

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**Gintaras Kušleika**

**CIKLINĖS APKROVOS POVEIKIO DVIRAČIO RĖMO IR**  
**ŠAKĖS SĄRANKAI TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

**Šiauliai, 2015**

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**CIKLINĖS APKROVOS POVEIKIO DVIRAČIO RĖMO IR**  
**ŠAKĖS SĄRANKAI TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

**Autorius – Gintaras Kušleika (MM-13 gr.)**

**Vadovas – doc. dr. Sergėjus Rimovskis**

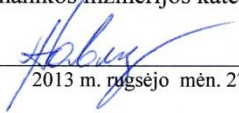
**Recenzentas – prof. Jonas Bareišis**

**Katedros vedėja – doc. dr. Loreta Kelpšienė**

**Šiauliai, 2015**

TVIRTINU

Mechanikos inžinerijos katedros vedėjas

  
2013 m. rugsėjo mėn. 27 d.

## MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

Išduota magistrantui Gintarui Kušleikai

Darbo tema: CIKLINIŲ APKROVŲ POVEIKIO DVIRAČIO RĖMO IR ŠAKĖS SĄRANKOS STIUPRUMUI TYRIMAS

Patvirtinta 2015 m. kovo mėn. 20 d. fakulteto dekanu potvarkiu Nr. TGMDP-02.

### 1. Darbo tikslas

Eksperimentiškai nustatyti optimaliausią santykį tarp dviračio rėmo ir šakės sąranką veikiančios jėgos dydžio ir dažnio, dinaminio bandymo (standartas LST EN 14766 p.4.8.5) metu jėginį poveikį sukūriant pneumo raumenimis.


### 2. Darbo struktūra

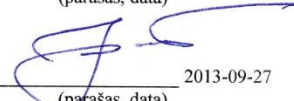
1. Standarto reikalavimai bei stendo aprašymas.
2. Eksperimentinių tyrimų metodikos sudarymas.
3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir lyginamoji analizė.

Darbo pateikimo terminas 2015 m. birželio mėn. 9 d.

Užduotį gavau Gintaras Kušleika  
(magistranto vardas, pavardė)

Vadovas Sergėjus Rimovskis  
(pareigos, vardas, pavardė)

  
(parašas, data) 2013-09-27

  
(parašas, data) 2013-09-27

## TURINYS

|  |    |
|--|----|
| SANTRAUKA.....   | 4  |
| SUMMARY.....   | 5  |
| LENTELIŲ SĄRAŠAS.....  | 6  |
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....   | 7  |
| ĮVADAS.....  | 8  |
| 1. RĖMO NUOVARGIO BANDYMAS NAUDOJANT HORIZONTALIĄ JĖGĄ.....                            | 12 |
| 1.1 Standarto reikalavimai.....  | 12 |
| 1.2 Bandymo stendas.....   | 13 |
| 1.3 Bandymo vykdymo įtaisai.....   | 13 |
| 2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA.....  | 15 |
| 2.1 Stendo įrangos paruošimas tyrimams. Bandinio parinkimas.....                       | 15 |
| 2.2. Matavimo metodų apžvalga ir tinkamiausio parinkimas sąrankos bandymams.....       | 17 |
| 2.2.1 Įtempių koncentracijos vietos nustatymas bandomojoje sąrankoje.....              | 19 |
| 2.2.2 Tenzorezistorinio jutiklio ir įrangos parinkimas eksperimentiniams tyrimams..... | 21 |
| 2.3 Sąrankos eksperimentiniai tyrimai.....   | 27 |
| 2.3.1 Sąrankos statiniai bandymai.....   | 28 |
| 2.3.2 Sąrankos dinaminiai bandymai su pneumatiniiais raumenimis.....                   | 29 |
| 3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ APSKAIČIAVIMAS IR ANALIZĖ.....                     | 34 |
| IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....   | 40 |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS.....   | 41 |
| PRIEDAI.....   | 42 |
| 1 PRIEDAS. Deformacijų kreivės.....  | 43 |
| 2 PRIEDAS. Plieno C20 savybės.....   | 45 |

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**Gintaras Kušleika. CIKLINĖS APKROVOS POVEIKIO DVIRAČIO RĖMO IR ŠAKĖS SĄRANKAI TYRIMAS/ vadovas doc. dr. S. Rimovskis.**

**SANTRAUKA**

Kalnų dviračių standartas LST EN 14766 reglamentuoja rėmo nuovargio bandymą naudojant horizontalią jėgą. Bandymo metu rėmo ir šakės sąranka patiria cikliškai kintančių jėgų poveikį. Sąrankos atskiruose elementuose atsiranda laike kintančios deformacijos. Eksperimentinių tyrimų laboratorijos rėmo dinaminio bandymo horizontalia jėga stendo vykdomasis įtaisas leidžia atlikti bandymus naudojant skirtingus jėgos dydžius ir dažnius. Darbe pateikiami atliktų eksperimentų rezultatai, kurie leidžia įvertinti vykdomojo įtaiso skirtingų dažnių (0,1; 0,5; 1; 1,5; 2; 4; 6; 8; 10 Hz) įtaką šakės pasirinktame taške fiksuojamoms deformacijoms. Gauti duomenys leidžia padaryti išvada, kad dviračio rėmo ir šakės sąrankos apkrova pneumatiniiais raumenimis šio tipo bandymuose yra netaikytina.

**Reikšminiai žodžiai:** dviračio bandymas, pneumatiniai raumenys, tenzorezistorinių jutiklių rozetė, svarbiausios deformacijos, dinamiškumo koeficientas.

**ŠIAULIAI UNIVERSITY**  
**FACULTY OF TECHNOLOGY AND NATURE SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL AND CIVIL ENGINEERING**

**Gintaras Kušleika.** Title. RESEARCH ON INFLUENCE OF CYCLIC LOADING TO FRAME AND FORK ASSEMBLY OF THE BICYCLE/ research advisor assoc. prof. dr. S. Rimovskis.

**SUMMARY**

The standard of mountain bicycles defines the requirement of frame and fork assembly fatigue test by horizontal force. During the test the frame and fork assembly is deformed by cyclic loading. It causes the strains in elements assembly which are varying in time. Used testing machine with pneumatic muscles actuator allows to carry out test with different values of horizontal forces and different loading frequencies. The work presents experimental data of fork strain range, dependant on frame and fork assembly loading frequencies (0,1; 0,5; 1; 1,5; 2; 4; 6; 8; 10 Hz). The results allowed to do the conclusion that pneumatic muscles actuator is not applicable for frame and fork assembly loading.

**Keywords:** bicycle test, pneumatic muscles actuator, tensometric rosette, principal strains, dynamicity coefficient.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Raumens DMSP-20-150N-RM-RM duomenys.....   | 15 |
| 2.2. Tenzorezistorinių jutiklių rozetės 3/120RY91 techninės charakteristikos.....   | 21 |
| 2.3. Statinių bandymų su pavieniais pneumatiniiais raumenimis rezultatai (veikia dešinysis raumuo).....   | 29 |
| 2.4. Statinių bandymų su pavieniais pneumatiniiais raumenimis rezultatai (veikia kairysis raumuo).....  | 29 |
| 2.5. Dinaminių bandymų su <b>pavieniais</b> pneumatiniiais raumenimis rezultatai (0,1 Hz veikia dešinysis raumuo).....                          | 30 |
| 2.6. Dinaminių bandymų su <b>pavieniais</b> pneumatiniiais raumenimis rezultatai (0,1 Hz, veikia kairysis raumuo).....                          | 30 |
| 2.7. Dinaminių bandymų su <b>vienu</b> pneumatiniu raumenimi rezultatai (0,5 Hz, veikia dešinysis).....   | 30 |
| 2.8. Dinaminių bandymų su <b>vienu</b> pneumatiniu raumenimi rezultatai (0,5 Hz, veikia kairysis).....  | 30 |
| 2.9. Dinaminių bandymų su <b>abiem</b> pneumatiniiais raumenimis rezultatai (0,5 Hz).....   | 31 |
| 2.10. Dinaminių bandymų su <b>vienu</b> pneumatiniu raumenimi rezultatai (1,0 Hz, veikia dešinysis, $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ))..... | 31 |
| 2.11. Dinaminių bandymų su <b>vienu</b> pneumatiniu raumenimi rezultatai (1,0 Hz, veikia kairysis, $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )).....  | 31 |
| 2.12. Dinaminių bandymų su <b>abiem</b> pneumatiniiais raumenimis rezultatai (1,0 Hz, $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )).....               | 31 |
| 2.13. Dinaminių bandymų su <b>vienu</b> pneumatiniu raumenimi rezultatai (veikia dešinysis, $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )).....         | 32 |
| 2.14. Dinaminių bandymų su <b>vienu</b> pneumatiniu raumenimi rezultatai (veikia kairysis, $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )).....          | 32 |
| 2.15. Dinaminių bandymų su <b>abiem</b> pneumatiniiais raumenimis rezultatai ( $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )).....                      | 33 |
| 3.1. Svarbiausios deformacijos $\epsilon_{1/2}$ .....   | 34 |

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

|   |    |
|---|----|
| 1.1 pav. Rėmo nuovargio bandymo naudojant horizontalią jėgą schema.....                                     | 12 |
| 1.2 pav. Rėmo dinaminio bandymo horizontalia jėga stendo vaizdas.....                                       | 13 |
| 1.3 pav. Pneumatinio raumens pjūvio vaizdas.....  | 14 |
| 2.1 pav. ETL stendo pneumatinių raumenų DMSP-20 sąranka.....  | 15 |
| 2.2 pav. Stendo vykdymo įtaiso principinė schema.....   | 16 |
| 2.3 pav. Foliniai tenzorezistoriniai jutikliai.....   | 19 |
| 2.4 pav. Sąrankos įtempių vaizdas, atlikus stiprumo modeliavimą sistema Inventor Profesional 2011...        | 20 |
| 2.5 pav. Jutiklio schema ir ant bandinio užklijuoto jutiklio vaizdas.....                                   | 22 |
| 2.6 pav. Priklijuoto tenzorezistorinio jutiklio vaizdas.....  | 23 |
| 2.7 pav. Informacinės matavimo sistemos „Spider 8“ funkcinė schema.....                                     | 24 |
| 2.8 pav. Deformacijų keitiklio į elektrinę įtampą schema.....   | 24 |
| 2.9 pav. Tenzorezistorinio jutiklio jungimo ketvirčiu tilto schema.....                                     | 26 |
| 2.10 pav. „Spider 8-30“ vaizdas iš galo (įrenginio schema ir įrenginio pajungimo bandymų metu vaizdas)..... | 26 |
| 2.11 pav. Sąrankos statinis bandymas kai atskirai veikia dešinysis ir kairysis pneumatiniai raumenys.....   | 28 |
| 3.1 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas.....   | 36 |
| 3.2 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas.....   | 36 |
| 3.3 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas.....   | 37 |
| 3.4 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas.....   | 37 |
| 3.5 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas.....   | 38 |
| 3.6 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas.....   | 38 |



## IVADAS

Dviratis – viena iš populiariausių transporto priemonių [1, 2]. Ši transporto priemonė nenaudoja degalų, mažai pavojinga kitiems eismo dalyviams, nekenkia sveikatai ir neteršia aplinkos. Pasaulyje yra maždaug 1 bilijonas naudojamų dviračių – dvigubai daugiau nei automobilių. Kiekvienais metais jų pagaminama dar 50-100 milijonų. Dviratis gali būti naudojamas susisiekimui, nedideliams kroviniams vežti, aktyvaus poilsio ir turizmo tikslais. Pastaruoju metu vis daugiau įrengiama dviračių takų, eismo juostų, turizmo trasų skirtų dviračiams, nuomos punktų, todėl vis daugiau gyventojų laisvalaikio ir atostogų metu pasirenka keliones šia transporto priemone. Skatinant dviračių transportą, nereikalingos didelės investicijos. Šaligatviai, kuriais mažiau vaikšto pėstieji, atitinkamai pažymimi ir jais gali saugiai važiuoti. Platesni šaligatviai perskiriami į dvi dalis, viena skiriama pėstiesiems, kita – dviratininkams. Tose miesto zonose, kur prognozuojamas dviračių judrumas galėtų smarkiai išaugti, tikslinga asfaltuoti specialius dviračių takus.

Vienintelė priežastis, dėl kurios Lietuvoje neįmanoma dviračius naudoti ištisus metus, klimatinės sąlygos. Ilga ir šalta žiema, gausūs sniego krituliai verčia dviratį laikyti sezonine susisiekimo priemone. Tačiau nežiūrint į tai, prognozuojama, kad dviračių skaičius tiek Lietuvoje, tiek ir visoje Europoje, nuolat augs. Statistika rodo, kad 25% visų kelionių dviračiu keliaujama iki 2 kilometrų atstumu nuo namų, 50% – iki 5 kilometrų, o 90% – iki 15 kilometrų. Tai atstumas, kurį miesto sąlygomis patogiausia įveikti dviračiu. Be to, šiuo metu vyrauja tendencija palaipsniui išsivaduoti miestus iš automobilių srauto.

Dviračių įvairovė yra labai didelė (kalnų, plento, hibridiniai, turistiniai, miesto, vaikiški, BMX, kt.). Visi jie skirti skirtingoms važiavimo sąlygoms, todėl jų charakteristikos taip pat skiriasi. Tačiau šis gaminys turi ir bendras, visiems dviračiams būdingas, charakteristikas – mažas svoris, tvirtumas, standumas, patikimumas, ilgalaikiškumas. Šios charakteristikos apibudina viso gaminio ir atskiro jo mazgo ar elemento sugebėjimą priešintis eksploatacijos metu jį veikiančioms apkrovoms ir jas atlaikyti. Šias apkrovas sukuria inercinės jėgos ir jų momentai. Dominuoja dinaminės apkrovos, dėl kurių poveikio dviračio konstrukcijos elementuose dažnai pradeda vystytis nuovargio reiškiniai. Vykstant kartotinėms-kintamoms apkrovoms tam tikros elementų vietos nuolat patiria plastines deformacijas, kurios kartojasi dešimtis, ar net šimtus tūkstančių kartų. Kaupiantis plastinėms deformacijoms, susiformuoja mikro įtrūkiai – būsimo plyšio užuomazga. Jam išplitus, susilpnėjęs elemento skerspjūvis nebepajėgia atlaikyti padidėjusių įtempių ir elementas deformuojasi arba lūžta. Šiuo požiūriu pavojingi dviračių elementai yra rėmas, priekinė šakė, bagažinė. Dinaminių apkrovų poveikis

taip pat sukelia dviračių elementų virpesius, dėl kurių jie gali atsilaisvinti. Minėtos eksploatacinės savybės turi įtakos ne vien tik konstrukcijos patikimumui. Svarbiausia – saugumas. Gamintojai atsakingi už tai, kad į rinką būtų tiekiami saugūs gaminiai. Tokį įpareigojimą numato Europos Sąjungos direktyvos. O jas įgyvendinti padeda standartai, kurie buvo parengti atsižvelgiant į visos Europos poreikius, siekiant užtikrinti, kad pagal juos gaminami dviračiai būtų kiek įmanoma saugesni. Bandymai standartuose buvo parengti taip, kad pradedant projektavimo stadija būtų galima užtikrinti tiek atskirų dalių, tiek viso dviračio stiprumą ir ilgalaikiškumą, visais atžvilgiais reikalaujant aukštos kokybės ir atsižvelgiant į saugos klausimus. Konkretūs dviračiams keliamų saugumo ir patikimumo reikalavimų nustatymo metodai ir procedūros pateikti LST EN 147XX serijos standartuose [3-6], kuriuos parengė Techninis komitetas ESK/TC 333 „Dviračiai“. Šiems Europos standartams Lietuvoje suteiktas nacionalinių standartų statusas ir jie taikomi visiems Lietuvoje gaminamiems arba į jos rinką tiekiamiems dviračiams.

