

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ernestas ŠUTINYS

PLIENINIŲ LYNŲ DEFEKTŲ TYRIMAS TAIKANT BEKONTAKTĮ DINAMINĮ METODĄ

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Vytautas BUČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2215-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-609-6

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2013

© Ernestas Šutinyš, 2013

ernestas.sutinysh@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Ernestas ŠUTINYS

THE INVESTIGATION OF WIRE ROPE DEFECT USING CONTACTLESS DYNAMIC METHOD

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



Vilnius TECHNICA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Vytautas BUČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama plieninių lynų defektų nustatymas taikant jėgines charakteristikas. Pagrindinis tyrimo objektas yra įtemptų plieninių lynų defektų nustatymas naudojant lino, kaip dinaminės sistemos, savybes. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti įtempto plieninio lino su išoriniame sluoksnyje nutrūkusiomis vielomis savybes ir sukurti nutrūkusių vielų bei jų vietos nustatymo tyrimų metodiką.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: eksperimentiškai nustatytos plieninio lino dinaminės charakteristikos ir naudojant jas aptinkamos įtempto plieninio lino paviršiuje nutrūkusios vielos buvimo vieta. Pirmasis uždavinys suformuluotas, nes atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad plieninių lynų defektams aptikti naudojant dinamines charakteristikas skirta mažai dėmesio. Ant- rasis siejasi su pirmojo uždavinio sprendimu, nes kai matuojamos virpančios nutrūkusios vielos amplitudės, labai svarbu įvertinti matavimo priemonių pati- kimumą.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, apra- šomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus pa- skelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikti plieninių lynų de- fektų diagnozavimo metodai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tiks- linami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateiktas įtempto plieninio lino matematinis modelis ir aprašyti skersiniai ir sukamieji įtempto lino virpesiai. Taip pat pateiktas įtempto plieninio lino vijos su išoriniame sluoksnyje nutrūkusiomis vielomis matemati- nis modelis bei atliktas tiriamos sistemos modeliavimas.

Trečiajame skyriuje aprašytos eksperimentiškai tiriamo plieninio lino vijoje nutrūkusios vielos vietos nustatymo galimybės naudojant dinaminį metodą.

Disertacijos tema paskelbti šeši straipsniai: trys – žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI sąrašą, trys – konferencijų medžiagose, referuotose Thomson ISI duomenų bazėje. Disertacijos tema gautas lietuviškas ir euro patentas.

Abstract

The dissertation investigates the diagnostics of wire rope by using forced characteristics. The main object of research is defects of prestressed ropes using a dynamic systems characteristic. The primary purpose of this dissertation is to research the characteristics of a prestressed rope with outside of broken wire and to create research methodology of broken wires and determine its location.

The paper approaches a few major tasks such as by experiment detecting the dynamic characteristics of the wire rope and detection broken wire on the surface of the wire rope using dynamic characteristics. Task 1 is formulated as the literature review found that the wire rope defects detected by using of the dynamic characteristics received little attention. Task 2 relates to the first problem solution, as measured by vibrating amplitude of broken wire, it is important to assess the reliability of measuring instruments.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, the research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 analysis used literature. It contains a wire rope defects and diagnostic methods. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered.

Chapter 2 describes the forces acting and contacts between wires and the forces acting and contacts between strands. The mathematical model give of the wire rope strand with broken wires and modelling performed the investigated system as well.

Chapters 3 present the experimental test wire rope broken wire detection options using a dynamic method.

6 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: three articles – in the Thomson ISI register, three articles – in conference material and scientific papers in Thomson ISI data base. The application was submitted Lithuanian and euro patent applications dissertation topic.

Žymėjimai

Simboliai

S – lyno įtempimo jėga, N ;
 R – apibendrintas lyno deformavimo koeficientas, N/s ;
 α – pastovumo koeficientas, $1/s$;
 φ – lyno sąsūkos kampas, rad ;
 κ – proporcingumo koeficientas, m/rad ;
 c – lyno standumo koeficientas, Nm^2/rad ;
 M – lyno sukimo momentas, Nm ;
 L – tiriamo lyno ilgis, m .

Santrumpos

LMA – plieninio lyno metalinio ploto sumažėjimas, %;
LF – plieninio lyno defektas nutrūkus vienai ar kelioms lyno konstrukcijos vieloms;
IWRC – plieninis lynas su nepriklausoma plienine šerdimi;

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
1. PLIENINIŲ LYNŲ IR JŲ DEFECTŲ TYRIMŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ	7
1.1. Plieniniai lynai ir jų defektai	7
1.2. Plieninių lynų diagnostikos metodai.....	13
1.3. Analizinių-kompiuterinių tyrimų apžvalga.....	17
1.4. Plieninio lyno tyrimų eiga	20
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	22
2. PLIENINIO LYNŲ ANALIZINIAI-SKAITINIAI TYRIMAI.....	25
2.1. Plieninio lyno teorinių tyrimų metodika.....	25

2.2. Skersiniai ir sukamieji įtempto lyno virpesiai	26
2.3. Plieninio lyno vijos tyrimas baigtinių elementų metodu	34
2.4. Antrojo skyriaus išvados	40
3. EKSPERIMENTINIAI PLIENINIO LYNŲ TYRIMAI.....	41
3.1. Tyrimo standas ir dinaminio tyrimo metodika	41
3.2. Lyno laikiklių, įtempto lyno ir nutrūkusios vielos savųjų virpesių tyrimas.....	44
3.3. Skirtingo ilgio nutrūkusių vielų dinaminio savybių tyrimai	56
3.4. Nutrūkusios vielos pašaknies mechaninio būvio ir užterštumą imituojančios papildomos masės įtakos tyrimas	61
3.5. Lyno liekamųjų deformacijų tyrimas	66
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	70
BENDROSIOS IŠVADOS	71
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	73
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	81
PRIEDAI.....	83
A priedas. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	83
B priedas. Statinės lyno laikiklių virpesių amplitudžių skaitinės reikšmės	85
C priedas. Patentas „Plieninio lyno kokybės diagnostikos būdas ir įranga“.....	83

Contents

INTRODUCTION	1
Topicality of the problem	1
Actuality of research	2
Objective of research.....	3
Aim of research	3
Task of research	3
Methodology of research.....	3
Scientific novelty.....	4
Practical value of research results	4
Defended propositions.....	4
Approbation of work results.....	5
Structure and contents of the work.....	5
 1. REVIEW OF THE INVESTIGATION AND ANALYSIS OF WIRE ROPES AND THEIR DEFECTS.....	 7
1.1. Wire rope and their defects.....	7
1.2. Diagnostics methods of wire rope	13
1.3. Analytical-computing research review	17
1.4. Research run of wire rope.....	20
1.5. Conclusions of the first chapter and formulation of dissertation tasks	22
 2. ANALYTICAL-NUMERICAL RESEARCH OF WIRE ROPE.....	 25

2.1. Theoretical research methodology of wire rope	25
2.2. Transverse and torque vibration of a tightrope.....	26
2.3. Research of wire rope strand FEM.....	34
2.4. Conclusions of the second chapter	40
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF WIRE ROPE.....	41
3.1. Test rig stand and the dynamic research methodology.....	41
3.2. Natural vibrations research of rope support, wire rope and broken wire.....	44
3.3. Research of broken wire of different lengths	56
3.4. Research of mechanical state broken wire core and impurity in a simulated additional influence of mass	61
3.5. Research of wire rope residual stress	66
3.6. Conclusions of the third chapter.....	70
GENERAL CONCLUSIONS	71
REFERENCES	73
AUTHOR'S PUBLICATIONS ON A DISSERTATION SUBJECT	81
APPENDIXES	83
Appendix A. Results of experimental research	83
Appendix B. Statistical characteristics of the rope support vibrations	83
Appendix C. Patent „Wire rope quality diagnostic method and equipment“	83

Ivadas

Problemos formulavimas

Šiuolaikinė technika tampa vis sudėtingesnė, jos diagnostikai keliama vis griežtesni reikalavimai. Lyno būklės vertinimas vizualiniu metodu buvo taikomas nuo pirmųjų lynų, pagamintų iš augalinių pluoštų, atsiradimo. 1830 metais sustiprinti plieninėmis vijomis augalinių pluoštų lynai buvo saugesni naudoti kėlimo įrenginiuose ir lynai tarnavo ilgesnį laiką.

Plieniniai lynai iš suvytų plieninių vielų naudojami daugelyje sričių: kranuose, tiltų statyboje, architektūriniuose objektuose, konvejerių juostose, kalnakasyboje, naftos ir dujų, žvejybos ir jūrų, miškų ir komunikacijų srityse, slidinėjimo keltuvuose, liftuose, kariniuose jūrų laivynuose, funikulieriuose ir kituose įrengimuose atsakingiems kroviniams ir žmonėms kelti, kai lynų trūkis yra ypač pavojingas. Dėl to lynų kokybės stipriui yra keliama dideli reikalavimai. Vienas iš pagrindinių kokybės reikalavimų yra vielų, iš kurių suvytas lynas, vientisumas, nutrūkusių vielų nebuvimas, nes nutrūkusios vielos silpnina lyną, ir jis tampa pažeidžiamas, trukdoma lyno eksploatacijai. Nepastebėti plieninių lynų defektai gali sukelti katastrofas ir padaryti didelių nuostolių turtui bei gyvybei. Lyno saugumui užtikrinti būtina itin griežta priežiūra. Vizuali kasdieninė lynų patikra yra labai brangi ir priklauso nuo specialisto darbinių savybių bei nuovargio faktoriaus, todėl lynų patikros sistemą būtina tobulinti. 1906 m. buvo aprašy-

tas pirmasis plieninių lynų patikros prietaisas, naudojantis elektromagnetus. Jį aprašė ir patentą gavo C. McCann ir R. Calson (Weischedel 1996). Iki šiol buvo naudojami lynų defektų (korozijos, abrazyvinio dilimo, nutrūkusios vielos nustatymo ir kiti) diagnostikos metodai: akustinio lauko metodas, elektromagnetinis ir rentgeno metodai. Norint nustatyti plieninio lyno tinkamumą toliau naudoti, būtina nustatyti jo nutrūkusių vielų kiekį, tenkantį lyno ilgio vienetui ir lyno skerspjūvio sumažėjimą nuo jo eksploatacijos pradžios.

Lynų defektai atsiranda dėl kelių priežasčių: mechaninio susidėvėjimo, lenkimo nuovargio įtrūkimų, korozijos žalos, tempimo perkrovos bei šlyties įtrūkimų.

Kėlimo mechanizmuose naudojami lynai periodiškai tikrinami. Lynų patikimumas darbe pasireiškia tuo, kad plieninis lynas nenutrūksta staiga, o pradeda trūkinėti atskiros jo vielos, tuo būdu signalizuodamos, kad lyną būtina pakeisti.

Plieninių lynų defektų aptikimo, nustatymo ir naujų prietaisų kūrimo ir tobulinimo problemos plačiai tyrinėjamos daugelio pasaulio šalių mokslininkų darbuose.

Disertacijoje pagrindinis dėmesys skirtas įtempto plieninio lyno išoriniame sluoksnyje esančioms nutrūkusioms vieloms aptikti; buvo tiriami įtempto plieninio lyno fragmento, kaip dinaminės sistemos, dinaminių savybių pokyčiai.

Darbo aktualumas

Šiuolaikinės technikos eksploatacijos ir saugumo reikalavimai tampa vis griežtesni. Ilgėjant gaminių eksploatacijos laikui bei tobulėjant medžiagoms, santykinės įrenginių apkrovos didėja, todėl ankstyvas gedimų nustatymas ir periodinė diagnostika sudaro didelę technikos eksploatacijos išlaidų dalį. Kėlimo ir transportavimo įrenginiuose naudojami plieniniai lynai yra vieni iš tokių įrangos elementų. Jų defektai yra specialiai reglamentuoti, tačiau plieninių lynų defektų, o ypač nutrūkusių išorinio sluoksnio vielų skaičiaus lyno ilgio vienetu nustatymo efektyvumas ir tyrimo greitis išlieka svarbia techninė problema. Siekiant sukurti tokį lynų patikros metodą, tenka išspręsti daug naujų mokslinių ir technologinių uždavinių. Atliekant plieninio lyno su nutrūkusia viela skaitinę ir eksperimentinę analizę, susiduriama su sudėtingu tiriamos sistemos analitinio modelio sudarymu bei skaičiavimo problemomis.

Plieninių lynų tyrimas, laikant įtempto plieninio lyno fragmentą dinamine sistema, leidžia surasti sistemos dinaminių savybių pokyčius, atsiradusius dėl nutrūkusių vielų jo paviršiuje. Kadangi lyne yra pakankamai daug vielų (nuo 7 iki 342), vienos vielos įtaka visai lyno fragmento dinaminei sistemai yra nykstamai maža, todėl nutrūkus vienai ar kelios vieloms lyno fragmento amplitudi-

nės-dažninės charakteristikos pokytis taip pat yra nykstamai mažas. Tikėtina, kad šis metodas gali pakeisti ilgą ir brangią ištisinės lynų apžiūros metodą.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – įtemptas plieninis lynas su lyno paviršiuje nutrūkusiomis vielomis.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – sukurti nutrūkusių vielų bei nutrūkusių vielų vietos nustatymo metodiką ir ištirti įtempto plieninio lyno su išoriniame sluoksnyje nutrūkusiomis vielomis savybes.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros apie plieninių lynų defektus, jų nustatymo metodus apžvalgą ir analizę.
2. Įvertinti įtempto plieninio lyno fragmento skersinius ir sukamuosius virpesius, atsirandančius žadinant lyną statmenai įtempto lyno ašiai.
3. Pasiūlyti metodiką, leidžiančią bekontakčiu jutikliu aptikti nutrūkusią vielą lyno išoriniame sluoksnyje, kai įtempto plieninio lyno fragmentas sužadinamas reikiama virpesių forma.
4. Sukurti eksperimentinį stendą, skirtą įtempto plieninio lyno ir jo nutrūkusių vielų virpesiams tirti.
5. Taikant pasiūlytą metodiką ir naudojant sukurta stendą praktiškai išsiaiškinti įtempto plieninio lyno defektų nustatymo galimybes.

Tyrimų metodika

Darbe atlikti teoriniai skaičiavimai pagrįsti teorinės mechanikos, virpesių teorijos ir matavimų teorijos principais, pritaikant analitinius, empirinius ir skaitinius tyrimo metodus.

Eksperimentinę medžiagą sudaro stovo, įtempto plieninio lyno ir nutrūkusių vielos virpesių matavimo duomenys. Eksperimentai buvo atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Mašinų gamybos katedros laboratorijose. Virpesių parametrams matuoti buvo naudota Danijos firmos „Brüel & Kjær“ ir „Hottiger“ matavimo įranga.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas ir ištirtas išorinių vienu galu nuo plieninio lyno atitrūkusių vielų ir atitrūkusių vielų vietos ant lyno paviršiaus nustatymo metodas.
2. Nustatytos įtempto plieninio lyno fragmento ir tyrimo stendo dinaminės savybės, leidžiančios realizuoti pasiūlytą plieninio lyno išorinių nutrūkusių vielų kiekio ir jų vietos diagnostikos metodiką.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Taikant pasiūlytą įtempto plieninio lyno išorinių nutrūkusių vielų nustatymo metodą, automatizuojamas įtemptų plieninių lynų defektų nustatymo procesas. Toks procesas leidžia išvengti subjektyvių operatoriaus savybių įtakos lynų patikros kokybei. Lyno periodinės patikros laikas gali būti sumažintas iki 5–15 s vienam lyno ilgio metrui, priklausomai nuo lyno diametro. Savalaikis plieninių lynų, naudojamų keliamuosiuose įrengimuose, išorinių nutrūkusių vielų nustatymas gali pailginti lynų darbo trukmę, nes jo keitimą galima atlikti atsižvelgiant į nutrūkusių vielų skaičių, o ne į atidirbtą resursą ar lyno amžių.

Ginamieji teiginiai

1. Pateiktas naujas įtemptų plieninių lynų išorinių nutrūkusių vielų nustatymo metodas pagrįstas lyno priverstinio virpesių principais.
2. Sukurta eksperimentinio tyrimo metodika leidžia įvertinti įtemptų plieninių lynų išorinių nutrūkusių vielų skaičių ir vietą lyne.
3. Naudojant pasiūlytą įtempto plieninio lyno nutrūkusių išorinių vielų nustatymo metodą ir taikant sukurta eksperimentinio tyrimo metodiką, plieninių lynų defektų nustatymas yra efektyvus.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti du ir vienas priimtas spausdinti moksliniai straipsniai, įtraukti į Thomson ISI Web of Science duomenų bazę.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti trijose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Tarptautinėje konferencijoje „*Mechanika*“ 2010, 2011 m. Kaune.
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*“ 2013 m. Vilniuje

Disertacijos tema yra gautas lietuviškas ir euro patentas „*Plieninio lyno kokybės diagnostikos būdas ir įranga*“.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrųjų darbo išvadų formulavimas. Taip pat yra trys priedai.

Darbo apimtis yra 82 puslapiai be priedų, tekste panaudota 31 numeruota formulė, 51 paveikslas ir 2 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 110 literatūros šaltinių.

Plieninių lynų ir jų defektų tyrimų apžvalga ir analizė

Skyriuje apžvelgti plieninių lynų defektai ir šių defektų diagnostikos metodai, taip pat pateikta užsienio šalių mokslininkų atliktų mokslinių matematinių tyrimų apžvalga.

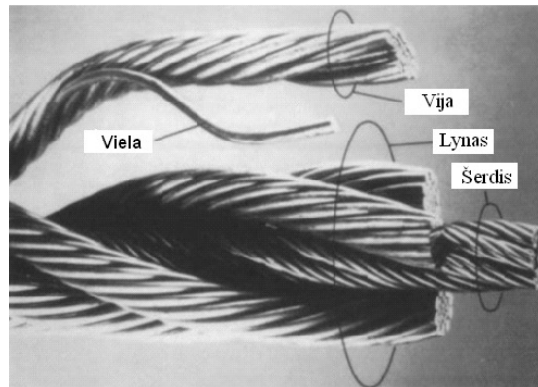
1.1. Plieniniai lynai ir jų defektai

Plieninis lynas – lankstus nehomogeninės mechaninės sistemos elementas, skirtas kroviniams kelti. Pagal istorinius šaltinius jau 5000 m. pr. Kr. buvo naudojamos plieninės vielos, ne tokios, kokias turime dabartiniais laikais, bet iškaltos iš vario ar aukso lakštų ir sukarpytos į siauras juosteles. 800 m. pr. Kr. atskiros vielos buvo susuktos į viją. 500 m. pr. Kr. buvo pagamintas pirmasis plieninis lynas, kurį sudarė trys vijos, o vijos susuktos iš kelių bronzinių vielų. Seniausias yra 4,5 m ilgio, 0,7 mm storio bronzinių vielų lynas, rastas kasinėjant Pompėją (Pietų Italija) (Technikos enciklopedija 2006).

Plieniniai lynai Europoje pradėti naudoti 1834–1854 metais Vokietijoje Harco (Harz) sidabro kasyklose (Technikos enciklopedija 2006). Plieniniai lynai buvo susukti rankomis iš vienodo ilgio trijų vielų į viją, o šios iš keturių vijų

viena kryptimi susuktos į lyną. Šie rankų darbo lynai yra žinomi kaip Alberto Raupės (Albert Ropes) lynai, kurie nebuvo labai lankstūs dėl savo standumo ir nemažo vielų skersmens. 1850 m. Londone Andrius Smitas (Andrew Smith) sukūrė ir užpatentavo 6 plieninių vijų, susuktų apie šerdį, lyną, kuris tapo pramoniniu standartu. Jonas Roeblingas (John Roebling) sukūrė šešiakampės formos lyną, kuriame kiekviena vija suvita iš 19 vielų. Sugalvoti ir Jono Roeblingo (Jonh Robebbling) sukurti įvairių rūšių lynai vis dar naudojami ir šiandien.

Plieniniai lynai – tai plačiausiai kėlimo mašinose naudojami lankstūs elementai (Costello 1997). Jų išilginis elastingumas sušvelnina darbo metu pasitaikančius smūgius. Plieninių lynų patikimumas darbo metu pasireiškia tuo, kad jie nenutrūksta staiga, o pradeda trūkinėti atskiros vielos (Pilkasas 1998). Plieniniai lynai suvejami į lyno vijas iš aukštos kokybės plonų 0,5...2 mm storio plieninių vielų, o vijos suvejamos į lyną (1.1 pav.).

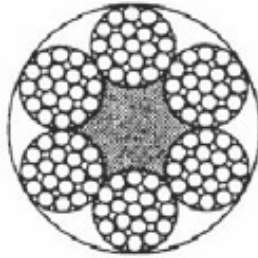


1.1 pav. Plieninis lynas (Costello 1997)

Fig. 1.1. Wire rope (Costello 1997)

Šaltai valcuotų vielų stiprumo riba $\sigma \leq 2600$ MPa. Daugumoje kėlimo mašinų naudojami lynai, suviti iš kelių vielų, kurių stiprumo riba $\sigma = 1600\text{--}2000$ MPa. Kuo stiprumo riba mažesnė, tuo lynas yra storesnis. Darbui drėgnose vietose naudojami lynai iš cinkuotų arba iš nerūdijančio plieno vielų. Pagal naudojimo struktūrą plieniniai lynai būna viengubo, dvigubo ir trigubo vijimo. Daugiausiai naudojami dvigubo vijimo lynai. Viengubo vijimo lynų visos vielos būna suvyniotos apie vieną-centrinę-vielą. Dvigubo vijimo lynų vielos pirmiausia suvejamos į vijas, o vijos – į lyną. Vijos vejamos apie kaproninę, kanapinę, asbestinę ar minkšto plieno vielos šerdį. Pluošto šerdis paprastai būna įmirkyta tepale, kad lynui lankstantis, būtų tepamos vielos. Vielų skaičius vijose ir vijų skaičius lynuose gali būti įvairūs. Pagal vijų struktūrą skiriami lynai su vienodo skersmens vielomis ir su skirtingo skersmens vielomis (Pilkasas 1998).

Plieninio lyno standumui ir jo mechaninėms savybėms didelę reikšmę turi plieninio lyno organinė ar metalinė šerdis (1.2 pav.). Kai kuriuose plieniniuose lynuose net 1/3 lyno dalies sudaro organinė šerdis, o likusias 2/3 lyno – plieninės vijos (Costello 1997).



1.2 pav. Plieninis lynas su organine šerdimi (Costello 1997)

Fig. 1.2. Wire rope with organic core (Costello 1997)

Organinė šerdis plieninį lyną apsaugo nuo vandens, abrazyvinių dalelių, apsaugo nuo korozijos, lynas tampa universalus, galintis dirbti ekstremaliomis sąlygomis, tokiomis kaip nuolatinis drėgnas oras, užterštos darbo sąlygos ir kt. Šerdis neleidžia lyno plieninėms vijoms tarpusavyje kontaktuoti, apsaugo vidines lyno vijas nuo trūkimo. Taip sumažinamas plieninio lyno dėvėjimasis ir pailginamas jo darbo laikas. Lynas darbo metu sumažina skleidžiamas vibracijas į dirbančius įrenginius, variklius.

Esant bet kokiems greičiams, plieniniai lynai dirba tolygiai ir be triukšmo. Lynų tamprumas sumažina dinamines apkrovas paleidimo ir stabdymo metu. Plieniniai lynai turi ir trūkumų – palyginti neilgai laiko ir eksploatacijos metu pailgėja (Pilkasas 1998).

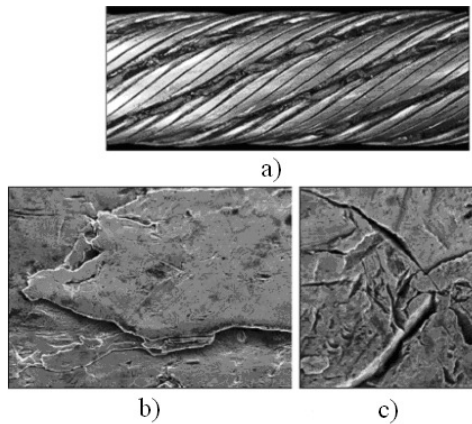
Lyno vielų atskirų įtempių didumas priklauso nuo daugelio veiksnių: nuo lyno konstrukcijos ir lyno skersmens, atskirų vielų bei vijų, o taip pat nuo skridinių ir būgnų tipo bei jų matmenų, apkrovos didumo ir t. t. Atlikti gausūs lynų eksperimentiniai tyrimai parodė, kad lyno veikimo laikas daugiausiai priklauso nuo lyną tempiančios jėgos dydžio ir lyno bei skridinio ar būgno skersmenų santykio (Pilkasas 1998).

Plieniniams lynams kontaktuojant su skriemuliais, su kitu lynu, su metaliniu ar nemetaliniu paviršiumi, turinčiu aštrias briaunas, atsiranda įvairūs lynų defektai:

- lynų mechaninis dilimas;
- lynų lenkimo nuovargio įtrūkis;
- lynų korozija;
- lynų tempimo perkrovos įtrūkis;

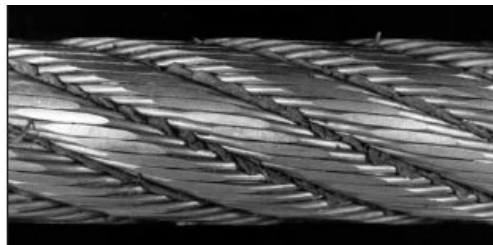
- vienos ar kelių vielų nutrūkimas;
- nutrūkusi lyno vija;
- vienos ar kelių vielų atsipalaidavimas;
- lyno užlaužimas;
- kiti defektai (Basak 2006).

Lynų mechaninis dilimas. Mechaninis dilimas lynuose atsiranda dėl jų tarpusavio kontakto arba esant lyno kontaktui su skriemuliu (1.3 pav. a). Ilgai dirbdamas esant nepalankioms sąlygoms, plieninis lynas praranda savo savybes. Metalinės lyno vielos tiek metalo viduje, tiek išorėje pavargsta ir jose atsiranda mikrotrūkimai, mikroplyšiai (1.3 pav. b ir c).



1.3 pav. Lyno defektai: a) abrazyvinis dilimas; b) susidėvėjęs išorinės vielos paviršius; c) susidėvėjusios vielos paviršius matomas per mikroskopą (Balan 2002)

Fig. 1.3. Defects of wire rope: a) abrasive wear; b) worn surface of the outer wire; c) worn surface of the outer wire is visible through a microscope (Balan 2002)

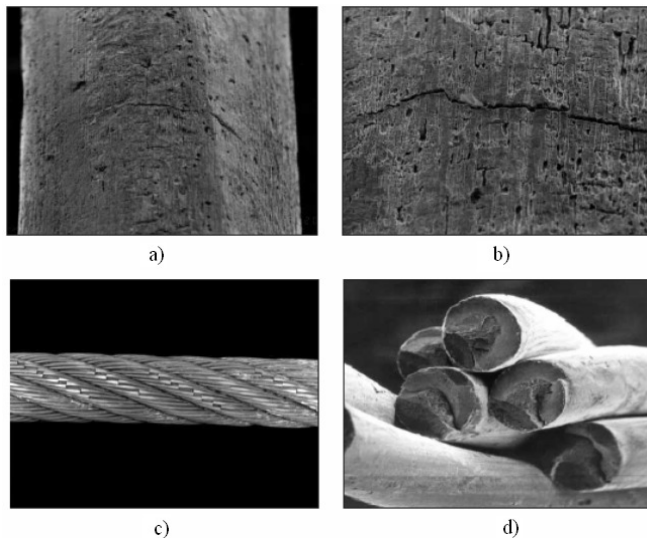


1.4 pav. Lyno paviršiuje nutrūkusios vielos (Verreet 2005)

Fig. 1.4. Broken wire on the rope surface (Verreet 2005)

Mikro įtrūkimai plika akimi nematomi, bet po kurio laiko įtrūkiui didėjant nutrūksta ir pati viela (1.4 pav.), o lyno paviršius pasišiaušia ir praranda savo eksploatacines savybes (Verreet 2005).

