

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

Vytautas Adomaitis

**DVIRAČIO VAIRO STATINIO STIPRUMO IR STANDUMO
TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Šiauliai, 2011

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**DVIRAČIO VAIRO STATINIO STIPRUMO IR STANDUMO
TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Autorius – Vytautas Adomaitis (MM-9 gr.)

Vadovas – doc. dr. A. Sabaliauskas

Recenzentas – doc. dr. S. Rimovskis

Katedros vedėjas – doc. dr. A. Sabaliauskas

Šiauliai, 2011



ŠIAULIŲ
UNIVERSITETAS

**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

TVIRTINU

(parašas, data)

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa MECHANIKOS INŽINERIJA

Išduota magistrantui (-ei) _____

Darbo tema _____

Patvirtinta 20__m. _____ mėn. __d. fakulteto dekanı potvarkiu Nr. _____.

1. Darbo tikslas

2. Darbo struktūra

Darbo pateikimo terminas 20__m. _____ mėn. __d.

Užduotį gavau _____
(magistranto vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas _____
(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

TURINYS

SANTRAUKA	5
SUMMARY	6
SANTRUMPOS	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	10
1. DVIRAČIO VAIRO BANDYMO METODIKA	12
1.1. Standartų apžvalga.....	12
1.2. Dviračio vairo bandymai	13
1.2.1. Statinis dviračio vairo bandymas vairų gamintojams	13
1.2.2. Statinis dviračio vairo bandymas gamintojams, kurie negamina vairų.....	14
2. DEFORMACIJŲ IR ĮTEMPIMŲ MATAVIMO METODAI IR PRIEMONĖS	15
2.1. Matavimo metodų apžvalga.....	15
2.2. Matavimo sistema.....	17
2.3. Įtempimai ir deformacijos metaluose	18
3. DVIRAČIO VAIRO STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS NAUDOJANT SKAITINIUS METODUS	23
3.1. Dviračio vairo eksperimentinio tyrimo metodika.....	23
3.2. Medžiagos charakteristikos	27
3.3. Skaičiavimo BEM rezultatai.....	27
4. DVIRAČIO VAIRO STIPRUMO EKSPERIMENTINIŲ REZULTATŲ ANALIZĖ	33
LITERATŪRA	38
1 PRIEDAS. Tenzojutiklio charakteristikos duomenys	39

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

Vytautas Adomaitis. DVIRAČIO VAIRO STATINIO STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS. Magistro baigiamasis darbas / vadovas doc. dr. A. Sabaliauskas.

SANTRAUKA

Šiandien dviratis užima gana svarbią vietą tarp kitų transporto rūšių. Jis suteikia didesnę judėjimo laisvę, todėl naudojamas laisvalaikio praleidimui, susisiekimui, turizmui, sportavimui. Tai ne tik patogi, bet ir ekonomiška važiavimo priemonė.

Kadangi dviračio vairas yra vienas svarbiausių jo elementų, lemiančių dviračio valdymą, todėl svarbu kad vairo statinis stiprumas ir standumas atitiktų keliamus reikalavimus. Šių reikalavimų laikymasis turi įtakos dviračio kokybei ir saugumui. Atitikimas standartų normoms nustatomas atliekant bandymus. Bandymų rezultatai laikomi teigiamais, jeigu po atliktų tyrimų nenustatomi lūžiai, įtrūkimai, įbrėžimai ar leistinus dydžius viršijantys konstrukcijos formos pakeitimai.

Siekiant išanalizuoti ir eksperimentiškai patikrinti dviračio vairo statinį stiprumą ir standumą naudojant plėvelinius tenzjutiklius ir informacinę matavimo sistemą, valdomą „Catman“ programine įranga, buvo atliktas eksperimentinis dviračio vairo statinio stiprumo ir standumo tyrimas. Tiek eksperimentinio tyrimo rezultatai, tiek baigtinių elementų metodo skaičiavimai, parodė, kad dviračio vairas atitiko standartuose keliamus dviračio vairo standumo ir stiprumo reikalavimus ir neviršijo juose numatytų reikšmių.

Reikšminiai žodžiai: dviračio vairas, statinis stiprumas ir standumas, baigtinių elementų metodas (BEM).

**ŠIAULIAI UNIVERSITY
FACULTY OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Vytautas Adomaitis. THE RESEARCH OF BICYCLE WHEEL'S STATIC STRENGTH AND RIGIDITY. Master final work / research advisor Assoc. doc. dr. A. Sabaliauskas.

SUMMARY

Nowadays bike has quite an important place among other modes of transport. It provides greater freedom of movement, and it is used for leisure, travelling, tourism and sports. It is not only convenient but also cost-effective vehicle of travelling.

As the bicycle wheel is one of its most important elements that determine the wheel control, so it is important that the static strength and rigidity would comply with the requirements of quality. Quality requirements compliance has an impact on the quality and safety of the bicycle. Compliance to the requirements is determined during the experiment. The experiment is considered positive if there are no breaks, cracks, scratches and the structural changes in shape meet the permitted levels.

In order to analyse and experimentally verify the handlebar static strength and rigidity using tenzosensor measurement and information system operated by „Catman” software has been made an experimental bicycle wheel strength and rigidity analysis. Experimental results and finite element method calculations showed that the bicycle wheel meets the strength and rigidity standards requirements and don't exceed them.

Keywords: bicycle wheel, static strength and rigidity, finite element method (FEM).

SANTRUMPOS

BEM – baigtinių elementų metodas

CEN – Europos standartų komitetas (Comité Européen de Normalisation)

EN – Europos standartas (European normalisation)

TBC – Technologinis bandymų centras

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė Rozetės duomenys	23
3.2 lentelė Plieno C20 cheminė sudėtis	27
3.3 lentelė Plieno C20 mechaninės charakteristikos	27
3.4 lentelė Dviračio vairo geometriniai parametrai	28
3.5 lentelė Medžiagos techninės charakteristikos.....	28
3.6 lentelė Jėgų ir atramų duomenys	28
3.7 lentelė Atramų reakcijos	29
3.8 lentelė Skaičiavimo rezultatai.....	29
4.1 lentelė Dviračio vairo apkrovimas.....	33
4.2 lentelė Vairo apkrovimo kreives ir BEM kreivės palyginimas	35

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Reguluojamo vairo parengimas bandymui	13
1.2 pav. Statinio bandymo tvirtinimo ir apkrovimo schema	13
1.3 pav. Dviračio vairo ir stiebo statinis bandymas.....	14
2.1 pav. Vielinio tenzodaviklio charakteristika	16
2.2 pav. Blokinė matavimo sistemos schema	17
2.3 pav. Vinstono tiltelio schema	18
2.4 pav. Idealią kristalo sankibos jėgų intensyvumo ir atstumo tarp dviejų gretimų atomų plokštumų tarpusavio priklausomybė.....	19
2.5 pav. Apkrauto kūno tašką veikiantys įtempimai	20
3.1 pav. Kompiuterinė matavimo sistema	23
3.2 pav. Schematinis matavimo signalo apdorojimas.....	24
3.3 pav. Tenzorezistoriaus rozetės tvirtinimas	25
3.4 pav. Tenzorezistoriaus rozetės klijavimas	25
3.5 pav. Jutiklių sujungimo schema	26
3.7 pav. Dviračio vairas suskaidytas į geometrinius elementus	28
3.8 pav. Statiškai apkrauto elemento ekvivalentiniai įtempimai	29
3.9 pav. Statiškai apkrauto elemento didžiausi svarbiausi įtempimai	30
3.10 pav. Statiškai apkrauto elemento mažiausi svarbiausi įtempimai	30
3.11 pav. Statiškai apkrauto elemento deformacijos	31
3.12 pav. Statiškai apkrauto elemento atsargos koeficientas.....	31
4.1 pav. Deformacijos: a – tenzorezistoriaus kampas 0° , b – tenzorezistoriaus kampas 45° , c – tenzorezistoriaus kampas 90°	33
4.2 pav. Svarbiausi įtempimai	34
4.3 pav. Vairo įtempimų priklausomybė nuo apkrovos.....	35
4.4 pav. Įtempimų ir deformacijų kreivės apkraunant ir nukraunant	36
4.5 pav. Vairo deformacijų priklausomybė nuo apkrovos.....	36

ĮVADAS

Darbo aktualumas. Šiandien dviratis užima gana svarbią vietą tarp kitų transporto rūšių. Apytiksliai 1,6 milijardai dviračių yra naudojami visame pasaulyje – kosmopolitiniuose miestuose, tolimuose užmiesčio keliuose, nedidelėse gyvenvietėse. Šimtai milijonų dviračių yra gaminami kiekvienais metais siekiant patenkinti vis didėjančią paklausą šiai nebrangiai transporto rūšiai.

Žmonės dviračius dažnai renkasi kaip transporto priemonę važiuojant į darbovietes. Tam turi įtakos pakilusios kuro kainos. Važiuoti dviračiu kur kas ekonomiškiau nei leisti pinigus brangstantiems degalams. Kita vertus, dviračiai populiarėja ne tik dėl taupymo, nes važinėjimasis dviračiu yra ir puikus būdas laisvalaikio praleidimui, susisiekimui, turizmui, sportavimui, varžyboms, sveikatai gerinti – galimybė patikrinti savo fizinį stiprumą ir moralinį tvirtumą. Galiausiai tai yra gera proga užsukti į gražiausius kampelius, pakeliauti kalnų perėjomis ir didžiųjų upių pakrantėmis, aplankyti naujus ir senus miestus, riedėti miško keliukais, kur galima mėgautis vėsa, klausytis raminančio lapų šlamesio.

Dviratis suteikia ne tik didesnę judėjimo laisvę, bet ir padaro žmogų atviresnį gamtai. Skirtingai nei automobilyje ar autobuse, važiuodami dviračiu galime tiesiog jausti mus supančią aplinką: pavasario dvelksmą, vasaros karštį, lietų ant veido ir šviežią sniegą. Šia dvirate transporto priemone per trumpą laiką galima pabėgti iš triukšmingo ir užteršto miesto centro į užmiestį, kur dar pastebimi tokios gamtos pėdsakai, kokia ji buvo prieš dešimtis metų [1].

Lietuvoje pirmieji dviračiai pradėti gaminti 1951 metais Šiauliuose. Šiaulių „Vairas“ gamino dviračius berniukams „Ereliukas“, mergaitėms „Kregždutė“. 1984 m. pagamintas dešimtmilijoninis dviratis „Ereliukas“ melsvu rėmu su užrašu „dešimt milijonų“.

1993 m. reorganizavus gamyklą „Vairas“, įkurta bendra Lietuvos ir Vokietijos įmonė „Baltik Vairas“, kuri yra viena iš Vokietijos dviračių gamybos koncerno „Panther“ padalinių. Nuo tada ypatingas dėmesys yra skiriamas dviračių kokybei gerinti, siekiant konkuruoti su Vakarų Europos dviračių gamintojais. „Baltik Vairas“ gaminami dviračiai, jų komplektuojančios detalės ir mazgai bei jų atitikimas Europos standartams (EN – European normalisation) yra testuojami nepriklausomojoje Šiaulių universiteto Technologijos fakultete veikiančiame Technologiame bandymų centre (TBC). TBC nuolat vykdomi gamybiniai – technologiniai bandymai, matavimai ir tyrimai pagal „Baltik Vairas“ užsakymus. Šių vykdomų bandymų bei matavimų patikimumas ir tikslumas svarbūs „Baltik Vaire“ gaminamų dviračių kokybei [2].

Kadangi dviračio vairas yra vienas svarbiausių jo elementų, lemiančių dviračio valdymą, todėl svarbu kad vairo statinis stiprumas ir standumas atitiktų keliamus reikalavimus. Šių reikalavimų laikymasis turi įtakos dviračio kokybei ir saugumui.

Darbo objektas – dviračio vairo statinis stiprumas ir standumas.

Tyrimo tikslas – išanalizuoti ir eksperimentiškai patikrinti dviračio vairo statinį stiprumą ir standumą naudojant plėvelinius tenzojutiklius ir informacinę matavimo sistemą, valdomą „Catman“ programine įranga.

Darbe, siekiant iškelto tikslo, yra sprendžiami tokie **uždaviniai**:

1. Aptarti dviračiams taikomus standartus ir statinius dviračių bandymus.
2. Apžvelgti deformacijų ir įtempimų matavimo metodus.
3. Išnagrinėti informacinę matavimo sistemą SPIDER-8 ir jos taikymą dviračio vairo stiprumo tyrimams.
4. Atlikti dviračio vairo statinio stiprumo ir standumo eksperimentinį tyrimą.
5. Išanalizuoti eksperimentinio tyrimo rezultatus lyginant juos su BEM skaičiavimais.

