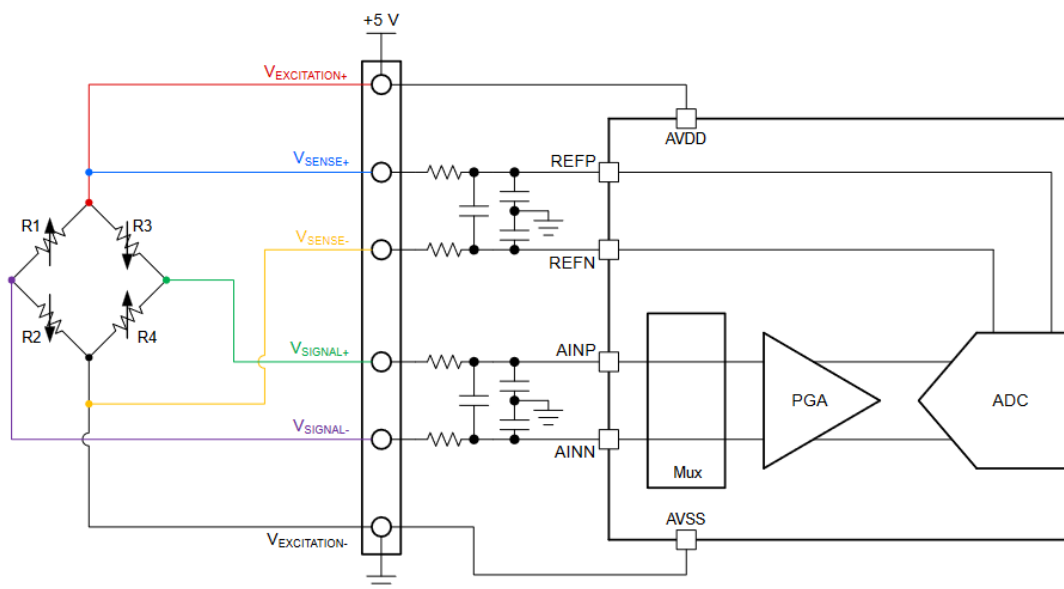
Straipsnyje „A Basic Guide to Bridge Measurements“ [7] pateikiamas detalus aprašymas, kaip gauti didžiausią tikslumą iš svorio jutiklių, esančių „Wheatstone“ tilto konfigūracijoje. Atkreipiamas dėmesys, kaip tinkamai, priklausomai nuo pritaikymo, svorio jutiklį prijungti prie analoginio-skaitmeninio keitiklio.

Keturių laidų jungimo būdas yra vienas iš paprasčiausių jungimo būdų. Šioje konfigūracijoje yra dvi laidų poros: viena pora skirta tilto sužadimui (prijungiama prie maitinimo) ir kita pora jutiklio diferencinio išėjimo signalo matavimui. Šis metodas yra

paprastas ir lengvai įgyvendinamas, tačiau jis gali būti jautrus laidų varžos pokyčiams, ypač jei laidai yra ilgi. Apskaičiuoja, kad esant $350\ \Omega$ jutiklio varžai, 5V maitinimui ir $1\ \Omega$ laido varžai, paklaida gali susidaryti net 0,6 %.

Šešių laidų tilto topologija (žr. 10 pav.) pašalina keturių laidų varžos kitimo paklaidas. Šioje konfigūracijoje yra dvi papildomos laidų poros, kurios skirtos matuoti tilto sužadinimo įtampą. Ši konfigūracija naudojama kaip „4-wire Kelvin“ matavimo metodas, kad būtų pašalintas laidų varžos poveikis bei sumažinta triukšmų įtaka, užtikrinant, kad ASK keitiklio atskaitos įtampa būtų tokia pati kaip ir tilto sužadinimo įtampa. Verta paminėti, kad toks prijungimas yra vadinamas radiometrinis. Šešių laidų tiltas suteikia tikslesnius matavimus, ypač kai laidai yra ilgi, tačiau tai padidina jungčių ir laidų skaičių, todėl sudėtingiau tokią sistemą montuoti.

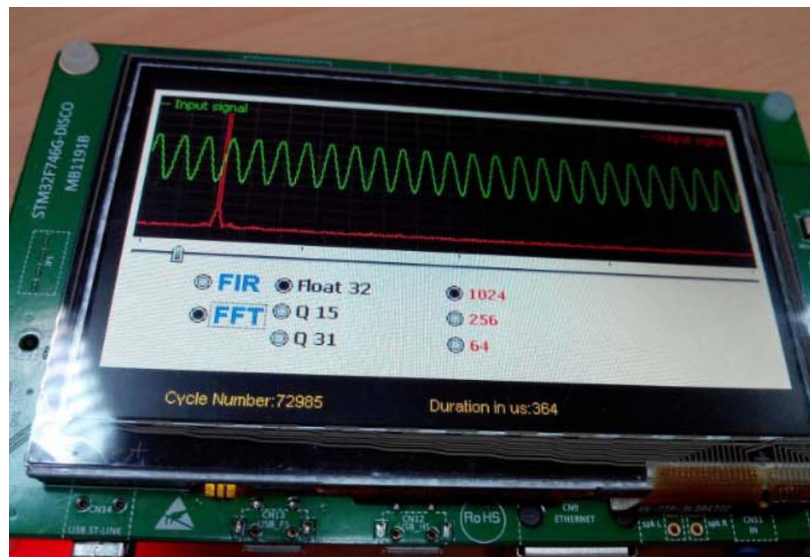
Kintamos srovės sužadinimas naudojamas, siekiant sumažinti sistemos nulinio poslinkį, atsiradusį dėl laidų ir jutiklio medžiagų temperatūros pokyčių. Vietoj nuolatinės sužadinimo įtampos naudojama kintama įtampa, kuri periodiškai keičia poliarizaciją. Minus tokios sistemos, kad kintamos srovės sužadinimas reikalauja sudėtingesnių ir brangesnių elektronikos komponentų, tačiau toks sprendimas gali ženkliai pagerinti matavimų tikslumą ilgalaikiuose ir dinamiškuose matavimuose. Verta paminėti, kad naudojant kintamos srovės sužadinimą, matavimų rezultatų atsilikimo laikas padvigubėja.



10 pav. Svorio jutiklio 6 laidų prijungimo metodas [7]

1.6. Greitoji Furjė transformacija, naudojant STM32 mikrovaldiklį

Greitoji Furjė transformacija (FFT) yra skirta konvertuoti signalą iš laiko srities į dažnio sritį. Toks metodas naudojamas stebint vibracijas, dėl paprastumo analizuoti signalo dedamąsias nei stebint laiko srities signalą. Straipsnyje [9] rašoma apie integruotas skaitmeninių signalo apdorojo funkcijas ARM branduolyje. STM32F4 serijos mikrovaldiklis yra pagrįstas ARM Cortex-M4 branduoliu, veikiančiu 180 MHz dažniu. ARM Cortex-M4 branduolys turi 32 bitų slankiojo kablelio procesorių (FPU), spartinantis aritmetinius skaičiavimus su slankiojančio kablelio skaičiais. Straipsnio praktinėje demonstracijoje du šeimos mikrovaldikliai yra sukonfigūruoti generuoti sinusoidę per DAC, atlikti matavimą per ASK keitiklį ir atlikti signalo FFT apdorojimą. Rezultatai rodomi LCD ekrane, leidžiantys realiu laiku stebėti įėjimo signalo formą ir FFT spektrą. Išmatuota, kad naudojant 1024 skilčių FFT su slankiojančio kablelio duomenimis, mikrovaldiklis atlieka skaičiavimus per maždaug 98624 ciklus (547 μ s). Tuo tarpu, STM32F7 serija, naudojanti ARM Cortex-M7 branduolį, veikiančią aukštesniu 216 MHz dažniu, tokį patį skaičiavimą atlieka per 73292 ciklus (339 μ s) (žr. 13 pav.). Tokį ženklų skirtumą skaičiavimų spartume galima paaiškinti lyginant skirtingų ARM branduolių našumą. ARM Cortex-M4 našumo rodiklis yra apie 1,25 DMIPS/MHz, kai ARM Cortex-M7 2,14 DMIPS/MHz.



13 pav. STM32F7 FFT 1024 skilčių demonstracija, naudojant slankiojo kablelio duomenis [9]

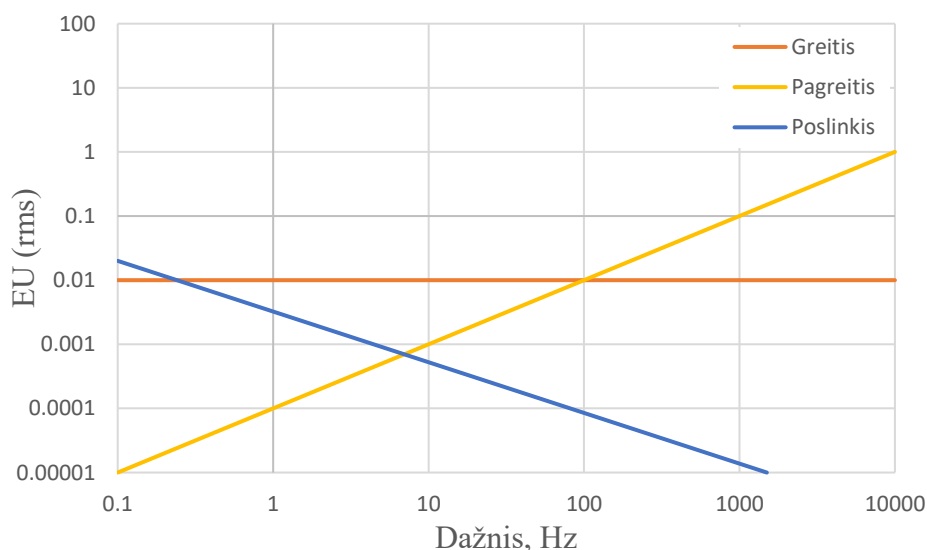
1.7. Vibracijos duomenų interpretavimas

Straipsnis [10] pateikia išsamią analizę apie tai, kaip teisingai interpretuoti duomenis, gautus iš vibracijos jutiklių ir atkreipia dėmesį į tris pagrindinius vibracijų stebėjimo parametrus: poslinkį, greitį ir pagreitį (žr. 14 pav.). Kiekvienas iš šių parametrų turi savo pritaikymo sritis ir ypatumus.

Poslinkis – tai parametras, tinkamas stebėti vibracijas žemuose dažniuose iki maždaug 100 Hz. Poslinkio matavimas yra svarbus struktūrinių vibracijų analizei, kurios dažnai pasireiškia žemesniuose dažniuose. Poslinkio parametro naudojimas tampa mažiau efektyvus aukštesniuose dažniuose, nes jo amplitudė sparčiai mažėja. Toks parametras yra naudingas pastatų ar kitų didelių struktūrų vibracijų analizei.

Greitis – skirtingai nei poslinkis, greičio amplitudė išlieka nuosekli per visą dažnių spektrą, todėl šis parametras yra itin naudingas bendrai mechanizmų būklei įvertinti. Greičio parametras yra informatyvūs balansavimo, laisvumo bei mechanizmų sulygiavimo problemų identifikavimui. Greičio amplitudė yra stabilus rodiklis per platų dažnių diapazoną.

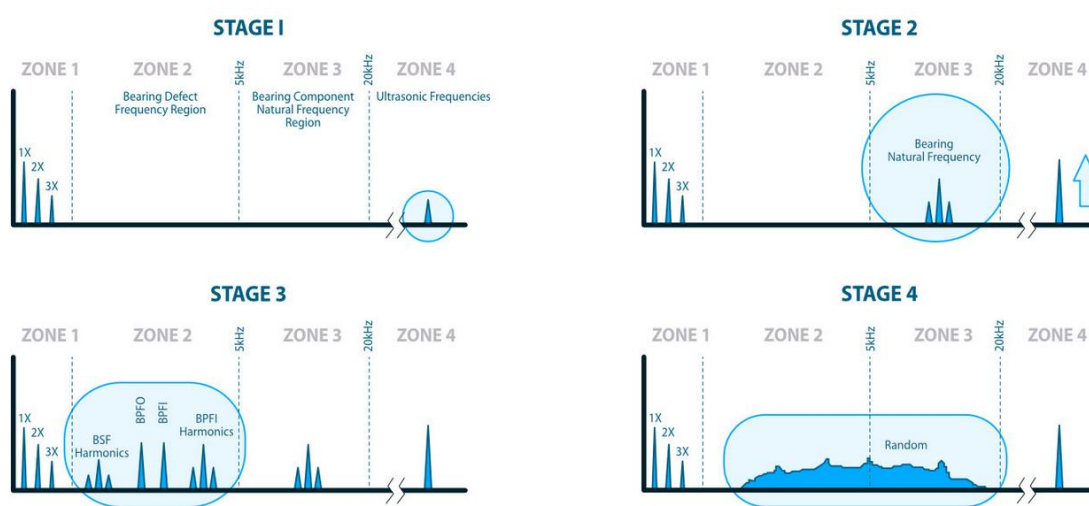
Pagreitis – svarbus analizuojant aukšto dažnio vibracijas, nes jo amplitudė didėja kartu su dažniu. Pagreitis yra labai jautrus bet kokiems judėjimo pokyčiams ir yra tinkamas stebėti judančių elementų, pavyzdžiui, guolių ar dantračių būsenas. Šis parametras yra naudojamas pramonėje, turbinų, siurblių ir kitų greitai besisukančių įrenginių priežiūroje.



14 pav. Vibracijos parametrų priklausomybė nuo dažnio [10]

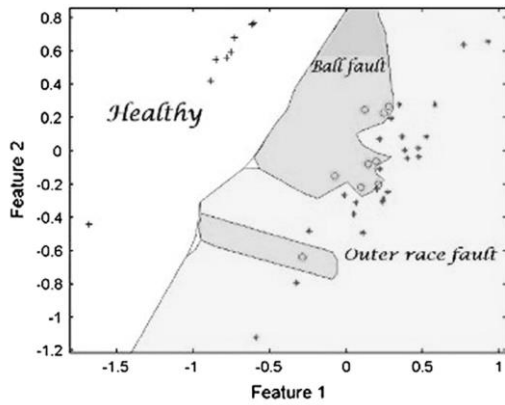
Straipsnyje taip pat pabrėžiama, kad norint greičiausiai ir tiksliausiai įvertinti vibracijas, naudojamas DC RMS metodas. Šis metodas leidžia išreikšti vibracijos duomenis kaip visų amplitudžių energijų sumą. Tai naudinga, kai reikia apibendrinti ir suprasti sudėtingus vibracijų duomenis, suteikiant aiškesnę bendrą įrenginio ar mašinos būklę.

Straipsnis [11], nagrinėjantis vibracijų matavimą guoliuose, dantračiuose ir mechaninėse ašyse, aprašo aspektus susijusius su mechaninių elementų dėvėjimusi. Straipsnyje pabrėžiama, kad pradiniai dėvėjimosi požymiai guoliuose ir mechaninėse ašyse dažnai matomi ultragarsiniuose dažniuose, 20–40 kHz diapazone (žr. 15 pav.). Toliau, kai guolis toliau nusidėvi, vibracijų dažnis mažėja ir galiausiai tampa atsitiktiniu triukšmu aukštuose dažniuose. Kai guolis būna beveik pilnai susidėvėjęs, pastebimas staigus spektro energijos padidėjimas. Turint tinkamą vibracijų matavimo įrangą, galima nustatyti pradinius nusidėvėjimo požymius ir nustatyti kada tikslinga daryti įrangos inspekciją ar remontą.

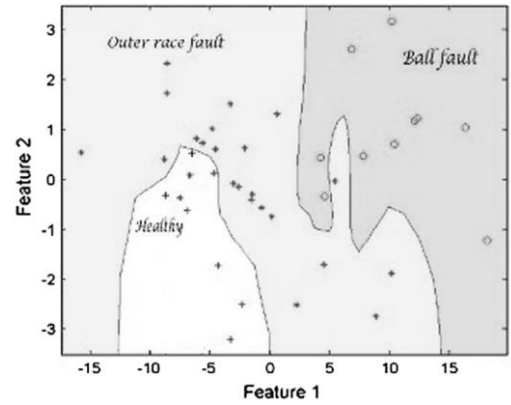


15 pav. Guolio nusidėvėjimo priklausomybė nuo energijos spektro [11]

Straipsnyje [12] rašoma apie guolių gedimus ir jų nustatymą, naudojantis akcelerometrais, svorio jutikliais ir dirbtiniu neuronų tinklu (DNT). Guolių būklės klasifikavimui naudojamas K-Nearest Neighbor (KNN) klasifikatorius, o Principal Components Analysis (PCA) metodas taikomas siekiant sumažinti duomenų perteklių. Šie duomenys padeda aprašyti tris guolių būsenas: sveikas guolis, šarato pažeidimas ir guolio paviršaus pažeidimas. Per apmokymo procesą pastebėta, kad svorio jutiklis yra tinkamas nustatyti bendrą guolio būklę (žr. 16 pav.), o akcelerometras tinkamas nustatyti tikslią defekto vietą (žr. 17 pav.). Šių rezultatų apjungimas suteikia išsamesnę informaciją apie guolio būklę. Ši metodika apima „waterfall“ sujungimo modelio taikymą, o siūlomas metodas buvo išbandytas identifikuojant trijų tipų guolių gedimus. Gauti rezultatai buvo palyginti su tradiciniais metodais, kai naudojami pavieniai jutikliai ir parodė aukštą efektyvumą guolių gedimų nustatyme.

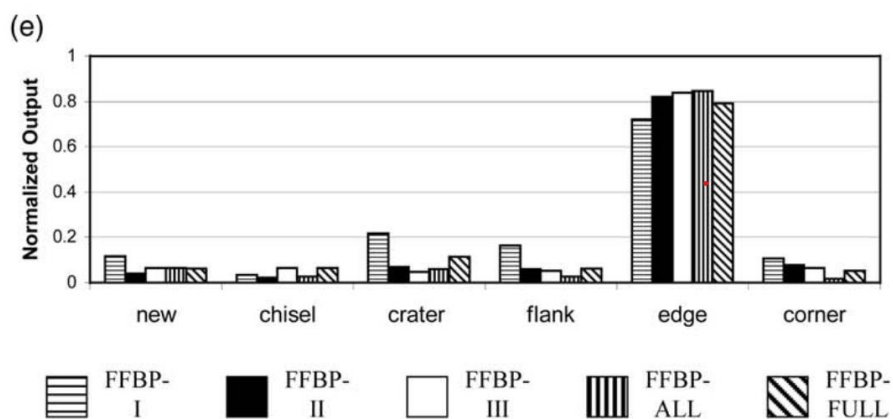


16 pav. Pagal svorio jutiklio duomenis [12]



17 pav. Pagal akcelerometro duomenis [12]

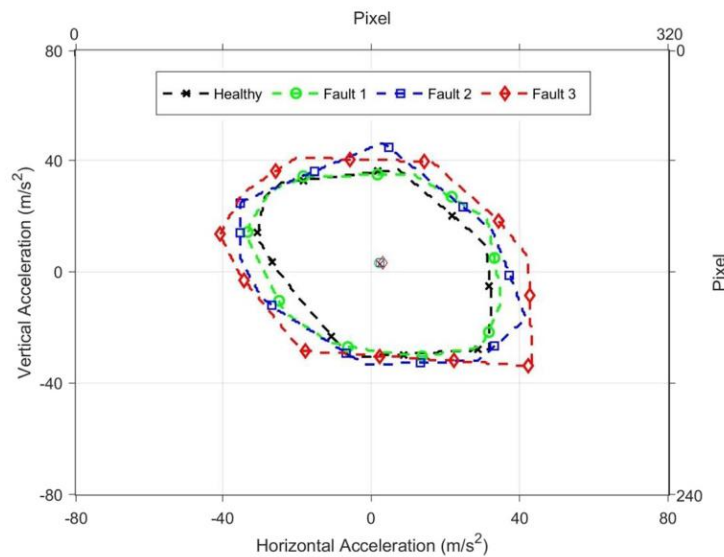
Straipsnyje [13] aprašomas grąžtų dėvėjimosi nustatymas. Tradiciniai įrankių būklės nustatymo metodai dažnai būna nepakankamai tikslūs ar patikimi, todėl šiame straipsnyje pristatomas efektyvesnis būdas, naudojant dirbtinius neuronų tinklus ir vibracijos signalus. Tyrimui buvo panaudotas vienas akcelerometras, pritvirtintas prie detales laikiklio, matuoti vibracijas. Šie duomenys apdorojami, naudojantis FFT ir „wavelet“ algoritmais, siekiant nustatyti didžiausius vibracijų dažnius. Gauti duomenys vėliau naudojami trijų sluoksnių Feed Forward Back Propagation (FFBP) dirbtinio neuronų tinklo mokymui, kuris sukonfigūruotas nustatyti šešis grąžtų nusidėvėjimo tipus (žr. 18 pav.). Daugiasluoksnis neuroninis tinklas buvo sėkmingai pritaikytas grąžto dėvėjimosi nustatymui ir klasifikavimui, naudojant supervizuotą mokymąsi su eksperimentiškai gautais vibracijos duomenimis. Testavimo metu pasiekta daugiau nei 80 % sėkmės lygis klasifikuojant grąžto nusidėvėjimą.



18 pav. DNT „edge breakage“ nustatymas [13]

Straipsnyje [14] nagrinėjama pavarų dėžių gedimų nustatymo ir klasifikavimo problema, su tikslu sukurti efektyvesnę pavarų dėžių būklės stebėjimo sistemą. Sistemoje

pagrindinis dėmesys skiriamas vibracijos duomenų analizei. Inovatyviu metodu siekiama nustatyti pavarų dėžių gedimus, naudojant klasifikavimo DNT kartu su vaizdo apdorojimu. Duomenų rinkimui naudojami akcelerometrai, kurių fiksuojami duomenys X ir Y ašyse ir konvertuojami į vaizdą (žr. 19 pav.). Šie vaizdai apdorojami naudojant vaizdo apdirbimo algoritmus, kad būtų nustatyti svarbūs duomenų požymiai. Šis metodas pasižymi ypač aukštu, 98 % tikslumu nustatant pavarų dėžių gedimus. Be to, vibracijos analizė suteikia vertingų įžvalgų mechaninės įrangos būklės nustatymui.



