

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

Alvydas Rūkas

DVIRAČIO ŠAKĖS STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS

Magistro baigiamasis darbas

Šiauliai, 2011

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

DVIRAČIO ŠAKĖS STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS

Magistro baigiamasis darbas

Autorius – Alvydas Rūkas (MM-9 gr.)

Vadovas – prof. habil. dr. A. Bražėnas

Recenzentas – doc. dr. R. Šniuolis

Katedros vedėjas – doc. dr. A. Sabaliauskas

Šiauliai, 2011

TURINYS

SANTRAUKA	4
SUMMARY	5
LENTELIŲ SĄRAŠAS	6
PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS	7
ĮVADAS	8
1. DVIRAČIAMS KELIAMI SAUGOS REIKALAVIMAI IR BANDYMO METODAI	10
1.1 Priekinė šakė. Statinis lenkimo bandymas	10
1.2 Priekinės šakės – lenkimo nuovargio bandymas	11
1.3 Priekinė šakė. Atbulinio smūgio bandymas	12
2. MECHANINIŲ DYDŽIŲ MATAVIMO METODAI IR PRIEMONĖS	14
2.1. Matavimo metodų apžvalga	14
2.2 Matavimo sistemos sandara	15
2.3. Matuojamojo dydžio keitimo procesas	17
3. DVIRAČIO ŠAKĖS STIPRUMO TYRIMAI	20
3.1 Deformuojamųjų metalų įtempimų ir deformacijų būvis	20
3.2. Dviračio šakės eksperimentiniai tyrimai	23
3.2.1. <i>Dviračio šakės bandymai baigtinių elementų metodu</i>	23
3.2.2. <i>„Spider 8“ informacinė matavimo sistema</i>	28
3.2.3 <i>Tenzodaviklių žymėjimas</i>	32
3.2.4 <i>Dviračio šakės eksperimentinio tyrimo metodika</i>	33
4. DVIRAČIO ŠAKĖS STIPRUMO EKSPERIMENTINIŲ REZULTATŲ ANALIZĖ	36
4.1. Įtempimų ir deformacijų skaičiavimai	36
4.2. Eksperimentinių rezultatų įvertinimas	39
IŠVADOS	42
LITERATŪRA	43
PRIEDAI	44
Tenzodaviklio 1-RY91-3/120 specifikacija	45

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

Alvydas Rūkas. DVIRAČIO ŠAKĖS STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS. Magistranto baigiamasis darbas /vadovas prof. habil. dr. A. Bražėnas.

SANTRAUKA

Dviračių šakių stiprumo ir standumo bandymai atliekami vadovaujantis reikalavimais, aprašytais standarte LST EN 14764. Norėdami nustatyti dviračio šakėje bandymo metu atsirandančius įtempimus ir deformacijas galime naudoti matavimo sistemą „Spider 8“ valdomą programine įranga „Catman“. Taip pat įtempimus ir deformacijas galima nustatyti naudojant virtualaus modeliavimo programas, tokias kaip SolidWorks. Darbe išnagrinėti matavimo sistemos „Spider 8“ veikimo principai. Gauti bandymų rezultatai pateikti lentelėse, grafikuose ir paveikslėliuose. Dviračio šakės bandymo rezultatai gauti naudojant folinius tenzodaviklius. Aprašytas daviklių klijavimas ant bandomos šakės, bei jų žymėjimas. Darbe išnagrinėta mechaninių dydžių matavimo metodai. Palyginti SolidWorks ir Catman programomis gauti bandymo rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: stiprumas, standumas, įtempimai, deformacija, tenzodaviklis.

ŠIAULIAI UNIVERSITY
FACULTY OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Alvydas Rūkas. ANALYSIS OF BICYCLE FORK'S STRENGTH AND SOLIDITY. Master final work / research advisor Assoc. prof. habil. dr. A. Bražėnas.

SUMMARY

Bicycle fork's strength and solidity tests are carried out under the conditions described in the standard LST EN 14764. To identify stresses and strains values in the bicycle fork's test we can use a measuring system „Spider 8" controlled by software Catman. Also, the stresses and strains can be determined by using virtual simulation software such as SolidWorks. Operating principles of measurement system „Spider 8 " is described in this project. Test results are presented in tables, graphs and pictures. Bicycle fork test results obtained by using strain gages. In this project is described how to bond strain gages and it's marking. In this project described measurement values of mechanical methods. Compared test results received by using SolidWorks and Catman programs.

Keywords: strength, solidity, stress, strain, strain gage.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. Medžiagos savybės (Material Properties).....	24
3.2 lentelė. Modelio apkrovos ir įtvirtinimai (Loads and restraints)	24
3.3 lentelė. Tinklelio informacija (Mesh Information).....	24
3.4 lentelė. Reakcijos jėgos (Reaction Forces).....	25
3.5 lentelė. Rezultatai (Study Results)	25
4.1 lentelė. Plieno C20 cheminė sudėtis	36
4.2 lentelė. Plieno C20 mechaninės charakteristikos	36
4.3 lentelė. Deformacijos ir įtempimai (Catman programos parodymai).....	36
4.3 lentelė. Paklaidų skaičiavimo rezultatai	39
4.4 lentelė. Deformacijų rezultatai	40
4.5 lentelė. Ekvivalentiniai įtempimai.....	41

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Priekinė šakė. Statinis lenkimo bandymas.....	11
1.2 pav. Priekinės šakės – lenkimo nuovargio bandymas	12
1.3 pav. Priekinė šakė. Atbulinio smūgio bandymas.....	13
2.1 pav. Tenzorezistoriniai davikliai	15
2.2 pav. Funkcinė matavimo sistemos schema.....	16
2.3 pav. Skaitmeninis - analoginis keitimas	18
2.4 pav. Skaitmeninio analoginio keitiklio principinė schema.....	19
3.1 pav. Nagrinėjamos šakės modelio vaizdas	23
3.2 pav. Ekvivalentiniai įtempimai (Stress).....	26
3.3 pav. Poslinkiai (Displacement).....	26
3.4 pav. Deformacijos (Strain)	27
3.5 pav. Atsargos koeficientas (Factor of Safety)	27
3.6 pav. Informacinės matavimo sistemos funkcinė schema.....	29
3.7 pav. Spider 8 vaizdas iš galo	29
3.8 pav. Tenzodaviklio jungimo pilnuoju tilteliu schema	30
3.9 pav. Tenzodaviklio jungimo pusės tiltelio schema.....	31
3.10 pav. Tenzodaviklio jungimo ketvirčio tiltelio schema	32
3.11 pav. Daviklio bendras vaizdas	33
3.12 pav. Jutiklis priklijuotas ant šakės plunksnos.....	34
3.13 pav. Technologinių bandymų centre bandymų metu lūžusi šakė.....	35
3.14 pav. Šakė įtvirtinta bandymo stende.....	35
4.1 pav. Deformacijų diagrama (iš Catman programos)	38
4.2 pav. Svarbiausių įtempimų diagrama (iš Catman programos)	38

IVADAS

Dviratis – tai dviratė bemotorė ekologiška transporto priemonė, naudojama daugelyje pasaulio šalių. Tačiau šis apibrėžimas netinka dviračiams su trim ar keturiais ratais, bei elektriniams dviračiams. Ši transporto priemonė naudojama laisvalaikio praleidimui, pramogai, susisiekimui, turizmui, sportavimui, varžyboms ir t.t. Pagrindinė dviračio struktūra: du ratai (rečiau 3 ar 4), rėmas, balnelis, vairas ir perdavimo mechanizmas, verčiantis sukčius ratus važiuojančio (važiuojančių) asmens raumenų jėga

Dviračių įvairovė didelė. Jie būna skirti įvairiom trasom, skirtingiems važiavimo stiliams. Vienaip važiuojama miesto gatvėmis, kitaip miško takeliais, dar kitaip – lenktyniaujant. Universalus dviračio, tinkamo visiems važiavimo stiliams, nėra. Skirtumai tarp skirtingų stilių dviračių taip pat nėra labai ryškūs. Tačiau pačių įvairiausių dviračių tipams keliami specifiniai saugumo ir patikimumo reikalavimai, kurie aprašyti standartuose [1-3]. Labai didelis dėmesys skiriamas apkrovoms, kuriomis dviratis veikiamas eksploatacijos metu. Standartai reglamentuoja statines bei dinamines šių apkrovų reikšmes, jų poveikio ribas visai dviračio konstrukcijai ar atskiriems jo elementams.

Dviračio konstrukcijos patikimumas ir kitos eksploatacinės savybės gali būti įvertinamos tik atliekant bandymus. Tačiau atsakyti į daugelį klausimų galima ir taikant įvairias analitinių tyrimų metodikas. Dviračių stiprumo, ilgaamžiškumo savybės gali būti įvertinamos analitiškai. Labai svarbi yra bet kokio gaminio projektavimo stadija, kurioje be skaičiavimų neapsieinama. Projektavimo stadijoje lengviausia daryti būtinus pakeitimus ir konstrukcijos bei atskirų jos elementų patobulinimus.

Šiaulių universiteto Technologinių bandymų centre, kuriame dirba technologijos fakulteto dėstytojai ir darbuotojai, vykdomi technologiniai dviračių bandymai, detalių bei mazgų linijiniai ir kampiniai matavimai, medžiagų mechaniniai bandymai, cheminės sudėties nustatymas.

Didžioji dalis bandymų yra atliekama UAB „Baltik Vairas“ įmonės pagamintiems dviračiams. Šioje įmonėje yra surenkami įvairios paskirties (vaikiški, suaugusių, miesto, kelioniniai, kalnų) dviračių modeliai su plieniniais ir aliuminiais rėmais, kurių didelė dalis realizuojama Vakarų ir Rytų Europos rinkose (apie 95 % produkcijos eksportuojama, apie 70 % parduodama Vokietijoje). Ne visada bandomi dviračiai atitinka standartų keliamiems reikalavimams. Tuomet padaromos atitinkamos išvados ir siūlomos rekomendacijos gamintojams.

Tyrimo objektas. Dviračių šakių kokybės analizė.

Tyrimo tikslas. Išanalizuoti ir eksperimentiškai patikrinti dviračių šakių stiprumo ir standumo tyrimo metodą, naudojant SolidWorks programą, folinius tenzodaviklius ir informacinę matavimo sistemą, valdomą Catman programine įranga.

Tyrimo uždaviniai:

- Atlikti galiojančių standartų ir dviračių šakių stiprumo ir standumo matavimo metodų analizę.
- Išnagrinėti informacinę matavimo sistemą Spider 8 ir jos taikymą dviračių šakių stiprumo tyrimams.
- Išanalizuoti metalų įtempimų ir deformacijų būvį.
- Atlikti dviračio šakės stiprumo ir standumo eksperimentinius tyrimus.
- Atlikti gautų eksperimentinių rezultatų analizę.

Teorinė darbo reikšmė. Išnagrinėtas deformacijų nustatymo metodas SolidWorks programa ir informacinė matavimo sistema Spider 8, kuri atlieka tokias pagrindines funkcijas - gauna, apdoroja ir pateikia vartotojui tiriamojo objekto informaciją, kuri svarbi dviračių šakių stiprumo tyrimams. Ši metodika gali būti taikoma bet kokios konstrukcijos dviračių šakių ir kitų ir kitų jo elementų stiprumo tyrimams.

Praktinė darbo reikšmė. Iš gautų bandymų rezultatų galima spręsti apie šakės tinkamumą gamybai ir ar reikalingi konstrukciniai šakės pakeitimai.

Darbo struktūra. Magistro darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis: 43 puslapiai, 23 paveikslėliai ir 11 lentelių.

Pridedamas vienas priedas.

1. DVIRAČIAMS KELIAMI SAUGOS REIKALAVIMAI IR BANDYMO METODAI

Dviratis, kaip ir kiekvienas gaminys, turi atitikti tam tikrus saugos reikalavimus. Šie reikalavimai aprašyti standartuose, kuriuose taip pat pateikiami saugos reikalavimų įvertinimo metodai. Tarptautinius, Europos ir nacionalinius standartus leidžia atitinkamos standartų organizacijos (pvz., ISO, DIN, LST, EN kt.). UAB „BaltikVairas“ iki 2006 metų vadovavosi Vokiečių standartu DIN 79100 [4]. Nuo 2006 metų šis standartas nustojo galioti. Dabar vadovaujamosi standartu EN 14764 „Miesto ir treko dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai“ [1]. Šį Europos standartą (EN 14764: 2005) parengė Techninis komitetas ESK/TC 333 „Dviračiai“, 2006 m. jam suteiktas nacionalinio standarto statusas. Visi nacionaliniai standartai, reglamentuojantys dviračių saugą tais pačiais metais buvo anuliuoti. Standartas EN 14764 buvo sudarytas, atsižvelgiant į ilgametę patirtį, įvertinant visus būtinus šio gaminio saugos reikalavimus. Bandymai buvo parengti taip, kad būtų galima užtikrinti atskirų dalių ir viso dviračio stiprumą ir ilgaamžiškumą, siekiant aukštos kokybės ir saugumo reikalavimų laikymosi tiek gaminio projektavimo stadijoje, tiek ir gaminio eksploatacijos metu. Pagal ESK/EESK vidaus nuostatas, šio Europos standarto privalo laikytis šių šalių nacionalinių standartų organizacijos: Austrijos, Belgijos, Kipro, Čekijos Respublikos, Danijos, Estijos, Suomijos, Prancūzijos, Vokietijos, Graikijos, Vengrijos, Islandijos, Italijos, Latvijos, Lietuvos, Liuksemburgo, Maltos, Nyderlandų, Norvegijos, Lenkijos, Portugalijos, Slovakijos, Slovėnijos, Ispanijos, Švedijos, Šveicarijos ir Jungtinės Karalystės.