Darbo struktūra ir apimtis. Darbą sudaro įvadas, 4 dalys, išvados. Pagrindinė darbo medžiaga aprašyta 29 puslapiuose, įskaitant 10 lenteles, 24 paveikslus. Taip pat pateikiamas 1 priedas. Naudotos literatūros sąrašą sudaro 17 šaltinių.

1. DVIRAČIO VAIRO BANDYMO METODIKA

Šiame skyriuje bus apžvelgiami dviračiams taikomi standartai bei dviračio vairams atliekami bandymai.

1.1. Standartų apžvalga

Kaip ir kiekvienas gaminy, taip ir dviratis bei atskiri jo mazgai turi atitikti tam tikrus reikalavimus, kurie nurodyti standartuose. Standartai sudaromi atsižvelgiant į žmonių poreikius turint tikslą, kad pagal jį gaminami dviračiai būtų kuo saugesni. Tam parengiami bandymai, kuriais būtų galima užtikrinti tiek atskirų dalių, tiek ir viso dviračio stiprumą ir ilgaamžiškumą, siekiant aukštos kokybės ir saugumo reikalavimų laikymosi, pradedant nuo projektavimo ir baigiant gaminio eksploatacija.

Už Europoje taikomus standartus yra atsakingas Europos standartų komitetas (CEN, pranc. Comité Européen de Normalisation). Jo sukurtų standartų pavadinimai prasideda raidėmis EN. Europos standartizacijos komitetas 2005 m. patvirtino saugos standartus dviračiams. Šiai Europos standartų serijai priklauso [3]:

- EN 14764 – *Miesto ir treko dviračiai. Saugumo reikalavimai ir bandymų metodai.*
- EN 14765 – *Vaikiški dviračiai. Saugumo reikalavimai ir bandymų metodai.*
- EN 14766 – *Kalnų dviračiai. Saugumo reikalavimai ir bandymų metodai.*
- EN 14781 – *Lenktyniniai dviračiai. Saugumo reikalavimai ir bandymų metodai.*
- prEN 14872 – *Dviračiai. Dviračių aksesuarai. Bagažo laikikliai.*
- prEN 15194 – *Dviračiai. Elektra varomi dviračiai. EPAC dviratis.*

Komiteto CEN nariai yra šios Europos valstybės: Airija, Austrija, Belgija, Danija, Graikija, Islandija, Ispanija, Italija, Jungtinė Karalystė, Liuksemburgas, Nyderlandai, Norvegija, Portugalija, Prancūzija, Suomija, Švedija, Šveicarija, Vokietija, Bulgarija, Čekija, Estija, Kipras, Latvija, Lenkija, Lietuva, Rumunija, Slovakija, Slovėnija, Turkija ir Vengrija.

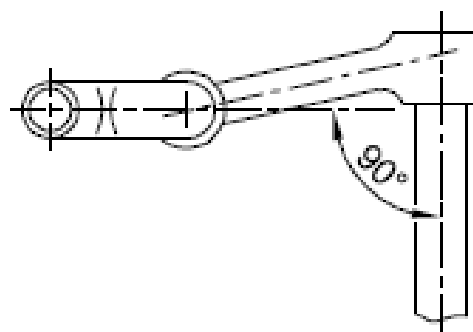
Standartai reikalauja iš gamintojo atlikti ne tik viso gaminio, bet ir atskirų jo elementų (rėmo, vairo ir pan.) tyrimus. Bandymų rezultatai laikomi teigiamais, jeigu po atliktų tyrimų nenustatomi lūžiai, įtrūkimai, įbrėžimai ar leistinus dydžius viršijantys konstrukcijos formos pakitimai.

1.2. Dviračio vairo bandymai

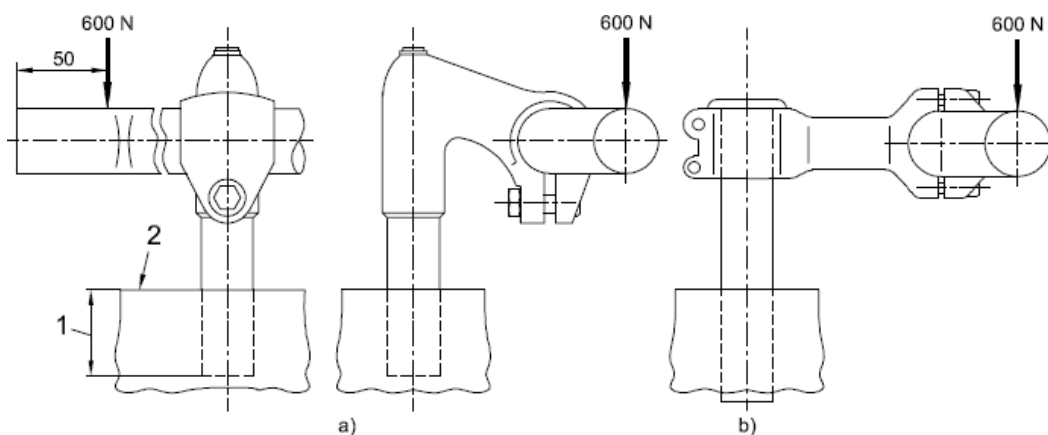
Dviračio vairo bandymai yra skirstomi į statinius ir dinامينius. Kadangi šiame darbe bus tiriamas dviračio vairo šatinis stiprumas ir standumas, todėl toliau bus aptariami statiniai dviračio vairo bandymai – bandymai vairų gamintojams ir dviračių gamintojams, kurie vairų negamina.

1.2.1. Statinis dviračio vairo bandymas vairų gamintojams

Šis bandymas skirtas vairus ir vairo stiebus gaminantiems gamintojams bei dviračių gamintojams. Bandymo metu vairo rankenos yra sulyginamos taip, kad jos būtų statmenoje stiebo ašiai plokštumoje (1.1 pav.), jeigu vairas ir jo stiebas nesutvirtinti suvirinimo ar litavimo būdu. Vairas atitinka reikalavimus, jei statinio bandymo metu apkrovas vertikaliai žemyn veikiančia 600 N jėga į tašką, esantį 50 mm nuo laisvojo vairo galo, kaip parodyta (1.2 pav.), nuolatinė liekamoji deformacija bandymo metu neviršija 15 mm ir ant vairo nėra įtrūkimų ar lūžių. Jėga turi būti išlaikoma 1 min. [3].



1.1 pav. Reguliuojamo vairo parengimas bandymui

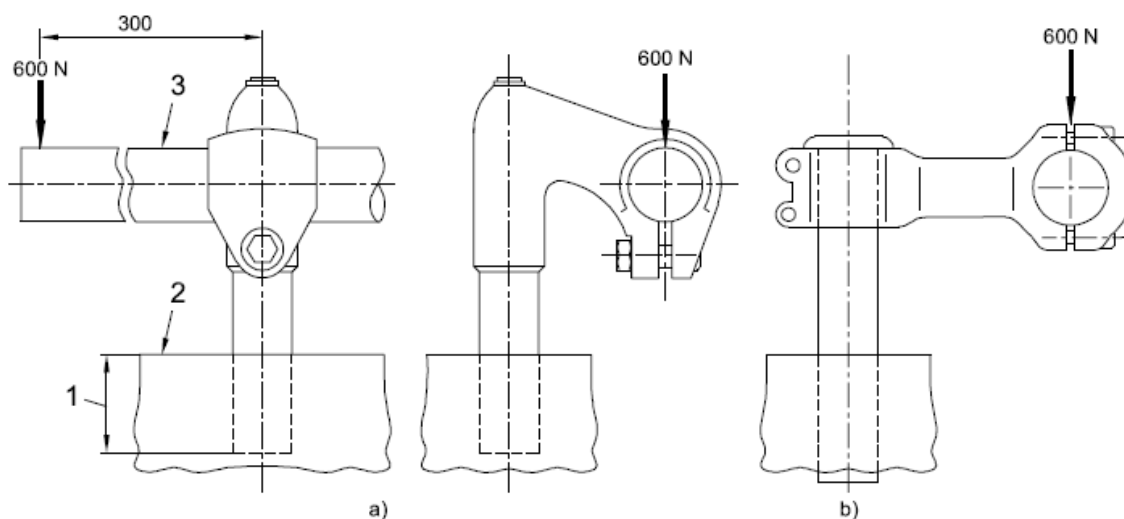


1.2 pav. Statinio bandymo tvirtinimo ir apkrovimo schema: a) – nereguliuojamo vairo parengimas; b) – veikiančių jėgų pozicijos; 1 – minimalus įleidimo gylis; 2 – tvirtinimo blokas

1.2.2 Statinis dviračio vairo bandymas gamintojams, kurie negamina vairų

Šis bandymas skirtas gamintojams, kurie negamina vairų – vairs užsisako iš kito gamintojo ar tiekėjo.

Jeigu bandomas vairas yra su įvove, skirta jį įleisti į šakės kotą, tai ji turi būti įtvirtinama į pagrindą minimaliame įleidimo gylyje. Prie stiebo primontuojamas bandomas vairas ir jis veikiamas 600 N jėga į tašką, esantį 300 mm nuo stiebo ašies, kaip parodyta (1.3 pav.). Jėga turi būti išlaikoma 1 min. Atlikus bandymą, ant vairo ar jo stiebo neturi būti jokių įtrūkimų ar lūžių, o nuolatinė liekamoji deformacija bandymo jėgos veikimo, bandomos jėgos veikimo kryptimi, neviršys 10 mm [3].



1.3 pav. Dviračio vairo ir stiebo statinis bandymas: a) – stiebo ir vairo kombinacija; b) – stiebo pratesimas

2. DEFORMACIJŲ IR ĮTEMPIMŲ MATAVIMO METODAI IR PRIEMONĖS

Šiame skyriuje bus aptariamos deformacijos ir įtempimai metaluose, jų matavimo metodai, priemonės bei matavimo sistema.

2.1. Matavimo metodų apžvalga

Deformacijoms, įtempimams matuoti plačiai taikomi elektromechaniniai, optiniai, fototamprumo, ultragarsiniai metodai [4].

Ultragarsiniai matavimo metodai pagrįsti ultragarso bangų atspindžiu nuo dviejų aplinkų skiriamos ribos. Jie dažniausiai susideda iš dviejų ultragarsinių pjezoelektrinių keitiklių (siųstuvo ir imtuvo), elektrinių signalų generatoriaus, komutacinės ir informacijos apdorojimo sistemos (mikroprocesoriaus) ir rezultatų rodymo, spausdinimo arba įvedimo į elektroninę skaičiavimo mašiną įrenginio. Ultragarso siųstuvas skleidžia ultragarsą, kuris, atsispindėjęs nuo tiriamo objekto arba per jį praėjęs, patenka į ultragarso imtuvą. Palyginus išsiųstąjį signalą su atspindėtu arba per objektą praėjusiu signalu, gaunama reikiama informacija.

Naudojant optinį metodą, objekto poslinkis nustatomas pagal tai, kiek erdvėje pasislenka su objektu susijęs elementas, keičiantis šviesos srauto intensyvumą. Elemento poslinkis išmatuojamas optiniu metodu, registruojant kokiu nors fotoimtuvu (fotoelementu, fotodiodu) elemento moduliuotą šviesos srautą. Tiksliausi yra diskretiniai matavimo metodai, kuriuos taikant tolydinis poslinkis pakeičiamas diskretinių erdvėje šviesos, o po to elektrinių impulsų seka. Pasiekama matavimo paklaida yra $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Fototamprumo metodas naudojamas įtempimams nustatyti sudėtingos formos detalių ar konstrukcijų modeliuose, esant tampriam deformavimui, kai analitiškai apskaičiuoti įtempimus dėl sudėtingos detalės formos negalima. Šis būdas dažniausiai taikomas plokščiojo įtempimų būviui nagrinėti.

Fototamprumo metodas pagrįstas tuo, kad fototampri medžiaga, kurioje apkraunant susidaro įtempimai, suskaido poliarizuotą šviesą į du spindulius, kurių sklidimo greičiai medžiagoje yra skirtingi. Analizuojant gautąjį vaizdą, galima nustatyti veikiančius įtempimus.

Elektromechaniniai matavimo metodai gali būti pagrįsti tenzometrijos principu: matuojama metalinio arba puslaidininkinio tenzorezistoriaus varža kinta, priklausomai nuo deformacijos. Jautrusis elementas – tenzorezistorius gali būti pakeistas, pvz., induktyviaisiais arba talpiniais keitikliais [4].

