



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Vytautas Buitvydas

SPRAUSTINIŲ POLIŲ FORMAVIMO PROCESO EFEKTYVUMO
UŽTIKRINIMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Dangirutis Navikas

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

SPRAUSTINIŲ POLIŲ FORMAVIMO PROCESO EFEKTYVUMO
UŽTIKRINIMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektronikos inžinerija (kodas 621H61002)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Dangirutis Navikas
(data)

Recenzentas

(parašas)
(data)

Projektą atliko

(parašas) Vytautas Buitvydas
(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Vytautas Buitvydas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Spraustinių polių formavimo proceso efektyvumo užtikrinimo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. gegužės 18 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vytauto Buitvydo** baigiamasis projektas tema „Spraustinių polių formavimo proceso efektyvumo užtikrinimo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Buitvydas, V. Spraustinių polių formavimo proceso efektyvumo užtikrinimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Dangirutis Navikas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 42 psl.

SANTRAUKA

Šio tiriamojo darbo objektas yra spraustinių polių, naudojamų statinių pamatuose, įrengimo procesas. Darbo metu atlikti tyrimai ir eksperimentai siekiant užtikrinti minėto proceso efektyvumą. Sudaryta eksperimentinė sistema leidžianti matuoti poliaus smigimo greitį, pagreitį ir pasiektą gylį.

Analizuojami moksliniuose straipsniuose pateikti efektyvumo užtikrinimo metodai. Aprašomos rastos panašios sistemos ir komerciniai gaminiai. Pateikiamos jų savybės ir funkcionalumas. Pirmo skyriaus pabaigoje pateikiami apibendrinti atliktos analizės rezultatai – polių įrengimo proceso parametrai (vibravimo dažnis, smigimo greitis, pagretis, pasiektas gylis) nusakantys jo atlikimo efektyvumą.

Remiantis analizės metu gautais rezultatais sudaryta proceso efektyvumui užtikrinti reikalingos sistemos struktūra. Pateikiama eksperimentinės sistemos skirtos duomenų surinkimui ir apdorojimui struktūra, aprašoma jos sudedamosios dalys ir komponentai. Sistemoje naudojamas akcelerometras ir atstumo matuoklis, duomenys surenkami mikrovaldikliu ir perduodami į kompiuterį. Antrame skyriuje pateikiami detalesni eksperimentinės sistemos veikimo algoritmai su paaiškinimais.

Trečiame skyriuje aprašomi panaudoti vibravimo dažnio nustatymo metodai, bei atstumo apskaičiavimo iš akcelerometro duomenų panaudojant dvigubo integravimo metodą.

Ketvirtame skyriuje pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai. Pasiektas atstumo matavimo tikslumas siekia ± 2 cm. Vibravimo dažnis nustatomas 1Hz tikslumu. Aprašomos kilusios problemos taikant aprašytus metodus realioje sistemoje. Pateikiamas minėtų problemų sprendimas.

Pateikiamos tiriamojo darbo išvados apie pasirinktų metodų tinkamumą spraustinių polių įrengimo proceso efektyvumo užtikrinimui.

Reikšminiai žodžiai: Spraustiniai poliai, akcelerometras, efektyvumas

Buitvydas, V. Research of efficiency assurance in driven piles installation process. Final project of master degree / supervisor prof. dr. Dangirutis Navikas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics Engineering.

Kaunas, 2015. 42 psl.

SUMMARY

The object of this research work is the process of installing driven piles which are used in building foundation. During this work some research and experimental work has been done in effort to assure efficiency in mentioned process. An experimental setup was made which lets to measure vibration frequency, velocity, acceleration and reached depth.

Efficiency assurance methods are analyzed in scientific papers. Some similar systems and commercial products are described and introduced with their functionality and characteristics. The results of analysis - parameters of driven piles process installation which describes its efficiency, are provided in end of a first section.

Description of system structure which will let to assure process efficiency, based on previous section results are provided in second section. Description of experimental setup which lets to collect and process data are provided with details of structure and components. In described system accelerometer and distance sensors are used, data are collected with microcontroller and sent to computer. Further in this section are provided detailed algorithms with explanations on how system works.

In third section used method to determine frequency of vibration and double integration method to determine distance from acceleration are described.

In fourth section the results and problems which were met during experimental research work are described. The solution for mentioned problems are also provided.

Conclusion about relevance of chosen methods to assure efficiency in driven piles installation process can be found at the end of the paper.

Keywords: driven piles, accelerometer, efficiency

TURINYS

IVADAS.....	7
1. TIRIAMO OBJEKTO ANALIZĖ.....	8
1.1 Poliai ir jų formavimas.....	8
1.2 Polių formavimo proceso kontroliavimas.....	9
1.2.1 Poliaus pasiekto gylio kontrolė.....	10
1.2.2 Deformacijų kontrolė.....	11
1.2.3 Vibravimo dažnio kontrolė.....	12
1.3 Reikalavimai sistemai.....	13
1.4 Esamos sistemos ir metodai.....	14
1.4.1 Poliaus pozicijos nustatymo sistema.....	14
1.4.2 Įsprausto poliaus kokybės tikrinimo sistema.....	15
1.4.3 „Pile driving analyzer“ sistema.....	16
1.5 Analizės rezultatų apibendrinimas.....	17
2. SISTEMOS STRUKTŪRA.....	19
2.1 Proceso kontrolės sistema.....	19
2.2 Eksperimentinė sistema duomenų surinkimui ir apdorojimui.....	20
2.2.1 Komponentai.....	20
2.3 Duomenų surinkimo ir apdorojimo algoritmai.....	22
3. MATAVIMO METODAI.....	25
3.1 Plakto vibravimo dažnio nustatymas.....	25
3.2 Pasiiekto gylio nustatymas.....	30
4. TYRIMŲ REZULTATAI.....	32
4.1 Vibravimo dažnio nustatymo rezultatai.....	32
4.2 Poliaus pasiekto gylio matavimo rezultatai.....	34
4.3 Polių kalimo mašinos rezultatų apdorojimas.....	38
IŠVADOS.....	42
LITERATŪRA.....	43
PRIEDAS NR.1.....	45
PRIEDAS NR.2.....	46
PRIEDAS NR.3.....	47
PRIEDAS NR.4.....	48
PRIEDAS NR.5.....	54
PRIEDAS NR.6.....	60

ĮVADAS

Bet kokio statinio viena iš svarbiausių dalių yra pamatai. Šiuo metu viena iš patikimiausių ir dažniausiai naudojamų pamatų technologijų yra spraustiniai poliai. Tokie poliai įrengiami vietose, kuriose paviršinis grunto sluoksnis yra silpnas pvz. durpės, dumblas. Tačiau polių įspraudimas į žemę yra sudėtingas ir brangus procesas. Iš čia kyla poreikis taikyti modernias technologijas proceso kontroliavimui ir efektyviam darbo sąnaudų panaudojimui. Siekiama sumažinti polių įrengimo kaštus, kontroliuoti procesą ir užtikrinti tinkamą kokybę. Tai leistų padaryti lengvai integruojamas ir panaudojamas elektroninės sistemos.

Esama įvairių polių įrengimo proceso efektyvumo užtikrinimo metodų. Pirmiausia svarbu kontroliuoti poliaus pasiektą gylį, nustatyti ar jis pakankamas. Poliai įrengiami tokio ilgio, kad būtų pasiektas pakankamai tvirtas grunto sluoksnis. Įrengus polių nepakankamame gylyje rizikuojama statinio saugumu. Įspraudžiant per giliai – bus neefektyviai išnaudojamas darbo laikas bei medžiagos, o kai kuriais atvejais gali būti pažeistas ir poliaus vientisumas. Kontroliuojant poliaus įspraudimo greitį ir pagreitį galima nustatyti grunto bei poliaus laikomąsias savybes. Kontroliuojant procesą realiu laiku galima laiku pastebėti kilusias problemas ir jas ištaisyti. Todėl svarbu nustatyti ir pritaikyti spraustinių polių įrengimo proceso efektyvumo užtikrinimo metodus. Iš čia ir kyla šio darbo tikslas.

Darbo tikslas – ištirti spraustinių polių formavimo proceso efektyvumo užtikrinimo metodus. Tikslui pasiekti iškelti sekantys uždaviniai:

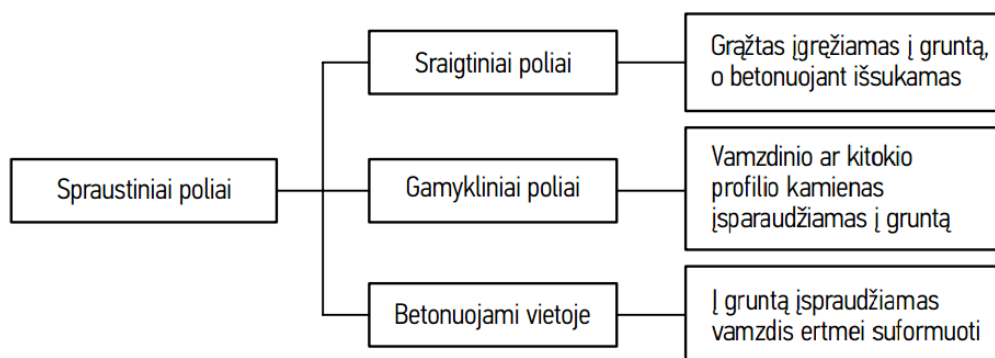
1. Išanalizuoti literatūroje ir moksliniuose straipsniuose aprašomus metodus
2. Apžvelgti esamą situaciją ir elektronines sistemas šioje srityje
3. Sudaryti tyrimui reikalingos sistemos struktūrą
4. Sudaryti tyrimui reikalingų duomenų surinkimo algoritmus
5. Suprojektuoti tyrimams reikalingą sistemą
6. Surinkti ir išanalizuoti duomenis

1. TIRIAMO OBJEKTO ANALIZĖ

Šiame skyriuje nagrinėjamas spraustinių polių formavimo procesas, jo kokybiniai parametrai. Analizuojama mokslinė literatūra, apžvelgiamos esamos elektroninės sistemos skirtos šio proceso efektyvumo užtikrinimui.

1.1 Poliai ir jų formavimas

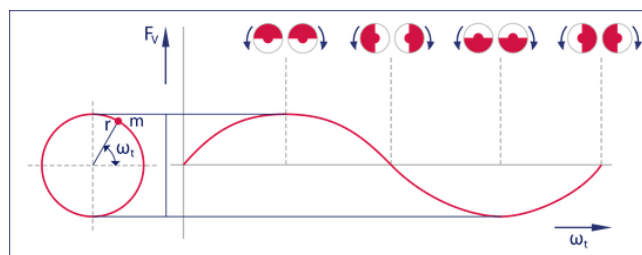
Poliai gali būti klasifikuojami [1] pagal jų įrengimo būdą. Išskiriamos dvi kategorijos – spraustinių ir gręžtinių. Pirmu atveju polių suformuojamas į gruntą įterpiant įvairias konstrukcijas, antru atveju – iškasamas gruntas ir atsiradusioje ertmėje formuojamas polių. Spraustiniai poliai gali būti klasifikuojami pagal tipą į sraigtingus, gamyklinius, betonuojamus (žr. 1.1 pav.) ir pagal įterpimo būdą [2] – įkalami, įvibruojami, išspaudžiami, išsukami.



1.1 pav. Spraustinių polių klasifikavimas[1]

Įkalami – oriniais, hidrauliniiais, dyzeliniais ar kt. plaktais įkalami mediniai, metaliniai, gelžbetoniniai ar kombinuoti poliai.

Įvibruojami poliai – tai dažnai naudojama technologija. Ant metalinio pagrindo statomas vamzdis ir išspaudžiamas į gruntą. Naudojami vibraciniai plaktai, kurie vibruodami tam tikru dažniu ir amplitudė sumažina trintį tarp poliaus ir grunto. Vibracija sukeliama panaudojant besisukančius svorius - ekscentriškus (žr. 1.2 pav.). Kur svyravimo amplitudė priklauso nuo svorio, o dažnis nuo sukimosi greičio.



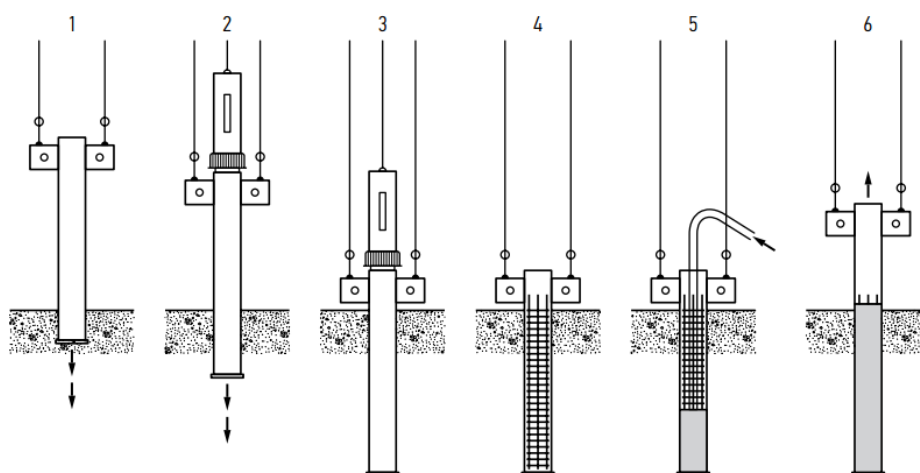
1.2 pav. Vibracija sukeliama plakto. m - masė, F_v - išilginė jėga, ω_t svyravimų kampinis dažnis¹

¹ <http://www.pve-holland.com/content/217/309/EN/Headnavigation/Technology/Vibro-hammers/Principle-of-a-vibro-hammer.html>

Kai trintis pasidaro mažesnė už polių spaudžiančią jėgą, polių pradeda smigti. Pasiekus reikiamą gylį į vamzdį įdedamas armatūros karkasas ir užpildomas betonu. Vamzdis ištraukiamas ir grunte lieka metalinis pagrindas bei suformuotas polių (žr.1.3 pav.).

Įspaudžiami – poliai įvairiomis spaudimo mašinomis spaudžiami į gruntą. Polių spaudžiamas tol kol nustoja smigti.

Įsukami – tokie poliai į gruntą įspaudžiami sukant. Sriegiami specialūs grąžtai, kurie gruntą išstumdo į šalis bet neiškelia į paviršių. Pasiekus reikiamą gylį, per grąžto šerdį pradedamas pilti betonas ir grąžtas išsriegiamas. Taip išstumdyto grunto vietoje įterpiamas betonas.



1.3 pav. Poliaus įrengimas: 1,2 - vamzdis spaudžiamas vibruojant, 3 - pasiektas reikiamas gylis, 4,5 - į vamzdį įleidžiamas armatūros karkasas ir užpildomas betonu, 6 - vamzdis ištraukiamas [1]

1.2 Polių formavimo proceso kontroliavimas

Įvairūs parametrai daro įtaką poliaus kokybei ir ilgaamžiškumui, o jų neteisingas parinkimas ar kontrolė atneša ir finansinius nuostolius. Formuojant spraustinius polių reikalinga kontroliuoti ir stebėti jėgą kuria spaudžiamas polių, nuokrypis nuo centro, pagreitis, pasiektas gylis. Lentelėje Nr. 1.1 lentelė. pateikiami Lietuvos statybininkų asociacijos sudaryti reikalavimai [3] spraustinių polių įrengimui.

1.1 lentelė. Spraustinių polių įrengimo kokybės kontrolė

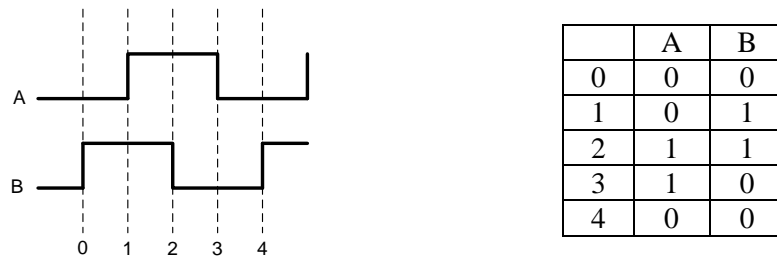
Objektas	Kontrolė	Tikslas	Dažnumas	Pastabos
Įrankių, polių būklė ir matmenys	Tikrinimas apžiūrint. Matavimas	Atitiktis	Prieš ir (arba) po naudojimo	
Įrankių naudojimas	Įgilinimo eiga, efektyvumas, per gilus įgilinimas	Priežiūra, atpažinimas kintančių gruntinių sąlygų, gylio, laiko, įrankių pakeitimo	Nuolat	
Poliaus geometrija	Matavimai:	Reikiamų (projekte	Kiekvienas	Būtinai polio gylio

	padėties plane, gylio, pasvirumo	užduotų) parametrų ir užsaiduotų leistinų nuokrypių išlaikymas	polius	parametras užduodamas darbo projekte su atskira pastaba.
Poliaus įgilinimas	Matuojamas įgilinimas ir/arba atsakas, priklausomai nuo darbo projekte užduotų esminių parametrų.	Darbo projekte užduotos laikomosios galios atitikimas, arba būtinas pasiekti gylis.	Kiekvienas polius	Polio gylio ir/arba atsako matavimo parametrai užduodami technologinėje kortelėje, priklausomai nuo: -konkrečios spraudimo įrangos techninių parametrų; -būtino pasiekti gylio.
Vandens sankaupa apačioje	Tikrinimas apžiūrint	Betono sluoksniavimosi ir užteršimo išvengimas	Kiekvienas polis	

1.2.1 Poliaus pasiekto gylio kontrolė

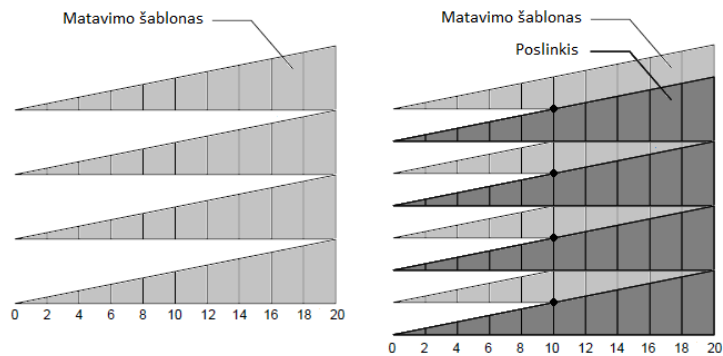
Šaltiniuose [4] ir [5] aprašomi poliaus pasiekto gylio matavimo metodai: naudojant gylio matavimo rites, didelio greičio kameras.