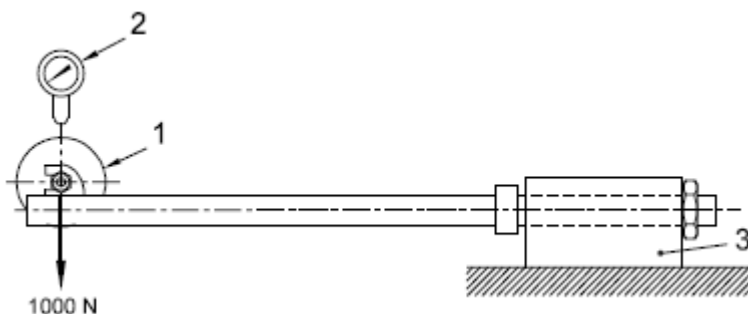
Standartai reikalauja iš gamintojo atlikti ne tik viso gaminio, bet ir atskirų jo elementų (rėmo, vairo, šakės ir pan.) bandymus. Bandymų rezultatai laikomi teigiamais, jeigu po atliktų bandymų nenustatomi lūžiai, įtrūkimai ar leistinus dydžius viršijantys konstrukcijos formos pakitimai.

1.1 Priekinė šakė. Statinis lenkimo bandymas.

Atliekant dviračio šakės statinį lenkimo bandymą, kuris numatytas standartuose [1-3], įvertinamas struktūrinis šios transporto priemonės vientisumas. Tai reiškia, kad atlikus bandymą aprašytu metodu, ant jokios šakės dalies neturi būti jokių matomų įtrūkimų ar lūžių, o nuolatinė liekamoji deformacija, vertinama, kaip rato veleno arba jo pakaitalo ašies nukrypimas šakės koto

ašies atžvilgiu, neviršija 5 mm nelanksčioms šakėms, ir 10 mm liekamoji deformacija pakabos šakėms.

Šakė įtvirtinama į priekinį vamzdį atstojančią įrenginį su gamintojo numatytais duotai šakei įprastais guoliais. Ant apkrovos įtaiso uždedamas matavimo prietaisas, kuriuo bus nustatytas šakės nuokrypis ir nuolatinė liekamoji deformacija, statmenai šakės ašiai, rato plokštumoje. Bandymo atlikimo schema pateikta 1.1 paveikslėlyje.



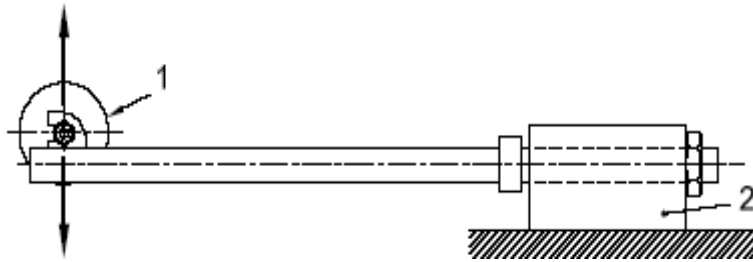
- 1 - Volelis
- 2 - Nuokrypio matavimo prietaisas
- 3 - Tvirtas pagrindas su pagrindiniais guoliais

1.1 pav. Priekinė šakė. Statinis lenkimo bandymas

Šakė apkraunama 100 N jėga į volelį, statmenai stiebo šakės ašiai, priešinga judėjimui kryptimi, rato plokštumoje. Nustatomas nuokrypio matavimo prietaisas ant nulinės padalos. Padidinama statinė jėga iki 1 000 N ir išlaikoma jėga 1 minutę, tada sumažinama jėga iki 100 N ir užrašoma gauta nuolatinė liekamoji deformacija[1].

1. 2 Priekinės šakės – lenkimo nuovargio bandymas

Šakė įtvirtinama į priekinį vamzdį atstojančią įrenginį su gamintojo numatytais duotai šakei įprastais guoliais, kaip parodyta 2.1 pav. Naudojama pilnai atbulinės, dinamiškos jėgos ciklai +/-450 N rato plokštumoje, statmenai stiebo vamzdeliui. Bandymo ciklų skaičius 100 000, dažnumas neturi viršyti 25 Hz.

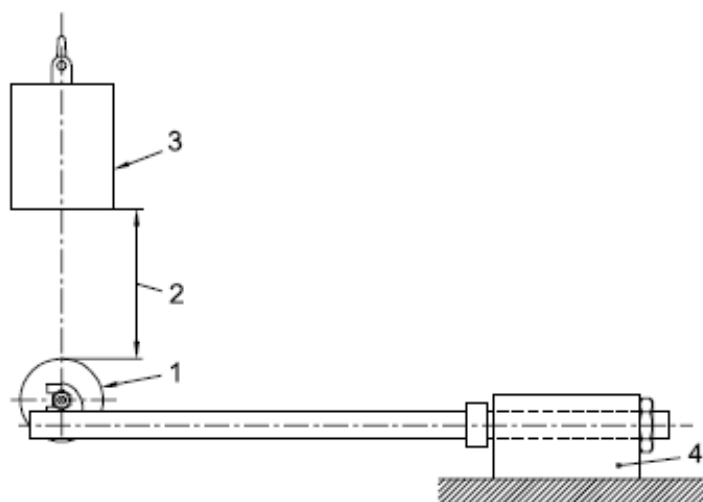


1. Ant ašies pritvirtintos jėgos panaudojimo įtaisas
 2. Nejudantis sumontavimas, apimantis pagrindinius guolius
- 1.2 pav.** Priekinės šakės – lenkimo nuovargio bandymas

Atlikus bandymą, ant jokios šakės dalies negali būti matomų įtrūkimų ar lūžimų. Anglies pluošto šakių atveju, aukščiausi nukrypimai bandymo metu bet kokia kryptimi nuo vidutinės padėties nepadidės daugiau, nei 20% nuo pradinių reikšmių[1].

1.3 Priekinė šakė. Atbulinio smūgio bandymas

Šakė įtvirtinama į priekinį vamzdį atstojantį įrenginį su įprastais guoliais, kaip parodyta 1.3 pav. Įstatomas į šakę mažesnio nei 1 kg svorio volelis. Ant volelio uždedamas 22,5 kg daužiklis taip, kad jo tempiamoji jėga veiktų prieš judėjimo kryptį ir rato plokštumoje. Pridedamas nuokrypio matavimo prietaisas po voleliu, užrašoma volelio pozicija šakės kotui statmena kryptimi, rato plokštumoje, ir pasižymima vertikali šakės pozicija. Nuimamas matavimo prietaisas, pakeliamas daužiklis į 640 mm aukštį, jeigu bandomoji šakė turi anglies pluošto detalių arba į 180 mm aukštį, jeigu šakė pagaminta vien tik iš metalo, ir leidžiama jam kristi ant volelio. išmatuojama nuolatinė liekamoji deformacija po voleliu.



1. Mažo svorio volelis
2. Metimo aukštis 180 mm
3. 22,5 kg svorio daužiklis
4. Tvirtas pagrindas su pagrindiniais guoliais

1.3 pav. Priekinė šakė. Atbulinio smūgio bandymas

Atlikus bandymą aprašytu metodu, ant jokios šakės dalies neturi būti matomų įtrūkimų ar lūžių, o nuolatinė liekamoji deformacija, vertinama, kaip rato veleno arba jo pakaitalo ašies nukrypimas šakės koto ašies atžvilgiu, neviršija 45 mm. Jeigu šakė naudojama rėmo smūgio bandyme (krintanti masė), šio bandymo atlikti nereikia[1].

2. MECHANINIŲ DYDŽIŲ MATAVIMO METODAI IR PRIEMONĖS

2.1. Matavimo metodų apžvalga

Technikoje mechaninėms jėgoms, momentams, įtempimas ir deformacijoms matuoti plačiausiai taikomi vizualieji, mechaniniai, elektromechaniniai, optiniai, ultragarsiniai ir fototamprumo metodai [5,6].

Ultragarsiniai, arba akustiniai, matavimo metodai pagrįsti ultragarso bangų atspindžiu nuo dviejų aplinkų skiriamosios ribos. Šie metodai dažniausiai naudojami detalių matmenims išmatuoti ir gauti trimatį erdvinį vaizdą.

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. Ekране gaunamas interferencinis vaizdas, kuriame maksimumų ir minimumų išsidėstymas priklauso nuo modelio įtempimų būsenos. Analizuojant gautąjį vaizdą, galima nustatyti veikiančius įtempimus.

Mechaniniai matavimo metodai pagrįsti metalinių plokštelių arba elementų deformavimusi. Jie dažniausiai taikomi statinėms mechaninėms deformacijoms matuoti.

Optiniai matavimo metodai pagrįsti šviesos spinduliuotės intensyvumo pokyčio, susijusio su matuojamojo objekto poslinkiu, matavimu. Šį pokytį registruoja fotoelektriniai keitikliai. Optiniai keitikliai taikomi labai tiksliais (iki $\pm 0,5\mu m$) objektų poslinkiams matuoti.

Elektromechaniniai matavimo metodai gali būti pagrįsti tenzometrijos principu (puslaidininkio arba metalinio rezistoriaus varža kinta, priklausomai nuo jo deformacijos), taip pat naudojami induktyvieji, talpiniai, pjezoelektriniai ir kt. keitikliai. Elektromechaninių metodų pranašumas yra jų paprastumas, plati matuojamųjų dydžių sritis, didelis matuojamųjų dinaminių apkrovų dažnis, galimybė sustiprinti elektrinį signalą, jį registruoti ir apdoroti kompiuteriais. Tai vieni plačiausiai taikomų metodų.

Mechaniniams dydžiams (jėgoms, momentams, deformacijoms) matuoti dažniausiai naudojami tenzorezistoriniai keitikliai (vieliniai, foliniai, puslaidininkiniai) [5,6]. Tenzorezistoriaus jautrusis elementas (metalo juostelė arba siūlelis, puslaidininkio monokristalas), veikiamas tam tikro dydžio jėgos, deformuojasi. Jo varžos pokytis tamprumo ribose yra proporcingas santykinei deformacijai:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (2.1)$$

čia: $\frac{\Delta R}{R}$ – santykinis varžos pokytis; K – tenzorezistoriaus jautrio koeficientas (nustatomas eksperimentiškai); ε – santykinė deformacija.

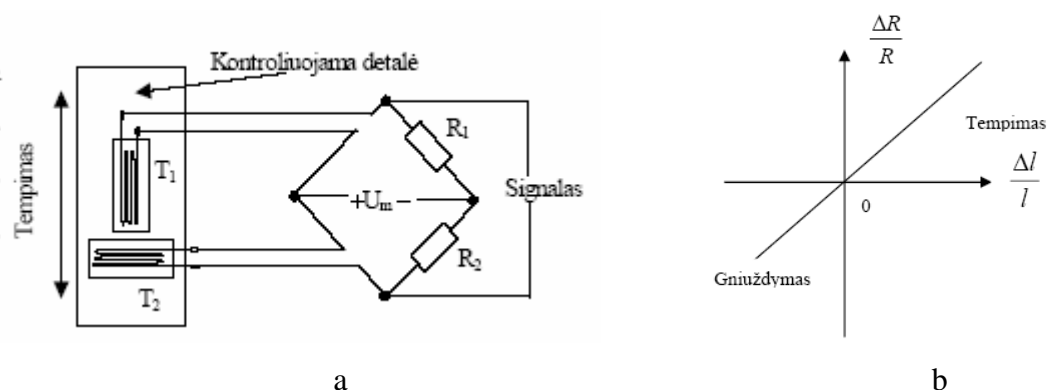
Tenzorezistoriaus jautrio koeficientas kietiesiems kūnams:

$$K = (1 + 2\nu) + m \quad (2.2)$$

čia: $\nu = -\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon}$ - Puasono koeficientas, $m = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}$ - (ρ – savitoji varža) - savitosios varžos pokytis,

susijęs su medžiagos savybių kitimu. Metalams $K \approx 1 + 2\nu$, o puslaidininkiams, $K \approx m$ [5,6].

Pagrindinis jų pranašumas yra didelis jautris mechaninėms deformacijoms. Be to, šie keitikliai maži, nesudėtingai kalibruojami, prie tampriojo elemento prikljuojami arba priveržiami varžtais, jais galima tirti statinius bei dinامينius pokyčius, todėl plačiai naudojami įvairiuose moksliniuose tyrimuose ir technikoje [6,7]. Šiame darbe matuoti deformacijoms pasirinkti foliniai tenzorezistoriniai davikliai, kurių jungimo schemas pavyzdys (a) ir keitimo charakteristika (b) pateikti 2.1 paveikslėlyje.