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 keitikliai. Tenzorezistoriai būna vieliniai, foliniai, plėveliniai ir puslaidininkiniai.

Vieliniai tenzorezistoriai susideda iš vielelių, įklijuotų tarp dviejų popieriaus lapelių. Vielos skersmuo 0,015 – 0,05 mm, minimali bazė $L=2$ mm, varža $R=50 - 800 \Omega$, maksimali leistina deformacija 1%. Tenzorezistoriai užklijuojami ant tiriamojo objekto ir objektas deformuojamas bazės kryptimi, tuomet turime didžiausią varžos pokytį.

Folijiniai tenzorezistoriai gaminami ėsdinimo būdu iš 0,004 – 0,02 mm storio folijos. Jų minimali bazė 0,4 mm, $R=50 - 800 \Omega$, maksimali leistina deformacija 2%.

Plėveliniai tenzorezistoriai gaminami užgarinant ant izoliacinio pagrindo ploną tenzojautrios medžiagos sluoksnį. Tenzorezistoriaus formą apsprendžia šablonas, per kurį vyksta užgarinimas.

Tenzorezistoriai paprastai yra tvirtai priklijuojami prie stangraus elemento, kuris ir perduoda jiems deformaciją. Deformuojantis tenzorezistoriui (tempiant ar gniuždant išilgai bazės) keičiasi santykinis jo varžos pokytis [4]:

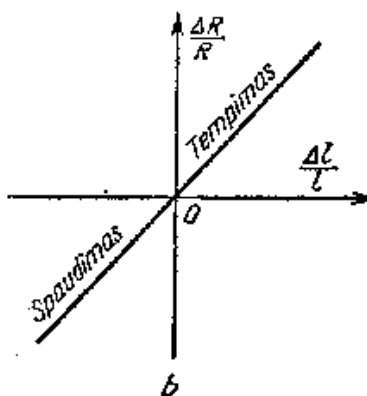
$$\frac{\Delta R}{R} = S_M \cdot \frac{\Delta l}{l} = S_M \cdot \varepsilon, \quad (2.1)$$

čia: $\frac{\Delta R}{R}$ – santykinis varžos pokytis; $\frac{\Delta l}{l}$ – santykinis ilgio pokytis; S_M – koeficientas priklausantis nuo vielutės medžiagos, ε – santykinė deformacija.

Tenzorezistoriaus jautrio koeficientas:

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

čia: $\nu = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e}$ – Puasono koeficientas; $m = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$ – savitosios varžos pokytis.



2.1 pav. Vielinio tenzodaviklio charakteristika

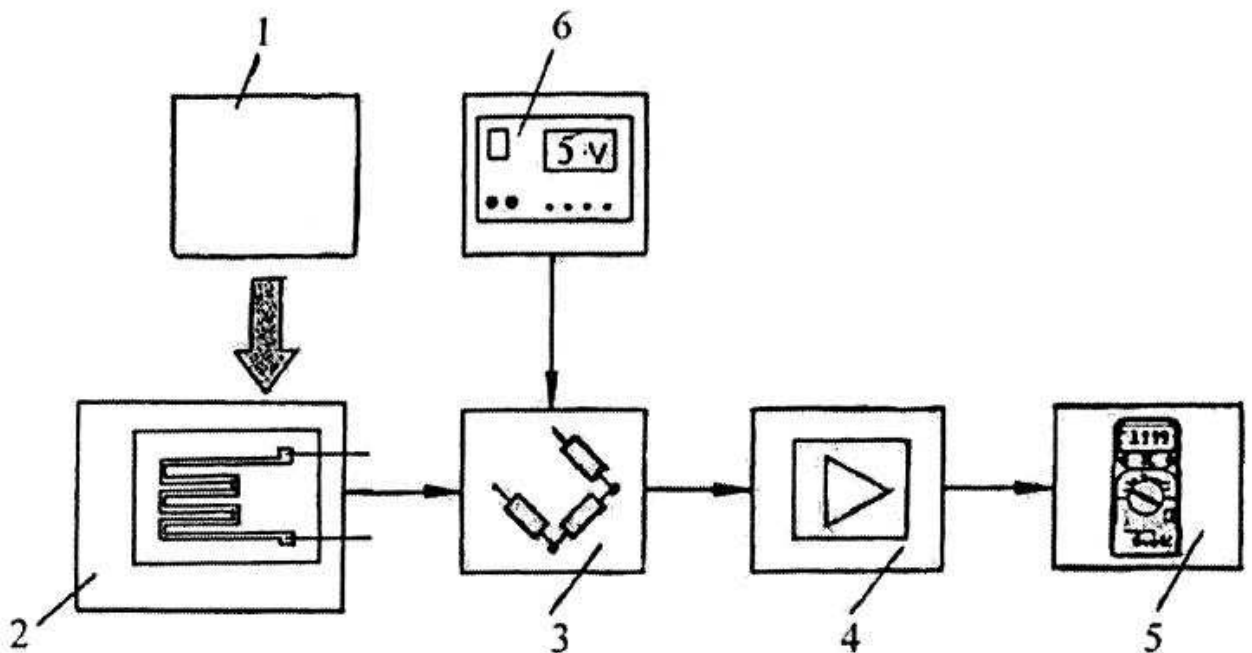
Šiame darbe deformacijoms matuoti pasirinkti tenzorezistoriniai jutikliai, kadangi lengvai kalibruojami, duomenys saugomi ir apdorojami asmeniniame kompiuteryje. Jais galima matuoti statines ir dinamines deformacijas. Vielinio tenzodaviklio charakteristika pateikta 2.1 paveiksle.

2.2. Matavimo sistema

Tenzodaviklio pagrindinė matavimo sistemos blokinė schema pateikta (2.2 pav.).

Pirminis keitiklis (2) matuojamą dydį, gautą iš tiriamojo objekto (1), keičia į registravimui patogesnę signalą (varžos ar įtampos pokytį). Pagrindinė keitiklio dalis yra jautrusis elementas su priklijuotais aktyviais tenzorezistoriais. Jis montuojamas ant tiriamojo objekto (1) [5].

Deformuojantis jautriam elementui, kinta priklijuoto aktyviojo tenzorezistoriaus R_t varža. Todėl jautrusis elementas vadinamas pirminiu keitikliu, kuris deformacijos pokytį keičia į tenzorezistoriaus varžos pokytį. Kadangi matuoti varžos pokytį tiesiogiai yra nepatogu, jautriojo elemento tenzorezistorius jungiamas į varžų (Vinstono) tiltelio (3) schemą (2.3 pav.), maitinama įtampa U_m , gaunama iš įtampos stabilizatoriaus (6) [5].



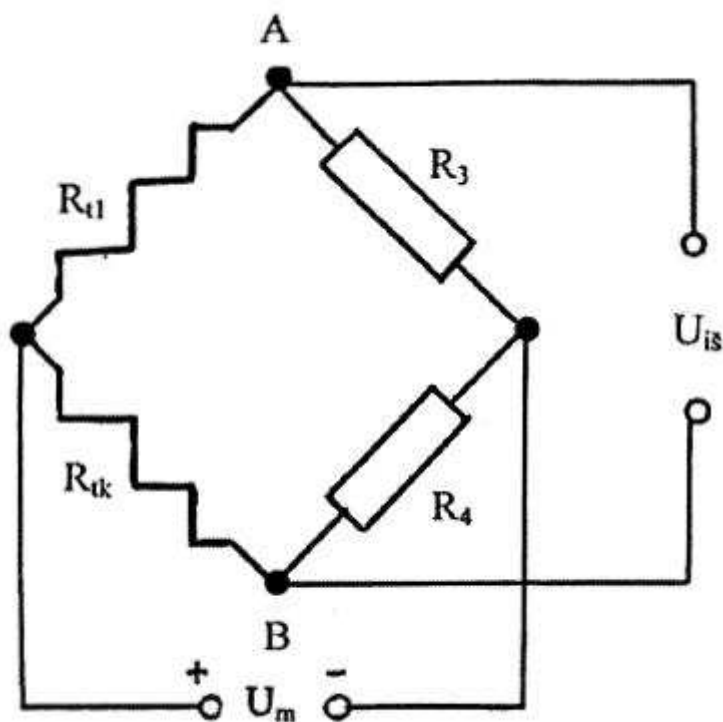
2.2 pav. Blokinė matavimo sistemos schema: 1 – tiriamas objektas; 2 – jautrusis keitiklio elementas (pirminis keitiklis); 3 – varžų matavimo (Vinstono) tiltelis; 4 – tiltelio disbalanso įtampos (matavimo) stiprintuvas; 5 – signalo vaizdavimo prietaisas; 6 – nuolatinės įtampos stabilizatorius (maitinimo šaltinis)

Tiltelis atlieka antrinio keitiklio vaidmenį, kuriame aktyviojo tenzorezistoriaus varžos pokytis keičiamas į įtampos disbalanso pokytį, kurį žymiai paprasčiau matuoti. Kad tiltelį būtų galima subalansuoti, panaudojamos dar kelios varžos: R_3 , kuri atsveria daviklio varžą R_t , ir maždaug vienodos reguliuojamos varžos R_{tk} ir R_4 . Kaitaliodami reostatu varžų R_{tk} ir R_4 santykį, tiltelį subalansuojame taip, kad srovė iš šaltinio nebeteka per tiltelį. Deformavus tiriamą objektą ir drauge su juo jautrijį elementą, varžų santykis pakinta ir elektros srovė tilteliu ima tekėti. Rodomas srovės stiprumas yra proporcingas daviklio varžos pokyčiui, taigi ir tiriamai deformacijai [6].

Labai tiksliai parinkti tiltelio elementu varžas sunku, naudojamos tiltelio balansavimo schemos, kurios prieš bandymą nustato išėjimo įtampą:

$$U_{is} = 0 \quad (2.3)$$

Matuojamos įtampos vertė U_{is} yra labai maža. Signalui sustiprinti naudojamas matavimo stiprintuvas (4 – 2.2 pav.). Sustiprintas signalas paduodamas į signalo atvaizdavimo prietaisą (5 – 2.2 pav.).



2.3 pav. Vinstono tiltelio schema

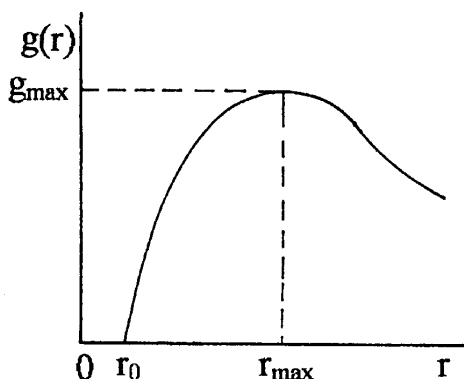
2.3. Įtempimai ir deformacijos metaluose

Dabartiniai dviračių vairai dažniausiai gaminami iš metalo, aliuminio ir anglies pluošto. Darbe bandymas bus atliktas su dviračio vairu, kuris pagamintas iš plieno C20.

Metalai kietajame būvyje yra polikristaliniai kūnai sudaryti iš įvairiai orientuotų kristalų. Kietasis kūnas išlaiko savo formą dėl to, kad tarp jo mikrodalelių (atomų, molekulių, kristalų ir t.t) egzistuoja vidinės sąveikos jėgos. Paveikus kūną išorinėmis jėgomis, jis deformuojasi, – nuotoliai tarp mikrodalelių pasikeičia (didėja ir mažėja, – kartu kinta ir vidinių sąveikos (sankabos) jėgų tarp jų didumas). Intensyvėjant išorinėms jėgoms vidinės jėgos taip pat didėja, tačiau ne iki begalybės: joms pasiekus atitinkamas reikšmes, elementas suyra (trapios medžiagos) arba neleistinai deformuojasi (plastinės medžiagos). Kūno dalelių tarpusavio sąveikos jėgos priešinasi šių dalelių tarpusavio šlyčiai. Kūno elementariųjų dalelių sankibos jėgų intensyvumas g priklauso nuo atstumo r tarp dviejų gretimų dalelių (2.4 pav.). Kai $g = 0$, t.y., kai kūnas yra nedeformuotas, tarpai tarp dalelių atitinka r_0 atstumą. Didinant atstumą $r (> r_0)$ sankibos jėgos greitai didėja ir pasiekia didžiausią reikšmę $r = r_{max}$. Toliau didinant atstumą $r (> r_{max})$ šios jėgos staigiai mažėja. Atstumui kintant nuo r_0 iki r_{max} egzistuoja tokia priklausomybė [7, 8, 10]:

$$g_{max} = E \cdot \varepsilon_{max}, \quad (2.4)$$

čia: $\varepsilon_{max} = r_{max}/r_0 - 1$ – santykinė deformacija.