Dviračių bandymai pagal minėtus standartus yra atliekami ir Šiaulių universiteto eksperimentinių tyrimų laboratorijoje (ETL). ETL akredituota 2012 metų lapkričio 28 dieną ir gali atlikti bandymus pagal daugelį standartų LST EN 14764:2006/P:2006, LST EN 14765:2006 +A1:2008, LST EN 14766:2006 punktų. Gavusi akreditavimo pažymėjimą bandymams atlikti, ETL įsipareigojo visą laiką atitikti kokybės užtikrinimo standarto LST EN ISO/IEC 17025:2005 reikalavimus. Akreditavimo pažymėjimo bei akreditacijos simbolio naudojimas įpareigoja nuolat sekti paslaugų kokybę ir **tobulinti įrenginius**, kad visi bandymai būtų atliekami tinkamai, pagal standartų reikalavimus.

Didžiausias ETL bandymų užsakovas – įmonė „X“. Šioje bendrovėje gaminami įvairių rūšių dviračiai, kuriuos būtina įvertinti saugumo ir patikimumo požiūriu, patikrinti jų atitiktį standartų reikalavimams.

Įmonė „X“ šiandien yra didžiausias dviračių ir elektrinių dviračių gamintojas Šiaurės Europoje, įsikūręs šiaurinėje Lietuvoje (Šiauliai). Dirbdama nuo 1948 m. bendrovė eksportuoja aukščiausios kokybės dviračius visoje Europoje. Turėdama didelius dviračių surinkimo pajėgumus, gali eksploatuoti vienu metu 7 dviračių surinkimo linijas, gaminti 1700 skirtingų dviračių modelių ir pristatyti užsakovui iki 500 000 dviračių per metus. Keli procentai gamybos lieka Baltijos šalyse. Kiti dviračiai yra eksportuojami į 14 pasaulio šalių - Vokietiją, Olandiją, Daniją, Šveicariją, Austriją, Suomiją ir kt. [7].

Vidinei gaminių kokybės kontrolei skiriamas gana didelis dėmesys. Užtikrinant ją įmonės viduje, atliekant bandymus prieš surinktiems gaminiams patenkant pas vartotoją, sumažėja išoriniai nuostoliai, t.y. mažiau gaunama skundų dėl netinkamos kokybės, mažiau broko patenka pas vartotojus. Kartu labai išauga pasitikėjimas įmone, vartotojai drąsiai perka gaminius, kadangi

jų kokybė yra pakankamai gera ir atitinka reikalavimus. Kadangi įmonė „X“ surenka galutinį gaminį, o visos reikiamos detalės perkamos iš gamintojų, kokybė užtikrinama priėmimo kontrole, kad brokuotos detalės nepatektu į surinkimo procesą. Paskui atliekami dviračių detalių, jų atskirų mazgų bei surinkto dviračio bandymai, siekiant išsiaiškinti, ar visos gautos detalės yra kokybiškos, kurios detalės neatitinka standartuose nurodytų reikalavimų. Taip užtikrinama, kad surinktas gaminys bus maksimaliai kokybiškas ir netinkami gaminiai nepateks galutiniam vartotojui. Visi kokybės kontrolės bandymai atliekami pagal standartuose numatytus reikalavimus [8].

**LST EN 14766** numato vieną iš kalnų dviračio rėmo bandymų – *dinaminį nuovargio bandymą panaudojant horizontaliąją jėgą*. Šis bandymas eksperimentinėje tyrimų laboratorijoje atliekamas naudojant specialų bandymų stendą. Nustatytomis apkrovomis veikiamas šliaužiklis, pneumatinių raumenų pagalba juda horizontalia kryptimi pirmyn ir atgal. Per jį tiesiogiai dinaminis periodinis poveikis perduodamas dviračio priekinei šakei, o per ją ir rėmui. Leidžiami skirtingi jėgos pridėjimo dažniai, todėl svarbu išsiaiškinti kaip tai įtakoja sąranką bandymo metu, kuo šie apkrovos būdai skiriasi. Šiame darbe eksperimentiškai nustatoma skirtingų dažnių įtaka jėgos perdavimo dydžiui stende, nustatant veikiančias dviračio šakės deformacijas, atliekama paliginamoji analizė.

### **Tyrimo objektas.**

Skirtingais dažniais horizontaliai ciklinių apkrovų veikiama dviračio priekinės šakės ir rėmo sąranka.

### **Tyrimo tikslas.**

Eksperimentiškai ištirti ciklinės jėgos dydžio priklausomybę nuo dažnio.

### **Tyrimo uždaviniai:**

1. Nustatyti baigtinių elementų metodu (BEM) didžiausių įtempimų vietą sąrankoje;
2. Paruošti sąranką bandymams: tenzorezistorinių jutiklių klįjavimas nustatytoje vietoje, „Spider 8-30“ ir „Catman“ programų įsisavinimas;
3. Paruošti rėmo dinaminio bandymo horizontalia jėga stendą eksperimentiniams tyrimams: susipažinti su stendo vykdomuoju įtaisu, standarto LST EN 14766 p.4.8.5 reikalavimais;
4. Atlikti eksperimentinius tyrimus;
5. Apdoroti eksperimentinių tyrimų rezultatus ir atlikti jų lyginamąją analizę.

### **Teorinė darbo reikšmė.**

Darbe neatliekami teoriniai priekinės dviračio šakės ir rėmo sąrankos dinamikos tyrimai, analitiškai neanalizuojama skirtingų jėgos pridėjimo dažnių įtaka sąrankos ir atskirų rėmo dalių poveikiui. Darbas eksperimentinio pobūdžio, jame pateikti bandymų rezultatai galės būti naudojami vėlesniuose kitų tyrėjų teoriniuose ir praktiniuose tyrimuose.

### **Praktinė darbo reikšmė.**

Darbe atlikta liginamoji skirtingų dažnių analizė leidžia kiekybiškai įvertinti jėgos poveikį, kuri veikia dviračio priekinės šakės ir rėmo sąranką, kai rėmas bandomas dinaminių nuovargio bandymų horizontalia jėga stende. Darbo rezultatai aktualūs ir svarbūs ETL darbuotojams, kurie atliks skirtingos paskirties ir įvairių modelių dviračių rėmų bandymus, pagal naujus 2015 metų liepos mėnesį įsigaliosiančius LST EN ISO 4210-6:2014 dviračių standartus.

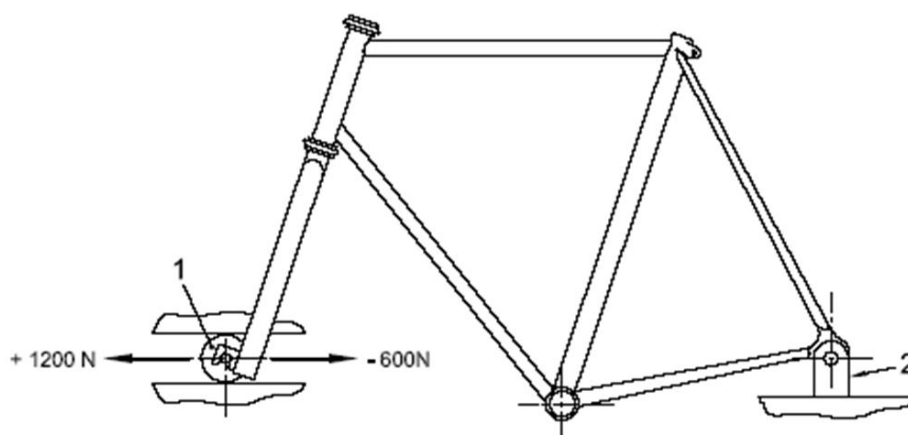
### **Darbo struktūra.**

Magistro darbą sudaro įvadas, 3 skyriai, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas. Darbo apimtis: 45 puslapiai, 20 paveikslų, 16 lentelių, 2 priedai.

# 1. RĖMO NUOVARGIO BANDYMAS NAUDOJANT HORIZONTALIĄ JĖGĄ

## 1.1. Standarto reikalavimai

Dviračio rėmo nuovargio bandymas naudojant horizontalia jėgą aprašytas kalnų dviračių standarte LST EN 14766 punkte 4.8.5. Bandymo principinė schema pateikta 1.1 pav. [5].



**1.1 pav.** Rėmo nuovargio bandymo naudojant horizontalią jėgą schema: 1 – laisvai besisukantis varomasis velenas; 2 – standus laikiklis su vėlenu, rėmo užpakalinės ašies laikikliui įtvirtinti

Rėmas normalioje padėtyje įstatomas į stendą ir pritvirtinamas prie standaus laikiklio su vėlenu tokiu būdu, kad rėmas nebūtų varžomas sukimosi prasme, kaip parodyta 1.1 pav. Reikia užtikrinti, kad priekinio ir užpakalinio veleno ašys stende būtų vienoje horizontalioje linijoje.

Reikia naudoti dinamiškų, horizontalių jėgų ciklus priekinių šakių išsikišimams 1200 N priekine kryptimi ir 600 N atgaline kryptimi. Ciklų skaičius – 50000. Priekinės šakes išsikišimai sutvirtinti taip, kad negali judėti vertikalia kryptimi, tačiau laisvai juda horizontaliai, jėgos pridėjimo metu į priekį ir atgal. Maksimalus leidžiamas dažnis 25 Hz.

*Standarto reikalavimas bandomam rėmui:* bandant 4.8.5.3 aprašytu metodu, ant jokios rėmo dalies neturi būti matomųjų įtrūkių ar lūžių, neturi būti jokių rėmo dalių atsiskyrimo.

## 1.2. Bandymo stendas

Eksperimentinių tyrimų laboratorijoje atliekami kalnų dviračių ir kitų modelių dviračių (jei pageidauja klientai) bandymai, atitinkantys standarto LST EN 14766 p.4.8.5 reikalavimus. Šiam tikslui ETL darbuotojų pastangomis pagal 1.1 pav. pateiktą principinę schemą buvo suprojektuotas ir pagamintas bandymų stendas (žr. 1.2 pav.).



1.2 pav. Rėmo dinaminio bandymo horizontalia jėga stendo vaizdas

Stendo konstrukcija surinkta iš tarpusavyje suvirintų plieninių, tuščiavidurių, stačiakampio profilio elementų. Stendo pagrindinė dalis – dviejų pneumatinių raumenų sąranka. Jais atliekamas dinaminis jėgos perdavimas bandiniui.

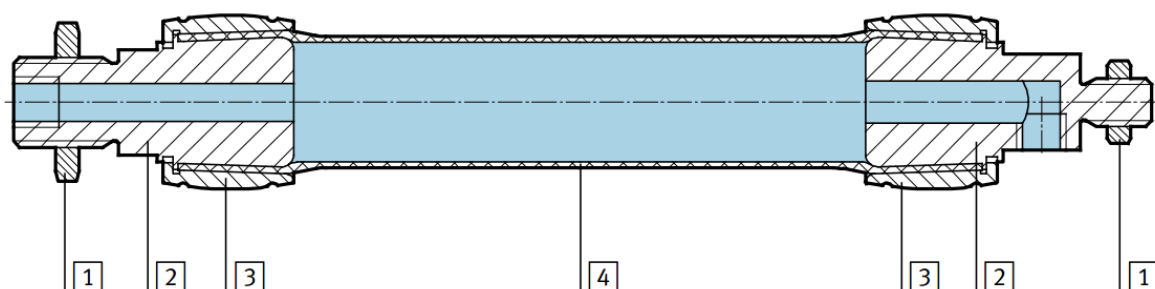
Rėmo ir šakės sąranką tvirtiname į stendą už pakabos ir priekinės šakės antgalių. Naudojami dinamiškų horizontalių jėgų ciklai į priekį ir atgaline kryptimi (žr. 1.1 pav.). Reikiamas darbinis slėgis ant manometrų nustatomas, atsižvelgiant į stendo kalibravimo duomenis. Valdiklyje nustatomas pasirinktas bandymo dažnis ir standarte nurodytas ciklų skaičius.

## 1.3. Bandymo vykdymo įtaisais

Pneumatinės sistemos jau nuo seno buvo naudojamos sprendžiant nesudėtingus techninius uždavinius, tačiau tik palyginti neseniai, pradėjus vystyti pneumoautomatikos technologijoms, jų vaidmuo ypač išryškėjo. Kartu su pneumoautomatikos sistemomis toliau tobulinami ir atskiri šių

sistemų elementai, jų gamybai naudojamos naujos medžiagos, tobulinamos gamybos technologijos ir projektavimo procesai. Pneumatiniai vykdomieji įtaisai dėl savo palyginti nedidelės kainos, montavimo paprastumo, nesudėtingos ir patikimos konstrukcijos bei didelio matmenų ir eigių diapazono yra vieni iš svarbiausių tiesinių vykdytojų [9].

Nuolat gamtos idėjas „pasisavinantys“ mokslininkai sukūrė pneumatinio cilindro funkcijas atliekantį įrenginį, kurio struktūra primena žmogaus raumenį (žr. 1.3 pav.).



**1.3 pav.** Pneumatinio raumens pjūvio vaizdas [10]. Detalės (medžiaga): 1 veržlė (plienas), 2 jungė (aliuminis), 3 įvorė (aliuminis), 4 membrana (chloroprenis)

Šis įrenginys atrodo, kaip paprasta aukšto slėgio žarna, kurios vienas galas yra užsandarintas. Jo veikimo principas identiškas žmogaus raumens darbui ir suteikia įrenginiui savybių, kurių neturi joks pneumatinis cilindras. Pneumatinio raumens veikimo principas toks: didėjant oro slėgiui įtaiso viduje, jis trumpėja, daromas traukimo judesys.

Jėga, kurią išvysto pneumatinis įtaisas yra didesnė už paprasto cilindro maždaug 10 kartų. Juo galima dirbti itin nepalankiomis sąlygomis, nes jis atsparus dulkečiai, drėgnai bei agresyviai aplinkai, taip pat jis nepakeičiamas darbui ypač švariomis sąlygomis, nes yra visiškai sandarus. Dar vienas privalumas, palyginti su cilindru – nėra besitrinančių detalių, kurias reikėtų nuolat tepti ar kitaip prižiūrėti. Judesys, kurį daro įrenginys, yra kur kas tolygesnis ir švelnesnis, nes žarna traukiasi bei plečiasi iš abiejų pusių vienodai. Ypatingas savybes gaminiui suteikia audinio medžiagos ir sudėtinga daugiasluoksnė armuota struktūra. Kadangi jie yra lengvi, jų transportavimas bei perkėlimas nesudėtingas, ir tai yra dar vienas įrenginio privalumas.

Perspektyviausia šiuos įrenginius naudoti kaip nedidelės eigos, didelės galios pavarą arba kaip paprastai valdomą pneumatinę spyruoklę.

## 2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

### 2.1. Stendo įrangos paruošimas tyrimams. Bandinio parinkimas

ETL rėmo dinaminio bandymo horizontalia jėga stendas turi dviejų vienodų pneumatinių raumenų sąranką (žr. 2.1 pav.). Raumens **DMSP-20-150N-RM-RM** (gamintojas FESTO, Vokietija) pagrindiniai duomenys surašyti 2.1 lentelėje [10].