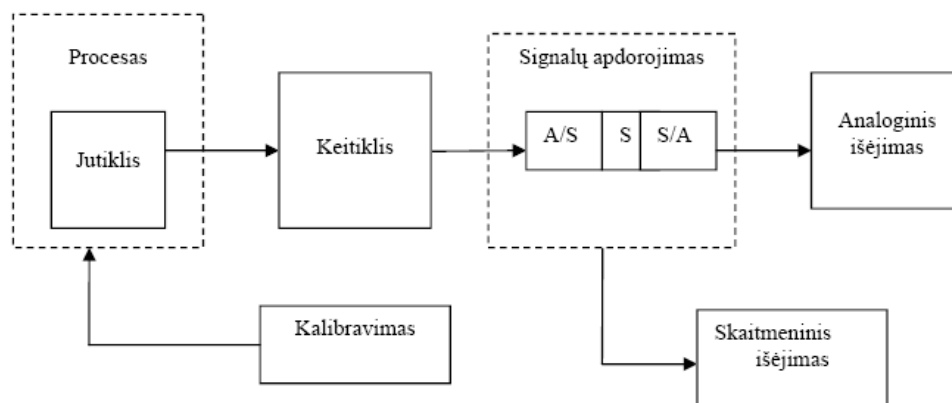


2.1 pav. Tenzorezistoriniai davikliai: a – tenzodaviklių įjungimo schema; b – folinių tenzodaviklių charakteristika

2.2 Matavimo sistemos sandara

Nagrinėjant įvairius matavimo prietaisus ir sistemas, galima išskirti tokias pagrindines matavimo sistemos dalis (2.2 pav.):

- a) daviklis / keitiklis,
- b) signalų norminimo blokas,
- c) signalų (duomenų) apdorojimo blokas,
- d) informacijos išvedimo blokas.



2.2 pav. Funkcinė matavimo sistemos schema

Pirmasis bet kurios matavimo sistemos uždavinys yra pajauti matuojamąjį dydį. Šią funkciją atlieka jutiklis – matavimo prietaiso elementas, kuris panaudoja kokį nors fizikinį reiškinį 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 matavimo signalas patenka į norminimo įrenginį. Matavimo signalas norminamas, norint unifikuoti įvairius dydžius. Pagrindinės signalų norminimo funkcijos yra tokios:

- teikti keitikliui maitinimo įtampą arba srovę,
- subalansuoti keitiklio 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 [6]. 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.

2.3. Matuojamojo dydžio keitimo procesas

Matuojant randama dydžio vertė, tačiau ne visada mato skalė atitinka matuojamojo dydžio verčių skalę, todėl matuojamieji dydžiai pakeičiami tokiais, kurių vertes galima tiesiogiai išmatuoti. Tai daroma ir tuo atveju, kai matuojamojo dydžio negalima perduoti arba užrašyti tokiu pavidalu, koku jis yra gaunamas, arba kai norima unifikuoti skirtingus dydžius, vartojamus, pavyzdžiui, kontrolės ar valdymo sistemose. Matavimo keitiklių įėjimo dydžiai yra labai įvairūs, o kaip išėjimo dydžiai matavimo prietaisuose dažniausiai vartojami įtampos, srovės arba slėgiai. Matuojamiesiems dydžiams pakeisti naudojami fizikiniai ar fizikiniai ir cheminiai efektai, kurių pasirinkimą dažniausiai riboja išėjimo dydžių pobūdis. Dažniausiai naudojami efektai, suteikiantys galimybę pakeisti matuojamąjį dydį elektros srove ar įtampa. Matavimo signalams keisti naudojami operaciniai elementai, atliekantys tam tikras matematinės operacijas (daugybą, dalybą, sudėtį, atimtį, diferencijavimą, integravimą ir pan.). Tokiems matavimų sistemų operaciniams elementams sudaryti dažniausiai naudojami operaciniai stiprintuvai [6,8]. Tai didelio stiprinimo koeficiento (gali siekti $10^3 - 10^6$) nuolatinės srovės stiprintuvai, turintys du įėjimus (tiesioginį ir invertuojantį). Jie paprastai naudojami su neigiamu įtampos grįžtamoju ryšiu.

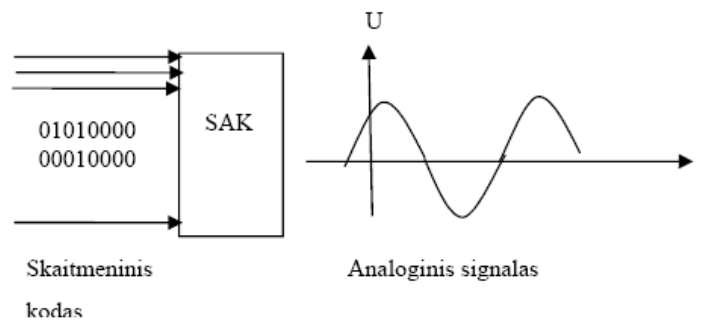
Operacinis stiprintuvas priklausomai nuo to, kokie elementai įjungti į jo išėjimo ir grįžtamojo ryšio grandinę, gali atlikti skirtingas matematinės operacijas. Panaudojant grįžtamuosius ryšius, suformuojama norima signalo keitimo funkcija ir gaunamas reikiamas stiprinimo koeficientas [8]. Stiprintuvas nustato įėjimo signalo dydį pagal lygtį:

$$U_2(t) = h(U_1(t)) \quad (2.4)$$

čia: $h(U_1(t))$ – tam tikra matematinė funkcija.

Iš dinaminio signalo nepageidaujamo dažnio informacijos šalinimui yra naudojami filtrai. Pasyviuosius analoginius filtrus sudaro rezistoriai, kondensatoriai ir induktyvinės ritės, aktyviuosiuose filtruose naudojami operaciniai stiprintuvai. Skaitmeniniuose matavimo prietaisuose ir kituose įtaisuose naudojami įvairūs elementai, kurie susieja skaitmeninius prietaisus su analoginiais signalais. Analoginiams signalams įvesti į PK ar kitus skaitmeninius įtaisus bei jiems iš šių įtaisų išvesti yra naudojami skaitmeniniai analoginiai (SKA) ir analoginiai skaitmeniniai keitikliai ASK) [6,8]. Skaitmeniniai signalai yra diskretūs ir pagal amplitudę ir pagal laiką. Beveik visos skaitmeninės matavimo sistemos naudoja tam tikras dvejetainės skaičių sistemos variacijas signalų informacijai perduoti skaitmenine forma.

SAK – tai įtaisai (2.3 pav.), skirti keisti skaičiaus kodui į analoginį signalą (srovę arba įtampą).



2.3 pav. Skaitmeninis - analoginis keitimas

Apibendrinančioji skaitmeninio analoginio keitiklio perdavimo funkcija:

$$U_{2x} = E_{et} (x_1 \cdot 2^{-1} + x_2 \cdot 2^{-2} + \dots + x_n \cdot 2^{-n}) \quad (2.5)$$

čia: U_{2x} – išėjimo analoginis signalas; E_{et} – etaloninio signalo šaltinio elektrovara;

x_1, x_2, \dots, x_n – koeficientai, kurių reikšmės priklauso nuo įėjimo dvejetainio kodo ir gali būti 1 arba 0, n – keitiklio skilčių (įėjimų) skaičius.

Principinę SAK (2.4 pav.) schemą sudaro etaloninės įtampos šaltinis E , elektroninių jungiklių, kurie gali būti vienoje iš dviejų padėčių rinkinys, stabilių ir tikslių rezistorių R rinkinys ir operacinis stiprintuvas. Į keitiklį patenkantis dvejetainis skaičius talpinamas registre. Rezistoriaus, susijusio su registro vyriausios skilties bitu (VRB) bitu varža R , kiekvienos jaunesnės skilties varža yra dvigubai didesnė. Jauniausios skilties (JS) rezistoriaus varža $2^{M-1} R$.

Keitiklio išėjimo įtampa:

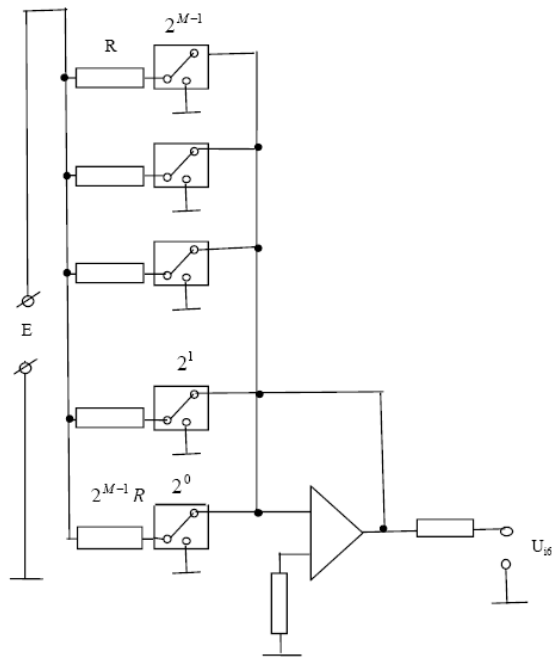
$$U_{i\check{s}} = IR_0 \quad (2.6)$$

čia: $I = E \sum_{m=1}^M \frac{C_m}{2^{M-1}}$ (C_m - yra skaičiai 1 arba 0, priklausomai nuo m -tojo registro įėjimo būsenos).

Analoginiuose skaitmeniniuose keitikliuose analoginę įėjimo įtampa U_{in} išreiškiama etaloninės įtampos E_{et} dalimi taip, kad gautas išėjime kodas atitiktų dvejetainį skaičių:

$$Y = \frac{U_{in}}{E_{et}} = y_1 \cdot 2^{-1} + y_2 \cdot 2^{-2} + \dots + y_n \cdot 2^{-n} \quad (2.7)$$

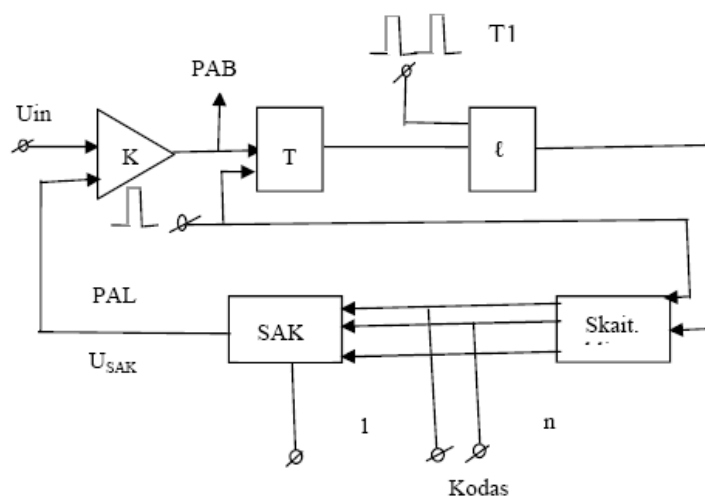
čia: n – dvejetainių įėjimų skaičius, y_1, y_2, \dots, y_n - įėjimų koeficientai, kurie gali būti 0 arba 1.



2.4 pav. Skaitmeninio analoginio keitiklio principinė schema:
ARS – aukščiausia reikšmės skiltis, ŽRS - žemiausia reikšmės skiltys.

Skilčių koeficientai, atitinkantys išėjimo kodą, gali būti gauti vienu metu arba nuosekliai vienas po kito. Pagal tai keitikliai skirstomi į lygiagrečiuosius ir nuoseklius. Naudojamos įvairios analoginių skaitmeninių keitiklių schemos. 2.5 paveiksle pateikta nuosekliojo ASK funkcinė schema.

Skaitiklis pradeda skaičiuoti taktinius impulsus T1 nuo nulio. Komparatorius K lygina SAK įtampą U_{SAK} su įėjimo signalo įtampa U_{in} . Kiekvieno keitimo ciklo pradžioje paleidimo signalu PAL skaitiklyje nustatomas nulinis kodas ir pradedami skaičiuoti taktiniai impulsai. Kai tik SAK išėjimo įtampa $U_{SAK} = U_{in}$, skaitiklis blokuojamas ir išduodamas keitimo pabaigos signalas PAB.



2.5 pav. Funkcinė analoginio skaitmeninio keitiklio schema: K – komparatorius; T – trigeris; ℓ - sutapimo schema; Skait. – skaitiklis, SAK – skaitmeninis analoginis keitiklis

3. DVIRAČIO ŠAKĖS STIPRUMO TYRIMAI

3.1 Deformuojamųjų metalų įtempimų ir deformacijų būvis

Šiuo metu dviračių šakės dažniausiai yra pagaminami iš metalo: plieno, aliuminio ir anglies pluošto. Šiame darbe eksperimentai atlikti su dviračio šake, kuri pagaminta iš plieno 20. Panagrinėsime įtempimų ir deformacijų būvius metaluose. Kietajame būvyje metalai yra polikristaliniai kūnai. Suartėjant atomams ir susidarant metaliniam ryšiui nuo atomų atitrūksta valentiniai elektronai, kurie gali laisvai judėti. Tokiu būdu metalai sudaryti iš kristalinės gardelės mazguose esančių teigiamų jonų ir laisvųjų laidumo elektronų. Laisvieji elektronai kompensuoja jonų elektrostatinės stūmimo jėgas ir tuo pačiu suriša juos į kietąjį kūną. Tokios sistemos elektrostatinė energija susideda iš jonų tarpusavio sąveikos, elektronų sąveikos su jonais ir elektronų tarpusavio sąveikos energijų [9]:

$$U_s = \frac{e^2}{2r_s} \cdot \frac{1,8 - 3\beta^2 + 1,2\beta^5}{(1 - \beta^3)^2} \quad (3.1)$$

čia: e - elektrono krūvis, r_s - pusiausvyrinis tarpelektroninis atstumas, $\beta = \frac{r_{jon}}{r_s}$, kur r_{jon} – jono spindulys.