19 pav. Palyginimas tarp apskritiminių ribų [14]

1.8. Vibracijų matavimo sistemų apžvalga

Siekiant sukurti teisingą prietaisą, reikalinga rinkos analizė ir įvertinimas, kuriose srityse kyla bėdos, o prietaisų toje srityje nėra sukurta arba jų pritaikymas yra per sudėtingas. Kaip anksčiau minėta, vibracijas sukelia įvairūs mechanizmai, tačiau jiems išmatuoti reikalinga kokybiška ir tiksli įranga. Vertinant guolių būklę, vibracijų dažnis turėtų siekti bent iki 10 kHz, o tai reiškia, kad diskretizavimo dažnis turi būti daugiau nei 20 kHz. Be to, būtina atkreipti dėmesį į prietaisų jautrumą, signalo triukšmo santykį ir galimybę apdoroti gautus duomenis realiuoju laiku. Tokie parametrai leidžia iš anksto tiksliau nustatyti mechanizmų gedimus. Analizuojant rinką, svarbu identifikuoti, ar egzistuoja integruoti sprendimai, kurie galėtų patenkinti konkrečius pramonės poreikius, taip pat įvertinti siūlomų prietaisų technines charakteristikas ir kainos-kokybės santykį.

1 produktas:



20 pav. Vibracijų matuoklis „PCE-VT 3700“

Vibracijos matuoklis PCE-VT 3700 yra nešiojamas prietaisas, skirtas vibracijų stebėjimui mašinose. Šis prietaisas skirtas techninės priežiūros specialistams, norintiems greitai patikrinti vibruojančias dalis ir sistemas. Jis tiesiogiai rodo vibracijos pagreitį, greitį ir poslinkį prietaiso ekrane. Prietaisas turi funkciją, leidžiančią atlikti matavimus pagal ISO 10816-3 standartą. Tai reiškia, kad prietaisas gali automatiškai analizuoti matavimo duomenis ir rodyti geros arba blogos būklės vertinimą ekrane. Šis vertinimas yra naudingas greitai įvertinti ar mašina veikia tinkamai ir ar reikalingas remontas.

Specifikacija:

- Akceleracijos matavimo diapazonas 0.0 - 399.9 m/s², skiriamoji geba 0.1 m/s², 10 Hz - 10 kHz.
- Greičio matavimo diapazonas 0.0 - 399.9 m/s, skiriamoji geba 0.01 m/s, 10 Hz - 1 kHz.
- Poslinkio matavimo diapazonas 0.000 - 3.999 mm, skiriamoji geba 1 μm, 10 Hz - 200 Hz.
- Pjezo jutiklio rezonansinis dažnis 24 kHz.

Šio prietaiso kaina yra 916 €.

Nuoroda į jutiklio parametrus:

https://www.pce-instruments.com/eu/api/getartfile?_fnr=1744242&_dsp=inline

2 produktas:



21 pav. Svorio jutiklio keitiklis „CE HS“

Specifikacija:

- Skiriamoji geba 13,5 bitų.
- Būti pajungtas tik vienas svorio jutiklis 6 laidų jungimo metodu.
- Diskretizavimo dažnis 1,6 kHz.
- RS-485

Šio prietaiso kaina yra 760 €.

Nuoroda į jutiklio parametrus:

https://www.kern-sohn.com/cosmoshop/default/pix/a/media/CE%20HSN/TD_CE+HSN_en.pdf

3 produktas:



22 pav. „NI-9205“ ASK keitiklis

„NI-9205“ yra universalus įtampos keitiklis, naudojantis SAR tipo ASK keitiklį. Jame yra 32 nebalansuoti arba 16 diferenciniai kanalai. Modulio maksimalus diskretizavimo dažnis yra 250 kS/s ir 16 bitų skiriamos gebos. Įėjimo įtampos diapazonas yra programuojamas: $\pm 0,2$

V; ± 1 V; ± 5 V ir ± 10 V. Visi įėjimai yra apsaugoti nuo viršįtampio iki 60 V. Be to, keitiklis turi dvigubą izoliaciją tarp įėjimų ir žemės, didinant saugumą ir pašalinių triukšmų atsparumą. Keitiklis yra sukurtas taip, kad galėtų veikti ekstremaliomis sąlygomis, įskaitant aukštą vibraciją, temperatūros pokyčius ir elektromagnetinį triukšmą. Modulį galima lengvai integruoti su įvairiais duomenų surinkimo sistemomis, naudojant „NI CompactDAQ“ ir „NI CompactRIO“ platformas.

Nuoroda į jutiklio parametrus:

<https://www.ni.com/pl-pl/shop/model/ni-9205.html>

1.9. Literatūrinės analizės išvados

1. Vibracijos jutiklio rezonansinis dažnis yra esminis ribojantis veiksnys. Norint gauti patikimus matavimo rezultatus, matavimai turi būti atliekami tik iki jutiklio natūralaus rezonansinio dažnio. Esant viršijimui, rezultatai tampa nepatikimi.
2. Jutiklio montavimo būdas tiesiogiai įtakoja matavimo tikslumą. Naudojami tvirtinimo metodai (varžtas, kljavimas, magnetas) gali pakeisti rezonansinį dažnį ir sukelti papildomų paklaidų.
3. Kalibravimas yra būtinas siekiant užtikrinti jutiklio tikslumą. Svorio jutikliai gali būti kalibruojami kartu su atskaitiniu akcelerometru. Gauta jutiklio jautrumo priklausomybė nuo dažnio turi būti kompensuojami programinėje įrangoje.
4. Svorio jutiklių jungimo būdas įtakoja signalo tikslumą. Keturių laidų jungimas yra paprastesnis, tačiau jautrus laidų varžos pokyčiams. Šešių laidų konfigūracija leidžia šiuos pokyčius kompensuoti.
5. ASK keitiklio tipas tiesiogiai įtakoja duomenų kokybę. SAR tipo ASK keitikliai greitesni, bet turi mažesnę skiriamąją gebą, o Sigma-Delta ASK keitikliai – tikslesni, bet lėtesni.
6. FFT algoritmas leidžia analizuoti vibracijas dažnių srityje. ARM mikrovaldikliai turi specializuotą biblioteką realiu laiku atlikti FFT skaičiavimus.
7. Vibracijos signalai gali būti interpretuojami kaip poslinkis, greitis arba pagreitis. Kiekvienas parametras turi skirtingą taikymo sritį: poslinkis – žemų dažnių vibracijoms, greitis – mechaninių sistemų būklei, pagreitis – aukšto dažnio vibracijų aptikimui.

2. AUKŠTO DAŽNIO VIBRACIJOS SISTEMOS PROJEKTAVIMAS

Šio tyrimo tikslas – sukurti ir ištirti aukšto dažnio vibracijų matavimo sistemą, skirtą tiksliai statinių apkrovų ir dinaminių vibracijų vertinimui. Tyrimas apima visą sistemos kūrimo procesą: analoginių signalų filtravimo sprendimų analizės, duomenų apdorojimo mikrovaldikliu bei galutinio veikimo įvertinimo realiomis sąlygomis.

Pirmiausia buvo projektuojamas žemųjų dažnių slopinimo filtras, naudojant penktos eilės Sallen–Key topologiją. Siekiant užtikrinti filtro teisingą veikimą, buvo sukurta atskira spausdintinė plokštė ir atlikti eksperimentiniai matavimai, lyginant juos su teoriniais skaičiavimais ir modeliavimo rezultatais. Toliau buvo integruota visa matavimo grandinė: žemo dažnio filtras, ASK keitiklis bei mikrovaldiklis (MCU), leidžiantys stebėti vibracinius signalus iš svorio jutiklio ir akcelerometrų.

Antroje tyrimo dalyje atlikti eksperimentiniai bandymai su vibraciniu stendu, kuriuose buvo lyginamas svorio jutiklio ir akcelerometrų atsakas į vibracinius signalus. Gauti duomenys leido įvertinti sistemos tikslumą, jautrumą bei galimas tobulinimo kryptis.

2.1. Svorio jutiklio pasirinkimas

Siekiant tiksliai išmatuoti objekto masę ir generuojamas vibracijas Z ašimi, reikalingas specialios konstrukcijos svorio jutiklis. Tyrimui buvo pasirinktas cilindro formos svorio jutiklis (žr. 23 pav.), kurio konstrukcijoje yra dvi plokštelės išdėstytos viena virš kitos ta pačia ašimi. Viršutinė plokštelė skirta tiriamo objekto tvirtinimui, o apatinė – naudojama kaip atskaitos taškas. Jėga, perduodama tarp šių plokštelių, sukelia deformaciją, kuri ir yra matuojama jutiklyje integruotais deformacijos jutikliais.



23 pav. Cilindrinis svorio jutiklis

Tyrimui atlikti pasirinktas jutiklis turi mažą matavimo diapazoną, siekiant užtikrinti kuo didesnę jautrumą ir tikslų mažų vibracijų registravimą. Toks sprendimas leidžia išmatuoti nedidelius dinامينius pokyčius, atsirandančius dėl vibracinių apkrovų vertikalia kryptimi. Toliau pateikiama pasirinkto svorio jutiklio gamintojo techninė specifikacija (žr. 2 lentelę).

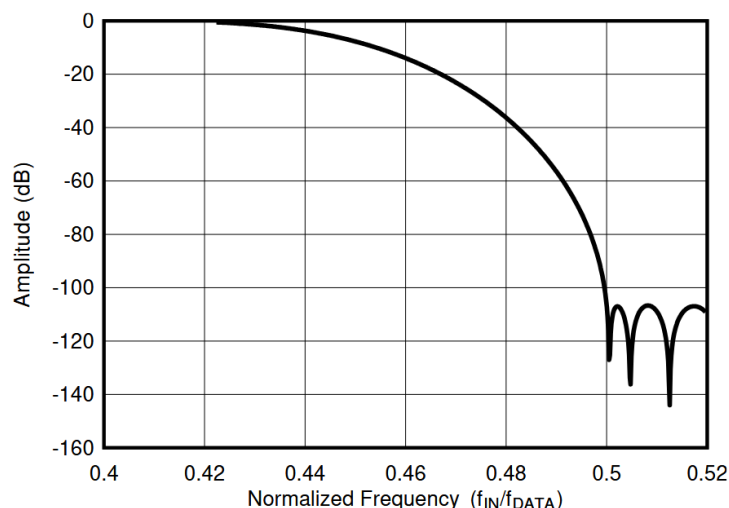
2 lentelė. Svorio jutiklio techninė specifikacija

	Vertė	Matavimo vienetas
Diapazonas	± 30	kg
Jautrumas	$2,0 \pm 0,005$	mV/V
Nulio poslinkis	0,15	kg
Pralaidumo juosta	10	kHz
Išėjimo varža	350	Ω
Įėjimo varža	400 ± 100	Ω

Svorio jutiklio kabelis turi 4 laidus: sužadinimo pliusą ir minusą, kuris jungiamas prie 5 V maitinimo šaltinio ir žemės, o diferencinis išėjimas, kuris jungiamas prie žemo dažnių filtro įėjimo.

2.2. ASK keitiklio pasirinkimas

Svorio jutiklis generuoja diferencinį signalą, kuris yra tiesiškai priklausomas nuo jėgos veikiančios svorio jutiklį. Išmatuoti šią sugeneruotą įtampą reikalingas ASK keitiklis. Pasirinktas ASK keitiklis yra „delta-sigma“ tipo, kuris pažymi aukšta skiriamąja geba. Šio keitiklio modelis yra „ADS127L11“, kuris pasižymi 24 bitų skiriamąja geba, diskretizavimo dažniu iki 400 kSPS ir matuojama diferencinius signalus. Šio ASK keitiklio nominalus vidinio RC osciliatoriaus veikimo dažnis yra 25,6 MHz. Kadangi vidinio RC osciliatoriaus generuojamas dažnis yra nestabilus, ASK keitiklio taktinis dažnis yra generuojamas mikrovaldiklio. Mikrovaldiklis generuoja 25,058 MHz taktinį dažnį, kuris eina į dažnio kartotuvą „LMK1C1104“ ir už jo į du ASK keitikius. ASK modulatorius veikia pusę taktinio dažnio (12,529 MHz). Modulatorius yra 1 bito, kurio išėjimas yra lyginamas su integratoriaus išvestimi. Šis aukšto dažnio 1 bito matavimas yra sulėtinamas FIR arba Sinc filtro. Pasirinktas FIR plačiajuostis filtras (žr. 24 pav.), kuris iš 12,529 MHz modulatoriaus išėjimo dažnio sulėtina iki 24,471 kHz duomenų išėjimo dažnio. FIR filtras pasižymi pralaidumo juosta iki 0,42 duomenų išėjimo dažnio (-3 dB ties 10,935 kHz) ir pralaidumo juostos bangavimu $\pm 0,0005$ dB. Esant 0,5 ir didesnio duomenų išėjimo dažnio signalas yra slopinamas -110 dB. Minimi, aukštesni dažniai skaitmeninio filtro efektyviai filtruojami iki modulatoriaus 12,529 MHz dažnio. Virš šio ribinio dažnio, esantys triukšmai gali persidengti su žemo dažnio signalais. Pašalinti aukštesnius dažnius nei modulatoriaus diskretizavimo dažnis, naudojamas analoginis žemo dažnio filtras.



24 pav. Plačiajuostis skaitmeninis filtras [18]

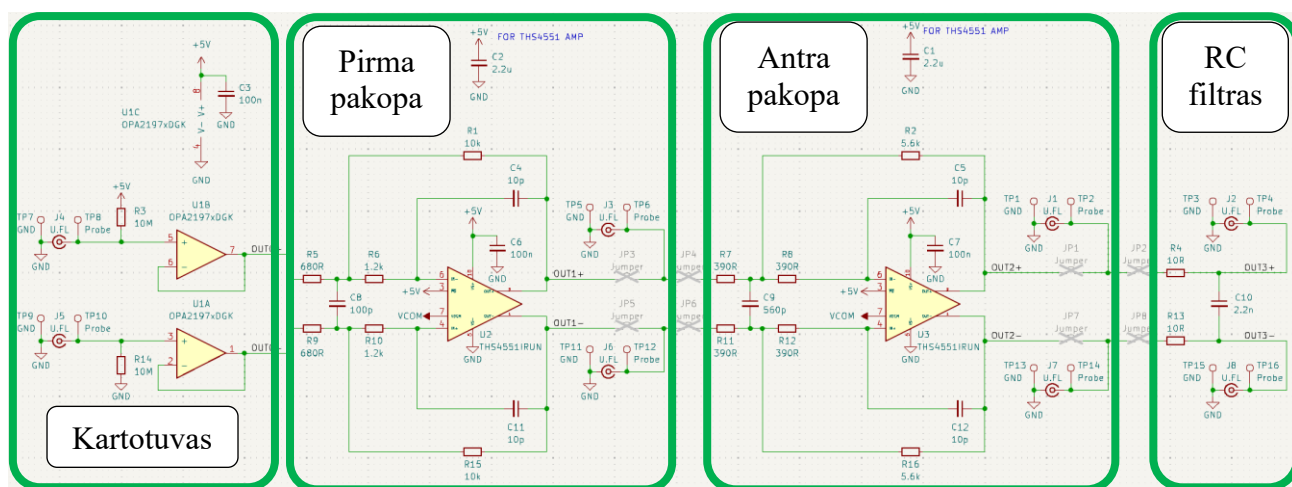
2.3. Analoginio filtro projektavimas

Suprojektuotas penktos eilės žemo dažnio filtras su kiek įmanoma statesne amplitudės slopinimo charakteristika. Filtro svarbiausios charakteristikos: pralaidumo juosta iki 1 MHz, -100 dB slopinimas, esant 12,8 MHz dažniui ir pralaidumo juostoje signalo stiprinimas apie 46,5 dB. Signalų stiprinimas reikalingas, kad išnaudoti visą ASK keitiklio įėjimo įtampos diapazoną. Svorio jutiklio jautrumas gali būti režiuose 1,0 – 3,0 mV/V. Kadangi svorio jutiklio maitinimas yra 5 V, todėl įėjimo įtampos diapazonas gali būti 5 – 20 mV, o ASK keitiklio matavimo diapazonas yra ± 5 V. Įėjimo varža >100 kOhm, kad neapkrauti svorio jutiklio ir sumažinti paklaidas.

Projektuojant žemo dažnio filtrą naudotas „TI Filter Design Tool“ skaičiuotuvas. Pasirinktas žemo dažnio filtro tipas praleidžia nuolatinę srovę ir kintamą srovę. Tai yra šis filtras leidžia matuoti statines apkrovas ir dinamines vibracijas. Toliau skaičiuotuve nurodomos filtro charakteristikos. Signalų stiprinimas pasirinktas 46,5 dB (211 V/V), pralaidumo juostos plotis 1 MHz, slopinimas -100 dB esant 12,8 MHz dažniui. Iš filtrų sąrašo išsirinktas „Butterworth“ tipas, kuris pasižymi mažu pralaidumo juostos bangavimu ir dideliu slopinimu. Apskaičiuotas filtro laipsnis 4, o slopinimas -80 dB/dec. Toliau pasirenkama kiekvieno filtro topologija, kurios yra dvi: „Sallen-key“ ir „Multiple feedback“. Pasirinktos abidvi pakopos „Multiple feedback“ (MFB), nes visi pasyvūs komponentai yra tik vienoje pusėje stiprintuvo. Toliau skaičiuotuve gaunamos rezistorių ir kondensatorių nominalai. Apskaičiuotos vertės yra skirtos nesubalansuotam signalui ir turi būti pritaikytos visiškai diferenciniam stiprintuvui. Straipnyje [19] paaiškinta, kaip nesubalansuotą MFB filtrą pakeisti diferenciniu. Pirmiausia sukuriamas nesubalansuotos filtro grandinės veidrodinis atvaizdas. Tada sujungiami visi

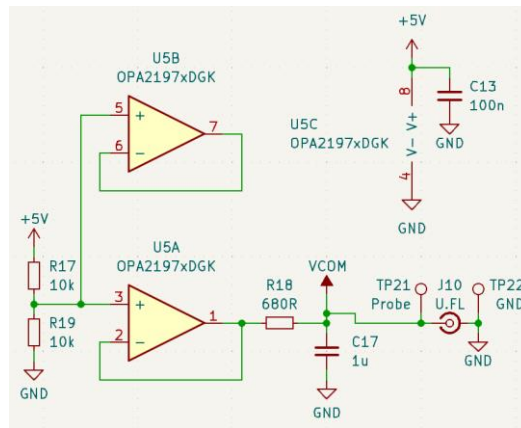
elementai, kurie jungiasi prie žemės potencialo. Operacinis stiprintuvas ir jo veidrodinis atvaizdas pakeičiami visiškai diferencialiniu operaciniu stiprintuvu.

Pasirinktas visiškai diferencinis stiprintuvas „THS4551“, kurio įėjimas ir išėjimas yra diferenciniai. Naudojami du FDA užtikrina, kad panašiai stiprinantys ir filtruojantys stiprintuvai nepasiektų vienetinio stiprinimo atsargą, kuris yra 150 MHz. Taip pat jie užtikrina mažos varžos signalo išėjimą į kitą stiprintuvą, kurio yra aukšta įėjimo varža. FDA išėjimas turi dar papildomą pasyvų žemo dažnio filtrą, kad padaryti slopinimą -100 dB/dec. Svorio jutiklis turi būti neapkrautas srove, tai yra prietaiso įėjimo varža būtų aukšta. Prieš žemo dažnio filtrą naudojamas papildomas operacinis stiprintuvas „OPA2197“ kartotuvo režime (žr. 25 pav).



25 pav. 5 eilės žemo dažnio filtro elektrinė schema

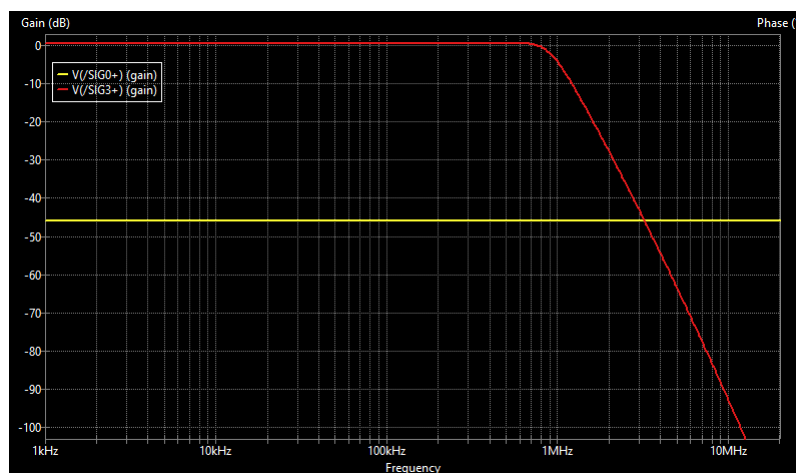
Kadangi svorio jutiklio sužadinimo įtampa yra 5 V, sinfazinė įtampa sudaro pusę maitinimo įtampos – 2,5 V. Operacinių stiprintuvų sinfazinė įtampa įėjimo režiai -0,1–3,9 V. Sinfazinei 2,5 V įtampai generuoti buvo panaudotas operacinis stiprintuvas „OPA2197“. Stiprintuvas veikia kartotuvo režime, kurio neinvertuojantis įėjimas prijungtas prie įtampos daliklio, o invertuojantis įėjimas sutrumpintas su stiprintuvo išėjimu (žr. 26 pav.). Įtampos daliklio santykis yra 1/2 maitinimo įtampos. Varžų nominalai yra vienodi ir lygūs 10 kΩ. Stiprintuvas skirtas aukšto impedanso varžų daliklio išėjimą pakeisti žemo impedanso išėjimu. Prie stiprintuvo išėjimo prijungtas žemo dažnio filtras, kuris slopina aukšto dažnio triukšmus perduodamus į FDA stiprintuvo išėjimą. Operacinio stiprintuvo pakuotėje yra du operaciniai stiprintuvai iš kurių buvo panaudotas tik vienas.