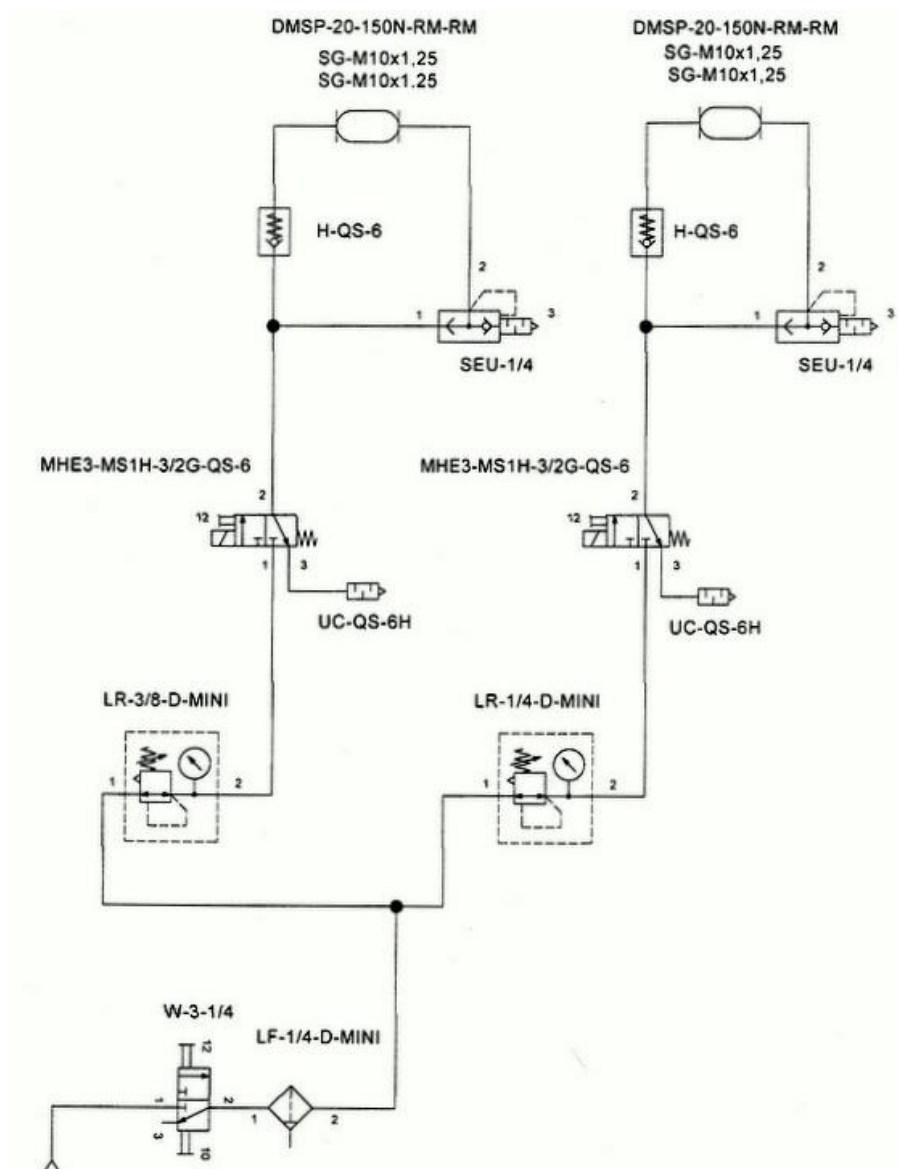
2.1 pav. ETL stendo pneumatinių raumenų DMSP-20 sąranka

2.1 lentelė. Raumens DMSP-20-150N-RM-RM duomenys

| Savybės                                      | Reikšmės   |
|--|--|
| Dydis  | 20   |
| Diametro padidėjimas maksimaliai susitraukus | 39 mm  |
| Maksimalus susitraukimas                     | 25 % vardinio ilgio  |
| Vardinis ilgis                               | 150 mm   |
| Darbinis slėgis                              | 0 – 6 bar  |
| Darbo režimas                                | Vienpusio veikimo, traukimo veikimas                       |
| Darbinė terpė                                | Išfiltruotas, nesuteptas, suslėgtas oras                   |
| Aplinkos temperatūra                         | -5 – 60 °C   |
| Teorinė jėga prie 6 barų                     | 1500N  |
| Pneumatinio raumens galų variantai           | Pneumatinės jungtys, radialinės, abiejuose galuose (RM-RM) |



ETL rėmo dinaminio bandymo horizontalia jėga stendo vykdymo įtaiso principinė schema parodyta 2.2 pav.



2.2 pav. Stendo vykdymo įtaiso principinė schema [9]

Stendas yra prijungtas prie kompresoriaus gaminančio suslėgtą orą. Oras į stendo vykdomąjį įtaisą patenka pro rankinį vožtuvą W-3-1/4. Praeidamas pro filtrą LF-1/4-D-MINI oras patenka į manometrus (slėgio reguliatoriai) LR-1/4-D-MINI. Čia suspaustas oras įgyja reikiamą slėgį ir pro solenoidinius vožtuvus MHE3-MS1H-3/2G-QS-6 užpildo dešinįjį, o po to kairįjį pneumatinių raumenių DMS-20-150N-RM-RM. Atlikęs darbą jis pasišalina per greito išmetimo vožtuvą SEU-1/4.

Eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinkta 28“ moteriško dviračio rėmo ir priekinės šakės sąranka (žr. 1.2 pav.), kurios tarpašinis atstumas 1120 mm.

Rėmo medžiaga – aliuminis **En AW 5083**, priekinės šakės – **plienas C20**. Tokių sąrankos dalių medžiagų kombinacija yra viena iš populiariausių ir dažniausiai naudojamų tipų surenkant vaikiškus, miesto, turistinius ir kalnų dviračius. Tai optimaliausias variantas norint gauti lengvą ir patvarų gaminį.

## 2.2. Matavimo metodų apžvalga ir tinkamiausio parinkimas sąrankos bandymams

Pirmasis bet kurios matavimo sistemos uždavinys yra pajauti matuojamąjį dydį. Šią funkciją atlieka jutiklis – matavimo prietaiso elementas, kuris panaudoja kokį nors fizikinį reiškinių tam, kad pajautų matuojamąjį dydį. Keitiklis pakeičia šį priimtą dydį mechaniniu, optiniu, elektriniu, pneumatiniu, hidrauliniu ar kitokiu signalu, tai yra suteikia signalui tokį pavidalą, kurį būtų lengva įvertinti kiekybiškai. Visais atvejais pajautas dydis turi atkurti matuojamąjį dydį taip, kad gautą signalą būtų galima toliau apdoroti. Iš matavimo įrenginio matuojamas signalas patenka į norminimo įrenginį. Signalas norminamas, norint unifikuoti įvairius dydžius.

Pagrindinės signalų norminimo funkcijos yra tokios:

- teikti jutikliui maitinimo įtampą arba srovę;
- subalansuoti jutiklio išėjimo signalą ar nustatyti šio signalo nulinę padėtį;
- sustiprinti matavimo signalą;
- atlikti su gaunamu signalu matematinės operacijas;
- eliminuoti nereikalingas signalo dedamąsias.

Jeigu matavimo sistemoje yra kompiuteriai, tai į signalų norminimo funkcijas įeina signalo formos pakeitimas iš analoginės į skaitmeninę [11]. Kiekvienas matavimo prietaisas dažniausiai atlieka kokią nors skaičiavimo operaciją. Atlikus šias operacijas gautos reikšmės naudojamos ne tik kaip tiesiogiai išvedama informacija, bet (ypač mechaninių dydžių matavimuose) ši informacija įsimenama ir panaudojama tolimesniam skaitmeniniam apdorojimui. Kai matavimo informacijos toliau neapdorojame arba ji pateikiama stebėtoji vizualiai, matavimas baigiamas informacijos atvaizdavimu. Tam naudojami tiek analoginiai, tiek skaitmeniniai metodai ir priemonės.

Įtempiai koncentracijos zonose ir tuo atveju, kai naudojamos sudėtingos sistemos apkrovimo būdai, svarbiausių deformacijų kryptys iš anksto nėra žinomos. Jos gali būti nustatytos eksperimentiškai, pastarąsias matuojant *tenzorezistorių*, *fototamprumo*, *fototamprųjų dangų*, *holografijos* metodais. Visais šiais metodais, išskyrus fototamprumo metodą, galima

nustatyti deformacijas, o įtempius apskaičiuoti pagal priklausomybę  $\sigma = f(\varepsilon, \nu, E)$ . Kai deformavimas tamprus, įtempiams apskaičiuoti naudojamas apibendrintas Huko dėsnis [12].

*Fototamprumo* arba optiniu įtempimų tyrimo metodu gali būti nustatomos statinės arba dinaminės deformacijos. Šių matavimo metodų esmė: iš optiškai aktyvios skaidrios medžiagos (dažniausiai iš organinio stiklo) pagaminamas modelis, jis apkraunamas tiriamąja medžiaga ir apšviečiamas poliarizuotąja šviesa. Ekrane gaunamas interferencinis vaizdas, kuriame maksimumų ir minimumų išsidėstymas priklauso nuo modelio įtempimų būsenos. Analizuojant gautąjį vaizdą, galima nustatyti veikiančius įtempimus.

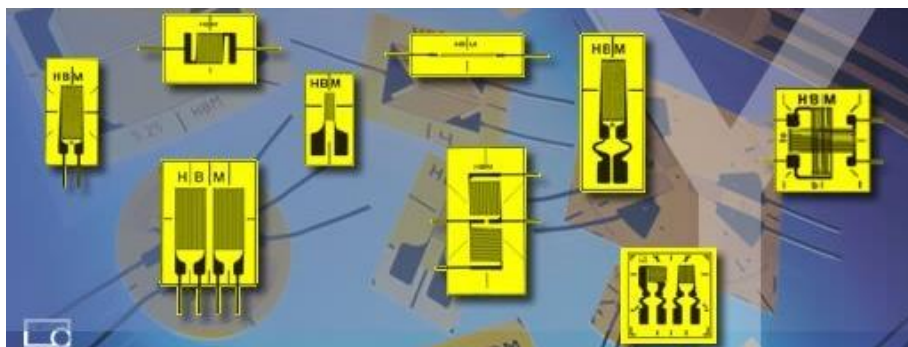
Naudojant *fototamprių dangų* metodą ant tiriamojo objekto užklijuojamos dangos (fototamprios medžiagos plokštelės). Dažniausiai tiriant metalus naudojama medžiaga ED5 – M, pagaminta karštos polimerizacijos būdu. Panašiai, kaip ir fototamprumo metodu, yra apšviečiama poliarizuota šviesa, tik šviesos spinduliai, parėję fototamprią dangą ir atsispindėję nuo tiriamojo objekto, grįžta atgal.

*Holografija* yra bangos fronto, išsklaidyto nagrinėjamo objekto, registravimo (dažniausiai fotoplokštelėje) ir atkūrimo metodas. Naudojantis šiuo metodu įrašoma ir atkuriamas objekto erdvinio vaizdo holograma, pagrįsta šviesos interferencija. Interferencija gaunama tarp dviejų koherentinių šviesos pluoštų: objektinio, kuris apšviečia objektą ir yra difuziškai atspindimas ir atraminio, sudarančio koherentinį foną.

*Elektromechaniniai* matavimo metodai gali būti pagrįsti tenzometrijos principu: matuojama metalinio arba puslaidininkinio tenzorezistoriaus varža kinta, priklausomai nuo deformacijos. Elektromechaninių metodų pranašumas yra jų paprastumas, plati matuojamųjų dydžių sritis, galimybė sustiprinti elektrinį signalą, jį registruoti ir apdoroti kompiuteriais. Tai vieni plačiausiai taikomų metodų.

Deformacijoms matuoti, dažniausiai naudojami tenzorezistoriniai jutikliai. Tenzorezistoriai būna vieliniai, foliniai ir puslaidininkiniai. Vieliniai tenzorezistoriai susideda iš *konstantano*, *manganinio*, *nichromo* vielių, įklijuotų tarp dviejų popieriaus lapelių. Vielos skersmuo 0,01-0,03 mm, minimali bazė  $L = 2$  mm, varža  $R = 50 \dots 800 \Omega$ , maksimali leistina deformacija – 1%. Tenzorezistoriniai jutikliai užklijuojami ant tiriamojo objekto ir objektas deformuojamas bazės kryptimi, tuomet turime didžiausią varžos pokytį.

Dabar dažniausiai naudojami foliniai tenzorezistoriniai jutikliai gaminami ėsdinimo būdu iš 0,004-0,02 mm storio folijos (žr. 2.3 pav.). Jų minimali bazė  $L = 0,4$  mm,  $R = 50 \dots 800 \Omega$ , maksimali leistina deformacija – 2%. Tenzorezistorinis jutiklis paprastai yra tvirtai priklijuojami prie stangraus elemento, kuris ir perduoda jiems deformaciją. Šis jutiklis keičia pailgėjimo pokytį į varžos pokytį [12].



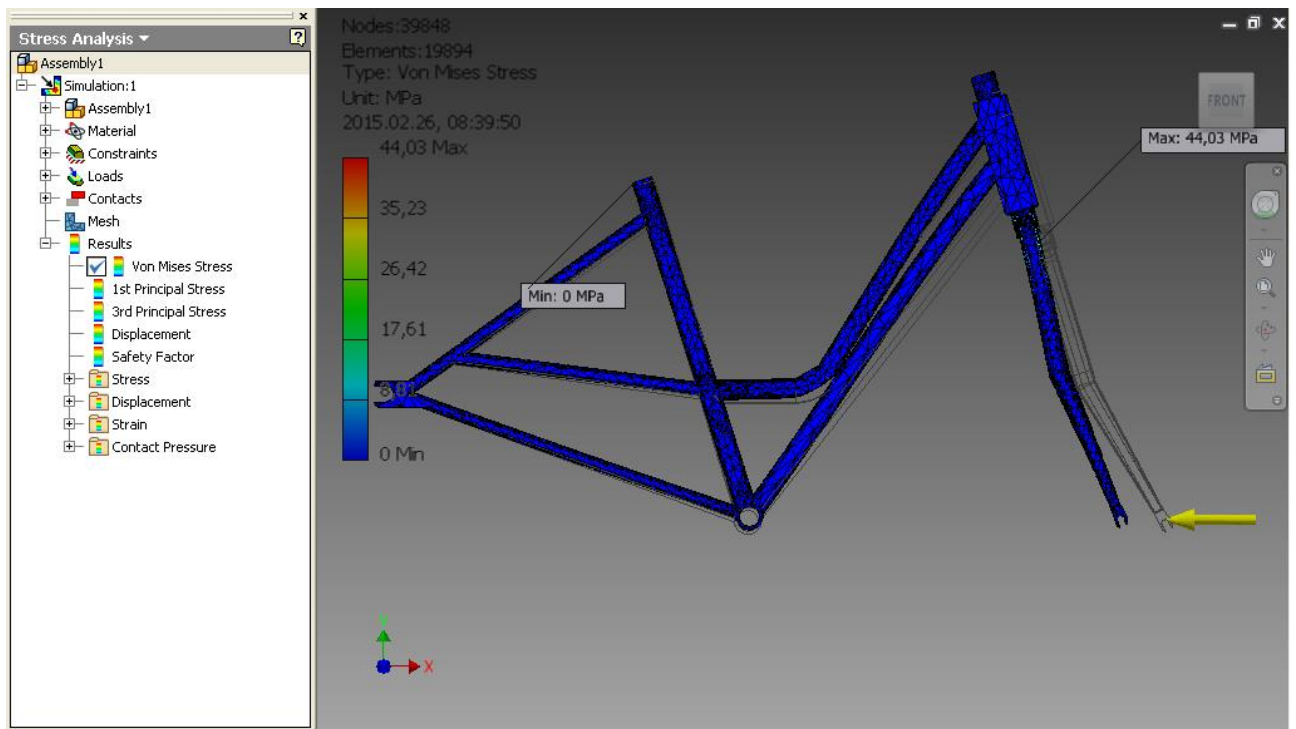
2.3 pav. Foliniai tenzorezistoriniai jutikliai

### 2.2.1. Įtempių koncentracijos vietos nustatymas bandomojoje sąrankoje

Aptikti gaminių silpniausias vietas, nustatant įtempimų koncentracijų zonas – yra svarbus uždavinys. Šiam tikslui atliekami bandymai. Tačiau dažniausiai bandymai brangiai kainuoja ir užtrunka nemažai laiko. Todėl dar gaminio projektavimo stadijoje, ar parenkant medžiagas iš kurių jis bus gaminamas, galima jo stiprumą, ilgaamžiškumą ir kitus parametrus įvertinti trimačių modelių modeliavimo ir baigtinių elementų analizės sistemomis, pvz., Inventor, SolidWorks, Comsol, kt.