Šios sąveikos potencinės energijos dydis nulemia kristalinės gardelės matmenis ir formą, o tuo pačiu ir metalo mechanines savybes [9,10]. Veikiant išorinėms mechaninėms jėgoms, elektriniams ir magnetiniams laukams, vykstant šiluminiam plėtimuisi kūnai deformuojasi – pasikeičia juos sudarančių dalelių padėtis, dėl ko pakinta kūnų matmenys ir forma ir juos sudarančių dalelių tarpusavio sąveikos jėgos, savo ruožtu sukeliančios įtempimų atsiradimą. Apkraunant kūną, didėja vidinė jėga, tenkanti vienai gardelei. Kai įtempimas neviršija tam tikro dydžio, kūno tamproji deformacija atsiranda dėl atstumų tarp kristalinės gardelės mazguose esančių dalelių padidėjimo. Nukraunant kūną, veikiančios vidinės sąveikos jėgos gražina daleles vėl į pusiausvyros padėtis. Padidėjus vidinėms jėgoms, gardelės pasislenka viena kitos atžvilgiu ir taip pasireiškia šlytis. Didėjant įtempimams gardelėse atsiranda negrįžtamų pokyčių – prasideda slydimas dislokacijų ir struktūros netobulumų išdėstymo plokštumose. Trapiose medžiagose kristalų sandūroje atsiranda mikro plyšiai [11].

Pagal Huko dėsnį [10,12,13] galioja tiesinis ryšys tarp kietojo kūno įtempimų bei deformacijų. Be abejo, tiesinė priklausomybė pasireiškia tik esant nedideliems įtempimams.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.2)$$

čia: σ – įtempimas, ε – santykinė deformacija, E – tamprumo modulis.

Daugelis inžinerinių konstrukcijų patiria mažas deformacijas ir jų ryšys su įtempimais yra tiesinis, todėl galima laikyti, kad įtempimai σ yra tiesiogiai proporcingi deformacijoms ε [9].

Bendruoju atveju deformacijos ir įtempimai sudaro tenzorius [10,12,13] . Įtempimų būvis bet kuriame kūno taške nustatomas įtempimų cenzoriumi

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

čia: σ_i – normalinių įtempimų komponentės, τ_{ij} - tangentinių įtempimų komponentės

($i = x,y,z; j = x,y,z$)

Įtempimų tenzorių (3.3) galima išskaidyti į sferinį tenzorių T_{σ}^0 ir tenzorių deviatorių

D_{σ}^H .

$$T_{\sigma} = T_{\sigma}^0 + D_{\sigma}^H \quad (3.4)$$

Sferinis tenzorius

$$T_{\sigma}^0 = \begin{pmatrix} \sigma_v & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Sferinio tenzorius įstrižainėje išdėstyti vidutiniai įtempimai σ_v ir jo komponentės sukelia tūrio deformacijas.

Tenzorius deviatorius

$$D_{\sigma}^H = \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_v & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_v & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_v \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

Įtempimų deviatoriaus komponentės sukelia kūno formos pokyčius.

Kūno deformacijų būvis bet kuriame taške nustatomas deformacijų tenzoriumi [10, 12, 13]

$$T_D = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

čia: ε - santykinė linijinė deformacija, γ – santykinė šlytis.

Deformacijų tenzorių taip pat galima išskaidyti į sferinį tenzorių T_D^0 , kurio įstrižainėje išdėstytos vidutinės deformacijos ε_v ir kuris įvertina izotropinę tūrio deformaciją (tolygų tūrio kitimą) ir tenzorių deviatorių D_D^H , kurio komponentės įvertina formos pokytį:

$$T_D = T_D^0 + D_D^H,$$

$$T_D^0 = \begin{pmatrix} \varepsilon_v & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_v & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_v \end{pmatrix},$$

$$D_D^H = \begin{pmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_v & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y - \varepsilon_v & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z - \varepsilon_v \end{pmatrix}$$
(3.8)

Šiuo atveju ryšys tarp įtempimų ir deformacijų išreiškiamas apibendrintuoju Huko dėsniumi [10,11,12]. Izotropiniam kūnui, kurio savybės apibūdinamos tamprumo moduliu E ir šlyties moduliu G , susietais Puasono koeficientu ν

$$E = 2G(1 + \mu)$$
(3.9)

Huko dėsnis tenzorinėje formoje užrašomas tokiu būdu:

❖ tūrio kitimo

$$T_\sigma^0 = E_0 \cdot T_D^0,$$
(3.10)

❖ formos kitimo

$$D_\sigma^H = 2GD_D^H,$$
(3.11)

čia: $E_0 = \frac{E}{1-2\nu}$ - tūrinis tamprumo modulis (charakterizuojantis medžiagos standumą).

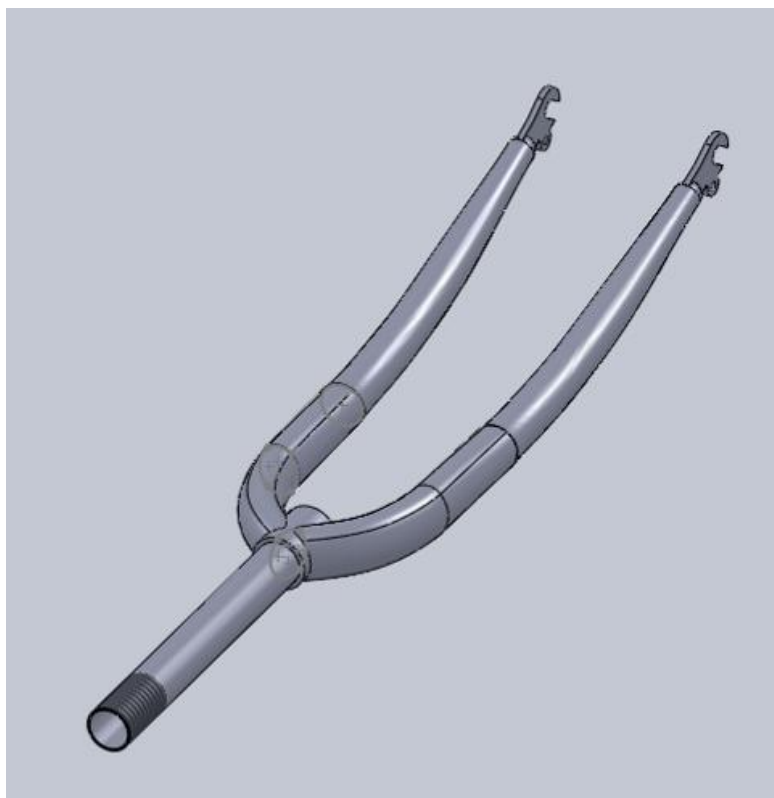
Ši apibendrintąjį Huko dėsnį galima taikyti realiems izotropiniams kūnams, kai veikiantys įtempimai nesukelia plastinių deformacijų, kai deformacijos yra mažos lyginant su kūno matmenimis ir temperatūra visuose kūno taškuose yra vienoda.

3.2. Dviračio šakės eksperimentiniai tyrimai

3.2.1. Dviračio šakės bandymai baigtinių elementų metodu

Naujų gaminių stiprumas ir ilgaamžiškumas visada turi būti patikrinami bandymais. Tačiau atlikti šiuos bandymus dažniausiai brangiai kainuoja ir užtrunka nemažai laiko. Todėl suprojektavus naują gaminį, jo dar nepagaminus, galima jo stiprumą ir ilgaamžiškumą išbandyti trimačių modelių modeliavimo sistemomis, tokiomis kaip Inventor, SolidWorks ir kitomis. Atlikti šį modeliavimą tereikia turėti gaminio trimatį modelį. Šie bandymai užtrunka tik kelias minutes, o gauti rezultatai yra pakankamai tikslūs. Gauti rezultatai parodo ar suprojektuotas gaminys atitinka jam keliamus reikalavimus. Taip yra sutaupoma daug laiko ir nepatiriama išlaidų realių bandomųjų gaminių gamybai. Be to paaiškėjus, kad konstrukcija yra netobula, ja nesunkiai galima pakeisti ir patobulinti ir dar kartą išbandyti.

Todėl pirmiausia buvo nuspręsta dviračio sakę išbandyti baigtinių elementų metodu. Buvo pasirinkta modeliavimo sistema SolidWorks. Buvo nubraižytas trimatis dviračio šakės modelis ir išbandytas baigtinių elementų metodu. Gauti rezultatai pateikti 3.2 – 3.5 pav., modelio informacija pateikta 3.1 – 3.5 lentelėse.



3.1 pav. Nagrinėjamos šakės modelio vaizdas

3.1 lentelė. Medžiagos savybės

Nr.	Modelio pavadinimas	Medžiaga	Masė	Tūris
1	Sake_skaiciavimui	Plienas 20	0.76273 kg	9.65481e-005 m ³

Pavadinimas	Reikšmė	Vienetai	Reikšmės tipas
Tamprumo modulis	2e+011	Pa	Constant
Puasono koeficientas	0.3		Constant
Šlities modulis	7.7e+010	Pa	Constant
Tankis	7900	kg/m ³	Constant
Stiprumo riba	4.1e+008	Pa	Constant
Takumo riba	2.45e+008	Pa	Constant
Šiluminio plėtimosi koeficientas	1.5e-005	/Kelvin	Constant
Šiluminis plėtimasis	47	W/(m.K)	Constant
Šiluminė talpa	420	J/(kg.K)	Constant

3.2 lentelė. Modelio apkrovos ir įtvirtinimai

Įtvirtinimai

Įtvirtinimo pavadinimas	Selection set
Įtvirtinimas <Sake_skaiciavimui>	Įtvirtintas 1 paviršiumi

Apkrovos

Apkrovos pavadinimas	Apkrovos tipas
Jėga/Momentas <Sake_skaiciavimui>	viename paviršiuje pridėta 500 N išskirstyta jėga vertikaliai žemyn

3.3 lentelė. Tinklelio informacija

Tinklelio tipas:	Tankus tinklelis
Naudotas tinklelis:	Standartinis tinklelis
Jakobjano patikrinimas:	4 taškai

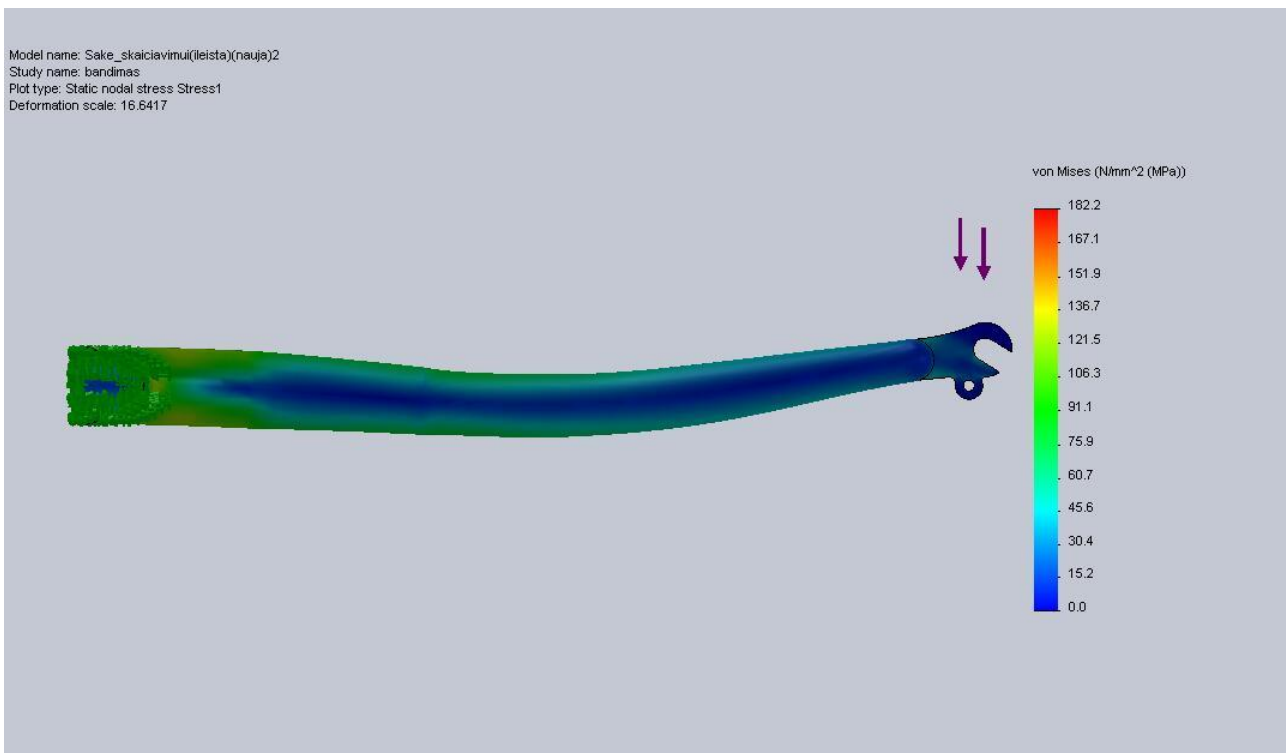
Elementų dydis:	5.2781 mm
Tolerancija:	0.2639 mm
Tikslumas:	High
Elementu skaičius:	8441
Mazgų skaičius:	16826
Laikas per kuri sudarytas tinklis (hh:mm:ss):	00:00:12