26 pav. 2,5 V įtampos generatoriaus elektrinė schema

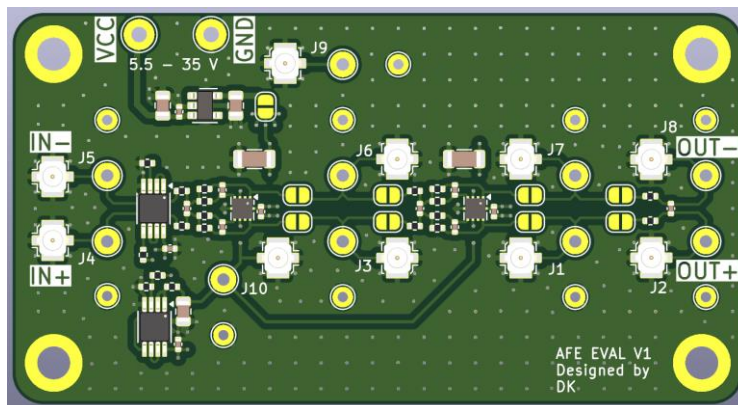
Straipsnyje [20] rašoma, kaip teisingai nenaudojamą stiprintuvą prijungti, kad sumažinti vartojamą srovę, sumažinti generuojamus triukšmus į gretimus stiprintuvus ir išvengti stiprintuvo sugedimo. Vienas iš stiprintuvo prijungimo būdų yra kai stiprintuvas veikia kartotuvo režime, o neinvertuojantis įėjimas prijungtas prie stiprintuvo sinfazinės įtampos diapazone esančio maitinimo šaltinio. Todėl nepanaudotas stiprintuvas buvo prijungtas prie įtampos daliklio.

Įsitikinti ar skaičiuotuvai atliko skaičiavimus teisingai ir filtras veiks kaip tikimasi, panaudota NGSPICE modeliavimo programa, esanti „KiCad“ programinėje įrangoje. Sukūrus naują projektą, perbraižyta žemo dažnio filtro schema. Operacinių stiprintuvų „THS4551“ ir „OPA2197“ modeliai parsisiųsti iš „Texas Instruments“ gamintojo tinklapio ir įkelti į schemą. Modeliavimo vartotojo sąsajoje nustatyti parametrai: „AC“ analizės tipas, kuri sugeneruoja DACH grafiką, modeliavimo dažnių diapazonas 1-12800 kHz. Iš gautų rezultatų nustatyta, kad žemo dažnio filtro signalo stiprinimas yra 46 dB, pralaidumo juosta iki -3 dB ties 925 kHz, signalo slopinimas ties 12,8 MHz yra -104 dB (žr. 27 pav.). Gauti rezultatai tenkino nustatytus reikalavimus.



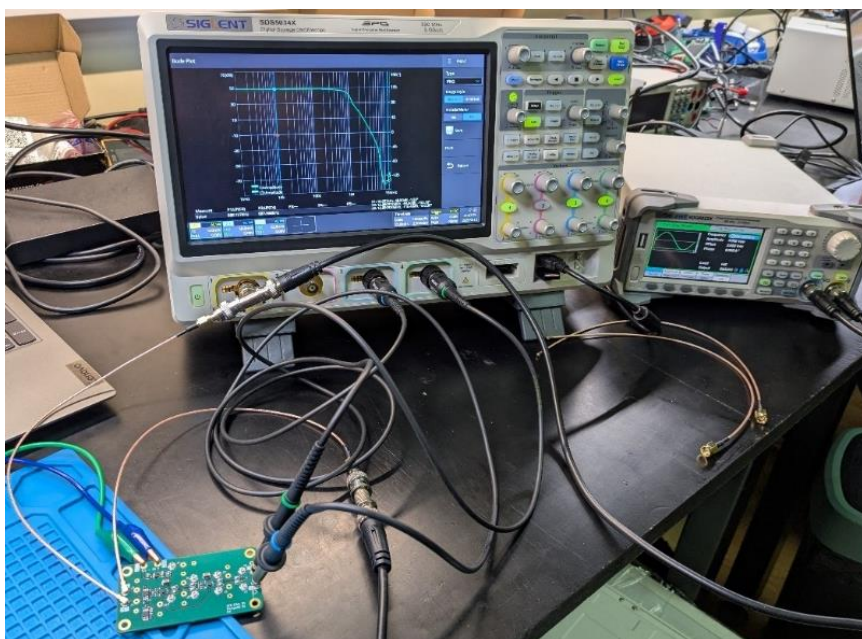
27 pav. Žemo dažnio filtro modeliavimo rezultatai

Suprojektuota spausdintinė plokštė (žr. 28 pav.) turi „U.FL“ jungtis, kurios užtikrina gerą kontaktą ir minimizuoja išorinių triukšmų persidavimą į laidą tarp oscilografo ir spausdintinės plokštės. Suprojektuota keturių sluoksnių spausdintinė plokštė, kurios išdėstymas yra: 1 – signalai/žemė, 2 ir 3 – žemė, 4 – 5 V maitinimo įtampa.



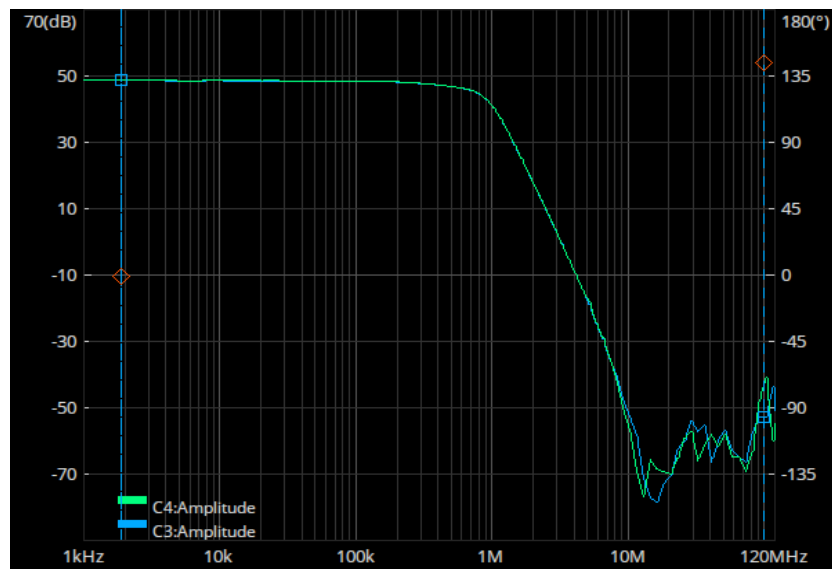
28 pav. Žemo dažnio filtro 3D modelis

Žemo dažnio filtras buvo išmatuotas naudojantis oscilografu ir signalų generatoriumi (žr. 29 pav.). Spausdintinės plokštės įėjimas „IN+“ prijungtas prie signalų generatoriaus 1 kanalo ir prie oscilografo 1 kanalo, o įėjimas „IN-“ prijungtas prie 2 kanalo, kurio fazė praslinkta 180°. Žemo dažnio filtro „OUT+“ prijungtas prie oscilografo 3 kanalo, o „OUT-“ prijungtas prie oscilografo 4 kanalo. Signalų generatorius prijungtas prie oscilografo per „USB“ sąsają ir panaudota oscilografe, esanti funkcija „Body Plot“, kuris leidžia sudaryti DACH grafiką.



29 pav. Atliekami realūs žemo dažnio filtro matavimai

Atliekama konfigūracija per oscilografo grafinę sąsają. Nustatyta sinfazinė įtampa lygi 2,5 V ir kuri yra pusė svorio jutiklio maitinimo įtampos 5 V. Diferencinė įtampa nurodyta įsijungus funkciją „Vari-Level“, kuri leidžia nustatyti kokią įtampą generuos signalų generatorius priklausomai nuo dažnio. Toks metodas leidžia išmatuoti didelius skirtumus tarp įėjimo ir išėjimo signalų su minimaliais triukšmais. Pasirinktos vertės: 0,1 mVp-p ties 1 kHz, 0,1 mVp-p ties 1 MHz, 1,0 Vp-p ties 13 MHz ir 3,0 Vp-p ties 120 MHz. Taip pat nustatytas 250 taškų kiekis per dekadą ir logaritminis dažnių generavimas. Sukonfigūravus matavimo parametrus, įjungtas 6 V maitinimas žemo dažnio filtrui ir paleidus matavimą gautas DACH grafikas. Išmatuota, kad pralaidumo juostos plotis yra 687,39 kHz, signalo slopinimas -118,4 dB ties 12,8 MHz ir signalo stiprinimas yra 48,8 dB (žr. 30 pav.). Matomas triukšmas 10-120 MHz diapazone yra dėl aukšto išėjimo signalo slopinimo.



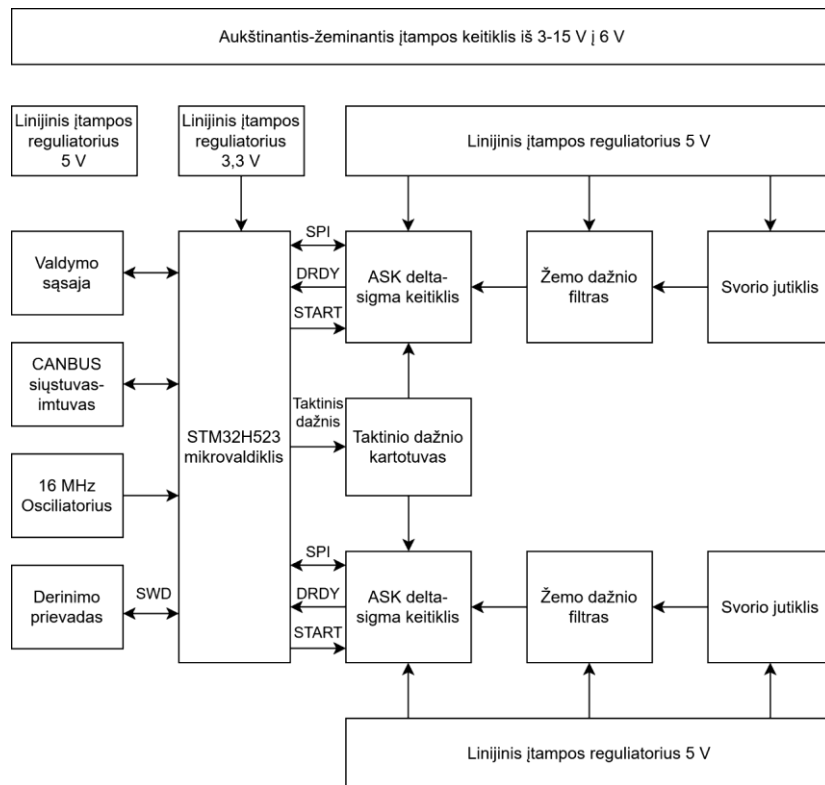
30 pav. Išmatuotas žemo dažnio filtro DACH

3 lentelėje nurodyti modeliuoti ir realiai išmatuoti filtro parametrai iš esmės sutampa, tačiau pastebimi tam tikri rezultatų nukrypimai. Didžiausias skirtumas pastebimas pralaidumo juostos dažnyje, kuris realiame matavime yra mažesnis nei modeliavimo metu. Tuo tarpu slopinimo ir stiprinimo charakteristikos rodo nedidelius nuokrypius, kurie gali būti dėl komponentų tolerancijų ar spausdintinės plokštės parazitinių talpumų.

3 lentelė. Žemo dažnio filtro rezultatų palyginimas.

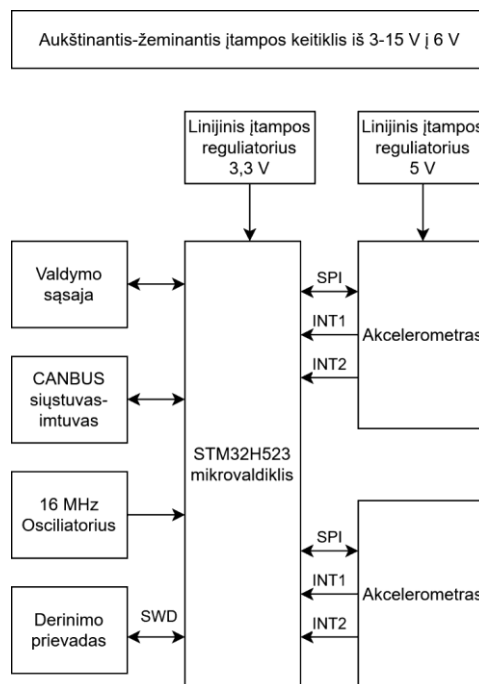
	Modeliavimo rezultatai	Išmatuoti rezultatai	Matavimo vienetai
Pralaidumo juosta iki -3 dB	925	687,39	kHz
Signalų slopinimas ties 12,8 MHz	-104	-118,4	dB
Signalų stiprinimas	46	48,8	dB

Kadangi žemo dažnio filtro išmatuoti rezultatai tenkina sudarytus reikalavimus, sukurta svorio jutiklio matavimo prietaiso struktūrinė schema (žr. 31 pav.). Joje nurodyti jutikliai, analoginė dalis, periferijos ir reikalingos įtampos. Tokiu būdu, kuriant elektrinę schemą galima parinkti tinkamus komponentus, kurie atitiktų iškeltus reikalavimus projektuojamam prietaisui. Viskas prasideda nuo prietaiso maitinimo. Iš išorės gaunamas maitinimas, stabilizuojamas aukštinančio-žeminančio įtampos keitiklio į 6 V įtampą. Toliau keitiklio išėjimo įtampa keičiama linijinių įtampos reguliatorių į 5,0 V ir 3,3 V įtampas. Linijiniai reguliatoriai pasižymi aukštu maitinimo šaltinio triukšmų mažinimo koeficientu (PSRR). ASK keitiklis matuoja diferencinį signalą išeinantį iš žemo dažnio filtro, o į žemo dažnio filtrą perduodamas diferencinis signalas iš svorio jutiklio. Šie blokai maitinami nuo dedikuoto 5 V maitinimo šaltinio. Sukurti du vienodi analoginės grandinės blokai leidžia prijungti du svorio jutiklius. Toliau prie mikrovaldiklio „STM32H523“ prijungiami ASK keitikliai per atskiras „SPI“ sąsajas. Atskiros sąsajos leidžia išgauti didesnę duomenų perdavimo greitį. Į „STM32“ mikrovaldiklį įrašyti programą ir realiu metu analizuoti išvestą jungtis per „SWD“ sąsają, per kurią paprasta prijungti „ST-Link“ programatorių. 16 MHz osciliatorius užtikrina stabilų taktinio dažnio generavimą „STM32“ mikrovaldikliui. Valdymo sąsają sudaro 3 mygtukai ir 3 programuojami LED šviesos diodai. Mygtukai skirti programavimo metu valdyti programos veikimo būseną, o šviesos diodai stebėti programos ir ASK keitiklių veikimo būsenas.



31 pav. Svorio jutiklio matavimo prietaiso struktūrinė schema

32 pav. pavaizduota akcelerometrų matavimo prietaiso struktūrinė schema. Skaitmeninė prietaiso dalis panaši į svorio jutiklio matavimo prietaiso struktūrinę schemą. Esminis pakeitimas yra „SPI“ sąsajų išvedimas į jungtis, kadangi pasirinkti akcelerometrai yra skaitmeniniai.



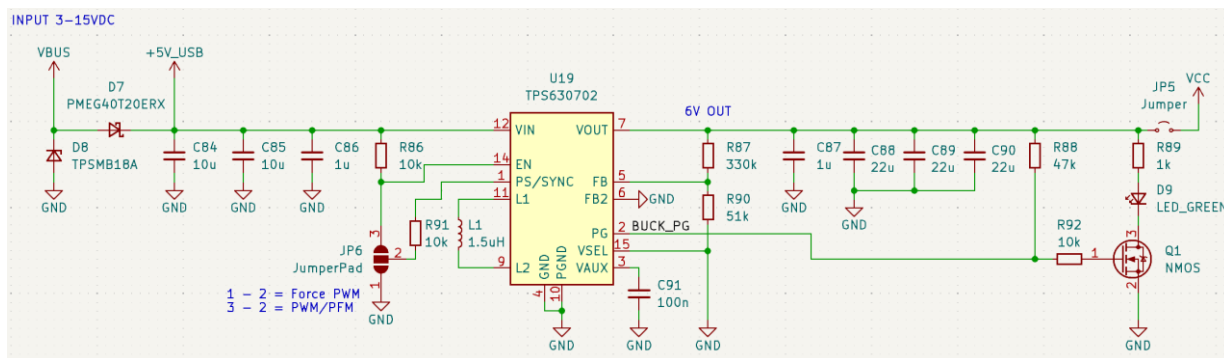
32 pav. Akcelerometrų matavimo prietaiso struktūrinė schema

2.4. Prietaiso elektrinė schema

Suprojektuota prietaisų elektrinės schemos turi didelį kiekį komponentų. Jų veikimo teisingas suderinimas lemia prietaiso stabilumą ir matavimų tikslumą. Projektuojant prietaisą, atkreiptas dėmesis į gamintojų rekomendacijas ir į įvairius straipsnius. Projektuoti elektrines schemas buvo pasirinkta atviro kodo programinė įranga „KiCad“, kuri yra nemokama.

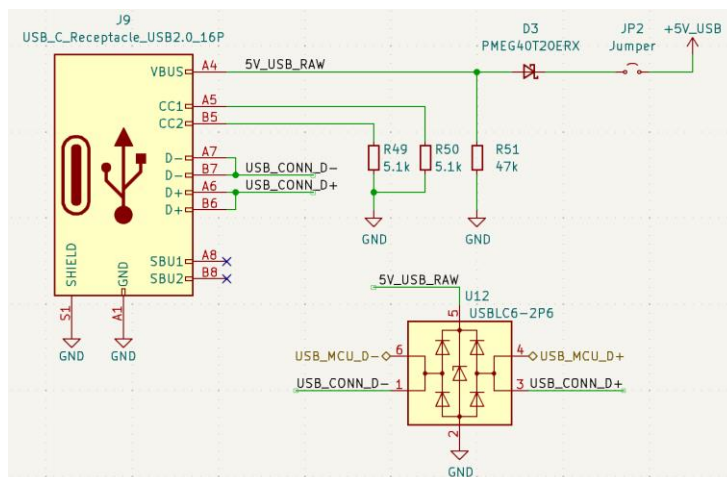
Prietaiso maitinimas galimas iš „USB“ sąsajos arba iš maitinimo jungties. Šios dvi maitinimo grandinės yra izoliuotos panaudojus Šotkio diodus „PMEG40T20ERX“. Tokiu būdu jeigu įjungtas 12 V maitinimas per maitinimo jungtį, ši įtampa nepersiduos į 5 V įtampos „USB“ jungtį ir nesugadins prijungto kompiuterio. Taip pat Šotkio diodas užtikrina, kad prietaisas nebūtų sugandintas, ne ta poliarizacija prijungus maitinimo šaltinį. Kadangi visi diodai turi atgalinę nuotėkio srovę, prijungtas 47 k Ω rezistorius tarp „USB“ sąsajos pliuso ir žemės. Taip išvengiama 12 V maitinimo jungties srovės nuotėkis į prijungtą kompiuterį. Elektrostatinės iškrovos diodai (ESD) „USBLC6“ ir „TPSMB18A“ apsaugo nuo statinių krūvių, kurie pažeidžia lustų vidinę struktūrą. Taip pat apsaugo nuo viršįtampio, kuris pakeičiamas į šilumą.

„TPS630702“ aukštinantis-žeminantis įtampos keitiklis užtikrina įtampos konvertavimą į 6 V. Keitiklis veikia aukštu 2,4 MHz taktiniu dažniu, todėl induktyvumo ritė yra maža ir jos vertė lygi 1,5 μ H. Įėjimo įtampos diapazonas 3-15 V, užtikrina prietaiso veikimą, kai „USB“ sąsajos maitinimo įtampa sumažėja žemiau nei nominali 5 V įtampa. Elektrinė schema (žr. 33 pav.) sudaryta, naudojantis gamintojo rekomendacijomis. Šis keitiklis leidžia pasirinkti vieną iš dviejų veikimo režimų – „PWM“ (angl. *Pulse Width Modulation*) arba „PFM“ (angl. *Pulse Frequency Modulation*). „PWM“ režime keitiklis palaiko pastovų taktinį dažnį, reguliuodamas įjungimo ir išjungimo plotį pagal apkrovos srovę. Taip užtikrinamas stabilus išėjimo įtampos lygis, esant kintamai apkrovai. „PFM“ režimas veikia keičiant dažnį. Įjungimo ir išjungimo trukmė išlieka pastovi, tačiau jų pasikartojimo dažnis keičiasi priklausomai nuo apkrovos srovės. Toks režimas yra efektyvesnis esant mažoms srovėms, bet pasižymi didesniais išėjimo įtampos svyravimais. Kadangi prietaise svarbus mažas įtampos bangavimas analoginėse grandinėse, pasirinktas „PWM“ režimas. Keitiklis turi išėjimą PG (angl. *Power Good*), kuris nurodo ar išėjimo įtampa pasiekė 80 % nustatytos įtampos ir ar prietaisas neperkaitęs.



33 pav. Aukštinančio-žeminančio įtampos keitiklio elektrinė schema

Prie „USB“ sąsajos jungties „CC1“ ir „CC2“ kontaktų prijungti 5,1 kΩ rezistoriai nurodo kompiuteriui, kad prietaisas naudoja maitinimą iš „USB“ sąsajos ir neturi išorinio maitinimo. Ši sąlyga galioja tiktais prijungus prietaisą prie kompiuterio, naudojantis „USB C“ į „USB C“ kabeliu.