Trimačių modelių „bandymai“ užima žymiai mažiau laiko, o gauti rezultatai yra pakankamai tikslūs. Jei svarbus konstrukcijos stiprumas, jie parodo maksimalių ir minimalių įtempių koncentracijų vietas, taip pat vietas, kuriose atsiranda maksimalūs poslinkiai ir kt. Naudojant į specializuotas inžinerinio projektavimo CAD sistemas įdiegtą baigtinių elementų metodą (BEM), sutaupoma daug laiko, energetinių išteklių ir nepatiriama išlaidų realių gaminių bandymams. Be to paaiškėjus, kad konstrukcija yra netobula, ją nesunkiai galima pakeisti, patobulinti ir dar kartą „išbandyti“.

Kadangi bandomoje sąrankoje veikiančių įtempių koncentracijos vieta ir dydis iš anksto nebuvo žinomi, buvo nuspręsta surasti šią vietą, pasinaudojant BEM modeliavimo sistema **Inventor Profesional 2011**. Buvo nubraižytas trimatis dviračio priekinės šakės ir rėmo sąrankos modelis. Išorinės jėgos parametrai parinkti pagal standarte numatytą apkrovos dydį ir standarto reikalavimus. Uždėtas programos paketo Inventor Profesional 2011 siūlomas standartinis baigtinių elementų metodo tinklėlis. Skaičiavimo rezultatai leido išaiškinti maksimalių įtempių taškus (žr. 2.4 pav.). Paveiksle pateiktas įtempių pagal von Mises (MPa) vaizdas. Šie įtempiai parodo dviračio modelio apkrovimo lygį, lyginant juos su takumo ribos įtempiais (panašiai buvo analizuojamas dviračio šakės stiprumas ir standumas darbe [13]).



**2.4 pav.** Šarankos įtempių vaizdas, atlikus stiprumo modeliavimą sistema Inventor Profesional 2011

Medžiagos plastinė deformacija prasideda, kai ekvivalentis von Mises įtempis pasiekia kritinę (takumo taško) vertę. Ekvivalentinis von Mises įtempis  $\sigma_{ekv}$  yra skaliarinis dydis, randamas iš įtempio tenzoriaus, ir yra apskaičiuojamas taip:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} . \quad (2.1)$$

čia:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ir  $\sigma_3$  – svarbiausieji įtempiai.

Kai deformavimas tamprus, priklausomybė tarp kūno įtempių ir deformacijų yra tiesinė:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} . \quad (2.2)$$

čia:  $\varepsilon$  – santykinė deformacija;

$\sigma$  – įtempis;

$E$  – tamprumo modulis.

Įtempio stipris  $\sigma_l$  nustatomas iš sąlygos:

$$\sigma_I = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|), \quad (2.3)$$

čia:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ir  $\sigma_3$  – diagonalizuoto įtempio tenzoriaus komponentės.

Įtempio stipris rodo įtempio apkrovą – zonas, kuriuose susidaro didžiausia tikimybė susiformuoti trūkiams. Dažnai  $\sigma_{ekv}$  ir  $\sigma_I$  skiriasi labai nedaug [14].

Huko dėsnis galioja tamprios (tiesiškai nuo įtempio kintančios) deformacijos ribose, todėl maksimalių įtempių taškas parodo, kad tame taške veikia ir didžiausios deformacijos.

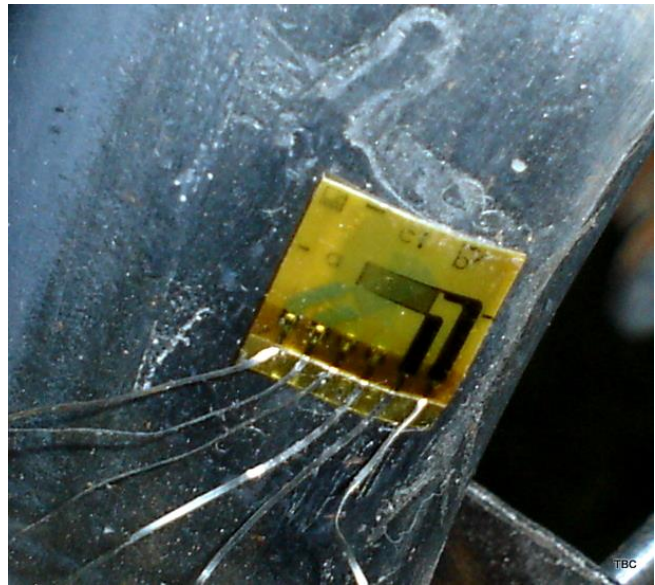
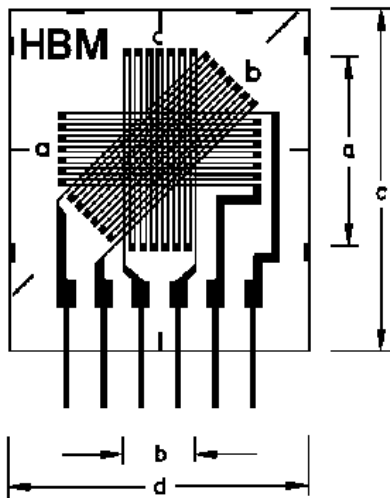
### 2.2.2. Tenzorezistorinio jutiklio ir įrangos parinkimas eksperimentiniams tyrimams

2.4 pav. pateiktas konstrukcijos įtempių vaizdas leidžia pasirinkti maksimalių įtempių vietą, kurioje tvirtinamas deformacijų jutiklis. Kadangi bandymų metu dviračio šakėje veikiančių svarbiausių įtempių veikimo kryptis nežinoma, buvo nuspręsta pasirinkti rozetės tipo tenzorezistorinį jutiklį. Iš keleto galimų folinių variantų buvo pasirinkta trijų sukryžiuotų tenzorezistorinių jutiklių rozetė (HBM tipo **3/120RY91**) plieno gaminiams. Jos charakteristikos pateiktos 2.2 lentelėje, o bendras vaizdas 2.5 pav.

Trys matavimams skirti tinkleliai pažymėti raidėmis **a**, **b** ir **c**. Atitinkamai trys tinklelių pagalba matuojamos deformacijos žymimos  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  ir  $\varepsilon_c$ .

**2.2 lentelė.** Tenzorezistorinių jutiklių rozetės 3/120RY91 techninės charakteristikos

| Savybės   | Reikšmės  |
|---|---|
| Paskirtis   | Plieniniams gaminiams   |
| Medžiaga  | Konstantano folija  |
| Varža   | 120 $\Omega$  |
| Maksimali matavimo įtampa                         | 2 V   |
| Tinklelių išdėstymas vienas kito atžvilgiu        | A - 0°/B - 45°/C - 90°  |
| Rozetės tinklelių koeficientas k                  | Tinklelio A: 1,97 $\pm$ 1 %<br>Tinklelio B: 2,02 $\pm$ 1 %<br>Tinklelio C: 2,02 $\pm$ 1 % |
| Skersinis jautrumas                               | Tinklelio A: 0,5 %<br>Tinklelio B: -0,1 %<br>Tinklelio C: 0,1 %                           |
| Temperatūrinis kompensacijos koeficientas plienui | $\alpha=10,8 [10^{-6} / ^\circ\text{C}]$  |



**2.5 pav.** Jutiklio schema ir ant bandinio užklijuoto jutiklio vaizdas [15]. Schemoje pateikti matmenys:  $a = 3 \text{ mm}$ ,  $b = 1,25 \text{ mm}$ ,  $c = 9 \text{ mm}$ ,  $d = 9 \text{ mm}$ ,

Tinklelio padėtis, kanalo numeris prietaise „Spider 8-30“, spalvos eksperimentų grafikuose ir duomenų lentelėse:

- „a“ – horizontalus, kanalas – Nr. 2 (2.10 pav.), „žalia“;
- „b“ – 45°, kanalas – Nr. 0 (2.10 pav.), „raudona“;
- „c“ – vertikalus, statmenas „a“, kanalas – Nr. 1 (2.10 pav.), „mėlyna“.

Svarbiausių normalinių įtempių veikimo krypties kampas  $\alpha$ , svarbiausi normaliniai įtempiai  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , svarbiausios deformacijos  $\varepsilon_1$  ir  $\varepsilon_2$ , ekvivalentiniai įtempiai pagal Mises'ą iš tinklelių  $a/b/c = 0^\circ/45^\circ/90^\circ$  apskaičiuojami pagal formules [15]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{atan} \left| \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \right|, \quad (2.4)$$

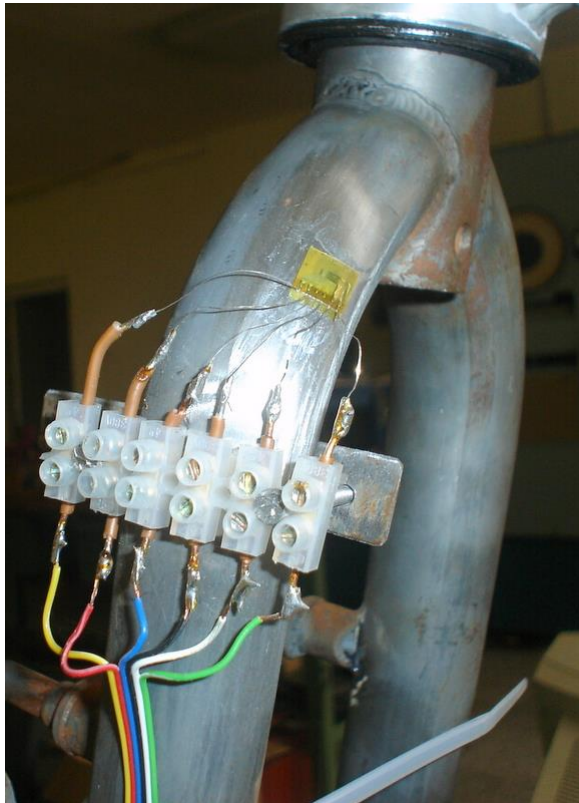
$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{2(1-\nu)} (\varepsilon_a + \varepsilon_c) \pm \frac{E\sqrt{2}}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}, \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{1/2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}, \quad (2.6)$$

čia:  $E$  – tamprumo modulis,

$\nu$  – Puasono koeficientas.

Jutiklis ant šakės buvo priklijuotas **Z70** klijuojamais. Prieš tai klijavimo vieta buvo nušveista smulkiu šlifavimo popieriumi ir nuriebalinta (žr. 2.6 pav.).



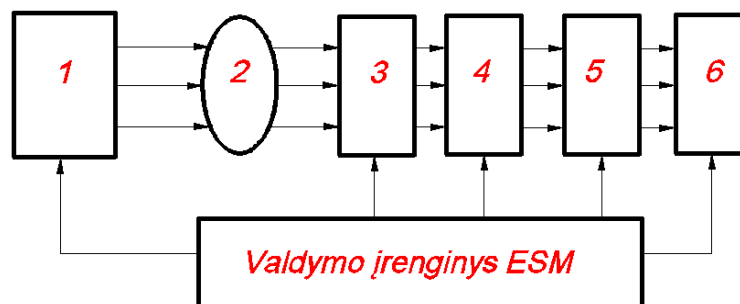
**2.6 pav.** Priklijuoto tenzorezistorinio jutiklio vaizdas

Mechaniniams dydžiams (slėgiams, poslinkiams, įtempiams, jėgoms, pagreičiams ir kt.) matuoti naudojama informacinė matavimo sistema (IMS) „Spider 8“ [16], sujungta su foliniais tenzorezistoriniais jutikliais ir valdomą „Catman“ programine įranga [15].

IMS galima išskirti tokius pagrindinius blokus (žr. 2.7 pav.):

- matavimo priemonė, susidedanti iš mechaninių dydžių, elektrinių dydžių ir informacinių jutiklių;
- informacijos jutikliai, apdorojantys informaciją pagal nurodytą algoritmą (matematinės operacijas, moduluojantys signalą ir pan.);
- informacijos saugojimo įrenginys;
- informacijos vaizdavimo keitiklis, paverčiantis matavimo informaciją vizualiai matoma;
- valdymo arba skaičiavimo įrenginys, organizuojantis visų IMS mazgų tarpusavio sąveiką.



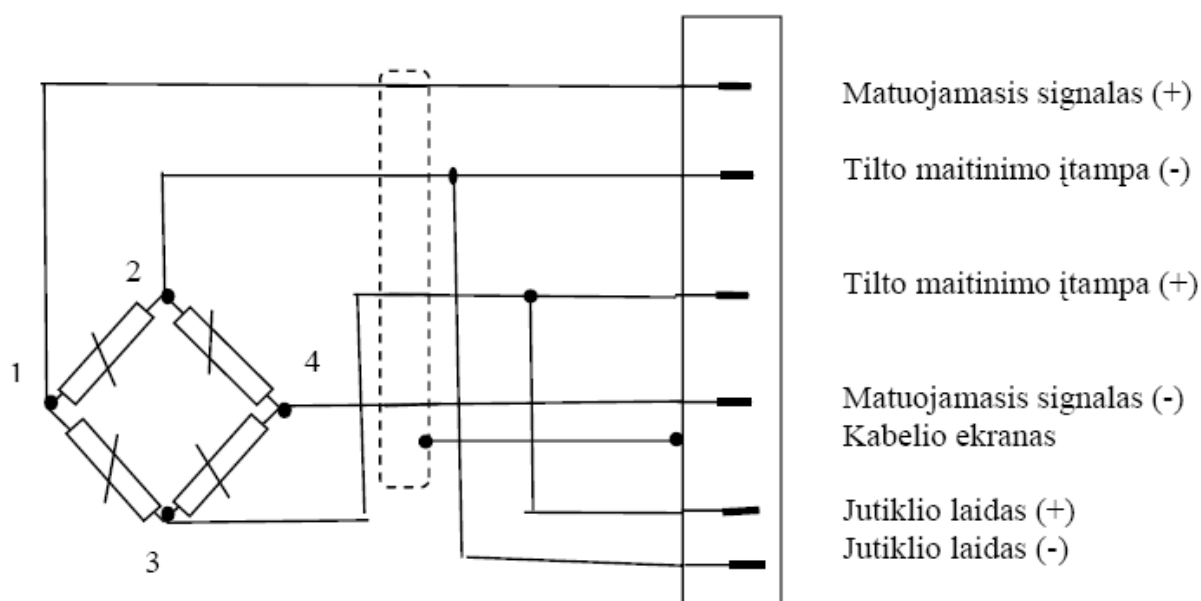


**2.7 pav.** Informacinės matavimo sistemos „Spider 8“ funkcinė schema:

1 – išorės veiksniai; 2 – objektas; 3 – keitikliai; 4 – matavimo rezultatų apdorojimas; 5 – informacijos registracija; 6 – informacijos atvaizdavimas

Matuojamąsias deformacijas pajaučia tenzorezistorinis jutiklis ir paverčia jas elektrinės varžos pokyčiais, o „Spider 8“, panaudojant tiltelio schemą, elektrinės grandinės įtampos pokyčiais. Šie elektriniai signalai panaudojami išėjimo dydžiui suformuoti.

Matavimo signalų apdorojimo schema (kai jutikliai sujungti pilnuoju tilteliu) pateikta 2.8 pav.



**2.8 pav.** Deformacijų keitiklio į elektrinę įtampą schema

Kintant jutiklių varžoms, keičiasi ir išėjimo įtampa. Kai tiltelis subalansuotas, t.y.,  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ , tuomet išėjimo įtampa  $U_{i\bar{s}} = 0$ . Deformacijų matavimui dažnai naudojamas nesubalansuoto tiltelio režimas. Išėjimo signalas (milivoltai kiekvienam įėjimo voltui)

formuojamas, kaip nuokrypis nuo pradinio signalo. Maitinimui naudojami 10 V įtampos pastoviosios srovės šaltiniai.

Bandymo metu aktyvus tik vienas jutiklis ir jo varža keičiasi dėl atitinkamos deformacijos. Tuomet šio jutiklio varža  $R_1 = R_1 + \Delta R = R_x$  ( $\Delta R$  – varžos pokytis dėl deformacijų) ir išėjimo įtampa [12, 17]:

$$U_{i\check{s}} = U_m \left( \frac{R_x}{R_x + R_2} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right), \quad (2.7)$$

čia:  $U_m$  – įėjimo įtampa,

$R_{x,2,3,4}$  – varžos.