2.4 pav. Idealiuojo kristalo sankibos jėgų intensyvumo ir atstumo tarp dviejų gretimų atomų plokštumų tarpusavio priklausomybė

Didžiausia sankibos jėgų intensyvumo reikšmė g_{max} nusako medžiagos teorinį stiprį, t.y. stiprį, kurį turėtų kietasis kūnas, jeigu jo struktūra būtų sudaryta iš idealiuojo kristalo. Teorinis medžiagų stipris yra ta riba, kurios reikia siekti. Tačiau realusis, dar vadinamas techniškuoju, medžiagų stipris yra 2–3 dydžių eilėmis mažesnis už teorinį. To priežastis yra realių makroskopinių kūnų struktūros defektai.

Realių kietųjų kūnų nevienalytėje struktūroje visada sutinkami įvairios prigimties defektai: dislokacijų ir vakansijų sancaupos, įvairios formos ir struktūros užpildai (intarpai), poros, mikroplyšiai, kurie gali būti „užprogramuoti“ jau pačioje medžiagos gamybos technologijoje [7].

Daugelis inžinerinių konstrukcijų patiria mažas deformacijas ir jų ryšys su įtempimais yra tiesinis. Įtempimų riba, iki kurios galioja tiesinis ryšys tarp įtempimų ir deformacijų, yra išreiškiamas Huko dėsnio [9, 12]:

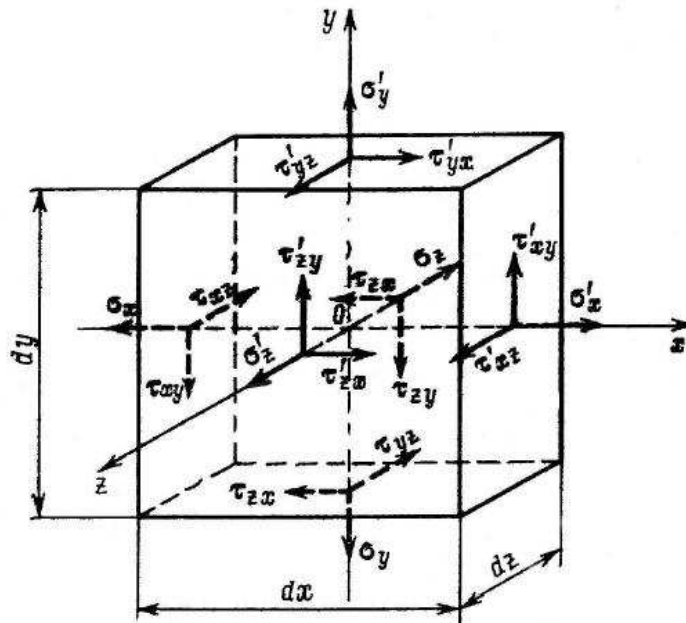
$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.5)$$

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

Įtempimų būvis bet kuriame kūno taške (2.5 pav.) nustatomas įtempimų tenzoriumi [9, 10, 11, 13]:

$$T_{it} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (2.6)$$

čia: σ_{ij} – normalinių įtempimų komponentės, τ_{ij} – tangentiųjų įtempimų komponentės ($i - x, y, z$; $j - x, y, z$).



2.5 pav. Apkrauto kūno tašką veikiantys įtempimai

Įtempimų tenzorių galima išskaidyti į sferinį tenzorių T_{it}^0 ir įtempimų tenzorių – deviatorių

D_{it}^H :

$$T_{it} = T_{it}^0 + D_{it}^H, \quad (2.7)$$

Sferinis tenzorius (tūrio pokytis):

$$T_{it}^0 = \begin{pmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{pmatrix}, \quad (2.8)$$

čia: σ_m – vidutinis įtempimas.

Sferinio įtempimų tenzoriaus komponentai sukelia tūrio deformacijas.

Tenzorius deviatorius (formos pokytis):

$$D_{it}^H = \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

Tenzoriaus deviatoriaus komponentai yra susiję su formos pokyčiais.

Deformacijų būvis bet kuriame kūno taške nustatomas deformacijų tenzoriumi [9,11,12, 13]:

$$T_{def} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

čia: ε – santykinė linijinė deformacija, γ – šlyties deformacija.

Deformacijų tenzorius taip pat skaidomas į deformacijų tenzorių ir deformacijų tenzorių deviatorių.

$$T_{def} = T_{\varepsilon}^0 + D_{\varepsilon}, \quad (2.11)$$

$$T_{\varepsilon}^0 = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

$$D_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_m & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y - \varepsilon_m & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z - \varepsilon_m \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

čia: $\varepsilon_m = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)/3$ – vidutinė linijinė deformacija.

Tarp įtempimų ir deformacijų komponentų egzistuoja tam tikra priklausomybė. Mažų deformacijų ribose ši priklausomybė yra tiesinė ir apibūdinama apibendrintu Huko dėsniumi [9,11,12,13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)], \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \\ \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}, \end{array} \right. \quad (2.14)$$

čia: ν – Puasono koeficientas, E – tamprumo modulis, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – tamprusis šlyties modulis

(medžiagos standumo charakteristika).

Šis dėsnis apytikslis ir duoda gerus rezultatus tik pradinėje apkrovimo stadijoje.

3. DVIRAČIO VAIRO STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS NAUDOJANT SKAITINIUS METODUS

Šioje dalyje bus aptariama dviračio vairo eksperimentinio tyrimo metodika, pateikiama tyrime naudoto vairo medžiagų charakteristika bei baigtinių elementų metodo tyrimo rezultatai.

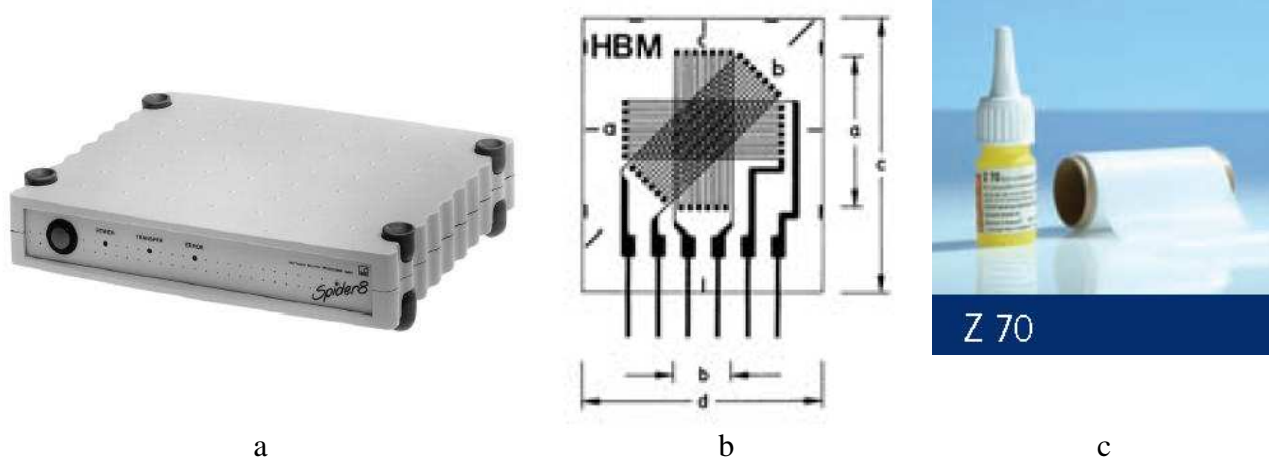
3.1. Dviračio vairo eksperimentinio tyrimo metodika

Matavimams pasirinkta kompiuterinė matavimo sistema su analoginiu skaitmeniniu keitikliu *SPIDER-8* (3.3 pav.), duomenų registravimo ir tvarkymo programą „Catman Professional“, trijų sukryžiuotų tenzorezistorių rozetę 1-RY91-3/120, kljus Z 70 (3.1 pav.). Rozetės duomenys pateikti 3.1 lentelėje.

SPIDER-8 yra daugiakanalė skaitmeninė matavimo sistema, dinaminio matavimo duomenų kaupimui, naudojant kompiuterį. Ji atlieka visas pagrindines funkcijas – gauna, apdoroja ir pateikia tiriamojo objekto informaciją per prijungtą spausdintuvą ar kompiuterį. Asmeninių kompiuterių pagalba matavimams vaidina svarbų vaidmenį, nes naudojant kompiuterius, matavimo prietaisai tampa vis mažesni ir pigesni [14].

3.1 lentelė Rozetės duomenys

Rūšis	Vardinė varža, Ω	Matmenys, mm				Maksimali leistina tilto žadinimo įtampa, V
		a	b	c	d	
Plienas	120	3	1,3	9	9	2
1-RY91-3/120						



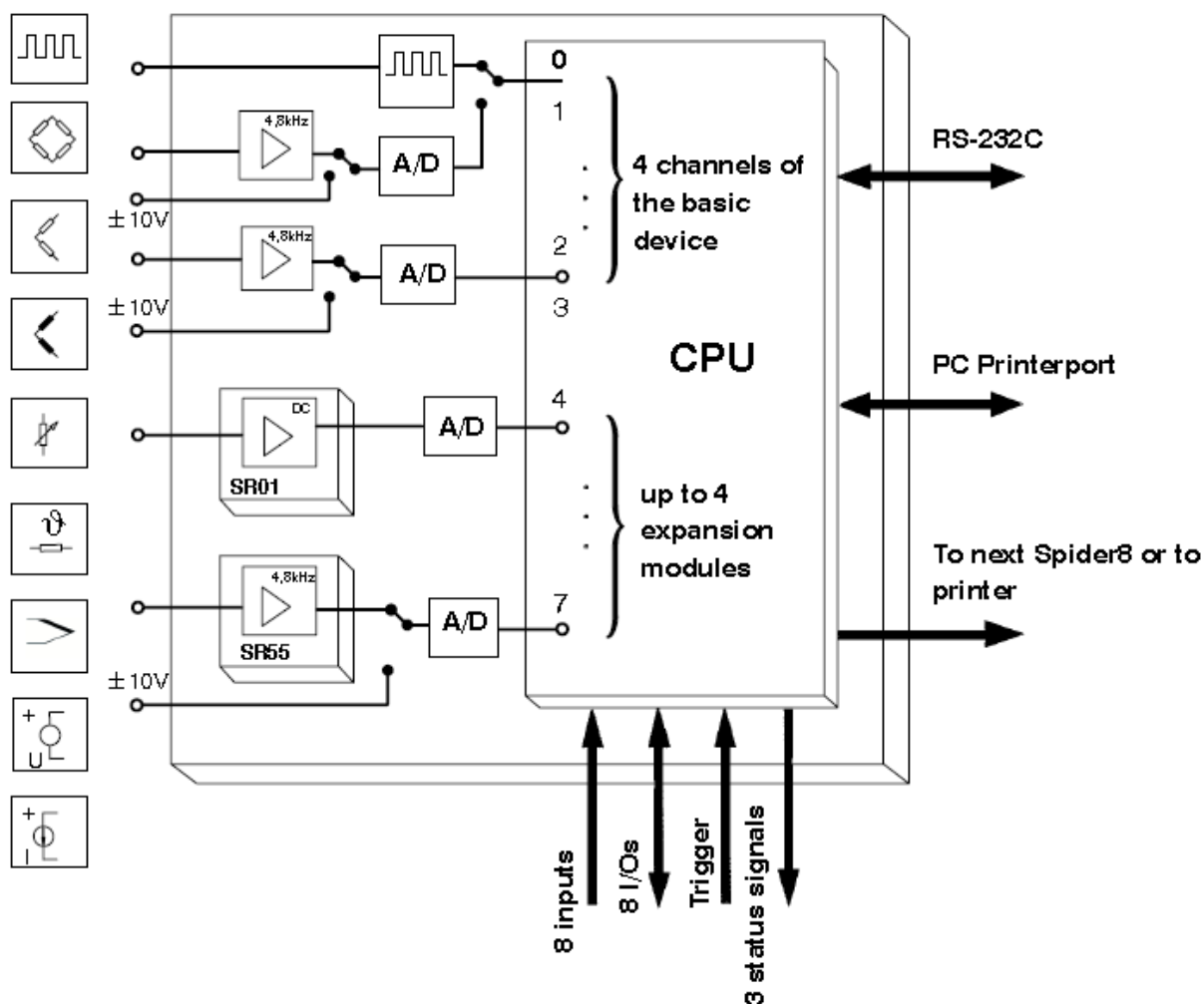
3.1 pav. Kompiuterinė matavimo sistema *SPIDER-8* a, rozetė 1-RY91-3/120 b ir kljiai Z 70 c

SPIDER-8 atlieka tokias matuojamojo dydžio keitimo funkcijas – matuojamojo dydžio pajautimą, šio priimtojo dydžio pakeitimą į elektrinį signalą, jo stiprinimą, analoginio signalo

keitimą į skaitmeninį ir filtravimą. Kiekvienas *SPIDER-8* kanalas turi maitinimo šaltinį pasyviems deformacijų keitikliams, stiprintuvą, filtrą ir analoginį skaitmeninį (A/D) keitiklį. Visi A/D keitikliai veikia sinchroniškai ir tiekia iki 9600 matavimų per sekundę. Ši sistema tinka naudoti su tenzorezistoriniais, induktyviniais, potenciometriniais ir kitais deformacijų matavimo jutikliais. Schematinis matavimo signalo apdorojimas pavaizduotas 3.2 pav. Įrenginys turi 8 kanalus, bet esant reikalui galima sujungti aštuonis *SPIDER-8* ir gauti 64 kanalus. Eksperimentiniams matavimams galima pasirinkti tris tiltelio jungimo būdus: ketvirtį tilto, pusės tilto ir visą tiltą [14].