34 pav. „USB“ sąsajos elektrinė schema

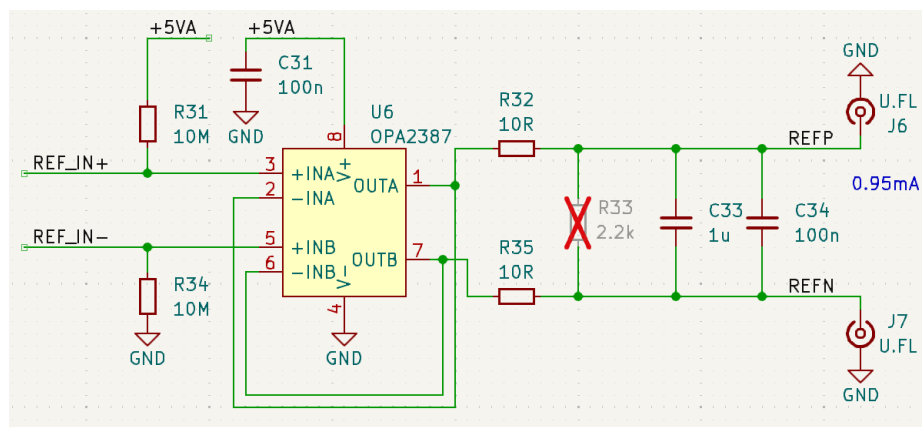
3,3 V ir 5,0 V linijinis įtampos reguliatorius „AP7375“ pasižymi aukštu maitinimo šaltinio triukšmų mažinimo koeficientu lygiu 85 dB, esant 1 kHz įtampos svyravimams. Reguliatoriaus platus įėjimo įtampos diapazonas 3-45 V apsaugo komponentus, jeigu netikėtai sugenda aukštinantis-žeminantis įtampos keitiklis. Tai yra jeigu keitiklio išėjimas susitrupina su įėjimu arba sugedus keitikliui įtampa sustiprinama iki 12 V. 3,3 V linijinis įtampos reguliatorius skirtas užmaitinti mikrovaldiklį, osciliatorių, taktinio dažnio kartotuvą, „CANBUS“ siųstuvą – imtuvą ir ASK keitiklių skaitmenines dalis. 5,0 V skirtas užmaitinti programuojamus LED šviesos diodus ir „CANBUS“ siųstuvą – imtuvą.

Du analoginiai blokai turi po atskirą 5,0 V linijinį įtampos reguliatorių „AP7375“. Bloką sudaro ASK keitiklio analoginė dalis, žemo dažnio filtras ir svorio jutiklis. Atskiras reguliatorius leidžia minimizuoti įtampos triukšmų perdavimą į analogines grandines. Jeigu

maitinimas ASK keitikliui būtų pajungtas nuo mikrovaldiklio, staigus skaitmeninių signalų junginėjimas sumažintų ASK keitiklio tikslumą.

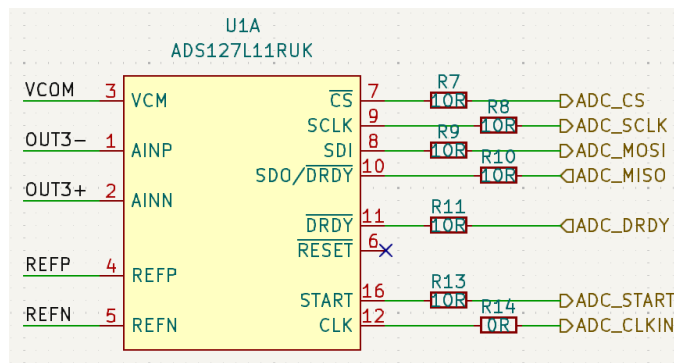
Anksčiau minėtas ASK keitiklio „ADS127L11“ „VCOM“ išėjimas generuoja įtampą, lygią pusei maitinimo įtampos. Ši įtampa naudojama kaip virtualus žemės potencialas ir prijungiama prie žemo dažnio filtro stiprintuvų, siekiant išnaudoti visą ASK keitiklio matavimo diapazoną. Tokiu būdu įėjimo signalas yra centruojamas aplink ASK keitiklio matavimo diapazono vidurio tašką, o tai leidžia matuoti teigiamas ir neigiamas signalo amplitudes.

ASK keitiklio atraminė įtampa nurodo diferencinio įėjimo signalo matavimo diapazoną. ASK keitiklio atraminė įtampa turi tik vieną kartotuvą prijungtą prie pliuso, o minusas neturi. Kadangi atraminės įtampos srovės nuotėkis lygus 0,95 mA, prijungtas papildomas įtampos kartotuvas (žr. 35 pav.). Į šį kartotuvą paduodama įtampa jungtyje iš svorio jutiklio sužadinimo pliuso ir minuso atskirais laidais (6 laidų pajungimo metodas), pašalinant įtampos nuostolius dėl laidų varžos.



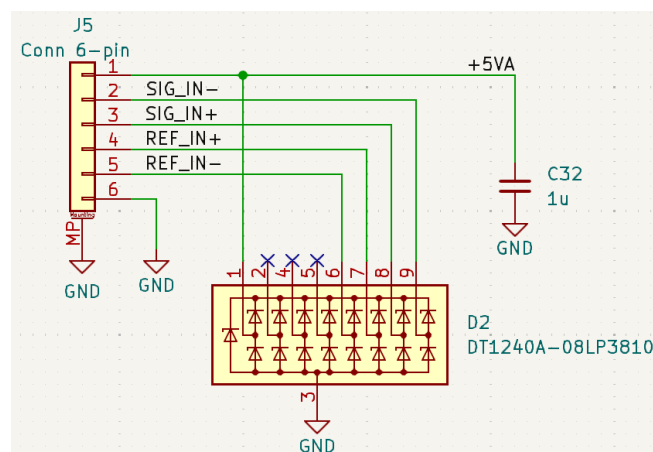
35 apv. ASK keitiklio atraminės įtampos kartotuvo elektrinė schema

„SPI“ sąsaja sudaro iš 4 signalų: CS, SCLK, MOSI ir MISO. CS, SCLK ir MOSI signalai yra siunčiami iš mikrovaldiklio į ASK keitiklį, o MISO – iš ASK keitiklio į mikrovaldiklį (žr. 36 pav.). Kadangi siųstuvas yra dvitaktis (angl. *push-pull*), o imtuvas yra aukšto impedanso, gaunami signalo atspindžiai ir bangavimai. Dėl šių triukšmų imtuvas gali užregistruoti ne tokio lygio bitą nei iš tikrųjų yra. Išvengti tokių klaidų reikalingas siųstuvo ir takelio impedansų suderinimas. Tarkime takelio impedansas yra 50 Ω, o siųstuvo impedansas yra 30 Ω. Tai reiškia, kad reikalinga 20 Ω varža kuo arčiau siųstuvo išėjimo. Šiuo atveju „STM32H523“ mikrovaldiklio gamintojo dokumentacijoje nebuvo nurodyta išėjimo impedansas, todėl nuspręsta panaudoti 10 Ω varžas. ASK keitiklio dokumentacijoje nurodyta, kad šie atspindžių triukšmai turi būti minimizuoti, kitaip ASK keitiklio luste iš skaitmeninės dalies triukšmai gali persiduoti į analoginę grandinę. Įprastai šios varžos nominalo derinimas atliekamas matuojant impulsus imtuve ir derinant varžas.



36 pav. ASK keitiklio elektrinė schema

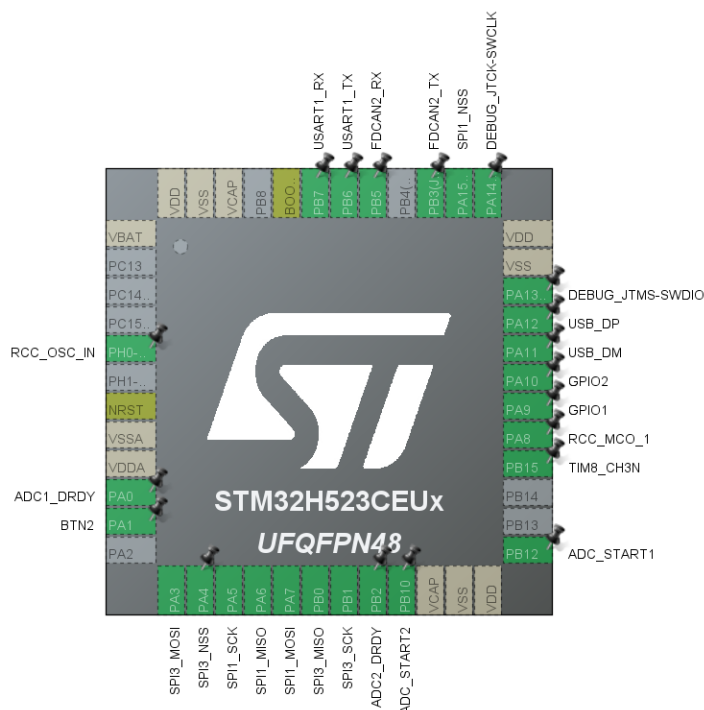
Prie svorio jutiklio jungties prijungtas „ESD“ diodų rinkinys (žr. 37 pav.). Renkantis „ESD“ diodus iškeltas reikalavimas, kad diodų vidinė talpa būtų kuo mažesnė. Išrinkto „DT1240A“ diodų rinkinio vieno kanalo vidinė talpa yra 0,6 pF. Tai reiškia, kad didelis svorio jutiklio diferencinio išėjimo impedansas su maža „ESD“ diodų talpa sudarys labai plačią žemo dažnio filtro pralaidumo juostą ir signalo įtampos neįtakos.



37 pav. Svorio jutiklio jungties „ESD“ diodų rinkinio elektrinė schema

Pasirinktas mikrovaldiklis „STM32H523“ mikrovaldiklis turi ARM Cortex-M33 branduolį, veikiančią 250 MHz dažniu ir integruotą „FPU“ (slankiojo kabelio aritmetikos bloką). „STM32H523“ turi 512 kB „Flash“ atminties ir 272 kB „RAM“ atminties. Didelė mikrovaldiklio sparta ir skaičiavimų efektyvumas yra svarbus atliekant realaus laiko skaičiavimus, tokius kaip greitoji Furjė transformacija (FFT), kurie reikalingi vibracijų signalo analizėje. Be to, šis mikrovaldiklis siūlo konkurencingą kainos ir našumo santykį, palyginus su kitomis „STM32“ serijomis kaip „F“ ar „G“ modeliais. Jis palaiko platų periferinių įrenginių spektrą (ASK, SAK, SPI, I2C, UART, DMA, TIM ir kt.), o kiekvienas išvadas dažnai turi kelias alternatyvias funkcijas. Taip sutaupoma laiko trasuojant ir optimizuojant komponentų išdėstymą spausdintinėje plokštėje. Vienas iš svarbiausių privalumų – patogus prievadų

konfigūravimas per „STM32CubeMX“ programinę įrangą (žr. 38 pav.). Ši aplinka leidžia greitai ir vizualiai parinkti reikiamas periferijas, nurodant, kurie mikrovaldiklio išvadai gali atlikti norimas funkcijas. Tai ženkliai sumažina klaidų tikimybę ir taupo laiką, kuris kitu atveju būtų skiriamas rankiniam dokumentacijos analizavimui.



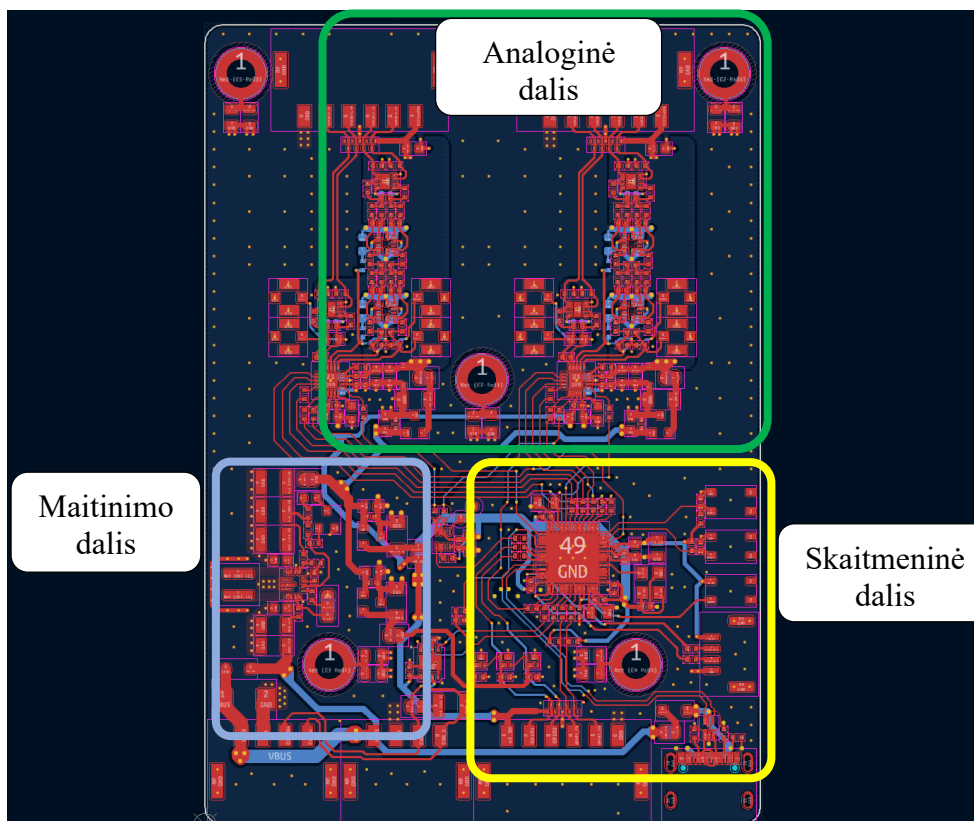
38 pav. Mikrovaldiklio prievadų konfigūravimas per „STM32CubeMX“ programinę įrangą

Matuojant vibracijas, svarbus signalų diskretizavimo dažnio tikslumas ir stabilumas. Naudojamas išorinis 16 MHz osciliatorius, kurio dažnio stabilumas yra ± 25 ppm. Atsižvelgiant į tai, kad ASK keitiklio duomenų perdavimo dažnis yra 24,471 kHz, toks stabilumo lygis reiškia maksimalų dažnio nuokrypį $\pm 0,61$ Hz. Kadangi atliekant greitąją Furjė transformaciją (FFT) naudojamas stulpelio plotis yra 5,97 Hz, šis dažnio nestabilumas sudaro tik apie 10 % vieno stulpelio pločio. Pasirinkto osciliatoriaus stabilumas yra pakankamas ir neturės reikšmingos įtakos spektro analizės rezultatų tikslumui.

Programos įrašymui bei mikrovaldiklio veikimo stebėsenai panaudota JST-GH jungtis, prie kurios prijungti SWDIO ir SWCLK signalai. Šie kontaktai yra naudojami „Serial Wire Debug“ (SWD) sąsajos ir yra sujungti su „ST-Link“ programatoriumi.

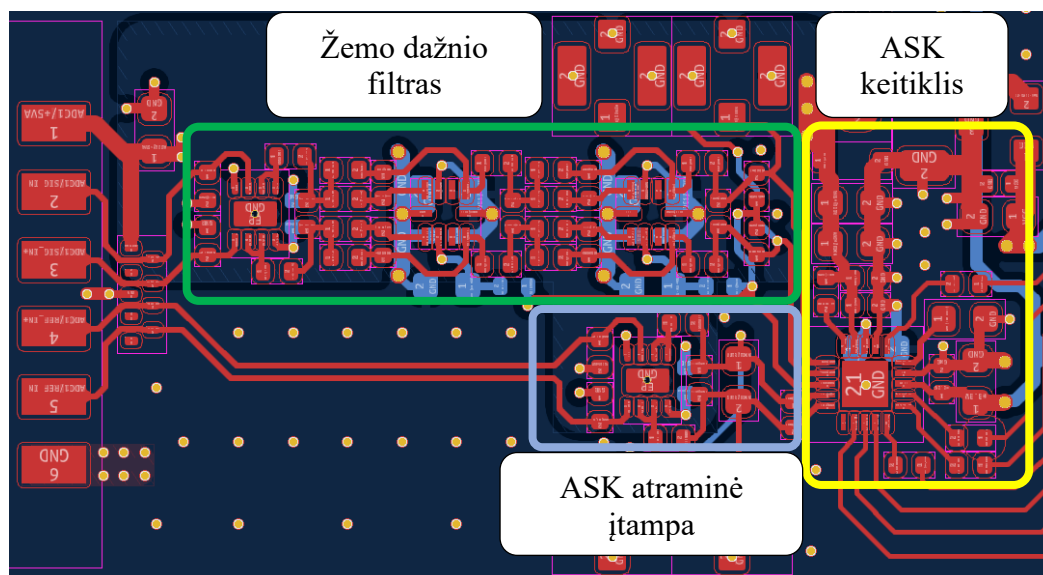
2.5. Prietaisų spausdintinių plokščių projektavimas

Suprojektuota keturių sluoksnių spausdintinė plokštė kaip ir testuojant žemo dažnio filtrą. Sluoksnių išdėstymas yra toks: 1 – signalai, 2 ir 3 – vientisos žemės plokštumos, 4 – signalai ir žemės plokštuma (žr. 39 pav.). Viršutiniame sluoksnyje žemės plokštuma nenaudojama, siekiant kontroliuoti žemės srovių tekėjimo kelius ir išvengti nepageidaujamų srovės kilpų. Vietoj to, grįžtamųjų srovių keliai nukreipiami per vidinius žemės sluoksnius, kuriuose užtikrinamas vientisas ir mažo impedanso pagrindas. Naudojamas dielektriko storis tarp signalo ir žemės sluoksnio yra 0,1 mm. Tokia konstrukcija sumažina elektromagnetinių trukdžių įtaką analoginėms grandinėms. Taip pat tankiai sutrumpinti žemės sluoksniai sumažina žemės induktyvumą ir žemės įtampos bangavimą. Kai signalas pereina iš vieno sluoksnio į kitą, šalia jo esanti metalizuota perėjimo kiaurymė sudaro trumpą grįžtamąjį kelią srovėms, taip sumažinant elektromagnetinį spinduliavimą bei išlaikant signalo vientisumą. Komponentų išdėstymas plokštėje buvo atliktas vadovaujantis gamintojų rekomendacijomis, siekiant užtikrinti optimalų veikimą ir minimalų triukšmo lygį. Plokštėje sukurtos trys funkcinės zonos: analoginė dalis, skaitmeninė dalis ir maitinimo grandinės. Toks išdėstymas leidžia sumažinti triukšmo sklaidimą tarp zonų. Spausdintinės plokštės matmenys yra 90,0 mm × 62,5 mm.



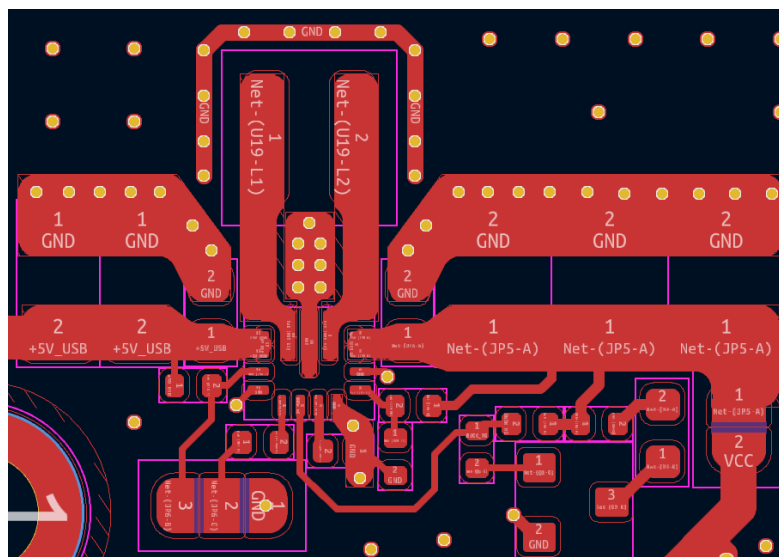
39 pav. Spausdintinės plokštės komponentų išdėstymas

40 paveiksle pateikta suprojektuotos spausdintinės plokštės analoginė dalis. Ši dalis suskirstyta į tris pagrindines funkcinės zonas: žemo dažnio filtrą, ASK keitiklio atraminės įtampos grandinę ir patį ASK keitiklį. Žemo dažnio filtro dalyje (žaliai pažymėta) išdėstyti kelių pakopų filtrai, sudaryti iš aktyviųjų ir pasyviųjų komponentų. Komponentai išdėstyti kompaktiškai ir simetriškai, o signalų takeliai yra kiek įmanoma trumpesni. Filtras orientuotas taip, kad signalas keliautų tiesia linija nuo įėjimo link ASK keitiklio, išvengiant nereikalingų perėjimų. ASK keitiklio atraminės įtampos grandinėje (šviesiai mėlyna dalis) komponentai išdėstyti kuo arčiau ASK keitiklio įėjimo, kad būtų išvengta įtampos nuostolių bei trukdžių perdavimo. Kadangi bet kokie šios įtampos svyravimai tiesiogiai veikia visą matavimo tikslumą, ši zona fiziškai atskirta nuo triukšmingesnių skaitmeninių ar maitinimo dalių. Trečioji zona (geltonai pažymėta) – tai pats ASK keitiklis. Į ASK keitiklį prijungtas žemo dažnio filtras ir atraminė įtampos kartotuvas. Iš ASK keitiklio skaitmeniniai signalai perduodami duomenų linijomis į skaitmeninę plokštės dalį.