(2.7) lygybę galima užrašyti taip:

$$\frac{U_{i\check{s}}}{U_m} = \frac{R_x}{R_x + R_2} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{R_2 \Delta R}{(R_1 + R_2)^2 \left( 1 + \frac{\Delta R}{R_1 + R_2} \right)}. \quad (2.8)$$

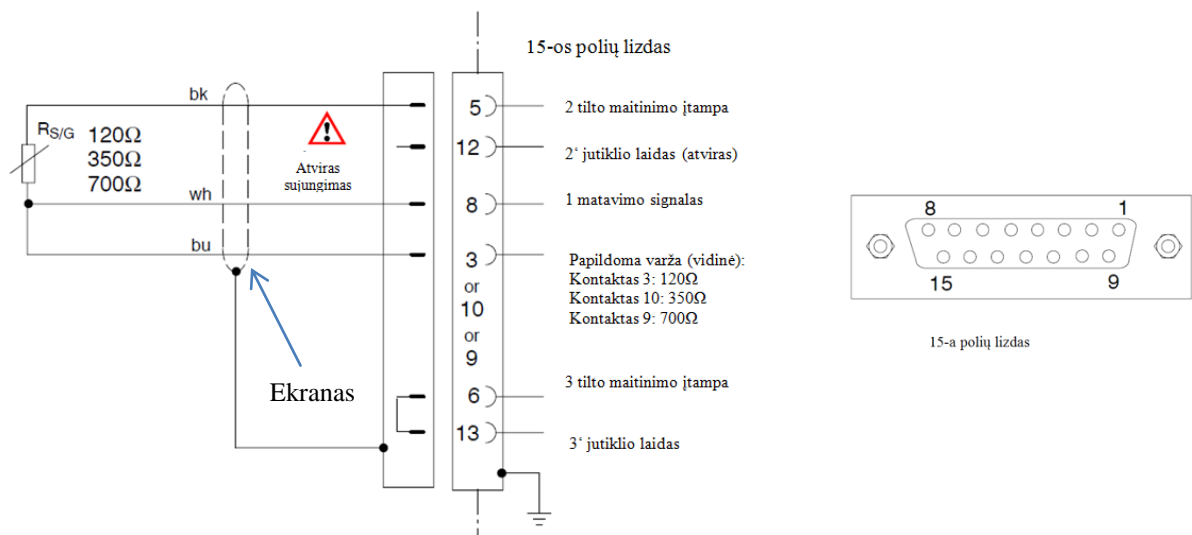
Tuo atveju, kai  $R_1 = R_2$ ,  $\Delta R \ll (R_1 + R_2)$ . Tuomet,

$$\frac{U_{i\check{s}}}{U_m} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}. \quad (2.9)$$

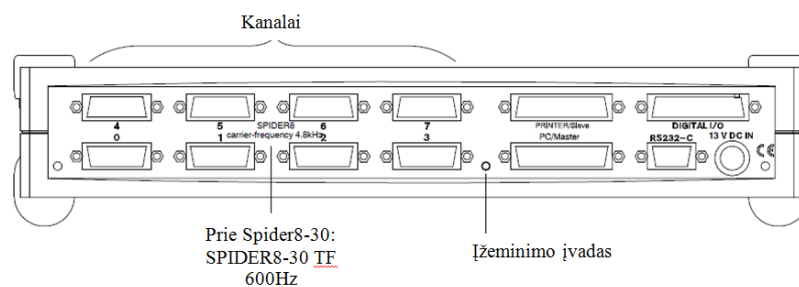
Sistema „Spider 8” sukurta kaip vienas įrenginys. Ji atlieka visas pagrindines funkcijas – gauna, apdoroja ir pateikia tiriamojo objekto informaciją, suformuoja tiriamojo objekto matavimo informaciją ir tiriamojo objekto valdymo poveikius. Eksperimentams naudojama modifikuota sistema “Spider 8-30”. Ji turi ketvirčio tilto matavimui įmontuotas papildomas varžas (120  $\Omega$ , 350  $\Omega$ , 700  $\Omega$ ), kurias galima pasiekti per 3,10 arba 9 polius (žr. 2.9 pav.).

Apsaugai nuo elektromagnetinių trukdžių yra naudojamas ekranas, sujungtas su korpusu, tuomet visa matavimo sistema yra ekranuojama ir jos neveikia išoriniai elektromagnetiniai laukai (žr. 2.9 pav.).

„Spider 8-30” su kuriuo buvo atlikti bandymai turi sukomplektuotus aštuonis kanalus (žr. 2.10 pav.). Kiekvienas kanalas atlieka visas matuojamojo dydžio keitimo funkcijas – matuojamojo dydžio pajautimą, šio priimtojo dydžio pakeitimą į elektrinį signalą, jo stiprinimą, analoginio signalo keitimą į skaitmeninį ir filtravimą.



**2.9 pav.** Tenzorezistorinio jutiklio jungimo ketvirčiu tilto schema [15]



**2.10 pav.** „Spider 8-30” vaizdas iš galo (įrenginio schema ir įrenginio pajungimo bandymų metu vaizdas)

Kiekviename „Spider 8-30” kanale yra maitinimo šaltinis pasyviems deformacijų jutikliams, stiprintuvas, filtras ir analoginis skaitmeninis (A/D) jutiklis. Visi A/D jutikliai dirba

sinchroniškai (taip užtikrinamas matavimas tuo pačiu metu visuose kanaluose) ir tiekia iki 9600 matavimų per sekundę (taip apimamas visas matuojamų mechaninių dydžių diapazonas) [15].

Prie esamo lizdo PC/MASTER galima prijungti kompiuterį arba kitą „Spinder 8“ bloką ir taip nuosekliai sujungti aštuonis „Spinder 8“ su iš viso 64 kanalais. Ši sistema tinka naudoti su tenzorezistoriniais, induktyviniais, potenciometriniais ir kitais deformacijų matavimo jutikliais. Jokie papildomi nustatymai yra nereikalingi, t.y., kompiuteriui sistema prisistato tiesiog kaip prietaisas su 8, 16 arba net 64 kanalais, kurie visi tarpusavyje yra sinchronizuoti.

Informacija iš IMS gali būti pateikiama operatoriui arba elektroninėms skaičiavimo mašinoms (ESM). Tiek operatorius, tiek ESM gali per IMS valdymo bloką keisti jos darbo programą. Racionaliausias IMS sudarymo principas – kai sistema kuriama kaip vienas įrenginys, susidedantis iš nepriklausomų funkcinių sąrankų (modulių). Kiekvienas modulis yra baigtinės konstrukcijos sąranka. Moduliai yra sujungiami interfeisais. Kuriant sistemas, numatoma galimybė eksploatacijos procese keisti arba plėsti IMS struktūrą. Agregavimo principo privalumai ypač išryškėja tada, kai, sujungus atskirus modulius, nereikia daryti jokių konstrukcinių pakeitimų.

Gauta informacija iš tenzorezistorinių jutiklių per ISM „**Spider 8-30**“ perteikiama į kompiuterį, o kompiuteryje gauti rezultatai apdorojami „**Catman**“ programa. Ši programa taip pat atlieka matavimo rezultatų vizualizavimą ir valdymą.

### 2.3. Sąrankos eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentinių tyrimų planas:

1. Atlikti sąrankai statinius bandymus su pavieniais pneumatiniiais raumenimis;
2. Atlikti dinامينius bandymus su pavieniais pneumatiniiais raumenimis;
3. Atlikti dinامينius bandymus su abiem pneumatiniiais raumenimis.

Atliekant statinius bandymus su atskirais pneumatiniiais raumenimis tiesiogiai pridedama nustatyta jėga prie bandomosios sąrankos. Slėgis, reikalingas gauti atitinkamai jėgai, yra paskaičiuotas stendo kalibravimo protokole.

Duomenys, gauti bandant sąranką statinėmis apkrovomis, laikomi *pamatiniais*. Jie naudojami tolimesniuose skaičiavimuose ir palyginami su rezultatais, gautais sąranką bandant įvairiomis dinaminėmis apkrovomis.

### 2.3.1. Srankos statiniai bandymai

Bandant „Spider 8-30“ sistemą su „Catman“ programine įranga buvo registruojami duomenys gaunami iš priklijuoto ant šakės jutiklio **3/120RY91**. Tiltelio faktorius pasirinktas lygus **1** visiems bandymams. Tai jutiklio jautrumo parametras ***n***.

Mažiausias jautrumas yra, kai ant jautraus elemento klijuojamas vienas tenzorezistorius  $R_{t1}$  ir šalia jo prie plokštelės termokompensacinis tenzorezistorius  $R_t$  (jis nedeformuojamas) [12].

Temperatūrą ir santykinę oro drėgmę visų bandymų metu išlaikėme nustatytą dviračių bandymų laboratorijoms:  $19 \pm 3$  °C, 35-75 %.

Gauti rezultatai fiksuojami, išsaugomi ir pateikiami vizualiai (Pvz. priedas 1).

Srankos statiniai bandymai atlikti į sistemą paduodant suslėgtą orą, kurio pagalba pneumatiniai raumenys išvysto 400 N, 600 N ir 800 N jėgą abiem kryptim. Statiniai bandymai atlikti, naudojant tik vieną pneumatinį raumenį, kaip parodyta 2.11 pav. Kiekvieno bandymo metu priešingos pusės pneumatinis raumuo yra nuimtas ir į jį darbinis suslėgtas oras netiekiamas. Po trijų bandymų raumenys sukeičiami ir bandymas kartojamas su vienu priešingos pusės pneumatiniu raumenu. Paduotas darbinis slėgis išlaikomas 1 min., matavimų skaičius – 10 matavimų per s. Matavimų rezultatai pateikti 2.3 ir 2.4 lentelėse.



**2.11 pav.** Srankos statinis bandymas kai atskirai veikia dešinysis ir kairysis pneumatinis raumuo

**2.3 lentelė.** Statinių bandymų su pavieniais pneumatiniiais raumenimis rezultatai (veikia dešinysis raumuo)

| Eil.<br>Nr. | p,<br>bar | F,<br>N | $\Delta$ ,<br>mm | SPIDER 8-30, $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |         |        |
|-------------|-----------|---------|------------------|--|---------|--------|
|             |           |         |                  | Ž  | R       | M      |
| 1           | 1,58      | 400,00  | 2,33             | -160,00  | -105,00 | 61,50  |
| 2           | 2,38      | 600,00  | 3,41             | -267,00  | -175,50 | 100,50 |
| 3           | 3,26      | 800,00  | 4,28             | -344,00  | -224,50 | 127,00 |

**2.4 lentelė.** Statinių bandymų su pavieniais pneumatiniiais raumenimis rezultatai (veikia kairysis raumuo)

| Eil.<br>Nr. | p,<br>bar | F,<br>N | $\Delta$ ,<br>mm | SPIDER 8-30, $\epsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |        |         |
|-------------|-----------|---------|------------------|--|--------|---------|
|             |           |         |                  | Ž  | R      | M       |
| 1           | 1,58      | 400,00  | 1,91             | 157,44   | 101,28 | -67,20  |
| 2           | 2,38      | 600,00  | 2,62             | 226,32   | 144,22 | -97,68  |
| 3           | 3,26      | 800,00  | 3,27             | 322,32   | 204,96 | -139,92 |

### 2.3.2. Sąrankos dinaminiai bandymai su pneumatiniiais raumenimis

Sąrankos dinaminiai bandymai buvo atliekami su **pavieniais** pneumatiniiais raumenimis, kai priešingas nuimtas (žr. 2.11 pav.). Po to – kai uždėti abu, bet veikia po **vieną**. Paskutinis etapas – uždėti abu ir veikia **abu** (žr. 1.2 pav.). Jėgų dydis dinaminių bandymų metu: 400 N, 600 N ir 800 N. Dinaminių bandymų metų nustatytas jėgos poveikio dažnis: 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 1,5 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz ir 10 Hz.

Matavimų fiksavimo dažnis visuose dinaminuose bandymuose – 200 matavimų per s. Gauti bandymų rezultatai pateikti 2.5 ir 2.15 lentelėse.

**2.5 lentelė.** Dinaminių bandymų su **pavieniais** pneumatiniiais raumenimis rezultatai (0,1 Hz, veikia dešinysis raumuo)

| Eil.<br>Nr. | p,<br>bar | F,<br>N | f,<br>Hz | SPIDER 8-30, $\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |         |        |
|-------------|-----------|---------|----------|---|---------|--------|
|             |           |         |          | Ž   | R       | M      |
| 1           | 0         | 0       | 0        | 0   | 0       | 0      |
| 2           | 1,50      | 400,00  | 0,10     | -169,00   | -111,00 | 62,00  |
| 3           | 2,38      | 600,00  |          | -253,00   | -167,00 | 91,00  |
| 4           | 3,26      | 800,00  |          | -331,00   | -217,00 | 119,00 |

**2.6 lentelė.** Dinaminių bandymų su **pavieniais** pneumatiniiais raumenimis rezultatai (0,1 Hz, veikia kairysis raumuo)

| Eil.<br>Nr. | p,<br>bar | F,<br>N | f,<br>Hz | SPIDER 8-30, $\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |        |         |
|-------------|-----------|---------|----------|---|--------|---------|
|             |           |         |          | Ž   | R      | M       |
| 1           | 0         | 0       | 0        | 0   | 0      | 0       |
| 2           | 1,50      | 400,00  | 0,10     | 190,00  | 135,00 | -78,00  |
| 3           | 2,38      | 600,00  |          | 258,00  | 168,00 | -103,00 |
| 4           | 3,26      | 800,00  |          | 339,00  | 215,00 | -135,00 |

**2.7 lentelė.** Dinaminių bandymų su **vienu** pneumatiniu raumenimi rezultatai (0,5 Hz, veikia dešinysis)

| Eil.<br>Nr. | p,<br>bar | F,<br>N | f,<br>Hz | SPIDER 8-30, $\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |         |        |
|-------------|-----------|---------|----------|---|---------|--------|
|             |           |         |          | Ž   | R       | M      |
| 1           | 0         | 0       | 0        | 0   | 0       | 0      |
| 2           | 1,50      | 400,00  | 0,50     | -167,00   | -111,00 | 62,00  |
| 3           | 2,38      | 600,00  |          | -252,00   | -166,00 | 91,00  |
| 4           | 3,26      | 800,00  |          | -336,00   | -222,00 | 121,00 |

**2.8 lentelė.** Dinaminių bandymų su **vienu** pneumatiniu raumenimi rezultatai (0,5 Hz, veikia kairysis)

| Eil.<br>Nr. | p,<br>bar | F,<br>N | f,<br>Hz | SPIDER 8-30, $\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |        |         |
|-------------|-----------|---------|----------|---|--------|---------|
|             |           |         |          | Ž   | R      | M       |
| 1           | 0         | 0       | 0        | 0   | 0      | 0       |
| 2           | 1,50      | 400,00  | 0,50     | 200,00  | 132,00 | -77,00  |
| 3           | 2,38      | 600,00  |          | 260,00  | 170,00 | -103,00 |
| 4           | 3,26      | 800,00  |          | 362,00  | 234,00 | -147,00 |

**2.9 lentelė.** Dinaminių bandymų su **abiem** pneumatiniiais raumenimis rezultatai (0,5 Hz)

| Eil. Nr. | p, bar | F, N   | SPIDER 8-30 viršus, $\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |         |       | SPIDER 8-30 apačia, $\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |        |        | Ciklų skaičius |
|----------|--------|--------|--|---------|-------|--|--------|--------|----------------|
|          |        |        | Ž  | R       | M     | Ž  | R      | M      |                |
| 1        | 0      | 0      | 0  | 0       | 0     | 0  | 0      | 0      | 0              |
| 2        | 1,50   | 400,00 | -122,00  | -81,00  | 47,00 | 118,00   | 79,00  | -42,00 | 7              |
| 3        | 2,38   | 600,00 | -200,00  | -132,00 | 72,00 | 186,00   | 123,00 | -72,00 | 4              |
| 4        | 3,26   | 800,00 | -256,00  | -169,00 | 93,00 | 247,00   | 162,00 | -97,00 | 5              |