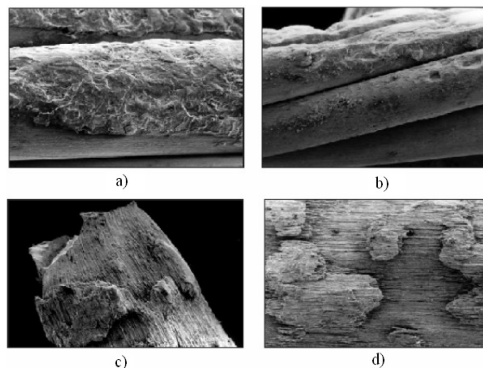
Lynų lenkimo nuovargio įtrūkiai. Kiekvienas plieninis lynas darbo metu yra lankstomas ar kitaip deformuojamas. Dažniausiai nuovargio pažeidimai atsiranda lyno išorinėse vielose. Kuo daugiau vielos lankstomos, tuo greičiau jos silpnėja ir nutrūksta (Verreet 2005). Didelės lyno lenkimo deformacijos atsiranda plieninį lyną vyniojant ant būgno bei jį išvyniojant. Lyno nuovargio įtempiai auga didėjant variklio greičiui ir mažėjant išorinių lyno vielų skersmeniui. Lenkimo deformacijų metu plieninio lyno išorines vijas veikia didesnės apkrovų nei vidines lyno vijas, todėl jų plieno medžiagos struktūra greičiau pavargsta ir lyno vielos nutrūksta. Toks defektas atsiranda pasireiškus plieno nuovargiui (1.5 pav.) (Balan 2002).



1.5 pav. Plieninio lyno defektai atsiradus plieno nuovargiui: a) pradinė plieno nuovargio stadija; b) plieninio lyno vielos įtrūkis; c) plieninio lyno vielų trūkis dėl plieno medžiagos nuovargio; d) plieninio lyno nutrūkusių vielų vaizdas (Balan 2002)

Fig. 1.5. Defects of wire rope in the event of steel fatigue: a) initial stage of the fatigue of steel; b) wire crack of rope; c) wire arrests of rope on steel fatigue; d) broken wire view of wire rope (Balan 2002)

Lynų korozija. Tinkamai neprižiūrint plieninių lynų bei jiems dirbant tokiomis sąlygomis, kurioms tos rūšies lynai nepritaikyti, ant lyno paviršiaus bei vidinių lyno vijų gali atsirasti korozijos židiniai (1.6 pav.).



1.6 pav. Plieninio lyno korozija: a) korozijos pažeistas plieninis lynas; b) korozijos pažeista plieninio lyno vija; c) dėl korozijos nutrūkusi viela; d) pradiniai korozijos požymiai ant plieninio lyno (Verreet 2005)

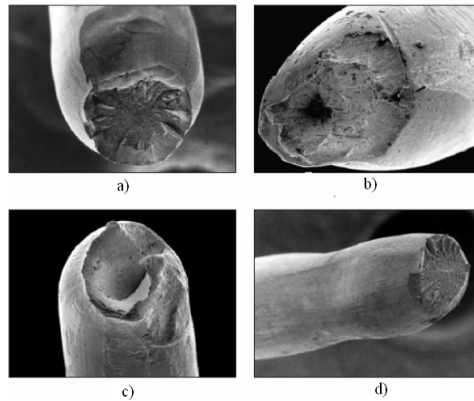
Fig. 1.6. Corrosion of wire rope: a) wire rope with the corrosion damage; b) strand corroded of wire rope; c) broken wire for corrosion; d) initial signs of corrosion on wire rope (Verreet 2005)

Korozija atsiranda metalui reaguojant su deguonimi. Korozijos pažeisti lynai praranda jėgą ir lankstumą. Korozijos pažeistų lynų paviršiuje greičiau atsiranda nuovargio įtrūkiai nei nuo jos apsaugotuose paviršiuose. Plieninių lynų paviršius yra 16 kartų didesnis už to paties skersmens strypo paviršių, todėl korozija ir plieninį lyną veikia 16 kartų greičiau. Plastikinė ir cinko danga apsaugo lyną nuo drėgmės patekimo. Lynas išsipučia korozijai pažeidus atskiras vietas. Dėl to padidėja lyno skersmuo. Padidėjęs lyno skersmuo gali būti pirmas požymis, kad atsirado vidinė korozija (Verreet 2005).

Plieninis lynas korozijos vietose netenka savo eksploatacinių savybių, praranda savo kėlimo bei lyno nutrūkimo ribą, lynas tampa netinkamas kelti įvairiems kroviniams, prilygstantiems jo nominaliai kėlimo jėgai.

Lyno tempimo perkrovos įtrūkiai. Kiekvienas gamyboje išleistas ir užpatentuotas plieninis lynas turi savo nominalią ir didžiausią kėlimo jėgą, kurią rekomenduoja gamintojas. Plieninio lyno nominali ir didžiausia kėlimo jėga yra nustatomos atliekant laboratorinius bandymus – lyną tempiant iki jo nutrūkimo jėgos. Lyno nutrūkimo jėga yra labai svarbus lyno darbo parametras, nuo kurio priklauso darbuotojų, dirbančių su plieniniu lynu, saugumas, todėl būtina prieš keliant kokią nors krovinį įsitikinti, kad lyno kėlimo jėga yra ne mažesnė už krovinio masę.

Tempimo perkrovos įtrūkiai atsiranda, kai ašinė apkrova viršija vielų trūkio jėgą. Šie įtrūkiai paprastai susiję su vielos skerspjuvio pavieniuose taškuose sumažėjimu (Verreet 2005). Plieninio lyno nutrūkimo atveju toje vietoje ant vielų atsiranda tik nutrūkimui būdingos formos galai (1.7 pav.).



1.7 pav. Plieninio lyno nutrauktų vielų galų formos: a) ir b) tipinis nutrūkusios vielos vaizdas; c) smarkiai perkrautos nutrūkusios vielos vaizdas; d) nutrūkusios vielos vaizdas su dviem galimomis nutrūkimo vietomis (Balan 2002)

Fig. 1.7. Broken wire ends forms of the wire rope: a) and b) typical view of broken wire; c) view of several overloaded broken wire; d) view of broken wire with two possible fracture sites (Balan 2002)

Pagal matomus defektus galima spręsti, ar lynas nutrūko viršijus leistiną didžiausią gamintojo apkrovą, ar buvo smarkiai pažeistas kitokio pobūdžio deformacijomis (Balan 2002).

1.2. Plieninių lynų diagnostikos metodai

Vizualinis metodas. Vizualinės apžiūros metodas – pats seniausias, paprasčiausias ir pigiausias; be to, jis universalus, operatyvus, bet ne toks patikimas (Volkovas 2000, Basak 2006, Basak 2008, Balan 2002, Zawada 1999, Kotelnikov, Sumyong 2007). Jį galima taikyti ir mechaninei sistemai veikiant, ir ją sustabdžius. Nuo pirminės neardomosios kontrolės dažniausiai pradedamas bet kurios mechaninės sistemos gedimų diagnozavimas. Kalbant apie vizualinę kontrolę, dažnai šiam terminui suteikiama platesnė prasmė, nes apžiūros metu paprastai įvertinama ir kita gaunama informacija. Vizualiai apžiūrint tikrinama:

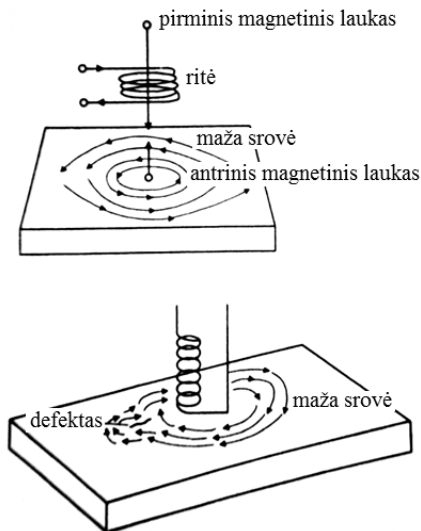
- atskirų detalių, mazgų, blokų ir elementų tarpusavio išdėstymas, matmenų ir formos nuokrypiai, judesių trajektorijos;
- paviršių būklė ir švara; ar nėra cheminių, korozinių, erozinių, terminių pažeidimų;
- deformacijos, įtrūkiai, tarpelių išdilimo laipsnis;
- tvirtinimo ir fiksavimo detalių padėtis;

- kitos mašinų bei sistemų veikimo sąlygos.

Vizualinės apžiūros metodo efektyvumas didele dalimi priklauso nuo operatoriaus patyrimo ir sugebėjimo sukongcentruoti dėmesį į atskiras detales. Vienos apžiūros metu dėmesys būna sukongcentruotas į objektą iki 20–30 min. Didžiausi vizualinės apžiūros metodo trūkumai – palyginti nedidelė skiriamoji geba, sunku apžiūrėti sunkiai prieinamas vietas, mažas jautris esant nepakankamam apšvietimui (Volkovas 2000).

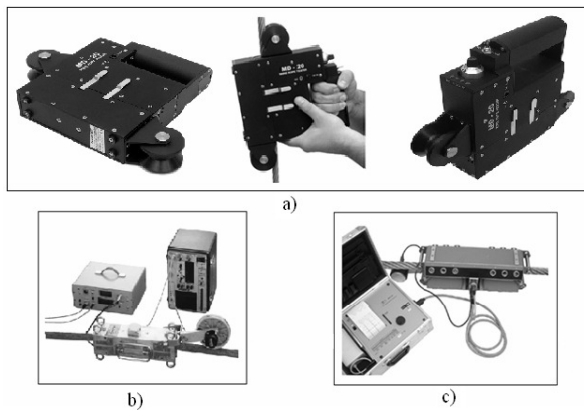
Magnetinių laukų sąveika pagrįsti diagnostikos metodai. Magnetinių laukų sąveika pagrįsti diagnostikos metodai yra gana universalūs ir gali būti plačiai taikomi. Be to, šie metodai kai kuriais atvejais yra vieninteliai, galintys suteikti reikiamos diagnostinės informacijos. Šiai grupei gali būti priskirti sūkurinių srovių, magnetinių dalelių dislokacijų ir magnetinių gaudytuvų metodai.

Sūkurinių srovių metodas. Sūkurinių srovių defektoskopijos metodai yra seniausiai naudojami ir išnagrinėti metodai, skirti plieninių lynų vientisumui tikrinti (Siviryuk 2008, Park 2005, Nagaraja 2006, Basak 2007, Toshikiyuki 2000, Saul 2002, Jomdecha 2003, Platzer 2009, Xiuli 2009, Canova 2009, Singh 2000, Russold 2000, Peterka 2004, Barat 2000, Chan 2003). Šio metodo esmė yra ta, jog rite yra leidžiama kintamoji elektros srovė ir dėl elektromagnetinės indukcijos reiškinių susidaro magnetinis laukas, kuris sąveikauja su ritės zonoje esančiu tiriamuoju objektu (1.8 pav.).



1.8 pav. Pirminių ir antrinių magnetinių laukų susidarymas tiriamajame lauke
Fig. 1.8. Primary and secondary magnetic field generation in the diagnostic field

Tiriamajame objekte indukuojamos sūkurinės srovės, kurios sudaro naują priešinga kryptimi nukreiptą magnetinį lauką. Abiejų laukų kombinacija sukuria suminį naujos krypties magnetinį lauką, ir elektros įtampa ritės maitinimo grandinėje pasikeičia. Keičiantis tiriamojo objekto elektrinėms, magnetinėms ir geometrinėms savybėms (atsiradus defektams), susidaro magnetinio lauko anomalijos, pakinta įtampa, fazė arba impedansas, o šių parametrų kitimą nesunku fiksuoti naudojant įprastus matavimo prietaisus (1.9 pav.). Užfiksavus antriniame magnetiniame lauke susidariusios indukuotosios elektrovaros parametrų pokytį, galima spręsti apie tiriamojo objekto elektrinių, geometrinių ar kitų savybių pokytį, kas dažniausiai rodo esant didesnę ar mažesnę defektą (Volkovas 2000).



1.9 pav. Plieninių lynų defektų nustatymo prietaisai: a) testeris MD20; b) defektų analizatorius; c) testeris MD120 (Volkovas 2000)

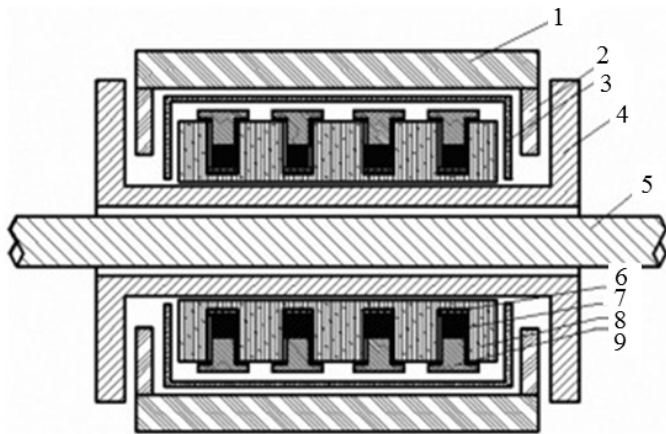
Fig. 1.9. An instrument to detect damage in wire rope: a) MD20 tester; b) defect analyser; c) MD120 tester (Volkovas 2000)

Sūkurinių srovių metodas plačiai naudojamas lynų techninei būklei kontroliuoti, po žeme esantiems objektams aptikti ir atstumui iki jų nustatyti, taip pat jų ir kitų daugiaaukščių namų liftų techninei būklei įvertinti. Dažniausiai praktikoje pasitaikantys lino defektai – atskirų jų sudarančių vielų ar jų pluoštų trūkis, efektyvaus skerspjūvio sumažėjimai – fiksuojami pagal magnetinio lauko anomalijas ir įtampas, fazės ar impedanso kitimą, lynui judant sūkurinių srovių defektoskopo centrine dalimi, siekiant nustatyti lynų tris savybes: lino skerspjūvio plotą, vielos kontaktus ir lino vielų nutrūkimus (Volkovas 2000, Rizzo 2004).

Taikant šį metodą aptinkamos ne visos nutrūkusios vielos dėl lino paviršiuje esančio susikaupusio purvo. Lino paviršiuje susikaupę nešvarumai (purvas su tepalu) nutrūkusias vielas prispaudžia prie lino paviršiaus ir jas uždengia. Esant šiam efektui sūkurinės srovės ne visada praeina pro nešvarumus ir ne visada ap-

tinka nutrūkusias vielas. Pagal galiojančius standartus, iki 6 mm skersmens plieniniams lynams (mano tiriamojo lyno atveju) leidžiamos 3 nutrūkusios vielos viename lyno žingsnyje. Esant didesniai nutrūkusių vielų skaičiui viename vijos žingsnyje, plieninis lynas turi būti pakeistas nauju. Neaptikus visų nutrūkusių vielų lyno paviršiuje ir viršijus standarte nustatytą nutrūkusių vielų skaičių viename lyno žingsnyje, lynas gali nutrūkti.

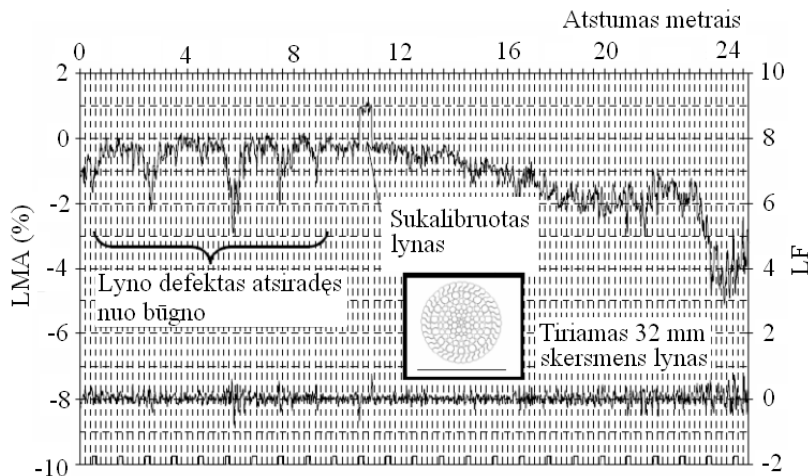
Magnetinių laukų metodas. Tiriant lyną, ieškant jo defektų, fiksavimo detektorius lynu turi judėti tolygiai. Nutrūkusios vielos aptinkamos detektoriaus viduje, magnetiniame lauke su magnetiniais jutikliais fiksuojant magnetinio lauko padidėjimą ar sumažėjimą. Apdorojant gautą signalą, kurio vertė viršija leistiną normą, iš karto signalizuojama garsiniais ir šviesos signalais ir rodoma, kad aptiktas defektas. Apdoroti jutiklio užfiksuoti duomenys per A/D keitiklį paverčiami skaitmeniniais signalais, kurie vėliau apdorojami kompiuteryje naudojant įvairias priemones, pvz., banginę analizę, trikdžių filtrus, nufiltruojant nuo signalo tikrinimo metu atsiradusius trikdžius. Norint surasti vielos įtrūkio vietą, yra naudojamas jutimo jutiklis, kuris nuolatos į kompiuterį siunčia gaunamą informaciją. Programiškai suderinami jutimo jutiklio ir detektoriaus signalai, kad atspausdintoje lyno defektų juostoje būtų matomi defektų skaičiai ir vietos, kuriose šie defektai yra (1.10 pav.) (Xiuli 2009).



1.10 pav. Lynų defektų iešiklio schema: 1 – korpusas; 2 – pastovus magnetas; 3 – magnetinis skydas; 4 – kreipiamasis, prie lyno skersmens prisitaikantis vamzdis; 5 – plieninis lynas; 6 – apsauginis blokas; 7 – magnetinis jutiklis; 8 – įvorė; 9 – skląstis, skirtas magnetiniam laukui nuo išorinio poveikio apsaugoti (Xiuli 2009)

Fig. 1.10. Finder diagram of wire rope: 1 – body; 2 – permanent magnet; 3 – magnetic shield; 4 – the guide tube is adaptable to the wire rope diameter; 5 – wire rope; 6 – guard block; 7 – magnetic sensor; 8 – bush; 9 – bar to protect against external magnetic field impact (Xiuli 2009)

Ant plieninio lyno esantys defektai vaizduojami grafiškai (1.11 pav.). Vienoje ašyje pateikiamas matuojamo plieninio lyno ilgis, o kitoje – pažymima magnetinio lauko kitimo amplitudė. Taip pavaizduojant plieninio lyno magnetinio lauko kitimą atskiruose jo taškuose nustatomi esami defektai ir defekto buvimo vieta (Basak 2009, Kotelnikov 2003).



1.11 pav. Plieninio lyno defektų grafinis vaizdas (Basak 2009)

Fig. 1.11. Graphical view of wire rope defect (Basak 2009)

LMA (Loss-of-metallic-area inspection) – plieninio lyno metalinio ploto sumažėjimas (%). Šis defektas atsiranda aptikus korozijos požymius, pasikeitus lyno diametru.

LF (Localized-flaw-inspection) – plieninio lyno defektas nutrūkus vienai ar kelioms lyno konstrukcijos vieloms.

Taikant šį metodą ne visuomet galima užtikrinti tolygų lyno judėjimą. Lynui pradedant judėti ir jam stojant, keičiasi lyno judėjimo greitis, o taip pat lynas pradeda virpėti, todėl aptikti visas nutrūkusias vielas lyno išorėje negalima.

1.3. Analizinių-kompiuterinių tyrimų apžvalga

Didelis dėmesys skirtas plieninių lynų matematinių modelių kūrimui ir analizei baigtinių elementų metodu. Skirtingi tyrėjai, analizuodami plieninio lyno matematinių modelių, vertino skirtingus parametrus. Kostelas G. A. (Costello G. A.), analizuodamas lyno struktūrą, įvertino trintį, įtempius, sukimo ir lenkimo momentus (Costello 1997), o analizuodamas septynių vijų lyną, trinties nevertino

(Costello 1983, Leclair ir Costello 1986). Filipas J. V. (Phillips J. W.) ir Kostelas G. A. (Costello G. A.), analizuodami plieninį lyną 6×25 IWRC, vertino kontaktus tarp elementų, įtempius, sukimo ir lenkimo momentus, tačiau nevertino deformacijos ir trinties (Phillips ir Costello 1985). Velinskis S. A. (Velinsky S. A.) analizavo 6×19 plieninį lyną, įvertindamas įtempius, sukimo ir lenkimo momentus, dvigubą spiralę, lenkimo standumą, tačiau nevertino kontaktų ir trinties (Velinsky 1985). Lanteignis J. (Lanteigne J.) analizavo lyną, įvertindamas kontaktus ir trintį tarp vielų, tempimą, lenkimo ir sukimo momentą. Tačiau nevertino vielų deformacijos ir santykinio vidinių vijos sluoksnio poslinkių (Lanteigne 1985). Raufas M. (Raoof M.) ir Krainkanikas I. (Kraincanic I.) analizavo keletą vijų, įvertindami kontaktus, trintį, įtempius ir sukimą (Raoof ir Kraincanic 1998). Giglis M. (Giglio M.) ir Manesas A. (Manes A.) septynių lyno vijų su nepriklausoma šerdimi modelyje vertino įtempius ir nuovargį, tačiau nevertino kontaktų ir trinties (Giglio ir Manes 2005). Prakašas A. (Prakash A.), atlikdamas trijų vijų lyno defektų analizę, vertino suspaudimą ir kontaktus (Prakash 1992). Kumaras K. (Kumar K.) ir Botsis J. (Bots J.) analizavo n vielų turinčios vijos linijinius kontaktus, įvertindami įtempius ir sukimo momentą (Kumar ir Bots 2001). Elatas D. (Elata D.) analizavo 6×36 IWRC susuktą ir 18×7 IWRC nesusuktą plieninio lyno struktūrą, įvertindamas įtempius ir sukimo momentą. Kontaktai buvo nevertinami, o trintis begalinė (Elata 2004). Zhangas D. K. (Zhang D. K.) analizavo 6×19 plieninio lyno vijos kontaktus ir trintį, nagrinėjo įšilimo mechanizmą (Zhang 2003).

Reikia atkreipti dėmesį, kad daugelis mokslinių darbų autorių, atlikdami teorinius tyrimus, įvertino esamus kontaktus, trintį, nuovargį tarp vielų, tačiau vielų deformacija buvo nevertinta.

Paczeltis I. (Paczelt I.) ir Beleznaitis R. (Beleznai R.) baigtinių elementų metodu sumodeliavo ir analizavo dviejų sluoksnių plieninį lyną, įvertindami visus tarp vielų įmanomus kontaktus, sausą trintį tarp vielų mažų poslinkių ir deformacijų, įtempius, sukimo ir lenkimo momentus (Paczelt 2011).

Jiangas V. G. (Jiang W. G.) ir Henšalas J. L. (Henshall J. L.) analizavo vieno sluoksnio vielų aštuonių vijų lyną, įvertindami simetrijos sąlygas, trintį ir kontaktus tarp šerdies ir tarp išorinio sluoksnio vijų, tačiau neįvertindami kontaktų tarp vielų. Analizė atlikta vieną lyno galą užtvirtinus, o kitą lyno galą apkraunant apkrova (Jiang ir Henshall 1999). Jiangas V. G. (Jiang W. G.) taip pat analizavo dviejų sluoksnių vielų aštuonių vijų lyną, įvertindamas simetrijos sąlygas, įtempius ir sukimo momentą. Kontaktai tarp šerdies ir pirmojo vielų sluoksnio buvo laikomi linijiniais, o tarp vielų pirmojo ir antrojo sluoksnių kontaktai buvo laikomi taškiniais. Kontaktai tarp tame pačiame sluoksnyje esančių vielų buvo nevertinami. Tyrimas buvo atliktas vieną lyno galą užtvirtinus, o kitą lyno galą apkraunant apkrova (Jiang 2000). Kitame tyrime Jiangas V. G. (Jiang W. G.) analizavo vieno sluoksnio vielų aštuonių vijų lyną, įvertindamas simetri-

jos sąlygas, įtempius ir sukimo momentą, trintį, kontaktus tarp šerdies ir vijų, taip pat įvertindamas kontaktus tarp vielų (Jiang 2008). Taktakas K. (Taktak M.) analizavo tikrai vieną sumodeliuotą ir susuktą viją, nevertindamas simetrijos sąlygų, kontaktų ir trinties (Taktak 2005).

Pastebėta, kad mokslininkai, norėdami supaprastinti tyrimus, naudoja simetrijos sąlygas. Įvertinami kontaktai ir trintis, bet neįvertinama kontaktų deformacija, o kontaktiniai įtempiai yra paskaičiuojami (Paczelt 2011).

Vielinio lyno teorija remiasi gerai žinomame klasikiniame traktate Loveso A. E. H. (Love A. E. H.) išvestomis pusiausvyros lygtimis. Dauguma analitinių tyrimų, dėl sudėtingos teorijos, rėmėsi pusiausvyros lygtimis, kuriose neįvertintos trinties reikšmės. Plieninių lynų geometrija yra sudėtinga ir užrašoma netiesinėmis pusiausvyros lygtimis, kurias sunku spręsti be linearizacijos procesų (Love 1944).

Analizuojant skirtingai veikiančius ašine apkrova apkrautus lynus, galima prognozuoti mechaninę plieninių lynų būseną. Buvo iškeltos įvairios hipotezės tiriant vijų geometriją, vijas veikiant lenkimo arba ašine apkrova, atsiradus nuovargiui ir vibracijoms. Autoriai Kardousas A. (Cardou A.) ir Jolicoeuras C. (Jolicoeur C.) darbe išsamiai aptaria vijos mechaninį modelį (Cardou 1997). Analitiškai tiriant lynų vijas, sunku nustatyti vijų elgseną, kadangi yra daug lyną aprašančių parametrų, kurie gali skirtis nuo lyno konstrukcijos. Sathikhs S. (Sathikh S.) ir kitų autorių darbe pateiktas viela ir vienoje atkarpoje susikertančias vielas veikiančių jėgų tiesinės analizės tyrimas (Sathikh 1996). Deformacijos energija ir pusiausvyros metodų naudojimas davė tuos pačius rezultatus, patvirtindamas metodo teisingumą. Buvo nustatyta ankstesnių modelių netikslūs vielų žingsniai ir vielų poslinkio kampo pokyčių netikslumai. Tai buvo atlikta naudojant Vempnerio G. (Wempner G.) bendrus formulavimus ir Ramseino H. (Ramsey H.) plonų strypų teoriją (Wemper 1973, Ramsey 1988, 1990). Ghoreišis S. R. (Ghoreishi S. R.) su kolegomis sukūrė du uždaro analizės metodus, kurie gali būti naudojami lynų vientisumo analizei atlikti (Ghoreishi 2007).

Plėtojant baigtinių elementų metodą, daugelio autorių darbuose šis metodas naudojamas plieninių lynų mechaninėms savybėms tirti. Karlsonas A. D. (Carlson A. D.) ir Kasperas R. G. (Kasper R. G.), naudodami baigtinių elementų metodą, sumodeliavo lyno vielas ir ryšius tarp jų (Carlson ir Kasper 1973). Iširtas vielų įtempių pasiskirstymas tiesine ašine kryptimi, naudojant trijų koordinačių baigtinių elementų modelį su nustatytu poslinkiu. Vielų įtempiai plieniniame lyne, atsirandantys jį tempiant, dėl veikiančio sukimo momento buvo nevertinami ribojančiomis lygtimis (Jiang 1999, 2000). Ghoreišis S. R. (Ghoreishi S. R.) sukūrė trijų koordinačių tiesinį baigtinių elementų modelį, kuriame be apribojimų įvertinama trintis tarp vielų ir šerdies (Ghoreishi 2007).