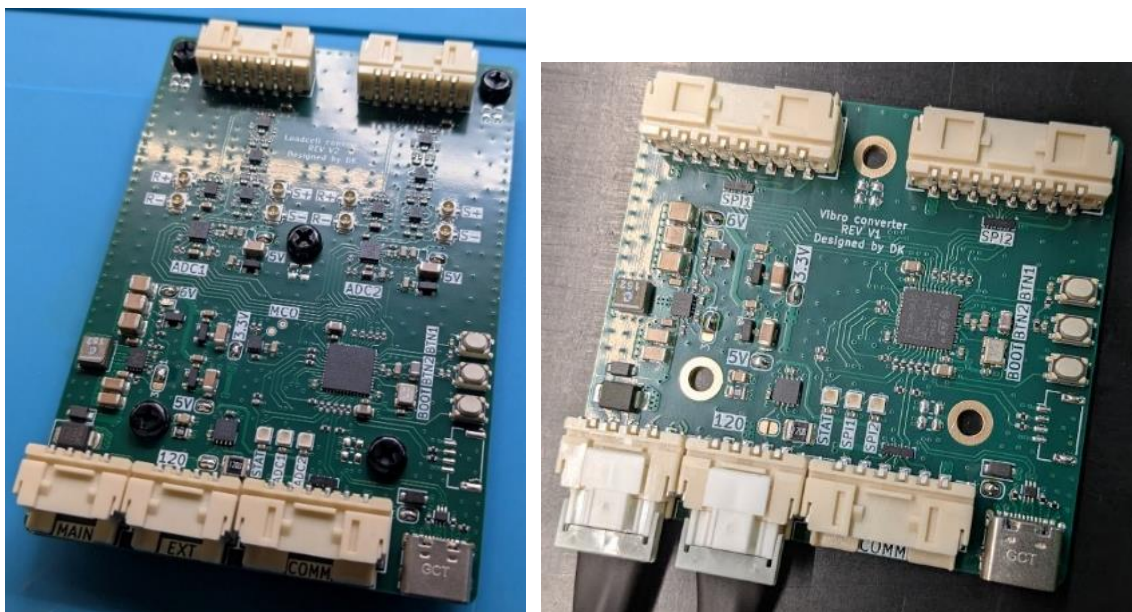
40 pav. Išstrasuota analoginė dalis spausdintinėje plokštėje

41 paveiksle suprojektuotas aukštinantis-žeminantis įtampos keitiklis, skirtas stabiliai ir efektyviai konvertuoti grandių maitinimo įtampą. Centrinėje dalyje, viršuje, matoma induktyvumo ritė, kurios aikštelės prijungtos plačiais takeliais. Kairėje ir dešinėje pusėse išdėstyti įėjimo ir išėjimo kondensatoriai. Jie naudojami tiek įėjimo įtampos filtravimui, tiek išėjimo įtampos stabilizavimui. Įėjimo pusėje esantys kondensatoriai slopina momentinius įtampos svyravimus, atsirandančius dėl apkrovos pokyčių, o išėjimo kondensatoriai sumažina išėjimo įtampos svyravimus. Keitiklio išėjimo takelis turi įpjovą. Tai leidžia išmatuoti ar keitiklis veikia teisingai ir tik tada prijungti išėjimą prie tolimesnių grandinių.



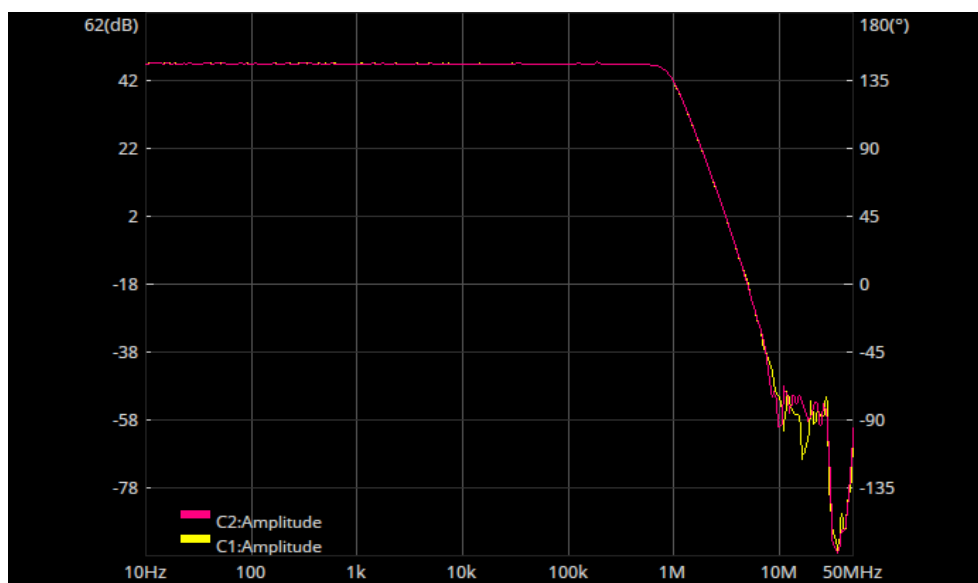
41 pav. Išstrauotas aukštinantis-žeminantis įtampos keitiklis spausdintinėje plokštėje

Gavus pagamintas spausdintines plokštes, jos pirmiausia vizualiai apžiūrimos, siekiant įvertinti gamybos kokybę – patikrinami takeliai, kontaktiniai paviršiai bei galimi mechaniniai pažeidimai. Po to plokštės nuvalomos izopropilo alkoholiu, siekiant pašalinti galimus gamybos likučius, dulkes ir riebalus. Norint užtikrinti vienodą ir tikslų litavimo pastos kiekį, litavimo pasta ant kontaktinių vietų užtepama naudojant trafaretą. Tai ypač svarbu komponentų susilitavimui, nes per mažas arba per didelis pastos kiekis gali lemti nekokybiškus sujungimus. Siekiant sutrumpinti surinkimo laiką ir išvengti klaidų, surinkimo metu naudojamas interaktyvus internetinis puslapis, sugeneruotas naudojant „Interactive HTML BOM“ įrankį, integruotą „KiCAD“ programinėje įrangoje. Šis įrankis leidžia matyti visų komponentų vietas, jų žymėjimus ir reikšmes. Sukomplektavus visus komponentus, lydmetalis ištirpinamas, naudojant karšto oro fėną (žr. 42 pav.). Prieš įjungiant įrenginį, atidžiai patikrinama, ar maitinimo grandinėse nėra trumpų jungimų. Jei įtampos reikšmės atitinka projektuotas vertes, į mikrovaldiklį įkeliama pirminė programinė įranga, skirta patikrinti jo veikimą.



42 pav. Sulituotos svorio jutiklio ir akcelerometrų matavimo spausdintinės plokštės

Surinkus spausdintinę plokštę, atliktas žemo dažnio filtro testavimas. Signalų generatorius buvo prijungtas prie svorio jutiklio jungties, o oscilografas – prie diferencinių išėjimų „S+“ ir „S-“. Gautame DACH grafike (žr. 43 pav.) matoma, kad filtro pralaidumo juosta iki -3 dB siekia 820,89 kHz, signalo slopinimas ties 12,8 MHz yra -103 dB, o signalo stiprinimas – 47 dB. Gauti rezultatai labiau atitiko modeliavimo rezultatus nei ankstesnius matavimus, atliktus su žemo dažnio filtro testavimo plokšte. Šį tikslumą galima paaiškinti optimizuotu komponentų išdėstymu galutinėje svorio jutiklio matavimo plokštėje. Takeliai trumpesni, komponentai išdėstyti tankiau, todėl sumažinti parazitiniai talpumas ir induktyvumai.

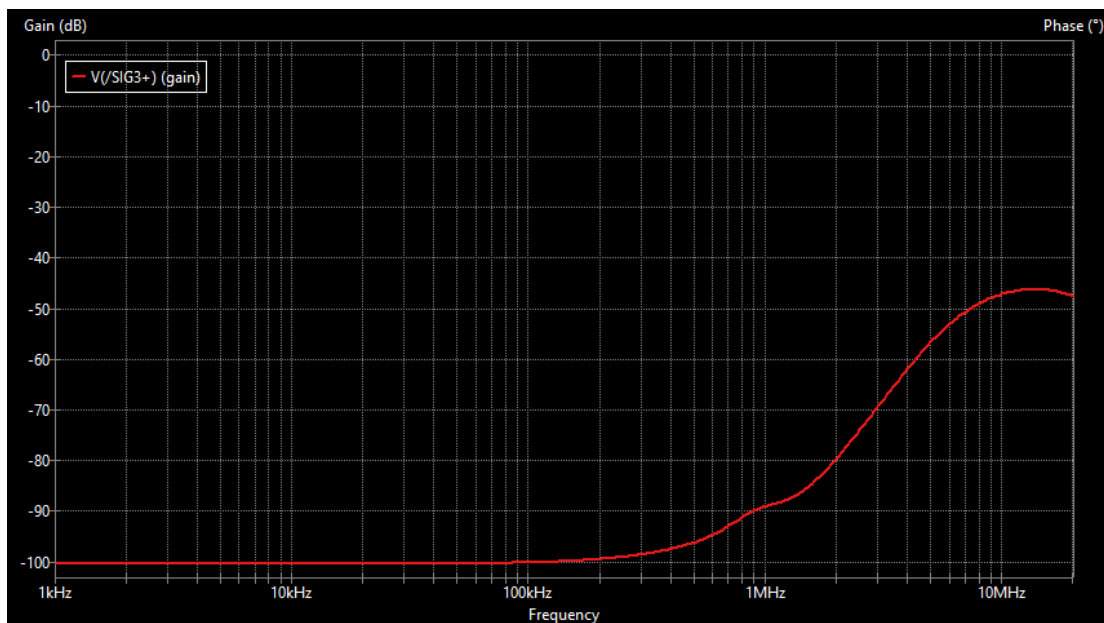


43 pav. Išmatuotas suriktos plokštės žemo dažnio filtras

Taip pat buvo atlikti sinfazinių triukšmų slopinimo (CMRR, angl. *Common Mode Rejection Ratio*) matavimai. Bandymo metu prie diferencinių įėjimų, esančių svorio jutiklio jungtyje, buvo prijungti laidai, kurie abu buvo prijungti prie to paties signalo generatoriaus išėjimo. Kaip matyti iš 44 paveikslėlio, realiai išmatuota CMRR -38 dB reikšmė neatitiko modeliavimo programoje gautos vertės -100 dB (žr. 45 pav.). Šis neatitikimas gali būti paaiškinamas keliais veiksniais: realioje plokštėje atsiradusi takelių asimetriją, komponentų tolerancijos ar žemės potencialo svyravimais tarp grandinės taškų. Be to, net ir nedidelis skirtumas tarp laidų ilgio ar impedanso gali sumažinti CMRR kokybę.



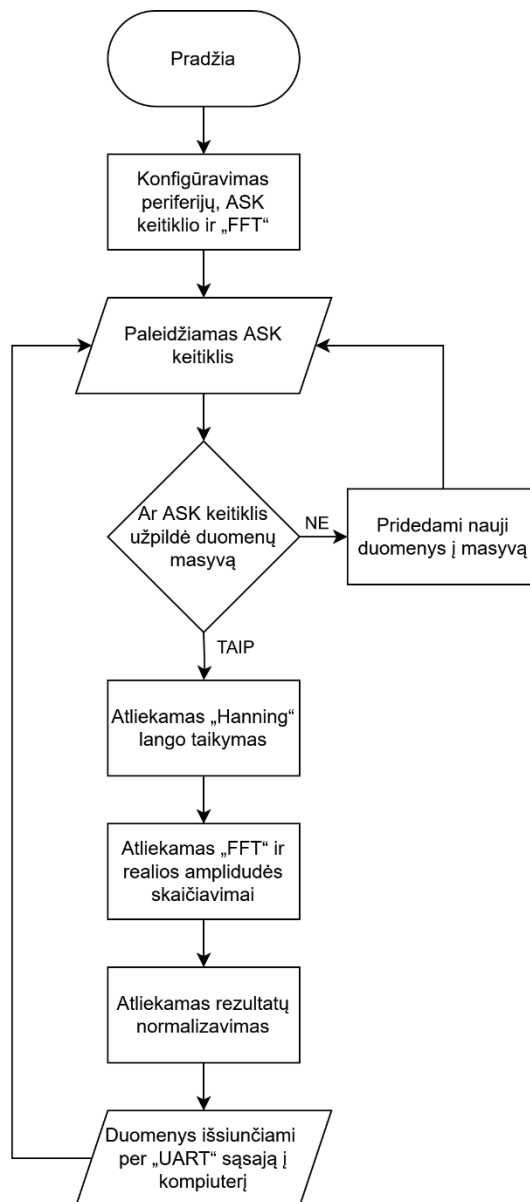
44 pav. Žemo dažnio filtro CMRR svorio jutiklio matavimo spausdintinėje plokštėje



45 pav. Žemo dažnio filtro CMRR modeliavimo programoje

2.6. Prietaisų programinės įrangos kūrimas

Blokinis mikrovaldiklio veikimo algoritmas pateiktas 46 paveiksle. Įjungus sistemą, mikrovaldiklis pirmiausia patikrina „BOOT0“ kontakto būseną, kuri nurodo, koku režimu jis turi veikti. Jeigu „BOOT0“ signalo lygis yra žemas, mikrovaldiklis pereina į programos vykdymo režimą. Jei signalo lygis yra aukštas – jis lieka programavimo režime. Vėliau mikrovaldiklis sukonfigūruoja vidinius dažnio daugiklius ir daliklius. Tokiu būdu sukuriama atitinkami taktiniai dažniai skirtingoms periferijoms. Tada atliekama periferijų, įskaitant UART sąsają, ASK keitiklio valdymą ir DMA, konfigūracija. Galiausiai inicializuojamas ir paleidžiamas išorinis ASK keitiklis, kuris pradeda svorio jutiklio matavimą. Pagrindinis programos vykdymas vyksta uždaro ciklo principu. Mikrovaldiklis laukia, kol ASK keitiklis sugeneruos žemo lygio impulsą ant „DRDY“ (angl. *Data Ready*) kontakto, kuris indikuoja, kad nauji duomenys yra paruošti nuskaitymui. Duomenys iš karto nuskaitymi iš ASK keitiklio atminties ir įrašomi į mikrovaldiklio atmintyje esantį duomenų masyvą. Kai duomenų masyvas užpildomas, atliekamas signalų apdorojimas – duomenims taikomas langavimo algoritmas (pvz., „Hanning“ langas). Tada atliekama greitoji Furjė transformacija (FFT), kurios pagalba diskretaus laiko srities signalas konvertuojamas į dažnių spektrą. Gauti rezultatai normalizuojami ir išsiunčiami į kompiuterį per „UART“ sąsają. Kompiuterio pusėje dažnių spektras vizualizuojamas naudojant MATLAB programinę įrangą, kas leidžia atlikti tolesnę analizę.



46 pav. Mikrovaldiklio programos algoritmas

Programuoti „STM32“ mikrovaldiklį buvo pasirinkta naudoti „STMicroelectronics“ gamintojo sukurta „STM32CubeIDE“ programinę įrangą. Ši programinė įranga leidžia generuoti žemo lygio paprogrames nustatytais parametrais. Naudojant šį įrankį galima atlikti periferijų konfigūracijas (ASK, UART, DMA ir kt.) bei išvadų nustatymus, išvengiant rankinio registrų programavimo. Be to, „STM32CubeIDE“ aplinka palaiko patogią programos derinimo funkciją – galima sustabdyti programos vykdymą konkrečiose kodo vietose, stebėti kintamųjų reikšmes realiu laiku bei analizuoti programos eigą žingsnis po žingsnio. Toks derinimo mechanizmas žymiai pagreitina klaidų identifikavimą.

ASK keitiklio konfigūravimas ir duomenų nuskaitymas vykdomas per 4 laidų „SPI“ sąsają „MODE 1“ režime. Maksimalus duomenų perdavimo greitis 40 MHz. Įprastai prieš ir po komunikacijos per „SPI“ sąsają būtina nustatyti „CS“ į žemą lygį, o paskiau į aukštą lygį.

„STM32H5“ mikrovaldiklio „SPI“ periferija atlieka šią funkciją automatiškai prijungus ASK keitiklio „CS“ kontaktą prie „Hardware NSS Signal“. Toks privalumas leidžia paleisti autonominę „GPDMA“ (angl. *General Purpose Direct Memory Access*) užklausą duomenis „SPI“ periferijoje perkelti į mikrovaldiklio atmintį. „GPDMA“ veikia nepriklausomai nuo mikrovaldiklio skaičiavimo bloko ir yra ženkliai spartesnis. Įprastame režime „GPDMA“ perkėlus duomenis iškviečia pertrauktį, kurios metu duomenys yra apdorojami ir išsaugomi. „GPDMA“ konfigūracija atliekama paprastai. Nustatomas užklausos tipas, dažniausiai periferija ir jos registras (šiuo atveju „SPI_RX“). Tada nurodoma duomenų perkėlimo kryptis ar iš mikrovaldiklio atminties į periferiją ar atvirkščiai (šiuo atveju duomenys perkeliama iš periferijos į mikrovaldiklio atmintį). Galiausiai, nustatomi atminčių duomenų pločiai ir ar didinti atminties adresą po kiekvieno duomenų perkėlimo. Kadangi „SPI“ periferija yra 8 bitų pločio, pasirenkama vieno baido plotis, o mikrovaldiklio atminties adresas automatiškai didinamas. Tokiu būdu automatiškai perkeliama ASK keitiklio 24 bitų matavimo rezultatas. Iškviesti „GPDMA“ užklausą tik kai ASK keitiklis baigia matavimą panaudotas „DRDY“ signalas. Šis signalas sukonfigūruotas iškviesti programos pertrauktį, kurios metu paleidžiama „GPDMA“ užklausa. Visas duomenų procesas yra autonominis ir nepriklausomas nuo pagrindinės programos. Užpildžius duomenų masyvą, vyksta laukimas kol duomenys bus galutinai apdoroti ir paleistas procesas iš naujo.

ASK konfigūravimas atliekamas nuskaitant prietaiso identifikacijos kodą, kuris leidžia įsitikinti, kad prijungtas prietaisas veikia teisingai. Tada atliekamas keitiklio konfigūravimas, kurio metu nustatomas keitiklio multiplekseris, įtampos kartotuvai, veikimo režimas, skaitmeninio filtro tipas ir išėjimo duomenų greitis. ASK keitiklio matavimų paleidimas įvyksta nustačius aukšto lygio signalą „START“ kontakte.

Kai duomenų masyvą yra užpildomas pradedamas surinktų apdorojamas, kurio metu duomenys pakeičiami iš diskretaus laiko srities į amplitudžių ir dažnių spektrą. Skaičiavimų eiga apima šiuos pagrindinius žingsnius. Pirmiausia atliekamas lango funkcijos taikymas. Kadangi surinkti duomenys yra baigtinio ilgio, tiesioginė jų analizė gali sukelti spektrinę nuotėkį, kuris iškraipo tikrąsias dažnių komponentes. Siekiant sumažinti šį efektą, duomenims taikoma lango funkcija (angl. *Window Function*), tokia kaip „Hanning“ ar „Blackman“ langas. Langų funkcijos sumažina duomenų amplitudes kraštuose. Prieš atliekant Furjė transformaciją, surinkti duomenys buvo padauginami iš „Hanning“ lango funkcijos. Hanning lango funkcija apibūdinama taip:

$$w(i) = 0,5 \times \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{i}{N-1}\right)\right), \quad (8)$$

čia:

i – matavimo numeris;

N – matavimų kiekis.

Paruošti vibracijos duomenys analizuojami dažnių srityje, taikant greitąją Furjė transformaciją (FFT), kuri leidžia signalą iš laiko srities perkelti į dažnių sritį. FFT algoritmas suskaido signalą į sinusoidinių dedamųjų spektrą, pateikdamas kompleksinių koeficientų masyvą, kuriame kiekvienas elementas atitinka tam tikrą dažninį. Skaičiavimams atlikti buvo panaudota ARM „CMSIS-DSP“ biblioteka, optimizuota ARM Cortex-M architektūrai. Joje naudojama funkcija „arm_rfft_fast_f32()“ leidžia efektyviai transformuoti realaus laiko duomenis į dažnių spektrą. Programoje pasirinkta maksimali galimų duomenų apimtis – 4096 taškai, siekiant pasiekti didesnę skilčių rezoliuciją. Skilčių rezoliucija apskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}, \quad (9)$$

čia:

f_s – diskretizavimo dažnis;

N – FFT taškų kiekis.

Esant 24,471 kHz diskretizavimo dažniui ir naudojant 4096 taškų FFT, vienos skilties plotis yra ~ 5,97 Hz. Toks tikslumas leidžia detaliai analizuoti vibracijos spektrą. Išmatuota, kad mikrovaldiklis STM32, veikiantis 213 MHz taktiniu dažniu, 4096 taškų FFT skaičiavimą atlieka per maždaug 5 ms.

FFT rezultatai yra kompleksiniai skaičiai, turintys realiąją (Re) ir menamąją (Im) dalis. Norint gauti signalo amplitudes dažnių srityje, būtina apskaičiuoti kiekvieno dažnio komponentės modulį. Tam naudojama „CMSIS-DSP“ bibliotekos funkcija „arm_cmplx_mag_f32()“, kuri apskaičiuoja kiekvieno taško modulį pagal formulę:

$$FFT(f) = \sqrt{Re^2 + Im^2}, \quad (10)$$

Gautas reikšmės galima interpretuoti kaip atskirų dažnių amplitudes, sudarančias bendrą signalo spektrą.