Pirmajame metode naudojamas įrenginys, kuris matuoja rites, kurioje yra suvyniotas lynas, apsisukimų skaičių. Ritė sumontuojama polių įrengimo mašinos viršuje ir vienas lyno galas pritvirtinamas prie poliaus, taip poliaus pasiektas gylis atitinka ištraukto lyno iš ritės ilgį. Ritės sūkliai skaičiuojami optinio enkoderio [6] pagalba. Tai keitiklis, kuris formuoja analoginį signalą arba tam tikrą impulsų skaičių, kuris yra proporcingas sukimosi greičiui, posūkio kampui arba nueitam keliui. Enkoderį sudaro šviesos šaltinis, kaukė, kodinis diskas, jutikliai (žr. 1.4 pav.). Kaukė naudojama formuoti siaurą šviesos spindulį. Kodinis diskas yra padalintas į laidžius ir nelaidžius šviesai tarpelius. Taip besisukdamas diskas praleidžia arba blokuoja šviesos spindulius, kurie fiksuojami fotojutiklių. Tam, kad būtų galima nustatyti sukimosi kryptį, reikalinga kad kodinis diskas turėtų bent du kodavimo takelius, o turint tris – galima nustatyti ir sukimosi dažnį. Sukimosi kryptis nustatoma pagal dviejų kanalų signalus (A ir B), kurių fazė skiriasi 90°. Pavyzdžiui jei kanalų A ir B esama reikšmė yra „00“ tai diskui pasisukus pagal laikrodžio rodykle ji pasikeis į „01“



1.4 pav. Optinio enkoderio veikimo principas

Antrasis metodas paremtas vaizdų apdorojimu ir greitomis kameromis, kurios gali užfiksuoti didelį kadrų skaičių. Prie įrengiamo poliaus priklijuojamas matavimo šablonas (žr. 1.5 pav.). Proceso metu fiksuojami kadrai ir lyginami su prieš tai buvusiu ir nustatomas poslinkis, kuris atitinka šablonų susikirtimo vietą.



1.5 pav. Matavimo šablonas

Apibendrinant paminėtus metodus galima pasakyti, jog pirmojo įgyvendinimas pareikalautų mažiau finansų negu antrojo. Antrajame naudojama brangi vaizdo įranga, bei sudėtingi apdorojimo algoritmai. Taip pat tokios įrangos panaudojimas statybų aikštelėje gana komplikotas. Todėl pirmasis metodas priimtinesnis.

1.2.2 Deformacijų kontrolė

Matuojant poliaus deformacijas naudojami įtempių jutikliai [7], kurie deformacijas verčia elektriniu signalu. Tokie jutikliai tvirtinami tiesiai ant matuojamo paviršiaus ir deformuojami kartu su juo. Dažniausiai naudojami metaliniai ar vieliniai jutikliai kurių varža kinta proporcingai nuo deformacijos. Metalinės vielos varža [8] išreiškiama formule:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1.1)$$

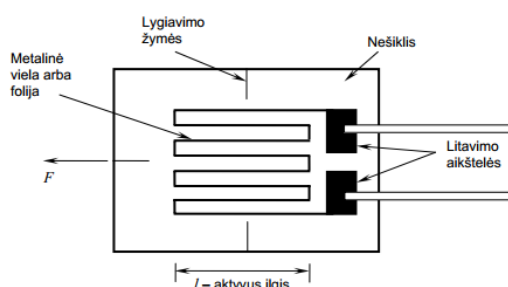
Čia R – vielos varža, l – laidininko (vielos) ilgis, A – laidininko skerspjūvio plotas, ρ - laidininko savitoji varža.

Įtempių jutiklio tipinė sandara yra plona metalinė viela arba folija suformuota ant tampraus pagrindo (žr. 1.6 pav.) vadinamo nešikliu. Viela ant pagrindo išdėstoma meandro

forma. Tai daroma tam, kad padidinti vielos efektyvųjį ilgį jutiklyje. Didesnis vielos efektyvusis ilgis reiškia, kad jutiklio varža bus didesnė. Tokiu būdu gaunamas didesnis varžos pokytis esant deformacijoms. Teisingai parinkus jutiklio tvirtinimo vietą jutiklio deformacijos bus proporcingos esančioms tiriamajame objekte. Esant pastoviai temperatūrai jutiklio varža kinta tiesiškai ir proporcingai deformacijoms [9]:

$$\frac{\Delta R}{R} = S\varepsilon \quad (1.2)$$

Čia ΔR – jutiklio varžos pokytis, R – jutiklio varža, S – tenzojautrumo koeficientas, ε – deformacija.



1.6 pav. Įtempių jutiklio struktūra

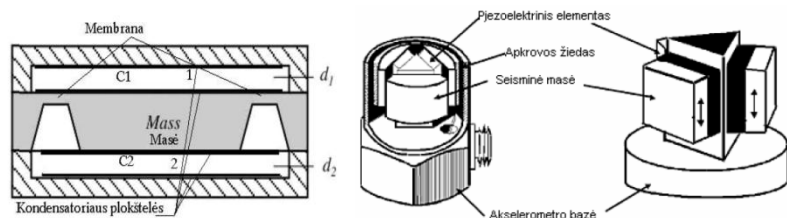
Tiriamam objektui pailgėjus deformuojamas ir jutiklis t.y. viela ištempinama ir sumažėja jos skerspjūvio plotas ir iš (1.1) matyti, jog jutiklio varža padidės.

1.2.3 Vibravimo dažnio kontrolė

Proceso metu dažnis gali būti apskaičiuotas iš akcelerometro duomenų. Akcelerometras [8] – įtaisas pagreitį verčiantis į elektrinį dydį. Šio įtaiso veikimas paremtas judančios masės pritvirtintos prie tamprus elemento judėjimu. Masės poslinkis keitiklių pagalba verčiamas į elektrinį dydį. Pagal keitiklio tipą akcelerometrai gali būti talpiniai, pjezoelektriniai ir kt.

Talpinis akcelerometras – jame masė pritvirtina prie membranos. Membrana sudaro vieną kondensatoriaus plokštelę. Ramybės būsenoje atstumai d_1 ir d_2 tarp kondensatorių plokštelių yra vienodi (žr. 1.7). Atsiradus pagreičiui pasikeičia atstumai tarp plokštelių, o tuo pačiu ir kondensatorių C_1 ir C_2 talpumai.

Pjezoelektrinis – šio tipo akcelerometruose judėdama masė spaudžia pjezokristalą, o šis atitinkamai generuoja įtampą (žr. 1.7 pav.).



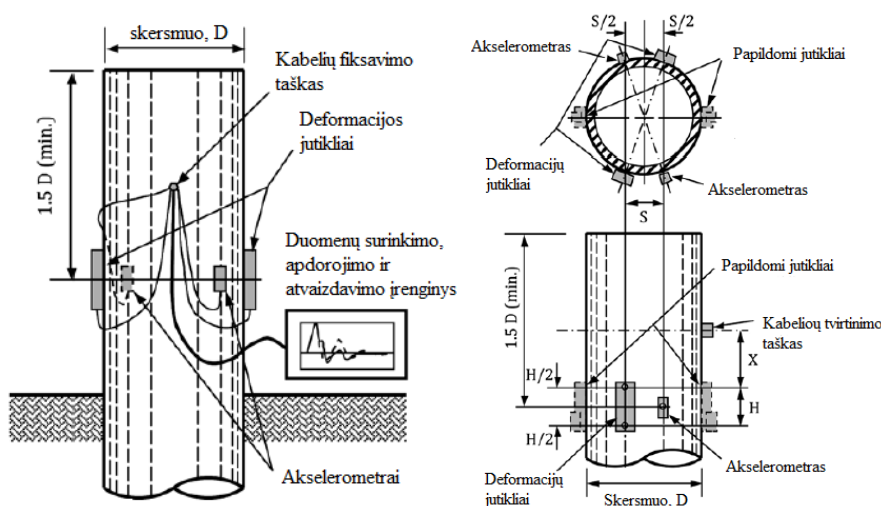
1.7 pav. Talpinio akcelerometro (kairėje) pjezoelektrinio (viduryje) sandara

Kadangi matuojant fiksuojamas laikas ir akcelerometro duomenys tai poliaus vibravimo dažnį galima nustatyti duomenis perkeliant į dažnių sritį t.y. atlikti Furje transformaciją.

1.3 Reikalavimai sistemai

Esama standartų, kuriuose yra apibrėžiami reikalavimai sistemoms skirtoms polių formavimo proceso kontroliavimui. Vienas iš jų yra Amerikos standartizavimo asociacijos (*angl. American Society for Testing and Materials – ASTM*) standartas ASTM D4945 - 12 [10]. Jame aprašoma proceso kontroliavimo metodika, sistemos funkcijos ir struktūra (reikalavimai jutiklių išdėstymui, jautrumui, duomenų perdavimui ir kt.).

Reikalavimai jutikliams – sistemoje turi būti keli nepriklausomi jutikliai sumontuoti ant poliaus paviršiaus, kurie matuotų poliaus deformacijas ir pagreitį bent vienoje poliaus vietoje. Vieta turi būti parinkta tokia, kad proceso metu jutikliai nebūtų sukalti į žemę ar pernelyg arti poliaus viršaus (žr. 1.8 pav.). Jutikliai turi būti standžiai pritvirtinti ir apsaugoti nuo išorės poveikių. Pašalintos medžiagos įtakojančios jutiklių darbą ar duomenų perdavimą.



1.8 pav. Jutiklių išdėstymas[7]

Deformacijų jutikliai – reikalaujama, kad jutiklio charakteristika būtų tiesinė visame matuojamų deformacijų diapazone, kuris išreiškiamas santykiniu pailgėjimu ir paprastai būna nuo $-2 \cdot 10^{-9}$ iki $+2 \cdot 10^{-9}$. Taip pat turėtų būti kompensuojama temperatūros įtaka jutiklio

rezultatams. Rekomenduojama tvirtinimo vieta pavaizduota paveikslėlyje Nr. 1.8 dešinėje, kur įtempių jutiklis turėtų būti atstumu S nuo akcelerometro.

Iš akcelerometrų gaunama informacija apie poliaus greitį, pagreitį ir poslinkį. Maksimalus pagreitis – 1000g betono ir 2000g plieniniams poliams. Jei naudojamas pjezoelektrinis jutiklis, jo rekomenduojamas rezonansinis dažnis turėtų būti didesnis nei 30kHz, kai pritvirtinama standžiai ir daugiau nei 10kHz, kai tvirtinama su vibracijas sugeriančia medžiaga.

Duomenų surinkimas – proceso metu duomenys turėtų būti renkami ir perduodami pakankamu greičiu, kad būtų galima realiuoju laiku stebėti parametrus. Sistemoje duomenys apie vykstantį procesą turėtų būti pateikti grafiniu pavidalu ir išsaugomi vėlesniam analizavimui.

Apibendrinat sistema turėtų atlikti tokias funkcijas:

- Surinkti duomenis iš jutiklių.
- Perduoti duomenis įrenginiui kuriame jie bus apdoroti.
- Atvaizduoti rezultatus realiu laiku.
- Išsaugoti rezultatus.

1.4 Esamos sistemos ir metodai

Spraustiniai poliai naudojami gana ilgą laiko tarpą, todėl jau esama įvairių sistemų, kurios padeda kontroliuoti polių įrengimo procesą. Šiame poskyryje apžvelgiamos elektroninės sistemos kuriose naudojami įvairūs jutikliai, vaizdo kameros, lazeriniai atstumo matuokliai polių formavimo procesui kontroliuoti.

1.4.1 Poliaus pozicijos nustatymo sistema

Sistema [11] skirta poliaus pozicijos nustatymui naudoja lazerinį atstumo matuoklį (*Laser Range Finder - LRF*). Ši sistema leidžia stebėti poliaus judėjimą horizontalia kryptimi. Lazериu nustatomi poliaus kontūrai ir programinės įrangos pagalba apskaičiuojamas centras. Vienu metu galima nustatyti kelių polių pozicijas. Sistemos paklaida 15 – 35mm.

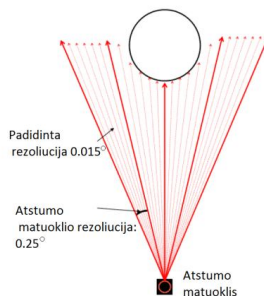
Matavimo procesą sudaro keturi etapai: duomenų surinkimas iš lazerinių matuoklių, kontūrų aptikimas iš surinktų duomenų, pozicijos apskaičiavimas pagal kontūrus, rezultatų atvaizdavimas.

Duomenų surinkimas – iš atstumo matuoklio gaunami duomenys, kuriuose yra informacija apie atstumą iki objekto ir atspindžio intensyvumas. Sistemoje naudojamas „UTM-30LX“ matuoklis, jo parametrai pateikti lentelėje Nr. 1.2 Tam, kad padidinti matuoklio kampinę rezoliuciją atliekami keli matavimai pasukant matuoklį. Pasukimui naudojamas „SUSTAINable

Robotics“ pozicionavimo įrenginys „SPU-01“, kurio rezoliucija siekia 0.015°. Tokiu būdu bendra matavimo rezoliucija padidinama apie 17 kartų (žr. 1.9 pav.).

1.2 lentelė. Matuoklio „UTM-30LX“ parametrai

Lazerio bangos ilgis	$\lambda=870\text{nm}$
Matuojamas atstumas	0.1-30m, 270°
Tikslumas	0.1–10m : $\pm 30\text{mm}$ 10 – 30m: $\pm 50\text{mm}$
Kampinė skiriamoji geba	0.25°

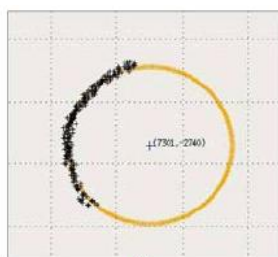


1.9 pav. Atstumo matuoklio rezoliucijos padidinimas[11]

Sudarant kontūrus ir apskaičiuojant pozicijas pirmiausia atskiriami judantys nuo stacionarių objektų. Užfiksuoti duomenys grupuojami ir ieškoma lanko formos panaudojant „RANSAC“ (*RANdom SAMple Consensus*) algoritimą [12]. Šis algoritmas išrenka didžiausius rinkinius su panašiais bruožais, kurie yra geometriškai suderinami. Išrinkimas vykdomas keičiant modelio (1.3) parametrus atsitiktinėmis sekomis tol kol modelis atitinka eksperimentinius duomenis.

$$(x - A)^2 + (y - B)^2 = R^2 \quad (1.3)$$

čia A,B – apskritimo centro koordinatės, R – apskritimo spindulys, x,y – matuoklio duomenys. Tada prie surasto lanko derinamas apskritimas ir surandamas centras (žr. 1.10 pav.).



1.10 pav. Poliaus centro radimas [11]

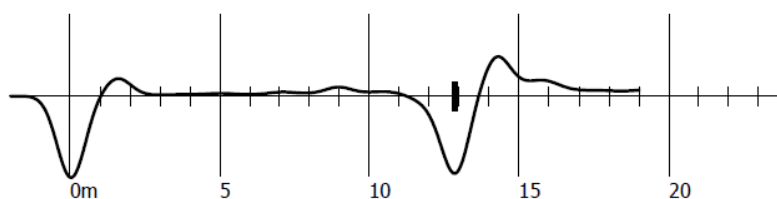
1.4.2 Įsprausto poliaus kokybės tikrinimo sistema

Suformuoto poliaus kokybei patikrinti dažnai naudojamos ultragarsinės sistemos [12]. Formuojant polių įdedami keli nedidelio diametro vamzdeliai (PVC arba plieniniai), jų ilgis turi būti lygus poliaus ilgiui. Po to vamzdeliais leidžiamas ultragarsinis siūstuvai/imtuvai ir nustatomas poliaus vientisumas 1.11 pav.



1.11 pav. Poliaus vientisumo tikrinimas²

Kitas būdas patikrinti išsprauto poliaus vientisumą yra naudojant rankinius plaktus [12]. Šis metodas pagrįstas vienmatės bangos sklidimu tamprioje terpėje. Smūgiuojama per poliaus viršų ir matuojama smūgio sukeltos bangos sklidimo greitis. Smūgio sukelta banga sklinda poliaus kamienu ir atsispindėjusi nuo jo apatinės dalies grįžta atgal. Jei poliaus medžiaga vienalytė tai atliekant bandymus keliose vietose bangos sklidimo greitis išlieka toks pats, kitu atveju – kinta. Paveikslėlyje Nr. 1.12. pateikiami tokio matavimo rezultatai. Pirmasis kreivės išlinkimas tai poliaus viršus, antrasis – poliaus galas. Tarpe esantys bangavimai vaizduoja poliaus defektus.



1.12 pav. Poliaus vientisumo matavimo rezultatai [6]

1.4.3 „Pile driving analyzer“ sistema

Ši sistema atitinka ankstesniame skyriuje aprašytą standartą [10] ASTM D4945 - 12 ir palčiai naudojama. Sistemoje naudojami pritaikyti akcelerometrai ir įtempių matuokliai, kurie prie poliaus tvirtinami varžtais. Sistemoje gali būti naudojama iki aštuonių jutiklių, 4 akcelerometrai ir 4 įtempių jutikliai. Jutiklių parametrai pateikti lentelėje Nr. 1.3 lentelė. ir Nr. 1.4 lentelė.

1.3 lentelė. Įtempių jutiklio parametrai

Įtempių jutiklis	
Efketyvusis ilgis (mm)	50
Dydis	115x35x11
Medžiaga	Aliuminis
Jautrumas ($\mu\epsilon/mV/V$)	380
Deformacijų ruožas ($\mu\epsilon$)	2000
Darbo temperatūra °C	Nuo -50 iki 120

² <http://adcomsouth.vn/tin-tuc/21/Thi-nghiem-sieu-am-Crosshole-Sonic-Logging>

1.4 lentelė. Akcelerometro parametrai

Pjezoelektrinis akcelerometras	
Jautrumas (mV/g)	1
Pagreičio ruožas (g)	5000
Dažnių juosta (Hz)	Nuo 0,25 iki 7000
Darbo temperatūra °C	Nuo -50 iki 120

Duomenys nuskaitomi ir perduodami į nešiojamą kompiuterį belaidžiu ryšiu iki 150m. Kompiuteryje naudojama speciali programa kurioje, atvaizduojama jėgos ir poslinkio kreivės, poliaus deformacijos ir įspėjama apie galimus pažeidimus. Taip pat vykdoma duomenų analizė bei automatinis kalibravimas.

Sistemos privalumai ir trūkumai:

- Privalumai – duomenys nuskaitomi ir analizuojami realiu laiku, nereikalingi jungiamieji laidai tarp jutiklių ir kompiuterio.
- Trūkumai – gaminio kaina.

1.5 Analizės rezultatų apibendrinimas

Atlikus mokslinių šaltinių bei esamų sistemų analizę galima daryti išvadą, jog pagrindiniai parametrai leidžiantis nusakyti ar poliaus įrengimo procesas vykdytas efektyviai:

- Vibravimo dažnis
- Pasiiektas gylis
- Kalimo laikas
- Smigimo greitis

Norint sudaryti sistemą matuojančią minėtuosius parametrus reikalinga iširti ir išspręsti uždavinius, kurie leis nustatyti tinkamiausius sistemos realizavimo variantus.

Norint matuoti vibravimo dažnį kalimo metu reikalinga nustatyti:

- Diskretizavimo dažnis
- Imčių skaičius
- Dažninė skyra
- Akcelerometro tipas ir parametrai

Norint nustatyti poliaus pasiektą gylį reikalinga nustatyti:

- Tinkamiausią matavimo metodą
- Matavimo tikslumą

Norint fiksuoti kalimo laiką reikalinga išspręsti laiko sinchronizavimo uždavinį ir nustatyti reikimą tikslumą.