3.4 lentelė. Reakcijos jėgos

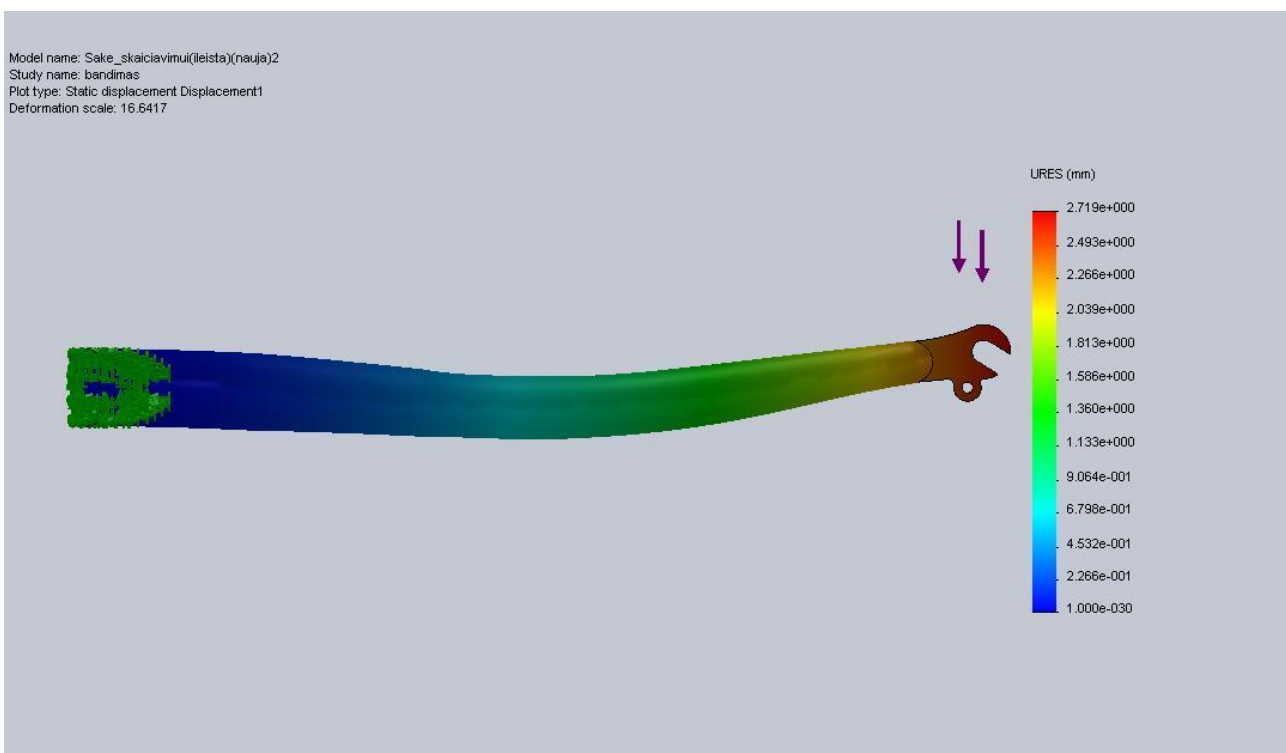
Vietos pasirinkimas	Vienetai	Sum X	Sum Y	Sum Z	Reakcijos jėga
Visas modelis	N	0.123238	501.036	-0.338863	501.036

3.5 lentelė. Rezultatai

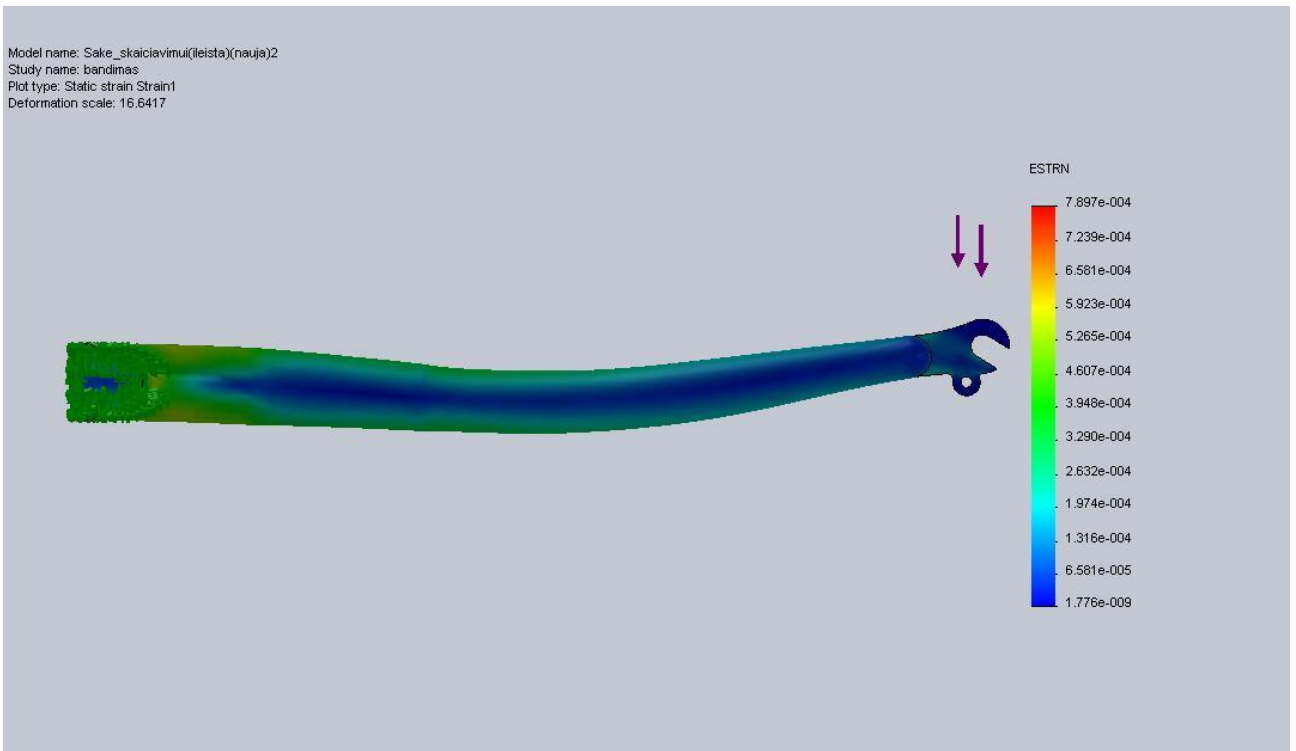
Pavadinimas	Tipas	Minimalūs	Vieta	Maksimalūs	Vieta
Įtempimai	VON: Miseso įtempimai	0.000409902 N/mm ² (MPa) Mazgas: 12910	(-5.81273 mm, 19.8359 mm, -445.234 mm)	182.237 N/mm ² (MPa) Mazgas: 9181	(33.7793 mm, -10.1723 mm, -26.283 mm)
Poslinkiai	URES: Atsirandantys poslinkiai	0 mm Mazgas: 467	(38.9083 mm, 14.7272 mm, 5.93356 mm)	2.71909 mm Mazgas: 510	(-9.81444 mm, 17.1461 mm, -445.394 mm)
Deformacijos	ESTRN: Ekvivalentinė deformacija	1.77624e-009 Mazgas: 12910	(-5.81273 mm, 19.8359 mm, -445.234 mm)	0.000789695 Mazgas: 9181	(33.7793 mm, -10.1723 mm, -26.283 mm)



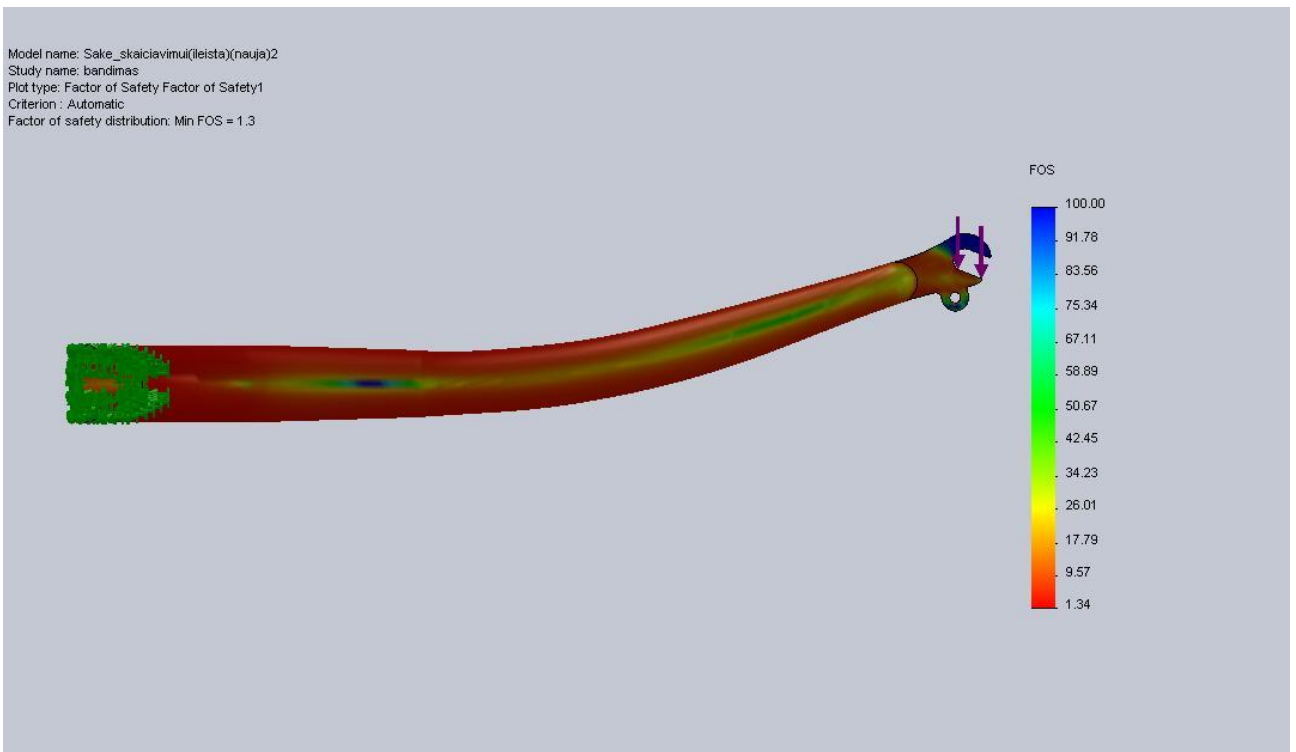
3.2 pav. Ekvivalentiniai įtempimai (Stress)



3.3 pav. Poslinkiai (Displacement)



3.4 pav. Deformacijos (Strain)



3.5 pav. Atsargos koeficientas (Factor of Safety)

Atlikus simuliacija SolidWorks programa gauta, kad maksimalūs šakės įtempimai yra 182,2 MPa, maksimalūs poslinkiai 2,7 mm, maksimali deformacija $7,9 \cdot 10^{-4}$. Šakė pagaminta iš Plieno C20 atlaikys užduotą apkrovą su minimaliu atsargos koeficientu 1,34.

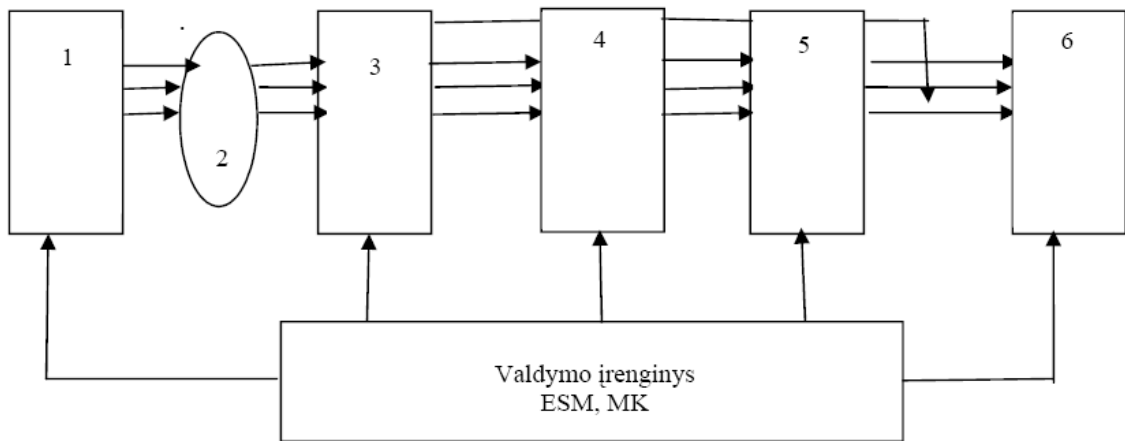
3.2.2. „Spider 8“ informacinė matavimo sistema

Mechaniniams dydžiams: slėgiams, poslinkiams, įtempimams, jėgoms, pagreičiams ir kt. siūloma naudoti informacinę matavimo sistemą „Spider 8“ [14, 15], sujungtą su foliniais tenzodavikliais ir valdomą „Catman“ programine įranga. Šie jutikliai gali būti jungiami tiltelio, pusės arba ketvirčio tiltelio schema.