Kadangi FFT metu gautos dažnių amplitudės nėra tiesiogiai išreikštos įtampa, būtinas spektrinių duomenų normalizavimas. Tai leidžia gautas reikšmes interpretuoti kaip tikrąsias signalo amplitudes. Be to, kadangi prieš atliekant FFT skaičiavimą buvo taikytas „Hanning“

langas, būtina kompensuoti jo amplitudės mažinimą. „Hanning“ lango koeficientas yra 0,5 ir įtraukiama į normalizavimo formulę. Normalizavimas atliekamas pagal šią formulę:

$$u(f) = FFT(f) * \frac{N}{2} * 0,5, \quad (11)$$

čia:

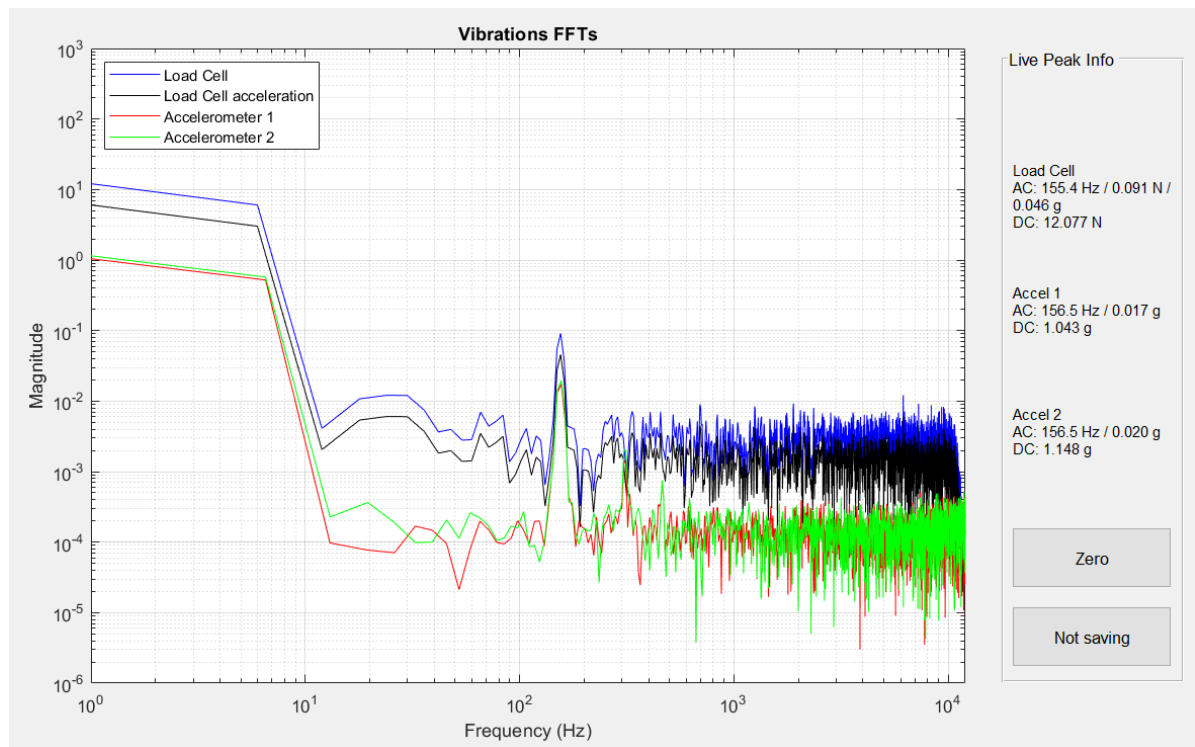
$FFT(f)$ – kompleksinės FFT reikšmės amplitudės;

N – FFT taškų kiekis.

Tokiu būdu spektriniai duomenys tampa tiesiogiai interpretuojami kaip amplitudės reikšmės, atitinkančios realaus signalo aukščiausiąs įtampas.

Apskaičiuota Furjė transformacija realiuoju laiku perduodama į kompiuterį naudojant „UART“ sąsają. Kadangi skaičių siuntimas kaip „ASCII“ simbolių seka yra neefektyvus ir lėtas, duomenų siuntimas įgyvendintas dvejetainiu formatu. Kiekvienas perduodamas paketas susideda iš specialios paketo pradžios reikšmės ir FFT rezultatų masyvo. Siekiant užtikrinti efektyvų ir nepertraukiamą duomenų perdavimą, „UART“ sąsaja sukonfigūruota naudoti „GPDMA“. Taip siuntimo procesas atliekamas tiesiai iš atminties į „UART“ periferiją, be pagrindinės programos pertraukimo. Kol vyksta duomenų siuntimas, ASK keitiklis toliau renka naujus duomenis į masyvą. Išmatuotas rezultatų atnaujinimo dažnis, nuo duomenų surinkimo iki jų perdavimo, yra maždaug 4 Hz, kas yra pakankama realaus laiko vibracijų stebėjimui.

Gauti duomenys yra atvaizduojami MATLAB programinėje aplinkoje (žr. 47 pav.). Vartotojo sąsaja leidžia vienu metu stebėti dviejų akcelerometrų matuojamą akceleraciją bei svorio jutiklio registruojamą jėgą dažnių srityje. Kiekvienam jutikliui pateikiamos dvi reikšmės. DC komponentė, kuri atitinka pirmojo FFT skilties reikšmę ir rodo signalo statinę dalį. AC komponentė, kuri nurodo dažnį su didžiausia amplitude ir atitinkama reikšme. Paleidus duomenų saugojimą, kiekvienam jutikliui įrašoma visa FFT reikšmių seka bei didžiausios amplitudės duomenys. Šie duomenys išsaugomi CSV formatu, kad būtų galima atlikti tolimesnę analizę ar apdorojimą, naudojant kitas priemones.



47 pav. MATLAB programinėje įrangoje atvaizduojamos vibracijos iš prietaisų

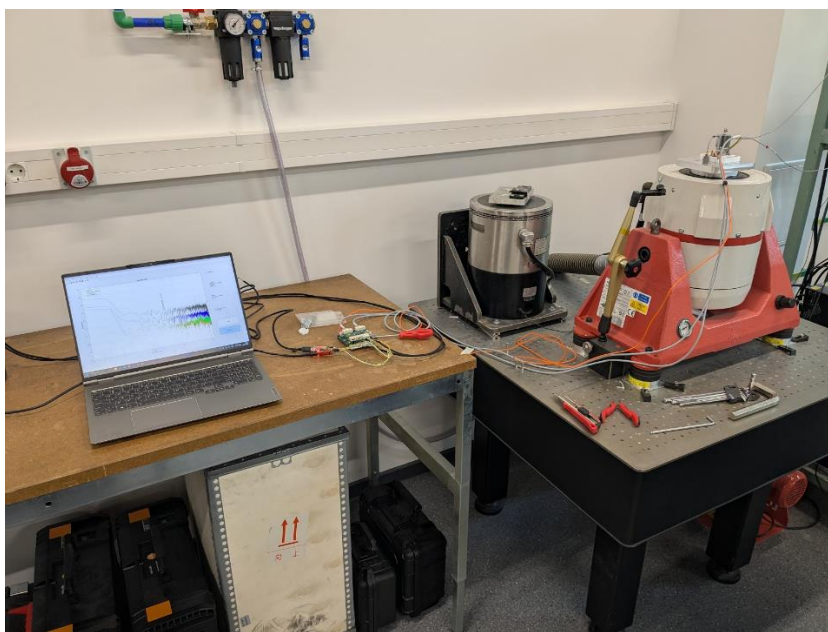
2.7. Aukšto dažnio vibracijos sistemos projektavimo išvados

1. Pasirinktas cilindrinis svorio jutiklis yra ± 30 kg diapazono ir 2,0 mV/V jautrumo, tinkantis vertikalių vibracijų fiksavimui.
2. Pasirinktas 24 bitų „delta-sigma“ tipo ASK keitiklis „ADS127L11“ pasižymi aukšta skiriamąja geba ir kokybišku FIR skaitmeniniu filtru, užtikrinančiu efektyvų aukšto dažnio triukšmų ir spektro persidengimo slopinimą.
3. Suprojektuotas penktos eilės žemo dažnio filtras, paremtas „Butterworth“ tipu ir „Multiple Feedback“ (MFB) topologija, pasiekiantis 48,8 dB stiprinimą, pralaidumo juosta 687,39 kHz ir -118,4 dB slopinimą ties 12,8 MHz.
4. Filtro modeliavimas atliktas „NGSPICE“ aplinkoje. Realios filtro stiprinimo bei slopinimo charakteristikos atitinka skaičiavimus su nedideliais nuokrypiais dėl komponentų tolerancijų ir parazitinių reiškinių.
5. Sudarytos ir aprašytos matavimų prietaisų struktūrinės, elektrinės schemos ir spausdintinės plokštės. Išmatuoti svorio jutiklio matavimo plokštės žemo dažnio filtrų charakteristikos sutapo su modeliavimo rezultatais.

6. Mikrovaldiklis „STM32H523“ su ARM Cortex-M33 branduoliu (250 MHz) ir FPU buvo pasirinktas dėl savo aukšto našumo ir plačios periferijos. Jis sugeba atlikti 4096 taškų FFT transformaciją per ~5 ms, kas yra pakankama realaus laiko vibracijų analizei.
7. Panaudoti skaitmeninio signalo apdorojimo algoritmai – „Hanning“ langas, FFT, amplitudžių apskaičiavimas ir normalizavimas. Tai užtikrino tikslų vibracijų atvaizdavimą dažnių spektre ir amplitudžių interpretavimą realiomis fizikinėmis reikšmėmis.
8. Sukurta MATLAB vizualizacijos sistema leidžia realiuoju laiku atvaizduoti dviejų akcelerometrų ir vieno svorio jutiklio duomenis, pateikiant tiek statines (DC), tiek dinamines (AC) reikšmes ir automatiškai išsaugant rezultatus CSV formatu.

3. VIBRACIJŲ MATAVIMAI SU SUKURTAIS PRIETAISAI

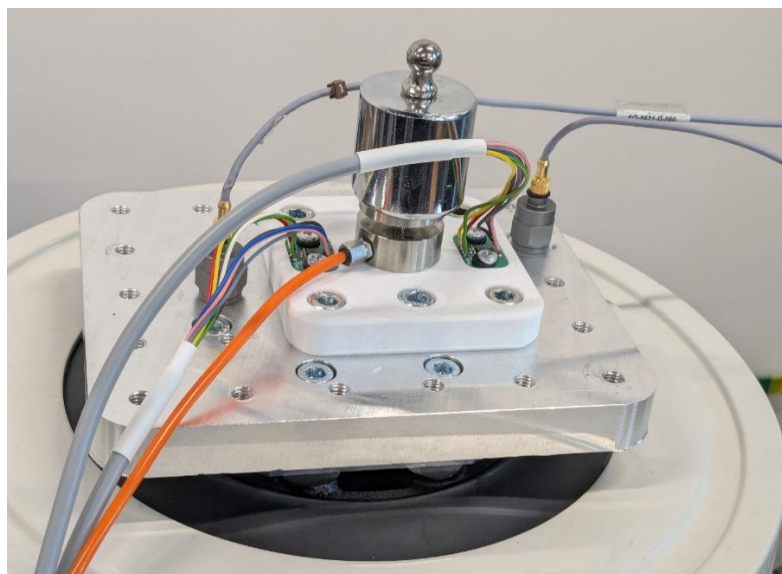
Paruošus matavimo prietaisus ir programinę įrangą, atliktas eksperimentinis tyrimas laboratorijoje (žr. 48 pav.), siekiant įvertinti, ar svorio jutiklis gali būti naudojamas akceleracijos matavimui. Tyrimo metu lyginamas svorio jutiklio išmatuotos akceleracijos reikšmės su atskaitiniais duomenimis, gautais iš akcelerometrų.



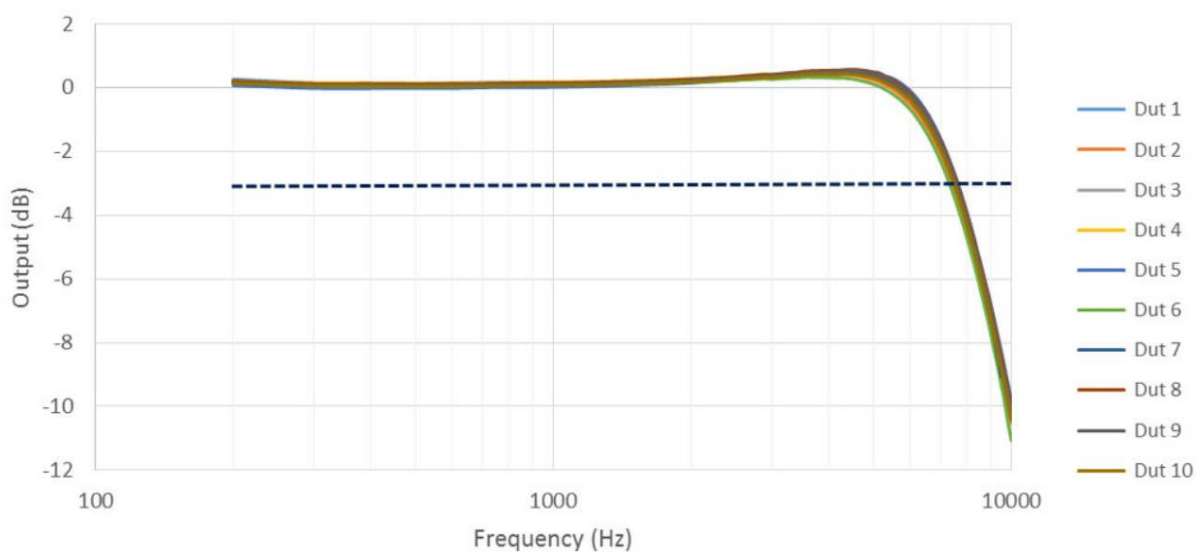
48 pav. Svorio jutiklio ir akcelerometrų matavimas laboratorijoje

Pirmiausia buvo suprojektuotas jutiklių laikiklis, kuris vėliau atspausdintas naudojant 3D spausdintuvą. Prie laikiklio pritvirtinti du „IIS3DWB“ akcelerometrai ir vienas svorio jutiklis (žr. 49 pav.). Akcelerometrai sukonfigūruoti ± 4 g matavimo diapazone, jų pralaidumo juosta siekia iki 6 kHz (žr. 50 pav.). Surinktas laikiklis buvo pritvirtintas prie vibracinio stendo.

Naudotas vibracinis stendas turi du akcelerometrus, iš kurių vienas naudojamas vibracijos stendo kontrolei uždarojo grįžtamojo ryšio režimu, o kitas – vibracijos stebėjimui ir matavimui. Šių akcelerometrų dažninė juosta siekia iki 4 kHz.



49 pav. Ant vibracijos stendo uždėti matuojami jutikliai



50 pav. Akcelerometro „IIS3DWB“ Z ašies išėjimo atsakas [21]

Pirmiausia nustatoma svorio jutiklio plokštelės masė. Kadangi tiesiogiai šios masės išmatuoti neįmanoma, atliktas matavimas ant vibracijos stendo. Esant 1 kHz 0,5 g vibracijai, išmatuota svorio jutiklio jėga lygi 0.093 N. Apskaičiuoti svorio jutiklio plokštelės masę galima pasinaudojus 12 formule. Svarbu paminėti, kad akcelerometrų matavimo rezultatai pateikiami ne SI sistemos vienetais – pagreičio reikšmės išreiškiamos „g“ vienetais, kur $1\text{ g} \approx 9.80665\text{ m/s}^2$.

$$m_1 = \frac{F}{g * 9,80665}, \quad (12)$$

čia:

m_1 – svorio jutiklio plokštelės masė;

g – išmatuota akceleracija;

F – svorio jutiklio matuojama jėga.

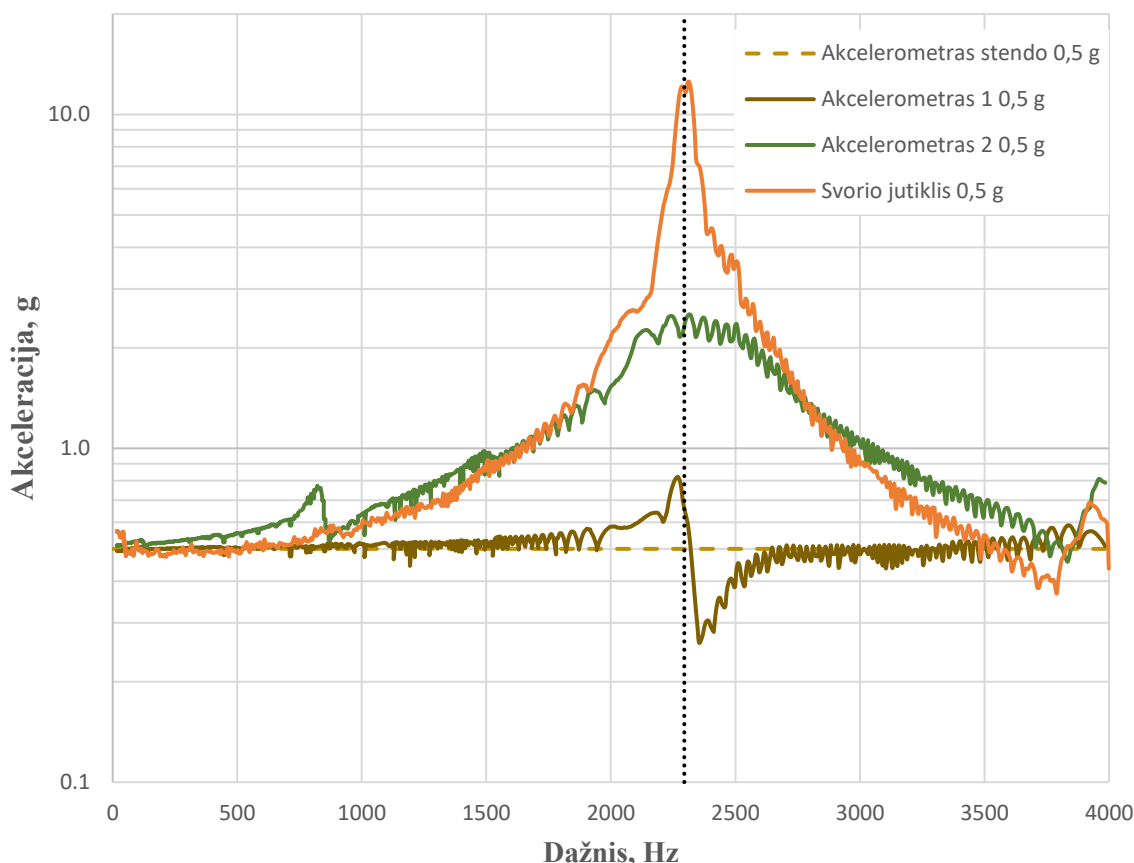
Apskaičiuota svorio jutiklio plokštelės masė lygi 19 gramų. Ši masė turi būti pridėta prie objekto masės, kuris yra priklijuotas ant svorio jutiklio plokštelės. Svorio jutiklio jėga gali būti pakeista į akceleraciją (žr. 13 formulę), remiantis žinoma svorio jutiklio plokštelės mase ir kalibracinio svarmens mase.

$$g = \frac{F}{(m_1 + m_2) * 9,80665}, \quad (13)$$

čia:

m_2 – pritvirtinto prie svorio jutiklio objekto masė.

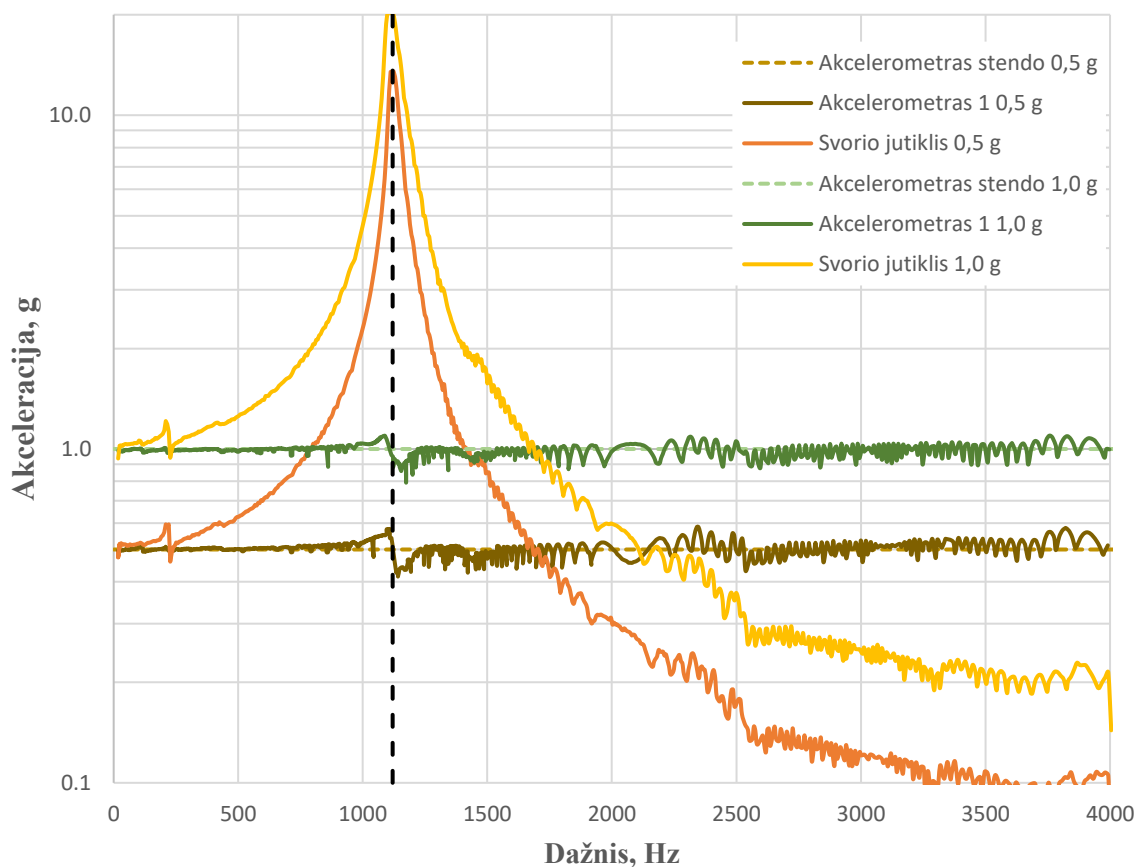
Kito eksperimento metu buvo atliktas svorio jutiklio ir akcelerometrų atsako dažnių srityje palyginimas. Išskirtinis šio bandymo aspektas – ant svorio jutiklio plokštelės buvo pritvirtintas vienas iš akcelerometrų („Akcelerometras 2“). Eksperimento metu vibracijos intensyvumas buvo nustatytas į 0,5 g, o matavimai buvo atlikti keičiant logaritmiškai vibracijos dažnį 20-4000 Hz diapazone. 51 paveiksle matyti, kad ties dažniu ~2295 Hz (pažymėta punktyrine juoda linija) tiek svorio jutiklis, tiek pritvirtintas akcelerometras registruoja ryškų rezonansinį piką. Svorio jutiklio atsakas viršija 10 g, o akcelerometras fiksuoja šiek tiek mažesnę, bet panašaus pobūdžio kreivę. Tai rodo, kad rezonuoja pati svorio jutiklio mechaninė struktūra. Akcelerometras 1, kuris buvo tvirtinamas ant laikiklio, ir vibracinio stendo integruotas akcelerometras rodo daug tolygesnį atsaką, neparodant stipraus rezonanso – tai reiškia, kad rezonansas yra lokalus ir būdingas konkrečiai svorio jutiklio geometrijai bei masei. Svarbu pažymėti, kad svorio jutiklio ir „Akcelerometro 2“ atsakai yra labai artimi, o tai patvirtina, kad svorio jutiklis gali fiksuoti akceleracijos pokyčius, bent jau tam tikrame dažnių ruože, tačiau rezonansinė sritis iškreipia matavimo tikslumą.