Matavimo metu gauti duomenys keliauja į kompiuterį, kur gauti rezultatai apdorojami „Catman“ programa. Ji atlieka tokias funkcijas:

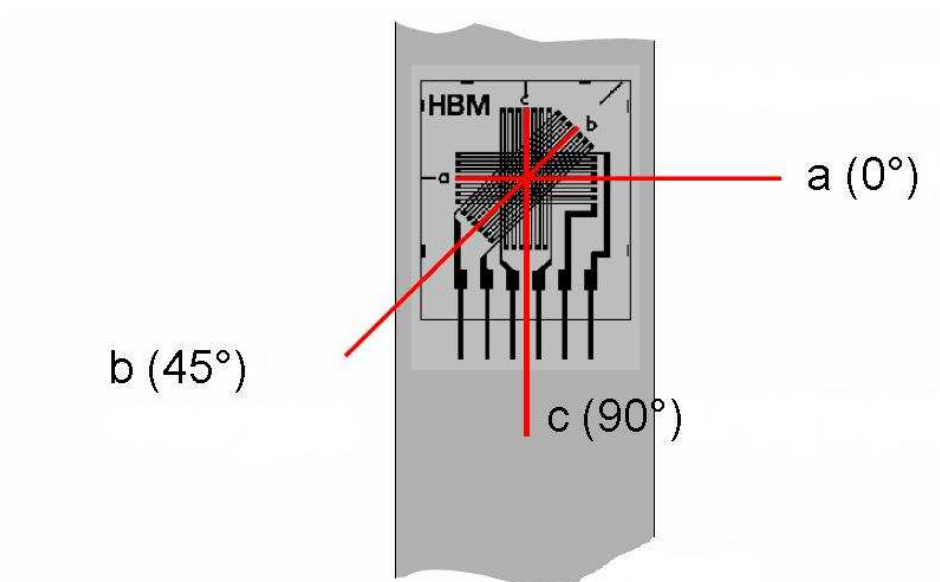
- matematinė analizė (signalų analizė, statistika, ir t.t.);
- grafinė vizualizacija;
- duomenų registravimas ir įrašymas.



3.2 pav. Schematinis matavimo signalo apdorojimas *SPIDER-8*

Bandymui pasirinkta tenzorezistoriaus rozetė 1-RY91-3/120, nes dviračio vairas yra sudėtingos formos ir sudėtinga nustatyti svarbiausius įtempimus bei kryptis. Rozetę sudaro trys poros tenzorezistorių, išdėstytų vienas kito atžvilgiu 45° kampu (3.3 pav.).

Prieš klijuojant rozetę ant bandinio, paviršių būtina nušveisti smulkiu švitriniu popieriumi, paskui nuriebalinti paviršių. Naudojant pieštuką ar žymeklį pažymima tenzorezistoriaus rozetės vieta. Klėjai paskleidžiami ant paviršiaus ir atsargiai naudojant lipnią juostą rozetė prispaudžiama prie paviršiaus (3.4 pav.).

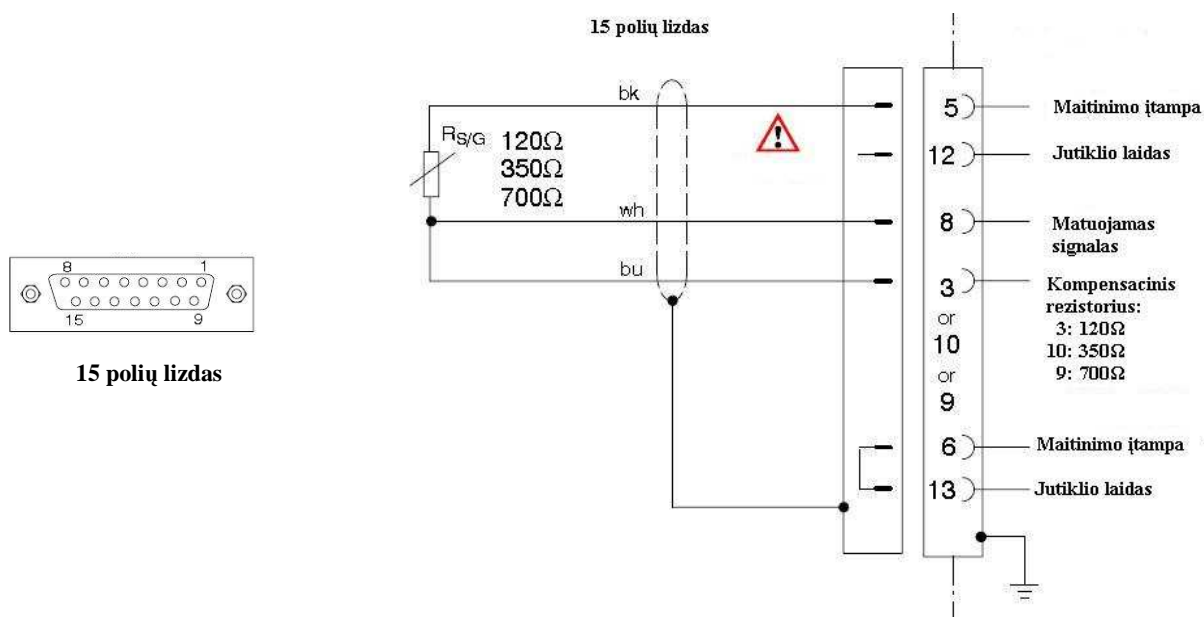


3.3 pav. Tenzorezistoriaus rozetės tvirtinimas



3.4 pav. Tenzorezistoriaus rozetės klijavimas

Tenzorezistoriaus rozetę sudaro 3 poros tenzorezistorių. Kiekvieną porą tenzorezistorių 15 polių lizde jungiami atskirai pagal schemą (3.5 pav.) į ketvirtadalį tinklelio [14].



3.5 pav. Jutiklių sujungimo schema

Šiuolaikinės kompiuterinės technologijos labai supaprastina sudėtingų inžinerinių konstrukcijų projektavimo galimybes. Šios technologijos sudaro sąlygas visapusiškai modeliuoti konstrukcijų būvį be prototipų bandymo, kuriems gaminti bei testuoti reikia didelių materialinių bei laiko sąnaudų. Baigtinių elementų metodo pagrindu (BEM) yra sukurta daug universalių bei specializuotų kompiuterinių programų, kurios leidžia greitai ir patikimai iširti projektuojamas sistemas ir dar esant projektavimo stadijai patikrinti ir prognozuoti jų savybes.

Šiame darbe skaičiavimai atlikti su kompiuterine projektavimo sistema „Autodesk Inventor“. Su papildomu „ANSYS“ programos paketu galima atlikti projektuojamų detalių įtempimų analizę (stress analysis), kurioje galima vizualiai pamatyti įtempimų pasiskirstymą detalėje, atsargos koeficientą, ekvivalentinius įtempimus ir kt. Iš to galima spręsti, ar suprojektuota detalė yra tinkama gamybai. Programoje įdiegti svarbiausi moderniausių technologijų simuliacijos metodai, todėl ji suteikia vartotojui aukšto lygio simuliacijos galimybes, nereikalaujama pateikti aukšto lygio ekspertizės [15].

Kaip ir daugeliui BEM programinių paketų, „ANSYS“ programavimas atliekamas tokia tvarka [15]:

- konstrukcijos ar elemento geometrinio modelio sudarymas (3.6 pav.);
- medžiagos charakteristikų nurodymas;
- veikiančių jėgų nurodymas;
- skaičiavimas;
- rezultatų įrašymas į duomenų failus.



3.6 pav. Dviračio vairo modelis

3.2. Medžiagos charakteristikos

Eksperimentas atliktas su dviračio vairo, kuris pagamintas iš plieno C20 vamzdžių. Plieno C20 cheminė sudėtis ir mechaninės savybės pateiktos 3.2 ir 3.3 lentelėse. Šios medžiagos tamprumo modulis $E = 2 \cdot 10^{11}$ MPa, Puasono koeficientas – $\nu = 0,3$ [16, 17].

3.2 lentelė Plieno C20 cheminė sudėtis

C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	S, %	P, %	Cr, %	Cu, %	As, %
0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	iki 0,25	iki 0,04	iki 0,04	iki 0,25	iki 0,25	iki 0,08

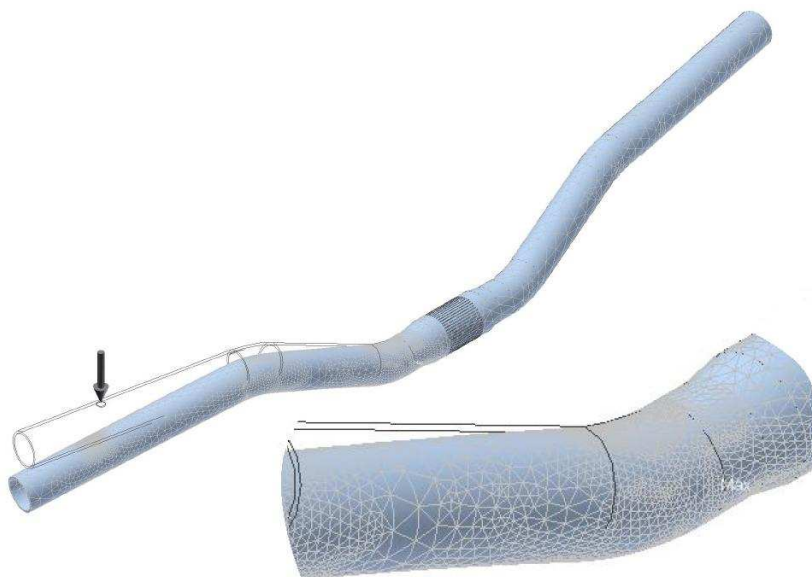
3.3 lentelė Plieno C20 mechaninės charakteristikos

Plienas C20	Takumo riba σ_y , MPa	Stiprumo riba σ_u , MPa	Santykinis ištyrimas trūkio metu δ_5 , %	Santykinis skerspjūvio susitraukimas ψ , %
	245	410	25	55

3.3. Skaičiavimo BEM rezultatai

Vairo preliminariems statiniams skaičiavimams panaudotas „ANSYS“ programinis paketas. Pirmame paruošimo etape sudaromas modelis, pridedamos apkrovos ir tvirtinimai. Čia nustatomi pradiniai duomenys, reikalingi sprendimui. Pridedama jėga nutolusi 50 mm nuo laisvo vairo galo (3.7 pav.). Vairas įtvirtintas standžiai tvirtinimo vietoje – suvaržytas 6 laisvės laipsniais.

Pasirenkamos mechaninės medžiagos savybės, baigtinių elementų tinklelio tankis. Tinklelio tankis parinktas toks, kad gauti rezultatai skiriasi mažiau kaip 10 procentų.