Nėra sukurtos vienintelės metodikos ar matematinio modelio, kuriuos naudojant būtų galima tiksliai nustatyti plieninio lyno vijos deformacijas ją tempiant

ašine kryptimi. Šibus G. (Shibu G.) ir kitų autorių darbe dėmesys buvo skirtas plieninio lyno vijos baigtinių elementų modeliui sukurti ir jį ištirti, veikiant viją tampriąja deformacija, ir siekiant sumažinti gautų teorinių ir eksperimentinių rezultatų skirtumus. Atlikti vijos baigtinių elementų modelio tyrimo rezultatai parodė gerą koreliaciją su eksperimentinėmis reikšmėmis (Shibu 2011).

Elatas D. (Elata D.) sukūrė ir tyrė naują plieninio lyno su nepriklausoma plienine šerdimi (IWRC) modelį (Elata 2004). Erdonmezas C. (Erdonmez C.) tyrė realų trijų koordinačių struktūrinio lyno vijos baigtinių elementų modelį ir vijos sąveiką plieniniame lyne su nepriklausoma šerdimi (Erdonmez 2009, 2010).

Daugelyje atliktų teorinių tyrimų nebuvo įvertinamas vielų tarpusavio trinties poveikis. Kastratovičius G. (Kastratovic G.), Jiangas V. (Jiang W.), Elatas D. (Elata D.) ir Imrakas C. E. (Imrak C. E.) trinties poveikį vertino atlikdami tyrimus, tačiau nevertino kontaktų poveikio taikydami ašinę apkrovą (Kastratovic 2010, Jiang 2000, Elata 2004, Imrak 2010).

Kastratovičius G. M. (Kastartovic G. M.) ir Vidanovičius N. D. (Vidanovic N. D.) sumodeliavo plieninio lyno su nepriklausoma plienine šerdimi baigtinių elementų modelį ir tyrė jį, dėmesį skirdami ryšiams tarp plieninio lyno vielų. Tyrime buvo taikomi dviejų tipų ryšiai ir įvertinama trintis tarp kontaktų (Kastartovic ir Vidanovic 2011).

Junas M. (Jun M.) ir kiti sumodeliavo 6 x 19 IWRC plieninio lyno baigtinių elementų modelį ir tyrė viso lyno ir kiekvienos vijos deformacijas, visiškai apribodami lyno vieno galo judesius, o kitas modelio galas buvo apribotas jėga, veikiančia lyną ašine kryptimi. Atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad skirtumas tarp išorinių ir vidinių plieninio lyno vijų deformacijų yra nedidelis dėl vidinių ir išorinių vijų santykinio judėjimo (Jun 2008).

Imarkas C. E. (Imark C. E.) tyrė lyno su nepriklausoma šerdimi geometrinis parametrus, kai vielos ant plieninės vijos šerdies buvo vyniojamos ašine kryptimi. Plieninių lynų su nepriklausoma šerdimi išorinių vijų žingsnis buvo modeliuojamas dvigubos spiralės forma (Imrak 2010).

Naudojant baigtinių elementų metodą, dėl sudėtingos plieninio lyno geometrijos ir didelio kiekio besiliečiančių vielų paviršiaus, galima modeliuoti nedidelę lyno skerspjūvio dalį – pilną vienos lyno vijos fragmentą.

1.4. Plieninio lyno tyrimų eiga

Siekiant sukurti plieninio lyno nutrūkusių vielų nustatymo metodą, buvo atlikta daug eksperimentinių ir teorinių tyrimų, kurie tarpusavyje susiję, dažnai teorinis tyrimas rėmėsi eksperimento metu nustatytais parametrais, kurie buvo naudojami tolimesniuose teoriniuose tyrimuose. Šiame darbe pagrindinis dėme-

sys buvo skirtas eksperimentiniam tyrimui. Visą disertacinio darbo eigą galima įvardyti taip:

1. Suprojektuotas ir pagamintas originalus lyno fragmento eksperimentinio tyrimo stendas. Stendo masė buvo parinkta taip, kad lyno virpesiai sukeltų nykstamai mažus virpesius lyno korpuse, o stendo korpuso savieji dažniai būtų toli nuo lyno dažnių diapazono.
2. Eksperimentinio tyrimo stendas buvo ištirtas, eksperimentiškai nustatyti jo savieji dažniai. Tai buvo atliekama žadinant jį specialiu plaktuku pagal tris koordinacinių ašis ir akselerometru registruojant korpuso virpesius. Po to gautų virpesių signalas buvo apdorotas ir gautas virpesių spektras. Tyrimo rezultatai pateikiami 3.2. poskyryje.
3. Tyrimams buvo parinktas labiausiai paplitęs žmonių kėlimo įrenginiuose naudojamas lynas. Buvo atliktas lyno statinio tempimo tyrimas, siekiant nustatyti lyno standumą ir to standumo charakteristiką. Dėl lyme atsirandančios trinties, jo tempimo-atleidimo poslinkių kreivė pasižymi histerezės reiškiniu, tačiau parinkus teisingą lyno įtempimo dydį, lyno standumą galima laikyti pastoviu. Lyno tempimo eksperimentinis tyrimas buvo pateiktas 3.5 skyriuje, vienos lyno vijos tyrimas naudojant baigtinių elementų metodą pateiktas 2.3 skyriuje. Baigtinių elementų modelio ir eksperimentinio tyrimo metu gauti duomenys rodo tą patį rezultatų pobūdį, tačiau tiesiogiai jų sulyginti negalima. Bandant nustatyti trinties įtaką lyno fragmento virpesiams, buvo pakankamai įrodyta, kad lyno fragmento dinaminė sistema yra slopinama virš kritinės reikšmės. Tokiu atveju tiriant lyno fragmento savuosius virpesius eksperimentiškai neįmanoma užrašyti virpesių signalo, nes virpesiai nuslopsta greičiau kaip per vieną virpesių periodą.
4. Siekiant nustatyti lyno sukamąjį standumą, buvo atliktas dar vienas eksperimentinis tyrimas, kurio metu gauta lyno sukamojo standumo priklausomybė nuo jo sukimo momento. Dėl lyno struktūros ypatybių ir jo skerspjūvio sumažėjimo sukančiant, lyno sukamasis standumas mažėja didinant sukimo momentą. Eksperimento metu gautas lyno sukamasis standumas buvo panaudotas sudarant analitinį lyno modelį, kuris pateiktas 2 skyriuje.
5. Norint nustatyti lyno su keliomis nutrūkusiomis vielomis dinamines savybes, buvo atlikti lyno dinaminių savybių nustatymo eksperimentiniai tyrimai. Pirmiausia lynas buvo žadinamas skersine kryptimi elektrodinaminiu vibratoriumi taip, kad sukeltų skersinius lyno virpesius, o nekontaktiniais jutikliais buvo matuojami lyno skersiniai poslinkiai ir nutrūkusios lyno vielos poslinkiai. Eksperimentiškai buvo išmatuoti lyno ir jo nutrūkusios vielos virpesiai stendo korpuso atžvilgiu visame pasirinktame dažnių diapazone, kuris buvo nustatytas teoriškai juos įvertinus pagal tikėtinas virpesių formas. Čia buvo nustatytos lyno fragmento, kaip dinaminės sistemos, amplitudinės-dažninės charakteristikos.

6. Siekiant įvertinti lyno dinaminį savybių pokytį dėl papildomos masės (taršalai, tepalas) bei nutrūkusios lyno vielos dažnio pokytį dėl nutrūkusios vielos pašaknio poveikio, prie esančio įtempto lyno fragmento buvo pritvirtintas mažas lyno fragmentas (50 mm ilgio) su nutrūkusia viela ir išmatuotas jos savasis dažnis. Įrodyta, kad nutrūkusios vielos pašaknės poveikis lyno vielos savajam dažniui yra mažas. Būtina konstatuoti, kad net tiriant paprastus dinaminį sistemų modelius, negalima laikyti, kad nutrūkusia viela yra kietai pritvirtinta prie lyno (pvz., kaip konsolė). Vielos pašaknės kaip jungties standumas yra mažesnis, todėl eksperimentiškai gauti dažniai yra žemesni.
7. Tiriant lyno ir nutrūkusios vielos skersinius virpesius, nustatyta, kad norint rasti nutrūkusios vielos vietą, reikia tiksliai žinoti nutrūkusios vielos dažnį, kuris priklauso nuo vielos ilgio ir jos formos (tiesi, sulenкта). Siekiant vieningo dažnio, kuris leistų aptikti virpančią nutrūkusią vielą, reikia surasti tokią virpesių formą, kuriai esant viela virpėtų kartu su lynu. Tokia forma yra sukamieji lyno virpesiai, kurie yra žemo dažnio, todėl vielų virpesiai lyno atžvilgiu nesusižadina. Tokiu atveju lyno sukamųjų virpesių amplitudė yra pakankamai didelė ir vielų galai virpa kartu su lyno paviršiumi ir yra lengvai aptinkami.
8. Sudarant teorinį lyno fragmento modelį, buvo tiriami skersiniai ir sukamieji lyno virpesiai atskirai. Taip buvo daroma todėl, kad lyno virpesių formos yra ortogonalios ir dažniai stipriai skiriasi. Teoriniame modelyje įvertinti lyno konstrukciją, kad tempiant lyną jis pasisuktų kampu išilgai savo ašies, yra netikslinga dėl modelio sudėtingumo ir neegzistuojančio tokios sistemos analitinio sprendinio. Šiuo atveju lyno skersiniai virpesiai, kuriuos sukelia vibratorius, tampa žadinimu lyno sukamiesiems virpesiams, o bendrasis sistemos atsakas yra dviejų virpesių suma. Tokiu atveju lyno sukamųjų virpesių uždavinio atskirai spręsti nereikia, nes šiuo atveju dominuos žemiausia lyno sukamųjų virpesių forma (žinoma iš teorinių šaltinių (Costello 1997, 2003) ir eksperimentinių tyrimų).
9. Pažymėtina, kad lyno sukamųjų virpesių žadinimas šiuo atveju bus parametrinis.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus mokslinės literatūros analizę galima daryti šias išvadas:

1. Remiantis atlikta plieninių lynų, jų defektų ir defektų diagnostikos metodų analize ir siekiant pagrįsti naujai kuriamo diagnostinio metodo struktūrinius sprendimus, disertacijoje pateikiamas plieninių lynų išoriniame sluoksnyje

nutrūkusių vielų nustatymo metodas. Metodas yra paremtas virpančių nutrūkusių vielų galų poslinkio nustatymu. Plieninio lyno fragmentas įtempiamas pastovia ašine apkrova ir vibratoriumi, statmenai lyno ašiai, sužadinami įtempto lyno fragmento skersiniai virpesiai, kurie pereina į lyno skersinius-sukamuosius virpesius. Esant lyno skersiniams-sukamiesiems virpesiams, nutrūkusios vielos virpa ir jos aptinkamos nekontaktiniais jutikliais. Apdorojant nekontaktinių jutiklių gautus signalus nustatoma nutrūkusių vielų buvimo vietą ir padėtį lyne.

2. Mokslinėse publikacijose plieninių lynų diagnostikos tyrimuose didelis dėmesys skirtas lyno defektams aptikti naudojant elektromagnetinį metodą. Atlikta literatūros apžvalga rodo, kad vizualinis lynų parametrų diagnozavimo metodas neužtikrina pilnos viso lyno diagnostikos, nes žmogaus akis nepamato visų lyno defektų, reikalingi aukštos klasifikacijos darbininkai. Elektromagnetinio metodo taikymas plieniniams lynams tikrinti yra dažniausiai naudojamas atliekant neardomuosius tyrimus. Naudojant šį metodą, sunkumai atsiranda analizuojant prietaiso vidinės ritės signalus, kurie suteikia informaciją apie lyno susidėvėjimo laipsnį, korozijos defektus ir nutrūkusias vietas. Taip pat labai sunku atskirti LF plieninio lyno nutrūkusių vienos ar kelių vielų signalus, jeigu jos yra to paties dydžio. Naudojant šį metodą, prietaisas nustato lyno konstrukcijos signalus (lyno konstrukcijos triukšmą), kuris būna apie 75–100 mV. Šis lyno konstrukcijos triukšmas trukdo atskirti plieninio lyno skersmens susidėvėjimo ir nutrūkusių vielų sukeltus signalus.
3. Atlikus mokslinės literatūros analizinių-kompiuterinių tyrimų apžvalgą nustatyta, kad daugiausia dėmesio skiriama plieninių lynų defektų naujų diagnostikos priemonių kūrimui ir esamų tobulinimui. Taip pat nustatyta, kad daug dėmesio skiriama pačių plieninių lynų savybių matematiniams skaičiavimams, įvertinant įvairius plieninio lyno parametrus, bei eksperimentiniams tyrimams – plieninių lynų defektams nustatyti naudojamų prietaisų su elektromagnetais tobulinimui.
4. Kitų autorių publikacijose išanalizuoti įvairūs plieninių lynų defektų tyrimo metodai, tačiau taikant dinaminį metodą plieninio lyno išorėje nutrūkusios vielos kitų tyrėjų nebuvo tiriamos. Todėl galimos didelės perspektyvos ir metodo tobulinimas tiriant lyno išorėje nutrūkusią vielą dinaminio metodu. Įvertinus mokslinėje literatūroje išnagrinėtus klausimus ir žinant darbo tikslą, tikslinga išspręsti šiuos uždavinius:
 - Įvertinti įtempto plieninio lyno fragmento skersinius ir sukamuosius virpesius, atsirandančius žadinant lyną statmenai įtempto lyno ašiai.
 - Pasiūlyti metodiką, leidžiančią bekontakčiu jutikliu aptikti nutrūkusią vielą lyno išoriniame sluoksnyje, kai įtempto plieninio lyno fragmentas sužadinamas reikiama virpesių forma.

- Sukurti eksperimentinį stendą, skirtą įtempto plieninio lyno fragmento ir jo nutrūkusių vietų virpesiams tirti.
- Taikant pasiūlytą metodiką ir naudojant sukurta eksperimentinį stendą, atlikti įtempto plieninio lyno fragmento defektų nustatymo eksperimentinius tyrimus.

Plieninio lyno analiziniai-skaitiniai tyrimai

Šiame skyriuje pateikti skersine kryptimi žadinamo lyno skersinių ir sukamųjų virpesių tyrimo rezultatai, gauti analiziniu-skaitiniu metodu. Šių virpesių savybės reikalingos įtempto plieninio lyno kokybės diagnostikai. Taip pat pateiktas BE metodu sudarytas lyno vijos modelis, turinčios išorėje kelias nutrūkusias vietas. Nustatyti tempiamos lyno vijos poslinkiai ir liekamieji pailgėjimai ją atpalaidavus, vertinant trintį.

Skyriaus tematika bus paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Šutins, Bučinskas et. al. 2014).

2.1. Plieninio lyno teorinių tyrimų metodika

Įvairios lyno savybių diagnostikos metodikos, besiremiančios lyno dinaminių savybių pokyčiu, yra žinomos ir taikomos. Nepaisant gausių teorinių ir kompiuterinių lyno savybių tyrimų, lyno vientisumo (nutrūkusių vielų nustatymo) tyrimas iki šiol išlieka sudėtinga problema.

Žinomi darbai (Gantmaxer 1950, Babakov 1965, Vanderveldt 1973), kuriuose lynas aprašomas lygtimis su dalinėmis išvestinėmis (analogiškai stygai),

pateikiami sunkiai realizuojami sprendiniai, be to, ten taikomos hipotezės sudarant lygtis, yra patogios, tačiau reikalauja papildomo eksperimentinio vertinimo.

Siekiant lyno, kaip dinaminės sistemos, savybių tyrimo, žemiau yra siūloma metodika, kuri leidžia, remiantis analitiniais ir skaitmeniniais sprendiniais, sukurti tinkamą lyno modelį, ir kuri būtų patikrinta eksperimentinio tyrimo metu.

Pirma, buvo atlikti įtempto plieninio lyno fragmento sukamojo standumo eksperimentiniai tyrimai, kurių rezultatai pateikiami 3.5 skyriuje. Tolimesniame įtempto plieninio lyno fragmento tyrime buvo naudojamos lyno sukamojo standumo reikšmės $c = 0,0086$, Nm^2/rad , nes lyno sukamasis standumas priklauso nuo lyno ašinės apkrovos. Įtempto plieninio lyno fragmento sukamojo standumo reikšmės yra gautos esant vardinei lyno ašinės apkrovos reikšmei. Esant kitoms įtempto plieninio lyno fragmento ašinės apkrovos reikšmėms, jo sukamojo standumo reikšmės skirsis.

Antra, buvo atliktas įtempto plieninio lyno vienos vijos fragmento statinio tempimo tyrimas. Tyrimui atlikti buvo panaudotas baigtinių elementų metodas. Buvo naudotas įtempto plieninio lyno išorinio sluoksnio vienos vijos fragmentas, kuriame visos vielos buvo sveikos, o nutrūkusios buvo 1, 2 ir 3 vielos. Tyrimų metu nustatyta, kad vijos fragmente nutrūkusių vielų įtaka bendram tiriamojo modelio standumui yra nykstamai maža ir sistemą galima laikyti nepakitusia, esant tokiam skaičiui nutrūkusių vielų. Tyrimo rezultatai pateikiami 2.3 skyriuje.

Trečia, buvo atliktas analogiškas viso įtempto plieninio lyno fragmento eksperimentinis tyrimas, kuriame lyno fragmentas buvo apkraunamas ašine jėga. Nustatyta įtempto plieninio lyno fragmento liekamoji deformacija, atsirandanti lyno fragmentą tempiant ir atleidžiant. Šio eksperimentinio tyrimo duomenys pateikiami 3.5 skyriuje.

Ketvirta, eksperimento metu buvo nustatytos įtempto plieninio lyno fragmento amplitudinės-dažninės charakteristikos, kurios leido įvertinti kuriamo lyno fragmento modelio gautąsias charakteristikas bei nustatyti esminius jo parametrus. Šio eksperimentinio tyrimo duomenys pateikiami 3.3 ir 3.4 skyriuje.

2.2. Skersiniai ir sukamieji įtempto lyno virpesiai

Nuo įtempto plieninio lyno fragmento vienu galu atitrūkusi viela, lyginant su pačiu lyno fragmentu, yra labai maža (nutrūkusi viela gali būti kelių milimetrų ilgio). Atitrūkusios vielos skersinių virpesių rezonansiniai dažniai yra žymiai aukštesni už įtempto lyno fragmento žemuosius rezonansinius skersinius ir sukamuosius dažnius. Dėl to galima atskirai nagrinėti tiek nutrūkusios vielos, tiek ir paties lyno fragmento virpesius. Sužadinus įtempto plieninio lyno fragmento žemuosius rezonansinius dažnius galima teigti, kad lynui virpant minėtais rezo-

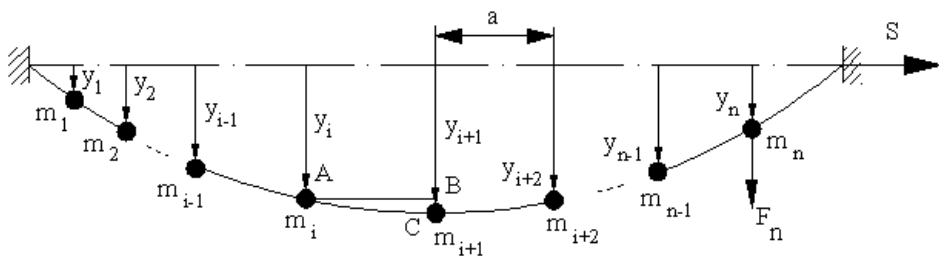
nansiniais dažniais, nutrūkusios vielos tampriosios deformacijos yra mažos ir virpesių tyrimo metu jų galima nepaisyti (nutrūkusios vielos virpesiai kinematiškai žadinami per jos sujungimo su įtemptu lynu vietą).

Iš gautų eksperimentinių rezultatų ir mokslinės literatūros duomenų (Glushko 1966, Malihovski 2001) matyti, kad įtempto plieninio lyno skersiniai virpesiai jam deformuojantis sukuria sukamuosius virpesius apie jo išilginę simetrijos ašį.

Kadangi tikslus įtempto plieninio lyno skersinių-sukamųjų virpesių analizinis nagrinėjimas yra sudėtingas, nes lynas yra sudarytas iš didelio kiekio tarpusavyje besiliečiančių vielų, todėl įtempto plieninio lyno skersinius ir sukamuosius virpesius analiziniu būdu nagrinėsime atskirai.

a) *Lyno skersiniai virpesiai* (Babakov 1965, Gantmacher 1950)

Aproksimuosime 4 mm skersmens 1,35 m ilgio lyną įtemptą bemase tampria styga su vienodais atstumais $a = 0,061$, m prie jos pritvirtintais taškiniais kūnais su vienodomis masėmis $m_1 = m_2 = \dots = m_i = \dots = m_n = m = 0,0066$, kg. (2.1 pav.).



2.1 pav. Lyno struktūrinė-skaičiuojamoji schema

Fig. 2.1. Structural-calculating scheme of the wire

Laikysime, kad lyno virpesiai žadinami harmonine jėga $F_n = F \sin \omega t$, pridėta prie n – tosios (12 – tosios) taškinės masės. Virpančio harmoniniais virpesiais lyno padėtį vertikalioje kryptimi apibūdina n apibendrintųjų koordinačių:

$$y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \dots, y_n. \quad (2.1)$$

Priimta, kad lynas virpa vertikaloje (brėžinio) plokštumoje. Jo virpesių lygtis sudarysime remdamiesi Lagranžo II – jo tipo lygtimis:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial y_i} + \frac{\partial \phi}{\partial \dot{y}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial y_i} = Q_i, \quad (2.2)$$

čia T , Π – nagrinėjamosios sistemos kinetinė ir potencinė energijos, Φ – disipacinė funkcija, Q_i – veikianti pagal $\dot{y}_i$ – tąją apibendrintąją koordinatę apibendrintoji jėga.

Sistemos kinetinė energija užrašoma taip:

$$T = \frac{1}{2} (m_1 \dot{y}_1^2 + m_2 \dot{y}_2^2 + \dots + m_{i-1} \dot{y}_{i-1}^2 + m_i \dot{y}_i^2 + m_{i+1} \dot{y}_{i+1}^2 + \dots + m_n \dot{y}_n^2) \quad (2.3)$$

$$m_1 = m_2 = \dots = m_n = m.$$

Priimama, kad įtempto plieninio lyno įtempimo jėga $S = 5 \text{ kN}$ ir nesikeičia jo deformavimo metu, t. y. nesikeičia visoms lyno fragmentą vaizduojančioms masėms m_i virpant (įtempto plieninio lyno fragmentą vaizduojančios stygos poslinkiai laikomi mažais) (Babakov 1965, Gantmaxer 1950).

Įtempto nevirpančio plieninio lyno (stygos su taškiniais kūnais) padėtis laikoma „nuline“ padėtimi, kurios atžvilgiu sistemai virpant yra nustatoma potencinė energija.

Tada deformuoto virpančio lyno potencinė energija yra (Babakov 1965, Gantmaxer 1950):

$$\Pi = S \Delta l, \quad (2.4)$$

čia $S = 5, \text{ kN}$ – lyno įtempimo jėga, Δl – bendras lyno pailgėjimas virpesių metu.

Pailgėjimui Δl nustatyti išnagrinėsime pailgėjimą Δl_i tarp kūnų i ir $i+1$ (jų masės m_i ir m_{i+1}). Iš trikampio ABC gauname (Babakov 1965, Gantmaxer 1950):

$$\Delta l_i = \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + a^2} - a = a \left[\sqrt{1 + \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{a^2}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

Išskleidę gautą (2.5) Teiloro eilutę $(y_{i+1} - y_i)$ laipsniais ir palikę šios eilutės tik pirmąją narį gauname:

$$\Delta l_i \cong \frac{1}{2a} (y_{i+1} - y_i)^2 \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n); \quad (2.6)$$

$$y_0 = y_{n+1} = 0. \quad (2.7)$$

Kadangi

$$\Delta l_i = \sum_{i=0}^{n+1} \Delta l_i, \quad (2.8)$$

tai visos sistemos potencinė energija:

$$\Pi = \frac{S}{2a} [y_1^2 + (y_2 - y_1)^2 + \dots + (y_n - y_{n-1})^2 + y_n^2]. \quad (2.9)$$

Disipacinės funkcijos Φ nustatymas yra sudėtingas. Apytiksliai priimame, kad disipacinės funkcijos forma yra analogiška potencinės energijos formai:

$$\phi = \frac{R}{2a} [\dot{y}_1^2 + (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \dots + (\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})^2 + \dot{y}_n^2] \quad (2.10)$$

čia $R = 50$, N/s – apibendrintas lyno deformavimo koeficientas. (Priimame, kad $R = \alpha S$, $\alpha = 0,01$, 1/s – pastovus koeficientas).

Taikydami Lagranžo (2.2) lygtis kiekvienai masei, gauname tokias lygtis kiekvienai taškinio kūno masei $m_1, \dots, m_n$:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) = m_1 \ddot{y}_1; \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} \right) = m_2 \ddot{y}_2; \dots; \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_i} \right) = m_i \ddot{y}_i; \dots; \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_n} \right) = m_n \ddot{y}_n.$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = \frac{S}{2a} [y_1 - (y_2 - y_1)] = \frac{S}{2a} [2y_1 - y_2];$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_2} = \frac{S}{2a} [(y_2 - y_1) - (y_3 - y_2)] = \frac{S}{2a} [-y_1 + 2y_2 - y_3];$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_3} = \frac{S}{2a} [(y_3 - y_2) - (y_4 - y_3)] = \frac{S}{2a} [-y_2 + 2y_3 - y_4];$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_4} = \frac{S}{2a} [(y_4 - y_3) - (y_5 - y_4)] = \frac{S}{2a} [-y_3 + 2y_4 - y_5]; \dots;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_i} = \frac{S}{2a} [(y_i - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_i)] = \frac{S}{2a} [-y_{i-1} + 2y_i - y_{i+1}]; \dots;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_{n-1}} = \frac{S}{2a} [(y_{n-1} - y_{n-2}) - (y_n - y_{n-1})] = \frac{S}{2a} [-y_{n-2} + 2y_{n-1} - y_n];$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_n} = \frac{S}{2a} [(y_n - y_{n-1}) + y_n] = \frac{S}{2a} [2y_n - y_{n-1}];$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{y}_1} = \frac{R}{2a} [2\dot{y}_1 - \dot{y}_2]; \frac{\partial \phi}{\partial \dot{y}_2} = \frac{R}{2a} [-\dot{y}_1 + 2\dot{y}_2 - \dot{y}_3]; \dots;$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{y}_i} = \frac{R}{2a} [-\dot{y}_{i-1} + 2\dot{y}_i - \dot{y}_{i+1}], \quad \frac{\partial \phi}{\partial \dot{y}_n} = \frac{R}{2a} [2\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}]$$

Gaunama tokia lygčių sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{y}_1 + \frac{R}{2a} (2\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \frac{S}{2a} (2y_1 - y_2) = 0; \\ m_2 \ddot{y}_2 + \frac{R}{2a} (-\dot{y}_1 + 2\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + \frac{S}{2a} (-y_1 + 2y_2 - y_3) = 0; \\ m_3 \ddot{y}_3 + \frac{R}{2a} (-\dot{y}_2 + 2\dot{y}_3 - \dot{y}_4) + \frac{S}{2a} (-y_2 + 2y_3 - y_4) = 0; \\ m_4 \ddot{y}_4 + \frac{R}{2a} (-\dot{y}_3 + 2\dot{y}_4 - \dot{y}_5) + \frac{S}{2a} (-y_3 + 2y_4 - y_5) = 0; \\ \dots \\ m_i \ddot{y}_i + \frac{R}{2a} (-\dot{y}_{i-1} + 2\dot{y}_i - \dot{y}_{i+1}) + \frac{S}{2a} (-y_{i-1} + 2y_i - y_{i+1}) = 0; \\ \dots \\ m_n \ddot{y}_n + \frac{R}{2a} (2\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) + \frac{S}{2a} (2y_n - y_{n-1}) = F \sin \omega t. \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Matricų pavidale ($m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$):

$$[A]\{\ddot{y}\} + [B]\{\dot{y}\} + [C]\{y\} = \{Q\}, \quad (2.12)$$

čia

$$[A] = \text{diag}\{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n\} = \text{diag}\{m, m, \dots, m\};$$

$$B = \frac{R}{2a} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix};$$

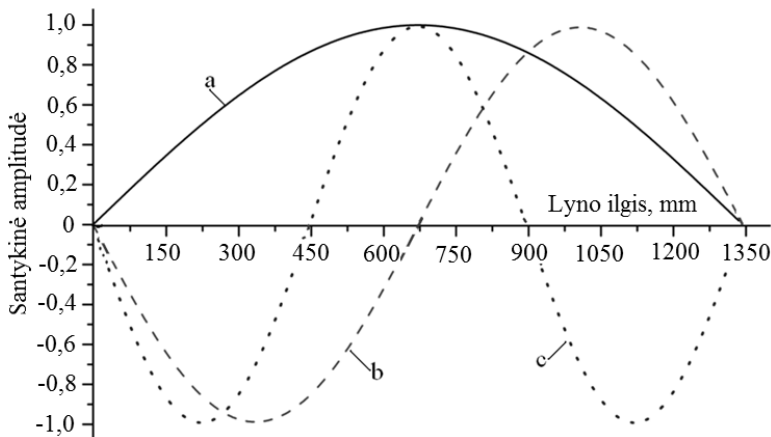
$$C = \frac{S}{2a} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

$$\{Q\} = \{0, 0, 0, \dots, F \sin \omega t\}. \quad (2.14)$$

Priėmus $[B] = 0$, pagal Babakovą (Babakov 1965) gauname sistemos savuosius dažnius nevertinat slopinimo:

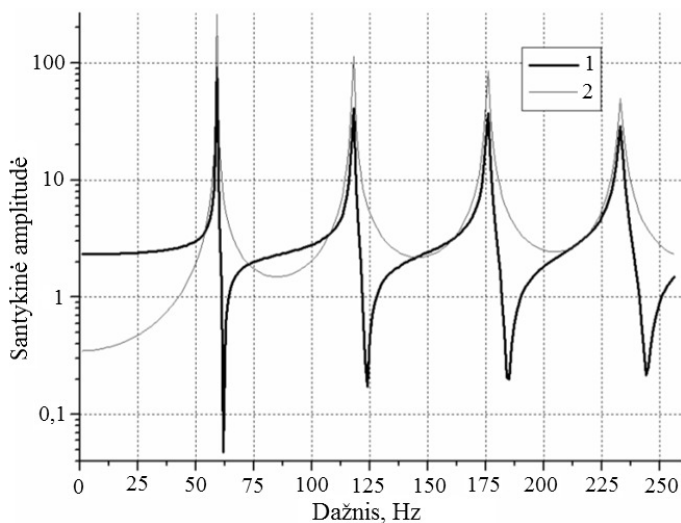
$$\omega_i = 2\sqrt{\frac{S}{ma}} \sin \frac{i\pi}{2(n+1)}. \quad (2.15)$$

Remdamiesi (2.12) lygybe gauname, kad kai įtempto 4 mm skersmens plieninio lyno harmoniniai virpesiai yra $y = A_i \sin \omega t$, tai lyno virpesių formos (modos) bus tokio pavidalo kaip parodyta 2.2 paveiksle, o amplitudinė-dažninė charakteristika – kaip pateikta 2.3 paveiksle.