51 pav. Svorio jutiklio akceleracijos lyginimas su antru akcelerometru

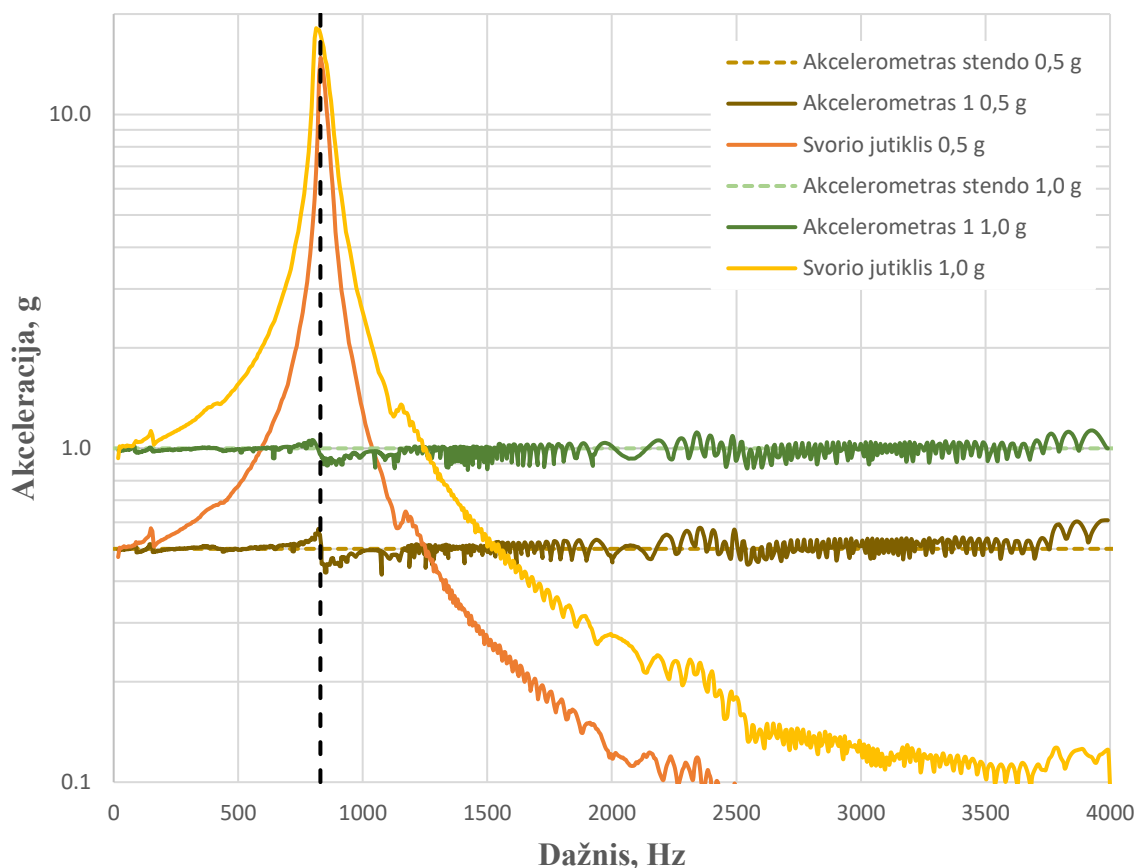
Kito eksperimento metu ant svorio jutiklio plokštelės buvo pritvirtintas kalibracinis $100 \pm 0,016$ g svarmuo. Tai leido įvertinti ar 13 formulė leidžia tiksliai išmatuoti akceleraciją su svorio jutikliu, kai tik žinoma uždėto kalibracijos svarmenio masė ir svorio jutiklio plokštelės masė. Brūkšniuota juoda linija grafike žymi rezonansinį dažnį, kuris yra apie 1120 Hz. Eksperimentas atliktas esant dviem skirtingoms vibracijos intensyvumo sąlygoms – kai akceleracija lygi 0,5 g ir 1,0 g. 52 paveiksle pateiktas matavimų rezultatai, kur akceleracijos dažninės charakteristikos, gautos iš dviejų akcelerometrų ir svorio jutiklio. Grafike pastebima, kad rezonansinėje srityje (ties ~ 1120 Hz) svorio jutiklis registruoja žymiai didesnę akceleraciją nei akceleras. Tai aiškiai rodo konstrukcinį rezonansą, kai apkrovos svyravimai stipriai sustiprinami dėl sistemos mechaninių savybių. Esant 1,0 g akceleracijai, svorio jutiklio atsakas tampa dar labiau išreikštas, o tai atspindi labai didelį svorio jutiklio jautrumą rezonanso taške. Tuo tarpu akcelerometrų atsakai išlieka santykinai pastovūs abiem akceleracijos lygiais, o tai rodo, kad jų tvirtinimo vieta nėra paveikta rezonansinių vibracijų. Pastebėtas mažas rezonansas ties ~ 221 Hz, dėl netvirtos svorio jutiklio prisukimo prie plastikinio laikiklio. Verta paminėti, kad esant žemiems dažniams išmatuotos akceleracijos vertės kinta tolygiau nei aukštesnių dažnių srityje. Taip yra dėl to, kad vibracijų generavimo dažnių diapazonas buvo keičiamas

logaritminiu žingsniu, todėl žemųjų dažnių ruože susidarė daugiau matavimo taškų. Kadangi kai kuriuose dažniuose buvo atlikti keli matavimai, nuspręsta analizei naudoti tik didžiausias amplitudes.



52 pav. Svorio jutiklio akceleracijos lyginimas su 100 g kalibraciniu svarmeniu

Sekančio eksperimento metu ant svorio jutiklio plokštelės buvo pritvirtintas didesnis – $200 \pm 0,030$ g kalibracinis svarelis. Eksperimento sąlygos liko analogiškos: vibracijos intensyvumas buvo nustatytas 0,5 g ir 1,0 g lygiu. 53 paveiksle pavaizduoti matavimų rezultatai. Lyginant su ankstesniu bandymu, pastebimas reikšmingas rezonansinio dažnio poslinkis žemyn – nuo 1120 Hz iki maždaug 830 Hz. Šis pokytis atitinka rezonansinės sistemos elgesį, kur didėjant masės apkrovai, rezonansinis dažnis mažėja.



53 pav. Svorio jutiklio akceleracijos lyginimas su 200 g kalibraciniu svarmeniu

Atliekant FFT analizę, kai dažnio skilties plotis yra apie $\sim 5,97$ Hz, pastebėta, kad esant signalo dažniui arti skilties krašto, dalis energijos pasiskirsto į gretimas skiltis. Dėl to sumažėja stebima amplitudė, nes signalo spektrinė galia nėra koncentruota viename taške. Nepaisant to, amplitudės taškas vis tiek priskiriamas skilties centrui. Siekiant išvengti šio netikslumo, rezultatai filtruojami taip, kad būtų išlaikomos tik maksimalios amplitudės reikšmės. Tokiu būdu, jei tas pats dažnis pasikartoja keliuose matavimuose, pasirenkama ta reikšmė, kurios dažnis yra arčiausiai skilties centro.

Išvados

Baigiamojo magistro darbo metu buvo sėkmingai sukurta aukšto dažnio vibracijų matavimo sistema, skirta vibracijų stebėsenai naudojant deformacijos (svorio) jutiklį. Sistema realizuota tiek techniniu, tiek programiniu lygmeniu – apimant signalo stiprinimą, žemo dažnio filtravimą, realaus laiko FFT analizę bei duomenų perdavimą ir vizualizaciją kompiuteryje. Darbo metu buvo atlikta ši veikla:

- 1) Atlikta vibracijos jutiklių tipų, veikimo principų formulių analizė. Palyginus su akcelerometru, deformacijos jutiklis pasižymėjo papildomu pranašumu – gebėjimu matuoti ir statines apkrovas. Tai suteikia galimybę naudoti tokį jutiklį aviacijoje ar mechanikos diagnostikoje, kur reikalinga vienu metu vertinti ir dinامينius, ir statinius parametrus. Susipažinta su vibracijos jutiklių kalibracijos metodais, naudojant kalibravimo stendą. Nustatyta, kad pasirinktas mikrovaldiklis yra gana našus FFT skaičiavimams realiuoju laiku atlikti. Išanalizuoti vibracijų matavimų praktiniai pritaikymai pramonėje: stebėti guolius ir mechanizmus, nustatyti grąžtų devėjimąsi.
- 2) Sukurtas ir ištirtas penkių pakopų žemo dažnio stiprinimo filtras, kurio slopinimas ties 12,8 MHz siekė -118,4 dB, o stiprinimas – 48,8 dB. Nors sistemos dažninė charakteristika šiek tiek skyrėsi nuo modeliavimo rezultatų, pasiekti rodikliai atitiko keliamus reikalavimus.
- 3) Sukurtos ir paaiškintos deformacijos jutiklio ir akselerometrų prietaisų struktūrinės schemos, kurios leido nustatyti kokių komponentų reikia ir koks yra jų tarpusavio ryšys.
- 4) Suprojektuotos trys elektrinės schemos ir spausdintinės plokštės, naudojantis „KiCad“ programinę įrangą. Atsižvelgta į komponentų gamintojų rekomendacijas ir išdėstymą. Atlikti skaičiavimai siekiant nustatyti, kokius komponentus reikėtų naudoti.
- 5) Sukurti ir įgyvendinti mikrovaldiklio valdymo algoritmai, naudojant „STM32CubeIDE“. Duomenų apdorojimas realizuotas naudojant ARM „CMSIS-DSP“ biblioteką – FFT skaičiavimai (4096 taškų) atlikti per ~5 ms, naudojant 213 MHz taktiniu dažniu veikiančią Cortex-M33 mikrovaldiklį su FPU. Realizuotas duomenų normalizavimo algoritmas leido konvertuoti FFT amplitudes į fizines Vp-p reikšmes, o „Hanning“ lango kompensacija užtikrino teisingą amplitudžių interpretavimą. Sukurta programa MATLAB programinėje įrangoje leido stebėti akselerometrų ir svorio jutiklio duomenis, identifikuoti dominuojantį dažnį ir amplitudę bei automatiškai išsaugoti rezultatus CSV formatu. Sistema pasiekė ~4 Hz atnaujinimo dažnį.

- 6) Eksperimentiniai vibracijų matavimai ant vibracijų stendo parodė, kad deformacijos jutiklis gali būti efektyviai naudojamas ne tik statinėms, bet ir dinaminių virpesių analizėms. Naudojant skirtingus kalibracinius svarmenis (100 g ir 200 g), tiksliai identifikuoti rezonansiniai dažniai. Pastebėta, kad didinant masę rezonansinis dažnis mažėja nuo ~1120 Hz iki ~830 Hz, kas atitinka rezonansinės sistemos teorinį elgesį. Svorio jutiklio atsakas koreliavo su akselerometro duomenimis, patvirtinant, kad tinkamai sukalibravus sistemą, šie jutikliai gali būti naudojami dinaminuose vibracijų tyrimuose, ypač žemųjų dažnių ruože.

Literatūros sąrašas

- [1] Brüel & Kjær (1982). Measuring Vibration.
<https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. spalio 6 d.]
- [2] Ernst Fischer (2015). Sensors for vibration measurement: Principles of operation and measuring ranges.
<https://collab.dvb.bayern/display/TUMzfp/Sensors+for+vibration+measurement%3A+Principles+of+operation+and+measuring+ranges>
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. spalio 6 d.]
- [3] Guo, Aiyin. (2014). A Vibration Sensor Design Research. Sensors and Transducers. 169. 228-234.
https://www.researchgate.net/publication/286494593_A_Vibration_Sensor_Design_Research
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. spalio 6 d.]
- [4] Dipali BANSAL (2012). Potential of Piezoelectric Sensors in Bio-signal Acquisition
https://www.researchgate.net/publication/292834666_Potential_of_Piezoelectric_Sensors_in_Bio-signal_Acquisition
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. spalio 10 d.]
- [5] DEWESoft. Vibration Measurement.
<https://training.dewesoft.com/storage/pro/courses/vibration-measurement.pdf>
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 5 d.]
- [6] Deformacijos jutiklio nuokrypio koregavimas naudojantis temperatūros jutiklius.
https://www.phidgets.com/?view=articles&article=LoadCellCorrection&fbclid=IwAR3sHHrYbY61VCbnCZvD2DkhmoPRHtWDhUGhP_UM3H_A64p38H2GIYriH_U
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 5 d.]
- [7] TI. Application Note. A Basic Guide to Bridge Measurements.
<https://www.ti.com/lit/an/sbaa532a/sbaa532a.pdf>
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 5 d.]
- [8] Wolfgang Reis. Analog-to-Digital Converters.
https://www.ele.uva.es/~lourdes/docencia/Sensores/Tema2/ADC/AD_Converters.pdf
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 7 d.]
- [9] STMicroelectronics. Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS.
https://www.st.com/resource/en/application_note/an4841-digital-signal-processing-for-stm32-microcontrollers-using-cmsis-stmicroelectronics.pdf
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 8 d.]
- [10] Peter Brown. Fundamentals of Vibration Measurement and Analysis Explained. <https://lifetime-reliability.com/wp-content/uploads/2021/03/Fundamentals-of-Vibration-Measurement-and-Vibration-Analysis-Explained.pdf>
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 5 d.]
- [11] Matt Watson, Jeremy Sheldon, Sanket Amin, Hyungdae Lee, Ph.D, and Carl Byington. A comprehensive high frequency vibration monitoring system for Incipient fault detection and isolation of gears, bearings and Shafts/couplings in turbine engines and accessories.

http://alvarestech.com/temp/osacbm/Impact_ADT_ComprehensiveHighFreqVibeMonitoringSystem_IGT107.pdf

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 5 d.]

- [12] Using multi-sensor data fusion for vibration fault diagnosis of rolling element bearings by accelerometer and load cell.

<https://doi.org/10.1016/j.inffus.2013.10.002>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. lapkričio 20 d.]

- [13] Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network

[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00023-3)

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. gruodžio 4 d.]

- [14] Vibration Region Analysis for Condition Monitoring of Gearboxes Using Image Processing and Neural Networks

<https://doi.org/10.1007/s40799-019-00329-9>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. gruodžio 4 d.]

- [15] Bahareh Yaghootkar, Soheil Azimi, and Behraad Bahreyni (2017). A High-Performance Piezoelectric Vibration Sensor

<http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2707063>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. gruodžio 4 d.]

- [16] Marcelo Romanssini, Paulo César, C. de Aguirre, Lucas Compassi-Severo and Alessandro G. Girardi (2023). A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery

<https://doi.org/10.3390/eng4030102>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. gruodžio 4 d.]

- [17] „Agate AT2040“ nešiojamas vibracijų jutiklių kalibravimo stendas.

<https://www.agatetechnology.com/portable-vibration-calibrator/>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. gruodžio 6 d.]

- [18] „ADS127L11“ analoginio – skaitmeninio keitiklio dokumentacija.

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads127l11.pdf>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2025 m. balandžio 4 d.]

- [19] Thomas Kuehl (2009). Using the infinite-gain, MFB filter topology in fully differential active filters.

<https://www.ti.com/lit/an/slyt343/slyt343.pdf>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. gruodžio 4 d.]

- [20] Edward Mullins, Ian Williams, Giuseppe Lo Voi, Raphael Puzio (2017). How to Properly Configure Unused Operational Amplifiers.

<https://www.ti.com/lit/ab/sboa204a/sboa204a.pdf>

[Interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. gruodžio 4 d.]

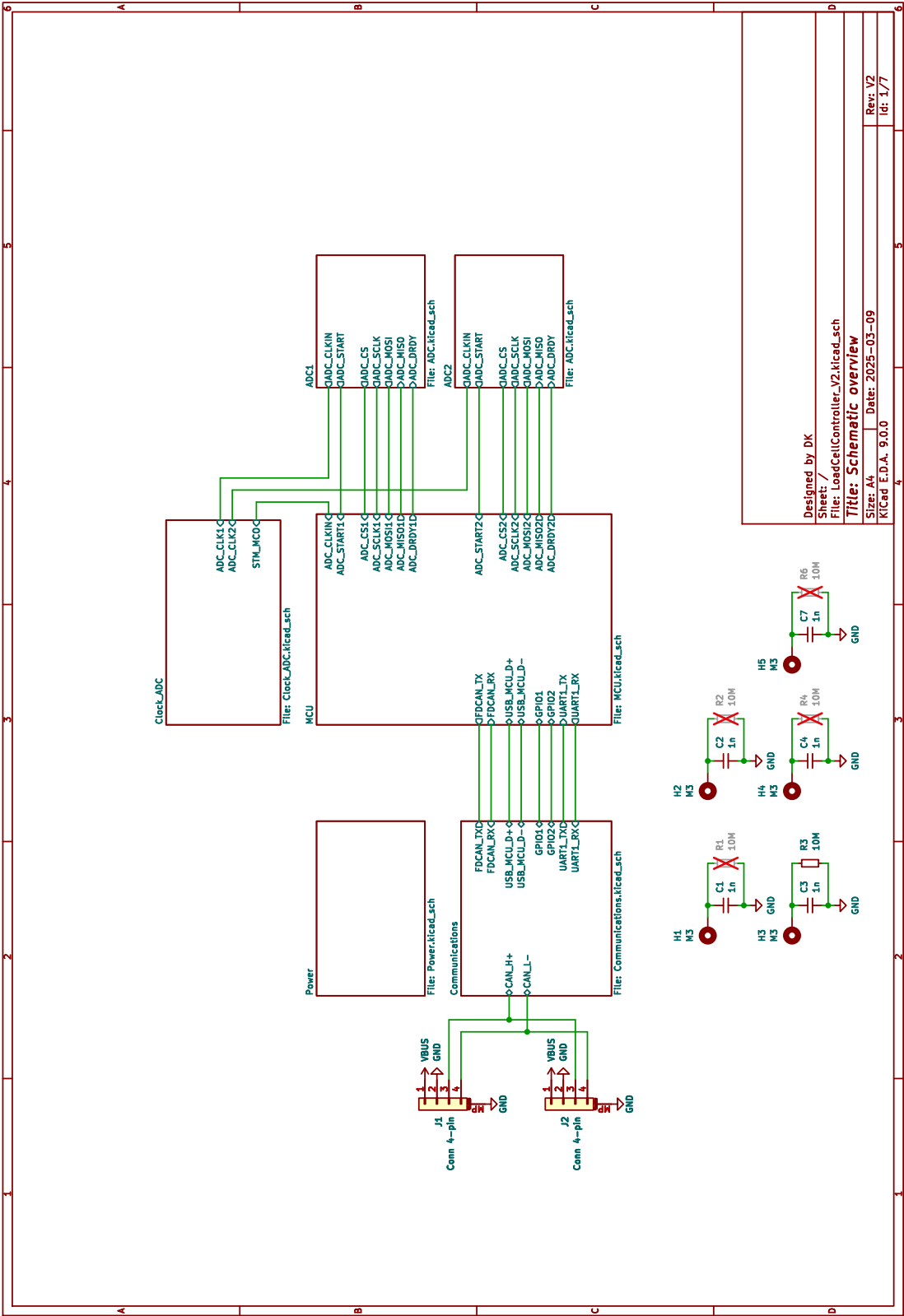
- [21] „IIS3DWB“ akcelerometro dokumentacija.