„Spider 8“ yra informacinė matavimo sistema (IMS), 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. Kiekvienoje IMS galima išskirti tokius pagrindinius blokus (3.6 pav.)

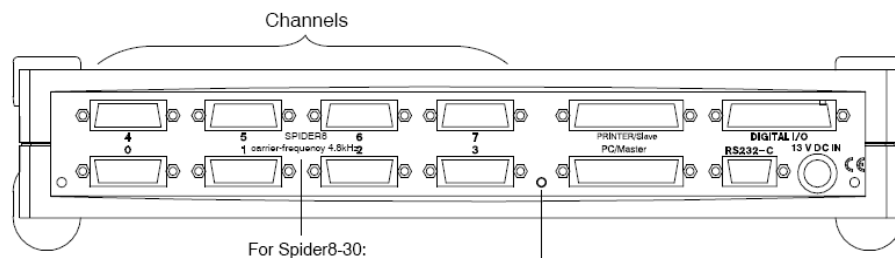
- matavimo priemonė, susidedanti iš mechaninių dydžių, elektrinių dydžių ir informacinių keitiklių;
- informacijos keitikliai, apdorojantys informaciją pagal nurodytą algoritmą atliekantys (matematinės operacijas, moduluojantys signalą ir pan.);
- informacijos saugojimo įrenginys;
- informacijos vaizdavimo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

Informacija iš IMS gali būti pateikiama operatoriui arba 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 mazgų (modulių). Kiekvienas modulis yra baigtinės konstrukcijos mazgas. 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.



3.6 pav. Informacinės matavimo sistemos funkcinė schema:
 1 – išorės veiksniai; 2 – objektas; 3 – keitikliai; 4 – matavimo rezultatų apdorojimas; 5 – informacijos registracija; 6 – informacijos atvaizdavimas

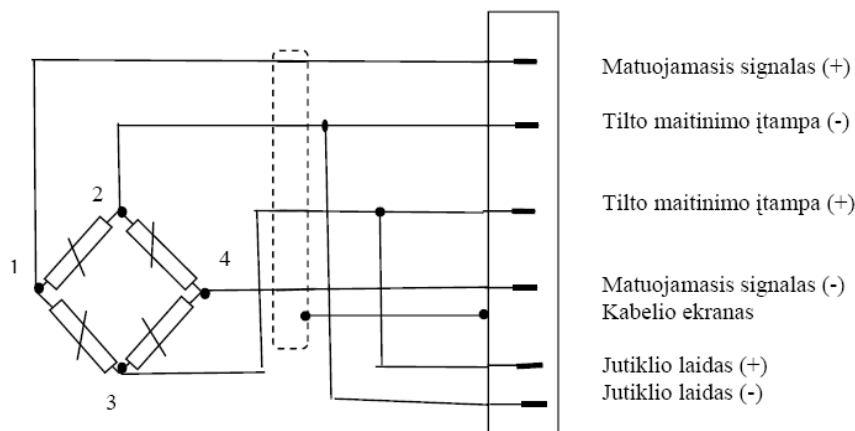
Prietaisas „Spider 8“ (3.7 pav.) turi standartiškai keturis sukomplektuotus kanalus. Įrenginys su kuriuo buvo atlikti bandymai turi sukomplektuotus aštuonis kanalus, kiekvienas kanalas atlieka visas matuojamojo dydžio keitimo funkcijas – matuojamojo dydžio pajautimą, šio priimtojo dydžio pakeitimą į elektrinį signalą, jo stiprinimą, analoginio signalo keitimą į skaitmeninį ir filtravimą.



3.7 pav. Spider 8 vaizdas iš galo

Kiekviename „Spider 8“ kanale yra maitinimo šaltinis pasyviems deformacijų keitikliams, stiprintuvas, filtras ir analoginis skaitmeninis (A/D) keitiklis. Visi A/D keitikliai dirba sinchroniškai (taip užtikrinamas matavimas tuo pačiu metu visuose kanaluose) ir tiekia iki 9600 matavimų per sekundę (taip apimamas visas matuojamų mechaninių dydžių diapazonas) [14]. Prie esamo lizdo PC/MASTER galima prijungti kompiuterį arba kitą „Spinder 8“ bloką ir taip galima nuosekliai sujungti aštuonis „Spinder 8“ su iš viso 64 kanalais. Jokie papildomi nustatymai yra nereikalingi, t.y. kompiuteriui sistema pristato tiesiog kaip prietaisas su 8, 16 arba net 64 kanalais, kurie visi tarpusavyje yra sinchronizuoti. Ši sistema tinka naudoti su tenzorezistoriniais,

induktyviniais, potenciometriniais ir kitais deformacijų matavimo jutikliais. Matavimo signalų apdorojimo schema (kai jutikliai sujungti pilnuoju tilteliu) pateikta 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Tenzodaviklio jungimo pilnuoju tilteliu schema

Matuojamąsias deformacijas pajaučia tenzorinis jutiklis ir paverčia ją elektrinės varžos pokyčiu, o šis, panaudojant tiltelinę schemą (3.8 pav.), elektrinės grandinės įtampos pokyčiu. Šie elektriniai signalai panaudojami išėjimo dydžiui suformuoti.

Išėjimo įtampa:

$$U_{i\check{s}} = U_m \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right), \quad (3.12)$$

čia: U_m - tilto maitinimo įtampa, R_1, R_2, R_3, R_4 - varžos.

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 $U_{i\check{s}} = 0$. 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.

Kai aktyvus tik vienas jutiklis ir jo varža keičiasi dėl atitinkamos detalės deformacijos, tuomet šio jutiklio varža $R_l = R + \Delta R = R_x$ (ΔR - varžos pokytis dėl deformacijų), tai išėjimo įtampa [16, 17]:

$$U_{i\check{s}} = U_m \left(\frac{R_x}{R_x + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (3.13)$$

arba

$$\frac{U_{i\dot{s}}}{U_m} = \frac{R_x}{R_x + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{R_2 \cdot \Delta R}{(R_1 + R_2)^2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta R}{R_1 + R_2}\right)} \quad (3.14)$$

Kai $R_1 = R_2$ ir $\Delta R \ll (R_1 + R_2)$, tuomet

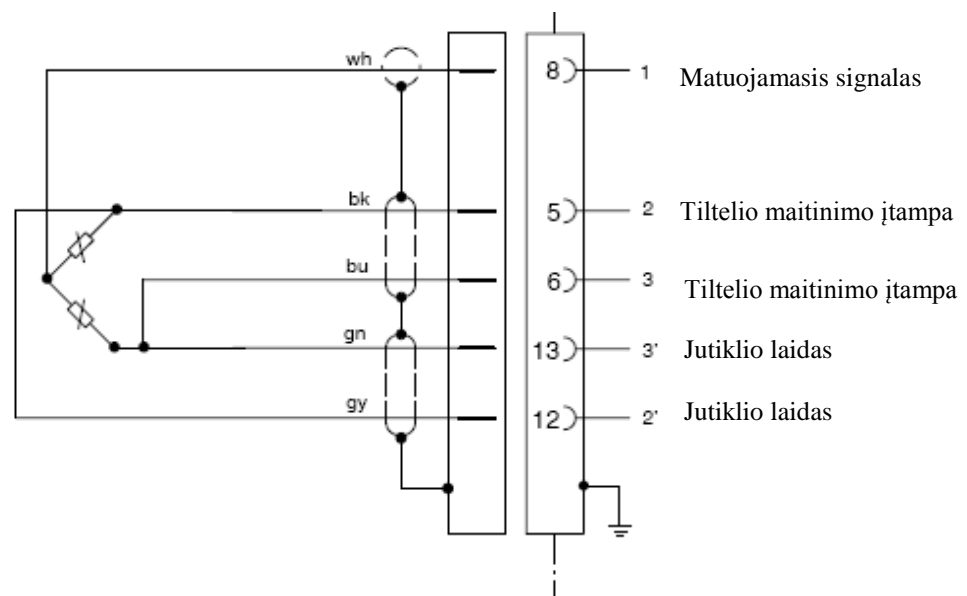
$$\frac{U_{i\dot{s}}}{U_m} \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (3.15)$$

Jeigu du aktyvieji jutikliai jungiami į gretimas tiltelio šakas ir kinta jų abiejų varžos dydžiu ΔR , tuomet [16]:

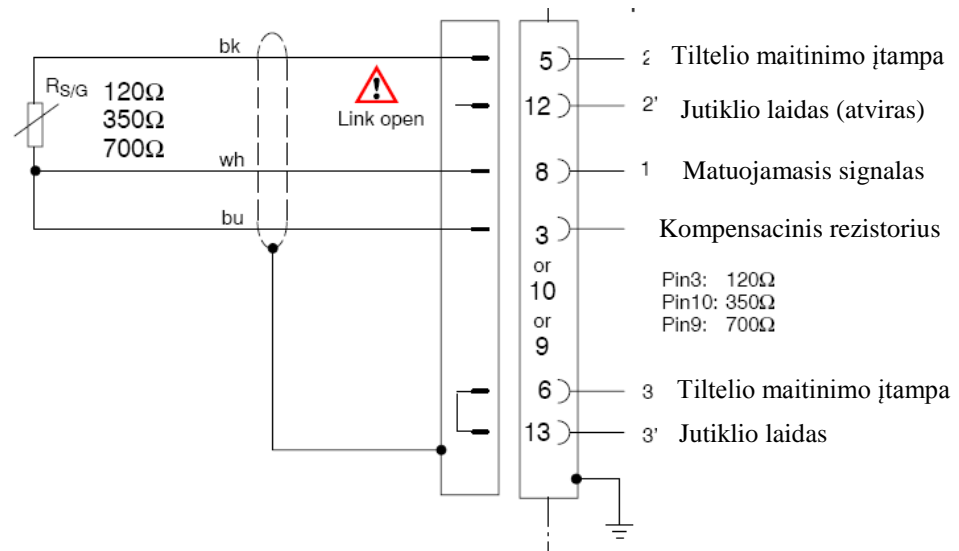
$$\frac{U_{i\dot{s}}}{U_m} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (3.16)$$

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

Be pateiktos 3.8 paveiksle tiltelio jungimo schemas, gali būti panaudota pusės ir ketvirčio tiltelio schemas (3.9 – 3.10 pav.).



3.9 pav. Tenzodaviklio jungimo pusės tiltelio schema



3.10 pav. Tenzodaviklio jungimo ketvirčio tiltelio schema

Gauta informacija iš tenzodaviklių išvedama į kompiuterį, o kompiuteryje gauti rezultatai apdorojami „Catman“ programa. Ši programa taip pat atlieka matavimo rezultatų vizualizavimą ir valdymą.

3.2.3 Tenzodaviklių žymėjimas

Tenzorezistoriniai keitikliai keičia pailgėjimo pokytį į varžos pokytį. Tenzodavikliai būna vieliniai, foliniai ir puslaidininkiniai. Vielinį tenzodaviklį sudaro vingiais išlankstyta 0,01- 0,03mm storio konstantano, manganinio, nichromo vielutė, priklijuota prie popieriaus ar lakų plėvelės su prilituotais išvadais.

Rusijoje gaminami tenzodavikliai žymimi raidiniu žymėjimu, po to nurodoma jo bazės ilgis ir varža. Tenzodavikliai su popieriniu pagrindu žymimi 2PKB, PPKBK, K, lako plėvelės pagrindu PKP, PPKB.

Šių tenzodaviklių bazė būna nuo 8 iki 100 mm, varža 50 – 400 Ω. Be vielinių naudojami ir foliniai tenzodavikliai, kuriuose vietoj vielėlių naudojama 4...12 μm storio stačiakampio skerspjuvio tų pačių metalų juostelės, priklijuotos prie popieriaus ar įlietos į lakų pagrindo plėvelę.

Foliniai tenzodavikliai ant lako VL – 031 pagrindo žymimi 2FKPA.

Dabar dažniausiai naudojami foliniai tenzodavikliai. Jie mechaniškai atsparesni ir geriau tenkina termokompensacijos sąlygas.

Rusijoje gaminami foliniai tenzodavikliai su lakų plėvelės pagrindu, kurie priklausomai nuo konfigūracijos ir plėvelės medžiagos žymimi: 2FKPA, 1FKTK, FK-PB, FK-RB, 2FKMV, 2FKMG. Jie klijuojami laku VL-4, VL-931 ir klėjais „Ciakrin“.

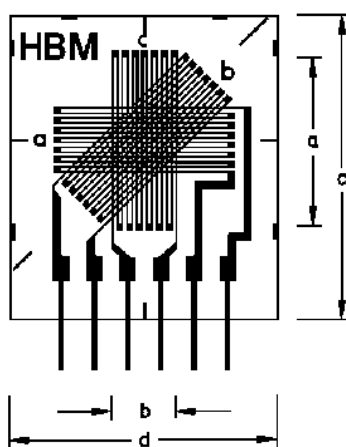
Tenzodaviklių žymėjimas priklauso nuo juos gaminančios firmos. Europoje plačiai žinoma HBM firma (Vokietija), gaminami tenzodaviklius ir antrinius prietaisus, signalams registruoti ir užrašyti. Šioje firmoje naudojamas toks folinių tenzorezistorių žymėjimas: pirmas ženklas parodo, ar jo išvadai standartiniai(1), ar su prilituotu kabeliu(K); antra raidė nurodo tenzodaviklių kiekį jo konstrukciniam išpildime; trečia raidė – jo pagrindo ir folijos medžiaga; ketvirtas skaičius nurodo tinklelio konfigūraciją; penktas skaičius – ant kokios medžiagos tenzodaviklis bus klijuojamas. Toliau esantys skaičiai rodo tenzodaviklio bazės ilgį ir jo varžą. Tenzodaviklis žymimas:

1-LY11-10/120, kai jis pagamintas iš konstantano folijos su poliamido pagrindu, skirtas klijuoti ant feritinio plieno. Jo bazė $l = 10 \text{ mm}$ ir varža $R_t = 120 \Omega$. Kai jis skirtas klijuoti ant aliuminio, žymimas 1-LY13-10/120.