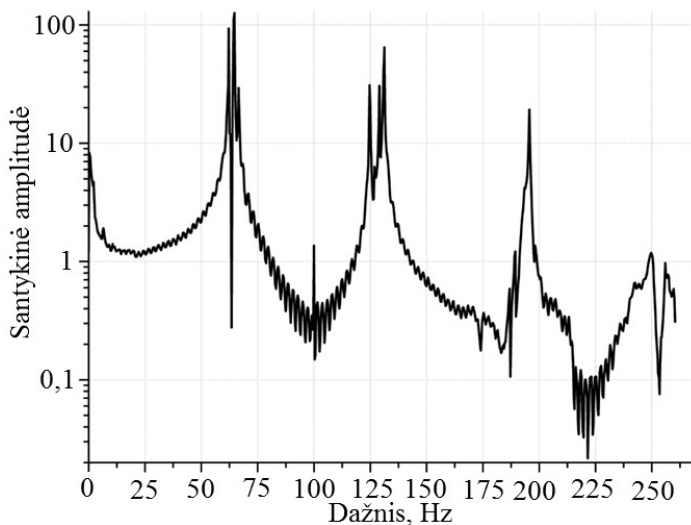
2.2 pav. Lyno virpesių formos: a) pirma; b) antra; c) trečia

Fig. 2.2. Vibration forms of the wire rope: a) first; b) second; c) third



2.3 pav. Lyno teorinių skaičiavimų amplitudinė-dažninė charakteristika: 1 – lyno skerspjūvio nutolusio 64,05 mm atstumu nuo dešiniojo lyno laikiklio; 2 – lyno skerspjūvio nutolusio 192,15 mm atstumu nuo kairiojo lyno laikiklio

Fig. 2.3. Amplitude-frequency characteristics of wire rope theoretical calculations: 1 – wire rope cross-section remote 64,05mm from right rope support; 2 – wire rope cross-sections remote 192,15mm from left rope support



2.4 pav. Eksperimentiniu būdu gautas lyno skersinių virpesių spektras
Fig. 2.4. The wire rope transverse oscillation spectrum obtained experimentally

Teoriškai apskaičiuotos ir eksperimentiškai nustatytos, harmoniškai žadinant įtemptą 4 mm skersmens ir 1,35 mm ilgio plieninį lyną, amplitudinės-dažninės charakteristikos pateiktos 2.3 ir 2.4 paveiksluose. Lyginant gautus teorinius ir eksperimentinius duomenis pastebima, kad teorinių ir eksperimentinių rezultatų pirmi dažniai sutampa ir yra lygus 62 Hz. Antras teorinių rezultatų dažnių pikas mažesnis už eksperimentinių rezultatų dažnių piką 7,7 %, trečias – 10,3 % ir ketvirtas – 8 %. Mažesnė virpesių amplitudė teorinių skaičiavimų metu rodo, kad naudojama teoriniuose skaičiavimuose slopinimo koeficiento reikšmė yra didesnė nei gauta eksperimentinių bandymų metu.

b) Lyno sukamieji virpesiai

Žinomuose literatūros šaltiniuose nustatyta (Babakov 1965, Gantmacher 1950), kad tempiamas lynas susisuka. Gauta, kad šis tempiamo lyno susisukimas (sąsūka) apytiksliai tiesiškai priklauso nuo jo ilgio pokyčio Δl lyną temptiant nedideliame lyno ilgio kitimo diapazone:

$$\Delta l \cong \kappa \varphi, \quad (2.16)$$

čia φ – lyno sąsūkos kampas, [rad], κ – proporcingumo koeficientas, [m/rad]. Minėtoje literatūroje teigiama, kad proporcingumo koeficientas yra priimamas kaip sąsūkos modelio pagrindas, esant mažiems sąsūkos kampams. Toks modelis yra pakankamai ištirtas ir patikimas.

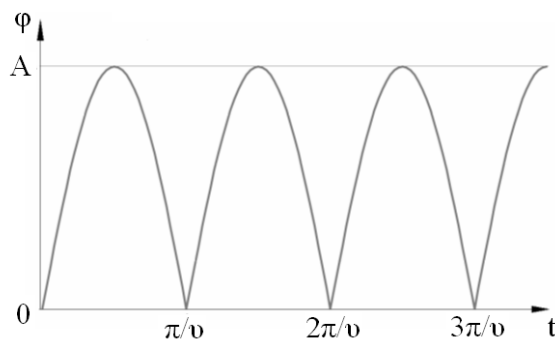
Sukėlus priverstinius harmoninius įtempto plieninio lyno skersinius virpesius $A_1 \sin \nu t$ arba laisvuosius virpesius $A_2 e^{-\varepsilon t} \sin \omega t$ (čia ν , ω – priverstinių ir laisvųjų virpesių dažniai; ε – sistemos charakteringosios lygties šaknies realioji dalis) lynas maksimaliai įsitempia ir susitraukia du kartus vieno skersinių virpesių periodo laikotarpiu:

$$T_{suk} = \frac{T_{sk}}{2}, \quad (2.17)$$

čia T_{suk} , T_{sk} – lyno sukamųjų ir skersinių harmoninių virpesių periodai.

Aišku, kad tokiu atveju įtempto plieninio lyno sukamųjų virpesių dažnis $p_{suk} = 2\nu$ arba atitinkamai $p_{suk} = 2\omega$. Remdamiesi (2.16) lygybe gauname, kad kai įtempto plieninio lyno harmoniniai virpesiai yra $y = A_1 \sin \nu t$, jo sąsūkos φ virpesiai bus tokios formos, kaip parodyto 2.5 paveiksle, kur:

$$\varphi = A |\sin \nu t|, \text{ kai } -\pi/\nu \leq t \leq \pi/\nu. \quad (2.18)$$



2.5 pav. Lyno sąsūkos kampo φ kitimo dėsningumo grafikas

Fig. 2.5. Twist angle φ variation regularity schema of the wire rope

Išskleidę (2.18) funkciją Furjė eilute gauname (Bronshtein 1981):

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{2A}{\pi} - \frac{4A}{\pi} \left(\frac{\cos 2vt}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4vt}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6vt}{5 \cdot 7} + \dots \right) = \\ &= A \left(0,6366 - 0,4244 \cdot \cos 2vt - 0,0848 \cdot \cos 4vt - \dots \right. \\ &\quad \left. - 0,0364 \cdot \cos 6vt - \dots \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Matome, kad pagrindinės harmonikos dažnis yra $2v$, o šios harmonikos amplitudė yra apie 5 kartus didesnė už $4v$ dažnio amplitudę, o tai tiesiogiai atitinka virpesių energijos pasiskirstymą. Todėl įtempto plieninio lyno sąsūkos virpesiuose dominuoja virpesių dedamoji, kurios dažnis $2v$. Jos amplitudė yra žymiai didesnė už kitas dedamąsias su aukštesniais dažniais.

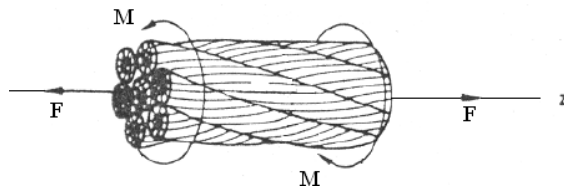
Įtempto plieninio lyno vielos sukamųjų virpesių amplitudė yra didelė, kai įtempto plieninio lyno skersiniai harmoniniai virpesiai yra rezonansiniai, t. y. kai $v \cong p$. Šis efektas buvo pastebėtas atliktų eksperimentinių tyrimų metu.

Gauti analitinio tyrimo rezultatai rodo, kad dėl skersinio žadinimo atsiranda papildomas lyno tempimas, kuris sukelia reikšmingus lyno fragmento sukamuosius virpesius, reikalingus siūlomam lyno diagnostikos metodui realizuoti.

2.3. Plieninio lyno vijos tyrimas baigtinių elementų metodu

Lyno, kaip ir kitų objektų, kai kurias savybes, kurios daro įtaką dinaminių poslinkių didumui, galima analizuoti esant šiems objektams ir statiniame būvyje. Šiame poskyryje BE metodu yra analizuojama trinties ir nutrūkusių vielų bei jų

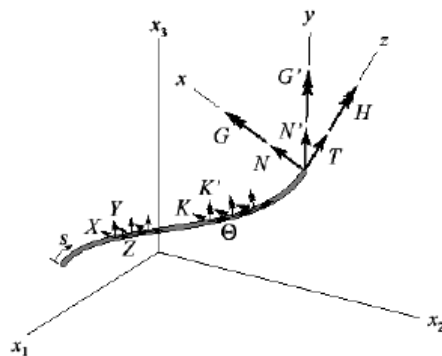
skaičiaus įtaka vijos standumui ir poslinkių slopinimui. Tai parametrai, kurių įtaka yra vertinama sudarant lyno dinaminį modelį.



2.6 pav. Plieninio lyno fragmentas
Fig. 2.6. Wire rope section

Apkraunant įtemptą plieninį lyną, jis ne tik pailgėja veikiamas tempimo jėgos F , bet ir dėl savo sudėtingos konstrukcijos, sukuriiančios sukimo momentą M , pasisuka apie savo simetrijos ašį z (2.6 pav.).

Tempiamo suvyto lyno vienos vielos skerspjūvyje veikia tempimo jėga T ir dvi skersinės jėgos N ir N' , sukimo H ir du lenkimo momentai G ir G' (2.7 pav.). Įtempto plieninio lyno vienos vielos paviršiuje yra pasiskirsčiusios papildomos kontaktinės jėgos ir momentai. Šios papildomos kontaktinės jėgos ir momentai žymimos simboliais X, Y, Z ir K, K' bei Θ (Costello 2003, Sathikh 1996).



2.7 pav. Įtemptą plieninę vielą veikiančios jėgos ir momentai
Fig. 2.7. Forces and moment distribution in a wire

Susumavus įtempto plieninio lyno vielą trijų koordinačių kryptimis veikiančių jėgų ir momentų pusiausvyros lygtis, gauname netiesines diferencialines lygtis, kurios pateiktos (2.20) ir (2.21) išraiškose:

$$\begin{aligned}
\frac{dN}{ds} - N'\tau + Tk' + X &= 0, \\
\frac{dN'}{ds} - Tk + N\tau + Y &= 0, \\
\frac{dT}{ds} - Tk' + N'k + Z &= 0,
\end{aligned} \tag{2.20}$$

čia s – vielos ašies lanko ilgis.

$$\begin{aligned}
\frac{dG}{ds} - G'\tau + Hk' - N' + K &= 0, \\
\frac{dG'}{ds} Hk + G\tau + N + K' &= 0, \\
\frac{dH}{ds} - Gk' + G'k + \Theta &= 0.
\end{aligned} \tag{2.21}$$

(2.20) ir (2.21) išraiškos yra lyno vielos, išdėstytos sraigtinėje linijoje, supaprastintos pusiausvyros lygtys. Pusiausvyros lygčių dedamosios dalys, kaip santykis tarp veikiančios pagrindinės jėgos ir lenkimo, sukimo bei pailgėjimo komponentų, išreiškiamos taip:

$$\begin{aligned}
G &= EI_x (k - k_0), \\
G' &= EI_y (k' - k'_0), \\
H &= C(\tau - \tau_0), \\
T &= ES\xi.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

čia E – vielos medžiagos tamprumo modulis, I_x ir I_y – skerspjūvio inercijos momentas, C – sukimo standumas, A – skerspjūvio plotas, ξ – vielos ašinė apkrova (Costello 2003). Lyno vielos, kurios skerspjūvio spindulys R , dedamosios dalys yra:

$$\begin{aligned}
G &= \frac{\pi R^4}{4} E (k - k_0), \\
G' &= \frac{\pi R^4}{4} E (k' - k'_0), \\
H &= \frac{\pi R^4 E}{4(1 + \nu)} (\tau - \tau_0), \\
T &= \pi R^2 E \xi.
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Įtempto plieninio lyno viją veikiančios deformacijos aprašomos Love's spindulio teorija (Costello 1997). Naudojant šią teoriją, trys skirtingi poslinkiai (u_1, u_2, u_3) aprašomi vienetiniais vektoriais n, b, t ir vienu sukamuoju $(\chi_3)t$, kuris yra nukreiptas liestinės kryptimi. Koordinačių sistemoje ašine linija poslinkiai naudojami apytiksliai skaičiuoti vijos pasukimo skersmeniui. Vienetinių vektorių n, b, t pasisukimas charakterizuojamas dydžiu χ_i , $i = 1, 2, 3$. Šlyties jėga nevertinama. Įvertinus tai, gaunamos išraiškos:

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{ds} + ku_3 - \tau u_2 &= X_2, \\ \frac{du_2}{ds} + \tau u_1 &= -X_1, \frac{du_3}{ds} - ku_1 = \varepsilon, \\ \frac{dX_1}{ds} + kX_3 - \tau X_2 &= \Delta w_1, \\ \frac{dX_2}{ds} + \tau X_1 &= \Delta w_2, \frac{dX_3}{ds} - kX_1 = \Delta w_3, \end{aligned} \quad (2.24)$$

čia ε yra santykinė vijos šerdies deformacija ir Δw_i , $i = 1, 2, 3$ yra išlinkimo pakeitimas. Vijos šerdį veikiančios vidinės jėgos – ašinės jėgos, lenkimo ir sukimo momentai – apskaičiuojami naudojant šias formules:

$$\begin{aligned} N &= AE\varepsilon - \text{ašinė tempimo jėga,} \\ M_1 &= I_1 E \Delta w_1, M_2 = I_2 E \Delta w_2 - \text{lenkimo momentai,} \\ M_3 &= M_T = I_T G \Delta w_3 - \text{sukimo momentai.} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Šlyties jėgos apskaičiuojamos:

$$\begin{aligned} F_1 &= -\left\{ \frac{dM_2}{ds} + \frac{dX_3}{ds} M_1 + \frac{d^2 u_2}{ds^2} M_3 + \mu_2 \right\}, \\ F_2 &= \frac{dM_1}{ds} + \frac{d^2 u_1}{ds^2} M_3 - \frac{dX_3}{ds} M_2 + \mu_1, \end{aligned} \quad (2.26)$$

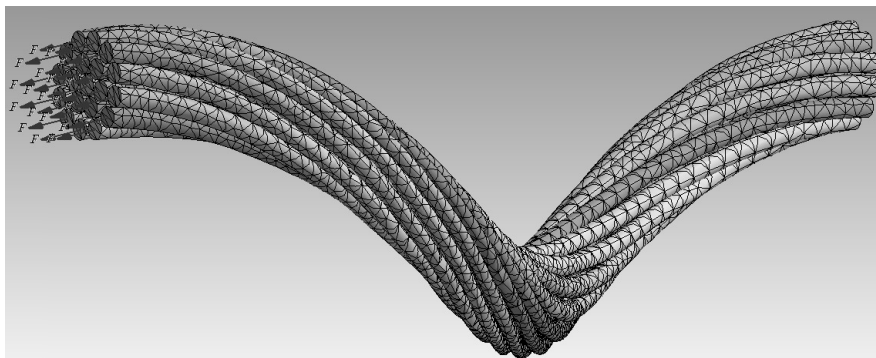
čia A – skerspjūvio plotas, I_1, I_2 – 1 ir 2 ašies skerspjūvio inercijos momentai, kurie yra lygiagretūs vienetiniams vektoriams n ir b , I_T – sukimo inercijos momentas, E – Jungo modulis, G – šlyties modulis, μ_k ($k = 1, 2$) – momento intensyvumas nuo paskirstytos ašinės apkrovos.

Įtempto plieninio lyno vijoje tarp vielų esantys kontaktai gali būti įvairūs. Tame pačiame vijos sluoksnyje esančios vielos gali ir nesiliesti. Įtempto plieni-

nio lyno šerdis su vijos vielų pirmuoju sluoksniu liečiasi linijiniu kontaktu, o tarp vijos vielų pirmojo ir antrojo sluoksnio yra taškiniai kontaktai.

Tarpai tarp vijos vielų kontaktinių paviršių, kurie gali būti tarp vijos šerdies ir vielų vidinio sluoksnio arba tarp vidinių ir išorinių vielų sluoksnių, priklauso nuo vijos vielų susidėvėjimo lygio ir lyną tempiančios ašinės jėgos. Vijos vielų lenkimo ir sukimo momentai sukelia šlyties įtempius.

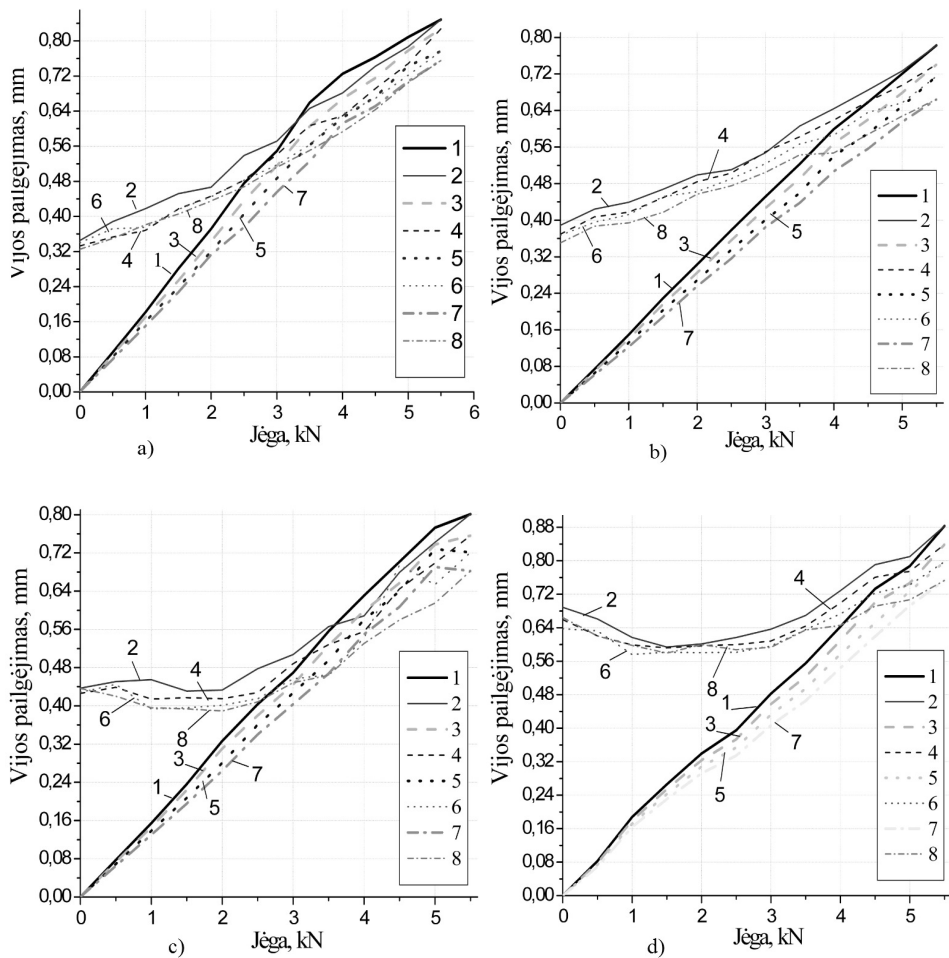
Siekiant nustatyti lyno ašinio tempimo liekamuosius įtempius, buvo atliktas įtempto plieninio lyno vienos vijos teorinis tyrimas. Tam buvo sudarytas įtempto plieninio lyno su nepriklausoma šerdimi, kurios skersmuo yra 4,186 mm (6x19), vienos vijos BE modelis (2.8 pav.). Naudojant kompiuterinę programą ANSYS 13, buvo apskaičiuoti tempiamos ir atpalaiduotos vieno žingsnio vijos ašiniai poslinkiai, įvertinant plieninio lyno medžiagą, kontaktus ir trintį tarp vielų. Tas buvo atlikta, įvertinant žingsnio didumą ir nutrūkusių vielų skaičių, esančių ant vijos paviršiaus.



2.8 pav. Įtempto plieninio lyno vienos vijos baigtinių elementų modelis

Fig. 2.8. Geometrical model of wire rope strand

Modeliuojant, plieninio lyno vijos vienas galas buvo nejudamai įtvirtintas, o kitas vijos galas buvo tempiamas jėga didėjančia iki 5,5 kN. Po to lynas buvo atpalaiduotas, palaipsniui mažinant jėgą iki nulio. Modelio medžiaga – šaltai valcuotas plienas AISI 1020, kurio tamprumo modulis $E = 2,05 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$, Puasono koeficientas – $\nu = 0,29$ ir šlyties modulis – $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$. Straipsniuose (Ghoreishi 2007; Imrak 2010; Katratovic 2010; Paczelt 2011) nurodytas trinties koeficientų reikšmių intervalas yra $\tau = 0,115 \dots 0,25$. Žinant, kad lyno vijos elementai yra sutepami tepalu, skaičiavimuose buvo naudojamas trinties koeficientas $\tau = 0,15$. Modeliavimo rezultatai pateikti 2.9 paveiksle.



2.9 pav. 12 mm (a), 18 mm (b), 36 mm (c) ir 72 mm (d) ilgių žingsnių vijų tempimo-atleidimo pailgėjimo priklausomybė nuo jėgos: nėra nutrūkusios vielos (1 – tempimas; 2 – atpalaidavimas); nutrūkusį vieną vielą (3 – tempimas; 4 – atpalaidavimas); nutrūkusios dvi vielos (5 – tempimas; 6 – atpalaidavimas); nutrūkusios trys vielos (7 – tempimas; 8 – atpalaidavimas)

Fig. 2.9. Dependency tension-release 12 mm (a), 18 mm (b), 36 mm (c) ir 72 mm (d) long strands steps elongation of force: there isn't broken wire (1 – tension, 2 – release); one broken wire (3 – tension, 4 – release); two broken wire (5 – tension, 6 – release); three broken wire (7 – tension, 8 – release)

2.9 paveiksle pateikta tempimo-atpalaidavimo modeliavimo metu gauta lyno vijos pailgėjimo priklausomybė nuo apkrovos, esant 12 mm (a), 18 mm (b), 36

mm (c) ir 72 mm (d) ilgio plieninio lyno vijos žingsniui, kai vijos išoriniame sluoksnyje nėra nutrūkusios nė vienos vielos, kai nutrūkusi, viena, dvi ir trys vielos. Iš pateiktų grafikų matyti, kad įtempus viją iki 5,5 kN jėgos ir atpalaidavus (nukrovus iki 0 kN), lieka vijos liekamieji pailgėjimai.

Lyginant pailgėjimus vijų, turinčių 1, 2 ir 3 nutrūkusias vielas, su nepažeistos vijos pailgėjimu, nustatyta, kad esant vienodam žingsniui, apkrovus mažiau pailgėja vijos turinčios vieną ar kelias nutrūkusias vielas (2.9 pav.). Pailgėjimai vijų, kurios turi 3 nutrūkusias vielas ir kurių žingsniai yra 12 mm, 18 mm, 36 mm ir 72 mm, lyginant su nepažeistos vijos pailgėjimu, yra mažesni atitinkamai 11 %, 15,1 %, 17,4 % ir 14,7 %.

Lyginant liekamuosius pailgėjimus vijų, turinčių 1, 2 ir 3 nutrūkusias vielas, su nepažeistos vijos liekamuoju pailgėjimu, nustatyta, kad esant vienodam žingsniui, nukrovus mažesnę liekamąją pailgėjimą turi vijos turinčios vieną ar kelias nutrūkusias vielas (2.9 pav.). Liekamieji pailgėjimai vijų, kurios turi 3 nutrūkusias vielas ir kurių žingsniai yra 12 mm, 18 mm, 36 mm ir 72 mm, lyginant su nepažeistos vijos liekamuoju pailgėjimu, yra mažesni atitinkamai 5,8 %, 9,2 %, 1,2 % ir 3,6 %.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Naudojant Babakov ir Gantmacher metodiką, sudarytas skaičiuojamasis (analitinis) dinaminis lyno modelis, schematizuojantis lyną tampriai sujungtomis koncentruotomis masėmis, įgalino apskaičiuoti 4 mm skersmens statmenai ašiai žadinamo lyno skersinių virpesių amplitudines-dažnines charakteristikas.

2. Sukamųjų virpesių, atsirandančių dėl parametrinio žadinimo, įvertinimui užtenka paprasčiausio dinaminio modelio, nes šiuo atveju žadinama žemiausioji jos forma. Atlikus lyno sukamųjų virpesių analizę nustatyta, kad jų svyravimai gali pakankamai efektingai žadinti nutrūkusios vielos virpesius, kuriuos įmanoma diagnozuoti.

3. Baigtinių elementų metodu sumodeliuotas įtempto plieninio lyno vijos su išorėje nutrūkusia viela modelis leido nustatyti, kad nedidelis nutrūkusių vielų skaičius (apie 3) vijos standumui įtakos praktiškai nedaro ir dinaminio modeliavimo atveju sistemą galima laikyti nepakitusia.