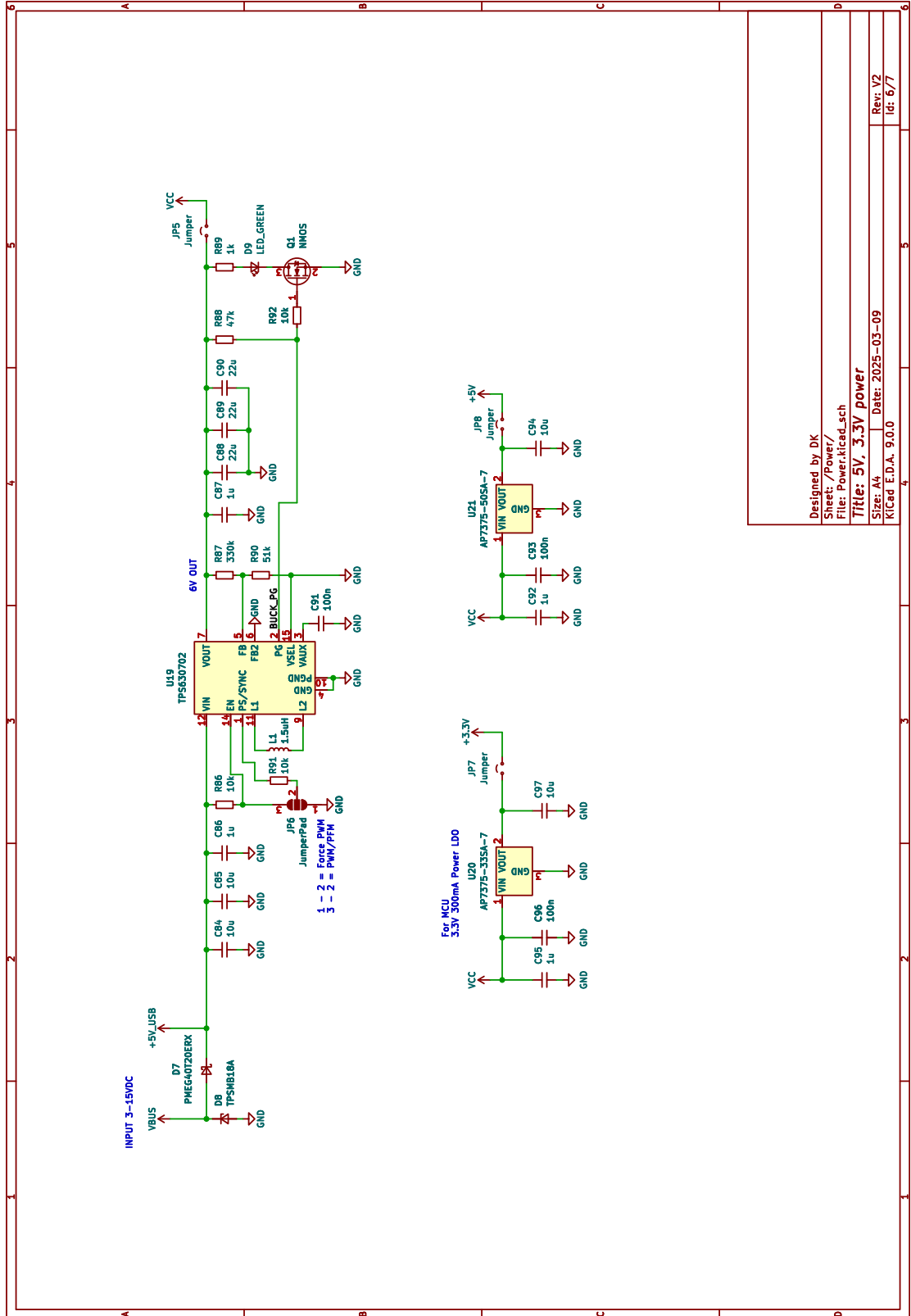
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/iis3dwb.pdf>

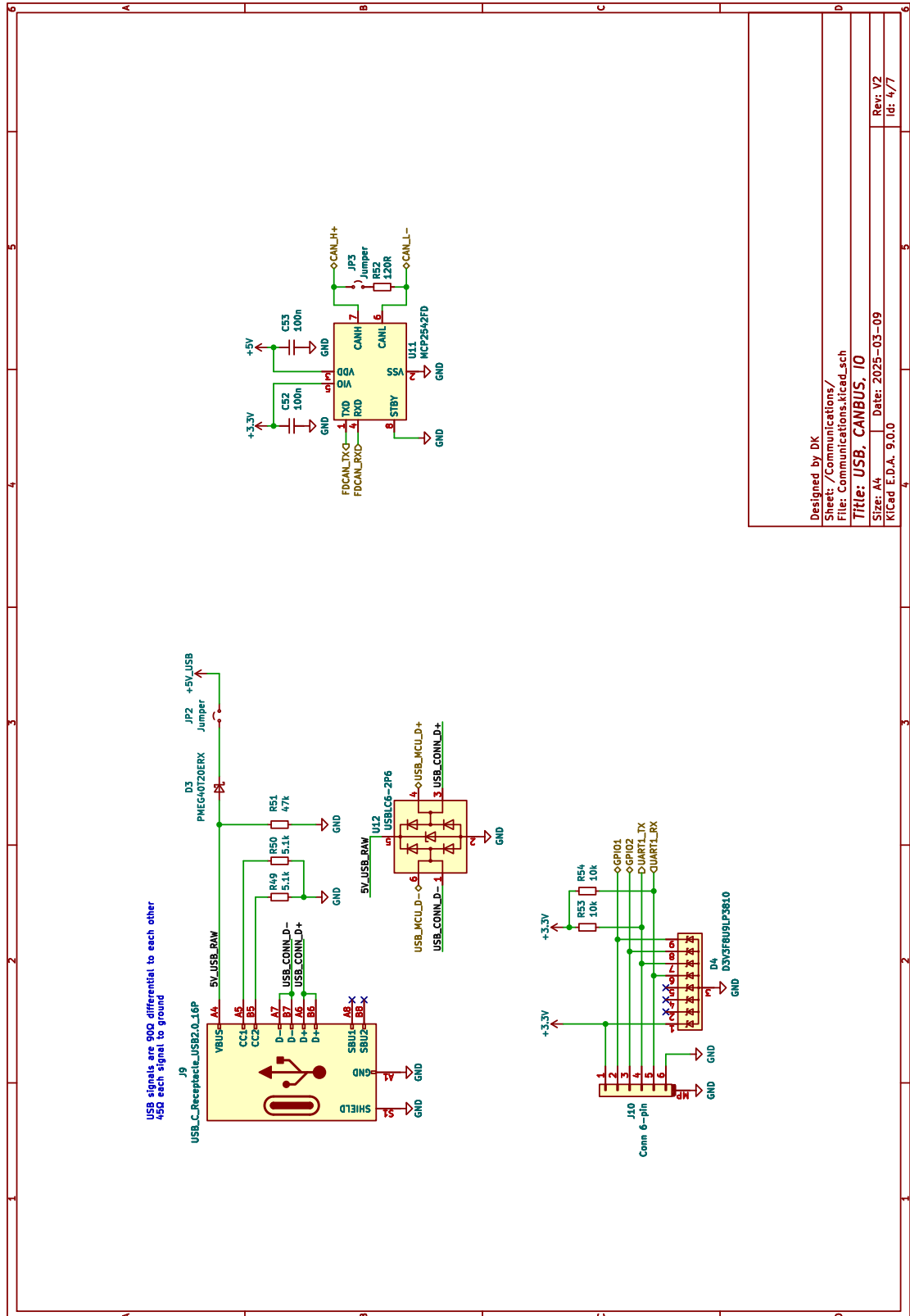
[Interaktyvus]. [žiūrėta 2025 m. balandžio 4 d.]

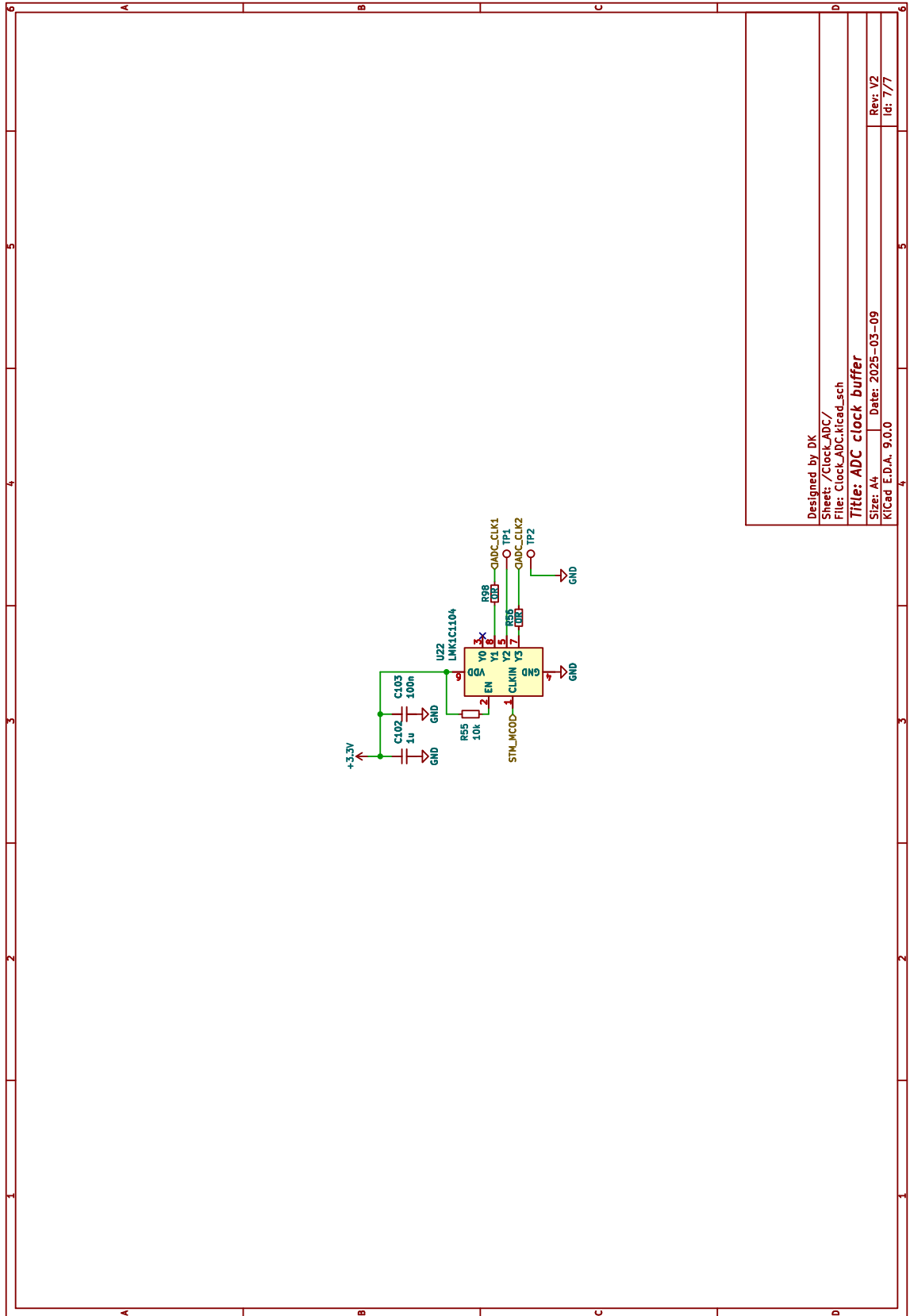
PRIEDAI

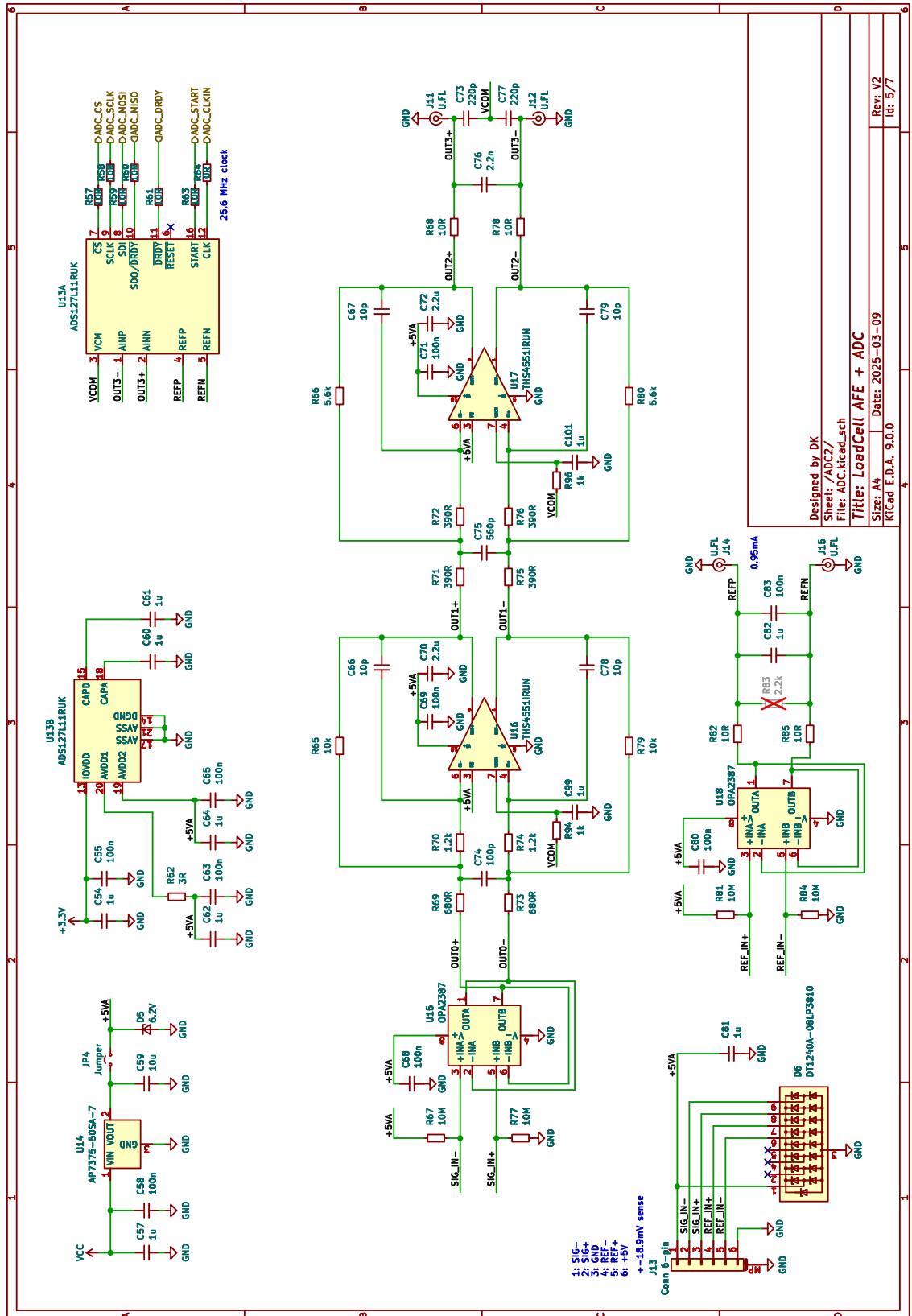
A priedas. Deformacijos jutiklio matavimo prietaiso pilna elektrinė schema



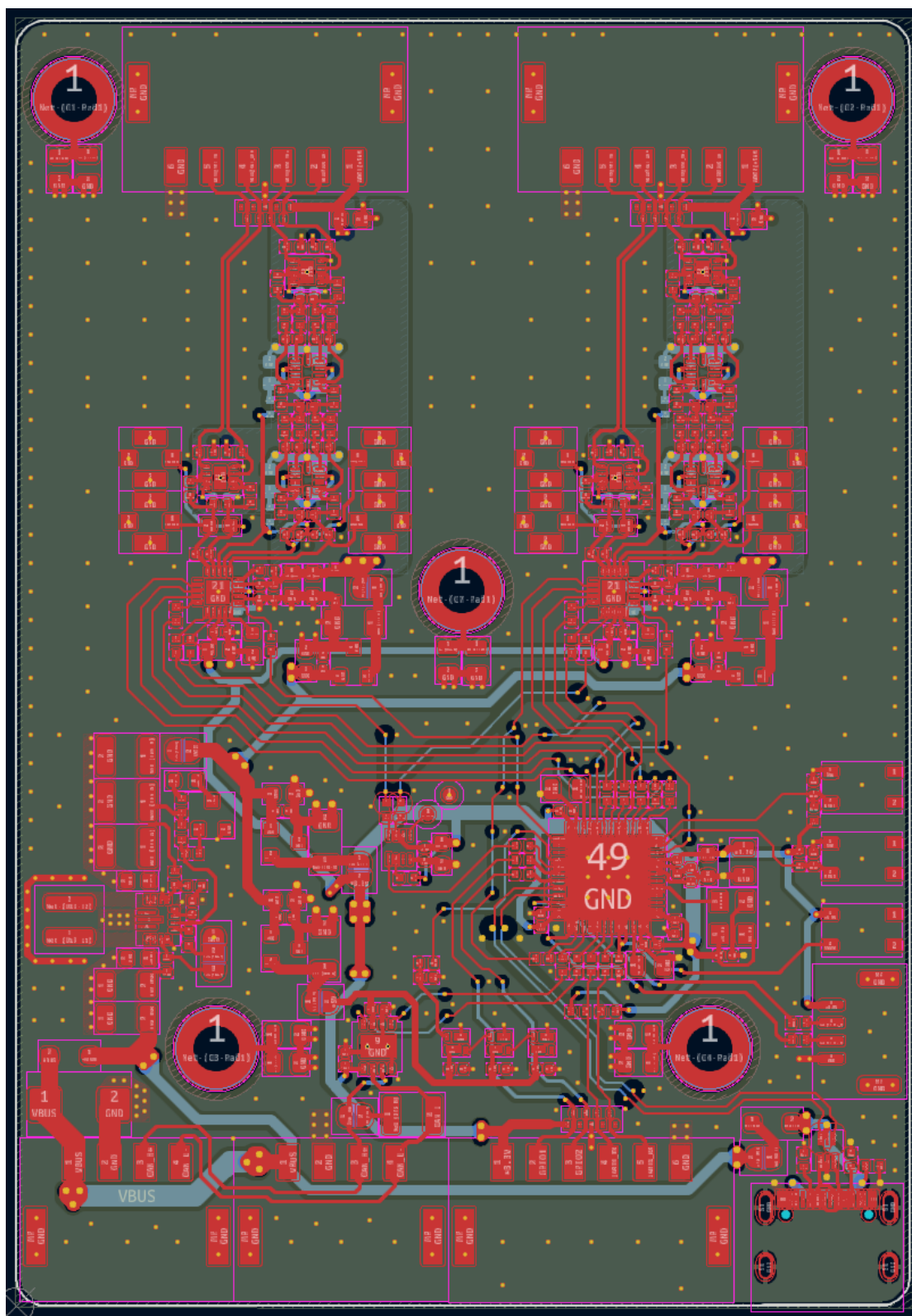




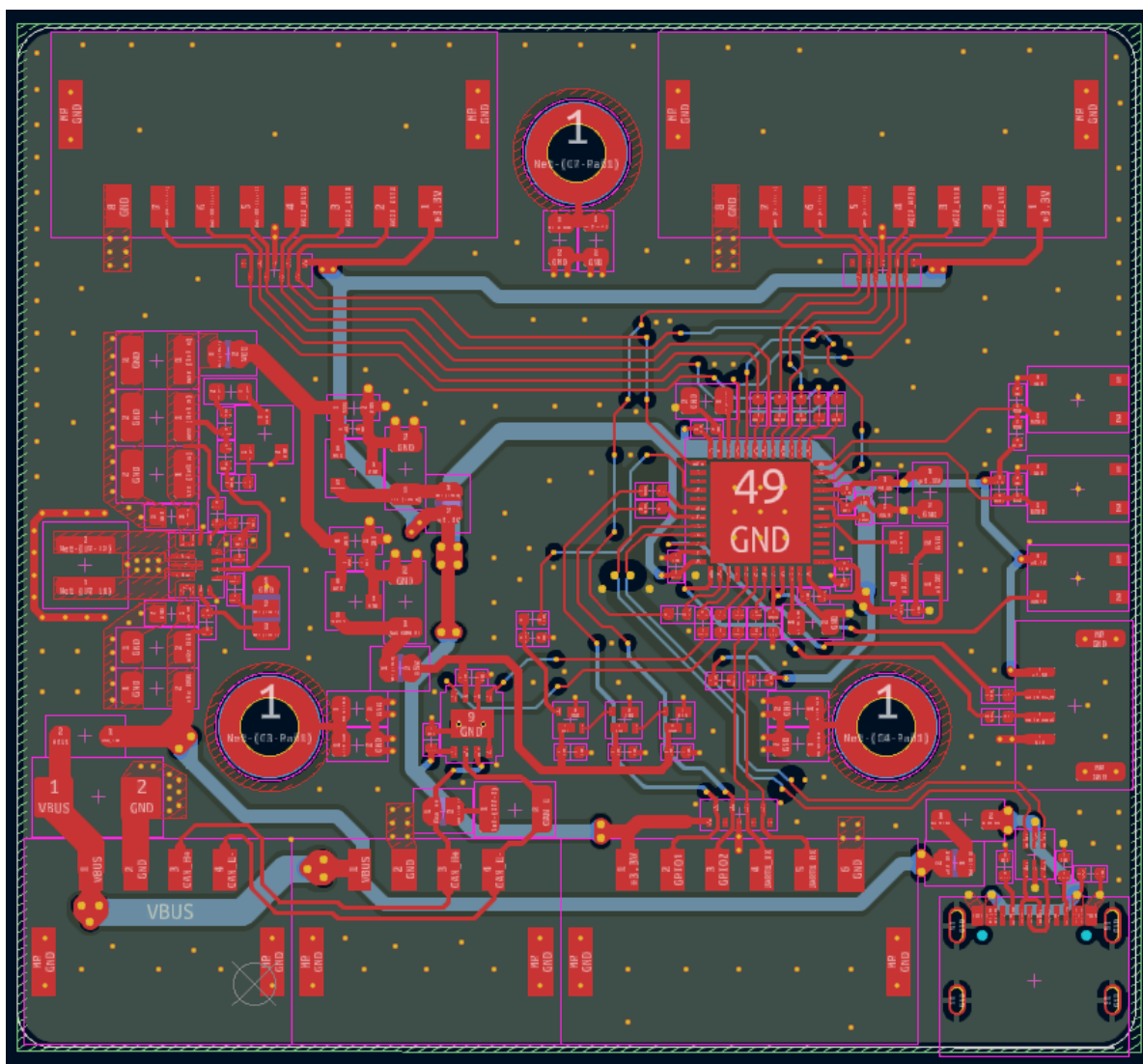




B priedas. Deformacijos jutiklio matavimo prietaiso spausdintinė plokštė



C priedas. Akcelerometrų matavimo prietaiso spausdintinė plokštė



D priedas. Akcelerometro spausdintinė plokštė