**2.10 lentelė.** Dinaminių bandymų su **vienu** pneumatiniu raumenimi rezultatai (1,0 Hz, veikia dešinysis,  $\varepsilon$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ))

| Eil. Nr. | p, bar | F, N   | SPIDER 8-30 viršus, $\varepsilon$ |         |        | SPIDER 8-30 apačia, $\varepsilon$ |       |      | Ciklų skaičius |
|----------|--------|--------|-----------------------------------|---------|--------|-----------------------------------|-------|------|----------------|
|          |        |        | Ž                                 | R       | M      | Ž                                 | R     | M    |                |
| 1        | 0      | 0      | 0                                 | 0       | 0      | 0                                 | 0     | 0    | 0              |
| 2        | 1,50   | 400,00 | -208,00                           | -108,00 | 123,00 | -9,00                             | -3,00 | 4,00 | 10             |
| 3        | 2,38   | 600,00 | -341,00                           | -167,00 | 183,00 | -11,00                            | -4,00 | 4,00 | 10             |
| 4        | 3,26   | 800,00 | -454,00                           | -223,00 | 245,00 | -16,00                            | -5,00 | 7,00 | 10             |

**2.11 lentelė.** Dinaminių bandymų su **vienu** pneumatiniu raumenimi rezultatai (1,0 Hz, veikia kairysis,  $\varepsilon$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ))

| Eil. Nr. | p, bar | F, N   | SPIDER 8-30 viršus, $\varepsilon$ |      |       | SPIDER 8-30 apačia, $\varepsilon$ |        |         | Ciklų skaičius |
|----------|--------|--------|-----------------------------------|------|-------|-----------------------------------|--------|---------|----------------|
|          |        |        | Ž                                 | R    | M     | Ž                                 | R      | M       |                |
| 1        | 0      | 0      | 0                                 | 0    | 0     | 0                                 | 0      | 0       | 0              |
| 2        | 1,50   | 400,00 | 4,00                              | 0,00 | -1,00 | 229,00                            | 127,00 | -148,00 | 10             |
| 3        | 2,38   | 600,00 | 4,00                              | 0,00 | 0,00  | 333,00                            | 173,00 | -206,00 | 10             |
| 4        | 3,26   | 800,00 | 11,00                             | 4,00 | -1,00 | 457,00                            | 231,00 | -288,00 | 10             |

**2.12 lentelė.** Dinaminių bandymų su **abiem** pneumatiniiais raumenimis rezultatai (1,0 Hz,  $\varepsilon$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ))

| Eil. Nr. | p, bar | F, N   | SPIDER 8-30 viršus, $\varepsilon$ |         |        | SPIDER 8-30 apačia, $\varepsilon$ |        |         | Ciklų skaičius |
|----------|--------|--------|-----------------------------------|---------|--------|-----------------------------------|--------|---------|----------------|
|          |        |        | Ž                                 | R       | M      | Ž                                 | R      | M       |                |
| 1        | 0      | 0      | 0                                 | 0       | 0      | 0                                 | 0      | 0       | 0              |
| 2        | 1,50   | 400,00 | -157,00                           | -77,00  | 91,00  | 123,00                            | 74,00  | -78,00  | 10             |
| 3        | 2,38   | 600,00 | -216,00                           | -112,00 | 131,00 | 200,00                            | 109,00 | -121,00 | 7              |
| 4        | 3,26   | 800,00 | -286,00                           | -151,00 | 168,00 | 265,00                            | 146,00 | -167,00 | 10             |



**2.13 lentelė.** Dinaminių bandymų su **vienu** pneumatiniu raumenimi rezultatai (veikia dešinysis,  $\varepsilon$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ))

| Eil. Nr.            | p, bar | F, N   | SPIDER 8-30 viršus, $\varepsilon$ |        |       | SPIDER 8-30 apačia, $\varepsilon$ |         |        | Ciklų skaičius |
|---------------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|-------|-----------------------------------|---------|--------|----------------|
|                     |        |        | Ž                                 | R      | M     | Ž                                 | R       | M      |                |
| <i>Dažnis 2 Hz</i>  |        |        |                                   |        |       |                                   |         |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | -0,20                             | 0,50   | 0,00  | -170,00                           | -111,00 | 65,00  | 18             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | -1,50                             | -1,50  | 0,70  | -260,00                           | -170,00 | 97,00  | 10             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | -2,00                             | -2,00  | 1,50  | -340,00                           | -225,00 | 125,00 | 11             |
| <i>Dažnis 4 Hz</i>  |        |        |                                   |        |       |                                   |         |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | -7,00                             | -5,00  | 3,50  | -110,00                           | -72,00  | 42,00  | 18             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | -15,00                            | -12,00 | 5,50  | -200,00                           | -130,00 | 75,00  | 12             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | -22,00                            | -16,00 | 7,20  | -257,00                           | -169,00 | 95,50  | 14             |
| <i>Dažnis 6 Hz</i>  |        |        |                                   |        |       |                                   |         |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | -19,00                            | -12,50 | 6,70  | -82,00                            | -54,00  | 32,00  | 14             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | -30,00                            | -19,00 | 12,00 | -128,00                           | -84,00  | 50,00  | 13             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | -47,00                            | -30,00 | 18,00 | -183,00                           | -120,00 | 68,00  | 14             |
| <i>Dažnis 8 Hz</i>  |        |        |                                   |        |       |                                   |         |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | -22,00                            | -14,50 | 8,60  | -55,00                            | -36,00  | 21,50  | 21             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | -41,00                            | -27,00 | 16,00 | -96,00                            | -62,00  | 37,00  | 28             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | -63,00                            | -42,00 | 24,00 | -140,00                           | -92,00  | 53,00  | 23             |
| <i>Dažnis 10 Hz</i> |        |        |                                   |        |       |                                   |         |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | -27,00                            | -18,00 | 10,50 | -49,00                            | -32,00  | 19,00  | 39             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | -50,00                            | -33,00 | 19,00 | -87,80                            | -57,00  | 34,00  | 34             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | -76,00                            | -49,90 | 29,00 | -127,00                           | -84,00  | 48,00  | 55             |

**2.14 lentelė.** Dinaminių bandymų su **vienu** pneumatiniu raumenimi rezultatai (veikia kairysis,  $\varepsilon$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ))

| Eil. Nr.            | p, bar | F, N   | SPIDER 8-30 viršus, $\varepsilon$ |        |         | SPIDER 8-30 apačia, $\varepsilon$ |       |        | Ciklų skaičius |
|---------------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|---------|-----------------------------------|-------|--------|----------------|
|                     |        |        | Ž                                 | R      | M       | Ž                                 | R     | M      |                |
| <i>Dažnis 2 Hz</i>  |        |        |                                   |        |         |                                   |       |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 167,00                            | 108,00 | -71,00  | 3,10                              | 3,10  | -1,50  | 15             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 259,40                            | 162,00 | -110,00 | 8,00                              | 5,30  | -3,60  | 13             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 330,00                            | 310,00 | -144,00 | 8,00                              | 4,50  | 0,00   | 12             |
| <i>Dažnis 4 Hz</i>  |        |        |                                   |        |         |                                   |       |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 126,00                            | 87,00  | -53,00  | 10,00                             | 6,50  | -5,00  | 30             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 185,50                            | 120,00 | -80,00  | 18,00                             | 10,00 | -9,00  | 22             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 244,00                            | 157,00 | -106,00 | 21,00                             | 12,00 | -12,50 | 19             |
| <i>Dažnis 6 Hz</i>  |        |        |                                   |        |         |                                   |       |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 77,00                             | 49,00  | -32,00  | 17,00                             | 11,50 | -7,20  | 22             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 120,00                            | 77,00  | -51,00  | 27,60                             | 18,50 | -11,00 | 18             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 156,00                            | 100,00 | -68,00  | 37,00                             | 24,00 | -16,00 | 19             |
| <i>Dažnis 8 Hz</i>  |        |        |                                   |        |         |                                   |       |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 52,00                             | 34,00  | -22,00  | 22,00                             | 14,00 | -9,00  | 34             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 82,00                             | 52,50  | -35,00  | 34,00                             | 22,00 | -13,50 | 33             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 116,00                            | 74,50  | -50,00  | 50,00                             | 32,00 | -20,00 | 34             |
| <i>Dažnis 10 Hz</i> |        |        |                                   |        |         |                                   |       |        |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 41,00                             | 26,00  | -18,00  | 22,00                             | 15,00 | -9,00  | 35,0           |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 63,00                             | 40,30  | -27,00  | 34,00                             | 23,00 | -14,00 | 40,0           |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 86,00                             | 55,00  | -37,00  | 47,00                             | 31,00 | -19,00 | 46,0           |

2.15 lentelė. Dinaminių bandymų su **abiem** pneumatiniiais raumenimis rezultatai ( $\epsilon$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ))

| Eil. Nr.            | p, bar | F, N   | SPIDER 8-30 viršus, $\epsilon$ |        |        | SPIDER 8-30 apačia, $\epsilon$ |         |       | Ciklų skaičius |
|---------------------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|--------------------------------|---------|-------|----------------|
|                     |        |        | Ž                              | R      | M      | Ž                              | R       | M     |                |
| <i>Dažnis 2 Hz</i>  |        |        |                                |        |        |                                |         |       |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 120,00                         | 83,00  | -48,00 | -98,00                         | -60,00  | 40,00 | 10             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 165,00                         | 114,00 | -67,00 | -160,00                        | -100,00 | 61,00 | 10             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 218,00                         | 146,00 | -89,00 | -223,00                        | -147,00 | 88,00 | 10             |
| <i>Dažnis 4 Hz</i>  |        |        |                                |        |        |                                |         |       |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 97,00                          | 64,00  | -39,00 | -102,00                        | -66,00  | 39,00 | 13             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 152,00                         | 101,00 | -58,00 | -150,00                        | -100,00 | 56,00 | 17             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 195,00                         | 130,00 | -76,00 | -204,00                        | -136,00 | 76,00 | 18             |
| <i>Dažnis 6 Hz</i>  |        |        |                                |        |        |                                |         |       |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 79,00                          | 50,00  | -35,00 | -84,00                         | -60,00  | 32,00 | 25             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 128,00                         | 79,00  | -67,00 | -131,00                        | -94,00  | 53,00 | 25             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 148,00                         | 91,00  | -80,00 | -180,00                        | -129,00 | 65,00 | 25             |
| <i>Dažnis 8 Hz</i>  |        |        |                                |        |        |                                |         |       |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 70,00                          | 46,00  | -29,00 | -75,00                         | -49,00  | 27,00 | 32             |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 88,00                          | 58,00  | -34,00 | -112,00                        | -73,00  | 43,00 | 30             |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 139,00                         | 91,00  | -58,00 | -152,00                        | -100,00 | 54,00 | 33             |
| <i>Dažnis 10 Hz</i> |        |        |                                |        |        |                                |         |       |                |
| 1                   | 1,58   | 400,00 | 52,00                          | 34,00  | -20,00 | -65,00                         | -42,00  | 24,00 | 35,0           |
| 2                   | 2,38   | 600,00 | 80,00                          | 54,00  | -26,00 | -96,00                         | -62,00  | 39,00 | 40,0           |
| 3                   | 3,26   | 800,00 | 104,00                         | 71,00  | -34,00 | -132,00                        | -85,00  | 50,00 | 46,0           |

### 3. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ APSKAIČIAVIMAS IR ANALIZĖ

Dviem apkrovos būdais ir įvairiais dažniais veikiamos sąrankos eksperimentiniai tyrimai rėmų bandymų horizontalia jėga stende buvo atlikti pagal metodiką, kuri aprašyta 2.3.1 ir 2.3.2 poskyriuose. „Catman“ programa apdoroti duomenys buvo užrašomi į duomenų masyvus, kurie išsaugomi failo plėtiniu\*.exe. Buvo atlikta virš 100 statinių ir dinaminių bandymų, prie vykdomojo įtaiso prijungiant po vieną pneumatinį raumenį, prijungiant abu pneumatinius raumenis bet darbinio režimu dirbant tik vienam, po to – abiem. Eksperimentai atlikti su uždėta sąranka ir be sąrankos – veikė vien tik vykdomasis mechanizmas (buvo matuojamas poslinkis). Ir visa tai buvo daroma su skirtingais dažniais.

Eksperimento pagrindiniais parametrais pasirinktos svarbiausios deformacijos  $\varepsilon_1$  ir  $\varepsilon_2$ , apskaičiuotos pagal (2.6) formulę. Iš gautų duomenų masyvų perskaičiuotos svarbiausios deformacijos pateiktos 3.1 lentelėje.

**3.1 lentelė.** Svarbiausios deformacijos  $\varepsilon_{1/2}$

| Eil. Nr.        | Bandymai, jėgos pridėjimo dažnis                                   | Kairysis raumuo |       |            | Dešinysis raumuo |       |       |
|-----------------|--|-----------------|-------|------------|------------------|-------|-------|
|                 |  | 400 N           | 600 N | 800 N      | 400 N            | 600 N | 800 N |
| 1               | Statika, po vieną raumenį  | 170             | 245   | 349        | -173             | -289  | -371  |
| <b>DINAMIKA</b> |  |                 |       |            |                  |       |       |
| 2               | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 0,1 Hz                             | 212             | 279   | 365        | -183             | -273  | -357  |
|                 | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 0,5 Hz                             | 217             | 282   | 392        | -181             | -272  | -363  |
|                 | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 1 Hz                               | 248             | 361   | 495        | -225             | -369  | -491  |
|                 | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 1,5 Hz                             | 237             | 377   | <b>497</b> | -209             | -336  | -466  |
|                 | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 2 Hz                               | 181             | 279   | 414        | -184             | -281  | -368  |
|                 | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 4 Hz                               | 139             | 202   | 265        | -119             | -216  | -278  |
|                 | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 6 Hz                               | 83              | 130   | 169        | -89              | -139  | -198  |
|                 | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 8 Hz                               | 57              | 89    | 126        | -60              | -104  | -152  |
| 3               | Uždėtas ir veikia vienas raumuo 10 Hz                              | 44              | 68    | 93         | -53              | -95   | -138  |
|                 | Uždėti abu, veikia vienas raumuo 0,1 Hz                            | 116             | 175   | 239        | -122             | -188  | -267  |
|                 | Uždėti abu, veikia vienas raumuo 0,5 Hz                            | 119             | 182   | 241        | -124             | -195  | -260  |
|                 | Uždėti abu, veikia vienas raumuo 1 Hz                              | 215             | 327   | 447        | -238             | -353  | -474  |
|                 | Uždėti abu, veikia vienas raumuo 1,5 Hz                            | 151             | 221   | 296        | -141             | -225  | -286  |
| 4               | Uždėti abu, veikia vienas raumuo 2 Hz                              | 112             | 194   | 244        | -107             | -165  | -230  |
| 4               | Uždėti abu ir abu veikia 1 Hz                                      | 133             | 216   | 287        | -170             | -235  | -309  |
| <b>497</b>      | - didžiausia svarbiausia sąrankos deformacija savo skaitine verte. |                 |       |            |                  |       |       |

Paėmus pačias didžiausias iš visų, pagal savo skaitinę reikšmę, svarbiausias deformacijas ir pasinaudojus (2.5) formule paskaičiuoju svarbiausius normalinius įtempimus  $\sigma_1$  ir  $\sigma_2$ .

$$\sigma_{1/2} = \frac{2,1 \cdot 10^5}{2(1-0,3)} (4,59 \cdot 10^{-4} - 1,85 \cdot 10^{-4}) \pm \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{2}}{2(1+0,3)} \sqrt{(4,59 \cdot 10^{-4} - 2,97 \cdot 10^{-4})^2 + (-1,85 \cdot 10^{-4} - 2,97 \cdot 10^{-4})^2};$$

$$\sigma_1 = 99,2 \text{ MPa};$$

$$\sigma_2 = -17,0 \text{ MPa}.$$

Turėdami svarbiausius įtempius, pagal formulę 3.1 paskaičiuoju ekvivalentinius įtempius pagal von Misesą:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2}, [15];$$

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{99,2^2 + (-17,0)^2 - 99,2 \cdot (-17,0)} = 108,7 \text{ MPa}.$$

**Plieno C20** medžiagos savybės surašytos P.3 lentelėje (žr. Priedą 2).

Rezultatas parodo, kad medžiagos takumo riba yra nepasiekta ( $\sigma_{yt} = 245 \text{ MPa}$ ), todėl bandymas vyksta šakės medžiagai deformuojantis tamprumo ribose, čia galioja Huko dėsnis.