3.7 pav. Dviračio vairas suskaidytas į geometrinius elementus

3.4 lentelė Dviračio vairo geometriniai parametrai

Autodesk® ANSYS™	
Gabaritiniai matmenys	70,33 mm 58,5 mm 565,3 mm
Detalės masė	0,392 kg
Detalės tūris	4,992e+004 mm ³
Tinklelio nustatymas	87
Mazgai	14408
Elementai	7177

3.5 lentelė Medžiagos techninės charakteristikos

Plienas C20	
Tamprumo modulis	2,e+005 MPa
Puasono koeficientas	0,3
Medžiagos tankis	7,85e-006 kg/mm ³
Takumo riba	245,0 MPa
Stiprumo riba	410,0 MPa

3.6 lentelė Jėgų ir atramų duomenys

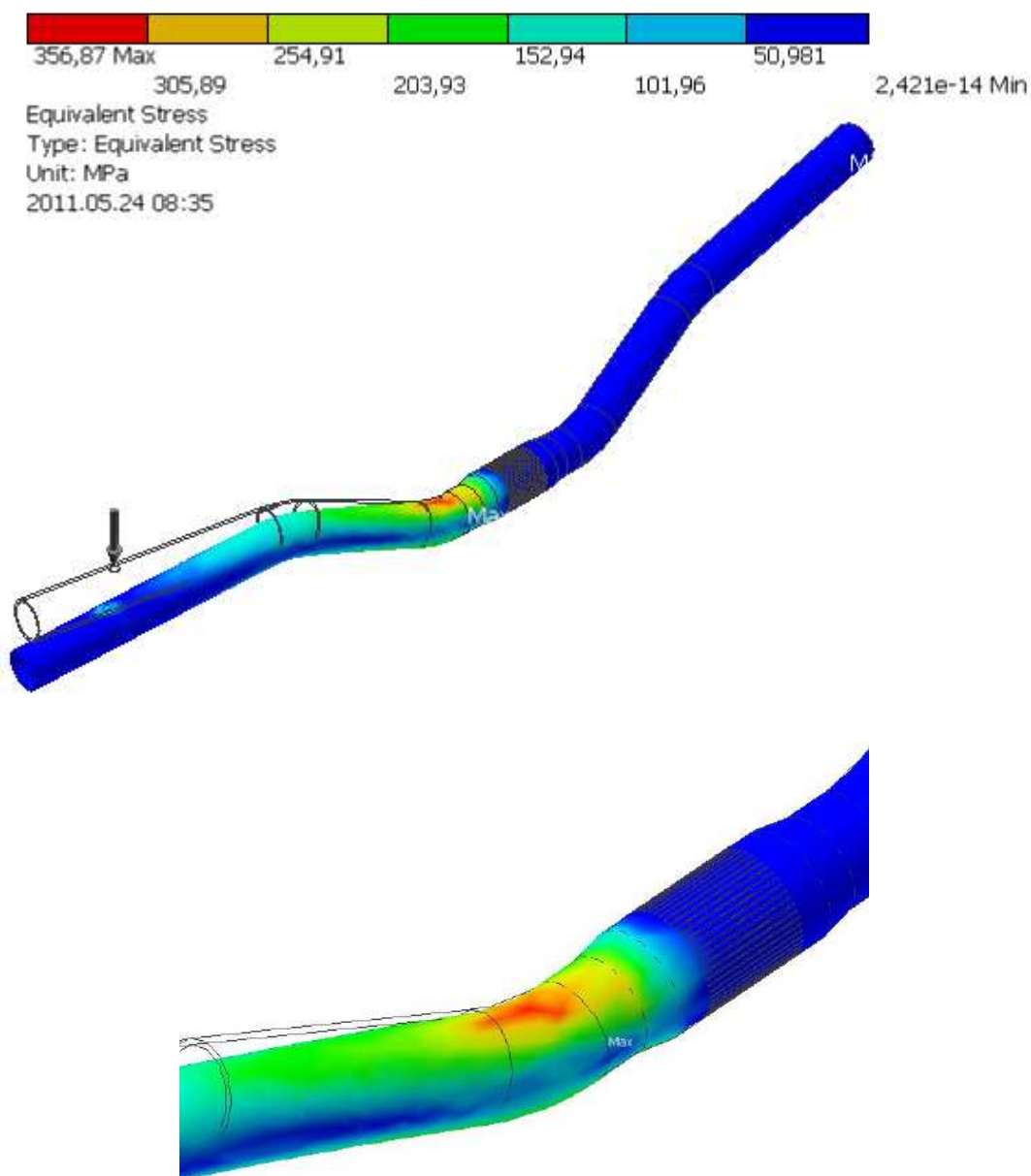
Pavadinimas	Tipas	Apkrovos dydis	Vektorius
Jėga	Išorinė jėga	600,0 N	0,0 N -600,0 N 0,0 N
Fiksuota atrama	Paviršius fiksuotai atramai	0,0 mm	0,0 mm 0,0 mm 0,0 mm

3.7 lentelė Atramų reakcijos

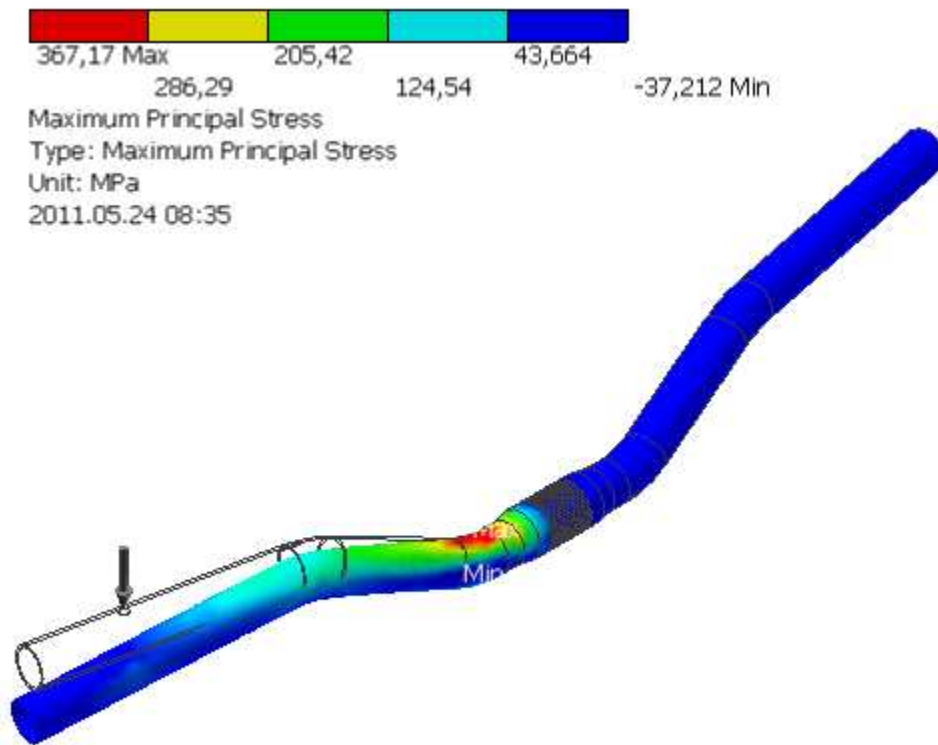
Pavadinimas	Jėga	Vektorius	Momentas	Momento vektorius
Fiksuota atrama	600,0 N	3,728e-008 N 600,0 N 5,037e-009 N	1,524e+006 N·mm	-1,524e+006 N·mm 1,37e-003 N·mm 2,219e+004 N·mm

3.8 lentelė Skaičiavimo rezultatai

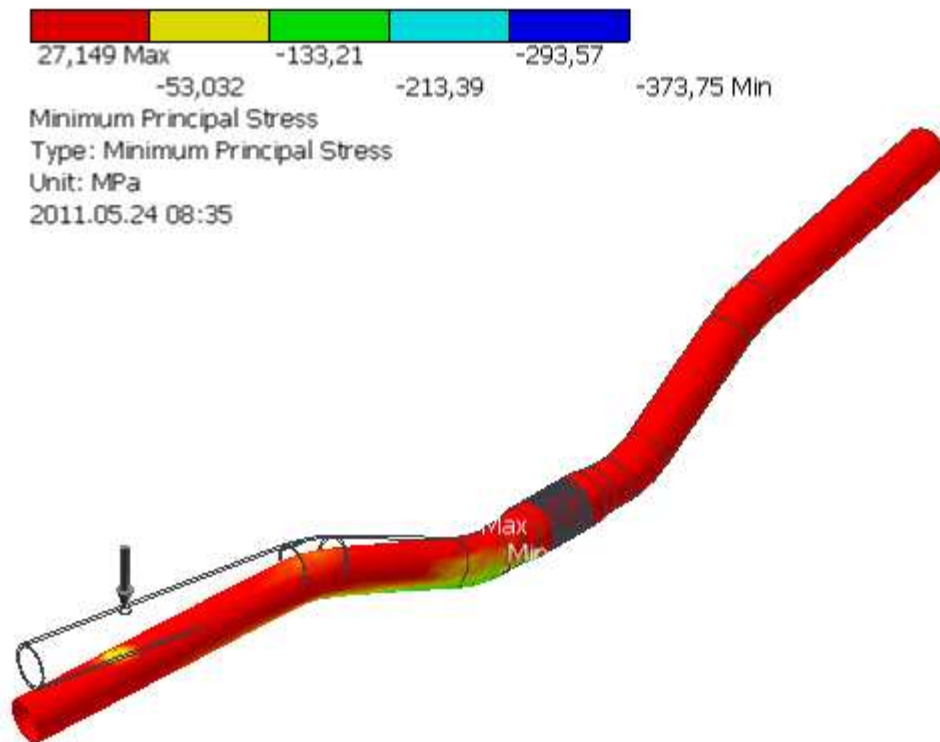
Pavadinimas	Mažiausia reikšmė	Didžiausia reikšmė
Ekvivalentiniai įtempimai	2,421e-014 MPa	356,9 MPa
Didžiausi svarbiausi įtempimai	-37,21 MPa	367,2 MPa
Mažiausi svarbiausi įtempimai	-373,8 MPa	27,15 MPa
Deformacijos	0,0 mm	3,365 mm
Atsargos koeficientas	0,6865	N/A



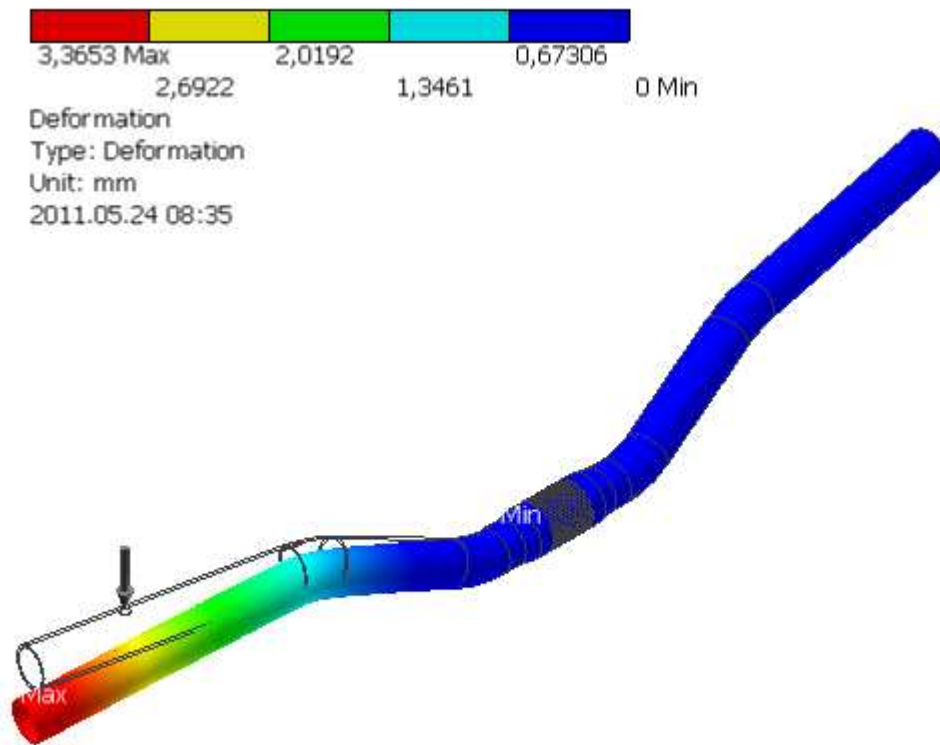
3.8 pav. Statiškai apkrauto elemento ekvivalentiniai įtempimai



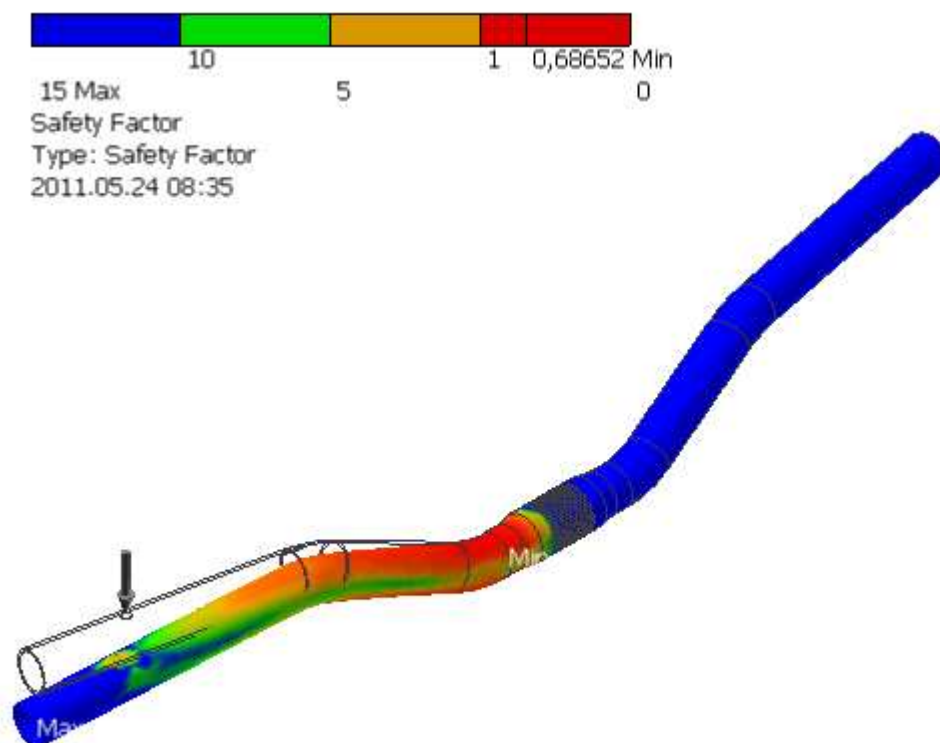
3.9 pav. Statiškai apkrauto elemento didžiausi svarbiausi įtempimai



3.10 pav. Statiškai apkrauto elemento mažiausi svarbiausi įtempimai



3.11 pav. Statiškai apkrauto elemento deformacijos



3.12 pav. Statiškai apkrauto elemento atsargos koeficientas

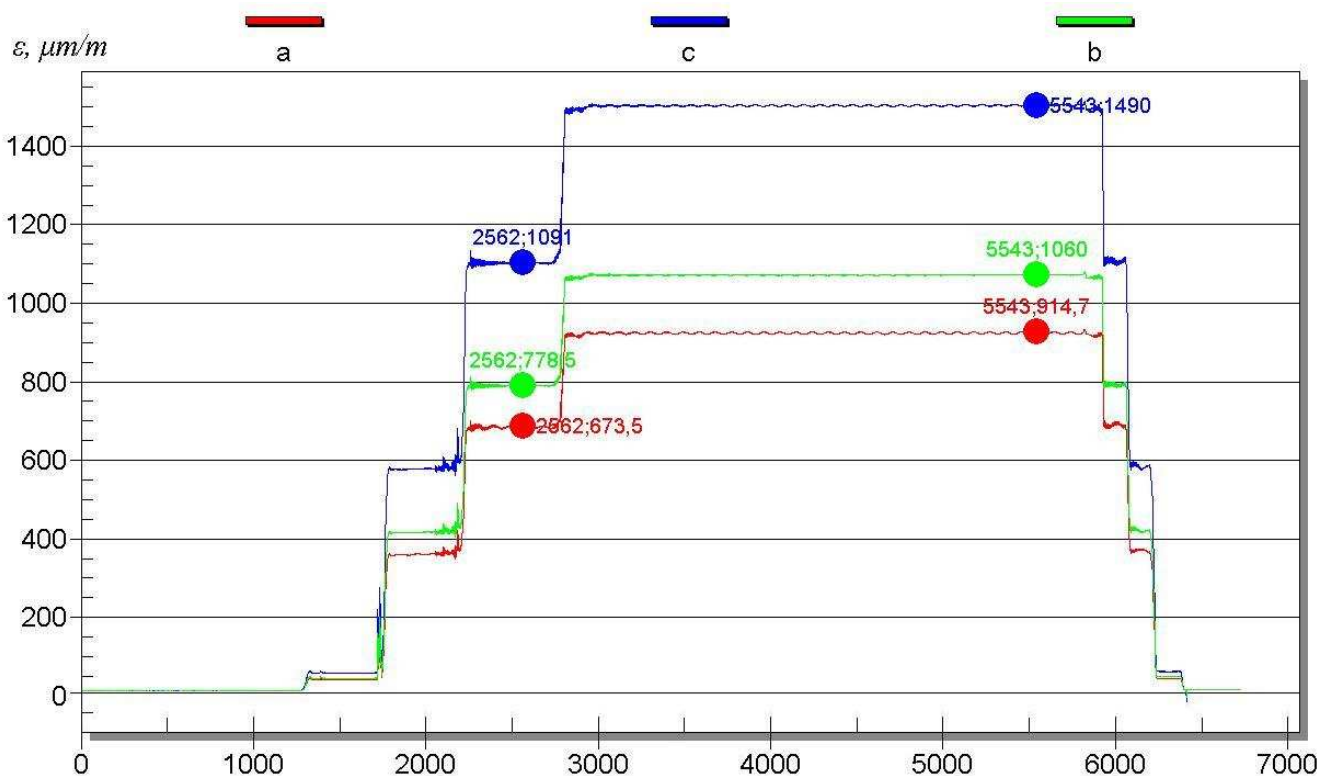
Analizuojant programos „ANSYS“ atliktus skaičiavimus statinėje būsenose matyti, kad yra nepakankamas atsargos koeficientas, t.y. viršijama takumo riba, tačiau stiprumo ribos ji nesiekia. Apkrovus vairą 600 N jėga, jis deformuosis negrįžtamai, tačiau nelūš. Vairo liekamoji deformacija atitinka standarto reikalavimus ir neviršija 15 mm ribos. Didžiausi įtempimai susitelkę netoli tvirtinimo.

4. DVIRAČIO VAIRO STIPRUMO EKSPERIMENTINIŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

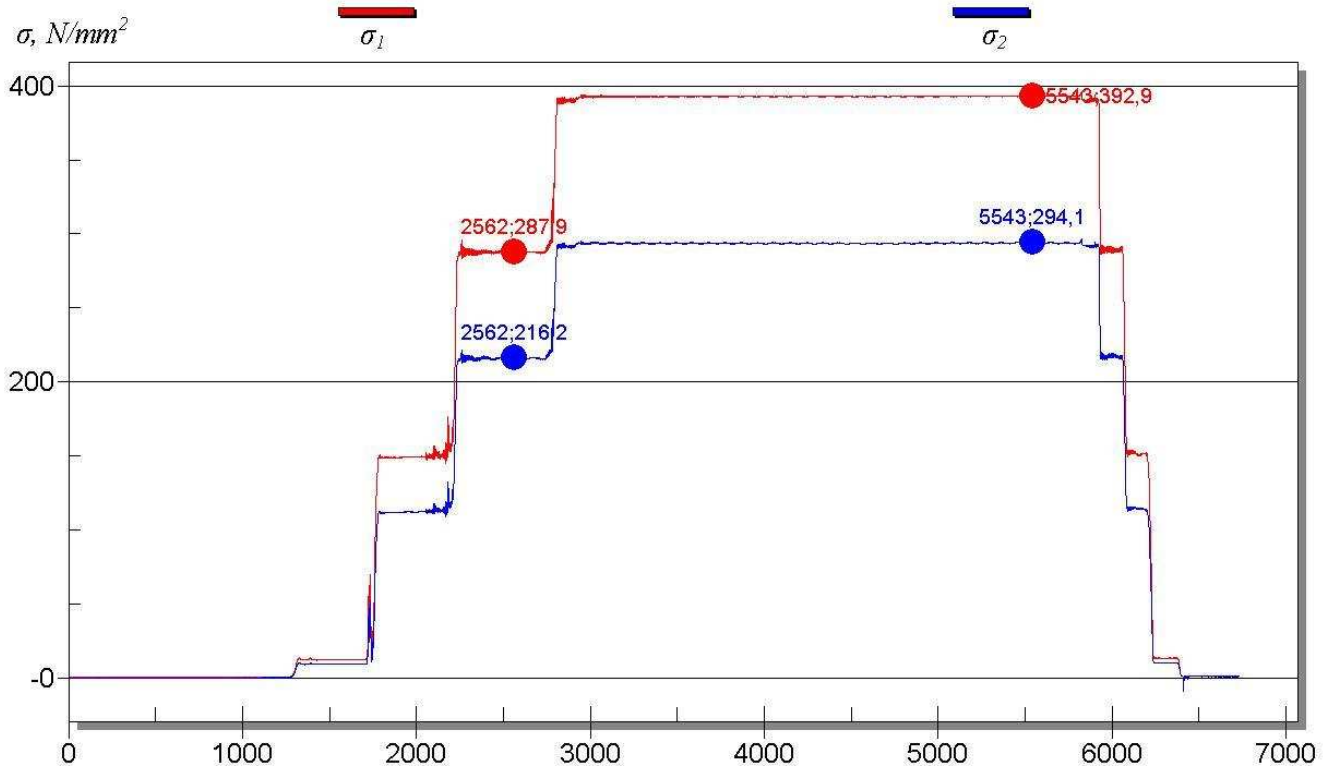
Pasitelkus duomenų registravimo ir tvarkymo programą „Catman“, apkraunant ir nukraunant dviračio vairą, gauti deformacijų ir įtempimų grafikai 4.1 ir 4.2 pav.). Atliekant bandymą svoriai dedami 4.1 lentelėje nurodyta tvarka.

4.1 lentelė Dviračio vairo apkrovimas

Nr.	Svoris, kg	F,N
1	0	0
2	1,26	12,6
3	23,68	236,8
4	23,70	237,0
5	10,66	106,6
6	0,485	4,85
7	0,184	1,84
Viso:	59,97	599,7



4.1 pav. Deformacijos: a – tenzorezistoriaus kampas 0° , b – tenzorezistoriaus kampas 45° , c – tenzorezistoriaus kampas 90°



4.2 pav. Svarbiausi įtempimai

Svarbiausi įtempimai naudojant $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ tenzorezistorių rozetę, apskaičiuojami pagal šias formules:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} + \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}, \quad (4.1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} - \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}. \quad (4.2)$$

Išmatuotos deformacijos (iš grafiko):

$$\varepsilon_a = 674 \mu m/m,$$

$$\varepsilon_b = 779 \mu m/m,$$

$$\varepsilon_c = 1090 \mu m/m.$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot 10^5}{1-0,3} \cdot \frac{674 \cdot 10^{-6} + 779 \cdot 10^{-6}}{2} + \frac{2 \cdot 10^5}{\sqrt{2}(1+0,3)} \cdot \sqrt{(674 \cdot 10^{-6} - 779 \cdot 10^{-6})^2 + (1090 \cdot 10^{-6} - 779 \cdot 10^{-6})^2} =$$

$$= 285 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{2 \cdot 10^5}{1-0,3} \cdot \frac{674 \cdot 10^{-6} + 779 \cdot 10^{-6}}{2} - \frac{2 \cdot 10^5}{\sqrt{2}(1+0,3)} \cdot \sqrt{(674 \cdot 10^{-6} - 779 \cdot 10^{-6})^2 + (1090 \cdot 10^{-6} - 779 \cdot 10^{-6})^2} =$$

$$= 217 \text{ MPa}$$

Ekvivalentiniai įtempimai apskaičiuojami pagal formulę [12]:

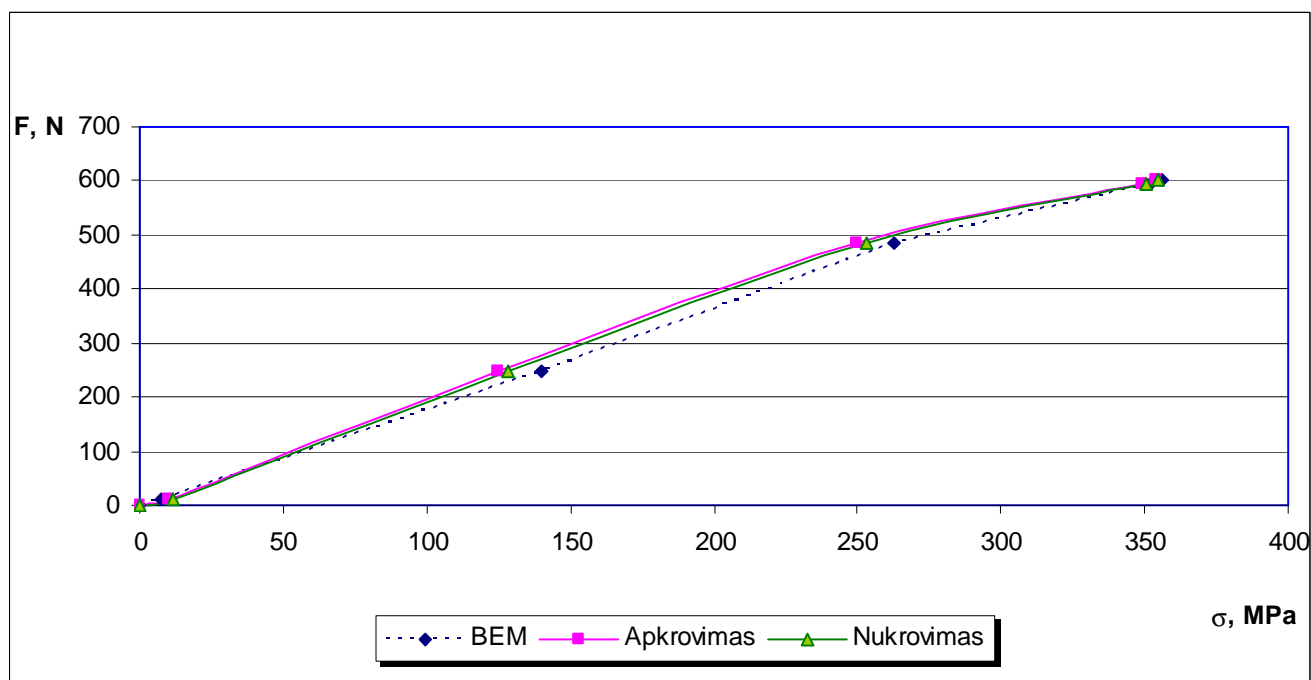
$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}, \quad (4.3)$$

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{(285)^2 + (217)^2 - 285 \cdot 217} = 257 \text{ MPa}, \quad (4.4)$$

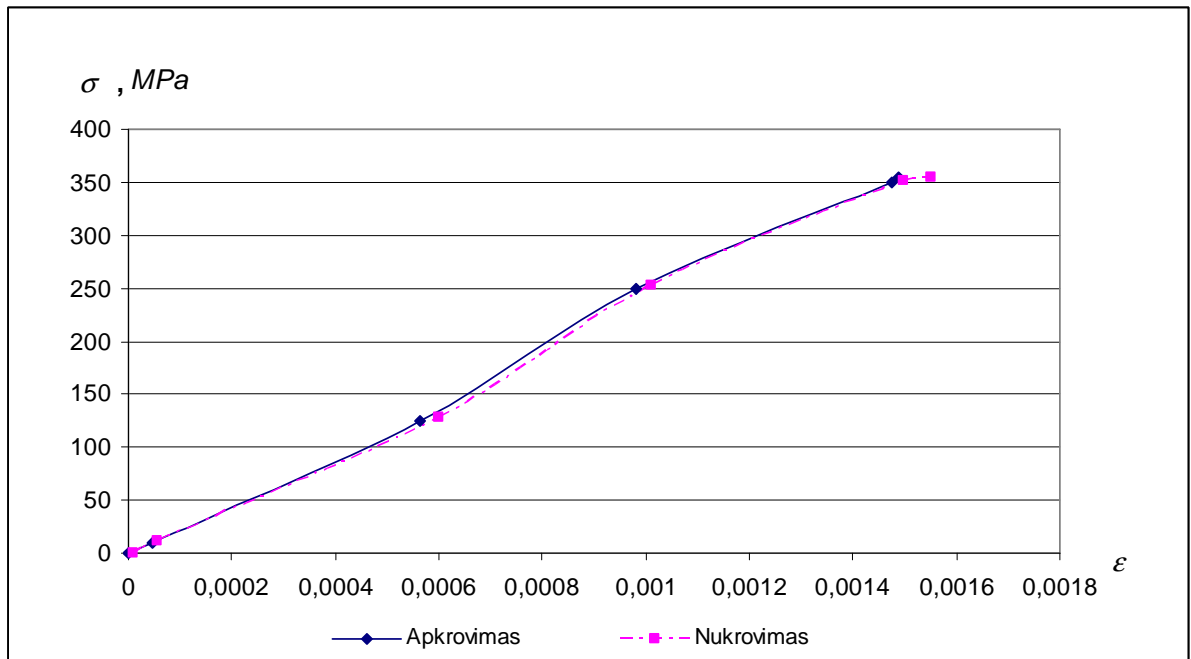
4.3 paveiksle parodyti vairo įtempimai atsirandantys prie skirtingų apkrovų. Lyginant apkrovimo kreivę su BEM kreive gaunamas toks procentinis skirtumas 4.2 lentelė:

4.2 lentelė Vairo apkrovimo kreives ir BEM kreivės palyginimas

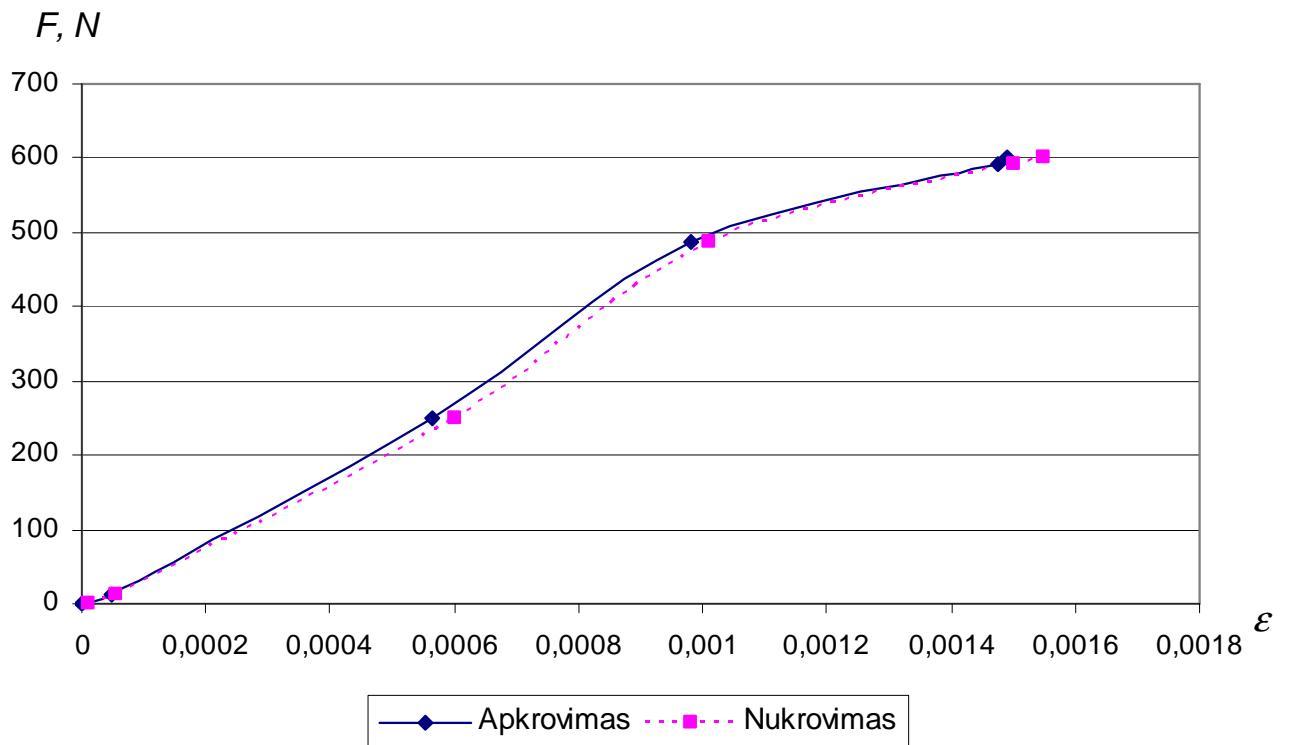
Apkrova, N	Apkrovimo kreivės ir BEM palyginimas, %
12,6	6,5
249,4	8,7
486,4	4,9
593	1,2
600	0,6



4.3 pav. Vairo įtempimų priklausomybė nuo apkrovos



4.4 pav. Įtempimų ir deformacijų kreivės apkraunant ir nukraunant



4.5 pav. Vairo deformacijų priklausomybė nuo apkrovos






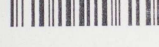

IŠVADOS

1. Tiek baigtinių elementų metodas, tiek ir eksperimentinio tyrimo rezultatai parodė, kad dviračio vairas atitiko standartuose keliamus dviračio vairo standumo ir stiprumo reikalavimus ir neviršijo juose numatytų reikšmių.
2. Lyginant gautus duomenis su BEM, rezultatai labiausiai skiriasi pačioje apkrovimo pradžioje ir skirtumas siekia iki 8,7 %. Toliau šis skirtumas palaipsniui mažėja ir yra nežymus.
3. Laiko atžvilgiu eksperimentinis tyrimas užtrunka ilgiau nei naudojant kompiuterinį modelį.
4. Naudojant BEM galima spręsti kur susitelkę didžiausi įtempimai.

LITERATŪRA

1. OCHLIABININAS, Sergėjus. *Išraskime dviratį*. Vilnius, 1991. 162 p. ISBN 5-7900-0016-9
2. Baltik vairas [interaktyvus]. [Šiauliai]: [žiūrėta 2011 m. vasario 4 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.baltikvairas.lt>>.
3. EN 14764:2005. *Miesto ir treko dviračiai. Saugos reikalavimai ir bandymo metodai*. ESK, 2005. 96 p.
4. BRAŽĖNAS, Algis. *Eksperimentinės mechanikos pagrindai*. Šiauliai, 2006. 166 p. ISBN 9986-663-2.
5. BRAŽĖNAS, Algis. *Eksperimentinės mechanikos laboratoriniai darbai ir medžiagų mechaninių bandymų atlikimo metodika*. Kaunas, 2008. 75 p. ISBN 978-9955-25-543-7.
6. ČIŽAS, Algirdas. *Medžiagų atsparumas. Konstrukcinių elementų mechanika*. Vilnius, 1993. 408 p.
7. JOKŪBAITIS, Vidmantas. *Statybinių medžiagų ir konstrukcijų irimo mechanikos pagrindai. Mokomoji knyga*. Vilnius, 2001. 96 p. ISBN 9986-05-470-2.
8. MIKUCKIS, Feliksas. *Medžiagų atsparumas. Mokomoji knyga*. Kaunas, 2008. 181 p. ISBN 978-9955-896-36-4.
9. BRAŽĖNAS, Algis. *Tamprumo ir plastiškumo teorijų pagrindai*. Šiauliai, 2003. 193 p. ISBN 9986-38-433-8.
10. Karpus, V. *Kristalinis būvis. Kietųjų kūnų fizika*. Vilnius, 2002. 248 p. ISBN 9955-497-04-01.
11. ŽILIUKAS, Antanas. *Medžiagų mechanika*. Kaunas, 2004. 595 p. ISBN 9955-09-729-9.
12. ŽILIUKAS, Antanas. *Stiprumo ir irimo kriterijai*. Kaunas, 2006. 207 p. ISBN 9955-25-134-4.
13. Atkočiūnas, J., Nagevičius, J. *Tamprumo teorijos pagrindai*. Vilnius, 2004. 515 p. ISBN 9986-05-793-0
14. HBM [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. sausio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.hbm.com>>.
15. ANSYS [interaktyvus]. [žiūrėta 2010 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ansys.com>>
16. Анурьев В. Справочник конструктора машиностроителя, т. 1. Москва, 2001. 921 p.
17. Интерсталь [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. sausio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.is66.ru/handbook/marochnik_steels/20>.

1 PRIEDAS. Tenzojutiklio charakteristikos duomenys

	Dehnungsmeßstreifen Strain Gauges Jauges d'extensométrie		Bestellnummer Order No. No. de référence	1-RY91-3/120 
	Widerstand Resistance Résistance	120 Ω ± 0.5 %	Stückzahl Contents Quantité	5 
k-Faktor Gauge factor Facteur k	Gitter A: 1.97 ± 1 %  Gitter B: 2.02 ± 1 %  Gitter C: 2.02 ± 1 % 	Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gauge factor Coefficient de température du facteur k	93 ± 10 [10⁻⁶ / °C] (-10...+45°C)	
Quersensitivität Transverse Sensitivity Sensibilité transverse	Gitter A: 0.5 % Gitter B: -0.1 % Gitter C: 0.1 %	Folienlos Lot Lot de la feuille	A405/33	
Temperaturkompensation: Angepaßt für Temperature Compensation: Compensated for Compensation de température: Compensation pour	Ferritischen Stahl mit Steel with Acier avec	Herstellungslos Batch Lot de fabrication	812047317 	
		$\alpha = 10.8 [10^{-6} / °C]$		