Puslaidininkiniuose tenzodavikliuose panaudotas 20...50 μm storio ir iki 0,5 mm pločio puslaidininkis (silicio n ir germanio p). Jie labai jautrūs, chemiškai inertiški. Žymimi KD-1, KTD-3, KTDM 1-2, mažos bazės JU-8A, JU-8B, $l = 1,4 \text{ mm}$.

3.2.4 Dviračio šakės eksperimentinio tyrimo metodika

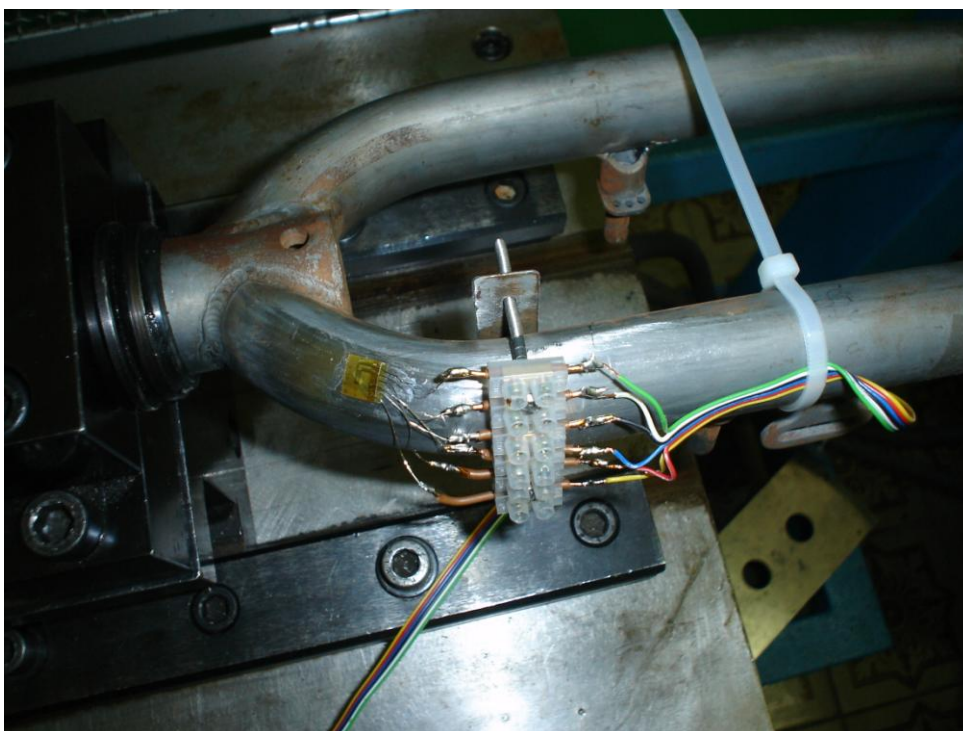
Dviračio šakės stiprumo tyrimus atlikome aukščiau išnagrinėta „Spider 8“ sistema. Kadangi bandymo metu šakėje veikiančių svarbiausių įtempimų veikimo kryptis buvo nežinoma, buvo nuspręsta pasirinkti rozetės tipo tenzodaviklius. Iš keleto galimų folinių tenzodaviklių variantų bandymams buvo pasirinkta naudoti tenzodaviklius HBM 1-RY91-3/120 (3.11 pav.).



3.11 pav. Daviklio bendras vaizdas:

$a = 3 \text{ mm}$, $b = 1,25 \text{ mm}$, $c = 9 \text{ mm}$, $d = 9 \text{ mm}$.

Daviklis pagamintas iš konstantano folijos aplietas poliamidu, matavimo bazė 3 milimetrai, varža 120 Ω , maksimali matavimo įtampa 2 V, jutiklių išdėstymas vienas kito atžvilgiu 0°/45°/90°. Šie jutikliai skirti matuoti plieninių detalių deformacijom.



3.12 pav. Jutiklis priklijuotas ant šakės plunksnos

Jutiklis ant šakės buvo priklijuotas Z70 kljais. Prieš tai daviklio kljavimo vieta buvo nušveista smulkiu šlifavimo popieriumi ir nuriebalinta. Kljai Z70 yra greitai stingstantys, pagaminti iš cyanoakrilino, specialiai sukurti tenzodaviklių kljavimui. Jais galima kljuoti visus HBM firmos gaminamus daviklius prie visų metalų ir įvairių plastikų. Z70 netinkami kljuoti prie korėtų medžiagų, kaip medis, betonas ir putoplastas. Šie kljai stingsta nuo oro drėgmės ir mechaninio spaudimo. Geriausiai jie stingsta kai oro drėgmė yra nuo 40% iki 70%. Jeigu oro drėgmė yra mažiau nei 30% kljū stingimas gali ilgai užtrukti arba jie išviso nesustings. Jeigu oro drėgmė didesnė nei 80% kljai grižiau sustings nei numatyta. Per numatytą laiką Z70 sustingsta tik plonais sluoksniais. Storais sluoksniais kljai galutinai nesustingsta. Stingimo greitis priklauso nuo kljuojamų paviršių cheminės būklės. Neutralūs paviršiai pagreitina kljū stingimą, rūgštiniai – ji stabdo arba išviso užkerta kelia kljū stingimui. Kljuojant prie plieno, kljai sustingsta per 60..120 sekundžių, prie aliuminio – per 50...100, prie plastikų – 10...60 sekundžių. Žemesnėje kaip kambario temperatūra kljū stingimas užtrunka ilgiau[18].

Iš technologinių bandymų centre atliktų bandymų rezultatų buvo nuspręsta daviklį kljuoti apatinėje šakės plunksnos dalyje. Jutiklis ant šakės buvo priklijuotas kairės plunksnos

apatinėje pusėje ir prijungtas prie informacinės matavimo sistemos Spider 8. Buvo pasirinktas ketvirčio tiltelio jungimas prie Spider 8 matavimo sistemos. Šakė buvo įtvirtinta šakės bandymo stende „Bike Machinery Proteus“ ir statiškai palaipsniui apkrauta iki 1000 N (3.13 pav.).



3.13 pav. Technologinių bandymų centre bandymų metu lūžusi šakė



3.14 pav. Šakė įtvirtinta bandymo stende

Apkrovimo metu Spider 8 sistema buvo registruojami duomenys gaunami iš priklijuoto daviklio ant šakės (50 reikšmių per sekundę). Gauti rezultatai buvo apdorojami ir pateikiami vizualiai.

4. DVIRAČIO ŠAKĖS STIPRUMO EKSPERIMENTINIŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

4.1. Įtempimų ir deformacijų skaičiavimai

Dviračio šakės paprastai gaminami iš plieno, aliuminio lydinių, dabartiniu metu iš anglies pluošto. Bandymas atliktas su dviračio šake, kuri pagaminta iš plieno C20 vamzdžių. Plieno C20 cheminė sudėtis ir mechaninės charakteristikos [19] pateiktos 4.1 ir 4.2 lentelėse.

4.1 lentelė. Plieno C20 cheminė sudėtis

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %
0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	≤0,25

4.2 lentelė. Plieno C20 mechaninės charakteristikos

Takumo riba σ_T , MPa	Stiprumo riba σ_B , MPa	Santykinis išlįsimas δ , %	Santykinis skerspjūvio susitraukimas Ψ , %	Tamprumo modulis E, MPa	Puasono koeficientas ν
245	410	25	55	$2 \cdot 10^5$	0,3

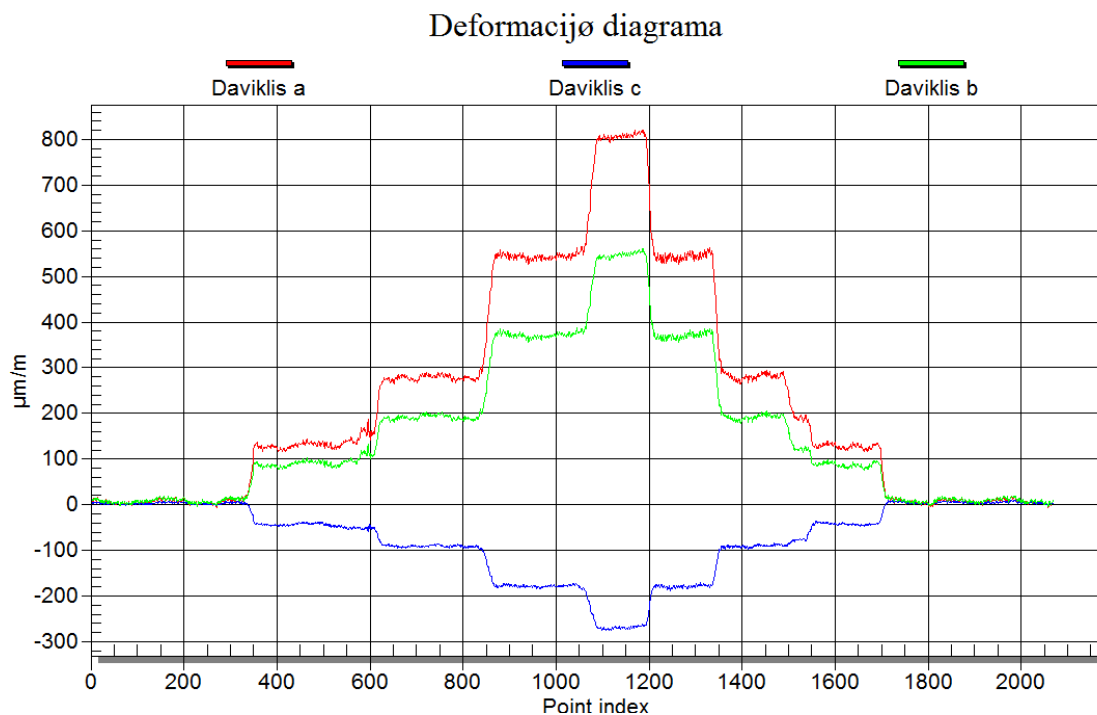
Dalis gautų deformacijų ir įtempimų reikšmių pateikta 4.3 ir 4.4 lentelėse. Jose pateikta tik dalis rezultatų gautų bandymo pradžioje, kai apkrova 0 N, kai apkrova yra maksimali – 1000 N ir kai apkrova yra visiškai pašalinama – 0 N.

4.3 lentelė. Deformacijos ir įtempimai (Catman programos parodymai)

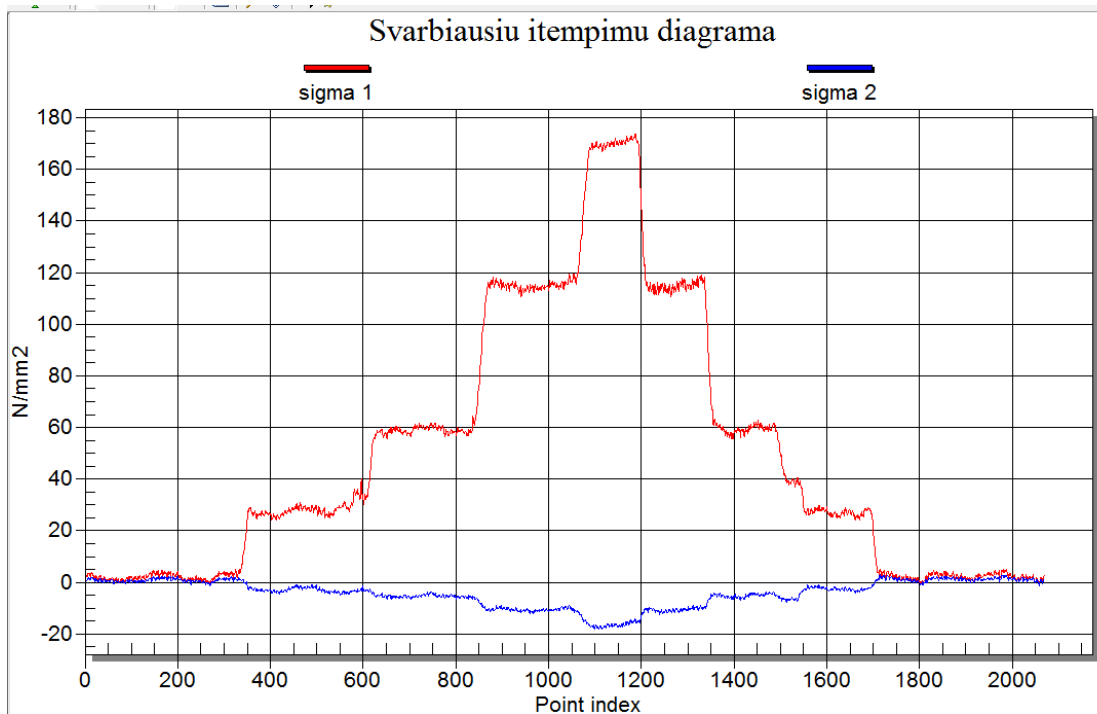
Laikas s	Deformacijos $\mu\text{m}/\text{m}$			Svarbiausieji įtempimai	
	ϵ_a	ϵ_c	ϵ_b	σ_1	σ_2
	Daviklis a	Daviklis c	Daviklis b	MPa	MPa
0	13,44	7,2	15,36	3,854668	2,02208654
0,02	7,68	3,84	10,08	2,370119	0,91007346
0,04	5,28	3,36	7,68	1,769871	0,68988748
0,06	7,2	4,32	11,04	2,484987	0,79481936
0,08	6,24	2,88	9,12	2,048285	0,54866294
0,1	8,16	2,88	8,64	2,202671	0,94149128
0,12	13,44	4,32	12,48	3,424884	1,63336748
0,14	12,48	4,8	12,96	3,352499	1,56856236
0,16	12,96	5,28	13,92	3,54599	1,64829224

0,18	12	5,28	13,44	3,365041	1,5556344
0,2	10,56	4,8	13,44	3,181101	1,19274652
0,22	10,08	4,32	12,48	2,978683	1,12194411
21,4	811,2	-268,32	552,48	171,1839	-16,24327
21,42	805,92	-271,2	546,24	169,705	-17,087715
21,44	805,44	-272,16	545,28	169,5161	-17,308389
21,46	810,24	-268,32	550,56	170,8794	-16,212324
21,48	811,68	-265,92	553,92	171,4623	-15,702718
21,5	810,24	-268,32	552	170,9816	-16,314493
21,52	808,8	-270,24	549,12	170,4511	-16,740153
21,54	807,84	-269,76	549,6	170,3352	-16,761411
21,56	805,44	-268,8	547,68	169,8148	-16,652223
21,58	809,76	-264,96	551,04	170,9579	-15,47276
21,6	810,72	-266,88	551,52	171,0868	-15,873679
21,62	813,12	-269,76	551,52	171,3976	-16,318991
21,64	819,36	-266,4	557,28	173,0292	-15,217231
21,66	814,08	-264,96	555,36	172,022	-15,30561
21,68	808,8	-265,92	550,08	170,6847	-15,745967
21,7	809,76	-266,88	549,12	170,7486	-15,809081
21,72	809,76	-268,8	550,08	170,7428	-16,348928
21,74	812,16	-268,32	552	171,3183	-16,103995
21,76	814,08	-265,44	553,44	171,8676	-15,287608
21,78	816,48	-263,04	555,84	172,5507	-14,604589
21,8	813,12	-265,44	553,44	171,6991	-15,392704
21,82	817,44	-264,96	558,24	172,8156	-15,141608
21,84	817,44	-264,96	557,28	172,7475	-15,073451
21,86	813,12	-265,92	553,92	171,7147	-15,544747
21,88	812,16	-265,44	552,48	171,4627	-15,42988
21,9	810,72	-266,4	552,48	171,1733	-15,823752
21,92	815,52	-266,4	554,88	172,1854	-15,467839
21,94	816,96	-264,96	554,88	172,4935	-14,956307
38	2,88	1,44	3,36	0,831248	0,39882449
38,02	1,44	0,48	1,44	0,378121	0,16870626
38,04	-0,48	0,96	0,96	0,22509	-0,0890595
38,06	1,92	1,44	2,4	0,595959	0,36050606
38,08	7,2	2,88	7,68	1,961766	0,90878884
38,1	6,24	2,88	5,76	1,616911	0,98003698
38,12	4,8	1,44	3,84	1,170016	0,60726982
38,14	2,88	1,44	3,84	0,897264	0,33280837
38,16	1,44	1,44	2,4	0,55857	0,26109222
38,18	-5,28	-0,96	-4,32	-0,50824	-1,2694342
38,2	-3,36	-0,96	-2,88	-0,39962	-0,8308409
38,22	5,76	2,4	6,24	1,584295	0,73943182
38,24	7,2	2,88	7,68	1,961766	0,90878884
38,26	7,68	2,88	7,2	1,977684	1,02967409
38,28	6,72	2,88	6,72	1,785983	0,94776878
38,3	-2,4	-4,5	0,96	0,037283	-0,7213001
38,32	0,48	0,96	2,88	0,539603	-0,1299657
38,34	2,88	2,88	5,76	1,264728	0,37459615
38,36	1,92	2,4	4,32	0,95064	0,27865977
38,38	6,72	3,84	8,16	2,001158	1,00542768
38,4	10,56	4,8	12	2,988721	1,38512718

Gautų rezultatų grafikai pateikti 4.1 ir 4.2 paveikslėliuose.



4.1 pav. Deformacijų diagrama (iš Catman programos)



4.2 pav. Svarbiausių įtempimų diagrama (iš Catman programos)

4.2. Eksperimentinių rezultatų įvertinimas

Pasinaudoję gautais bandymo rezultatais (gautomis deformacijomis) pagal 4.1 formulę apskaičiuojame svarbiausius įtempimus ir palyginame su gautais Catman programa ir apskaičiuojame skaičiavimų paklaidą (4.2 formule).

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (4.1)$$

$$P = \left(\frac{\sigma_{1/2s} - \sigma_{1/2a}}{\sigma_{1/2s}} \right) \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Dalis gautų paklaidų skaičiavimo rezultatų pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Paklaidų skaičiavimo rezultatai

Paklaida, %					
σ1			σ2		
MPa			MPa		
	max	Min		max	min
0,151413	0,930335	2,17924E-06	0,719661	1,592939	0,007107
0,122162			0,91647		
0,114311			0,984235		
0,108775			1,122171		
0,107772			1,195429		
0,147534			0,730144		
0,177292			0,609925		
0,158022			0,687484		
0,152751			0,711637		
0,146737			0,741166		
0,123688			0,904557		
0,125879			0,883208		
0,122162			0,91647		
0,151354			0,720846		
0,177241			0,620193		
0,17446			0,625708		
0,158022			0,687484		
0,161529			0,681644		
0,163145			0,67678		
0,16872			0,657521		
0,143852			0,75247		
0,120245			0,946436		
0,19661			0,562403		

Maksimali paklaida apskaičiuojant svarbiausius įtempimus $\sigma_1 = 0,93\%$, o $\sigma_2 = 1,59\%$.

4.4 lentelėje pateikta dalis deformacijų rezultatų gautų Catman programa.

4.4 lentelė. Deformacijų rezultatai

Deformacijos					
daviklis a		daviklis c		daviklis b	
	max		max		max
1,34E-05	0,000821	7,2E-06	-0,00028	1,54E-05	0,000562
7,68E-06		3,84E-06		1,01E-05	
5,28E-06		3,36E-06		7,68E-06	
7,2E-06		4,32E-06		1,1E-05	
6,24E-06		2,88E-06		9,12E-06	
8,16E-06		2,88E-06		8,64E-06	
1,34E-05		4,32E-06		1,25E-05	
1,25E-05		4,8E-06		1,3E-05	
1,3E-05		5,28E-06		1,39E-05	
1,2E-05		5,28E-06		1,34E-05	
1,06E-05		4,8E-06		1,34E-05	
1,01E-05		4,32E-06		1,25E-05	
7,68E-06		3,84E-06		1,01E-05	
1,2E-05		5,76E-06		1,34E-05	
1,54E-05		5,76E-06		1,49E-05	
1,34E-05		4,8E-06		1,3E-05	
1,25E-05		4,8E-06		1,3E-05	
1,2E-05		5,76E-06		1,3E-05	
5,76E-06		2,88E-06		6,24E-06	
9,12E-06		4,32E-06		9,6E-06	
5,28E-06		2,88E-06		6,24E-06	
3,36E-06		1,44E-06		4,32E-06	
9,6E-06		3,36E-06		8,64E-06	
1,06E-05		3,36E-06		9,12E-06	
5,28E-06		2,4E-06		5,28E-06	
7,68E-06		3,36E-06		8,64E-06	
6,72E-06		2,4E-06		6,72E-06	
2,88E-06		9,6E-07		3,84E-06	

Iš gautų svarbiausių įtempimų, pasinaudoję 4.3 formule, apskaičiuojame ekvivalentinius įtempimus.

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (4.3)$$

Dalis gautų rezultatų pateikta 4.5 lentelėje.

4.5 lentelė. Ekvivalentiniai įtempimai

	σ_{ekv} , MPa	
	max	min
3,339585	181,431	0,187242186
2,070922		
1,545113		
2,198132		
1,836487		
1,914254		
2,96709		
2,905346		
3,073448		
2,916972		
2,783487		
2,605647		
2,070922		
2,928991		
3,467185		
3,021682		
2,905346		
2,877862		
1,38767		
2,160414		
1,336855		
0,892401		
2,105323		
2,277023		
1,221557		
1,871029		
1,533875		
0,792338		
1,391744		

Gauti ekvivalentiniai įtempimai yra mažesni nei takumo riba:

$$\sigma_{ekv} = 181,4MPa < 245MPa ;$$

Palyginus ekvivalentinius įtempimus gautus Catman programa atlikus šakės statinio apkrovimo bandymą ir gautus SolidWorks programa, gauta kad jie yra labai panašūs: $181,4MPa \approx 182,2MPa$. Gauti ekvivalentiniai įtempimai Catman programa yra tikslesni, nes gauti atlikus realų apkrovimo bandymą su dviračio šake.

Išnagrinėtas tyrimo metodas informacine matavimo sistema „Spider 8” tinka ne tik dviračių šakių, bet ir kitų jo elementų bandymams.

IŠVADOS

1. Darbe aprašytas virtualus dviračio šakės apkrovimo bandymas parodė, kad maksimalūs įtempimai neviršija takumo ribos, atsirandančios deformacijos ir poslinkiai yra leistinose ribose, todėl šakė pagaminta iš Plieno 20 atlaikys užduotas apkrovas.
2. Atlikta informacinės matavimo sistemos „Spider 8“ analizė. Nustatyta, kad informacinė matavimo sistema „Spider 8“ tenkina standarto LST EN 14764 reikalavimus ir gali būti naudojama dviračių šakių ir kitų dviračio elementų stiprumui įvertinti.
3. Naudojant informacinę matavimo sistemą „Spider“, galima nustatyti dviračio šakės deformacijų kitimo eigą, bei atsirandančius įtempimus atliekant statinio apkrovimo bandymą, bei šiuos duomenis apdoroti programiniu paketu „Catman“.
4. Eksperimentų rezultatai: deformacijų bei jų sklaidos eigos grafikai bei įverčiai, svarbiausi įtempimai dviračio šakėje pateikti diagramose. Gautieji maksimalūs ekvivalentiniai įtempimai su atsarga neviršija takumo ribos $\sigma_{ekv} = 181,4MPa < 245MPa$.

LITERATŪRA

1. LST EN 14764:2006. Miesto ir turistiniai dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai.
2. LST EN 14765:2006+A1:2008. Vaikiški dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai.
3. LST EN 14766:2006. Kalnų dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai.
4. DIN 79100: 2000. Dviračiai - saugumo technikos reikalavimai ir tikrinimas.
5. Электрические измерения неэлектрических величин/ Турчин А., Новицкий П. Левшина В и др. Ленинград, 1985. 576 с.
6. Matavimų teorija ir praktika / Vekteris Vladas, Albinas Kasperavičius, Saulius Kaušinis, Rimantas Kanapėnas. Vilnius, 2000. 380 p. ISBN 9986-524-26-1.
7. www.hbm.com
8. Pramoninė elektronika/ Lašas Algirdas, Bartkevičius Vaclovas, Šurna Rimas ir kt. Vilnius, 1999. 255 p. ISBN 5-420-00146-2.
9. Karpus V. Kietųjų kūnų fizika. Kristalinis būvis. Vilnius, 2002. 248 p. ISBN 9955- 497-04-01.
10. Bražėnas A. Tamprumo ir plastiškumo teorijų pagrindai. Šiauliai, 2003. 193 p. ISBN- 9986-38-433-8/
11. Žiliukas A. Stiprumo ir irimo kriterijai. Kaunas, 2006. 207 p. ISBN 9955-25-134-4.
12. Atkočiūnas J. Tamprumo teorijos pagrindai/ Atkočiūnas J., Nagevičius J. Vilnius, 2004. 528 p. ISBN 9986-05-793-0.
13. Žiliukas A. Medžiagų mechanika. Kaunas, 2004. 595 p. ISBN 9955-09-729-9.
14. www.hbm.de/productes/
15. www.hbm.cz/
16. Thiel R. Elektrisches Messen nichtelektrischen Größen. Stuttgart, 1998. 195 S.
17. Bražėnas A. Eksperimentinės mechanikos pagrindai. Kaunas, 2006. 166 p. ISBN 9986- 38-663-2.
18. Klijų Z70 naudojimo instrukcija.
19. Анурьев В. Справочник конструктора машиностроителя, т. 1. Москва, 2003 elektroninė versija.
20. Ruseckas, Algimantas. Dviračio rėmo stiprumo analizė. Magistro darbas. ŠU TF Mekanikos inžinerijos katedra. 2007.
21. HBM strain gages and accessories. Elektroninio katalogo programa.
22. Strain Gages and Accessories. Elektroninis katalogas.

PRIEDAI