4. Nustatyta, kad didėjant įtempto lyno vijos žingsniui ir didėjant vijos išorinių nutrūkusių vielų skaičiui, dėl sumažėjusios trinties vijos išilginių poslinkių slopinimas mažėja. Šio reiškinio įtaka dinaminio modelio atveju kiekybiškai įvertina disipacinė funkcija ir slopinimo koeficientas.

Eksperimentiniai plieninio lyno tyrimai

Šiame skyriuje aprašytas eksperimentinio tyrimo stendas ir dinaminių tyrimų metodika. Pateikti lyno, lyno nutrūkusių vielų ir stendo dinaminių savybių tyrimo rezultatai. Nustatyta nutrūkusių vielų skaičiaus, ilgio, formos, jų pašaknies mechaninio būvio ir lyno užterštumo įtaka šių vielų bei paties lyno amplitudinėms-dažninėms charakteristikoms. Taip pat šiame skyriuje pateikti: eksperimentinė tempiamo-nukraunamo lyno liekamųjų ašinių poslinkių priklausomybė nuo jėgos, ir lyno sukamojo standumo eksperimentinis tyrimas.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Bučinskas, Šutinys et. al. 2010a, 2010b, 2011; Šutinys, Bučinskas et. al. 2011, 2013).

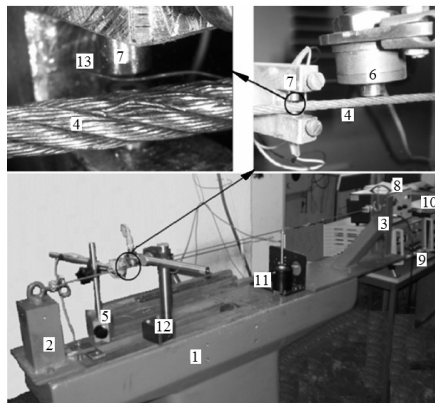
3.1. Tyrimo stendas ir dinaminio tyrimo metodika

Šiame poskyryje aprašytas stendas, kuris leidžia atlikti lyno, lyno nutrūkusių vielų ir stendo dinaminius tyrimus. Šiame stende yra žadinami lyno skersiniai svyravimai, kurie savo ruožtu sužadina atitinkamus lyno sukamuosius virpesius. Esanti ant lyno paviršiaus nutrūkusi viela (ir jos laisvas galas) virpa apie ašį kartu su lyno paviršiumi. Taip nutrūkusios vielos galas juda kartu su lyno paviršiu-

mi, brėždamas didesnio spindulio lanką. Šių virpesių amplitudė priklauso nuo žadinimo dažnio. Jei sužadinti lyno sukamieji virpesiai yra žemesnio, nei vielos rezonansinis dažnis, tai nutrūkusios vielos galo virpesiai praktiškai su jais sutampa dėl itin mažų vielos virpesių amplitudžių lyno paviršiaus atžvilgiu. Tam tikras lyno žadinimo dažnis gali sukelti ir nutrūkusios vielos rezonansinius svyravimus, kurių metu nutrūkusios vielos galas įgyja didelius poslinkius ir lyno paviršiaus atžvilgiu, kurie vyksta taip pat tangentine kryptimi. Suminė nutrūkusios vielos galo tangentinės krypties virpesių amplitudė yra matuojama bekontaktiniu jutikliu. Patikimiausia nutrūkusios vielos diagnostika galima, kai nutrūkusią vielą nevirpa lyno atžvilgiu, o lynas virpa rezonansiniais sukamaisiais virpesiais.

Dinaminiams tyrimams buvo naudojamas šaltai valcuoto 4 mm skersmens ir 1350 mm ilgio lynas 6x19 IWRC, pagamintas iš plieno AISI 1020. Tai lynas su nepriklausoma plienine šerdimi, suvytas iš šešių vijų, turinčios po 19 vielų.

Tiriamosios sistemos virpesių parametrus matuoti buvo naudotos Danijos kompanijos „Brüel & Kjær“ virpesių matavimo priemonės. 3.1 paveiksle parodytos visos tiriamosios sistemos virpesių matavimo priemonės: 1. Stovas; 2. Kairysis lyno laikiklis; 3. Dešinysis lyno laikiklis; 4. Tiriamasis lynas; 5. Jutiklio Tr4 laikiklis; 6. Linijinis poslinkio jutiklis „Hottiger Tr102“; 7. Linijinis poslinkio jutiklis „Hottiger Tr4“; 8. Galios stiprintuvas 2706; 9. Stiprintuvas „Hottiger KWS 503 D“; 10. Generatorius 1027; 11. Elektrodinaminis mini vibratorius 4810; 12. Jutiklio Tr102 laikiklis; 13. Nutrūkusią vielą.



3.1 pav. Virpesių matavimų stendas

Fig. 3.1. Test rig vibration measuring diagram

Ant stovo 1 tvirtai pritvirtinti tiriamojo lyno 4 laikikliai 2 ir 3. Vienas lyno 4 galas tvirtinamas lyno laikiklyje 2 ir ištempiamas horizontaliąja kryptimi prie jo

kito galo pritvirtintu tempiamuoju varžtu, kuris yra laikiklyje 3. Lyno ištempimo jėga apytiksliai yra lygi 5 kN. Prie įtempto tiriamojo lyno 4 nejudamai stripelio pagalba prispaudžiamas elektrodinaminis mini vibratorius 11, kuris nejudamai pritvirtintas prie stovo 1, atstumu 755 mm nuo kairiojo lyno laikiklio. Skersinių virpesių žadinimo dažnis parenkamas taip, kad tiriamasis lynas 4 virpėtų vienu iš savo rezonansinių dažnių. Tuo pat metu sužadinami nuo įtempto plieninio lyno vijų nutrūkusių vielų 13 galų intensyvūs skersiniai virpesiai. Sužadinto įtempto plieninio lyno sukamieji virpesiai matuojami linijiniu poslinkių jutikliu „Hottiger Tr102“ 6, kuris nejudamai įtvirtintas laikiklyje 12 ir nejudamai pastatytas ant stovo 1 atstumu 350 mm nuo kairiojo lyno laikiklio. Sužadinti nutrūkusios vielos skersiniai virpesiai matuojami linijiniu poslinkių jutikliu „Hottiger Tr4“ 7, kuris įtvirtintas laikiklyje 5 ir nejudamai pastatytas ant stovo 1 atstumu 320 mm nuo kairiojo lyno laikiklio. Iš linijinių poslinkių jutiklių 6 ir 7 gauti ir sustiprinti signalai stiprintuvu 9 perduodami į kompiuterį, kuriame gauti duomenys apdorojami ir vizualizuojami. Tarpas tarp jutiklių 6 ir 7 jautriųjų paviršių ir matuojamų paviršių 4 ir 13 parenkamas taip, kad jutiklių signalas (rodmuo) būtų pakankamai aiškus.

Gauti matavimo signalai buvo apdorojami kompiuteriu, naudojant programas Origin 6.1 ir Pulse.

Kai kurie dinaminių tyrimų metodikos ypatumai susiję su atskirų faktorių poveikio įvertinimu, aptarti kituose atitinkamuose poskyriuose.

Eksperimentiniai rezultatai buvo vertinami analizuojant reikiamus virpesių spektrus ir nustatant dinaminės sistemos amplitudines-dažnines charakteristikas.

Stendo, lyno ir nutrūkusių vielų virpesių stabilumo įvertinimui buvo panaudoti matuojamų poslinkių statistiniai rodikliai. Tam buvo apskaičiuoti tokie gautų signalų statistiniai parametrai: aritmetinis vidurkis:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

standartinis nuokrypis:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.2)$$

Standartinis vidurkio nuokrypis (aritmetinio vidurkio vidutinė kvadratinė paklaida:

$$S_x = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.3)$$

Sklaida:

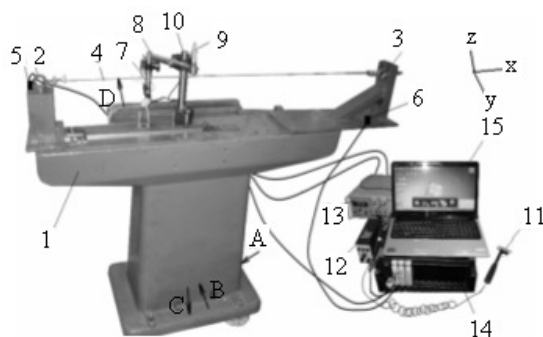
$$x_{sklaida} = x_{\max} - x_{\min} . \quad (3.4)$$

čia n – matavimų rezultatų skaičius; x_i – i -asis matavimo rezultatas.

Toliau pateikti eksperimentiniai tyrimai, atlikti taikant dinaminių tyrimų stendą, parodė, kad sukurtą naują neardomosios plieninių lynų diagnostikos metodą galima realizuoti ir praktiškai.

3.2. Lyno laikiklių, įtempto lyno ir nutrūkusios vielos savųjų virpesių tyrimas

Šio tyrimo tikslas – nustatyti lyno laikiklių ir įtempto plieninio lyno bei vijos nutrūkusių vielų savuosius dažnius, sistemą veikiant virpesius žadinančiais smūgiais atitinkamuose stovo ir lyno taškuose. Tiriamosios sistemos virpesiai buvo matuojami akselerometrais. Jėgos impulsas buvo nukreiptas išilgai akselerometro ašiai ir dviem jam statmenomis kryptimis.



3.2 pav. Stendo, lyno ir vielos savųjų virpesių matavimo stendas: 1. Stovas; 2. Kairysis lyno laikiklis; 3. Dešinysis lyno laikiklis; 4. Tiriamasis lynas; 5 ir 6. Akselerometrai 4506; 7. Linijinio poslinkio jutiklis „Hottiger Tr4“; 8. Jutiklio Tr4 laikiklis; 9. Linijinio poslinkio jutiklis „Hottiger Tr102“; 10. Jutiklio Tr102 laikiklis; 11. Žadinimo plaktukas 8202 su jėgos matavimo jutikliu 8200; 12. Stiprintuvas 2626; 13. Stiprintuvas „Hottiger KWS 503 D“; 14. Duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga; 15. Kompiuteris

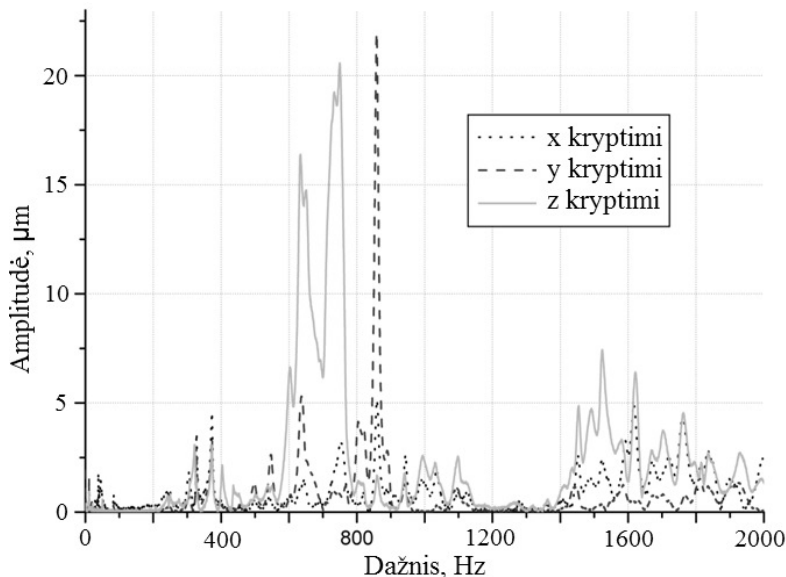
Fig. 3.2. Test rig vibration – measuring own diagram of test rig, wire rope and wire: 1 – test rig body, 2 – the left rope support, 3 – the right rope support, 4 – wire rope, 5 and 6 – accelerometers 4506, 7 – linear displacement transducer „Hottiger Tr4“, 8 – sensor Tr4 frame, 9 – linear displacement transducer „Hottiger Tr102“, 10 – sensor Tr102 frame, 11 – the impact hammer 8202 with the force transducer 8200, 12 – the amplifier 2626, 13 – the amplifier „Hottiger KWS 503 D“, 14 – the equipment accumulation and processing of information, 15 – computer

Tyrimas buvo atliktas dviem etapais. *Pirmame etape* žadinimo plaktuku buvo žadinamas stovas ir lynas. Sužadinus stovą, buvo nustatyti laikiklių savieji dažniai. Lyno ir nutrūkusios vielos savieji dažniai buvo nustatyti sužadinus lyną žadinimo plaktuku. Tiriamas 4 mm skersmens lynas su nutrūkusiomis vielomis buvo įtemptas 5 kN jėga, kuri atitinka vardinę lyno apkrovą, ir įtvirtintas tarp laikiklių. Gauti signalai iš poslinkių jutiklių per stiprintuvą „Hottiger KWS 503D“ buvo siunčiami į duomenų kaupimo ir apdorojimo įrangą, o iš jos duomenys persiunčiami į kompiuterį.

Sužadinus stovo virpesius dinaminio žadinimo plaktuku taške $A - x$ kryptimi, taške $B - y$ kryptimi ir taške $C - z$ kryptimi (taškų padėties ir x, y, z kryptys parodytos 3.2 pav.), dviem akselerometrais buvo matuojami lyno laikiklių virpesiai 50 Hz – 2 kHz dažnių intervale. Kairiojo laikiklio virpesiai buvo matuojami x, y, z kryptimis, o dešiniojo laikiklio – y ir z kryptimis.

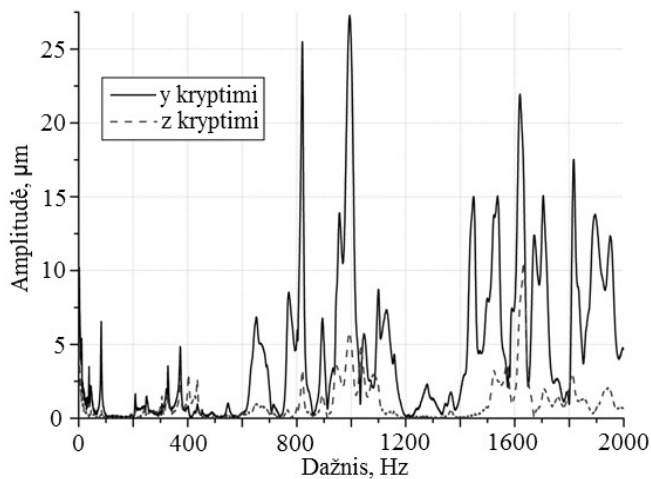
Žadinimo plaktuku sužadinus stovą taške A , lyno kairiojo laikiklio virpesiai buvo matuojami akselerometru x, y, z kryptimis, o lyno dešiniojo laikiklio virpesiai buvo matuojami akselerometru y ir z kryptimis.

Kairiojo ir dešiniojo lyno laikiklių amplitudinės-dažninės charakteristikos, gautos sužadinus stovą taške A kryptimi x yra pateiktos 3.3–3.4 paveiksluose.



3.3 pav. Lyno kairiojo laikiklio virpesiai (žadinamas A_x stovas)

Fig. 3.3. Vibration of the left rope support (excitation A_x test rig body)

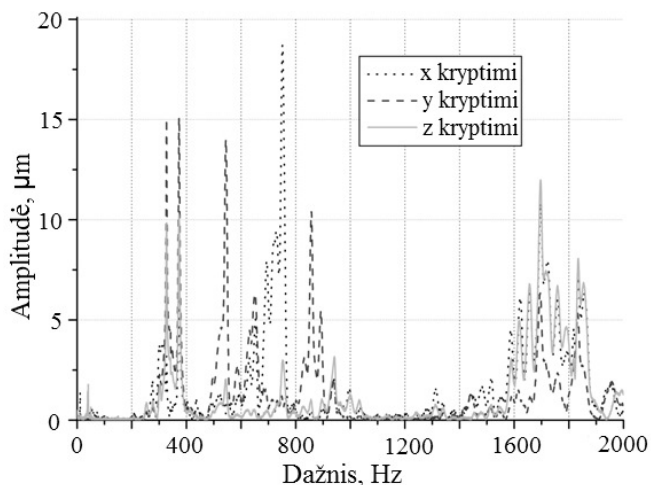


3.4 pav. Lyno dešiniojo laikiklio virpesiai (žadinamas A_x stovas)

Fig. 3.4. Vibration of the left rope support (excitation A_x test rig body)

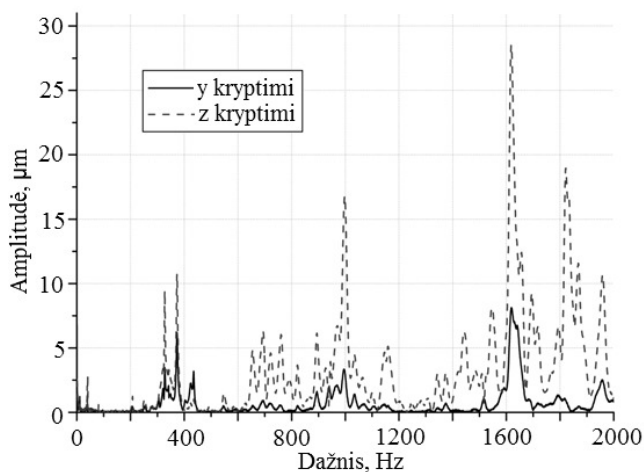
Žadinimo plaktuku sužadinus stovą taške B , lyno kairiojo laikiklio virpesiai buvo matuojami akselerometru x , y , z kryptimis, o lyno dešiniojo laikiklio virpesiai buvo matuojami akselerometru y ir z kryptimis.

Kairiojo ir dešiniojo lyno laikiklių amplitudinės-dažninės charakteristikos, gautos sužadinus stovą taške B kryptimi x yra pateiktos 3.5–3.6 paveiksluose.



3.5 pav. Lyno kairiojo laikiklio virpesiai (žadinamas B_y stovas)

Fig. 3.5. Vibration of the left rope support (excitation B_y test rig body)

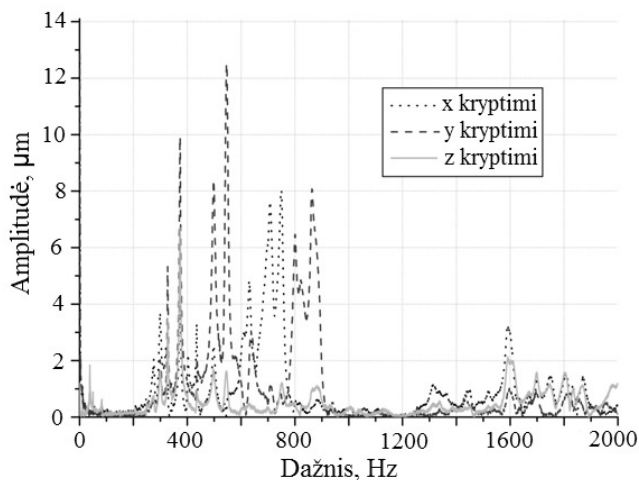


3.6 pav. Lyno dešiniojo laikiklio virpesiai (žadinamas B_y stovas)

Fig. 3.6. Vibration of the left rope support (excitation B_y test rig body)

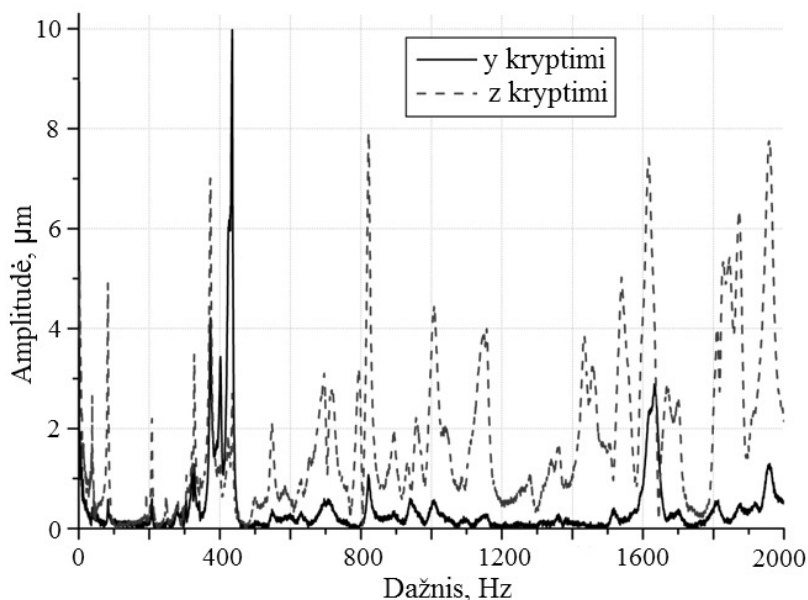
Žadinimo plaktuku sužadinus stovą taške C , lyno kairiojo laikiklio virpesiai buvo matuojami akselerometru x , y , z kryptimis, o lyno dešiniojo laikiklio virpesiai buvo matuojami akselerometru y ir z kryptimis.

Kairiojo ir dešiniojo lyno laikiklių amplitudinės-dažninės charakteristikos, gautos sužadinus stovą taške C kryptimi x yra pateiktos 3.7–3.8 paveiksluose.



3.7 pav. Lyno kairiojo laikiklio virpesiai (žadinamas C_z stovas)

Fig. 3.7. Vibration of the left rope support (excitation C_z test rig body)



3.8 pav. Lyno dešiniojo laikiklio virpesiai (žadinamas C_z stovas)

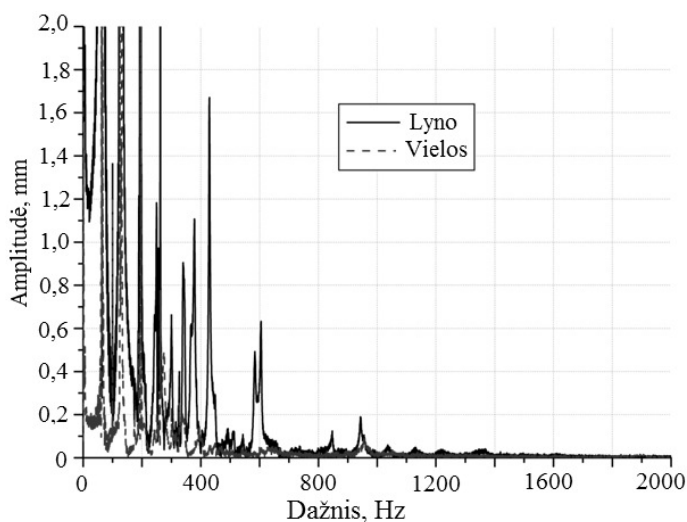
Fig. 3.8. Vibration of the left rope support (excitation C_z test rig body)

Laikiklių savųjų dažnių ir atitinkamų virpesių amplitudžių reikšmės yra pateiktos (iš 3.3–3.8 pav.) lentelėje 3.1 ir A priedo grafike 1 A pav. Dominuojantys stovo savieji dažniai yra tokie: x kryptimi – 327 Hz, y kryptimi – 373 Hz, z kryptimi – 320 Hz.

Lyno ir nutrūkusios vielos savųjų virpesių nustatymui, dinaminio žadinimo plaktuku buvo žadinamas lynas, turintis nutrūkusią vielą, kurios skersmuo 0,28 mm ir ilgis 11 mm. Žadinimas buvo vykdomas taške D – y kryptimi (3.2 pav.). Tiriamojo lyno virpesiai buvo matuojami z kryptimi, naudojant poslinkio jutiklį „Hottiger Tr102“. Nutrūkusios vielos, virpesiai buvo matuojami z kryptimi, naudojant poslinkio jutiklį „Hottiger Tr4“.

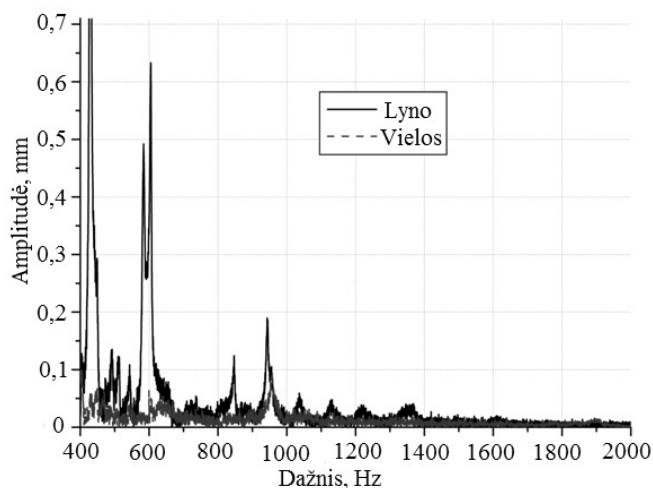
Žadinimo ir eksperimento metu gauti signalai iš poslinkio jutiklių per stiprintuvus buvo siunčiami į duomenų kaupimo ir apdorojimo įrangą, o iš jos gauti duomenys persiunčiami į kompiuterį.

Gautos lyno ir nutrūkusios vielos amplitudinės-dažninės charakteristikos pateiktos 3.9–3.10 paveiksluose.



3.9 pav. Lyno ir nutrūkusios vielos amplitudinės-dažninės charakteristikos visame dažnių intervale (žadinamas D_y lynas)

Fig. 3.9. Amplitude-frequency characteristics of wire rope and broken wire in whole tested frequency range (excitation D_y wire rope)



3.10 pav. Lyno ir nutrūkusios vielos amplitudinės-dažninės charakteristikos 400 Hz – 2 kHz dažnių intervale (žadinamas D_y lynas)

Fig. 3.10. Amplitude-frequency characteristics of wire rope and broken wire in frequency range from 400 Hz to 2 kHz (excitation D_y wire rope)

Grafikuose (3.9–3.10 pav.) matyti, kad stendo dinaminė sistema turi daug laisvės laipsnių, kurių savieji dažniai patenka į intervalą iki 450 Hz. Nusistovėjus šios sistemos virpesiams, išryškėja įtempto 4 mm skersmens lyno savieji virpesiai. Jų dažniai yra 550–627 Hz intervale. Dominuojantis lyno savasis dažnis yra 607 Hz. Dominuojanti nutrūkusios vielos savasis dažnis yra 960 Hz, kuris gerai matomas 3.10 pav. Kitos lyno ir nutrūkusios vielos dinaminės charakteristikos (iš 3.9–3.10 pav.) yra pateiktos lentelėje 3.1 ir A priedo grafike 1 A pav.

3.1 lentelė. Stendo, lyno ir 11 mm ilgio nutrūkusios vielos rezonansiniai dažniai

Table 3.1. Resonant frequencies of test rig body, wire rope and 11 mm long broken wire

Objekto pavadinimas	Smūginio žadinimo		Matavimas		Rezonansiniai dažniai, Hz (amplitudė, mm)
	Taškas	Kryptis	Daviklis	Kryptis	
Stendas	A	X	5	X	327 (0,004); 372 (0,005); 751 (0,003); 859 (0,005); 1616 (0,005); 1762 (0,004)
				Y	373 (0,003); 636 (0,005); 857 (0,022)
				Z	320 (0,003); 634 (0,016); 750 (0,021); 1523 (0,007)
			6	Y	372 (0,003); 402 (0,003); 819 (0,003); 922 (0,004); 1631 (0,011)
				Z	330 (0,004); 820 (0,026); 992 (0,027); 1623 (0,022); 1817 (0,017)
	B	Y	5	X	327 (0,010); 372 (0,011); 940 (0,003); 1695 (0,012); 1833 (0,008)
				Y	327 (0,015); 372 (0,015); 546 (0,014); 652 (0,006); 857 (0,010); 1696 (0,006); 1833 (0,005)
				Z	318 (0,004); 373 (0,007); 751 (0,019); 1312 (0,002); 1695 (0,010); 1833 (0,007)
			6	Y	325 (0,003); 370 (0,006); 433 (0,003); 995 (0,003); 1622 (0,008); 1790 (0,001)
				Z	327 (0,010); 372 (0,011); 998 (0,017); 1618 (0,029); 1822 (0,019)
	C	Z	5	X	325 (0,004); 373 (0,007); 498 (0,002); 547 (0,002); 751 (0,001); 1591 (0,002)

3.1 lentelės pabaiga

Objekto pavadinimas	Smūginio žadinimo		Matavimas		Rezonansiniai dažniai, Hz (amplitudė, mm)
	Taškas	Kryptis	Daviklis	Kryptis	
Stendas	C	Z	5	Y	327 (0,005); 373 (0,010); 499 (0,008); 546 (0,013); 803 (0,006); 860 (0,008); 1701 (0,001)
				Z	300 (0,004); 370 (0,004); 630 (0,005); 704 (0,008); 746 (0,008); 1588 (0,003)
			6	Y	373 (0,004); 435 (0,010); 818 (0,001); 1633 (0,002)
				Z	372 (0,007); 823 (0,008); 1007 (0,004); 1617 (0,007); 1959 (0,008)
Lynas	D	Y	Tr102	Z	427 (1,671); 585 (0,477); 607 (0,625); 845 (0,121); 944 (0,177); 1035 (0,060); 1126 (0,048)
Vielą			Tr4		427 (0,061); 631 (0,054); 960 (0,091); 1021 (0,026); 1328 (0,022); 1621 (0,016); 1898 (0,017)

3.1 lentelėje pateikti duomenys rodo, kad žadinant stovą smūginio žadinimo x , y , z ašių kryptimis ir žadinant įtemptą lyną y ašies kryptimi, sužadunami virpesiai, kurių dažniai yra 318–427 Hz dažnių intervale. Šie dažniai yra stendo kaip dinaminės sistemos savieji dažniai.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad esant toms pačioms dažnių reikšmėms, lyno poslinkio amplitudė yra didesnė už nutrūkusios vielos amplitudę.