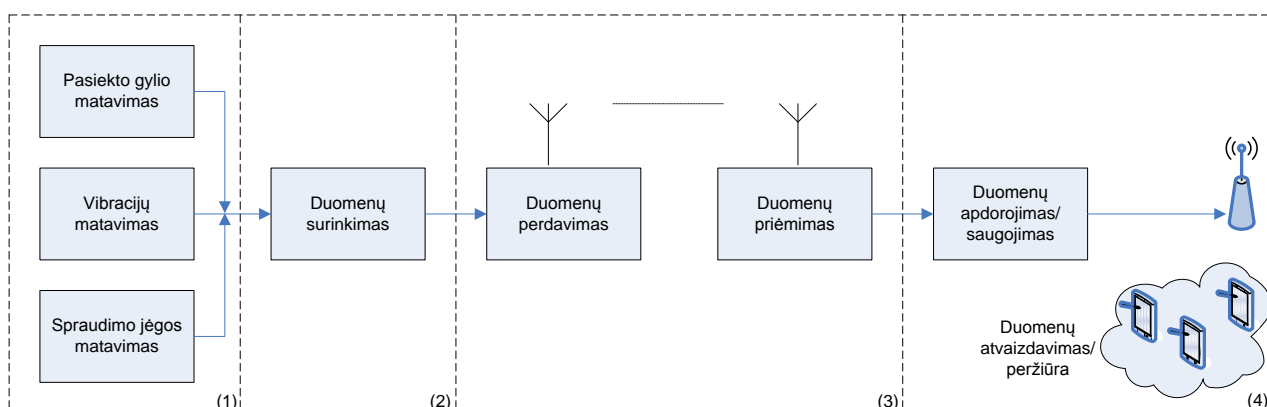
2. SISTEMOS STRUKTŪRA

Šiame skyriuje aprašoma projektuojama tyrimams reikalinga sistema, jos sudedamosios dalys, duomenų surinkimo bei apdorojimo algoritmai, charakteristikų nustatymo metodai.

2.1 Proceso kontrolės sistema

Išanalizavus jau esamas sistemas ir polių įrengimo proceso kontroliavimo metodus sudaryta efektyviam polių kalimo procesui užtikrinti reikalingos sistemos struktūra, kurios schema pateikta 2.1 pav. Pagrindinės struktūrinės dalys:

- Jutikliai – parinkti tinkamų parametrų analoginiai arba skaitmeniniai.
- Duomenų surinkimas – blokas turintis prievadus ar skaitmenines sąsajas duomenų surinkimui.
- Duomenų perdavimas/priėmimas – blokuose realizuotas duomenų perdavimas ir priėmimas iki kelių šimtų metrų atstumu belaidžiu ryšiu.
- Duomenų apdorojimas – pagrindinis įrenginys kuriame kaupiami ir apdorojami duomenys.



2.1 pav. Sistemos struktūra

Norimiems matuoti parametrus reikalingi įtaisai verčiantys mechaninius dydžius į elektrinius. Vibracijoms išmatuoti gali būti panaudotas akcelerometras, atstumui matuoti – gylio matuoklės, deformacijoms – įtempių jutikliai. Todėl reikalinga nustatyti ir iškelti reikalavimus jutikliams, atsižvelgiant į tai kokioje aplinkoje jie bus naudojami, kokios reikalingos matavimo ribos ir kraštiniai parametrai. Sistemos struktūroje ši dalis pažymėta Nr.1 (žr. 2.1 pav.) ir šios dalies pagrindinė funkcija – matuoti mechaninius dydžius ir versti juos elektriniais, kurie galės būti perduoti tolimesniam apdorojimui.

Duomenų surinkimo blokas Nr.2 (žr. 2.1 pav.) – šiame bloke turėtų būti panaudotas mikrovaldiklis, kurio pagrindinės funkcijos:

- Atlikti jutiklių konfigūravimą (jeigu panaudoti skaitmeniniai).
- Nustatyti ar jutikliai pasiruošę darbui.
- Surinkti duomenis iš jutiklių.
- Paruošti perdavimui.
- Inicijuoti perdavimą duomenų siuntimo moduluose.

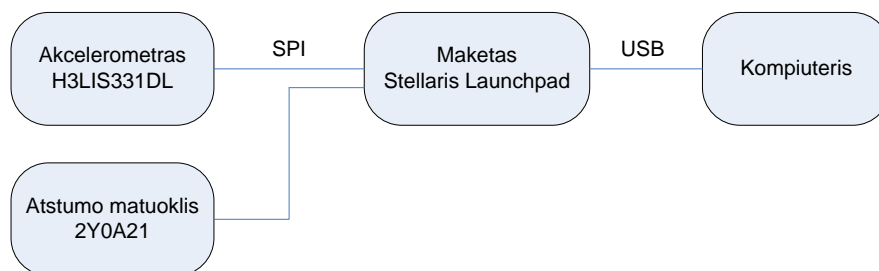
Pagal išvardintus reikalavimus reikalinga parinkti tinkamą mikrovaldiklį, kuris turėtų reikalingas sąsajas komunikavimui tarp jutiklių ir duomenų siuntimo modulių, užtikrintų pakankamą veikimo spartą bei atminties kiekį.

Duomenų perdavimo blokas Nr.3 (žr. 2.1 pav.) – tai bevielio ryšio moduliai skirti perduoti duomenis tarp sistemos blokų. Priklausomai nuo reikalingo atstumo ir aplinkoje, kurioje reikalinga užtikrinti bevielį ryšį reikia parinkti ryšio tipą.

Paskutiniame sistemos funkciniame bloke Nr.4 (žr. 2.1 pav.) atliekamas galutinis duomenų apdorojimas, sprendimų priėmimas, saugojimas ar pateikimas vartotojui. Šioms užduotims atlikti gali būti panaudotas nešiojamasis kompiuteris, duomenys saugomi serveryje ir gali būti prienami kitiems įrenginiams per interneto ryšį.

2.2 Eksperimentinė sistema duomenų surinkimui ir apdorojimui

Polių kalimo mašinos, plakto vibravimo dažniui ir pasiektam gyliui matuoti eksperimente panaudotas akcelerometras. Duomenis iš akcelerometro nuskaityto mikrovaldiklis ir juos apdoroja, arba siunčia į kompiuterį. Gylio matavimams patikrinti buvo naudojamas papildomas atstumo matuoklis. Sistemos struktūra pateikta 2.2 pav., bei sudaryta sistemos elektrinė schema pateikta prieduose (PRIEDAS NR.1)



2.2 pav. Struktūra vibravimo dažnio ir gylio matavimui

2.2.1 Komponentai

Duomenų surinkimui, apdorojimui ir perdavimui naudojamas „Texas Instruments“ maketas „Stellaris Launchpad“. Jo pagrindinės charakteristikos pateiktos lentelėje 2.1 lentelė. Šis maketas pasirinktas dėl to, kad turi slankaus kabelio modulį, kuris bus reikalingas amplitudžių

spektro skaičiavimams. Taip pat turi SPI modulį komunikacijai su akcelerometru, UART modulį komunikacijai su kompiuteriu.

2.1 lentelė. Maketo „Stellaris Launchpad“ charakteristikos

Procesorius	80MHz 32-bit, ARM Cortex - M4
Atmintis	256KB Flash / 32KB SRAM / 2KB EEPROM
Periferija	USB, UART, I2C, CAN, SPI
GPIO	43 - bendros paskirties išvadai

Dažnio matavimui naudojamas skaitmeninis „STMicroelectronics“ H3LIS331DL akcelerometras. Šis akcelerometras pasirinktas todėl, kad jo dažnių juosta bei matuojamas diapazonas atitinka reikiamą, be to yra skaitmeninis ir nereikia papildomų elementų duomenų surinkimui. Gali būti jungiamas tiesiai prie mikrovaldiklio. Akcelerometro parametrai pateikti lentelėje 2.2 lentelė. Šis akcelerometras pasirinktas dar ir dėl to, jog matavimo tikslumas bei diskretizavimo dažnis gali būti pasirenkamas. Duomenų perdavimas galimas per kelias skaitmenines sąsajas SPI ir I2C. Taip pat gali dirbti esant dideliems pagreičiams.

2.2 lentelė. Akcelerometro H3LIS331DL parametrai

Jutiklio tipas	MEMS
Maitinimo įtampa	2.16V - 3.16V
Diskretizavimo dažnis	0.5 Hz - 1 kHz
Matavimo ribos	±100g/±200g/±400g/, maksimalus pagreitis - 1000g

Pagrindiniai nustatymai reikalingi parengti akcelerometrą darbui yra skaitmeninės sąsajos išrinkimas duomenų perdavimui, diskretizavimo dažnis, filtro pjūvio dažnis. Visi konfigūravimo registrai pateikti priede (PRIEDAS NR.2).

Komunikacijai su akcelerometru naudojama SPI sąsaja. Ji pasirinkta dėl didesnio duomenų perdavimo greičio pastaroji veikia 10MHz dažniu, kai I2C sąsajos taktinis dažnis siekia tik 400kHz. Kiti atlikti nustatymai pateikti lentelėje (2.3 lentelė.).

2.3 lentelė. Akcelerometro nustatymai

Sąsaja	SPI
Diskretizavimo dažnis	1 kHz
Žemų dažnių filtro pjūvio dažnis	780 Hz
Matavimo ruožas	±100 g

Eksperimentinėje sistemoje atstumui matuoti buvo pasirinktas SHARP GP2Y0A21YK jutiklis. Atstumas nustatomas infraraudonųjų spindulių pagalba Šio matuoklio išėjime priklausomai nuo atstumo keičiama įtampa. Šiai įtampai matuoti panaudotas mikrovaldiklyje esantis 12 bitų analogas kodas keitiklis. Jutiklio parametrai pateikti 2.4 lentelė.

2.4 lentelė. SHARP GP2Y0A21YK jutiklio parametrai

Maitinimo įtampa	4.5V – 5.5V
Išėjimo įtampa	0.4 V– 3.1 V
Naudojama srovė	30 mA
Matavimo ruožas	10 cm – 80cm

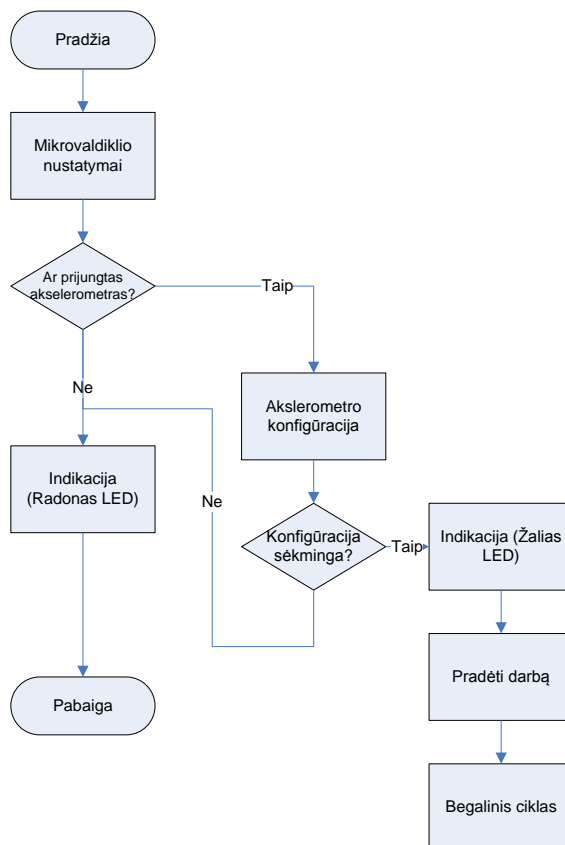
2.3 Duomenų surinkimo ir apdorojimo algoritmai

Mikrovaldiklio darbo algoritmas pateiktas 2.3 pav. jame pavaizduoti tik pagrindiniai žingsniai.

Mikrovaldikliui pradėjus darbą pirmiausia atliekami įvairūs nustatymai:

- taktinio dažnio nustatymas,
- bendros paskirties išvadų konfigūravimas,
- įvairių modulių įjungimas bei konfigūravimas,
- sukonfigūruojama UART sąsaja komunikacijai su kompiuteriu,
- sukonfigūruojama SPI sąsaja komunikacijai su akcelerometru,
- programos pertraukčių nustatymai.

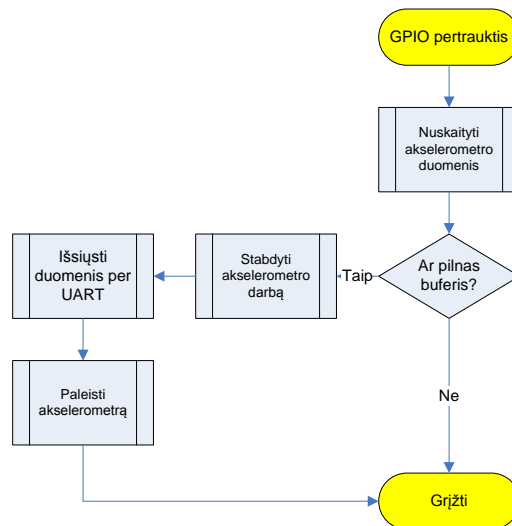
Atlikus reikalingus mikrovaldiklio nustatymus sekančiame žingsnyje patikrinama ar prijungtas akcelerometras. Tai atliekama nuskaitant prijungto įrenginio registrą, kuriame yra įrenginio identifikacinis numeris. Jei nuskaitytas sutampa su turimu numeriu – darbas tęsiamas, jei ne – darbas nutraukiamas ir tai indikuojama raudonu šviesos diodo signalu. Aptikus prijungtą akcelerometrą atliekamas jo konfigūravimas. Į reikiamus registrus įrašomi atitinkami duomenys, konfigūravimas laikomas sėkmingu, tada kai po konfigūracijos atlikimo nuskaitytų registrų turinys sutampa. Tuo atveju kai registrų turinys nesutampa mikrovaldiklis baigia darbą, tai indikuodamas raudonu šviesos diodo signalu. Kitu atveju uždegamas žalias signalas ir sistema pradeda darbą. Mikrovaldiklio programa pereina į begalinį ciklą, kuri gali būti laikinai sustabdytas esant pertrauktims.



2.3 pav. Pagrindinis mikrovaldiklio darbo algoritmas

Kadangi akcelerometras sukonfigūruotas taip, jog esant naujai duomenų sekai suformuojamas duomenų parengties signalas (*angl. Data Ready*) akcelerometro išvade. Šis signalas iššaukia mikrovaldiklio programos pertrauktį, kurios vykdymo algoritmas pateiktas 2.4 pav.

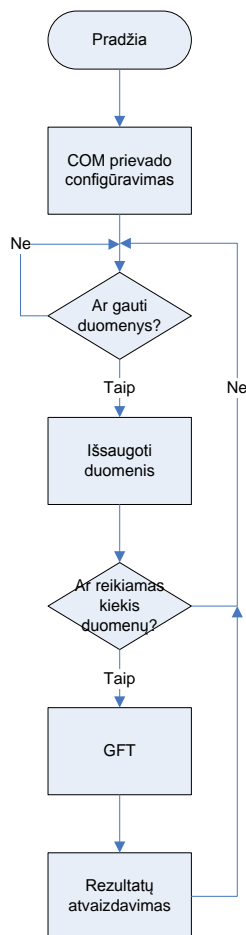
Pertrauktyje nuskaitomi akcelerometro duomenys (viena atskaita), tada patikrinama ar duomenų buferis pilnas. Jo dydis nustatomas pagal tai koks duomenų kiekis norimas surinkti. Užsipildžius duomenų buferiui, stabdomas akcelerometro darbas ir duomenys iš buferio perduodami kompiuteriui.



2.4 pav. Mikrovaldiklio pertraukties vykdymo algoritmas

Atliekant pirmuosius sistemos bandymus duomenys buvo apdorojami kompiuteryje „Matlab“ programos paketu. Kurios algoritmas pateiktas 2.5 pav.

Sukonfigūruojamas ir atidaromas kompiuterio COM prievadas. Priimti duomenys saugomi duomenų masyve. Kai surenkamas reikiamas kiekis GFT (*Greitoji Furje transformacija*) skaičiavimui (šiuo atveju 512 atskaitų) paskaičiuojamas amplitudžių spektras ir atvaizduojamas grafiškai.



2.5 pav. „Matlab“ programos vykdymo algoritmas

3. MATAVIMO METODAI

Šiame skyriuje aprašomi metodai kuriais buvo remtasi matuojant vibravimo dažnį bei atstumą.

3.1 Plakto vibravimo dažnio nustatymas

Plakto vibravimo dažnis gali būti nustatomas iš akcelerometro duomenų, juos perkeliant iš laiko srities į dažnių sritį ir atvaizduojant kaip amplitudžių spektrą.

Amplitudžių spektras gaunamas skaičiuojant diskretinio signalo greitąją Furje transformaciją GFT [14]. Jei turime diskretinį signalą $x(n)$:

$$x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1) \quad (3.1)$$

kur N – atskaitos numeris, tada randame transformacijos koeficientus $X(k)$:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \text{ kai } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.2)$$

kur $W = e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}$, o $x(n)$ – diskretinio signalo atskaita.

Kadangi gauti koeficientai yra kompleksiniai ir norint atvaizduoti tik amplitudžių spektrą reikalingas koeficientų modulis. Spektra atskaitų vertės A_k gaunamos:

$$A_k = \frac{1}{N} |X(k)| = \frac{1}{N} \sqrt{(\text{Real}[X(k)])^2 + (\text{Imag}[X(k)])^2}, \quad \text{kai } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.3)$$

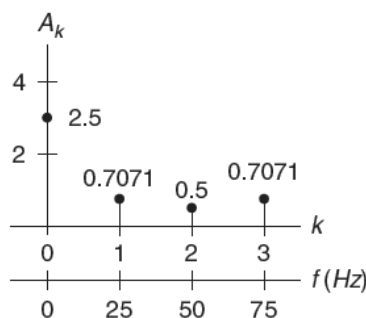
kur $X(k)$ – transformacijos koeficientai.

Norint gautas amplitudžių spektra vertes susieti su atitinkama dažnio atskaita f naudojama formulė (3.4):

$$f = \frac{kf_d}{N} \quad (3.4)$$

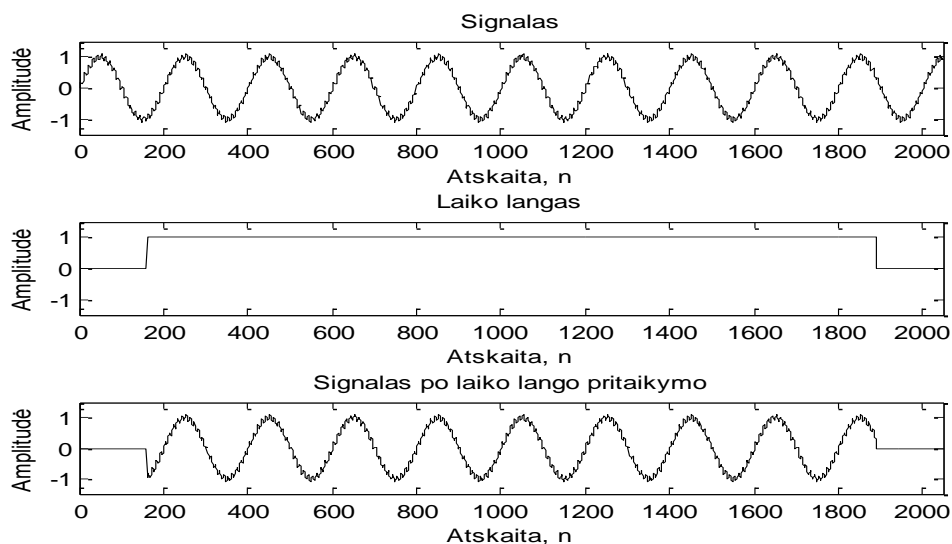
kur k – atskaitos numeris, f_d – diskretizavimo dažnis, N – atskaitų skaičius.

Amplitudžių spektra dažniausiai atvaizduojamas ties atitinkama dažnio atskaita atidedant amplitudžių vertes (3.1 pav.).



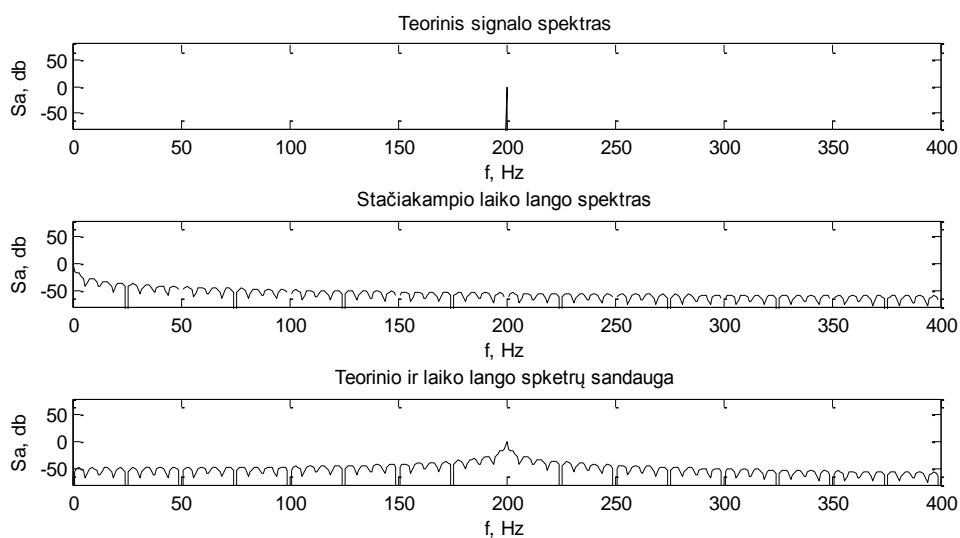
3.1 pav. Amplitudžių spektra atvaizdavimas

Viena iš greitosios „Furje“ transformacijos savybių yra ta, jog ji gali būti taikoma tik baigtinio ilgio signalams. Daugeliu atvejų analizuojami signalai, nėra baigtinės trukmės todėl signalams pritaikomas laiko langas, kurio metu paimama tik tam tikra signalo dalis. Paveikslėlyje 3.2 pav. pavaizduotas laiko lango pritaikymo rezultatas signalui laiko srityje.



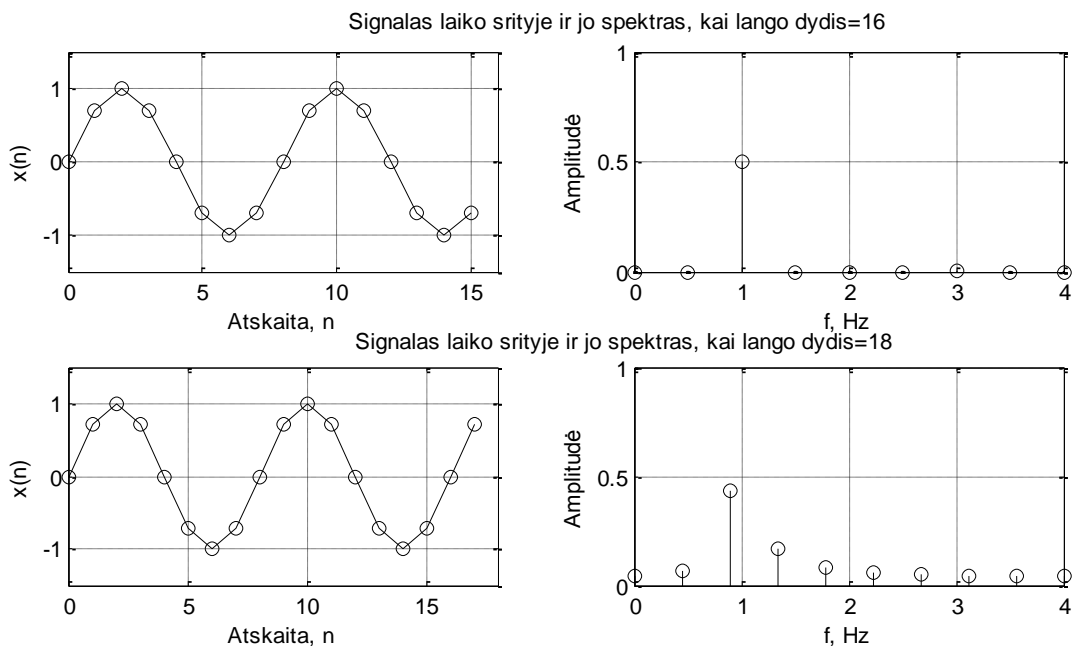
3.2 pav. Laiko lango pritaikymas: viršuje analizuojamas signalas, viduryje - laiko langas, apačioje signalas po lango pritaikymo

Šiuo atveju naudojamas stačiakampio formos laiko langas ir jo atskaitos sudauginamos su signalo atskaitomis. Lango ribose signalas nepakeičiamas, o už lango ribų lygus nuliui. Signalų sandauga dažnių srityje yra signalų spektrų „sąsuka“. Paveikslėlyje 3.3 pav. pavaizduotas signalo teorinis spektras (viršuje), kuris yra tik viena dažnio dedamoji, laiko lango spektras (viduryje) ir rezultatas (apačioje). Gautas rezultatas nebėra tik viena dažnio atskaita ties signalo dažniu, o jau su dirbtinėmis spektrinėmis linijomis ir šalutiniais šoniniais lapeliais.



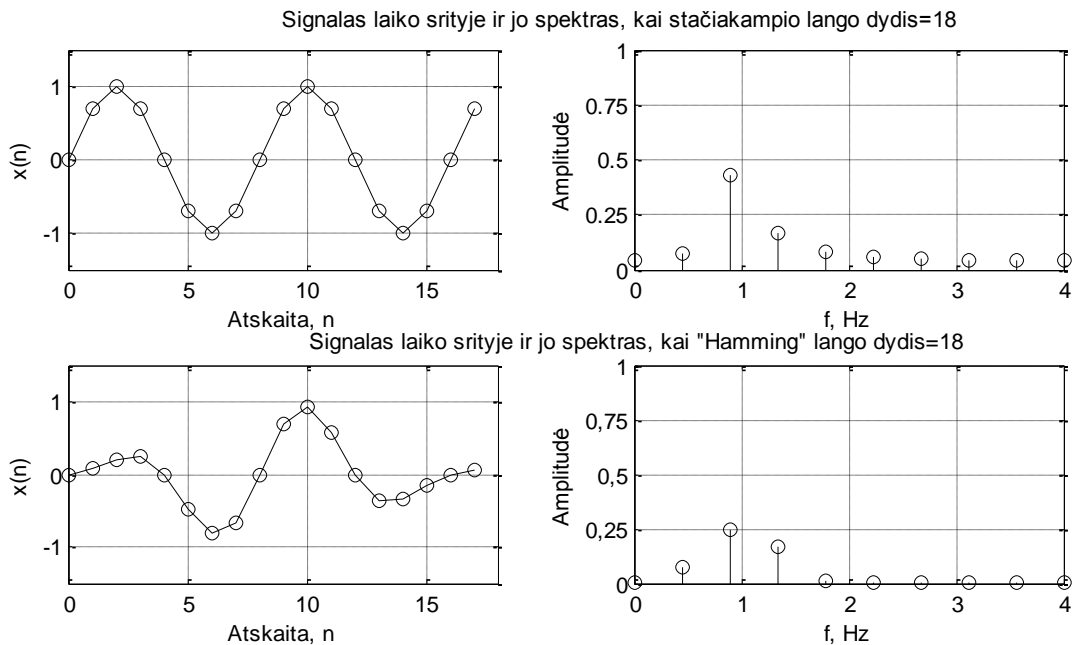
3.3 pav. Signalų ir lango spektrų „sąsukos“ rezultatas

Skaičiuojant signalo dažnių spektrą remiamasi keliomis prielaidomis: priimama, kad signalas periodiškai kartojasi, nėra staigių trūkių tarp signalo atskaitų sekų, signale nėra dažnio dedamųjų aukštesnių, kaip pusė diskretizavimo dažnio. Pirmoji prielaida dažnai yra pažeidžiama, nes sunku užtikrinti, kad analizuojant realius signalus bus visada paimta signalo atkarpa, kurioje telpa sveikas periodų skaičius. Tai iššaukia spektro „nutekėjimo“ efektą. Paveikslėlyje 3.4 pav. pavaizduoti atvejai, kai spektro skaičiavimui paimama $N=16$ ir $N=18$ signalo atskaitų. Pirmu atveju analizuojamoje signalo dalyje telpa sveikas periodų skaičius, o antru atveju du periodai ir dalis trečiojo. Matoma, kad antru atveju signalo spektre atsiranda dedamųjų, kurių iš tikrųjų nėra signale. Šios dedamosios atsirado dėl to jog atsirado signalo trūkis tarp signalo pradžios ir pabaigos. Kuo didesnis trūkis tuo didesnis pašalinių dedamųjų lygis.



3.4 pav. Spektro nutekėjimo efektas dėl nesveiko skaičiaus signalo periodų

Spektro nutekėjimo efektas mažinamas signalui pritaikant įvairių formų laiko langus, kurių pagalba signalo amplitudė pradžioje ir pabaigoje specialiai sumažinama. Paveikslėlyje (3.5 pav.) pavaizduotas signalo spektras prieš ir po „Hanningo“ lango pritaikymo. Galima pastebėti jog pašalinių dažnių dedamųjų lygis sumažėjo. Tokiu atveju galima objektyviau įvertinti signalo spektrą ir nustatyti signalo dažnį kai jis nėra žinomas.



3.5 pav. Hanning lango pritaikymas signalui

Kitas efektas atsirandantis dėl signalo apribojimo laiko langu yra spektro dažninės skyros sumažėjimas. Mažiausias skirtumas tarp spektrinių dažnio dedamųjų gali būti išreikštas formule:

$$\Delta f = \frac{1}{T_L} \quad (3.5)$$

kur T_L – laiko lango trukmė. Iš formulės matyti, jog norint padidinti dažninę skyrą reikia didinti laiko lango dydį ir signalo atskaitų skaičių. Paveikslėlyje nr. 3.6 pavaizduota laiko lango trukmės įtaka signalo amplitudžių spektro dažninei skyrai. Panaudotas 10Hz signalas $x(n)$, diskretizuotas 1kHz dažniu, pirmu atveju (3.6 pav. grafikai viršuje) laiko langas apima 500 atskaitų t.y. 0.5s ir dažninė skyra pagal formulę (3.5) yra 2Hz:

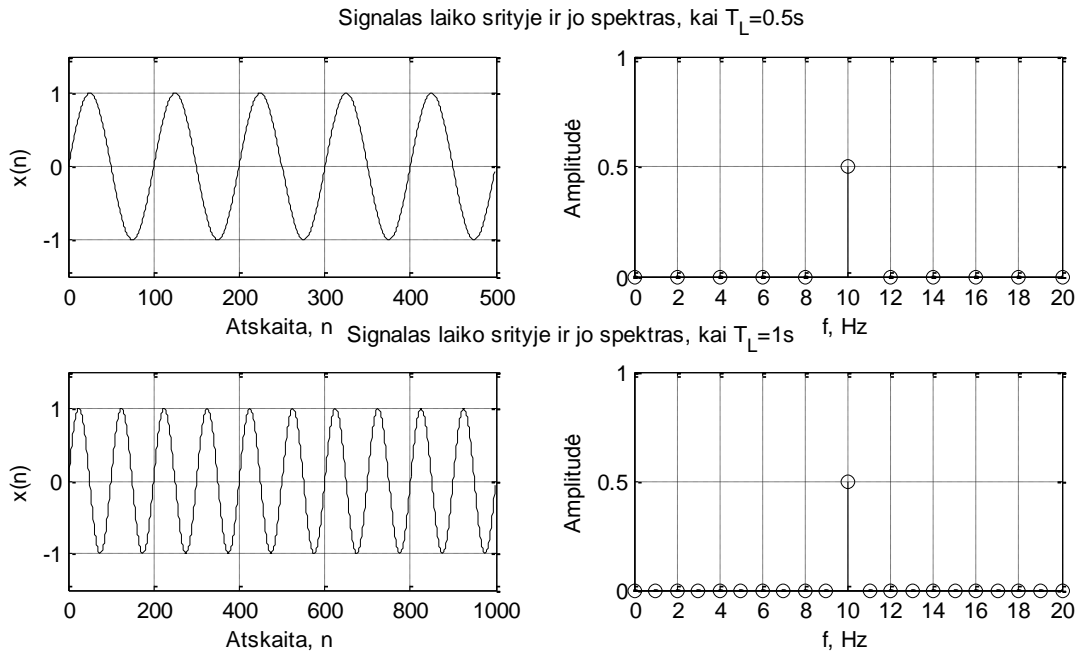
$$\Delta f = \frac{1}{T_L} = \frac{1}{0.5} = 2 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

Antru atveju (3.6 pav. grafikai apačioje) signalo parametrai tokie patys tačiau panaudotas didesnę atskaitų kiekį apimantis laiko langas, kurio trukmė 1s. Šiuo atveju gauta signalo amplitudžių spektro dažninė skyra lygi:

$$\Delta f = \frac{1}{T_L} = \frac{1}{1} = 1 \text{ Hz} \quad (3.7)$$

Iš pateiktų pavyzdžių matyti, jog norint tinkamai atvaizduoti analizuojamo signalo amplitudžių spektrą reikia iš anksto žinoti signalo parametrus tokius kaip diskretizavimo dažnį ir tinkamai parinkti laiko lango trukmę.

Padidinti dažninę skyrą galima į „atkirpto“ signalo pabaigą įterpti nulį. Tai atlikus nepridedama papildomos informacijos apie signalą tačiau galima lengviau interpretuoti rezultatus.



3.6 pav. Laiko lango trukmės įtaka dažninei skyrai

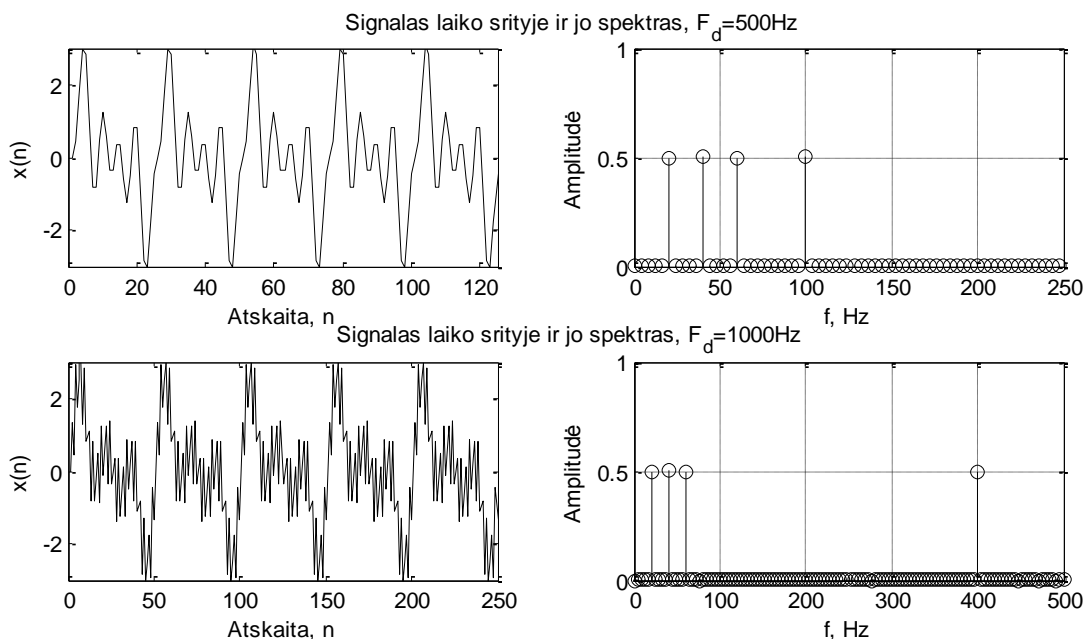
Kitas svarbus parametras analizuojant signalus yra diskretizavimo dažnis – F_d . Nuo šio dažnio parinkimo priklauso ar korektiškai bus atvaizduojamas analizuojamo signalo spektras. Diskretizavimo dažnis parenkamas remiantis „Naikvisto“ teorema. Ja remiantis diskretizavimo dažnis turi būti daugiau nei du kartus didesnis už maksimalų analizuojamo signalo dažnį. Paveikslėlyje 3.7 pav. pavaizduota diskretizavimo dažnio įtaka signalo amplitudžių spektro atvaizdavimui. Įtakai nustatyti buvo sudarytas signalas susidedantis iš sinusinių harmonikų kurio išraiška:

$$x(n) = \sin\left(2\pi f_1 n \frac{1}{F_d}\right) + \sin\left(2\pi f_2 n \frac{1}{F_d}\right) + \sin\left(2\pi f_3 n \frac{1}{F_d}\right) + \sin\left(2\pi f_4 n \frac{1}{F_d}\right) \quad (3.8)$$

kur $f_1=20\text{Hz}$, $f_2=40\text{Hz}$, $f_3=60\text{Hz}$, $f_4=400\text{Hz}$ – harmonikų dažniai, n – signalo atskaita, F_d – diskretizavimo dažnis. Paveikslėlio viršuje signalas diskretizuotas $F_d=500\text{Hz}$ dažniu, amplitudžių spektre matyti, jog pirmosios trys harmonikos atvaizduojamos tiksliai tačiau ketvirtoji $f_4=400\text{Hz}$ harmonika yra už spektro vaizdavimo ribų ir atsirado 100Hz harmonika kurios signale nebuvo. Matyti spektro „persidengimo“ efektas kai dažnių dedamosios esančios už „Naikvisto“ dažnio ribos persikelia į žemų dažnių sritį. Šiuo atveju signalo spektras yra klaidingas ir neleidžia tinkamai interpretuoti informacijos apie signalą.

Paveikslėlyje 3.7 pav. apačioje pavaizduota to paties signalo analizės rezultatai kai naudotas $F_d=1000\text{Hz}$ diskretizavimo dažnis. Signalų harmonikų dažniai išlaikyti tie patys tačiau

dabar amplitudžių spektre visos keturios dedamosios atvaizduojamos korektiškai. Parinktas didskretizavimo dažnis tenkina „Naikvisto“ teoremą.



3.7 pav. Diskretizavimo dažnio įtaka signalo amplitudžių spektro atvaizdavimui

3.2 Pasiecto gylio nustatymas

Poliaus pasiektą gylį galima nustatyti įvairiais metodais. Tiesioginis gylio matavimas naudojantis rankiniais įrankiais reikalauja papildomų žmogiškųjų išteklių t.y. reikalinga nuolat stebėti poliaus kalimo procesą ir atlikti matavimus rankiniu būdu ir juos dokumentuoti. Kitas būdas naudoti papildomus įrenginius (lazeriniai atstumo matuokliai, matavimo ritės) tačiau ir šis būdas kelia tam tikrų problemų siekiant efektyviai išnaudoti darbo laiką ir priemones. Lazerinių atstumo matuoklių panaudojimą apsunkina statybų aikštelėse esančios dulkės, purvas dėl ko jie nuolat turėtų būti tikrinami ir valomi. Matavimo ričių panaudojimas reikalauja papildomų parengiamųjų darbų tokių kaip ritės pritvirtinimas prie kalimo mašinos ir trosu prikabinimas prie poliaus. Taip pat kaip ir lazeriniams atstumo matuokliams dulkės ir purvas gali sugadinti matuoklės mechanines dalis. Visų šių problemų būtų galima išvengti matuojant poliaus pasiektą gylį netiesioginiais metodais – panaudoti duomenis iš akcelerometro. Kadangi akcelerometro duomenų atskaitos paaimamos tam tikru intervalu todėl žinomas laikas ir pagreitis tuo momentu. Žinant šiuos du dydžius galima rasti poliaus judėjimo greitį ir nueitą kelią.

Fizikinis dydis pagreitis [15] – apibūdina greičio pakitimą per laiko vienetą. Kūnas juda su pagreičiu, jei kinta jo greitis arba kryptis. Algebrinė pagreičio vertė yra pirmoji greičio arba antroji kelio išvestinė:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} \quad (3.9)$$

Fizikinis dydis greitis [15] – kelias, kurį kūnas nueina per vienetinį laiką, jis apibūdina judėjimo greitumą ir judėjimo kryptį tam tikru laiko momentu. Skaitine verte jis lygus pirmajai kelio išvestinei laiko atžvilgiu:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (3.10)$$

Tačiau reikalinga rasti kūno greitį ir nueitą kelią turint jo pagreitį ir laiką. Žinant, kad $dv = a dt$, greitis gali būti rastas integruojant:

$$v = \int a dt = at + C \quad (3.11)$$

kur C priklauso nuo pradinių sąlygų:

- 1) jei $t = 0$ ir $v = 0$, tai ir $C = 0$; tada $v = at$
- 2) jei $t = 0$, $v = v_0$, tai $C = v_0$; tada $v = v_0 + at$.

Turint kūno greitį ir laiką gali būti rastas ir nueitas kelias s :

$$s = \int v dt = \int (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{at^2}{2} + C \quad (3.12)$$

kur $C = s_0$, jei $t = 0$. Tada gauname galutinę nueito kelio formulę:

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (3.13)$$

kur s – nueitas kelias, s_0 – pradinis atstumas, v_0 – pradinis greitis, – pagreitis, t – laikas.

Šio metodo trūkumas yra tas, kad apskaičiuojant kiekvienos atskaitos rezultatą gaunama paklaida yra sumuojama. Todėl svarbu tinkamas duomenų apdorojimas ir tikslumas.

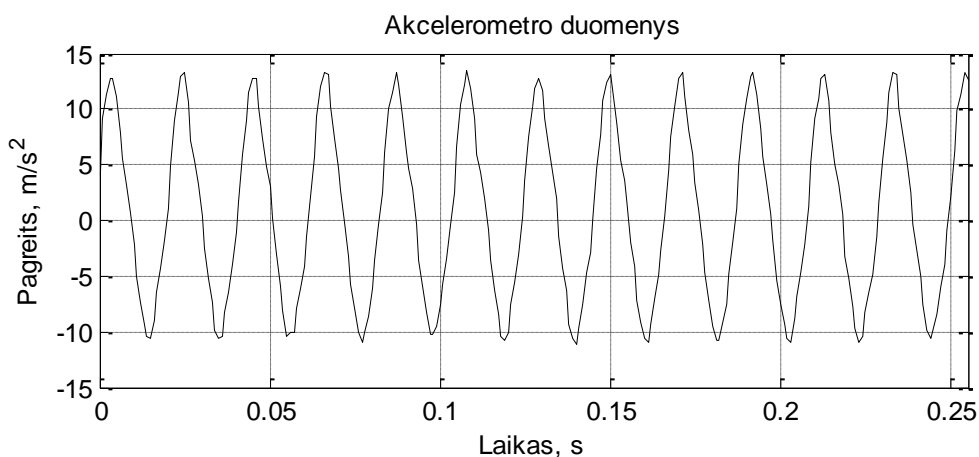
4. TYRIMŲ REZULTATAI

Šiame skyriuje pateikiami tyrimų ir eksperimentų metu gauti rezultatai – vibravimo dažnio, pasiekto gylio matavimai ir smigimo greičio.

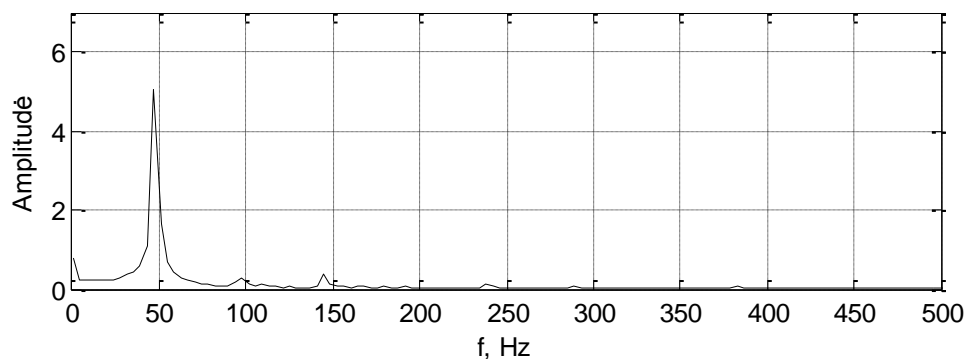
4.1 Vibravimo dažnio nustatymo rezultatai

Sistemos bandymams buvo naudojamas žemų dažnių garsiakalbis. Akcelerometras pritvirtinamas prie membranos. Tokiu būdu buvo galima sukelti žinomo dažnio vibracijas ir palyginti ar sistemos nustatomas dažnis jį atitinka.

Rezultatas pateiktas 4.2 pav. ir 4.1 pav., viršuje pavaizduoti akcelerometro duomenys laiko srityje, o apačioje dažnių srityje. Garsiakalbiu buvo generuojamas 50Hz dažnio tonas. Pateiktame amplitudžių spektre matoma, jog pagrindinis dažnis atitinka generuojamą. Taip pat galima pastebėti spektro „nutekėjimo“ efektą, tačiau pagrindinis dažnis išskiriamas pakankamai aiškiai.



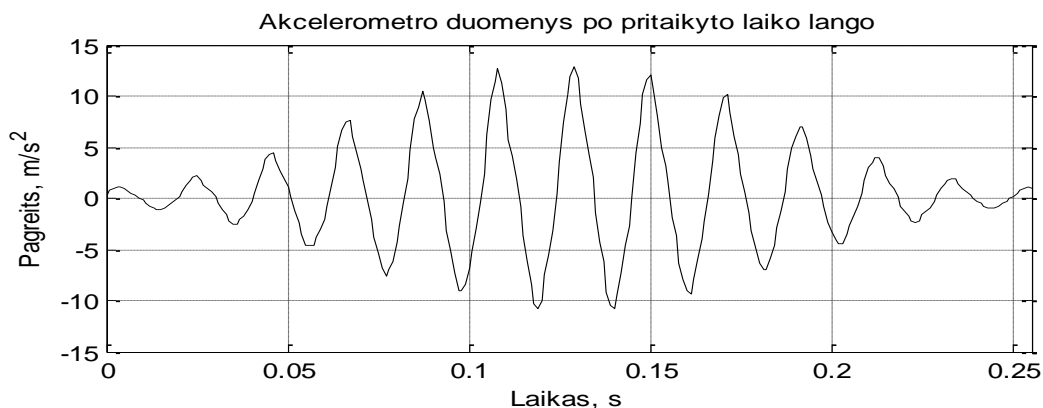
4.1 pav. Akcelerometro duomenys laiko srityje



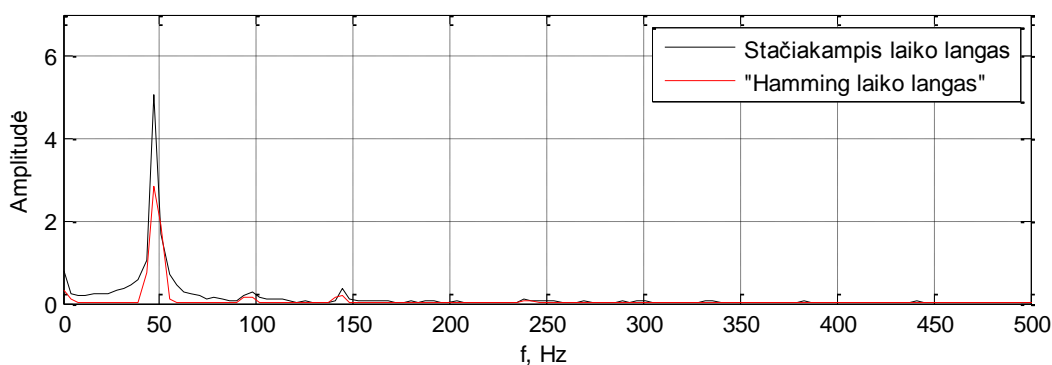
4.2 pav. Akcelerometro duomenys dažnių srityje

Spektro nutekėjimo efektui mažinti buvo pritaikyti įvairių formų langai. Geriausias rezultatas pasiektas taikant „Hamming“ tipo langą. Signalas po lango taikymo pavaizduotas 4.3

pav. Dažnių srityje (4.4 pav.) matyti jog sumažėjo signalo spektre atsiradusių papildomų dažnių dedamųjų lygis, tačiau pagrindinė dedamoji taip pat sumažėjo. Nors ir taikant laiko langą sumažėjo pagrindinė dažnio dedamoji atitinkanti signalo dažnį, tačiau grafiškai signalo spektras atvaizduojamas korektiškiau, nebematyti „netikrų“ dažnio dedamųjų, kurios atsirado dėl spektro „nutekėjimo“ efekto.



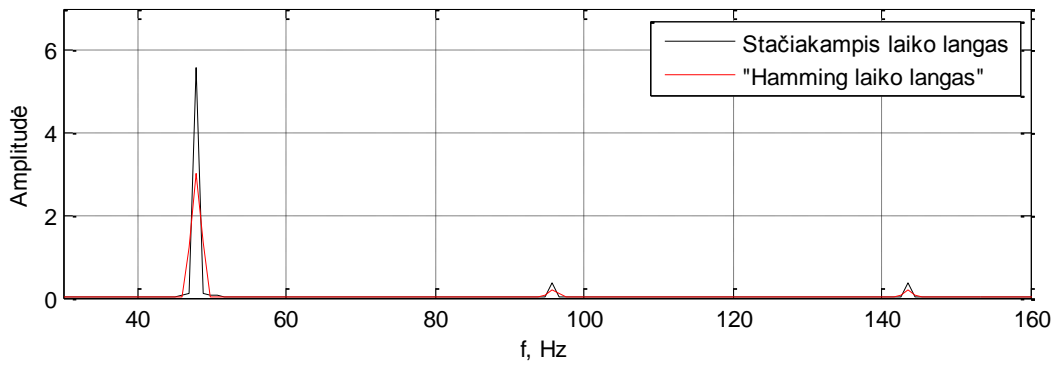
4.3 pav. Akcelerometro duomenys po lango pritaikymo laiko srityje



4.4 Akcelerometro duomenys po lango pritaikymo dažnių srityje

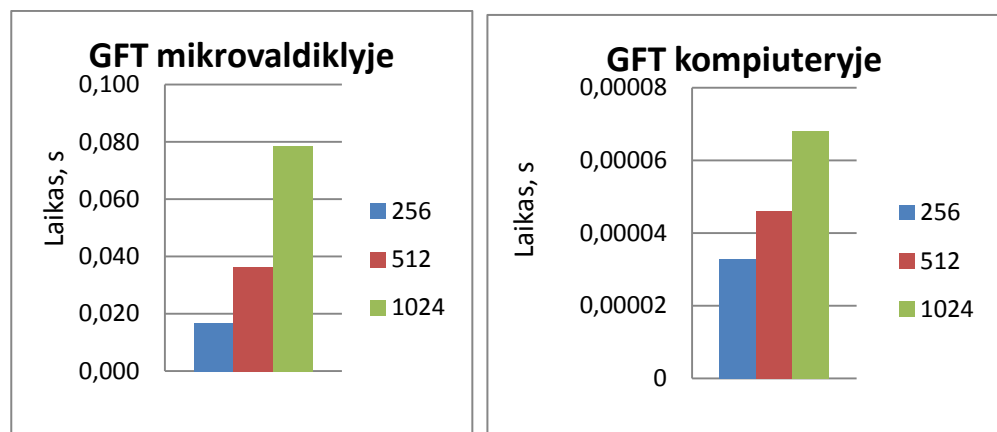
Pagal formulę (3.5) paskaičiuotas minimalus reikalingas laiko lango dydis, kad gauti 1Hz dažninė skyra. Jo trukmė lygi vienai sekunde. Kadangi akcelerometras sukongfigūruotas taip kad duomenys diskretizuojami 1 kHz dažniu tai reikalingas atskaitų kiekis bus $n=1024$ (kartotinis 2, kaip to reikalauja GFT algoritmas).

Padidinus signalo atskaitų skaičių pastebėta, jog sumažėja spektro "nutekėjimo" efektas (žr. 4.5. pav.). Todėl galima teigti, jog laiko lango taikymas turi didesnę įtaką, kai norima atvaizduoti signalo amplitudžių spektrą iš mažesnio atskaitų skaičiaus.



4.5. pav. Signalų spektras padidinus atskaitų skaičių (susiaurinta dažnių juosta detalesniam atvaizdavimui)

Kadangi sistemai reikalinga stebėti ir apdoroti duomenis realiu laiku, buvo nustatyti pagrindinių operacijų įvykdymo laikas. Tokiu būdu galima nustatyti kurią operaciją reikėtų optimizuoti. Paveikslėlyje 4.6 pav. pateikti GFT skaičiavimo trukmė, juos atliekant mikrovaldiklyje ir kompiuteryje, priklausomai nuo duomenų kiekio. Matyti, jog spartesnis GFT skaičiavimas vykdomas kompiuteryje.



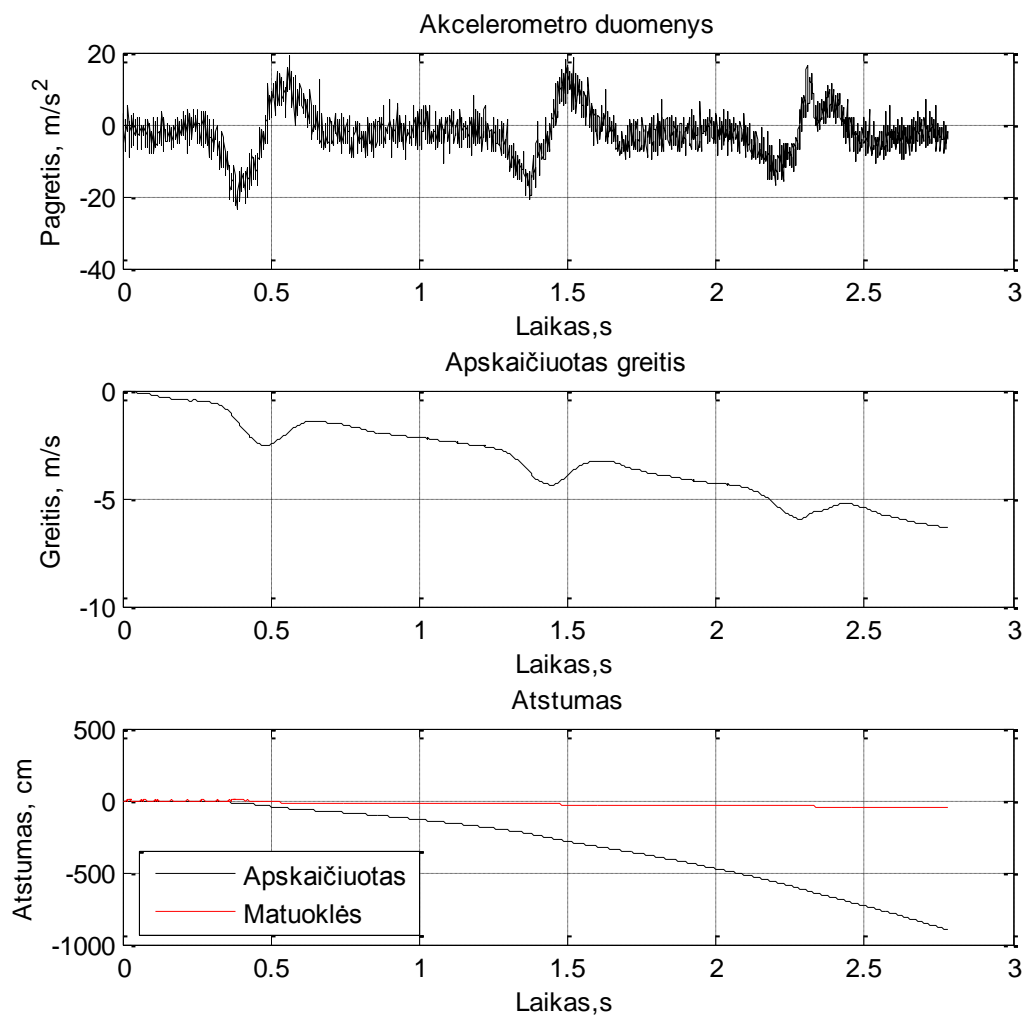
4.6 pav. GFT skaičiavimo operacijų trukmė

4.2 Poliaus pasiekto gylio matavimo rezultatai

Buvo siekiama nustatyti poliaus pasiektą gylį naudojant tą patį akcelerometrą su kuriuo buvo nustatomas plakto vibravimo dažnis. Eksperimentinė sistema pateikta priede (PRIEDAS NR.3). Rezultatų patikimumui nustatyti buvo naudojamas atstumo matuoklis ir gauti duomenys buvo palyginti su apskaičiuotais. Akcelerometras buvo pritvirtintas prie atstumo matuoklio, ir keičiama jo pozicija. Atliekant eksperimentą atstumo matuoklis buvo kelis kartus nuleidžiamas žemyn „Z“ ašies atžvilgiu.

Bandymu rezultatai pateikti 4.7. pav. viršutiniame grafike pavaizduota akcelerometru išmatuotos pagreičio atskaitos. Matyti jog signalas turi nemažą triukšmo lygį kuris svyruoja nuo

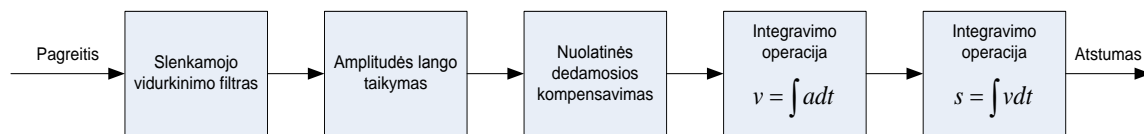
-5 iki 5 m/s² ir neigiamą nuolatinę dedamąją. Tokie duomenys yra klaidinantys, nes pradžioje akcelerometras yra ramybės būsenoje, o duomenys rodo neigiamą pagreitį nors pagreitis turėtų būti lygus nuliui. Viduriniame 4.7. pav. grafike pateiktas apskaičiuotas akcelerometro judėjimo greitis laikant jog pradinis buvo lygus nuliui. Iš grafiko matyti, jog paklaida atsiradusi dėl triukšmo ir papildomo nuolatinio lygio integruojant akcelerometro pagreitį vis auga. Todėl sudaromas klaidingas išpūdis, jog greitis nuolat didėja. Paskutiniame 4.7. pav.. grafike pateiktas apskaičiuotas atstumas. Čia integruojant antrąjį kartą akcelerometro duomenis, paklaida pasidaro dar didesnė ir gaunami realybės neatitinkantys atstumai. Dėl šių priežasčių reikalinga imtis priemonių sumažinančių šias paklaidas.



4.7. pav. Atstumo matavimo rezultatai

Norint sumažinti integravimo metu gautas paklaidas reikalinga sumažinti triukšmo lygį signale [16] [17]. Tai galima padaryti naudojant slenkančio vidurkio filtrą [18], eliminuoti

nereikšmingas atskaitas bei kompensuoti amplitudės poslinkį. Veiksmų seka pavaizduota 4.8. pav.



4.8. pav. Signalų apdorojimo seka

Slenkančio vidurkio filtras gali būti išreikštas formule:

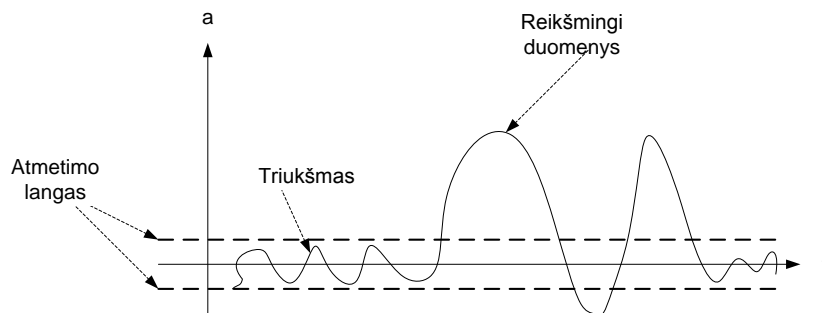
$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (4.1)$$

kur y – filtro išėjimo atskaita, M – filtro eilė, x – įėjimo signalas.

Taikant amplitudės langą yra atmetami nereikšmingi duomenys, kurie atsiranda dėl triukšmo ir jie pakeičiami nuliais. Užsiduodamos lango ribos ir tik reikšmės esančios už lango ribų yra paliekamos:

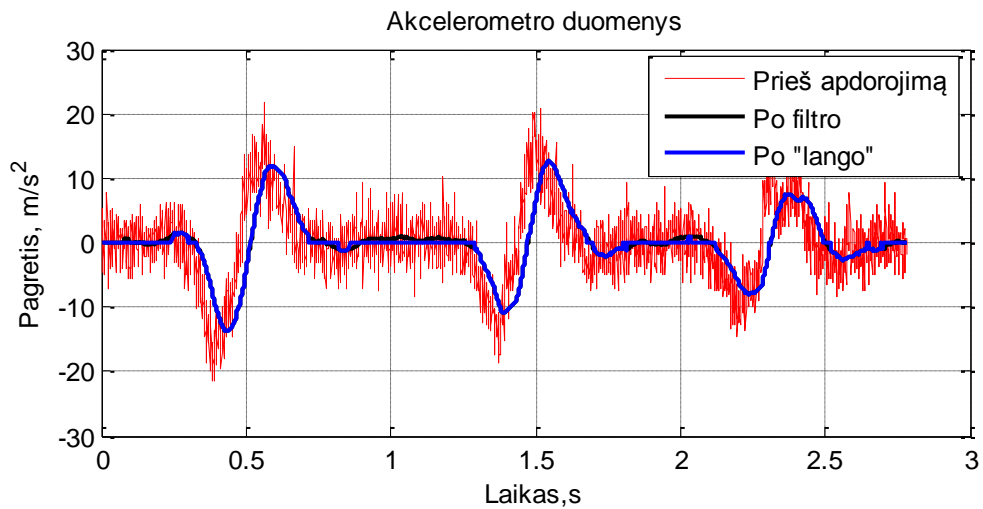
$$x(i) = \begin{cases} 0, & \text{kai } n_{\min} < x(i) < n_{\max} \\ x(i), & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (4.2)$$

kur x – įėjimo signalas, n_{\min} ir n_{\max} lango ribos. Grafiškai amplitudės lango taikymas pateiktas 4.9. pav.



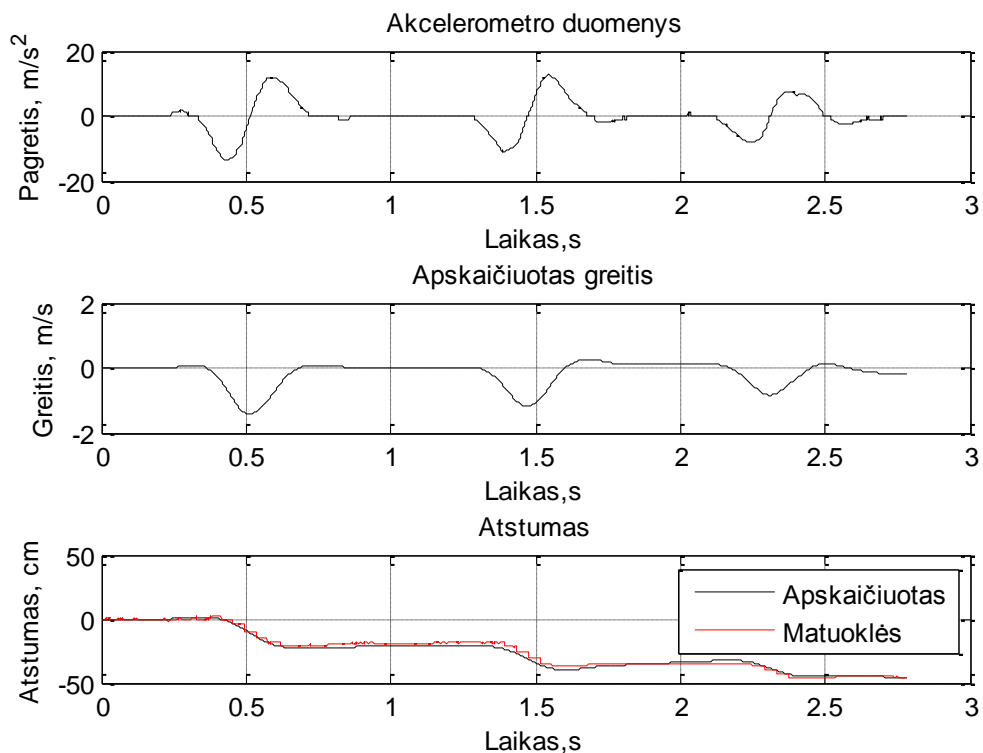
4.9. pav. Amplitudės lango taikymas

Paveikslėlyje 4.10. pav. atvaizduoti akcelerometro duomenys po apdorojimo anksčiau minėta seka. Matyti jog stipriai sumažinamas triukšmo lygis ir pašalinami nereikšmingi duomenys. Tokiu būdu išskiriamas pagreitis atsiradęs tik dėl judesio. Taip pat galima pastebėti kad dėl slenkančio vidurkio filtro atsirado signalo vėlinimas, kuri priklauso nuo filtro eilės. Kuo naudojama aukštesnė filtro eilė tuo didesnis vėlinimas ir atvirkščiai.



4.10. pav. Akcelerometro signalas po apdorojimo

Grafike kuris pateiktas 4.11. pav. pavaizduotas akcelerometro signalas apdorotas 80 eilės slenkamojo vidurkio filtru ir taikant amplitudės langą kurio ribos $n_{\min}=-1$ ir $n_{\max}=1$. Tame pačiame paveikslėlyje pavaizduotas apskaičiuotas greitis bei atstumas ir jis palygintas su išmatuotu.

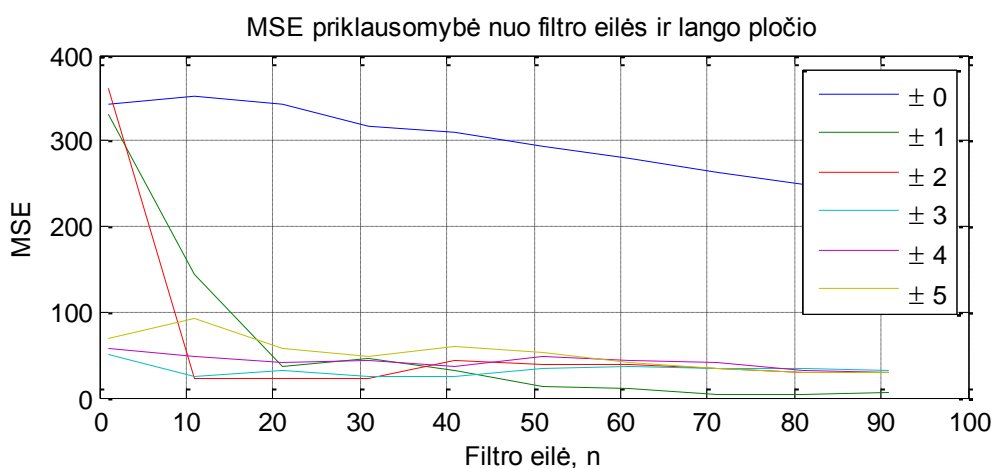


4.11. pav. Bandymo rezultatai

Paklaida buvo įvertinta naudojantis vidutinės kvadratinės paklaidos įverčiu MSE (*angl. mean squared error*):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - y(n))^2 \quad (4.3)$$

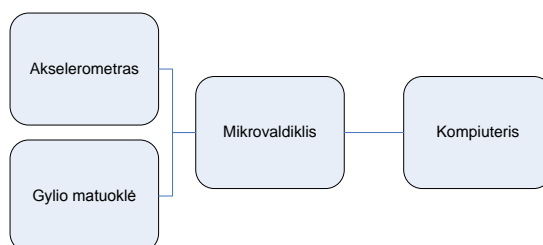
kur $x(n)$ – išmatuotas atstumas, $y(n)$ – apskaičiuotas atstumas. Remiantis šiuo kriterijumi nustatyta vidutinės kvadratinės paklaidos priklausomybė nuo slenkamojo vidurkio filtro eilės ir amplitudės lango ribų. Rezultatai pateikti 4.12. pav. kur matyti, jog mažiausia paklaida gaunama kai naudojamas filtras yra 80 eilės ir lango ribos yra nuo -1 iki 1.



4.12. pav. MSE priklausomybė nuo filtro eilės ir amplitudės lango ribų

4.3 Polių kalimo mašinos rezultatų apdorojimas

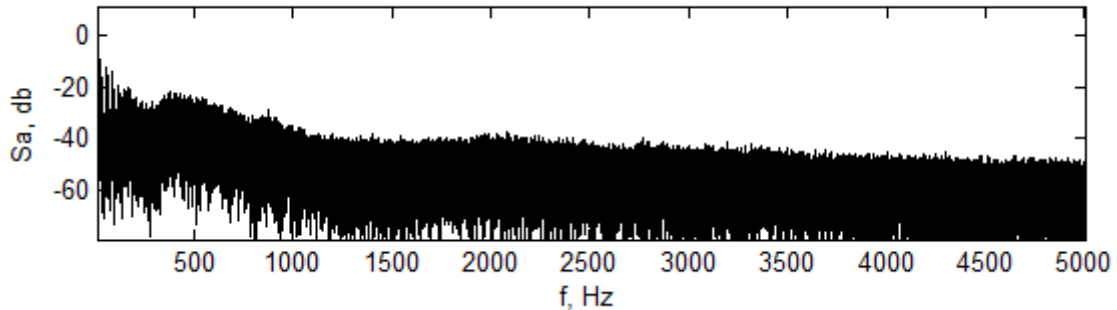
Siekiant nustatyti polių kalimo mašinos charakteristikas jos darbo metu buvo panaudota duomenų surinkimo sistema, kurios pagrindinės dalys pavaizduotos 4.13 pav. Ją sudaro analoginis akcelerometras, gylio matuoklė, mikrovaldiklis ir kompiuteris. Duomenys iš akcelerometro ir gylio matuoklės surenkami mikrovaldiklio pagalba ir perduodami kompiuteriui, kur yra išsaugomi. Duomenų perdavimui tarp mikrovaldiklio ir kompiuterio naudojama RS485 sąsaja. Kompiuteris šiuo atveju naudojamas duomenų kaupimui ir vėlesniam polių kalimo mašinos charakteristikų tyrimui.



4.13 Duomenų surinkimo sistemos struktūra

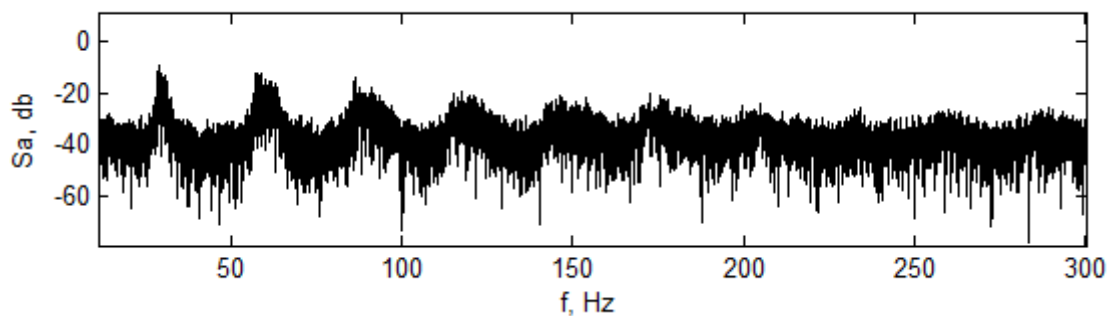
Surinkus duomenis iš akcelerometro buvo siekiama nustatyti kalimo dažnį bei kaip jis kinta proceso metu, taip pat nustatyti kitas dažnio dedamąsias jei tokių yra.

Akcelerometras buvo pritvirtintas prie poliakalės nevibruojančios dalies. Žemiau esančiame paveikslėlyje 4.14 pateiktas amplitudžių spektras iš akcelerometro duomenų. Naudotas diskretizavimo dažnis yra 10 kHz. Tačiau kaip matyti iš paveikslėlio pagrindinės dažnio dedamosios yra tik žemų dažnių srityje.

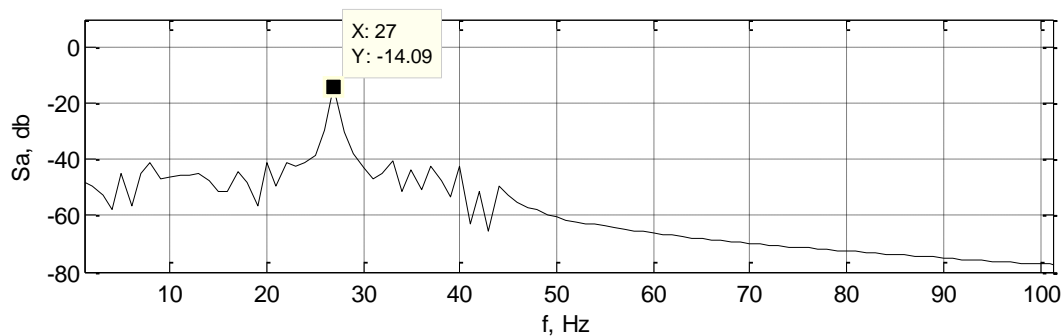


4.14 pav. Dažnių spektras iš akcelerometro duomenų.

Paveikslėlyje 4.15 pav. pateiktas amplitudžių spektras žemų dažnių srityje. Jame matyti pagrindinis polių kalimo mašinos dažnis – 27 Hz ir jo harmonikos – 54Hz, 81 Hz ir 108Hz. Paveikslėlyje 4.16 pav. atvaizduotas išskirtas pagrindinis kalimo dažnis su 1Hz paklaida.



4.15 pav. Amplitudžių spektras žemų dažnių srityje



4.16 Išskirtas kalimo dažnis

Rezultatai rodo, jog stebima poliaus kalimo mašinos dažnių juosta turėtų būti tik žemų dažnių srityje. Taip pat galima naudoti ir žemesnį diskretizavimo dažnį. Norint stebėti tik pagrindinį 27 Hz plakto dažnį pagal „Naikvisto“ teoremą, kuri sako, kad diskretizavimo dažnis turi būti bent dvigubai didesnis nei aukščiausio dažnio signalo dedamoji, todėl teoriškai diskretizavimo dažnis galėtų būti 54 Hz. Be to signalą reikalinga filtruoti žemų dažnių filtru tam,

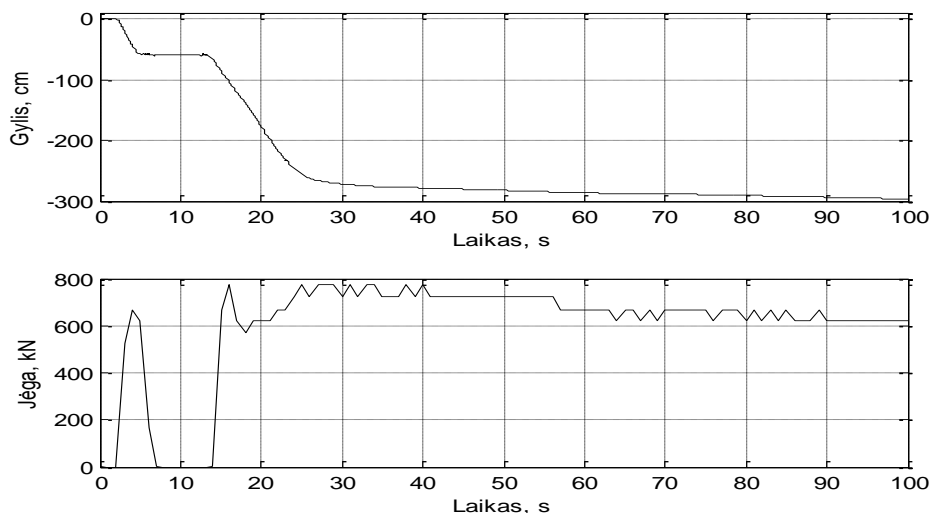
kad signale neatsirastų spektro persidengimo efekto. Tai efektas, kai signale esančios dažnių dedamosios didesnes nei pusė diskretizavimo dažnio persikelia į žemųjų dažnių sritį spektre.

Iš nustatyto kalimo dažnio pagal formulę (4.4) [19] galima apskaičiuoti kalimo jėgą:

$$F = M \cdot 10^{-3} \cdot (f \cdot 60)^2 \cdot 0.011 \quad (4.4)$$

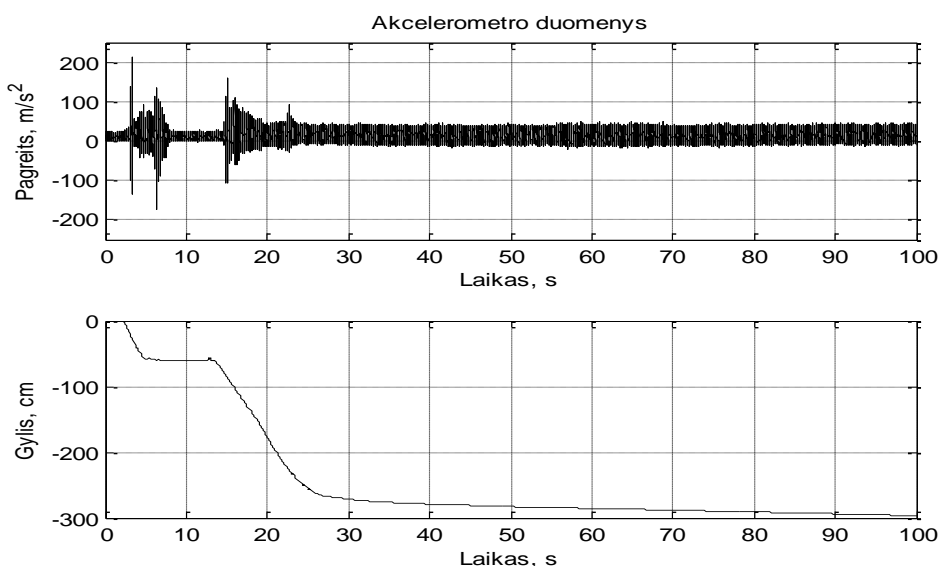
kur M – statinis momentas (pateikiamas kalimo mašinos specifikacijoje), f – kalimo dažnis.

Paveikslėlyje 4.17 pateiktas jėgos kitimas kalimo metu.



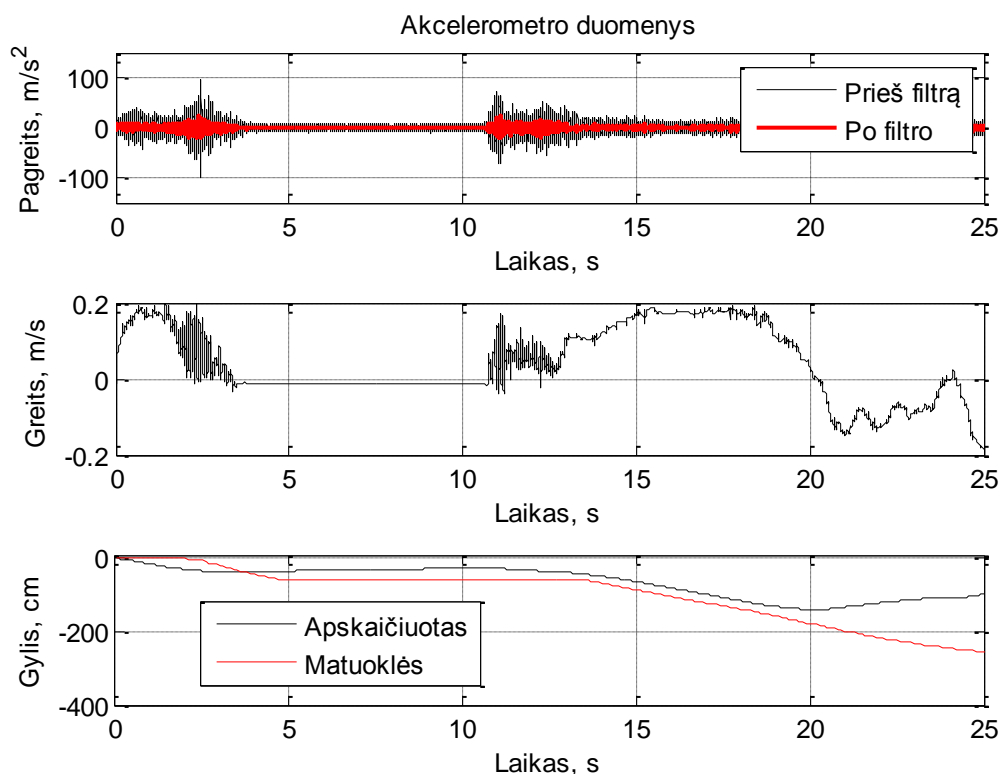
4.17 Kalimo jėgos kitimas

Matuojant poliaus pasiektą gylį ir stebint akcelerometro duomenis buvo ieškoma kaip nustatyti, jog pasiektas reikiamas gylis ir gruntas pakankamai sutankintas. Iš surinktų duomenų matyti (žr. 4.18 pav.), jog ties 25 sekunde poliaus pasiektas gylis didėja nežymiai nors ir kalimas tęsiamas.



4.18 pav. Poliaus akcelerometro duomenys (viršuje), poliaus pasiekto gylio grafikai

Paveikslėlyje 4.19 pav. pateikta atkirpta akcelerometro signalo dalis. Viršutiniame grafike pateiktas signalas prieš ir po apdorojimo. Viduriniame grafike apskaičiuotas poliaus smigimo greitis, o apatiniame grafike apskaičiuotas pasiektas gylis ir palygintas su išmatuotu. Iš paskutiniojo grafiko matyti, jog gauta skaičiavimo paklaida yra didelė ir siekia beveik 1m. Greičio grafike taip pat matoma su laiku didėjanti paklaida. Todėl galima teigti, jog realiomis sąlygomis apskaičiuotas pasiektas gylis gaunamas su didele paklaida kuri netenkina reikalavimų. Todėl pasiekto gylio matavimui reikalingi papildomi atstumo matuokliai.



4.19 Apskaičiuotas poliaus smigimo greitis bei pasiektas gylis

Gautų duomenų pakanka tam, kad užtikrinti polių įrengimo proceso efektyvumą. Vartotojui siūloma pateikti šiuos parametrus grafiniu pavidalu:

- pasiektas gylis,
- kalimo dažnis,
- kalimo jėga,
- smigimo greitis.

Šie parametrai turėtų būti pateikti realiu laiku tam, kad operatorius galėtų laiku priimti sprendimą t.y. tęsti ar nutraukti poliaus kalimą. Taip pat šie parametrai turėtų būti saugomi ir prienami tolimesnei analizei. Pagal išsaugotus duomenis galima parengti ataskaitą apie įrengtų pamatų atitikimą projektui. Skyriuje 2.1 aprašyta siūloma sistema leistų atlikti minėtus veiksmus.

IŠVADOS

Mokslinių šaltinių ir panašių darbų analizės rezultatas – spraustinių polių įrengimo proceso efektyvumą užtikrinantys parametrai: kalimo dažnis, smigimo greitis, pasiektas gylis ir laikas.

Darbo metu sudaryta eksperimentinė sistema nustatyti vibravimo dažniui ir pasiektam gyliui, sudaryti duomenų surinkimo ir apdorojimo algoritmai bei programa mikrovaldikliui. Sistemos bandymo rezultatai parodė, jog vibravimo dažnis nustatomas teisingai su 1Hz paklaida. Pasirinktas diskretizavimo dažnis 1kHz leidžia korektiškai atvaizduoti kalimo dažnį kuris yra 27Hz, reikalingas minimalus atskaitų skaičius $n=1024$ tam kad užtikrinti 1Hz raišką.

Eksperimentinėje sistemoje duomenų apdorojimas atliekamas sparčiau kompiuteryje tačiau įvertinant duomenų perdavimo problemas ir kompiuterio panaudojimo galimybes tikslingiau visus skaičiavimus ir duomenų apdorojimą atlikti mikrovaldiklyje.

Siekiant sumažinti paklaidas skaičiuojant pasiektą gylį, reikalingas akcelerometro duomenų apdorojimas. Panaudojant slenkamojo vidurkio filtrą ir „amplitudės langą“ paklaida nesiekia 2cm eksperimentiniuose tyrimuose, tačiau realiomis sąlygomis paklaida netenkina reikalavimų.

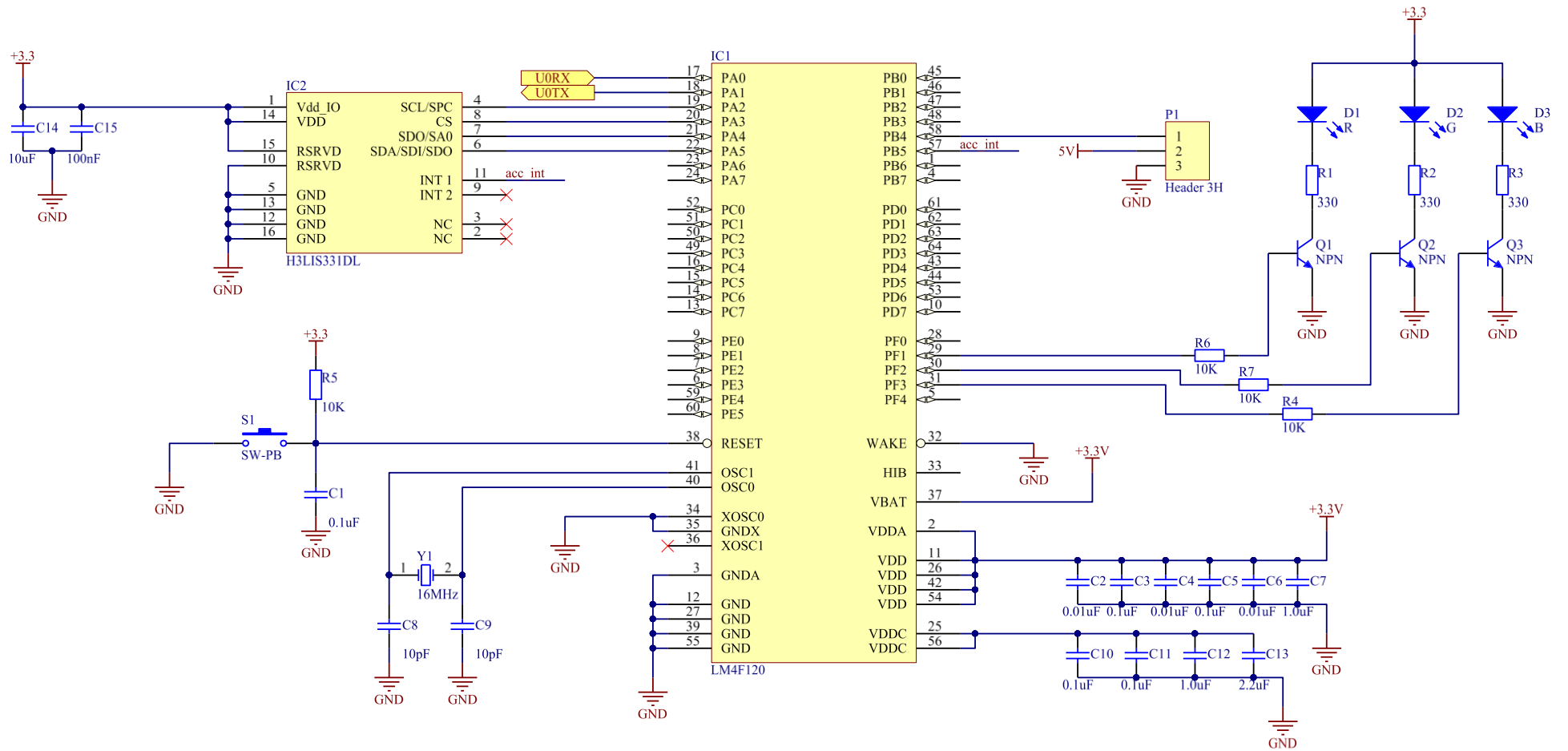
Spraustinių polių įrengimo proceso efektyvumą galima užtikrinti remiantis akcelerometro duomenimis matuojant kalimo dažnį ir nustatant pasiektą gylį naudojantis papildomais atstumo matuokliais.

LITERATŪRA

1. SLIŽYTĖ D., MEDZVIECKAS J., MACKEVIČIUS R. Pamatai ir pagrindai. – Vilnius „Technika“ 2012. - 240 p.
2. Zavadskas E. K., Karablikovas A. ir kiti. Statybos procesų technologija: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2008. 576 p.
3. POŽEMINIŲ KONSTRUKCIJŲ ĮRENGIMO DARBAI: Spraustinių polių įrengimas I dalis. Kaltiniai, vibraciniai, įspaudžiami poliai. LIETUVOS STATYBININKŲ ASOCIACIJA.
4. K. VIKING. Vibro-Driveability. -A Filed study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils.
5. SE-NA LEE, BUM-JAE YOU , MEE-SEUB LIMB, SANG-ROK OH , SONG-SOO HAN, SANG HEON LEE. Visual Measurement of Pile Penetration and Rebound Movement Using a High-speed Line-Scan Camera.
6. A. KIŠKIS. Elektros pavarų valdymo sistemų elementai. Klaipėdos universitetas, 2009
7. Department of Mechanical and Nuclear Engineering. Stress, Strain and Strain Gages. The Pensilvania State University WEB site. Prieiga per internetą: http://www.mne.psu.edu/me345/Lectures/Strain_gages.pdf [Žiūrėta 2014.05.25].
8. S. PLESKAS. Mechatronikos pagrindai. Mokomiji knyga.
9. AMBRASAS, V. Fizikos pagrindai. Kaunas: Šviesa. 1990. 281 p.
10. Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations. ASTM D4945 - 12
11. TAKESHI SASAKI, XIANGQI HUANG, HIDEKI HASHIMOTO AND FUMIHIRO INOUE. Position Measurement of Piles Using a Laser Range Finder for Accurate and Efficient Pile Driving//2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Budapest, Hungary, July 3-7, 2011
12. M. FISCHLER IR R. BOLLES. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 1981.
13. MOHAMAD H. HUSSSEIN, G. LIKINS Foundations Quality Control and Quality Assurance Testing Methods. Florida Engineering Society Journal
14. LI TAN, JEAN JIANG. Digital Signal Processing – Fundamentals and Applications. Academic Press 2013.

15. VIDMANTAS AMBRASAS, BRONISLOVAS JASIULIONIS. Mechanika, molekulinė fizika ir termodinamika. KTU leidykla "Technologija", 2007
16. SANGBO HAN. Measuring displacement signal with an accelerometer. Journal of Mechanical Science and Technology 24 (2010)
17. RONG LIU, MING LIU. Signal Processing and Accelerometer-based Design for Portable Small Displacement Measurement Device. The 2008 International Conference on Embedded Software and Systems (ICCESS2008)
18. TIANHUANG CHEN, WEIYI HU, RAN SUN. Displacement Measurement Algorithm Using Handheld Device with Accelerometer. College of Computer Science and Technology Wuhan University of Technology Wuhan, Hubei, China.
19. Sheet piling Handbook. ThyssenKrupp gft bautechnik. [žiūrėta 2014-04-18] Priega per internetą:
http://thyssenkruppaltija.com/download/sheet_piling_handbook_3rd_edition.pdf

PRIEDAS NR.1

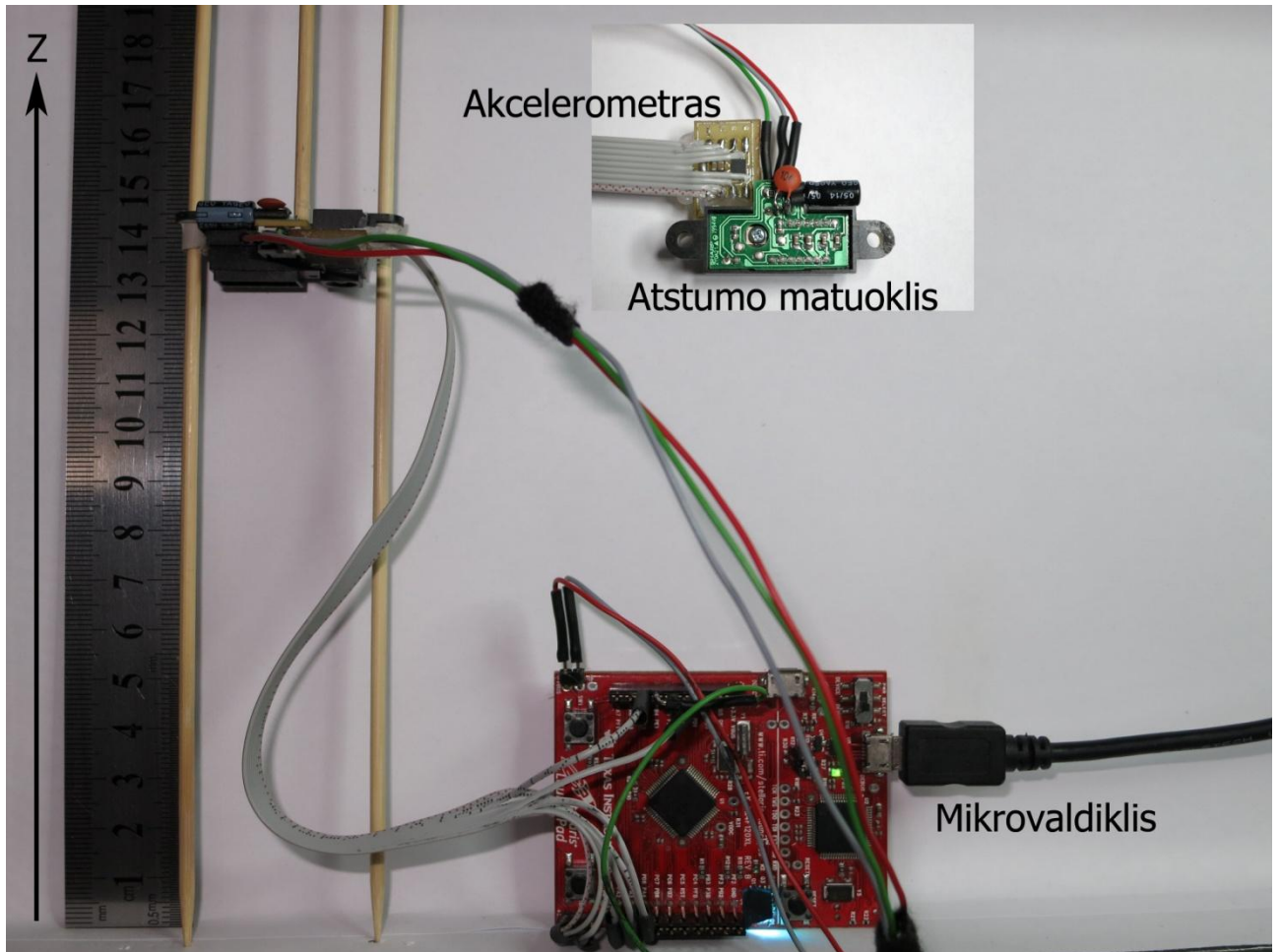


PRIEDAS NR.2

Lentelė 1 Akcelerometro konfigūravimo registų aprašas

Name	Type	Register address		Default	Comment
		Hex	Binary		
Reserved (do not modify)		00 - 0E			Reserved
WHO_AM_I	r	0F	000 1111	00110010	Dummy register
Reserved (do not modify)		10 - 1F			Reserved
CTRL_REG1	rw	20	010 0000	00000111	
CTRL_REG2	rw	21	010 0001	00000000	
CTRL_REG3	rw	22	010 0010	00000000	
CTRL_REG4	rw	23	010 0011	00000000	
CTRL_REG5	rw	24	010 0100	00000000	
HP_FILTER_RESET	r	25	010 0101		Dummy register
REFERENCE	rw	26	010 0110	00000000	
STATUS_REG	r	27	010 0111	00000000	
OUT_X_L	r	28	010 1000	Output	
OUT_X_H	r	29	010 1001	Output	
OUT_Y_L	r	2A	010 1010	Output	
OUT_Y_H	r	2B	010 1011	Output	
OUT_Z_L	r	2C	010 1100	Output	
OUT_Z_H	r	2D	010 1101	Output	
Reserved (do not modify)		2E - 2F			Reserved
INT1_CFG	rw	30	011 0000	00000000	
INT1_SRC	r	31	011 0001	00000000	
INT1_THS	rw	32	011 0010	00000000	
INT1_DURATION	rw	33	011 0011	00000000	
INT2_CFG	rw	34	011 0100	00000000	
INT2_SRC	r	35	011 0101	00000000	
INT2_THS	rw	36	011 0110	00000000	
INT2_DURATION	rw	37	011 0111	00000000	
Reserved (do not modify)		38 - 3F			Reserved

PRIEDAS NR.3



PRIEDAS NR.4

```
#include <stdlib.h>

#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_ssi.h"
#include "inc/hw_types.h"
#include "driverlib/ssi.h"
#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/fpu.h"
#include "utils/uartstdio.h"
#include "driverlib/uart.h"
#include "driverlib/interrupt.h"
#include "math.h"
#include "driverlib/rom.h"

//*****
//!! - SSI0 peripheral
//!! - GPIO Port A peripheral (for SSI0 pins)
//!! - SSI0CLK - PA2
//!! - SSI0Fss - PA3
//!! - SSI0Rx - PA4
//!! - SSI0Tx - PA5
//*****
// Number of bytes to send and receive.
//*****
#define NUM_SSI_DATA 1
#define NUM_ACC_INIT_SEQ 8
//*****
// Accelerometer registers
//*****
#define WHO_AM_I 0x0F
#define CTRL_REG1 0x20
#define CTRL_REG2 0x21
#define CTRL_REG3 0x22
#define CTRL_REG4 0x23
#define CTRL_REG5 0x24

#define STATUS_REG 0x27

#define OUT_X_L 0x28
#define OUT_X_H 0x29
#define OUT_Y_L 0x2A
#define OUT_Y_H 0x2B
#define OUT_Z_L 0x2C
#define OUT_Z_H 0x2D

#define ACC_ID 0x32

#define SWAP(a,b) tempr=(a);(a)=(b);(b)=tempr //for fft

#define len 8

//*****
// Length of buffers
//*****

#define acc_buff_len 1024
unsigned long cnt=0;

signed short int acc_data_buff_int16[acc_buff_len];

unsigned char acc_data_buff [acc_buff_len];

float duomenys[2*len],ReFFT[len],ImFFT[len];
float fft_data[acc_buff_len];
```



```

float res[512];

//*****
// Module of complex number (amplitude spectrum)
//*****
void amplitude_spectrum(float data[]){
    int i;

    for (i=0; i<512; i++){
        res[i]=sqrt(data[i*2] * data[i*2] + data[i*2+1] * data[i*2+1]);
    }
}

//*****
// FFT function
//*****
void fourl(float data[], unsigned long nn, int isign)
{
    unsigned long n,mmax,m,j,istep,i;
    double wtemp,wr,wpr,wpi,wi,theta;
    float tempr,tempi;
    n=nn << 1;
    j=1;
    for (i=1;i<n;i+=2) {
        if (j > i) {
            SWAP(data[j],data[i]);
            SWAP(data[j+1],data[i+1]);
        }
        m=n >> 1;
        while (m >= 2 && j > m) {
            j -= m;
            m >>= 1;
        }
        j += m;
    }

    mmax=2;
    while (n > mmax) {
        istep=mmax << 1;
        theta=isign*(6.28318530717959/mmax);
        wtemp=sin(0.5*theta);
        wpr = -2.0*wtemp*wtemp;
        wpi=sin(theta);
        wr=1.0;
        wi=0.0;
        for (m=1;m<mmax;m+=2) {
            for (i=m;i<n;i+=istep) {
                j=i+mmax;
                tempr=wr*data[j]-wi*data[j+1];
                tempi=wr*data[j+1]+wi*data[j];
                data[j]=data[i]-tempr;
                data[j+1]=data[i+1]-tempi;
                data[i] += tempr;
                data[i+1] += tempi;
            }
            wr=(wtemp=wr)*wpr-wi*wpi+wr;
            wi=wi*wpr+wtemp*wpi+wi;
        }
        mmax=istep;
    }
}

//*****
// SPI functions
//*****
unsigned long spi_read (unsigned long spi_addr){
    unsigned long DataTx;
    unsigned long DataRx;
}

```

```

while(SSIBusy(SSIO_BASE))
{
}

//flush fifo
while(SSIDataGetNonBlocking(SSIO_BASE, &DataRx))
{
}
DataTx=(spi_addr | 0x80)<<8;

SSIDataPut(SSIO_BASE, DataTx);
while(SSIBusy(SSIO_BASE))
{
}
SSIDataGet(SSIO_BASE, &DataRx);

DataRx &= 0x00FF;
return DataRx;
}

void spi_write (unsigned long spi_addr, unsigned long data){
unsigned long DataTx;
DataTx=(spi_addr<<8) | data;
while(SSIBusy(SSIO_BASE))
{
}
SSIDataPut(SSIO_BASE, DataTx);
}

//*****
// Function to check if acc is connected
//*****
int check_acc(){
unsigned long DataTx;
unsigned long DataRx;

DataTx=(WHO_AM_I | 0x80)<<8;

while(SSIDataGetNonBlocking(SSIO_BASE, &DataRx))
{
}
SSIDataPut(SSIO_BASE, DataTx);
while(SSIBusy(SSIO_BASE))
{
}
SSIDataGet(SSIO_BASE, &DataRx);
DataRx &= 0x00FF;

if (DataRx==0x32) {
return 1;
}
else {
return 0;
}
}

//*****
//Function to configure accelerometer (H3LIS331DL)
//*****
int cnf_acc() {
unsigned long rw[NUM_ACC_INIT_SEQ]={0x00, 0x80, 0x00, 0x80, 0x00, 0x80, 0x00, 0x80};
unsigned long AD[NUM_ACC_INIT_SEQ]={CTRL_REG1, CTRL_REG1, CTRL_REG2, CTRL_REG2,
CTRL_REG3, CTRL_REG3, CTRL_REG4, CTRL_REG4};
unsigned long DATA[NUM_ACC_INIT_SEQ]={0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x12, 0x00, 0x00,
0x00};
unsigned long DataTx;
unsigned long DataRx;
unsigned long i;

```

```

int status=1;

for(i = 0; i < NUM_ACC_INIT_SEQ; i++)
{
    //just for flushing fifo
    while(SSIDataGetNonBlocking(SSIO_BASE, &DataRx))
    {
    }
    //prepare SPI data
    DataTx=(rw[i]<<8)|(AD[i]<<8)|DATA[i];
    if (rw[i]==0x00){
        SSIDataPut(SSIO_BASE, DataTx);
        while(SSIBusy(SSIO_BASE))
        {
        }
    }
    else {
        SSIDataPut(SSIO_BASE, DataTx);
        while(SSIBusy(SSIO_BASE))
        {
        }
        SSIDataGet(SSIO_BASE, &DataRx);
        DataRx &= 0x00FF;
        if (DataRx==DATA[i-1])
            status = 1;
        else {
            status = 0;
        }
    }

    if (status==0)
        return 0;

}

if (status==1)
    return 1;

}

void UARTIntHandler(void)
{
}

// Interrupt handler
void RDYint_handler(void)
{
    int i;
    int j;
    signed long acc_data;
    signed long tmp;
    //SysCtlDelay(20000);
    acc_data=spi_read(OUT_Z_L);
    acc_data_buff[cnt]=acc_data;
    tmp=acc_data;
    acc_data_buff_int16[cnt]=acc_data;
    acc_data=spi_read(OUT_Z_H);
    acc_data_buff_int16[cnt]|=acc_data<<8;
    tmp=(acc_data<<8);
    fft_data[cnt]=tmp;
    fft_data[cnt+1]=0;
    acc_data_buff[cnt+1]=acc_data;
    cnt=cnt+2;
    if (cnt==1024) {
        spi_write(CTRL_REG1, 0x38);
        fourl(fft_data-1,512,1);
        amplitude_spectrum(fft_data);
        cnt=0;
        for(i = 0; i < acc_buff_len; i++){
            while(UARTBusy(UART0_BASE));

```

```

        UARTCharPut(UART0_BASE, (unsigned char)acc_data_buff[i]);
    }
    spi_write(CTRL_REG1, 0x3C);
    cnt=0;
}
GPIOPinIntClear(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1);
}

int main(void)
{
    unsigned long i;
    unsigned long j;
    ROM_FPUEnable(); // enable floating point unit
    IntMasterDisable();

    // Clock configuration (configure to 80MHz)
    SysCtlClockSet(SYSCTL_SYSDIV_2_5 | SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_OSC_MAIN |
SYSCTL_XTAL_16MHZ);

    // UART configuration

    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART0);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOB);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA0_U0RX);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA1_U0TX);
    GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);
    UARTConfigSetExpClk(UART0_BASE, SysCtlClockGet(), 921600,
        (UART_CONFIG_WLEN_8 | UART_CONFIG_STOP_ONE | UART_CONFIG_PAR_NONE));

    //enable leds
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOF);
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3);
    GPIOPinTypeGPIOInput(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1);
    GPIOPortIntRegister(GPIO_PORTB_BASE, RDYint_handler);
    GPIOIntTypeSet(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1, GPIO_RISING_EDGE);

    //
    // The SSI0 peripheral must be enabled for use.
    //
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_SSI0);

    GPIOPinConfigure(GPIO_PA2_SSI0CLK);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA3_SSI0FSS);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA4_SSI0RX);
    GPIOPinConfigure(GPIO_PA5_SSI0TX);

    GPIOPinTypeSSI(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_5 | GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_3 |
        GPIO_PIN_2);

    SSIConfigSetExpClk(SSI0_BASE, SysCtlClockGet(), SSI_FRF_MOTO_MODE_0,
        SSI_MODE_MASTER, 1000000, 16);

    //
    // Enable the SSI0 module.
    //
    SSIEnable(SSI0_BASE);

    //initialize accelerometer

    if (check_acc() && cnf_acc()){
        GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3,8);
        GPIOPinIntClear(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1);
        GPIOPinIntEnable(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1);
        IntMasterEnable();
        spi_write(CTRL_REG1, 0x3C);
        while (1){
        }
    }
}

```

```
}  
  
else  
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1|GPIO_PIN_2|GPIO_PIN_3, 2);  
  
//  
// Return no errors  
//  
return(0);  
}
```

PRIEDAS NR.5

```
clc;
clear all;
close all;
a=1:1025;

s = serial('com3');
set(s,'BaudRate',921600, 'DataBits',8, 'FlowControl','none', 'Parity','none',
'StopBits',1, 'OutputBufferSize',1024);
set(s,'Terminator','')
fopen(s);
props = set(s);
fprintf(s,a)
out2 = get(s,{'BytesAvailable'});
out2 = get(s,{'BytesAvailable'});
out2 = get(s,{'BytesAvailable'});
out2 = get(s,{'BytesAvailable'});
i=1;
k=0:1:512-1;
Fd=1000;
f=k*Fd/512;
figure1 = figure('Color',[1 1 1]);
while (1)
    while (cell2mat(get(s,{'BytesAvailable'}))>=2)
        aa(i)=fread(s,1,'int16');

        i=i+1;

        if i==513
            plot(aa);
            aa_mean=aa-mean(aa);
            aa_norm=aa_mean/max(aa_mean);
            tic
            fft_aa=abs(fft(aa_norm))/512;
            toc
            %S=20*log10(fft_aa/max(fft_aa));
            h2=stem(f,fft_aa,'r.','MarkerSize',1,'LineWidth',1.5);
            axis([0 512 0 0.5])
            xlabel('Dažnis, Hz')
            ylabel('Amplitudė')
            title('Amplitudžių spektras')
            grid on
            hold on
            drawnow
                clf
                i=1;

        end;

    end
end
fclose(s)
delete(s)
clear s

%%close all
clc;
close all;
clear all;
fd=2000; % Sampling freq
Td=1/fd; % Sampling time
n=0:1999; % number of samples
%data=0.1*sin(2*pi*500*n*Td)+sin(2*pi*10*n*Td);
data=sin(2*pi*200*n*Td);
win_start=160;
win=[zeros(1,win_start),ones(1,length(n)-2*win_start),zeros(1,win_start)];
```

```

data_windowed=data.*win;
figure
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-1.5;
YMAX=1.5;
subplot(3,1,1);
plot(data,'k');
title('Signalas');
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
xlabel('Atskaita, n');
ylabel('Amplitudė');

subplot(3,1,2);
plot(win,'k');
title('Laiko langas');
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
xlabel('Atskaita, n');
ylabel('Amplitudė');

subplot(3,1,3);
plot(data_windowed,'k');
title('Signalas po laiko lango pritaikymo');
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
xlabel('Atskaita, n');
ylabel('Amplitudė');
figure
subplot(3,1,1)

spektras(data,fd);
title('Teorinis signalo spektras');
xlim([0 400])
subplot(3,1,2)

spektras(win,fd);
title('Stačiakampio laiko lango spektras');
xlim([0 400])
subplot(3,1,3)

spektras(data_windowed,fd);
title('Teorinio ir laiko lango spektrų sandauga');
xlim([0 400])

fd=8; % Sampling freq
Td=1/fd; % Sampling time
n=0:15; % number of samples
%data=0.1*sin(2*pi*500*n*Td)+sin(2*pi*10*n*Td);
data=sin(2*pi*1*n*Td);
figure
subplot(2,2,1)
plot(n,data,'ko-');
title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, kai lango dydis=16')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
grid on
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-1.5;
YMAX=1.5;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
subplot(2,2,2)
spektras_num(data,fd);
grid on

fd=8; % Sampling freq
Td=1/fd; % Sampling time
n=0:17; % number of samples
%data=0.1*sin(2*pi*500*n*Td)+sin(2*pi*10*n*Td);
data=sin(2*pi*1*n*Td);
subplot(2,2,3)
plot(n,data,'ko-');

```

```

title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, kai lango dydis=18')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
grid on
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-1.5;
YMAX=1.5;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
subplot(2,2,4)
spektras_num(data,fd);
grid on

figure
fd=8; % Sampling freq
Td=1/fd; % Sampling time
n=0:17; % number of samples
%data=0.1*sin(2*pi*500*n*Td)+sin(2*pi*10*n*Td);
data=sin(2*pi*1*n*Td);
subplot(2,2,1)
plot(n,data,'ko-');
title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, kai stačiakampio lango dydis=18')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
grid on
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-1.5;
YMAX=1.5;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
subplot(2,2,2)
spektras_num(data,fd);
grid on
win=transpose(hamming(length(n)));
data=data.*win;
subplot(2,2,3)
plot(n,data,'ko-');
title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, kai "Hamming" lango dydis=18')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
grid on
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-1.5;
YMAX=1.5;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
subplot(2,2,4)
spektras_num(data,fd);
grid on

fd=1000; % Sampling freq
Td=1/fd; % Sampling time
n=0:512; % number of samples
nn=0.25/Td
Tl=length(n)*Td
deltaf=1/Tl
%data=0.1*sin(2*pi*500*n*Td)+sin(2*pi*10*n*Td);
data=sin(2*pi*9*n*Td);
data=[data zeros(1,512)];
figure
subplot(2,2,1)
plot(data,'k-');
title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, kai T_L=0.5s')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
XMIN=0;
XMAX=length(n)+500;
YMIN=-1.5;
YMAX=1.5;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
grid on

```



```

subplot(2,2,2)
spektras_num(data,fd);
axis([0 20 0 1]);
grid on
n=0:999;
data=sin(2*pi*11*n*Td);
subplot(2,2,3)
plot(n,data,'k-');
title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, kai T_L=1s')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-1.5;
YMAX=1.5;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
grid on
subplot(2,2,4)
spektras_num(data,fd);
axis([0 20 0 1]);
grid on

fd=500; % Sampling freq
Td=1/fd; % Sampling time
n=0:124; % number of samples
nn=0.25/Td
Tl=length(n)*Td
deltaf=1/Tl
data=sin(2*pi*20*n*Td)+sin(2*pi*40*n*Td)+sin(2*pi*60*n*Td)+sin(2*pi*400*n*Td);
figure
subplot(2,2,1)
plot(data,'k-');
plot(data,'k-');
title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, F_d=500Hz')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-3;
YMAX=3;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
subplot(2,2,2)
spektras_num(data,fd);
axis([0 fd/2 0 1]);
grid on
fd=1000; % Sampling freq
Td=1/fd; % Sampling time
n=0:249; % number of samples
nn=0.25/Td
Tl=length(n)*Td
deltaf=1/Tl
data=sin(2*pi*20*n*Td)+sin(2*pi*40*n*Td)+sin(2*pi*60*n*Td)+sin(2*pi*400*n*Td);
subplot(2,2,3)
plot(data,'k-');
plot(data,'k-');
title('Signalas laiko srityje ir jo spektras, F_d=1000Hz')
xlabel('Atskaita, n')
ylabel('x(n)')
XMIN=0;
XMAX=length(n);
YMIN=-3;
YMAX=3;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
subplot(2,2,4)
spektras_num(data,fd);
axis([0 fd/2 0 1]);
grid on

clc
close all

```

```

clear all
load('acc_data3.mat')
load('dist_data3.mat')
fd=1000;
td=1/fd;
interp_factor=1;
mov_avg_n=80;
discard_f=1;

a_part=a(19670:22450)*9.8-7.5;
s_part=z(19670:22450)-52.63;
%a_part=a(35080:41730)*9.8-7.5;
%s_part=z(35080:41730)-47.48;
max_time=length(a_part)*td;
time=(0:length(a_part)-1)*td;
a_i=interp(a_part,interp_factor);
time_i=(0:length(a_i)-1)*td/interp_factor;
a_i_m=tsmovavg(a_i,'s',mov_avg_n);
a_i_m=[zeros(1,mov_avg_n-1) a_i_m(mov_avg_n:end)];
a_im_d=disc_window(a_i_m,discard_f);

[v,s]=acc2dist(a_im_d,fd);
s=s*100;
figure
%plot(time,a_part,'k');
%title('Akcelerometro duomenys')
%xlabel('Laikas,s')
%ylabel('Pagretis, m/s^2')
%hold on
plot(time_i,a_i,'r');
hold on
plot(time_i,a_i_m,'k','LineWidth',1.5)
grid on
plot(time_i,a_im_d,'LineWidth',1.5)
hold off
title('Akcelerometro duomenys')
xlabel('Laikas,s')
ylabel('Pagretis, m/s^2')
legend('Prieš apdorojimą','Po filtro','Po "lango"')

figure
subplot(3,1,1)
plot(time_i,a_im_d,'k');
title('Akcelerometro duomenys')
xlabel('Laikas,s')
ylabel('Pagretis, m/s^2')
grid on
subplot(3,1,2)
plot(time_i,v,'k');
title('Apskaičiuotas greitis')
xlabel('Laikas,s')
ylabel('Greitis, m/s')
grid on
subplot(3,1,3)
plot(time_i,s,'k');
hold on
plot(time,s_part,'r');
title('Atstumas')
xlabel('Laikas,s')
ylabel('Atstumas, cm')
legend('Apskaičiuotas','Matuoklės')
grid on
mse=MSE(s_part,s)
rmse=sqrt(mse)
%calculate mean squared error
mov_avg_n=1:10:100;
discard_f=0:1:5;
for i=1:length(discard_f)
    for j=1:length(mov_avg_n)

```

```

a_i_m=tsmovavg(a_i,'s',mov_avg_n(j));
a_i_m=[zeros(1,mov_avg_n(j)-1) a_i_m(mov_avg_n(j):end)];
a_im_d=disc_window(a_i_m,discard_f(i));

[v,s]=acc2dist(a_im_d,fd);
s=s*100;
mse(j,i)=MSE(s_part,s);
rmse(j,i)=sqrt(mse(j,i));
end

end

figure
plot(mov_avg_n,mse);
grid on
title('MSE priklausomybė nuo filtro eilės ir lango pločio')
xlabel('Filtro eilė, n')
ylabel('MSE')
legend('\pm 0', '\pm 1', '\pm 2', '\pm 3', '\pm 4', '\pm 5')

```

PRIEDAS NR.6