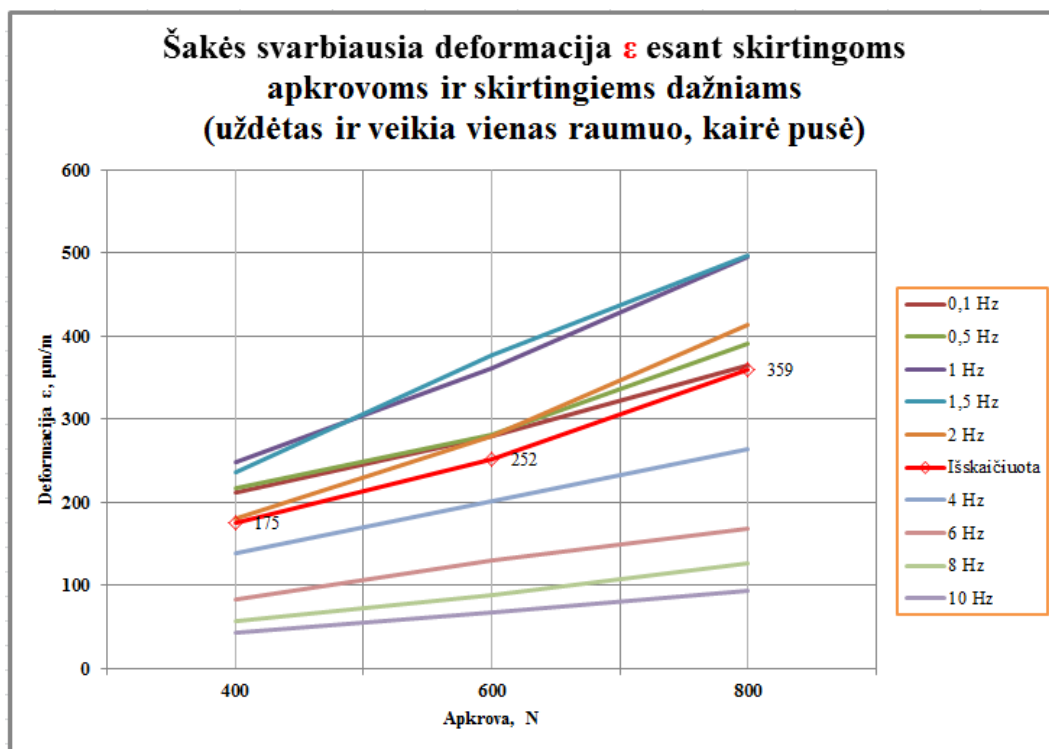
Kad pasiektume savo eksperimento tikslą (*eksperimentiškai ištirti optimaliausią santykį tarp dažnio ir jėgos dydžio, veikiančio priekinę dviračio šakę pneumatinių raumenų pagalba, dinaminio bandymo metu*), turime įvertinti skirtingų dinaminių apkrovų gautas svarbiausias deformacijas. Tai padarysime pasinaudodami **dinamiškumo koeficientu**.

Dinaminėmis laikomos tokios apkrovos, kai laike kinta jų dydis arba pridėjimo vieta. Vienas iš jų parametru – tai dinamiškumo koeficientas  $\mu = 1,03$  [12, 18]. Jis išreiškiamas dinaminių ir statinių deformacijų santykiu ( $\mu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{st}}$ ). Dinamiškumo koeficientas, tai koeficientas iš kurio reikia padauginti statinės deformacijos reikšmę, kad gautume dinaminę [12, 18].

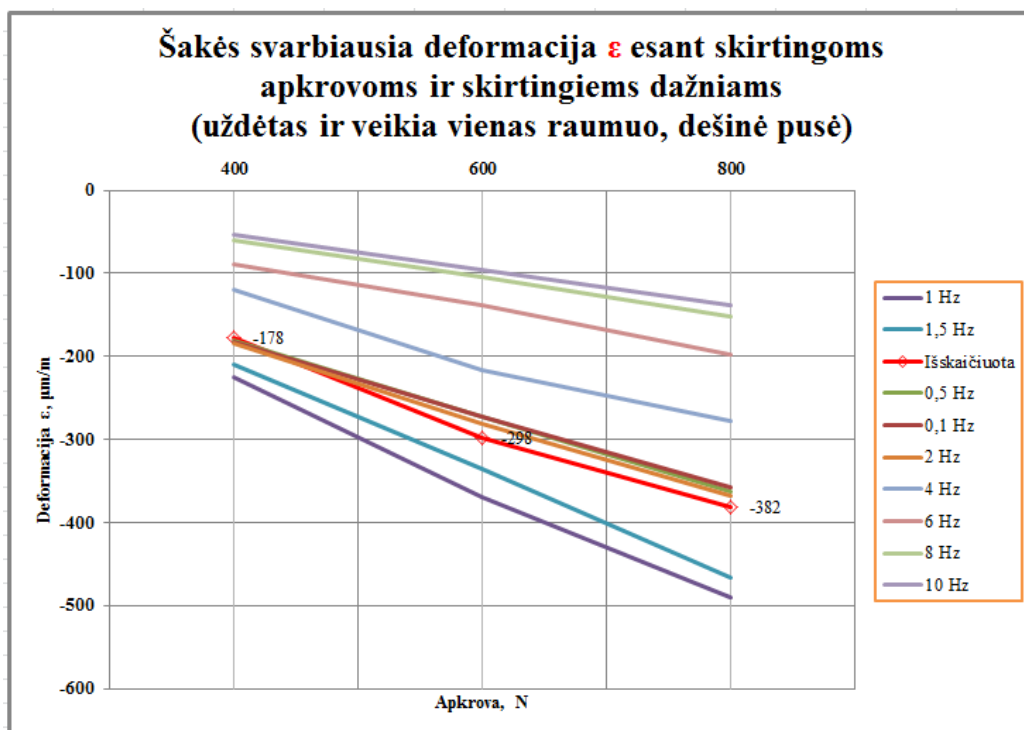
Naudojamos statinio eksperimento gautas svarbiausias deformacijas  $\varepsilon_1$  ir  $\varepsilon_2$ , jos padauginamos iš dinamiškumo koeficiento  $\mu$  ir gautą kreivę laikome atskaitos linija kreivėms, kurios gautos dinaminių bandymų metu.

Kaip rekomenduojama minėtose literatūros šaltiniuose, visos kreivės, kurios atitinką sąlygą  $1,03 < \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{st}}$  yra tinkamos tolimesnei analizei, o kreivės kurioms  $1,03 \geq \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{st}}$ , atmetamos.

3.1 ir 3.2 pav. pateikti dinaminių bandymų rezultatai (svarbiausia deformacija), kai naudojamas vienas pneumatinis raumuo, o kitas - nuimtas. Matome, kad naudojamą dinamiškumo sąlygą atitiko bandymai kurie buvo daryti su apkrovos dažniu 0,1; 0,5 1; 1,5; 2 Hz, kai veikė kairysis raumuo ir 1; 1,5 Hz, kai veikė dešinysis raumuo.

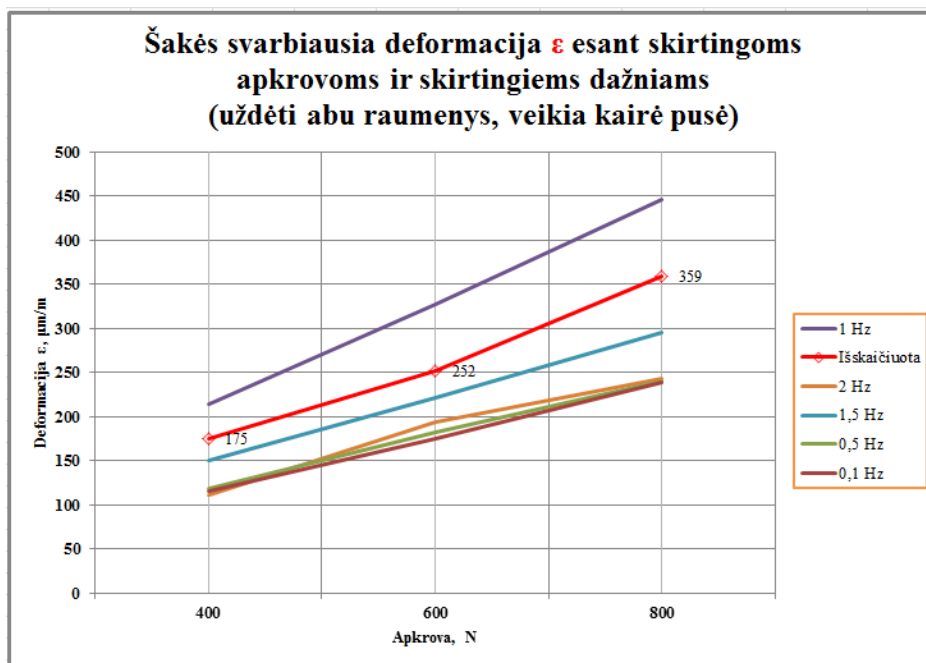


3.1 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas

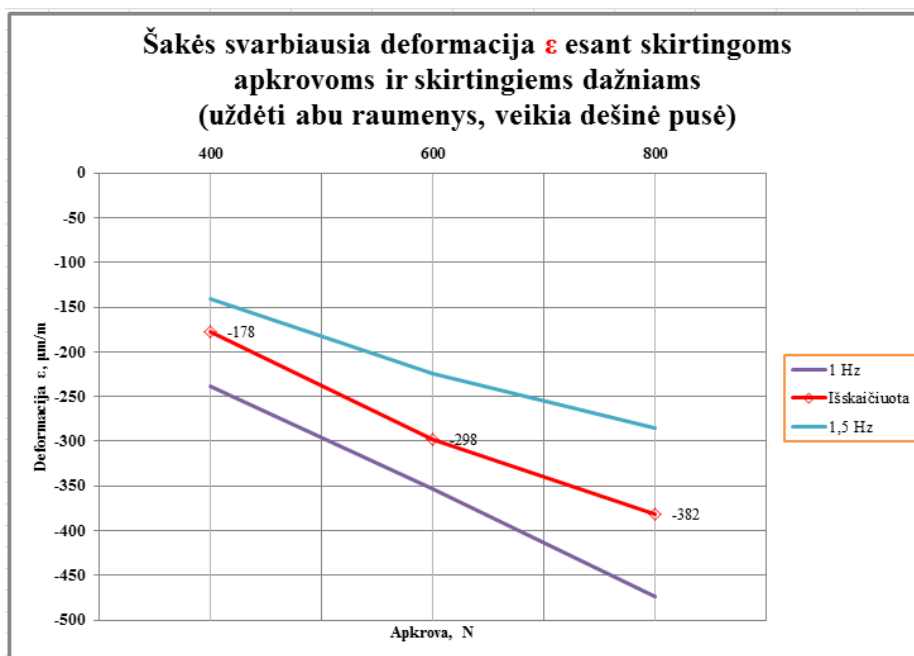


3.2 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas

Tyrimas tęsiamas bandymams naudojant abu raumenis, bet veikia tik vienas. Rezultatai pateikti 3.3 ir 3.4 pav. Matyti, kad dinamiškumo sąlygą atitiko bandymai, daryti esant apkrovos dažniui 1 Hz.

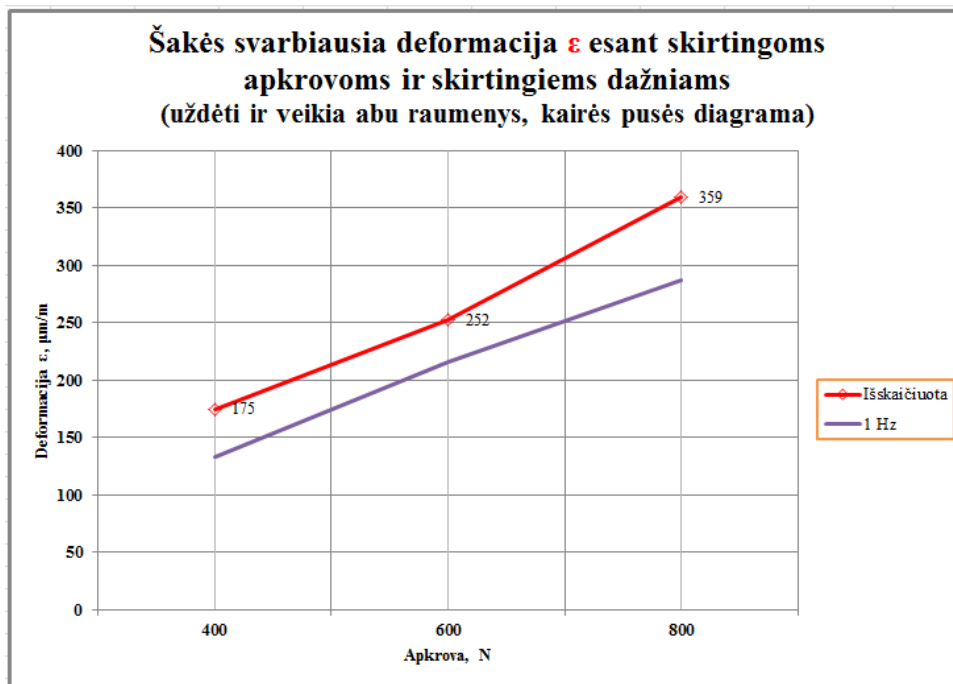


3.3 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas

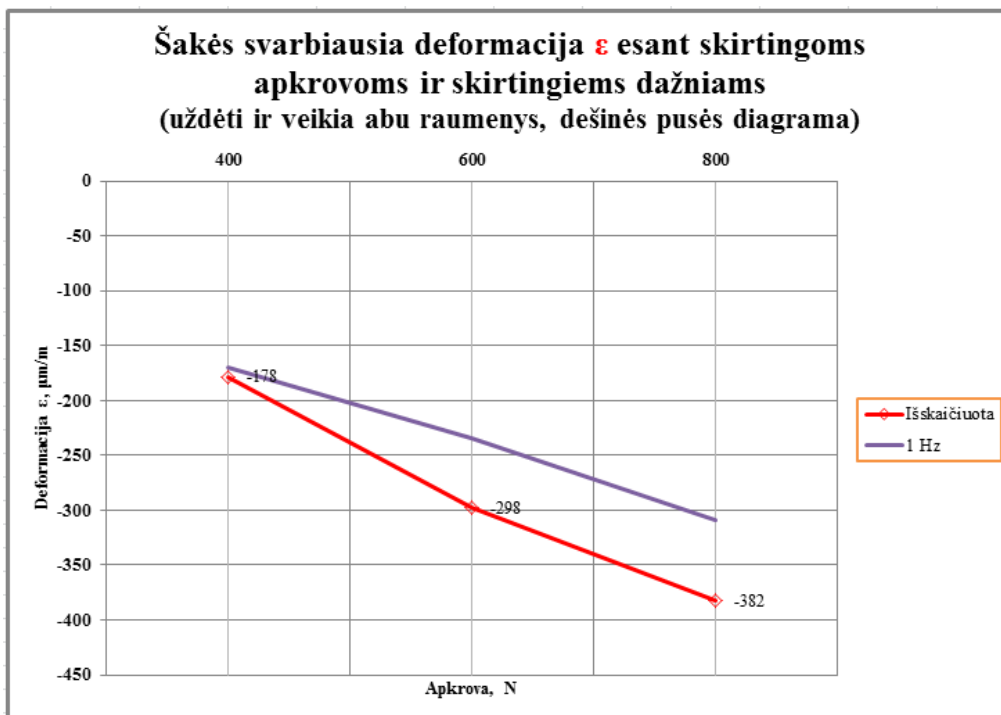


3.4 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas

3.5 ir 3.6 pav. pateiktos apskaičiuotos svarbiausių deformacijų kreivės, kai uždėti abu raumenys ir abu jie naudojami cikliškam sąrankos poveikiui. Matyti, kad šiuo atveju abu bandymai neišpildo numatytų sąlygų ir turi būti atmesti.



3.5 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas



3.6 pav. Svarbiausių deformacijų kreivių palyginimas

Gauti bandymų rezultatai parodo, kad vykdomasis stendo pneumatinių raumenų įtaisas, negali pilnai išpildyti standarto LST EN 14766 reikalavimus, t.y., dinaminio bandymo metu pagal užduotą maksimalų oro slėgį pneumatiniai raumenys neišvysto standarte numatytos jėgos. Stendą būtina modifikuoti.

Vykdomąjį įtaisą rekomenduoju pakeisti dvikrypčiu pneumatiniu cilindru [9]. Dvikrypčių cilindrų privalumas yra tas, kad jie gali suteikti jėgą bandomam gaminiui abiem kryptim. Įrengimo požiūriu jie yra universalesni. Be to, naudojant pneumatinį cilindą su greito išmetimo vožtuvu, būtų galima padidinti stūmoklio greitį ir tuo pačiu bandymo dažnį.

Kad užtikrinti standarte reglamentuojamos jėgos dydį, tarp cilindro koto ir bandinio laikiklio rekomenduoju įtvirtinti induktyvinį jėgos jutiklį [12]. Šie jutikliai dažniausiai naudojami esant nedideliems dažniams iki ~8 Hz ir dinaminėms apkrovoms kurios siekia  $5 \cdot 10^4 \dots 100$  kN jėgą. Tada bandymo metu būtų galima matyti faktinį jėgos dydį ir jį reguliuoti.

Pateiktos rekomendacijos leistų patobulinti sąrankos apkrovos schemą ir rasti optimaliausią santykį tarp apkrovos dažnio ir tinkamo apkrovos dydžio.



## IŠVADOS IR PASIŪLYMAI:

1. Darbe nustatyta dviračio rėmo ir šakės sąranką veikiančios ciklinės jėgos dydžio priklausomybė nuo dažnio;
2. Nustatytos sąrankos eksperimentinės deformacijų kreivės esant skirtingiems dažniams ir apskaičiuotos svarbiausios deformacijos;
3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad esanti pneumatinių raumenų sąranka negali tinkamai atlikti bandymo pagal standarto LST EN 14766 numatytus reikalavimus. Nustatytos artimiausios deformacijos yra 5-24 % mažesnės už apskaičiuotas;
4. Rekomenduojama stendo vykdomąjį įtaisą patobulinti atliekant tokius pakeitimus:
  - vykdomąjį įtaisą pakeisti dvikrypčio veikimo pneumatiniu cilindru;
  - tiesiai ant cilindro sumontuoti greito išmetimo vožtuvus;
  - tarp cilindro koto ir bandinio laikiklio įtvirtinti induktyvinį jėgos jutiklį.

Tokia veikimo schema padėtų rasti optimaliausią santykį tarp apkrovos dažnio ir tinkamo apkrovos dydžio.

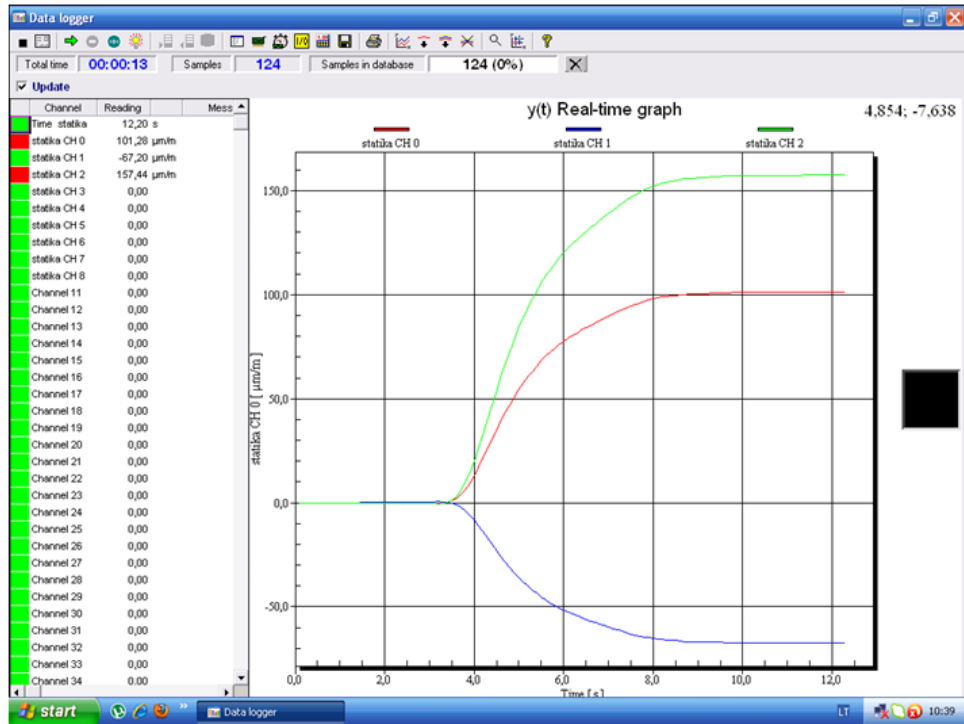
## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. WILSON, D., G. *Bicycling science. Third edition.* 2004. 466 p.
2. HADLAND T., LESSING H., E. *Bicycle design: an illustrated history.* The MIT Press, 2014. 584p.
3. LST EN 14764:2006/P:2006. *Miesto ir turistiniai dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai.* Vilnius, 2006. 98p.
4. LST EN 14765:2006+A1:2008. *Vaikiški dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai.* Vilnius, 2006. 52p.
5. LST EN 14766:2006. *Kalnų dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai.* Vilnius, 2006. 96p.
6. LST EN 14781:2006. *Lenktyniniai dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai.* Vilnius, 2006. 90p.
7. UAB Baltik vairo internetinis puslapis [interaktyvus]. [Šiauliai]: PC [žiūrėta 2015 m. vasario 07 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.baltikvairas.lt/about-us/about-baltik-vairas/>>.
8. ČIKOTIENĖ, Dalia; ZWICK, Dirk; RAMONAS, Zenonas. *Kokybės užtikrinimas dviračių gamybos įmonėje.* Jaunųjų mokslininkų darbai. 2010, Nr.2(27). 39p.
9. CROSER, P.; *Pneumatika.* Bazinis lygis. Kaunas, 1992. 225p.
10. UAB FESTO internetinis puslapis [interaktyvus]. [Šiauliai]: PC [žiūrėta 2015 m. vasario 13 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.festo.com/cms/lt\\_lt/index.htm](http://www.festo.com/cms/lt_lt/index.htm)>
11. VEKTERIS Vladas, KASPERAVIČIUS Albinas, KAUŠINIS Saulius, KANAPĖNAS Rimantas. *Matavimų teorija ir praktika.* Vilnius, 2000. 380 p. ISBN 9986-524-26-1.
12. BRAŽĖNAS, Algis. *Eksperimentinės mechanikos pagrindai.* Šiauliai, 2006. 166 p. ISBN 9986-663-2.
13. RŪKAS, Alvydas. *Dviračio šakės stiprumo ir standumo tyrimas: magistro baigiamasis darbas.* ŠU. Šiauliai, 2011. 33p.
14. ŠUKEVIČIUS, Šarūnas. *Kompiuterizuotas projektavimas ir modeliavimas.* Praktinių darbų metodikos nurodymai. Vilnius, 2012. 71p. eISBN 978-609-457-304-0.
15. HMB. *Catman Versija 5.0 instrukcija.* [CD-ROM]. Ismaning, 2001.
16. HMB. *Spider 8 Versija 2.27 instrukcija.* [CD-ROM]. Ismaning, 2001.
17. THIEL R. *Elektrisches Messen nichtelektrischen Größen.* Stuttgart, 1998. 195 S.
18. Филин А. П. *Прикладная механика твердого тела.* Том 3. Москва, 1981. 480с.

## **PRIEDAI**

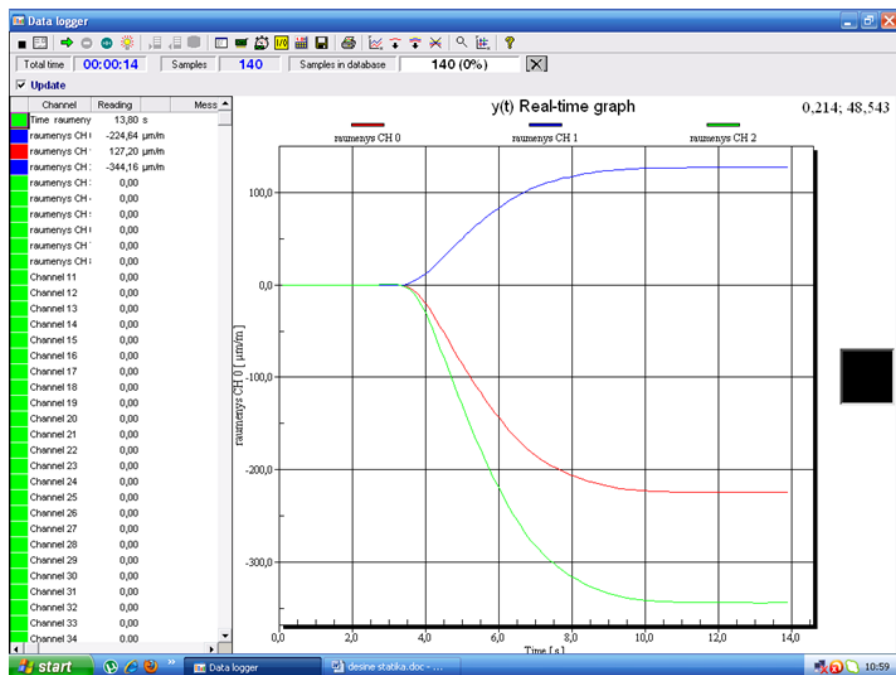
# 1 PRIEDAS

## Deformacijų kreivės Sąrankos bandymas statiškai



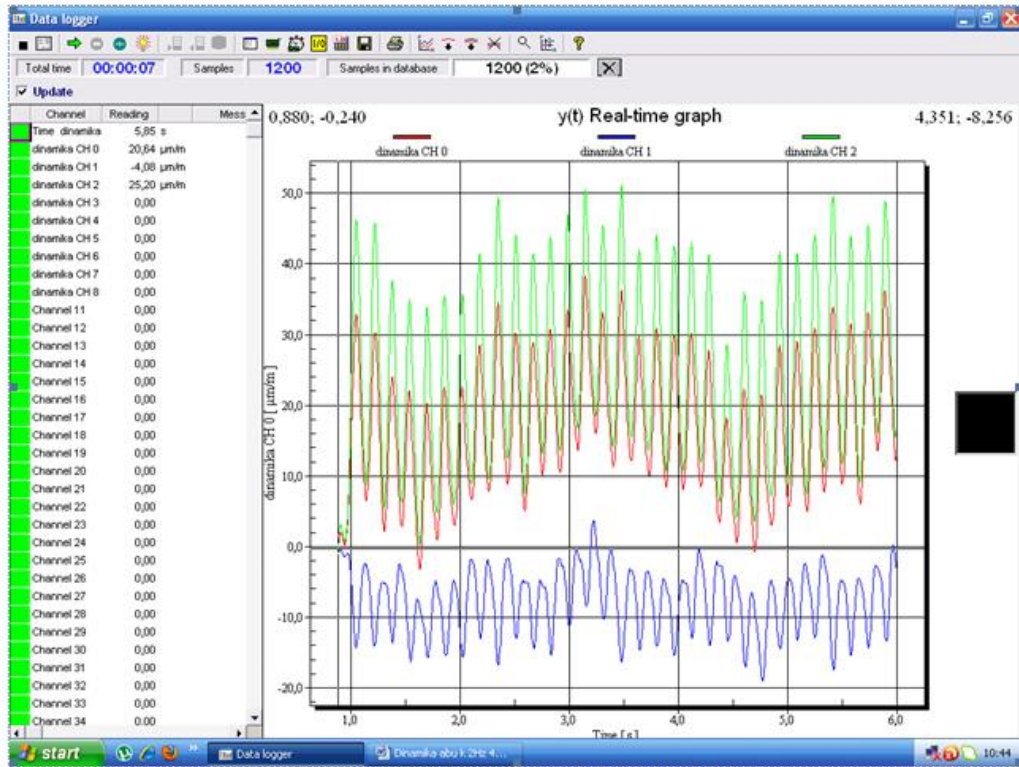
Kaire statika 400N

P.1.1 pav. Veikia kairysis pneumatinis raumuo, apkrova 400 N



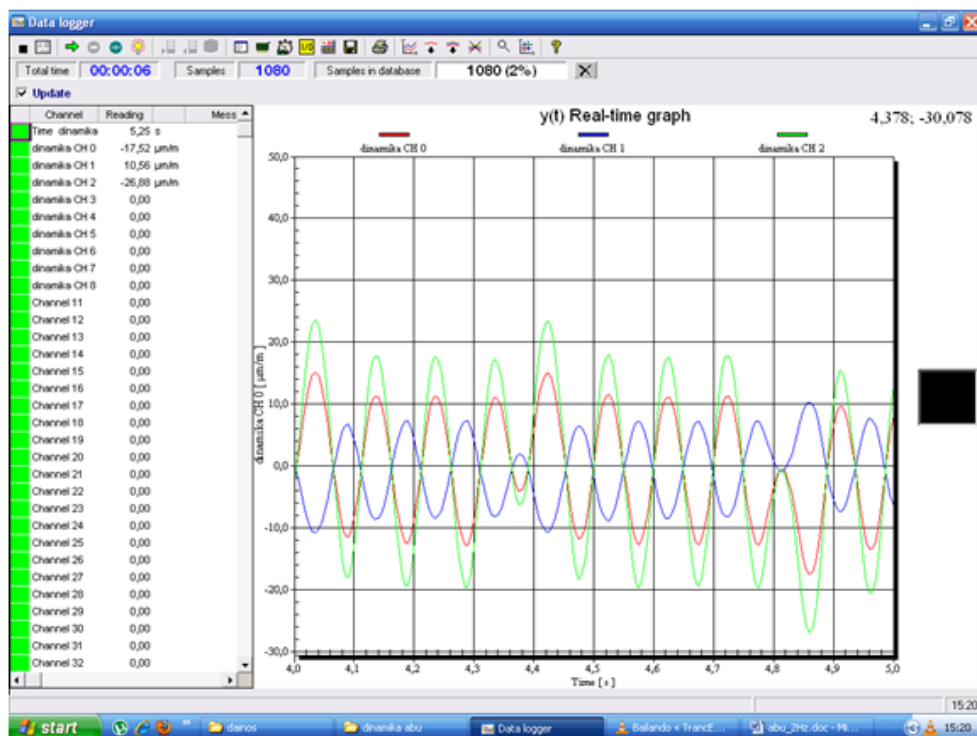
Desine statika 800N

P.1.2 pav. Veikia dešinysis pneumatinis raumuo, apkrova 800 N



Dinamika abu k 6Hz 400N

P.1.3 pav. Uždėti abu pneumatiniai raumenys veikia kairysis, dažnis 6 Hz, apkrova 400 N



Abu 10Hz 600N

P.1.4 pav. Uždėti abu ir veikia abu pneumatiniai raumenys, dažnis 10 Hz, apkrova 600 N

## 2 PRIEDAS

**P.2 lentelė. Plieno C20 savybės**

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Tamprumo modulis, E         | 210 GPa                |
| Puasono koeficientas, $\nu$ | 0,3                    |
| Šlities modulis, G          | 77 GPa                 |
| Tankis, $\rho$              | 7900 kg/m <sup>3</sup> |
| Stiprio riba, $\sigma_u$    | 410 MPa                |
| Takumo riba, $\sigma_{yt}$  | 245 MPa                |