Lyno ir nutrūkusios vielos amplitudžių statistiniai rodikliai pateikti 3.2 lentelėje. Priminsime, kad šie rodikliai liečia atvejį, kai įtemptas lynas dinamiškai plaktuku buvo žadinamas taške D kryptimi y , o amplitudės išmatuotos z kryptimi (ašys nurodytos 3.2 paveiksle).

3.2 lentelė. Statistinės lyno ir nutrūkusios vielos virpesių amplitudžių skaitinės reikšmės
Table 3.2. Statistical characteristics of the wire rope and broken wire vibrations

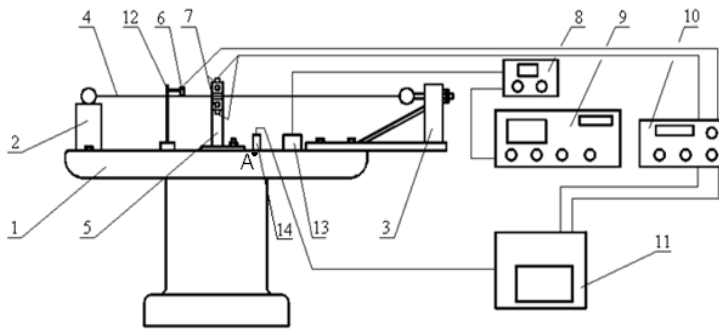
Matavimo kryptis	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis $\bar{x}$, mm	Standartinis nuokrypis S_x , mm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, mm	Mažiausia reikšmė x_{min} , mm	Didžiausia reikšmė x_{max} , mm	Sklaida, mm
Lynas	2,11 E-3	16,13	0,37	- 0,090	0,110	0,200
Viola	1,39 E-3	4,60	0,21	- 0,024	0,025	0,050

Didžiausia stovo poslinkio amplitudės sklaida yra 0,041 mm. Didžiausios lyno ir nutrūkusios vielos amplitudžių sklaidos yra 0,200 mm ir 0,050 mm atitinkamai. Sužadinus lyną y kryptimi, lyno poslinkio amplitudės aritmetinis vidurkis yra 66 % didesnis už vielos poslinkio amplitudės aritmetinį vidurkį.

Statistiniai rodikliai, kurie liečia išmatuotas lyno laikiklių virpesių amplitudes, gautas plaktuku sužadinus stovą taške A (x kryptimi), taške B (y kryptimi) ir taške C (z kryptimi), yra pateikti B priede 1B lentelėje, 2B lentelėje ir 3B lentelėje atitinkamai. Statistiniai duomenų apdorojimo rodikliai leidžia teigti, kad eksperimentinių tyrimų gautos reikšmės yra statistiškai patikimos ir viršija paklaidų ribą.

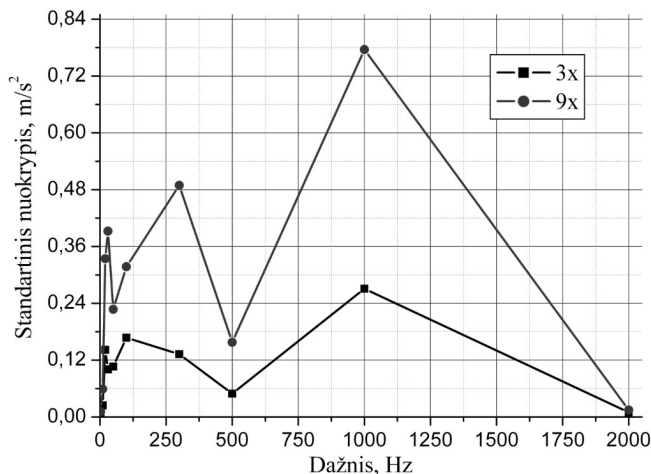
Antrame etape buvo nustatyti stovo, lyno ir nutrūkusios vielos savieji dažniai, betarpiškai žadinant stovą harmonine jėga. Buvo siekiama ištirti stendo savuosius virpesių dažnius ir stendo, kaip dinaminės sistemos tiesiškumą. Tam stendo dinaminė sistema buvo žadinama harmoniniais virpesiais su skirtingomis žadinimo amplitudėmis ir matuojamas jo dinaminis atsakas.

Sužadinus stovą vibratoriumi, vienu metu poslinkių jutikliais buvo išmatuoti santykiniai lyno ir nutrūkusios vielos virpesiai stovo atžvilgiu. Tuo pačiu metu buvo matuojami stovo absoliutiniai virpesiai akcelerometru taške A . Gauti signalai iš poslinkių jutiklių per stiprintuvą buvo siunčiami į kompiuterį (3.11 pav.).

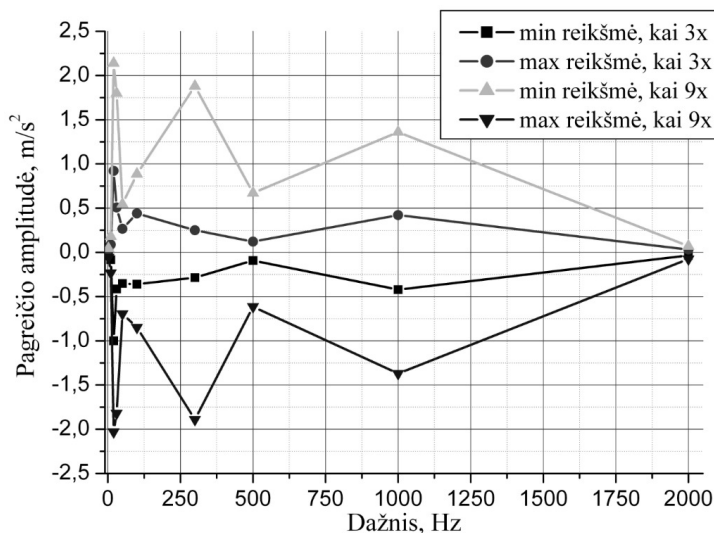


3.11 pav. Tiriamosios sistemos virpesių matavimo struktūrinė schema
Fig. 3.11. Structural vibration measuring diagram

Matuojant stendo, lyno ir nutrūkusios vielos virpesius, buvo pasirinkti du skirtingos žadinimo amplitudės variantai. Pirmojo stiprinimo metu buvo pasirinkta amplitudė, kurio dydis buvo tris kartus didesnė nuo standartinės sukalibruotos standartiniu bandymu amplitudės ($3x$), o kito bandymo metu žadinimas buvo 9 kartus didesnis nei standartinė sukalibruota amplitudė ($9x$). Toks žadinimo amplitudžių pasirinkimas leido nustatyti, kad stendo dinaminė sistema yra pakankamai tiesinė. Gauti rezultatai pateikti 3.12–3.17 paveiksluose.

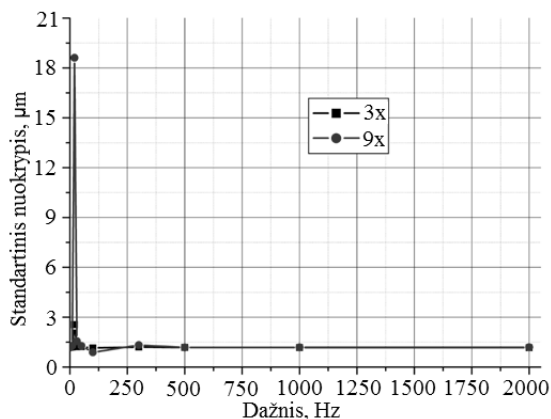


3.12 pav. Taške A (3.11 pav.) stovo matuoto pagreičio standartinio nuokrypio priklausomybė nuo dažnio ($3x$ – žadinimo amplitudė; $9x$ – žadinimo amplitudė)
Fig. 3.12. Dependency of acceleration standard deviation of acceleration S_x from frequency of test rig body in the point A (Fig. 3.11) ($3x$ – amplitude of excitation; $9x$ – amplitude of excitation)



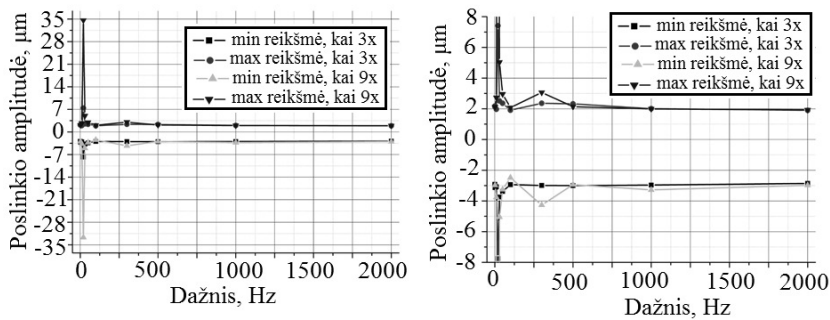
3.13 pav. Taške A (3.11 pav.) matuoto stovo pagreičio amplitudės priklausomybė nuo dažnio mažiausios ir didžiausios reikšmės (3x – žadinimo amplitudė; 9x – žadinimo amplitudė)

Fig. 3.13. Minimum and maximum values amplitude of acceleration dependency frequencies of test rig body in the point A (Fig. 3.11) (3x – amplitude of excitation; 9x – amplitude of excitation)



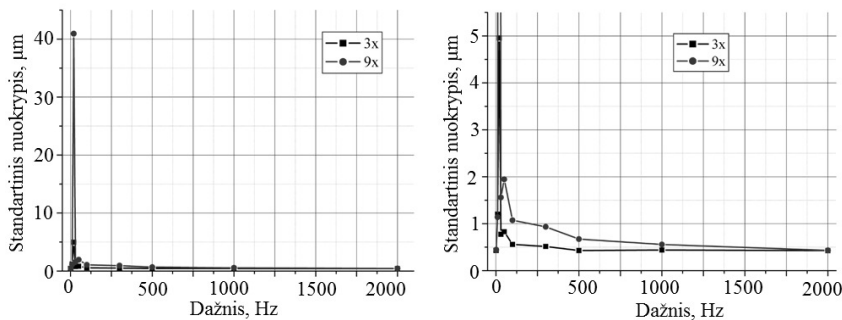
3.14 pav. Santykiniai lyno virpesiai stovo atžvilgiu (3x – žadinimo amplitudė; 9x – žadinimo amplitudė)

Fig. 3.14. Relative wire rope oscillation values in respect of stand (3x – amplitude of excitation; 9x – amplitude of excitation)



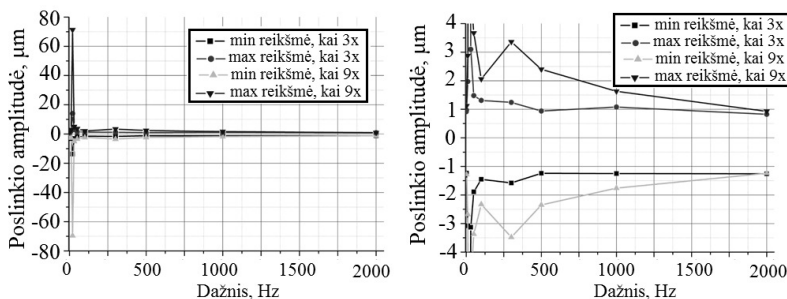
3.15 pav. Santykinės lyno virpesių (stovo atžvilgiu) mažiausios ir didžiausios reikšmės (3x – žadinimo amplitudė; 9x – žadinimo amplitudė)

Fig. 3.15. Minimal and maximal relative wire rope oscillation values in respect of stand (3x – amplitude of excitation; 9x – amplitude of excitation)



3.16 pav. Santykiniai nutrūkusios vielos virpesiai stovo atžvilgiu (3x – žadinimo amplitudė; 9x – žadinimo amplitudė)

Fig. 3.16. Relative broken wire oscillation values in respect of stand (3x – amplitude of excitation; 9x – amplitude of excitation)



3.17 pav. Santykinės nutrūkusios vielos virpesių (stovo atžvilgiu) mažiausios ir didžiausios reikšmės (3x – žadinimo amplitudė; 9x – žadinimo amplitudė)

Fig. 3.17. Minimal and maximal relative broken wire oscillation values in respect of stand (3x – amplitude of excitation; 9x – amplitude of excitation)

Atlikus eksperimentinį tyrimą ir nustačius tiriamosios sistemos dinامينius parametrus (3.12–3.17 pav.), gauta, kad visos sistemos savųjų virpesių dažnių intervalas yra nuo 300 Hz iki 400 Hz.

3.12 paveiksle pateiktuose rezultatuose matyti, kad padidinus stovo žadinimo amplitudę tris kartus, stovo pagreičio standartinis nuokrypis padidėjo 72 % esant 300 Hz (taške A), o esant 1000 Hz – padidėjo 64 %. Pagreičio minimalios ir maksimalios reikšmės padidėjo 87,5 % ir 69 %, atitinkamai esant 300 Hz ir esant 1000 Hz (3.13 pav.).

Padidinus stovo žadinimo amplitudę tris kartus, lyno santykinių virpesių standartinis nuokrypis stovo atžvilgiu, esant dažniui 300 Hz, padidėjo 14 % (3.14 pav.), o vielos – 44 % (3.16 pav.). Esant dažniui 1000 Hz, lyno santykinių virpesių standartinis nuokrypis stovo atžvilgiu išliko vienodas t.y. $12\mu\text{m}$ (3.14 pav.), o nutrūkusios vielos atveju jis padidėjo 33 % (3.16 pav.). Esant dažniui 300 Hz, lyno santykinių virpesių amplitudžių minimalios ir maksimalios reikšmės stovo atžvilgiu padidėjo 27 % (3.15 pav.), o nutrūkusių vielų – 7 % (3.17 pav.). Ir esant dažniui 1000 Hz, atitinkami padidėjimai yra 0 % (3.15 pav.) ir 51% (3.17 pav.).

Tyrimo metu nustatyta, kad stendo dinaminė sistema gali būti laikoma tiesine ir jai tinka tiesinės dinaminės sistemos lygtys. Sistemos tiesiškumas buvo įvertintas, taikant skirtingos amplitudės žadinimą, kurio metu visi savieji dažniai pasireiškia atitinkamais rezonansiniais dažniais. Statistiškai apdorojus dinaminį bandymų rezultatus galima teigti, kad bandymo rezultatai yra statistiškai reikšmingi ir jų vidurkių pokytis viršija paklaidų ribas. Paklaidų ribos buvo nustatytos standartiniais bandymais ir kurios yra 0,059–0,84 mm.

3.3. Skirtingo ilgio nutrūkusių vielų dinaminį savybių tyrimai

Besitrinant lyno dalims tarpusavyje, kai lynas vyniojamas ant būgno, bei lynui kontaktuojant su skriemuliu, vielos esančios lyno paviršiuje nutrūksta. Jų ilgis būna nevienodas.

Šiame poskyryje pateiktais tyrimais buvo siekiama nustatyti įvairaus ilgio nutrūkusių vielų diagnostikos galimybę. Kartu išryškintas optimaliausias lyno žadinimo atvejis iš dviejų galimų diagnostikoje.

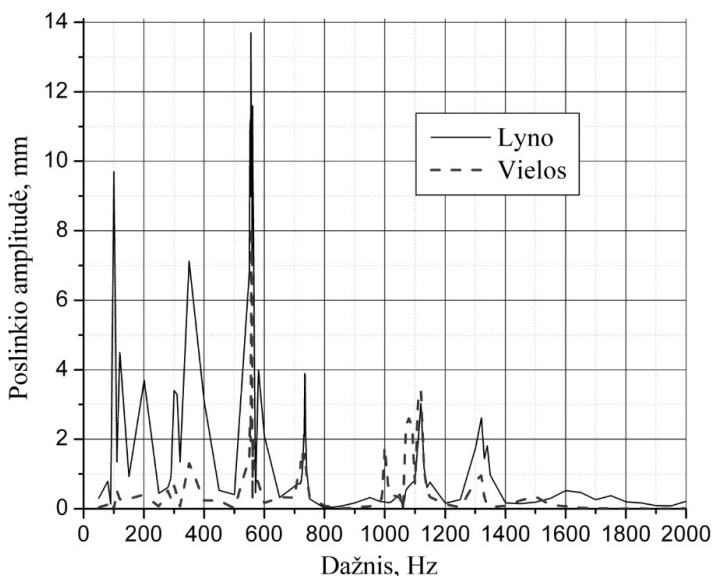
Tyrimuose buvo matuojami įtempto plieninio lyno vijos nutrūkusių išorinių vielų santykiniai virpesiai (stovo atžvilgiu), gauti harmoniškai žadinant įtemptą plieninį lyną 50–2000 Hz dažnių intervale. Lyno ir nutrūkusios vielos virpesius matuojantys jutikliai buvo pritvirtinti ant stovo pagrindo (3.1 pav.). Čia galima priminti, kad visuose eksperimentuose, tame tarpe ir pateiktuose šiame poskyry-

je, buvo naudojamas lynas 6x19, kurio skersmuo 4 mm. Vielų skersmuo – 0,28 mm.

Šiuose eksperimentuose įtemptas lynas buvo žadinamas z kryptimi, kuri nurodyta 3.2 paveiksluose. Tos pačios krypties (z) lyno ir nutrūkusios vielos virpesių amplitudės buvo matuojamos jutikliais Tr102 ir Tr4. Nutrūkusią vielą kyšojo lyno šone, todėl jos galo virpesiai vyko z kryptimi.

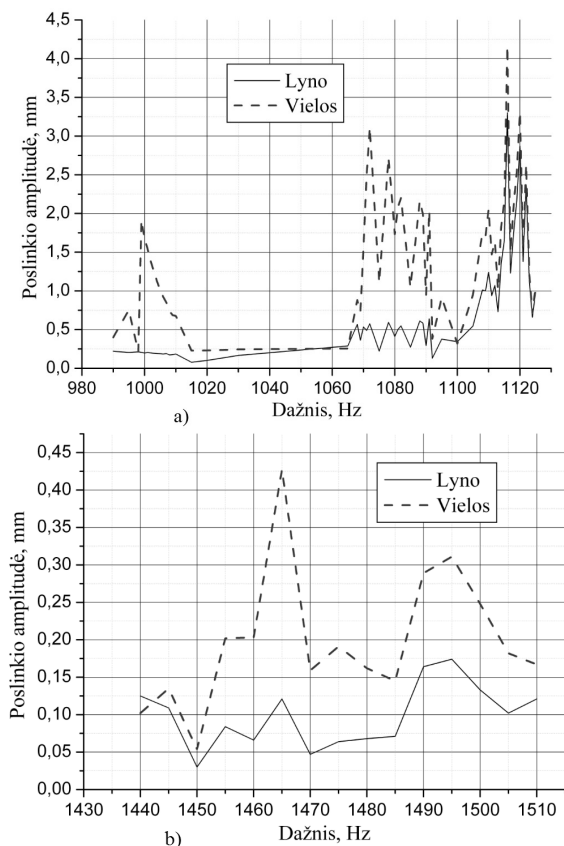
Pirmiausiai buvo pasirinktas pirmas lyno žadinimo variantas, kai lyno žadinimo amplitudė nebuvo palaikoma pastovaus didumo. Buvo tiriama lyno paviršiuje esanti nutrūkusią vielą, turinti 11 mm ilgį. Tyrimų rezultatai, žadinant lyną statmena įtempto lyno ašiai z kryptimi, pateikti 3.18–3.19 paveiksluose.

3.18 paveiksle yra pateiktos lyno ir vielos poslinkių amplitudinės-dažninės charakteristikos, gautos matuojant poslinkius visame dažnių intervale. Paveiksle 3.19 tas parodyta detaliau: 990–1125 Hz ir 1440–1512 Hz dažnių intervaluose. Šiuose dažnių intervaluose matyti, kad nutrūkusios vielos poslinkio amplitudė yra didesnė už lyno poslinkio amplitudę. Dažnių intervale iki 990 Hz didesnės yra lyno poslinkių amplitudės.



3.18 pav. Lyno ir vielos poslinkių amplitudinės-dažninės charakteristikos visame dažnių intervale

Fig. 3.18. Amplitude-frequency characteristics of whole rope and single wire in whole tested frequency range



3.19 pav. Lyno ir vielos poslinkių amplitudinės-dažninės charakteristikos 990–1125 Hz (a) ir 1440–1512 Hz (b) dažnių intervaluose

Fig. 3.19. Amplitude–frequency characteristics of whole rope and single wire in frequency range 900–1125 Hz (a) and 1440–1512 Hz (b)

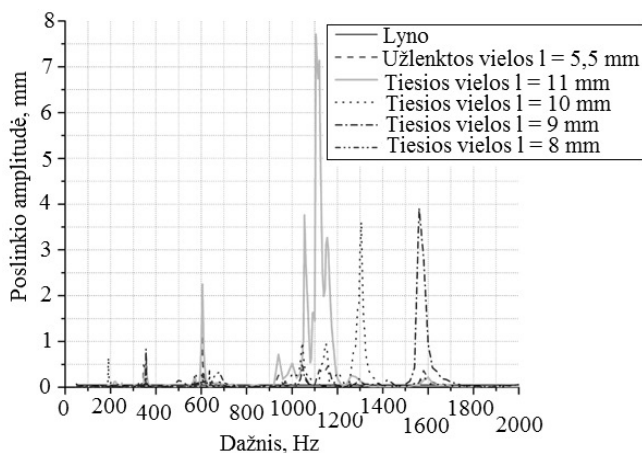
Pirmasis nutrūkusios vielos virpesių pikas matomas ties dažniu 995 Hz. Šį piką atitinkančios amplitudės didumas yra 1,8 mm. Didžiausia amplitudė 4,1 mm turi pikas, atsiradęs esant dažniui 1118 Hz. Reikia pastebėti (3.19 pav.), kad nors savieji nutrūkusios vielos virpesiai ne visur pasireiškia, kaip pavyzdžiui, dažnių intervaluose 1016–1063 Hz ir 1470–1485 Hz, matavimo sistema tokiais atvejais jų virpesius taip pat lengvai fiksuoja. Šiais atvejais nutrūkusi viela (ir jos laisvas galas) virpa apie lyno ašį kartu su lyno paviršiumi. Nutrūkusios vielos virpesių amplitudės didumą praktiškai lemia sukamieji lyno virpesiai. (Tas pats atitinkamuose dažnių intervaluose buvo stebima ir įvairaus ilgio nutrūkusių vielų tyrimuose, kurie pateikti žemiau). Taigi, dažnių intervaluose 990–1125 Hz ir 1440–1512 Hz nutrūkusios vielos buvimas yra lengvai matomas.

Lyginant nutrūkusios vielos ir lyno virpesių amplitudes galima pasakyti, kad nutrūkusios vielos virpesių amplitudė yra 1,3–9,5 karto didesnė už lyno virpesių amplitudę (dažnių intervale nuo 990 Hz iki 1125 Hz) ir 1,5–4 karto didesnė – dažnių intervale nuo 1440 Hz iki 1512 Hz.

Toliau buvo nustatytos lyno išoriniame sluoksnyje nutrūkusių įvairaus ilgio vielų virpesių amplitudinės-dažninės charakteristikos, kurios buvo lyginamos. Čia įtemptas lynas buvo žadinamas lyno ašiai statmena kryptimi, palaikant nekintančią 50 μm lyno virpesių poslinkio amplitudę.

Čia reikia pastebėti, kad sužadinus lyną nutrūkusios vielos ilgesnė dalis pradeda švytuoti greičiau negu jos trumpesnė dalis ir jos ilgesnę dalį galima aptikti greičiau. Kadangi lyno paviršiuje vielos ilgis atitinka pusę vielos žingsnio, esančios viename vijos žingsnyje, tai trumpiausia diagnozuojama dalis sudaro ketvirtį vielos žingsnio. Taigi, ji nebūna labai trumpa ir ją visada galima aptikti.

Duomenys apie nutrūkusių įvairaus ilgio vielų virpesius, nustatytus palaikant nekintančią lyno žadinimo virpesių amplitudę, galima matyti 3.20 ir 3.21 paveiksluose. Šiuose paveiksluose nekintančią lyno virpesių amplitudę demonstruoja linija, lygiagreti dažnių ašiai. Tirtos 8 mm, 9 mm, 10 mm ir 11 mm ilgio nutrūkusios vielos. Dar viena tirta viela buvo užlinkusi ir jos ilgis nuo pašaknies iki užlinkimo sudarė 5,5 mm. Visas tikrasis jos ilgis sudarė 11 mm.

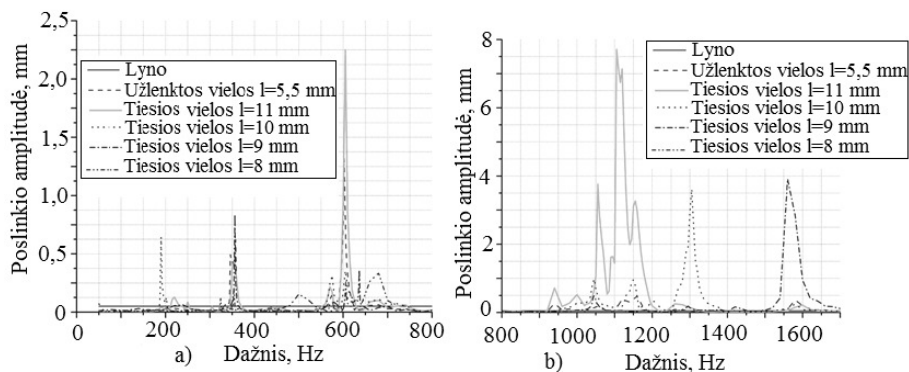


3.20 pav. Įvairaus ilgio nutrūkusių vielų dažnių spektras esant lyno 50 μm žadinimo virpesių poslinkio amplitudei

Fig. 3.20. Spectrum of frequencies of broken wire vibration for different length of wire; whole vibration amplitude – 50 μm

Analizės palengvinimui 3.20 paveiksle yra pateiktas įvairių ilgių nutrūkusių vielų poslinkių amplitudinės-dažninės charakteristikos, gautos matuojant poslin-

kus visame dažnių intervale. 3.21 paveiksle tas parodyta detaliau: 0–800 Hz ir 800–1700 Hz dažnių intervaluose. Šiuose dažnių intervaluose matyti, kad pirmieji nutrūkusių vielų pikai yra ties dažniu 600 Hz.



3.21 pav. Detalus nutrūkusių vielų dažnių spektras dažnių intervaluose: a) 50–800 Hz ir b) 800–1700 Hz

Fig. 3.21. Detailed frequency spectrum broken wire vibration in frequency ranges 50–800 Hz (a) and 800–1700 Hz (b)

Kai palaikoma nekintanti lyno žadinimo amplitudė, pirmasis 11 mm ilgio nutrūkusios vielos virpesių pikas matomas ties dažniu 575 Hz. Didžiausia amplitudė 7,65 mm turi pikas, atsiradęs esant dažniui 1100 Hz (3.20 pav.). Prisiminę aukščiau pateiktus rezultatus matome, kad tiriant vienodo ilgio nutrūkusias vielas (11 mm), pirmasis amplitudės pikas atsiranda esant žemesniam dažniui (575 Hz) tuo atveju, kai palaikoma nekintanti lyno žadinimo amplitudė. Taip pat šiuo atveju nutrūkusios 11 mm ilgio vielos didžiausioji virpesių amplitudė (7,56 mm) yra pastebimai didesnė už tą (4,2 mm), kuri buvo nustatyta, nepalaikant lyno žadinimo pastovaus amplitudės didumo.

Sulyginus nutrūkusių vielų poslinkio amplitudes, kurios pateiktos 3.21 paveiksle, matyti, kad žemiausias dažnis, kuriam esant skirtingo ilgio nutrūkusių vielų pikų vieta sutampa, yra 355 Hz. Palyginus šio dažnio reikšmę su 3.1 lentelėje esančiomis reikšmėmis, pastebėta, kad tai yra visos sistemos savieji dažniai, dominuojantys apytikriai iki 400 Hz.

3.21a paveiksle matyti, kad žemesnių dažnių intervalas, kuriame nutrūkusias vielas sužadina lynas ir jos pradeda švytuoti daug intensyviau, yra 575–675 Hz. Jų poslinkių amplitudės čia yra nuo 1,2 iki 45 karto didesnės už lyno poslinkio amplitudę. Tokius pat virpesių požymius nutrūkusios vielos turi ir aukštesnių dažnių intervale 920–1680 Hz (3.21b pav.). Jų poslinkio amplitudės yra 1,5–154 karto didesnės 920–1230 Hz ir 4–78 karto didesnės 1510–1680 Hz dažnių intervaluose.

Iš 3.21a paveikso galima matyti, kad pirmame minėtame intervale visų ilgių nutrūkusios vielos poslinkio pikai atsiranda esant tam pačiam dažniui – 600 Hz. Esant šiam žadinimo dažniui, o nutrūkusiai vielai sutrumpėjus 1 mm, vielų poslinkio amplitudės sumažėja apie 1,3 karto. Didžiausią amplitudę – 2,25 mm turėjo viela, kurios ilgis 11 mm (tiesioji viela). Mažiausią amplitudę – 0,27 mm turėjo 8 mm ilgio nutrūkusi viela. Panašią amplitudę ji turėjo ir ties gretimam dažniui 672 Hz.

Tiesios 11 mm ilgio nutrūkusios vielos poslinkio amplitudė 1,8 karto buvo didesnė už užlenktos tokį pat ilgį turinčios vielos amplitudę (esant 600 Hz dažniui). Čia reikia prisiminti, kad pastarosios vielos atveju atstumas nuo pašaknies iki užlinkimo sudarė 5,5 mm.

Antrame intervale (3.21b pav.) įvairaus ilgio nutrūkusių vielų pikai nesutampa, išsibarsto dažnių ašyje. Didžiausią amplitudę – 7,72 mm turėjo viela, kurios ilgis 11 mm (tiesioji viela) esant dažniui 1105 Hz. Mažiausią amplitudę – 0,37 mm turėjo 8 mm ilgio nutrūkusi viela esant dažniui 1201 Hz.

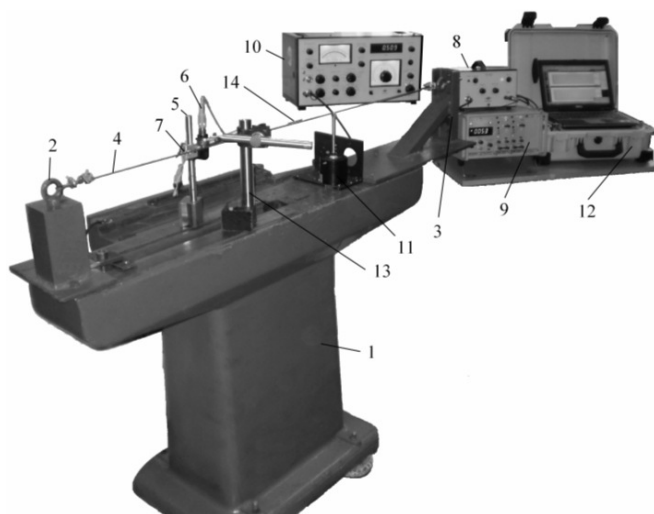
Taigi, analizuojant gautus rezultatus nustatyta, kad geresnis lyno žadinimas yra tuomet, kai lyno žadinimo amplitudė palaikoma užduoto dydžio. Tuomet stabilesnės yra lyno žadinimo sąlygos; taip pat įvairaus ilgio nutrūkusios vielos sužadinamos, esant žemesniems dažniams, o nutrūkusios vielos pikai dažniau būna didesni.

Gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad naudojant pasiūlytą metodiką galima aptikti įvairaus ilgio nutrūkusias vielas, kurios gali būti bet kurioje lyno perimetro vietoje. Žadinant įtemptą lyną, harmoniniu žadinimu nutrūkusios vielos visada sužadinamos. Jų virpesiai yra matomi visame taikomo žadinimo intervale. Taip pat nustatyta, kad nutrūkusiai vielai trumpėjant, jos savasis dažnis didėja.

3.4. Nutrūkusios vielos pašaknies mechaninio būvio ir užterštumą imituojančios papildomos masės įtakos tyrimas

Įvairaus tipo ir skersmens lynų nutrūkusios vielos pašaknies mechaninis būvis yra daugiau ar mažiau skirtingas net ir tada, kai lynai įtempti vardine ašine jėga. Pašaknies srityje nutrūkusi viela išeidama iš lyno laisvėja palaipsniui. Mažėjančių kontaktinių jėgų dydis ir pridėties ilgis skirtingų lynų atvejais vis kitoks. Šiame poskyryje pašaknies mechaninio būvio įtaka nutrūkusių vielų virpesiams buvo tirama, atliekant specialius bandymus. Kartu buvo tiriamas ir ant lyno paviršiaus susikaupusius tepalus ir purvą imituojančios papildomos lyno masės poveikis nutrūkusių vielų elgsenai.

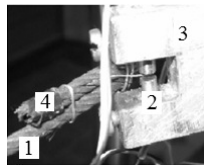
Du bandymai buvo atlikti su įtemptu lynu, prie kurio buvo pririštas 50 mm ilgio tokio pat lyno kitas gabaliukas su nutrūkusia 10 mm ilgio viela. Įtemptas lynas savo paviršiuje taip pat turėjo tokio pat ilgio nutrūkusią vielą. Bendra bandymų schema parodyta 3.22 paveiksle.



3.22 pav. Lyno su nutrūkusiomis vielomis virpesių matavimo stendas: 1. Stovas; 2 ir 3. Lyno laikikliai; 4. Lynas; 5. Jutiklio Tr4 laikiklis; 6. Linijinis poslinkių jutiklis Tr102; 7. Linijinis poslinkių jutiklis Tr4; 8. Galios stiprintuvas 2706; 9. Stiprintuvas „Hottiger KWS 503 D”; 10. Generatorius 1027; 11. Elektrodinaminis mini vibro stendas 4810; 12. Kilnojama matavimų rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727” su kompiuteriu DEEL; 13. Jutiklio Tr102 laikiklis; 14. Lyno gabaliukas

Fig. 3.22. Test rig vibration – measuring diagram of wire rope with broken wire: 1 – test rig body, 2 and 3 – rope supports, 4 – wire rope, 5 – sensor Tr4 frame, 6 – linear displacement transducer Tr102, 7 – linear displacement transducer Tr4, 8 – exciter amplifier 2706, 9 – amplifier „Hottiger KWS 503 D”, 10 – generator for electro dynamic mini exciter type 1027, 11 – electro dynamic mini exciter type 4810, 12 – the portable measurement results processing station „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727” with laptop DEEL, 13 – sensor Tr102 frame, 14 – piece of wire rope

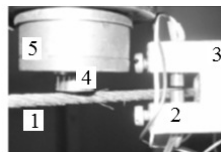
Pririštas kito lyno gabaliukas su savo nutrūkusia viela geriau yra matomas 3.23 paveiksle. Nutrūkusioji viela, esanti ant pririšto lyno gabaliuko, nuo kairiojo lyno laikiklio buvo nutolusi 495 mm atstumu. Įtempto lyno ir ant jo esančios nutrūkusios vielos virpesių matavimo vieta liko ta pati, kuri aprašyta 3.1 poskyryje. Abu bandymai buvo atlikti palaikant pastovią lyno žadinimo amplitudę (50 μm), kuri buvo fiksuojama jutikliu Tr102 (3.24 pav.).



3.23 pav. Nutrūkusios vielos virpesių poslinkių matavimo ant lyno gabaliuko pritvirtinto ant lyno su viela vaizdas: 1. Lynas; 2. Linijinis poslinkių jutiklis Tr4; 3. Jutiklio Tr4 laikiklis; 4. Lyno gabaliukas

Fig. 3.23. Displacement measurement of broken wire on the piece of wire rope which is affixed by wire on the wire rope: 1 – wire rope, 2 – linear displacement transducer Tr4, 3 – sensor Tr4 frame, 4 – piece of wire rope 102, 5 – sensor Tr102 frame

Pirmojo bandymo metu buvo nustatyta amplitudinė-dažninė charakteristika nutrūkusiai vielai, kuri kyšojo įtempto lyno paviršiuje. Jos virpesių matavimo vaizdas taip pat matomas 3.24 paveiksle. Nutrūkusios vielos, esančios ant pririšto tokio pat lyno kito gabaliuko (3.23 pav.), amplitudinė-dažninė charakteristika buvo gauta antrojo bandymo metu. Taigi, abu bandymai buvo atlikti su papildoma mase (vienodose bandymo sąlygose).



3.24 pav. Lyno ir nutrūkusios vielos poslinkių matavimas: 1. Lynas; 2. Linijinis poslinkių jutiklis Tr4; 3. Jutiklio Tr4 laikiklis; 4. Linijinis poslinkio jutiklis Tr102; 5. Jutiklio Tr102 laikiklis

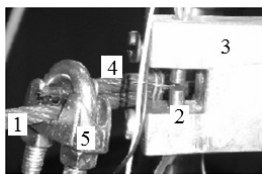
Fig. 3.24. Displacement measurement of wire rope and broken wire: 1 – wire rope, 2 – linear displacement transducer Tr4, 3 – sensor Tr4 frame, 4 – linear displacement transducer Tr102, 5 – sensor Tr102 frame

Nagrinėjant gautus rezultatus buvo laikoma, kad pirmojo bandymo metu įtempto lyno nutrūkusios vielos įveržtumas pašaknyje buvo žymiai didesnis, negu antrojo bandymo atveju. Pirmojo bandymo atveju dėl ašinės apkrovos lynas patiria didelį sąsūkį ir papildomai suspaudžia tiriamos vielos pašaknį. Antrojo bandymo atveju, ant neįtempto lyno gabaliuko paviršiaus esančios nutrūkusios vielos pašaknis buvo žymiai laisvesnė, be papildomo įveržtumo.

Nutrūkusios vielos amplitudinės-dažninės charakteristikos gautos, atlikus pirmąjį ir antrąjį bandymus, pateiktos 3.26 paveiksle. Čia galima akivaizdžiai matyti, kad laisvesniosios, taip pat kaip ir papildomai įveržtosios, vielų virpesių

amplitudės buvo pakankamo didumo fiksuoti matavimo priemonėmis. Kartu matyti, kad laisvesniosios nutrūkusios vielos virpesių amplitudės beveik visame taikytame žadinimo intervale (tiksliau 0–1320 Hz) buvo didesnės už tas, kurias turėjo papildomai įveržta nutrūkusi viela. Didžiausios amplitudžių pikų reikšmės skiriasi nedaug, laisvesniosios vielos – 2,2 mm, o daugiau įveržtosios – 1,8 mm. 3.26 paveiksle taip pat galima matyti šešis abiejų nagrinėjamų vielų amplitudžių pikus, kurie atsiranda, esant praktiškai vienodiems dažniams. Šia prasme jų virpesiai yra panašaus pobūdžio.

Analizuojant gautus eksperimentinius rezultatus, reikia nepamiršti, kad nutrūkusių vielų diagnostika visada vykdoma įtempus lyną vardine ašine apkrova. Šių dviejų bandymų rezultatai įtikina, kad ir kitų lynų nutrūkusios vielos pašaknies skirtingas įveržtumas diagnostikos požiūriu esminės įtakos neturės, nes diagnozuojama gali būti daugiau įveržta ir net jokio papildomo įveržtumo neturinti nutrūkusi viela.



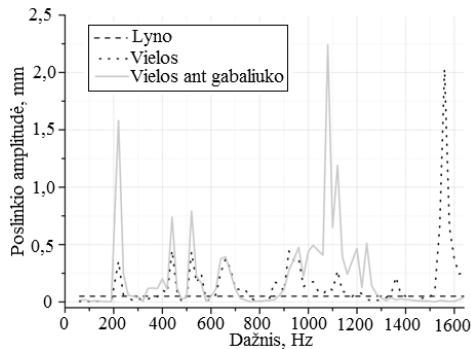
3.25 pav. Nutrūkusios vielos virpesių poslinkių matavimas ant lyno gabaliuko, pritvirtinto ant lyno su apkaba vaizdas: 1. Lynas; 2. Linijinis poslinkių jutiklis Tr4; 3. Jutiklio Tr4 laikiklis; 4. Lyno gabaliukas; 5. Apkaba

Fig. 3.25. Displacement measurement of broken wire on the piece of wire rope which is affixed by clamp on the wire rope: 1 – wire rope, 2 – linear displacement transducer Tr4, 3 – sensor Tr4 frame, 4 – piece of wire rope, 5 – clamp

Trečiajame eksperimente (taip pat kaip ir antrajame bandyme) lynas turėjo papildomą lyno gabaliuką. Tačiau šis gabaliukas buvo pritvirtintas su apkaba, kurios masė buvo beveik dvigubai didesnė už panaudoto lyno gabaliuko masę (3.25 pav.). Tokiu būdu trečiame eksperimente panaudota papildoma masė buvo apie tris kartus didesnė už tą, kuri buvo taikyta antrajame bandyme.

Rezultatai gauti trečiojo bandymo metu pateikti 3.27 paveiksle. Ten yra matomi virpesiai nutrūkusios vielos, esančios ant lyno gabaliuko, pritvirtinto prie lyno su apkaba, ir vielos esančios ant įtempto lyno. Apie papildomos masės įtaką geriausiai spręsti, lyginant esančių ant įtempto lyno nutrūkusių vielų, virpesius, kurie atsirado atliekant antrąjį ir trečiąjį bandymus. Šie virpesiai pažymėti taškinėmis linijomis 3.26 paveiksle ir 3.27 paveiksle atitinkamai. Lyginant šiuos virpesius galima teigti, kad esant didesnei masei, nutrūkusios vielos (esančių ant įtempto lyno) virpesių amplitudės visame tyrimo dažnių intervale yra šiek tiek

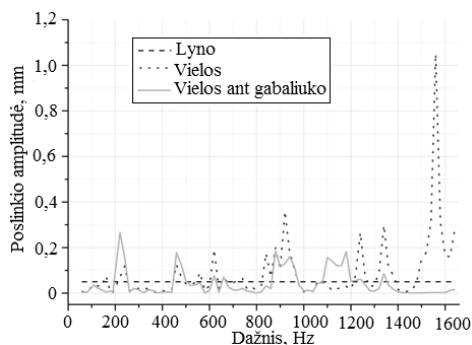
mažesnės. Virpesių pikai dažnių intervale iki 660 Hz yra mažesni apie 2 kartus, intervale nuo 900 Hz iki 1400 Hz lyginami nutrūkusių vielų pikai beveik lygūs, o prie 1585 Hz – mažesni apie 1,5 karto.



3.26 pav. Nutrūkusios vielos ant lyno ir ant lyno gabaliuko, mechanškai pritvirtinto ant įtempto lyno su viela, amplitudės-dažninės charakteristikos

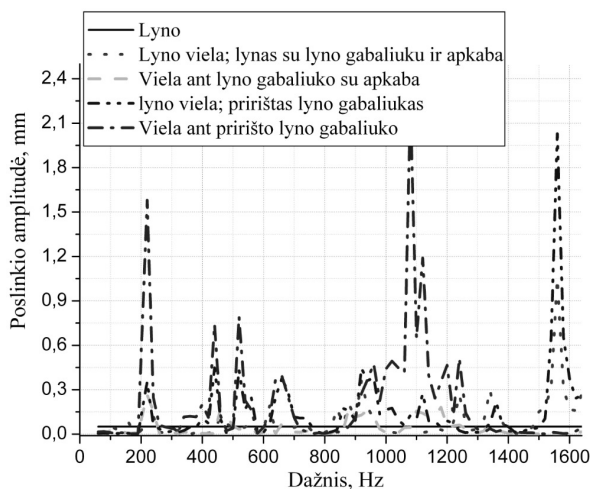
Fig. 3.26. Amplitude-frequency characteristics of broken wire on the wire rope and on the piece of wire rope which is affixed by rule on the wire rope with wire

3.27 paveiksle matyti, kad (esant didesnei lyno masei) dažnių intervaluose, kur savieji nutrūkusios vielos virpesiai nepasireiškia ir jos virpa apie lyno ašį kartu su lyno paviršiumi, virpesių amplitudės nedidelės, tačiau buvo fiksuojamos be pertrūkių. Čia nutrūkusios vielos virpesių amplitudės didumą praktiškai lemia sukamieji lyno virpesiai.



3.27 pav. Nutrūkusios vielos ant lyno ir ant lyno gabaliuko, mechanškai pritvirtinto ant įtempto lyno su apkaba, amplitudės-dažninės charakteristikos

Fig. 3.27. Amplitude-frequency characteristics of broken wire on the wire rope and on the piece of wire rope which is affixed by rule on the wire rope with clamp



3.28 pav. Amplitudės-dažninės charakteristikos nutrūkusios vielos ant lyno ir ant lyno gabaliuko

Fig. 3.28. Amplitude-frequency characteristics of broken wire on the wire rope and on the piece of wire rope

3.28 paveiksle parodytas bendras visų viršuje nagrinėtų virpesių vaizdas.

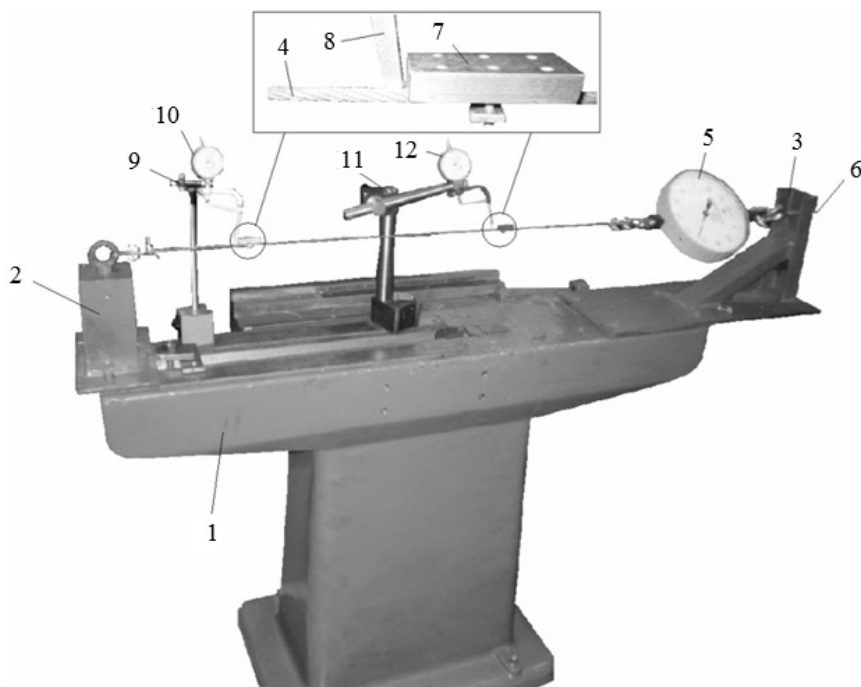
Taigi, esant didesniai nutrūkusios vielos pašaknio įveržtumui ir esant didesnei lyno masei, nutrūkusių vielų virpesių amplitudės visumoje yra šiek tiek mažesnės. Nors nutrūkusios vielos pašaknio įveržtumas ir papildoma lyno masė daro tam tikrą įtaką nutrūkusių vielų, esančių ant įtempto lyno, virpesiams, tačiau tas netrukdo diagnostikai. Jų virpesiai yra matomi visame taikomo žadinio intervalo.

3.5. Lyno liekamųjų deformacijų tyrimas

2.3 poskyryje BE metodu buvo analizuojama trinties įtaka lyno vijos standumui ir poslinkių slopinimui. Tai parametrai, kurių įtaka yra vertinama sudarant lyno dinaminį modelį. Lyno vija tėra viena iš lyno sudėtinių dalių. Todėl šiame poskyryje buvo atliktas analogiškas eksperimentinis tyrimas su realiu lynu, turinčiu visas sudėtines dalis. Buvo siekiama eksperimentiškai nustatyti lyno liekamąsias deformacijas, kurias lynas įgyja jį atpalaidavus ir pagal jas spręsti apie trinties įtaką.

Stendo vaizdas, kuriame lynas buvo įtemptas ir atpalaiduojamas, parodytas 3.29 paveiksle. Lyno 450 mm ilgio atkarpos pailgėjimas arba sutrumpėjimas buvo nustatomas, išmatavus dviejų lyno skerspjūvių poslinkius, naudojant du

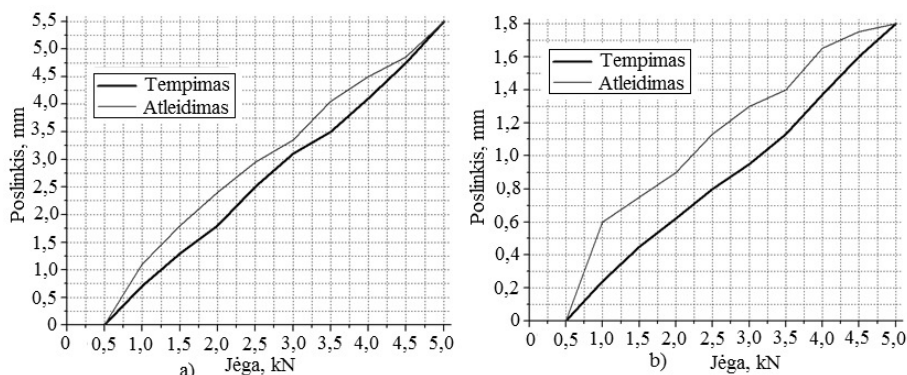
laikrodinius indikatorius. Vienas skerspjūvis ir atitinkamas indikatorius (10), buvo nutolę nuo kairiojo lyno laikiklio, kuriame lynas buvo įtvirtintas, 195 mm atstumu. Kitas skerspjūvis ir jam priskirtas indikatorius (12), nuo kairiojo laikiklio buvo nutolę 645 mm atstumu. Lyno ašinė apkrova buvo keičiama 0,5 kN žingsniu naudojant lyno tempimo varžtą. Jėgos didumą matavo dinamometras (5).



3.29 pav. Lyno tempimo – atleidimo stendas: 1. Stovas; 2 ir 3. Lyno laikikliai; 4. Tiriamas lynas; 5. Dinamometras; 6. Tempimo varžtas; 7. Plokštelė; 8. Svirtelė; 9 ir 11. Indikatorių laikikliai; 10 ir 12. Indikatoriai

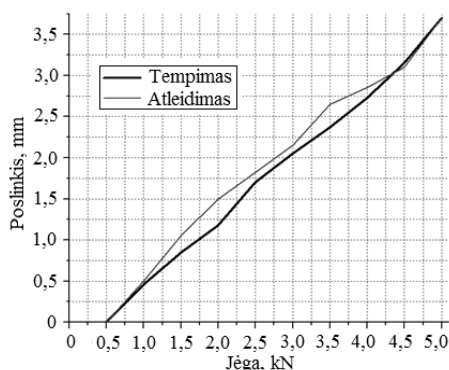
Fig. 3.29. Test rig tension – exception of wire rope diagram: 1 – test rig body, 2 and 3 – rope support, 4 – test rope, 5 – dynamometer, 6 – tension bolt, 7 – plate, 8 – lever, 9 and 11 – indicator frame, 10 and 12 – indicator

Pirmojo skerspjūvio poslinkių diagrama, sudaryta naudojant indikatoriaus (10) parodymus, pateikta 3.30 a paveiksle. Naudojant antrojo indikatoriaus (12) parodymus sudaryta kito skerspjūvio poslinkių diagrama pateikta 3.30 b paveiksle. 3.31 paveiksle pateikta nagrinėjamos lyno atkarpos tempimo ir atleidimo diagrama, gauta iš dviejų pirmųjų diagramų skirtumo.



3.30 pav. Lyno tempimo-atleidimo eksperimento rezultatai: a) Indikatoriaus (10); b) Indikatoriaus (12)

Fig. 3.30. Results of the experiment of wire rope tension-extension: a) indicator (10), b) indicator (12)



3.31 pav. Lyno 450 mm ilgio atkarpos tempimo-atleidimo diagrama

Fig. 3.31. Tension-extension diagram of 450 mm longer wire rope

Pateiktose diagramose (3.30 pav.) matoma, kaip kinta tiriamojo lyno jėgos poslinkio charakteristikos, matuojant lyno tempimo-atleidimo poslinkius, su dviem skirtingose vietose pritvirtintais indikatoriais. Tempiamo ir atleidžiamo lyno atskiri elementai (vijos ir vielos) kontaktuoja tarpusavyje. Tempiamo lyno elementai pasisuka vienas kito atžvilgiu kampų φ ir atskiros vielos viena kitą spaudžia didindamos lyno vidinės trinties jėgas. Atpalaiduojant lyną ištemptos ir pasisukusios atskiros vielos, dėl esančios tarp vielų trinties ir įtempimų, nesugrįžta į pradinę padėtį proporcingai sumažinant apkrovai.

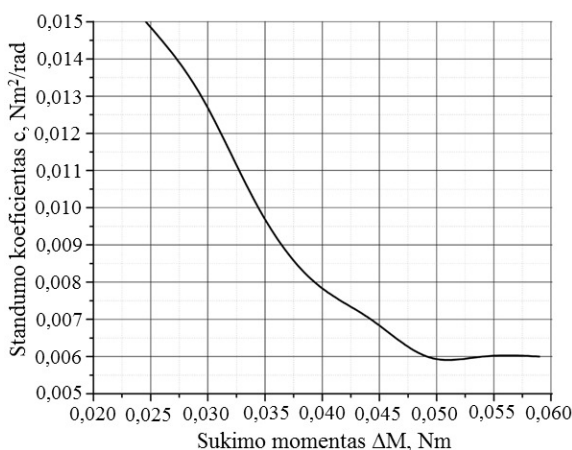
Nagrinėtos atkarpos tempimo – atleidimo diagrama yra histerezės kilpa, kuri rodo, kad trinties įtaka lyno poslinkiams yra reikšminga. Šis eksperimentas patvirtina rezultatus apie trinties įtaką lynui, kurie buvo nustatyti BE metodu 2.3 poskyryje.

Žinome, kad lynas turi specifinę formą, jo vielos apie centrinę vielą suvytos į viją, o vijos apie centrinę viją (šerdį) suvytos į lyną. Kai lyną veikia ašinė jėga, jis patiria vidinio sukimo momento poveikį – lynas pasisuka apie centrinę lyno ašį kampu φ . Lyno virpesių analitiniuose modeliuose reikalingas sukamasis standumo koeficientas. Čia jis buvo nustatomas eksperimentiškai. Tam prie lyno, kurio ilgis 1350 mm buvo pridėdamas išorinis sukimo momentas M . Ant įtempto 4 mm skersmens lyno fragmento buvo pritvirtinta 50 mm ilgio letenėlė, nutolusi 785 mm nuo kairiojo lyno laikiklio. Ant letenėlės buvo dedami svareliai ir indikatoriumi buvo matuojamas jos poslinkis, atsirandantis dėl lyno sąsūkio. Kadangi abiejuose galuose lynas yra įtvirtintas, jis buvo vertinamas kaip statiskai neišsprendžiama sistema. Lyno sukamojo standumo koeficientas buvo apskaičiuotas remiantis 3.5 formule:

$$c = \frac{\Delta M \cdot L}{\Delta \varphi}, \quad (3.5)$$

čia ΔM – lyno vidinio sukimo momento pokytis, veikiantis 785 mm atkarpoje, Nm; L – tiriamo lyno atkarpa, lygi 0,785 m; $\Delta \varphi$ – lyno pasisūkimo kampo pokytis, rad.

Lyno sukamojo standumo koeficiento priklausomybė nuo sukimo momento grafiškai pateikta 3.32 paveiksle.



3.32 pav. Lyno sukamojo standumo koeficiento priklausomybė nuo sukimo momento
Fig. 3.32. Diagram of wire rope stiffness coefficient dependence of torsion moment

3.32 paveiksle galima matyti, kad lyno sukamasis standumo koeficientas akivaizdžiai ženkliai priklauso nuo sukimo momento. Tą sąlygoja sudėtinga lyno konstrukcija. Pagal grafiką (3.32 pav.) nustatyta, kad padidinus sukimo momentą 50 %, lyno standumo koeficientas sumažėja apie 60 %.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Eksperimentiškai patvirtinta, kad pasiūlyta metodika leidžia diagnozuoti įtempto plieninio lyno išorinių nutrūkusių vielų buvimą ir vietą lyne.
2. Eksperimentų metu ištirta „lynas-nutrūkusi viela“ sistema. Atlikus tyrimus nustatytos sistemos dinaminės charakteristikos: stovo savieji dažniai yra apie 400 Hz; lyno savasis dažnis – 607 Hz; nutrūkusios vielos savasis dažnis – 960 Hz.
3. Eksperimentų metu nustatyta, kad geresnis lyno žadinimas yra tuomet, kai lyno žadinimo amplitudė palaikoma užduoto dydžio (šiuo atveju 50 μm). Tuomet stabilesnės yra lyno žadinimo sąlygos; taip pat įvairaus ilgio nutrūkusios vielos sužadinamos, esant žemesniems dažniams, o nutrūkusios vielos poslinkio pikai dažniau būna didesni.
4. Eksperimentų metu nustatyta, kad ant lyno paviršiaus esanti papildoma masė, imituojanti susikaupusį purvą, turi tam tikrą įtaką nutrūkusių vielų virpesių poslinkio amplitudei. Kuo didesnis papildomas svoris esantis ant lyno paviršiaus, tuo nutrūkusių vielų virpesių poslinkio amplitudė yra mažesnė.
5. Eksperimentiškai nustatyta, kad esant didesniai nutrūkusios vielos pašaknio įveržtumui nutrūkusių vielų virpesių amplitudės visumoje yra šiek tiek mažesnės. Nors nutrūkusios vielos pašaknio įveržtumas daro tam tikrą įtaką nutrūkusių vielų, esančių ant įtempto lyno, virpesiams, tačiau tas netrukdo diagnostikai. Jų virpesiai yra matomi visame taikomo žadinimo intervale.
6. Eksperimentų metu nustatyta, kad lyno tempimo-atleidimo poslinkio priklausomybė nuo jėgos yra netiesinė ir atpalaiduojant lyną lieka liekamosios deformacijos. Tempiant lyną, lyno elementų pasisukimo kampas didėja ir dėl to, didinant ašinę jėgą, sumažėja lyno sukamasis standumo koeficientas.
7. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad įmanoma sužadinti lyno sukamuosius virpesius, žadinant lyną skersine jėga; sukelti sukamieji virpesiai žadinami parametriškai, t. y. virpesių dažnis du kartus didesnis už žadinimo dažnį.
8. Eksperimentinio tyrimo stendo savųjų virpesių dažniai nepakliūna į tiriomojo lyno fragmento savųjų dažnių aplinką, todėl stendo, kaip dinaminės sistemos įtaka matavimų tikslumui, yra nykstamai maža.

Bendrosios išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros apie plieninius lynus, lynų defektus (lyno vijos išoriniame sluoksnyje nutrūkusios vielos) ir jų diagnostikos metodų analizę, nustatyta, kad plačiausiai paplitę elektromagnetiniai diagnostikos metodai, tačiau šiuo metu šie diagnostikos metodai nutrūkusioms vieloms lyno išorėje nustatyti dar nėra visiškai patikimi. Dinaminių metodų taikymas lyno išorėje nutrūkusioms vieloms aptikti nėra ištirtas.
2. Pasiūlytas naujas metodas įtemptų plieninių lynų vijos išorinio sluoksnio nutrūkusioms vieloms nustatyti, naudojant įtempto plieninio lyno dinamines savybes. Tiesiogiai žadinant lyną statmenai lyno ašiai harmonine jėga ir palaikant užduoto dydžio lyno žadinimo amplitudę, kuri įtemptą lyną sužadina sukamajai virpesių formai ir nutrūkusios vielos pradeda švytuoti.
3. Nustatyta, kad nutrūkusių vielų kiekis vijos išorėje turi iki 17,4 % įtakos lyno kaip dinaminės sistemos charakteristikoms, sukeliant sukamuosius lyno virpesius.
4. Eksperimentiškai nustatyta, kad naudojant pasiūlytą metodiką galima aptikti įvairaus ilgio nutrūkusias vielas. Skirtingo ilgio nutrūkusių vielų dinaminės savybės skiriasi. Tirtos 4 mm skersmens lyno nutrūkusių 8–11 mm ilgio vielų poslinkio amplitudės yra 1,2–45 karto didesnės už tiriamojo 4 mm skersmens lyno poslinkio amplitudę 575–675 Hz, 1,5–154 karto didesnės 920–1230 Hz ir 4–78 karto didesnės 1510–1680 Hz dažnių intervaluose.

5. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad siūlomas metodas yra stabilus: lyno sukamųjų virpesių dažnis beveik nepriklauso nuo lyno paviršiuje nutrūkusių vielų skaičiaus.
6. Skirtingų rūšių ir skersmenų lynų diagnostikai atlikti reikia suderinti lyno rezonansinius sukamųjų virpesių dažnius, parenkant kitokį lyno fragmento ilgį.
7. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad galima sukurti diagnostinę įrangą siūlomam lynų nutrūkusių vielų nustatymo metodui realizuoti.

Literatūra ir šaltiniai

Allan, G. P.; Thomas L. P. 2010. *Harris` Shock and Vibration Handbook*. Sixth edition. 1199 p.

Balan, K. P. 2002. *Failure Analysis of Wire Rope*. ASM International 2.

Barat, V.; Slesarev, D.; Lunin, V.; Belitsky, S. 2000. Wavelet analysis of MFL signal for steel wire rope testing. *The e – Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonic* 5: 33–37.

Barzdaitis, V.; Čilinskas, G. 1998. *Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika*. Kaunas: Technologija. 364 p.

Basak, D. 2007. Electromagnetic (EM) nondestructive evaluation of steel wire rope: a preview. *Wire an International Journal* 6: 204–206.

Basak, D.; Pal, S.; Patranabis, D. Ch. 2006. In situ assessment of independent wire rope core ropes in cage winders by a nondestructive method. *Russian Journal of Nondestructive Testing* 44: 585–588.

Basak, D.; Pal, S.; Patranabis, D. Ch. 2007. Assessment of track ropes by nondestructive method: a case study. *International Journal of Nondestructive Testing* 49: 15–20.

Basak, D.; Pal, S.; Patranabis, D. Ch. 2008. In-situ non-destructive assessment of a haulage Rope in a monocable zigback passenger ropeway. *International Journal of Non-destructive Testing* 50: 136–137.

Basak, D.; Pal, S.; Patranabis, D. Ch. 2008. Nondestructive evaluation of haulage rope in a monocable continuously moving passenger ropeway. *International Journal of Nondestructive Testing* 50: 156–157.

Basak, D.; Pal, S.; Patranabis, D. Ch. 2009. Inspection 6X19 seale performed haulage rope by nondestructive technique. *Russian Journal of Nondestructive Testing* 45: 143–147.

Basak, D.; Pal, S.; Patranabis, D. Ch. 2009. Nondestructive evaluation of a 6X25 FW haulage rope in a monocable continuously moving passenger cable car installation. *IAC-SIT International Journal of Engineering and Technology* 1: 486–490.

Byeong, H. K.; Jung B. J.; Hong P. L.; Do H. L. 2012. Evaluating longitudinal vibration characteristics of bonded strands embedded in prestressed concrete beams by a system indentification approach. *The International Journal for Composites* 43: 1531–1537.

Cacciatore, V.; Canova, A.; Vallan, A.; Vusini, B. 2007. Experience and technologies in NDT of ropes. *Key Engineering Materials* 347: 627–632.

Canova, A.; Vusini, B. 2008. Magnetic analysis of non-destructive testing detectors for ferromagnetic ropes. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 27: 869–878.

Cappa, P. 1988. An experimental study of wire strains in an undamaged and damaged steel strand subjected to tensile load. *The International Journal of Experimental Mechanics* 15: 346–349.

Cardou, A.; Jolicoeur, C. 1997. Mechanical models of helical strands. *The International Journal of Applied Mechanics Review* 50: 1–14.

Carlson, A. D.; Kasper, R. G. 1973. A structural analysis of a multiconductor cable. *Technical report, Naval underwater system center, New London laboratory*, 767–963.

Chan, J. 2003. Tools for conductor evaluation: state of the art review and promising technologies. *The International Journal of Experimental Mechanics* 36: 236–239.

Cook, B.; Gronau, O.; Sukhorukov, V.; Verdegaal, E. 2002. Steel rope NDT in the off-shore industry and shipyards. *Proceeding of the 8th European Conference of Non-Destructive Testing*. Barcelona, 17–21.

Costello, G. A. 1983. Stresses in multilayered cables. *Journal of the Energy Resour Technology* 105: 337–340.

Costello, G. A. 1997. Theory of wire rope. *Mechanical engineering series. Second edition*. Springer, 128 p.

Costello, G. A. 2003. Mechanics of wire rope. *Wire association international Atlanta, Georgia*.

Eitutis, A. 1998. Eksperimentinė mechanika. *Kaunas: Technologija*. 200 p.

Elata, D.; Eshkenazy, R.; Weiss, M. P. 2004. The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core. *International Journal of Solids and Structures* 41: 1157–1172.

- Erdonmez, C.; Imrak, C. E. 2009. Modeling and numerical analysis of the wire strand. *Journal of Naval Science and Engineering* 5: 30–38.
- Faravelli, L.; Fuggini, C.; Ubertini, F. 2011. Experimental study on hybrid control of multimodal cable vibrations. *International Journal of Mechanics* 46: 1073–1084.
- Ghoreishi, S. R.; Cartroud, P.; Davies, P.; Messenger, T. 2007. Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part I: A continuum model for multi-layered fibrous structures. *International Journal of Solids and Structures* 44: 2924–2942.
- Ghoreishi, S. R.; Cartroud, P.; Davies, P.; Messenger, T. 2007. Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part II: A linear elastic model for 1+6 fibrous structures. *International Journal of Solids and Structures* 44: 2943–2960.
- Ghoreishi, S. R.; Cartroud, P.; Davies, P.; Messenger, T. 2007. Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model. *International Journal of Mechanical Sciences* 49: 1251–1261.
- Giglio, M.; Manes, A. 2005. A life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads. *International Journal of Engineering Failure Analyses* 12: 549–568.
- Goldshtein, A. E.; Urazbekov, E. I. 2007. Optimization of design factors and an operating regime of a magnetic – marking device in an extensometer for steel ropes. *International Journal of Non-Destructive Testing* 43: 515–520.
- Goroshko, O. A. 2007. Evaluation of the dynamic theory of hoist rope. *International Journal of Applied Mechanics* 43: 64–67.
- Greguss, P. 1980. Ultrasonic imaging – seeing by sound. *Focal Press Inc.*, New York.
- Haller, A. 1998. Wire cable testing using high resolution magnetic induction. *International Journal of Engineering Failure Analyses* 3: 12–18.
- Hashemi, S. M.; Roach, A. 2006. Dynamic finite element for vibration analysis of cables and wire rope. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* 7: 487–500.
- Hoashi, H.; Sugimoto, T. 2007. Nondestructive inspection of the suspender ropes in a suspension bridge. *International Journal of Non-Destructive Testing* 43: 520–526.
- Huang, J.; Nissen, J. A.; Bodegon, E. 1992. Diffraction of light by a focused ultrasonic wave. *International Journal of Applications* 1: 25–32.
- Imanishi, E.; Nanjo, T.; Kobayashi, T. 2009. Dynamic simulation of wire rope with contact. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23: 1083–1088.
- Imark, C. E.; Erdonmez, C. 2010. On the Problem of Wire Rope Model Generation with Axial Loading. *Journal of Mathematical and Computations* 15: 259–268.
- Jiang, W. G.; Henshall, J. L. 1999. The analysis of termination effects in wire strand using the finite element method. *Journal of Strain Analyses* 34: 31–38.
- Jiang, W. G.; Henshall, J. L.; Walton, J. M. 2000. A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand. *International Journal of Mechanical Sciences* 42: 63–86.

- Jiang, W. G.; Michael, K.; Warby, J.; Henshall, J. L. 2008. Statically indeterminate contacts in axially loaded wire strand. *Europe Journal of Mechanical A Solids* 27: 69–78.
- Jiang, W. G.; Yao, M. S.; Walton, J. M. 1999. A concise finite element model for simple straight wire rope strand. *International Journal of Mechanical Sciences* 41: 143–161.
- Jomdecha, C.; Prateepasen, A.; Methong, W. 2003. Characterization of wire rope defects from magnetic flux leakage signals. *Tharnmasat International Journal of Sciences Technology* 8: 54–63.
- Jun, M.; Shirong, G.; Dekun, Z. 2008. Distribution of wire deformation within strands of wire rope. *International Journal of Mining and Technoogyl* 18: 475–478.
- Jutkevičius, D.; Andriuškevičius, A.; Kleinas, A. 1992. Kėlimo įrenginiai. *Vilnius: Studijos leidykla*. 156 p.
- Kashyap, S. K.; Laxminarayna, G.; Tewari, S.; Sinha, S. 2005. Non-destructive testing of steel wire ropes and their discard criteria. *Proceeding of the 8th international conference of the Slovenian society for Non-Destructive Testing "Application of contemporary Non-Destructive Testing In Engineering"*. September 1–3, Slovenia. 229–235.
- Kastratovic, G.; Vidanovic, N. 2010. The analysis of frictionless contact effects in wire ropes strand using the finite element method. *International Journal of Transport and Logistics* 19: 33–40.
- Kastratovic, G.; Vidanovic, N. 2011. Some aspects of 3D finite element modeling of independent wire rope core. *Journal of FME Transactions* 39: 37–40.
- Kastratovic, G.; Vidanovic, N. 2010. The analysis of frictionless contact effects in wire rope strand using the finite element method. *International Journal of Transport and Logistics* 19: 33–40.
- Kotelnikov, V.; Sukhorukov, V. 1992. Rope NDT as means to raise safety of crane and elevator use. Gosgortekhnadzor, Moscow, Russia.
- Kumar, K.; Botsis, J. 2001. Contact stresses in multilayered strands under tension and torsion. *Journal of Applied Machanical* 68: 432–440.
- Laird, II G.; Schrems, K. K. 1997. Mechanical modeling and analysis of the impact testing of wire. *Journal of Experimental Mechanics* 37: 258–263.
- Lanteigne, J. 1985. Theoretical estimation of the response of helically armored cables to tension, torsion and bending. *Journal Applied Mechanical* 52: 423–432.
- LeClair, R. A.; Costello, G. A. 1986. Axial bending and torsional loading of a strand with friction. *In Proceedings of the fifth international OMAE symposium Tikyo Japan* 3: 550–555.
- Livingston, R. A. 2001. Non-destructive testing of historic structures. *Journal of Archives and museum informatics* 13: 249–271.
- Lorca, J.; Varona, J. M.; Sanchez, G. V.; Gutierrez, S. F. 1989. Fatigue behavior of wire ropes. *Journal of Materials and Structures* 22: 411–419.

- Love, A. E. H. 1944. A treatise on the mathematical theory of elasticity. 4th ed., New York: Dover Publications, Chapter XVIII–XIX. 381–426.
- Ma, J.; Ge, Sh.; Zhang, D. 2008. Distribution of wire deformation within strands of wire ropes. *Journal of China University Mining and Technology* 18: 475–478.
- Mironenko, A. S.; Shpakov, I. I. 2006. Non-destructive testing of steel ropes of passenger rope – way, in podemnye sooruzheniya. *Spetsialnaya tehnika* 4: 52–54.
- Nagaraja, R. G. M.; Jayanthu, S. 2006. Electromagnetic method of testing the wire rope vis-a-vis calibration of defects. *Proceeding National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, 372–376.
- Paczelt, I.; Belezna, R. 2011. Nonlinear contact – theory for analysis of wire rope strand approximation in the FEM. *Journal of Computers and Structures* 89: 1004–1025.
- Park, S. J. 2005. Vibration response of exposed gas pipeline placed to temporary structure. *Journal of Civil Engineering* 9: 305–311.
- Patarai, D. The calculation of rope-rod structures of ropeways on the basis of the new approach. *Main researcher of the Institute of Mining, Georgian Technical University*, 1–11.
- Peterka, P.; Krešak, J.; Kropuch, S. 2004. Non-destructive tests of the steel wire rope. *METABK* 43: 343–344.
- Phillips, J. W.; Costello, G. A. 1985. Analysis of wire rope with internal wire rope cores. *Journal of Applied Mechanical* 52: 510–516.
- Pilkauskas, K.; Kerpauskas, A. 1998. Kėlimo ir transportavimo mašinos. *Vilnius: Mintis*. 243 p.
- Platzer, E. S.; Denzler, J. 2009. Model-based surface defect detection and condition monitoring in wire rope. *Dagstuhl Event Proceedings* 210–212.
- Prakash, A.; Conway, T. A.; Costello, G. A. 1992. Compression of a cord. *Trans ASME, Journal of Applied Mechanical* 59: 213–216.
- Ramsey, H. 1990. Analysis of interwire friction in multilayer cables under uniform extension and twisting. *International Journal of Mechanical Sciences* 32: 107–176.
- Ramsey, H. 1988. A theory of thin rods with application to helical constituent wires in cables. *International Journal of Mechanical Sciences* 30: 559 – 570.
- Raoof, M.; Kraincanic, I. 1998. Determination of wire recovery length in steel cables and its practical applications. *Journal of Computers and Structures* 68: 445–459.
- Rizzo, P.; Lanza, F. S. 2004. Wave propagation in multi-wire strands by wavelet-based laser ultrasound. *Journal of Society for Experimental Mechanics* 6: 407–415.
- Russold, A.; Belitsky, S. 2000. Inspection of ropes for Austrian ropeway using modern NDT instruments. *The e – Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonic* 5: 22–25.
- Sathikh, S.; Moorthy, M. B. K.; Krishnan, M. 1996. A symmetric linear elastic model for helical wire strands under axisymmetric loads. *Journal of Strain Analysis* 31: 389–399.

Saul, R.; Humpf, K. 2002. Inspection and maintenance of cable-stayed bridges-German experiences. *Proceedings of the First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. IABMAS* 223–226.

Shahsavari, H.; Starzewski, O. 2005. Spectral finite element of a helix. *Published by Elsevier Ltd. Journal of Mechanics Research Communications* 32: 147–152.

Shibu, G.; Mohankumar, K. V.; Devendiran, S. 2011. Analysis of a three layered straight wire rope strand using finite element method. *Proceedings of the Word Congress on Engineering III*. WCE 2011, July 6–8, London, U. K.

Singh, M. K.; Mahto, A.; Thakur, R. N.; Sinha, A. 2007. Failure analysis of wire rope used for hoisting in mining: a case study. *Springer Journal of Failure Analysis and Prevention* 7: 87–91.

Singh, S. D.; Ghara, B. 2000. Steel wire rope condition monitoring by non-destructive investigation and evaluation while on installation/ service. *The e – Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonic* 5: 40–43.

Siviryuk, V. L.; Gramotnik, V. K.; Bezbrukov, A. N.; Shtaiger, A. G. 2006. Magnetic-field testing of steel rope via a KPM-IJK-2M instrument. *Russian Journal of Non-Destructive Testing* 42: 363–368.

Siviryuk, V. L.; Gramotnik, I. V.; Bezbrukov, A. N. 2008. Magnetic method for testing steel ropes. *Russian Journal of Non-Destructive Testing* 44: 579–584.

Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W. 2005. Engineering tribology. New York, *Elsevier Butterworth – Heinemann*.

Sumyong, N.; Prateepasen, A.; Kaewtrakulpong, P. 2007. Influence of scanning velocity and gap distance on magnetic flux leakage measurement. *Journal of Electronics and Communications* 5: 118–122.

Sun, J. F.; Wang, G. L.; Zhang, H. O. 2005. Elastoplastic contact problem of laying wire rope using FE analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 26: 17–22.

Taktak, M.; Dammak, F.; Abid, S.; Haddar, M. 2005. A mixed-hybrid finite element for three-dimensional isotropic helical beam analysis. *International Journal Mechanical Science* 47: 209–229.

Technikos enciklopedija. 2006. III tomas. Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas. Vilnius. 709 p.

Toshiyuki, M.; Sugawara, M.; Tsukada, K. 2004. Magnetic nondestructive evaluation of corrosion in wire ropes. Tokyo Rope MFG. Co., Ltd., *Journal of Engineering Division* 8: 1904–1909.

Toshiyuki, M.; Tsukada, K.; Hanasaki, K. 2004. A magnetic method for evaluation of the deterioration of large diameter wire ropes. *The e – Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonic* 9: 30–33.

Vanderveldt, H. H.; Chung, B. S.; Reader, W. T. 1973. Same dynamic properties of axially loaded wire rope. *SESA Fall Meeting held in Milwaukee*.

Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. 2000. Matavimų teorija ir praktika. *Vilnius: Žiburio leidykla*. 381 p.

Velinsky, S. A. 1985. General nonlinear theory for complex wire ropes. *International Journal Mechanical Science* 27: 497–507.

Verreet, R. 2005. Casar spezialdrahtseile. Drahtseile vor gericht. 50 p.

Volkovas, V.; Žiedelis, S. 2000. Mechaninių sistemų techninė diagnostika ir monitoringas. *Kaunas: Technologija*. 242 p.

Wei, G.; Jianxin, Ch. 2005. Signal analysis of fluxgate array for wire rope defaults. Sensors & their applications XIII. *Journal of Physics* 15: 311–314.

Wempner, G. 1973. Mechanics of solids with applications to thin bodies. McGraw-Hill, New York.

Wriggers, P. 2002. Computational contact mechanics. New York, *Journal of Wiley and Sons* 7: 56–62.

Xiuli, Ch.; Yang, L.; Zhihua, G.; Jianjun, Z. 2009. Structure and character analysis of a new type of steel wire rope NDT detector apparatus. *IEEE International. China*. 4095–4099.

Zawada, K. 1999. Magnetic NDT of steel wire rope. *Journal of Non-Destructive Testing* 4: 263–266.

Zhang, C. Y.; Zhu, C. M.; Lin, Z. Q.; Wu, T. X. 2004. Theoretical and experimental study on the parametrically excited vibration of mass loaded string. *Journal of Nonlinear Dynamics* 37: 1–18.

Zhang, D. K.; Ge, S. R.; Qiang, Y. H. 2003. Research on the fatigue and fracture behavior due to the fretting wear of steel wire in hoisting rope. *International Journal of Wear* 255: 1233–1237.

Zhang, D. L.; Cao, Y. N.; Wang, C.; Xu, D. G. 2006. A new method of defects identification for wire rope based on three dimensional magnetic flux leakages. *International Symposium on Instrumentation Science and Technology. Journal of Physics* 48: 334–338.

Zhu, Z. C.; Cao, G. H.; et al. 2007. Analysis of longitudinal vibration of wire rope in loading of skip. *Journal of China University of Mining and Technology* 36: 325–329.

Žiliukas, P.; Barauskas, R. 1997. Mechaniniai virpesiai. *Vadovėlis aukštosios mokyklos. Kaunas: Technologija*. 309 p.

Бабаков, И. М. 1965. Теория колебаний. Москва: Наука. 559 с.

Бронштейн, И. Н., Семендаев К. А. 1981. Справочник по математике. Москва, Ленинград: Наука. 720 с.

Гантмахер, Ф. Р., Крейн М. Г. 1950. Осуиляционные матрицы и ядра и топые п?-опебаные механических систем. Москва: Ленинград. 360 с.

Глушко М. Ф. 1966. Стальные подъёмные канаты. Киев: Техника. 165 с.

Малиновский, В. А. 2001. Стальные канаты. Часть I. Некоторые вопросы технологии, расчёта и проектирования. Одесса: Астропринт. 190 с.

Справочник машиностроителя. 1962. Том 3. Москва: Машгиз. 651 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Bučinskas, V.; Šutinys, E.; Kilikevičius, A. 2010. Experimental research of steel rope dynamic. *Journal of Vibroengineering*. 12(4): 676–682. ISSN 1392-8716. (ISI Web of Science).

Bučinskas, V.; Šutinys, E.; Augustaitis, V. K. 2011. Experimental research of steel rope integrity problem. *Journal of Vibroengineering* 13(2): 312–318. ISSN 1392-8716. (ISI Web of Science).

Šutinys E.; Bučinskas V.; Šešok N.; Iljin I.; Klevinskis A. 2013. Analytical research of steel rope dynamic properties. *Journal of Vibroengineering* 16(1) ISSN 1392-8716. (Primtas spaudai).

Straipsniai kituose leidiniuose

Bučinskas, V.; Šutinys, E. 2010. Research of defects in non – uniform mechanical systems using dynamic methods, in the 15th international conference “Mechanika – 2010”. *Selected Papers (8–9 April 2010, Kaunas. Lithuania)* 1: 96–99. ISSN 1822-2951.

Šutinys, E.; Bučinskas, V. 2011. Detecting defects rope using dynamical methods, in the 16th international conference “Mechanika – 2011”. *Selected Papers (7–8 April 2011, Kaunas, Lithuania)* 1: 301–305. ISSN 1822-2951.

Šutinys, E.; Bučinskas, V. 2013. Lyno išoriniame sluoksnyje nutrūkusių vielų tyrimas taikant dinaminį metodą. *Science – Future of Lithuania/ Mokslas – Lietuvos ateitis*. (Priimtas spaudai).

Patentai

Augustaitis, Vytautas Kazimieras, Bučinskas, Vytautas; Šutinys, Ernestas, *Method and Equipment of Steel Rope Quality Diagnostics/* išradėjai: Vytautas Kazimieras Augustaitis, Vytautas Bučinskas, Ernestas Šutinys; pareiškėjas: Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Nr. PCT/LT2012/000001.

Augustaitis, Vytautas Kazimieras, Bučinskas, Vytautas; Šutinys, Ernestas, *Plieninio lyno kokybės diagnostikos būdas ir įranga/* išradėjai: pareiškėjas: Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Patent numeris LT 5962 B.

Priedai

A priedas. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

B priedas. Statinės lyno laikiklių virpesių amplitudžių skaitinės reikšmės

C priedas. Patentas „Plieninio lyno kokybės diagnostikos būdas ir įranga“

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Ernestas ŠUTINYS

PLIENINIŲ LYNŲ DEFEKTŲ TYRIMAS TAIKANT BEKONTAKTĮ DINAMINĮ METODĄ

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (09T)

THE INVESTIGATION OF WIRE ROPE DEFECT USING CONTACTLESS DYNAMIC
METHOD

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (09T)

2013 12 20. 8,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius