



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Antanas Vainauskas

Popieriaus transportavimo sistemos hidrodinaminių procesų tyrimas

Hydrodynamical process analysis of paper rewinder

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas **621E20003**

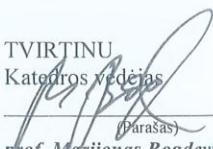
Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas



prof. Marijonas Bogdevičius
(Vardas, pavardė)

(Data)

Antanas Vainauskas

POPIERIAUS TRANSPORTAVIMO SISTEMOS HIDRODINAMINIŲ
PROCESŲ TYRIMAS
HYDRODYNAMICAL PROCESS ANALYSIS OF PAPER REWINDER

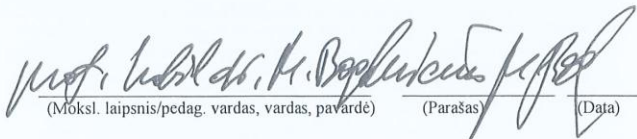
Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas



(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

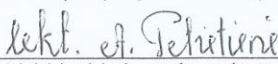
Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas



(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)



(Parašas)

(Data)

2013-06-03

Vilnius, 2013

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei
gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Antanas Vainauskas, 20074705

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerija, TTSfm-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. birželio 5 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Popieriaus transportavimo sistemos hidrodinaminių procesų tyrimas“ patvirtintas 2011 m. gruodžio 27 d. dekanų potvarkiu Nr. 516ti, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius. Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Antanas Vainauskas

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Transporto inžinerijos fakultetas
Transporto technologijų įrenginių katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Transporto inžinerijos** programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **Popieriaus transportavimo sistemos hidrodinaminių procesų tyrimas**

Autorius **Antanas Vainauskas**

Vadovas **prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame darbe nagrinėjamos popieriaus vyniotuvo „BELOIT“ technologinės ir mechaninės problemos. Suprojektuotas mechaninis ir hidrodinaminis sistemos modelis. Pateiktos mokslinės ir teorinės problemos eksploatuojant popieriaus vyniotuvą BELOIT. Išnagrinėtos popieriaus vyniotuvo BELOIT mechaninės ir hidrodinaminės sistemos, bei jų įtaka popieriaus vyniojimo technologiniam procesui. Pateiktas popieriaus vyniotuvo matematinis modelis. Atlikti eksperimentiniai vibracijų ir slėgio tyrimai, vibracijų ir slėgių spektrų analizė. Pateiktos popieriaus vyniotuve monitoringo galimybės.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, mokslinių darbų apžvalga, įrangos veikimo modelis, įrangos procesų modeliavimas, įrangos procesų eksperimentavimas, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 72 p. teksto be priedų, 92 iliustr. 9 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: hidraulika, pulsacijos, mikrologas, vibracijos, monitoringas, popieriaus, vyniotuvas, BELOIT, spektras.

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Transport Engineering Department of Transport Technological Equipment	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Transport Engineering study programme Final Work	
Title	Hydrodynamic processes research of paper transportation system
Author	Antanas Vainauskas
Academic supervisor	Prof Dr Habil Marijonas Bogdevičius
Thesis language: Lithuanian	
Annotation The purpose of my Master thesis was to find hydraulical pulsations in paper rewinder system BELOIT and how hydraulical pulsations effects rewinder technological process. In this thesis there are 76 pages that include: Other scientific reaserch conducted by other scientists, dynamical and mathematical models of paper rewinder system, theorical problems of rewinder systems and how those problems effect paper rewinding. Testing of these parameters were also conducted in this theses using vibration analysis tools and pressure sensor device. At the end of thesis conclusion and maintenance guide for future work with paper rewinder is presented.	
Keywords: Hydraulic, pulsation, effect, vibration, trend, rewinder, paper, BELOIT.	

Turinys

Įvadas	12
1. Mokslinių darbų analizė.....	15
2. BELOIT vyniotuvo įranga ir jos pagrindiniai parametrai.....	23
3. BELOIT įrangos veikimo modelis.....	34
3.1 BELOIT mechaninės sistemos dinaminis modelis.....	34
3.2 Transportuojamo popieriaus fizinės, mechaninės savybės	35
3.3 Pirmojo popieriaus vyniotuvo būgno matematinis modelis.....	36
3.4 Antrojo popieriaus vyniotuvo būgno matematinis modelis	39
3.5 Vyniojamo popieriaus rulono matematinis modelis.....	42
3.6 Prispaudimo veleno matematinis modelis.....	43
3.7 Prispaudimo mechanizmo matematinis modelis	44
4. BELOIT įrangos dinaminių ir hidrodinaminių procesų eksperimentavimas	46
4.1 Eksperimente naudojama įranga	46
4.2 Įrangos diaminių procesų (vibracijų) eksperimentinis tyrimas naudojantis SKF mikrologu	47
4.3 Beloit popieriaus vyniotuvo slėgio pulsacijų eksperimentinis tyrimas.....	62
Išvados.....	72
Pasiūlimai	72
Literatūros sąrašas	73

Iliustracijų sąrašas

1 pav. Popieriaus vyniojimo staklės.....	12
2 pav. Popieriaus vyniotuvas	13
3 pav. Suprojektuota hidraulinė sistema (Krogerus <i>et al.</i> 2008).....	15
4 Pav. Hidraulinio cilindro darbo eiga, ir slėgis (Krogerus <i>et al.</i> 2008).....	15
5 pav. Suprojektuota hidraulinė sistema (Patrick Chua S. K.. <i>et al</i> 2003).....	16
6 pav. Hidraulinės stotelės variklio vibracijų spektras. (Tan <i>et al</i> 2003)	17
7 pav. Triukšmų lygis su padėvėtais ir naujais sandarikliais (Tan <i>et al.</i> 2003).....	17
9 pav. Dviejų skirtingų hidraulinių slopintuvų vibravimas koordinacių sistemoje	18
10 pav. Traktoriaus BELARUS hidraulinis slopintuvas.....	19
11 pav. Hidraulinio siurblio triukšmų lygis	20
12 pav. Hidraulinio skirstytuvo akutės pločio priklausomybė nuo išeinančio slėgio.	20
13 pav. Hidraulinio skirstytuvo akutės pločio priklausomybė nuo išeinančio slėgio.....	21
15 pav. Hidraulinio skirstytuvo akutės pločio priklausomybė nuo išeinančio slėgio.	22
16 pav. BELOIT popieriaus vyniotuvo popieriaus prispaudimo mechanizmas.....	34
17 pav. BELOIT popieriaus vyniotuvo pirmojo būgno dinaminis modelis.....	36
18 pav. Vyniotuvo būgno guolio laisvumo tarpelio kitimas.....	37
19 pav. Dinaminis pirmojo vyniotuvo būgno guolio modelis.....	38
20 pav. BELOIT popieriaus vyniotuvo antrojo būgno dinaminis modelis	39
21 pav. Dinaminis antrojo vyniotuvo guolio modelis	41
22 pav. BELOIT popieriaus rulono dinaminis modelis	42
23 pav.. BELOIT prispaudimo veleno dinaminis modelis.....	43
24 pav. BELOIT prispaudimo mechanizmo dinaminis modelis	44
25 pav. Vyniojamas popieriaus rulonas	23
26 pav. Vyniotuvo būgnas nr. 1	24
27 pav. Vyniotuvo būgnas nr. 1	24
28 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno guolio parametrai.....	26
29 pav. Vyniotuvo būgnas nr. 2	26

30 pav. Antras vyniotuvo būgnas	27
31 pav. Vyniotuvo būgno nr. 2 guolio specifikacija	28
32 pav. Prispaudimo mechanizmas	29
33 pav. BELOIT hidraulinė stotelė	30
34 pav. BELOIT hidraulinis siurblys	31
35 pav. BELOIT hidraulinis siurblio triegis vožtuvas	32
36 pav. BELOIT hidraulinės sistemos droselis	32
37 pav. BELOIT hidraulinis skirstytuvas	33
38 pav. SKF Microlog Analyzer GX series CMXA 75	46
39 pav. Eksperimento schema	48
41 pav. Prispaudimo slėgio nuo rulono skersmens priklausomybė	49
42 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras	50
43 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	50
44 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras	50
45 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	51
46 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras	51
47 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	51
48 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras	52
49 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	52
50 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras	52
51 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	53
52 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras	53
53 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	53
54 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras	54
55 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	54
56 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras	54
57 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	55
58 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras	55
59 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	55
60 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras	56
61 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras	56

62 pav. Pirmojo vinytovo horizontalus greičių spektras	56
63 pav. Pirmojo vinytovo vertikalus greičių spektras	57
64 pav. Pirmojo vinytovo horizontalus greičių spektras	57
65 pav. Pirmojo vinytovo vertikalus greičių spektras	57
65 pav. Pirmojo vinytovo horizontalus greičių spektras	58
66 pav. Pirmojo vinytovo vertikalus greičių spektras	58
67 pav. Pirmojo vinytovo horizontalus greičių spektras	58
68 pav. Pirmojo vinytovo vertikalus greičių spektras	59
69 pav. Hidraulinio siurblio eksperimento schema.....	60
70pav. Hidraulinio siurblio horizontalių vibracijų spektras	60
71 pav. Hidraulinio siurblio vertikalių vibracijų spektras.....	61
72 pav. Hidraulinio siurblio vertikalių vibracijų spektras su plundžerio veikimo dažniu	61
73 pav. Hidraulinio siurblio vertikalių vibracijų spektras su plundžerio veikimo dažniu	62
74 pav. Hidraulinio siurblio vertikalių vibracijų spektras.....	62
75 pav. Danfoss MBS 4050 slėgio daviklis	47
76 pav. Hidraulinės sistemos eksperimento schema	63
77 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko	63
78 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko	63
79 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko	64
80 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio.....	64
81 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko	64
82 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio.....	65
83 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko	65
84 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio.....	65
85 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko	66
86 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio.....	66
88 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio.....	67
89 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio, su plundžerio veikimo dažniu	68
90 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio, su plundžerio veikimo dažniu	68
91 pav. Vibracijų greitis, veikiant slėgio pulsacijai	69
92 pav. Vibracijų greitis, veikiant slėgio pulsacijai	69

93 pav. Vibracijų greitis, veikiant slėgio pulsacijai	70
---	----

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Eksperimento eigos lentelė.....	49
2 lentelė. Slėgio pulsacijų sukeltų vibracijų greičių kitimas, nuo rulono skersmens.	70

Ivadas

Šiuolaikinės popieriaus išvyniotuvų linijos reikalauja geros popieriaus prispaudimo kontrolės, siekiant maksimalaus efektyvumo bei didesnio technologinio našumo. Popieriaus vyniojimo sistemose labai svarbu išlaikyti nustatytus popieriaus rulono technologinius parametrus, kadangi popieriaus vyniojimo metu, prispaudimo funkciją atlieka hidraulinė sistema, kuri hidrauliniiais cilindrais prispaudžia popierių prie vyniojimo gilzės per prispaudimo veleną, neleidama susidaryti oro kišenėms (klostėms). Atitinkamai hidraulinė sistema neturi ir perspausti popieriaus, perspaudimo atveju popierius plyšta, atsiranda technologinių prastovų, kol popierius iš naujo yra užvyniojamas.

Kadangi tai yra didelės spartos popieriaus vyniotuvo serijos įrenginys, atsiradusios pašalinės vibracijos vyniojimo sekcijoj tiesiogiai veikia popieriaus rulono prispaudimo parametrus. Vibracijų gali atsirasti dėl guolio pažeidimų, veleno kakliuko defektų, movos pažeidimų atsiradimo ir t.t.



1 pav. Popieriaus vyniojimo staklės

Darbe pateikiama (1. Pav) popieriaus vyniotuvo (BELOIT) veikimas, suprojektuotos mechaninės ir hidrodinaminės sistemos, popieriaus vyniojimo technologinis procesas bei sistemos sąveika su technologiniu procesu. Pateiktos mokslinės ir teorinės problemos eksploatuojant popieriaus vyniotuvą BELOIT. Išnagrinėtos popieriaus vyniotuvo BELOIT mechaninės ir hidrodinaminės sistemos įtaka popieriaus vyniojimo technologiniam procesui. Pateiktas popieriaus vyniotuvo matematinis modelis. Atlikti eksperimentiniai tyrimai, vibracijų spektrų analizė. Pateiktos popieriaus vyniotuve monitoringo galimybės.

2011 m. darbo metu operatoriai negalėjo sureguliuoti tinkamo prispaudimo slėgio. Vyniotuvas pradėjo gaminti popieriaus rulonus su klostėmis. Popieriaus rulonas su klostėmis yra netinkamas tolesniam gamybos procesui, todėl vyniotuvo darbą teko sustabdyti. Pagrindine gedimo priežastimi įvardyta hidraulinės stotelės gedimas. Popieriaus vyniotuve, prispaudimo mechanizmo hidraulinuose cilindruose, yra įmontuotas skaitmeninis slėgio daviklis, gedimo analizės metu pastebėta, kad hidraulinio cilindro darbinės kameros slėgis pradeda pulsuoti (slėgio kitimas tam tikra amplitude), dėl to ant popieriaus atsirasdavo oro kišenių (klosčių). Pagal šį pastebėjimą buvo atlikta vynotuvo slėgio reguliatoriaus (valdančio prispaudimo slėgį) revizija. Demontavus slėgio reguliatorių, gedimų nepastebėta, todėl buvo atkreiptas dėmesys į vyniotuvo būgno guolius.



2 pav. Popieriaus vyniotuvas

Demontavus vyniotuvo būgno nr. 1 guoliavietes, pastebėtas guolio išorinio žiedo įtrūkimas. Pakeitus guolius, slėgio pulsacijos išnyko, ir popieriaus vyniotuvas toliau buvo eksploatuojamas. Darbe nagrinėjama vyniotuvo mechaninės sistemos (būgno) vibracijų priklausomybė nuo popieriaus prispaudimo hidraulinės sistemos.

3 pav. matyti, kad popieriaus rulonas yra varomas dviejų velenų (M9 ir M10), popieriaus rulonas yra prispaudžiamas RIDER ROLL veleno, hidrauliniiais cilindrais, todėl velenų M9 ir M10 vibracijos per popieriaus ruloną veikia hidraulinio cilindro darbinės kameros slėgį. Slėgis yra reguliuojamas automatinio slėgio reguliatoriumi, priklausomai nuo rulono skersmens, kadangi vyksta vibracijos, hidraulinis cilindras vietomis labiau prispaudžia popieriaus ruloną,

arba nepakankamai prispaudžia, dėl to atsiranda popieriaus nutraukimų (per didelis prispaudimas) bei klosčių (oro kišenių) atsiradimui (per mažas prispaudimas).

Popieriaus vyniotuvo sistemose labai svarbu užkirsti kelią popieriaus nutraukimui (per didelis prispaudimas) bei klosčių (oro kišenių) atsiradimui (per mažas prispaudimas). Greičiai yra nepastovūs priklausomai nuo popieriaus rulono skersmens, sistemoje yra suprojektuota hidraulinė sistema su cilindrais, skirstytuvais, slėgio reguliatoriais, presais kurie veikia išvyniotuvo darbą. Tiriamojo darbo metu bus suprojektuotas dinaminis modelis, kartu įtraukiant ir hidraulinės sistemos darbą. Ir išnagrinėti visi faktoriai, kurie turi įtakos įrenginio darbui, tai vibracijos, slėgis, skysčio debitas, greičiai.

Hidraulinę sistemą sudaro: hidraulinė stotelė, apsauginis vožtuvas, automatinis slėgio reguliatorius, droselis su atbuliniu vožtuvu, kontrolinis vožtuvas, bei 2 hidrauliniai cilindrai.

Mechaninę sistemą sudaro: du varikliai, dvi movos, du vyniojimo velenai, grandinė, dvi ekscentrinės žvaigždutės.

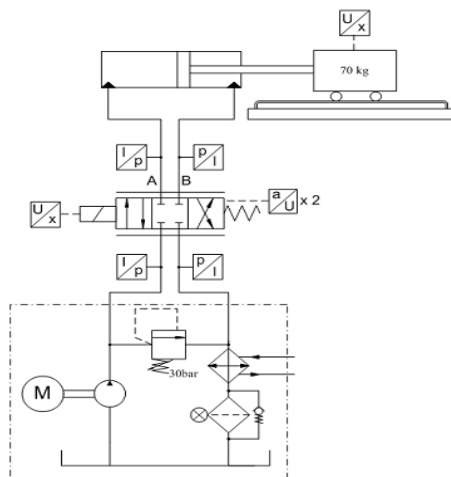
Magistriniame darbe atliktas eksperimentinis tyrimas, kuriame išmatuota hidraulinės stotelės įtaka vyniojimo būgnams.

Darbe atliktas eksperimentinis tyrimas, nustatantis hidraulinės sistemos įtaką vyniotuvo mechaniniams procesams. Eksperimentiniame tyrime buvo naudojamosi SKF mikrologu, bei aukšto dažnio slėgio jutikliu, taip pat vibracijų matuokliu „VIBRO tester“.

Pagal gautus eksperimento rezultatus nagrinėjama slėgio priklausomybė nuo vyniotuvo būgno, vibracijų greičio priklausomybė.

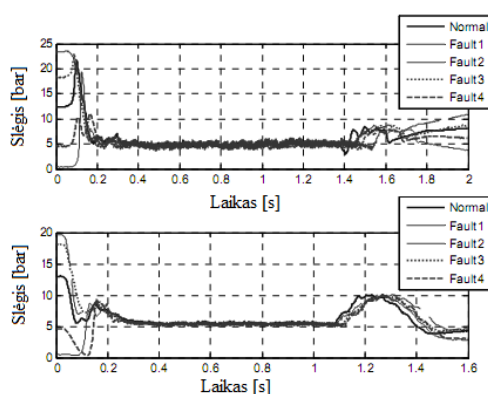
1. Mokslinių darbų analizė

Magistriniame darbe nagrinėjami moksliniai darbai, kuriuose nagrinėjamos hidrodinaminės vibracijos, eksperimentų modeliai, bei hidrodinaminių vibracijų įtaka gamybiniam procesui. Panaši problema nagrinėjama straipsnyje „Vibracijų palyginimas su slėgiu, naudojant slėgio redukavimo įrenginį (Krogerus *et al.* 2008).



3 pav. Suprojektuota hidraulinė sistema (Krogerus *et al.* 2008)

Moksliniame strapsnyje buvo nagrinėjama vibracijos įtaka hidrodinaminei sistemai. Hidrodinaminę sistemą sudaro (3 pav.): hidraulinis siurblys, hidraulinis skirstytuvas, hidraulinis cilindras, prie kurio prikabinta 70 kg masė su vežimėliu (Krogerus *et al.* 2008).

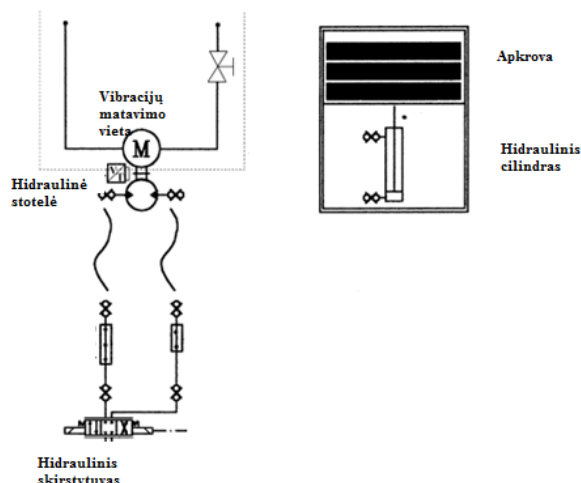


4 Pav. Hidraulinio cilindro darbo eiga, ir slėgis (Krogerus *et al.* 2008)

Eksperimente prikabintas vežimėlis buvo žadinamas kalibruotu dažniu, pagal žadinimo amplitudę matuojamas cilindro prispaudimo slėgis. Straipsnyje aprašoma priklausomybė tarp vibracijų dažnio bei slėgio (4 pav.) Pastebėta, kad esančios vibracijos turi įtakos darbinio cilindro eigą. Precizinėse sistemose atsiradę nuokrypiai dėl vibracijų, kurie veikia viso proceso darbą (4 pav.), parodo priklausomybę tarp cilindro susitraukimo laiko bei darbinės kameros slėgio. Straipsnyje aprašoma išvada, kad sistemoje, atsiradus pašalinėms vibracijoms, kurios nebuvo numatytos projektavimo etape, daro įtaką visos sistemos darbui (Krogerus 2008).

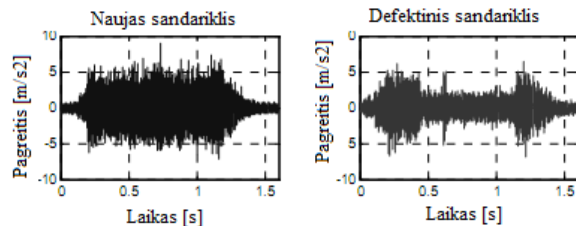
Kadangi kiekviena hidraulinė sistema neapsieina be sandarinimo elementų, straipsnyje išnagrinėta hidraulinių cilindrų sandarinimo žiedų įtaką hidraulinės stotelės procesams. (Patrick Chua S. K. 2003). Tyrime buvo akcentuojamos riebokšlių pažaidos ir kaip jos keičia hidraulinės sistemos parametrus. (Tan 2003).

Eksperimente suprojektuota hidraulinė sistema (5 pav.)



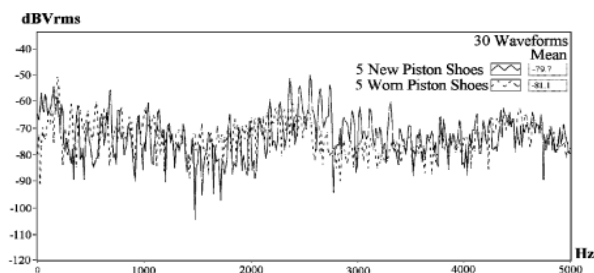
5 pav. Suprojektuota hidraulinė sistema (Patrick Chua S. K., *et al* 2003)

Tyrimo metu hidrauliniai cilindrai yra apkrauti 3 kN jėga. Tyrimas buvo atliekamas su naujais ir padėvėtais hidraulinių cilindrų riebokšliais, ir bandoma išjudinti uždėtą krovinį. Vykdamt eksperimentą, buvo matuojamas hidraulinio siurblio guoliavietės pagreitis. Pagal skirtingus pažaidų laipsnius nustatyta, kad vibracijos kinta, priklausomai nuo riebokšlio nusidėvėjimo (6 pav.). Tyrime taip pat akcentuojamas dėmesys triukšmams, atsiradusiems hidraulinėje sistemoje dėl riebokšlio (7 pav.).



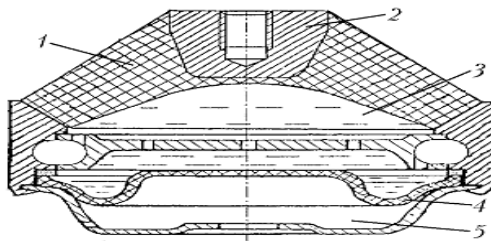
6 pav. Hidraulinės stotelės variklio vibracijų spektras. (Tan . et al 2003)

Pastebėta, kad vidutinis triukšmų lygis, eksploatuojant hidraulinę stotelę su naujais riebokšliais, yra 2, 3 % mažesnis (7 pav.). Didesni triukšmų lygiai atsiranda dėl atsiradusios papildomos trinties, pasikeitus riebokšlio šiurkštumui dinaminėje dalyje. Šiurkštumas pasikeičia dėl pastovaus trynimosi į cilindro stūmoklį bei abrazyvinių dalelių atsiradimo hidraulinėje alyvoje. Šie parametrų pažeidimai sandariklyje turi įtakos hidraulinės sistemos parametrams, bei darbo eigai. (Tan *et al.* 2003)



7 pav. Triukšmų lygis su padėvėtais ir naujais sandarikliais (Tan *et al.* 2003)

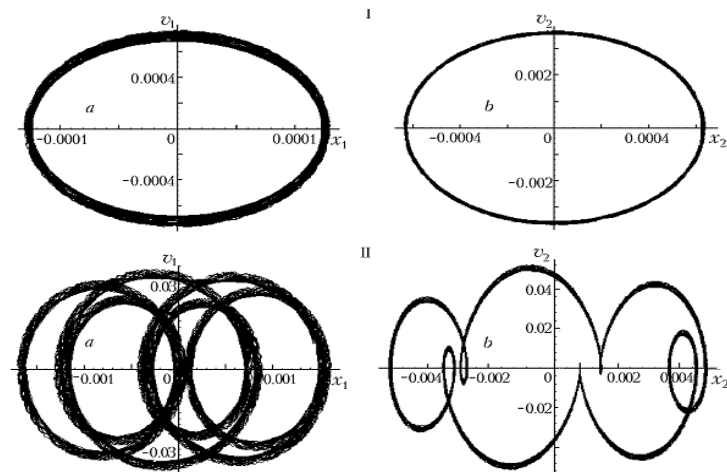
Atliekant mokslinių darbų analizę buvo atkreiptas dėmesys į hidraulinius slopintuvus bei jų įtaką važiavimo procesui, bei jų parametrų kitimas, sukeliant įvairias vibracijas. Pateikiami vibracijų spektrai, priklausomai nuo hidraulinio slopintuvo parametrų. (Dokukova *et al.* 2008).



8 pav. BELARUS traktoriaus hidraulinis slopintuvas

Straipsnyje nagrinėjama traktoriaus „belarus“ hidraulinio slopintuvo savybės, keičiant hidraulinio slopintuvo (8 pav.) parametrus, kartu stebint vibruojančios pakabos vibracijos pokyčius.

Tyrimo metu hidraulinio slopintuvo membrana (4) buvo kalbiruotai pažeista, ir matuojamas hidraulinio slopintuvo vibracijų pokytis. Tyrime atliekami horizontalūs ir vertikalūs vibracijų greičių matavimai.

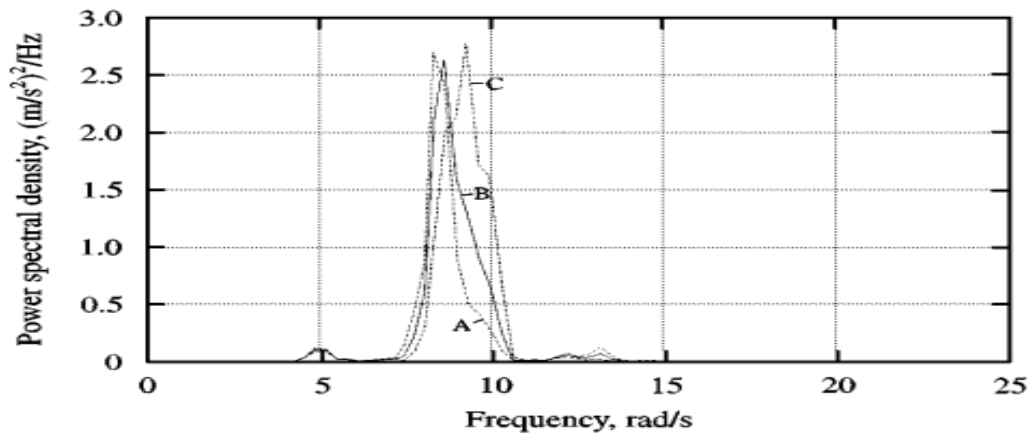


9 pav. Dviejų skirtingų hidraulinių slopintuvų vibravimas koordinačių sistemoje

Tyrimo metu yra atkreipiamas dėmesys į techninės įrangos būklės kitimą, kaip vibracijos veikia traktoriaus „Belarus“ darbą, tačiau nesusiejama su technologinio proceso kitimu, kur hidraulinis cilindras, atlieka labai svarbias funkcijas, t.y. nuo jo parametru priklauso gaminamo produkto kokybė, kaip popieriaus vyniotuve, tačiau išvedama tiesioginė priklausomybė tarp korpuso vibracijų bei hidraulinio slopintuvo slėgio skirtumo - tarp defektinio ir nedefektinio.

Kadangi popieriaus vynuotuvą nuolat veikia vibracijos ir vyniotuvo guoliai yra stipriai apkrauti popieriaus rulono, straipsnyje („Evaluation of a Cascade Compensator for Horizontal Vibrations of a Flexible“) stebimas vibracijų kitimas esant skirtingoms apkrovoms.

Straipsnyje nagrinėjamos ekskavatoriaus, ant kurio sumontuotas purškimo mechanizmas, korpuso vibracijos esant įvairiems skysčio kiekiams bake, ir kaip nuo skysčio masės keičiasi ekskavatoriaus dinaminės savybės bei transporto priemonės vibracijos. Taip pat pateikiami konstrukciniai sprendimai, straipsnyje nurodomas kompensatorių panaudojimas.



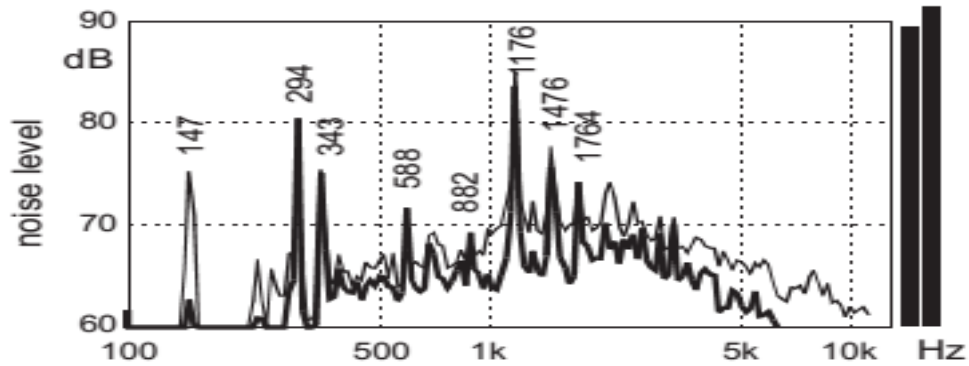
10 pav. Traktoriaus BELARUS hidraulinis slopintuvas

Pagal esamo skysčio kiekį bake (9 pav.), matomi skirtingi vibracijų spektrai. (A - pilnas, B - pusiau pilnas, C - tusčias). Pagal šiuos spektrus matome esamus vibracijų pokyčius. Kadangi, popieriaus vyniojimo procese popieriaus masė kinta (popierius vyniojimas), todėl atlikdamas eksperimentą, turėsiu įvertinti rulono svorio pastovų kitimą, kadangi tai tiesiogiai veikia dinامينius įrenginio parametrus (Ramon *et al.* 1998).

Kadangi popieriaus vyniojimo sistemą BELOIT sudaro hidraulinė sistema su hidraulinio siurbliu, darbe analizuojamas straipsnis „DETECTION OF CAVITATION PHENOMENON IN ACENTRIFUGAL PUMP USING AUDIBLE SOUND“ kuriame nagrinėjamos kavituojančio išcentrinio siurblio sukelti triukšmai, priklausomai nuo siurblio parametrų. Tyrime nagrinėjamas siurblys (10 pav.).

Tyrime keičiamas trieigio vožtuvo (1) tepalo tiekimo skylutės plotas, mažinant skylutės plotą, mažinamas paduodamo tepalo debitas (Q), taip dirbtinai sukeliant kavitacijos efektą. Kavitacijos metu siurblys pradeda vibruoti, keičiasi tiekiamo tepalo parametrai, siurblys nesugeba išlaikyti pastovaus slėgio (P) hidraulinėje magistralėje.

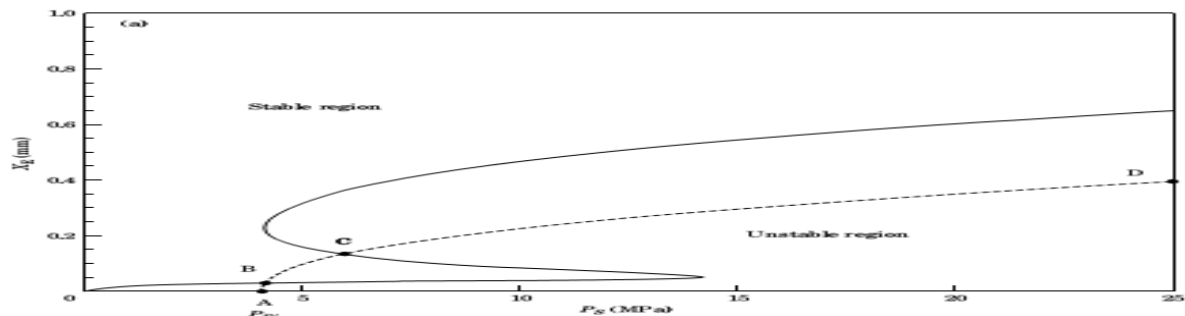
Tyrimo metu hidraulinio siurblio išėjimo anga yra užsandarinama. Trieigiu vožtuvu, hidraulinė sistema yra reguliuojama taip, kol prasideda pirmieji kavitacijos požymiai (siurblio vibracijos, slėgio kritimas, slėgio pulsacijos). Triukšmai matuojami hidraulinio siurblio darbo kameroje ir stebimas triukšmų pokytis nuo nekavituojančio siurblio.



11 pav. Hidraulinio siurblio triukšmų lygis

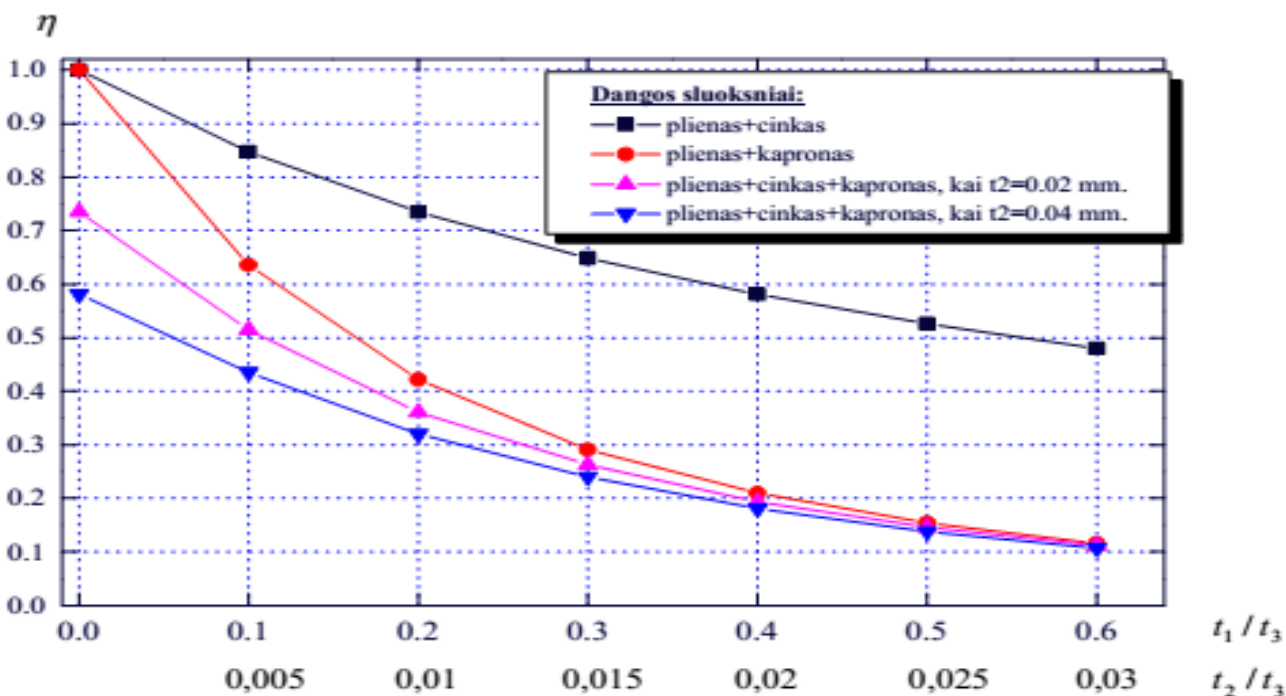
11 pav. matyti, kad kavitacijos proceso metu stipriai išauga triukšmas 147 HZ dažniu. Autorius šiame straipsnyje tokio dažnio triukšmą įvardijo kaip paties siurblio darbo rato sukimo dažnį (Stora linija – siurblio triukšmų amplitudės neveikiant kavitacijos procesui, plona linija – siurblio veikimas veikiant kavitacijos procesui). Pagal 147 Hz dažnį straipsnyje nagrinėjamos ir sukeltos vibracijos, tokios vibracijos stipriai sumažina hidraulinio siurblio guolių naudojimo laiką bei rotorius veikimo einamąjį resursą, kadangi kavitacijos metu gadinamos išcentrinio siurblio mentės (Cudina 2003).

Magistriniame darbe hidraulinę sistemą sudaro hidraulinis vožtuvas. Hidraulinio vožtuvo slėgio pokyčiai tarp įėjimo ir išėjimo skiriasi, kadangi hidrauliniam vožtuve veikia, pasipriešinimo jėgos, hidraulinio vožtuvo darbas nagrinėjamas straipsnyje (CHAOS IN A HYDRAULIC CONTROL VALVE). Straipsnyje aprašomas hidraulinio vožtuvo išeinančio slėgio priklausomybė nuo vožtuvo pratekėjimo akutės dydžio (12 pav.) (Hahayashi 1997).



12 pav. Hidraulinio skirstytuvo akutės pločio priklausomybė nuo išeinančio slėgio.

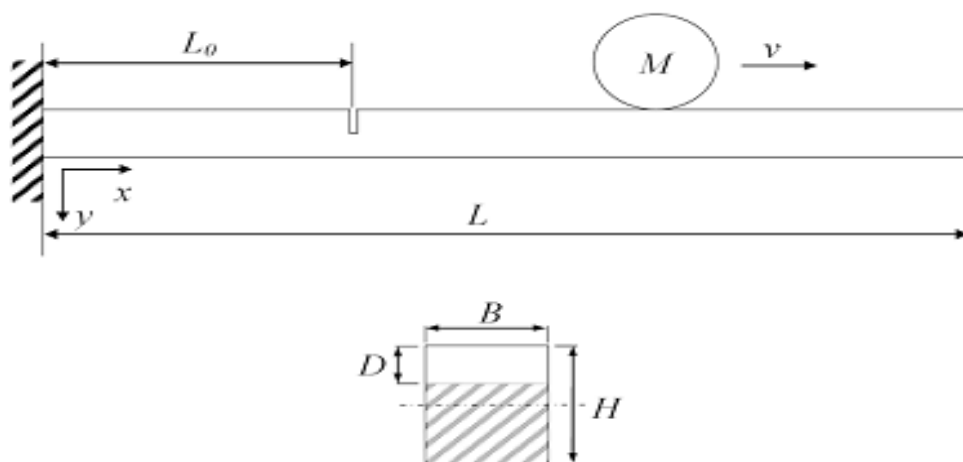
Hidraulinėje sistemoje beveik visi esantys sistemos elementai (vožtuvai, cilindrai ir t.t.) yra gaminami iš plieno lydinio, baigiamajame darbe atlikta analizė straipsnio “Plokštelė su daugiasluoksne apsaugine danga priverstiniai virpesiai”, straipsnyje nagrinėjama daugiasluoksnės medžiagos priešininimasis sukeliama vibracijoms. Straipsnyje pateikti medžiagos plokštelės mėginiai yra žadinami kalibruotu dažniu ir matuojamos poslinkių amplitudės (Baradokas 2002).



13 pav. Hidraulinio skirstytuvo akutės pločio priklausomybė nuo išeinančio slėgio

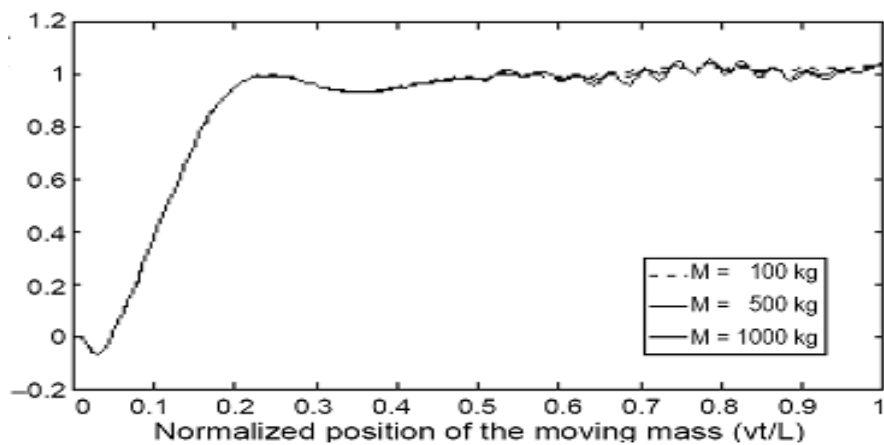
13 pav. matome, kad nuo plokštės dangos priklauso vibracijų amplitudė, bei ypač dideliu virpesių slopinimu pasižymi polimerinė danga (optimalus dydis dangos storis 0,4 - 0,6mm).

Tolimesniame straipsnių analizės etape, buvo nagrinėjamas straipsnis „ĮTRŪKUSIOS GEMBINĖS SIJOS VIRPESIAI VEIKIANT JUDANČIAI MASĖS APKROVAI“. Straipsnyje aiškinama priklausomybė, tarp apkrautos sijos masės, bei vibracijų amplitudės pikų (aukščiausių taškų). Kadangi popieriaus vyniotuvą, prispaudimo sekcija veikia taip pat didžiulė masė, kadangi įranga yra ne nauja (1980 m. gamybos), prispaudimo sekcijoje yra atsiradę įtrūkimai korpuse, kurie įtakoja popieriaus vyniotuvo darbą, bei vibracijų slopinimo galimybes. Straipsnyje sukurtas matematinis modelis sijos su įtrūkimu, bei judančios masės (Baradokas 2002).



14 pav. Hidraulinio skirstytuvo akutės pločio priklausomybė nuo išeinančio slėgio

Straipsnyje sudarytas matematinis modelis plieninės sijos su įtrūkimu, pagal tai sudarytas matematinis modelis, kaip sijos įtrūkimo tarpelis įtakoja.



15 pav. Hidraulinio skirstytuvo akutės pločio priklausomybė nuo išeinančio slėgio.

13 Pav. Pateikta įtrūkusios sijos vibracijų poslinkis, esant skirtingoms apkrovoms. Taip pat nagrinėjama, paties įtrūkimo tarpelio gylis, vibracijų priklausomybė, nuo kintančios apkrovos. Modelis buvo kartojamas keltą kartų, nagrinėjant skirtingus tarpelių dydžius.

2. BELOIT vynuotuvo įranga ir jos pagrindiniai parametrai

2.1 Transportuojamo popieriaus fizinės, mechaninės savybės

Popieriaus storis:

$$\delta = 70 \mu m; \pm 10 \mu m$$

Popieriaus rulono parametrai:

$R_3 = 1,83m$ - popieriaus rulono spindulys.

$L_3 = 2,75m$ - popieriaus ilgis.

Popieriaus krepas (ltempimas):

$$V_2 - V_1 = R_2 \dot{\phi}_2 - R_1 \dot{\phi}_1 = \frac{\Delta L}{L_0} = 15\% = E;$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \varepsilon \Rightarrow \frac{F}{A \varepsilon} = \frac{6N}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3}} = 11,4 \cdot 10^6 N / m^2;$$

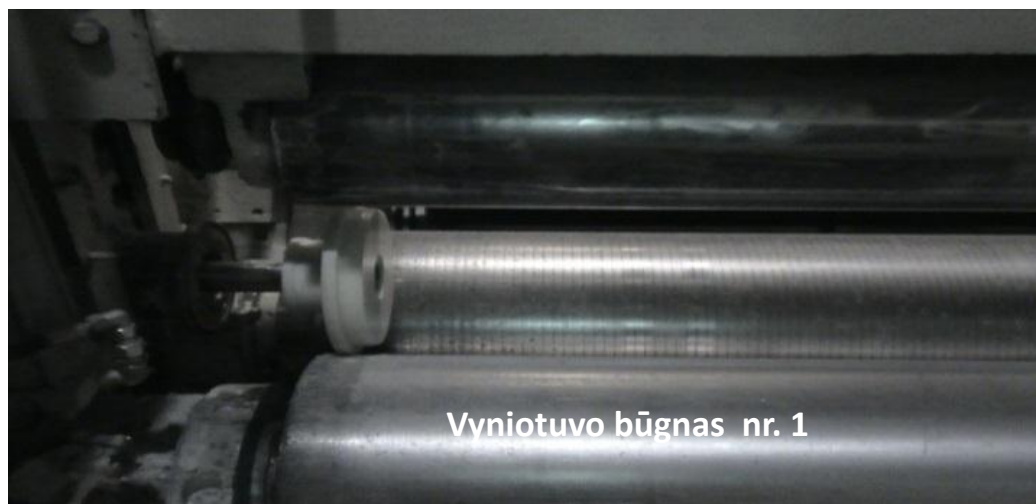


25 pav. Vyniojamas popieriaus rulonas

Nagrinėjamas popierius yra SB 2-25 tipo popierius. SB2 klasės popierius yra gaminamas iš perdirbtos makulatūros ir yra 25 g/m.

2.2 Popieriaus vyniotuvo pirmojo vyniojimo būgno parametrai

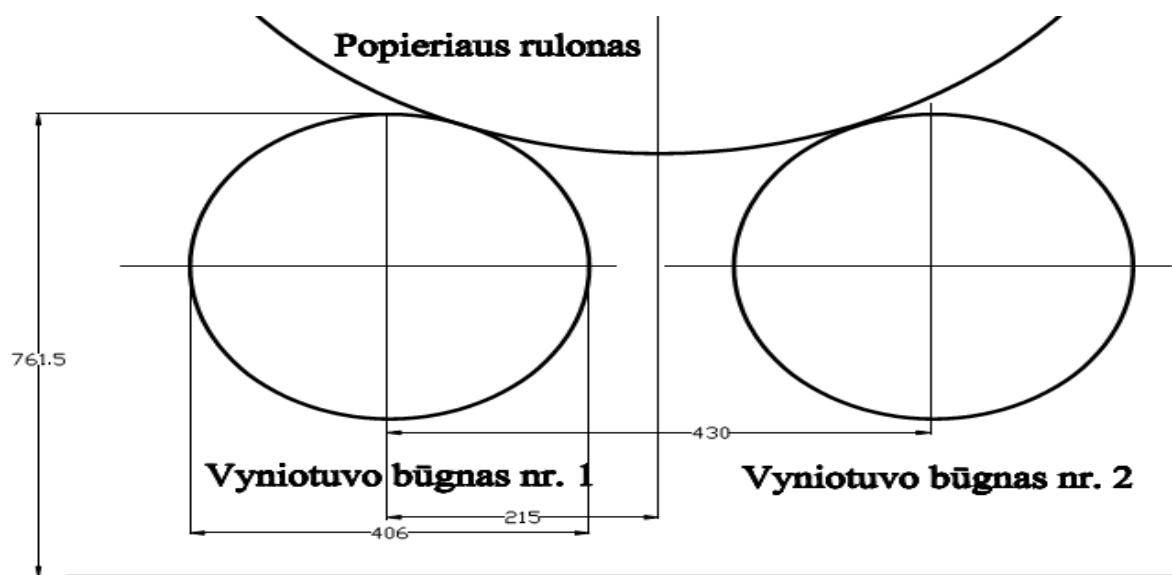
Bendras vaizdas



26 pav. Vyniotuvo būgnas nr. 1

Popieriaus vyniotuvo būgnas pagamintas iš plieno, yra tuščiaviduris, cilindro formos.

Specifikacija:



27 pav. Vyniotuvo būgnas nr. 1

Vyniotuvo būgno nr. 1 parametrai:

Vyniotuvo būgno nr. 1 ilgis

$$L_1 = 3 \text{ m}$$

Būgno diametras

$$R_1 = 0,406 \text{ m} - \text{Popieriaus rulono spindulys}$$

Vyniotuvo būgno nr.1 variklio parametrai

$$n_1 = 1460 \frac{\text{aps}}{\text{min}};$$

$$W_1 = 22 \text{ kW}.$$

Vyniotuvo būgno guoliai

Vyniotuvo būgno nr. 2 guolis

tipas: SAF explorer bearing ;

Guolio kodas: 22216 E.

Parametrai

$d = 80 \text{ mm}$ – guolio vidinis skersmuo;

$D = 140 \text{ mm}$ – guolio išorinis skersmuo;

$C = 236 \text{ kN}$ – bazinė apkrova;

$N = 24$ – ritinėlių skaičius;

$N = 4300 \text{ r/min}$ – leistinas apsisukimų skaičius.

Guolio 22216 specifikacija

Principal dimensions			Basic load ratings		Speed ratings	Limiting speed	Designation
d	D	B	dynamic C	static C_0	Reference speed		* SKF Explorer bearing
mm			kN		r/min		-
80	140	33	236	270	4300	6000	22216 E *

Calculation factors
 e 0,22
 Y_1 3
 Y_2 4,6
 Y_0 2,8

28 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno guolio parametrai

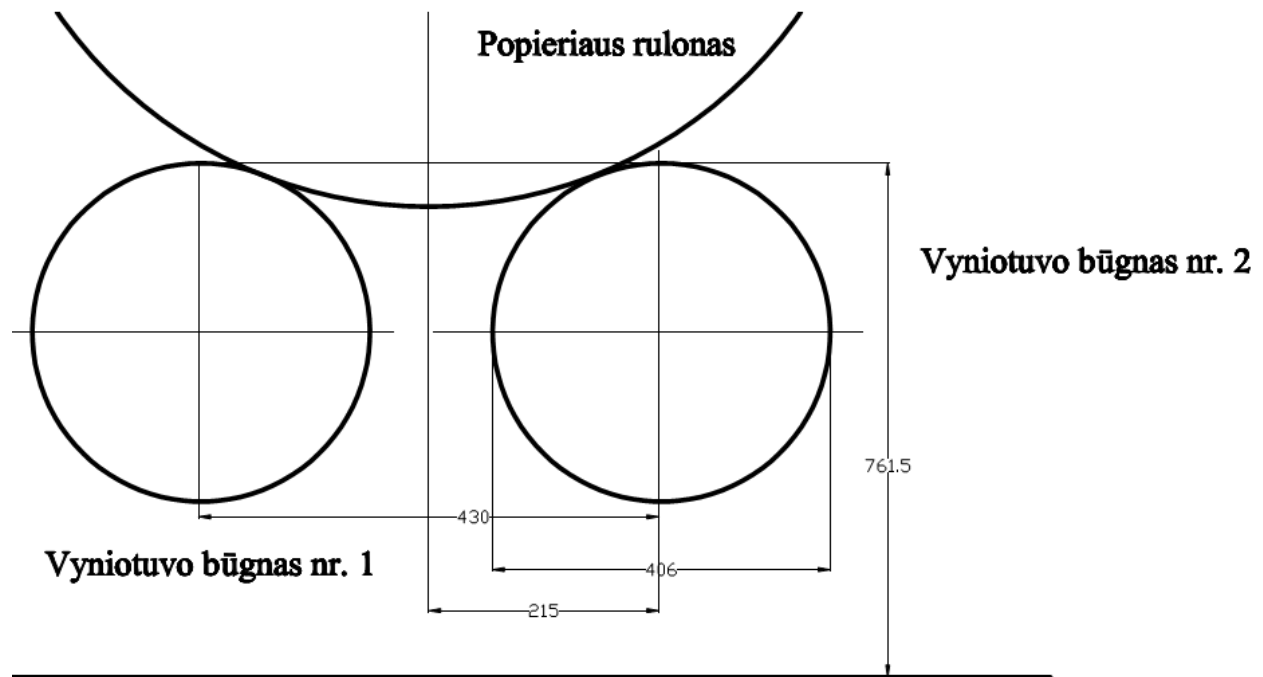
2.3 Popieriaus vyniotuvo antrojo vyniojimo būgno procesų modeliavimas

Bendras vaizdas



29 pav. Vyniotuvo būgnas nr. 2

Brežinys:



30 pav. Antras vyniotuvo būgnas

Vyniotuvo būgno nr. 2 parametrai

Vyniotuvo būgno nr.2 ilgis

$$L_2 = 3 \text{ m}$$

Būgno diametras

$R_2 = 0,406 \text{ m}$ - popieriaus rulono spindulys.

Vyniotuvo būgno nr.2 variklio parametrai

$$n_2 = 1460 \text{ aps / min;}$$

$$N_2 = 22 \text{ kW.}$$

Vyniotuvo būgno nr.2 guolio parametrai

tipas: SAF explorer bearing .

Guolio kodas: 22216 E

$d = 80 \text{ mm}$ - guolio vidinis skersmuo;

$D = 140 \text{ mm}$ - guolio išorinis skersmuo;

$C = 236 \text{ kN}$ - bazinė apkrova

$N = 24$ – ritinėlių skaičius

$N = 4300 \text{ r/min}$ – leistinas apsisukimų skaičius

Guolio 22216 specifikacija

Principal dimensions			Basic load ratings		Speed ratings	Limiting speed	Designation
d	D	B	dynamic C	static C_0	Reference speed		* SKF Explorer bearing
mm			kN		r/min		-
80	140	33	236	270	4300	6000	22216 E *

Calculation factors
 e 0,22
 Y_1 3
 Y_2 4,6
 Y_0 2,8

31 pav.Vyniotuvo būgno nr. 2 guolio specifikacija

2.3 Popieriaus vyniotuvo prispaudimo mechanizmo procesų modeliavimas

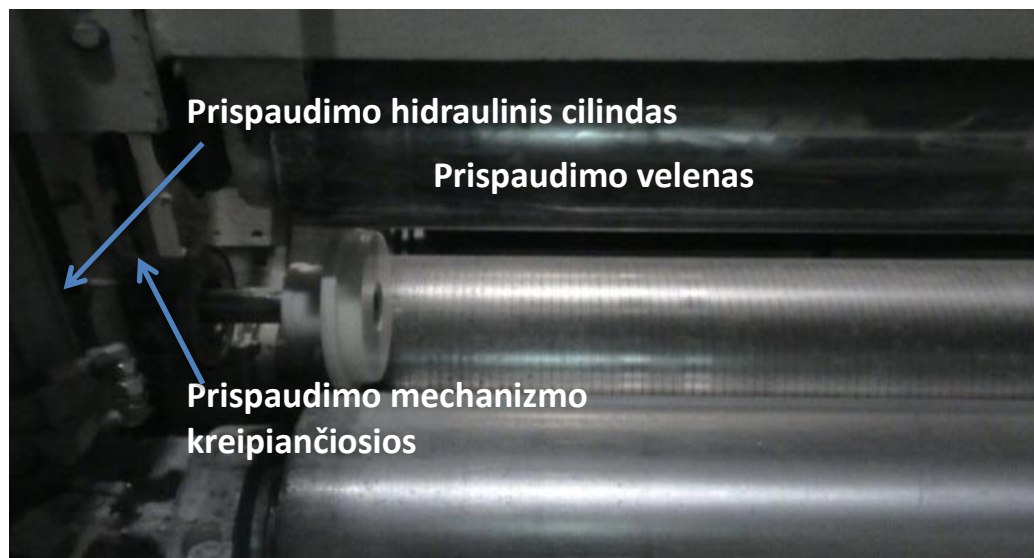
Pirspaudimo sistemą sudaro:

Mechaninė sistema: prispaudimo velenas, kreipiančiosios

Hidraulinė sistema: hidraulinė stotelė, apsauginis vožtuvas, automatinis slėgio reguliatorius, droselis su atbuliniu vožtuvu, bei hidraulinis cilindras.

Bendras vaizdas

Mechaninė sistema:



32 pav. Prispaudimo mechanizmas

Prispaudimo mechanizmo mechaninės sistemos parametrai:

Prispaudimo veleno ilgis:

$L_4 = 3 \text{ m}$ – prispaudimo veleno ilgis.

Būgno skersmuo:

$R_3 = 0,406 \text{ m}$ – prispaudimo veleno diametras.

Prispaudimo mechanizmo variklio parametrai:

1 variklio parametrai:

$$n = 1420 \text{ aps} / \text{min};$$

$$N = 22 \text{ kW}$$

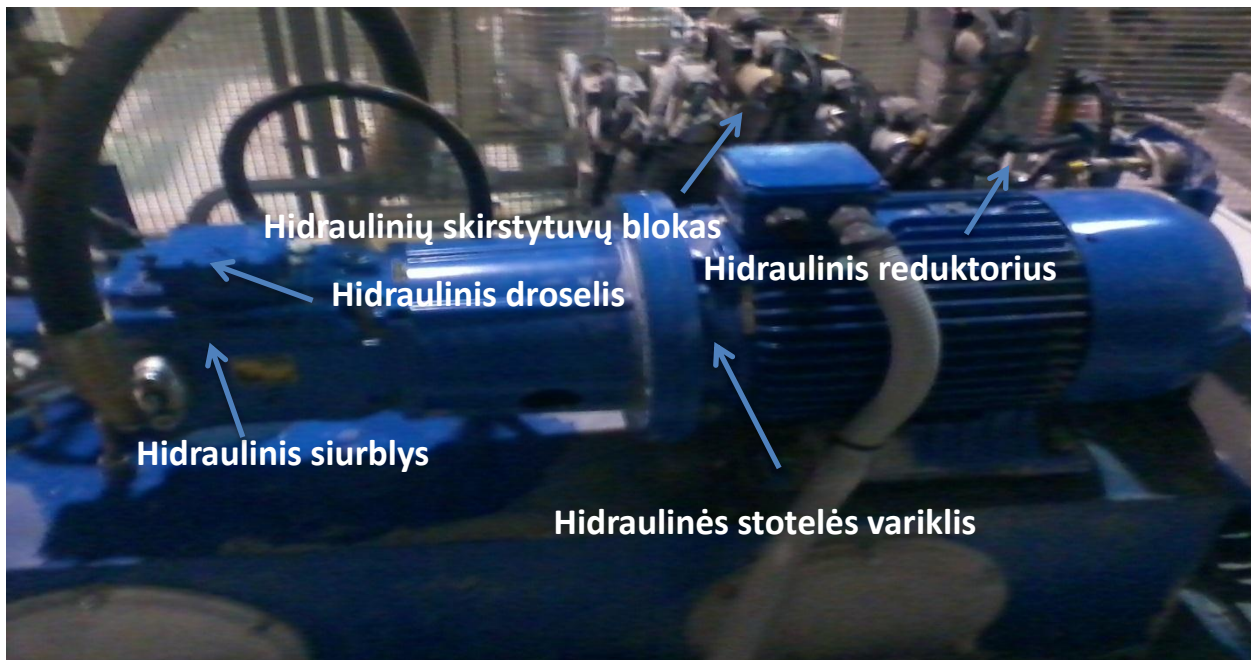
2 Variklio parametrai:

$$n = 1420 \text{ aps} / \text{min};$$

$$N = 22 \text{ kW}$$

Bendras vaizdas

Hidraulinė sistema:



33 pav. BELOIT hidraulinė stotelė

Hidraulinės sistemos parametrai

Variklio parametrai:

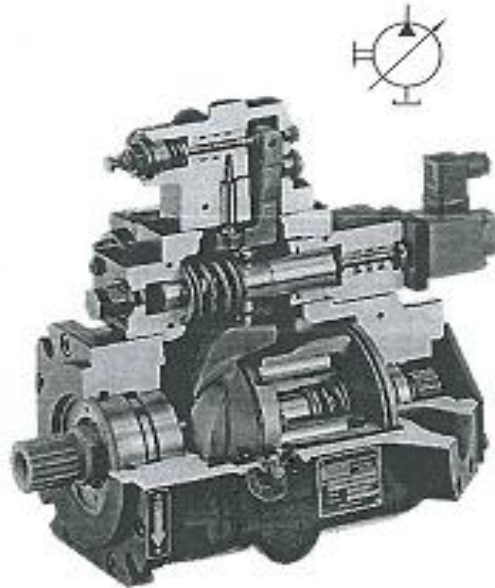
$$n = 1420 \frac{\text{aps}}{\text{min}};$$

$$N = 22 \text{ kW}$$

Hidraulinio siurblio parametrai :

Modelis: D7960

Tipas: plunžerinis siurblys



34 pav. BELOIT hidraulinis siurblys

Hidraulinio siurblio techniniai parametrai

$Q = 138 \text{ lpm}$;

$N = 22 \text{ kW}$;

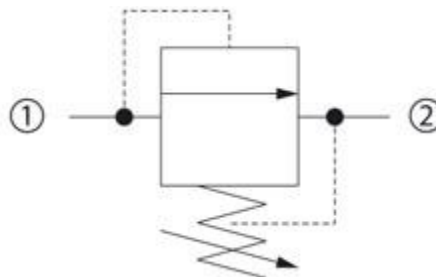
$n = 5$ – plunžerių skaičius.

Automatinio slėgio reguliatoriaus (hidraulinio reduktoriaus) parametrai

Modelis: T8a RBAP .25gpm (sun hydraulics)

Tipas: slėgio reguliatorius

Pagaminimo metai: 2001 m.



35 pav. BELOIT hidraulinis siurblio trieigis vožtuvas

Techniniai parametrai :

$p = 350 \text{ bar}$ – maksimalus slėgis

$p = 276 \text{ bar}$ – darbinis slėgis

$Q_{\max} = 120 \text{ inch}^3 / \text{min} = 0.001966448 \text{ m}^3 / \text{min}$ - maksimalus pralaidumas esant 100 % atidarytam vožtuvui.

Veikimo dažnis 140 Hz.

Hidraulinio droselio parametrai:

Modelis: NCEB (sun hydraulics).

Tipas: hidraulinis droselis.

Pagaminimo metai: 2000 m.



36 pav. BELOIT hidraulinės sistemos droselis

Techniniai parametrai

$p = 20 \text{ bar}$ – darbinis slėgis

$p_{\max} = 350 \text{ bar}$ – maksimalus slėgis

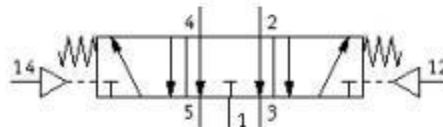
$Q_{\max} = 110 \text{ L} / \text{min}$ – maksimalus pralaidumas esant 100 % atidarytam vožtuvui esant 20 bar.

Hidraulinio skirstytuvo parametrai

Modelis: D3W (sun hydraulics)

Tipas: Hidraulinis skirstytuvas 5/3 tipo

Pagaminimo metai: 2000 m.



37 pav. BELOIT hidraulinis skirstytuvas

Techniniai parametrai

$p = 20 \text{ bar}$ – darbinis slėgis

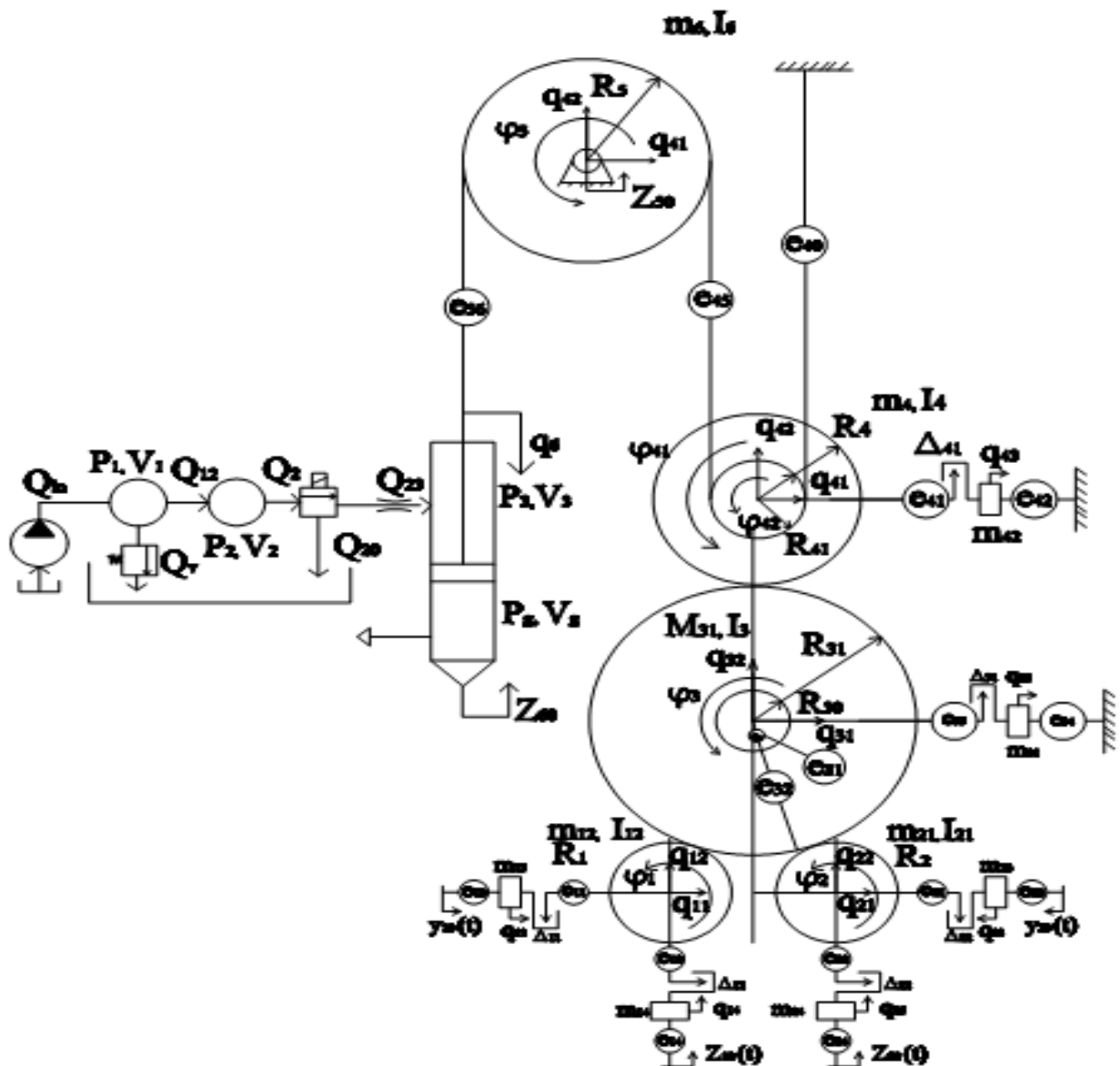
$p_{\max} = 350 \text{ bar}$ – maksimalus slėgis

$Q_{\max} = 150 \text{ L / min}$ – maksimalus pralaidumas esant 100 % atidarytam vožtuvui esant 20 bar.

3. BELOIT įrangos veikimo modelis

3.1 BELOIT mechaninės sistemos dinaminis modelis

Sukurtas BELOIT popieriaus vyniotuvo mechaninės ir hidrodinaminės sistemos dinaminis modelis: (Bogdevičius 2012)



16 pav. BELOIT popieriaus vyniotuvo popieriaus prispaudimo mechanizmas

3.2 Transportuojamo popieriaus fizinės, mechaninės savybės

$$\delta = 70\mu m; \pm 10\mu m \text{ popieriaus storis}$$

Popieriaus rulono parametrai:

$$R_3 = 1,83m;$$

$$L_3 = 2,75m;$$

Krepas (Įtempimas):

$$V_2 - V_1 = R_2 \dot{\phi}_2 - R_1 \dot{\phi}_1 = \frac{\Delta L}{L_0} = 15\% = E;$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon \Rightarrow \frac{F}{A\varepsilon} = \frac{6N}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3}} = 11,4 \cdot 10^6 N / m^2;$$

Rulono tech. parametrai:

$$R_{30} = 0,125m;$$

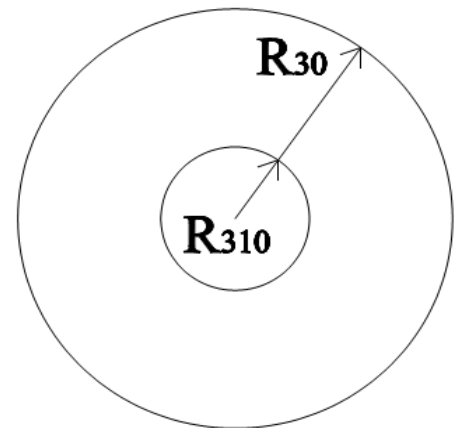
$$R_{310} = 0,14m;$$

$$I_{30} = \frac{\pi}{64} (D_{30}^4 - D_{30}^2) = 0,87 \cdot 10^{-5} m^4$$

$$K_{30} = \frac{48EI_{30}}{L_{30}^3} = \frac{4810 \cdot 10^9 \cdot 0,8678 \cdot 10^{-5}}{2,75^3} = 0,2003 \cdot 10^6 m;$$

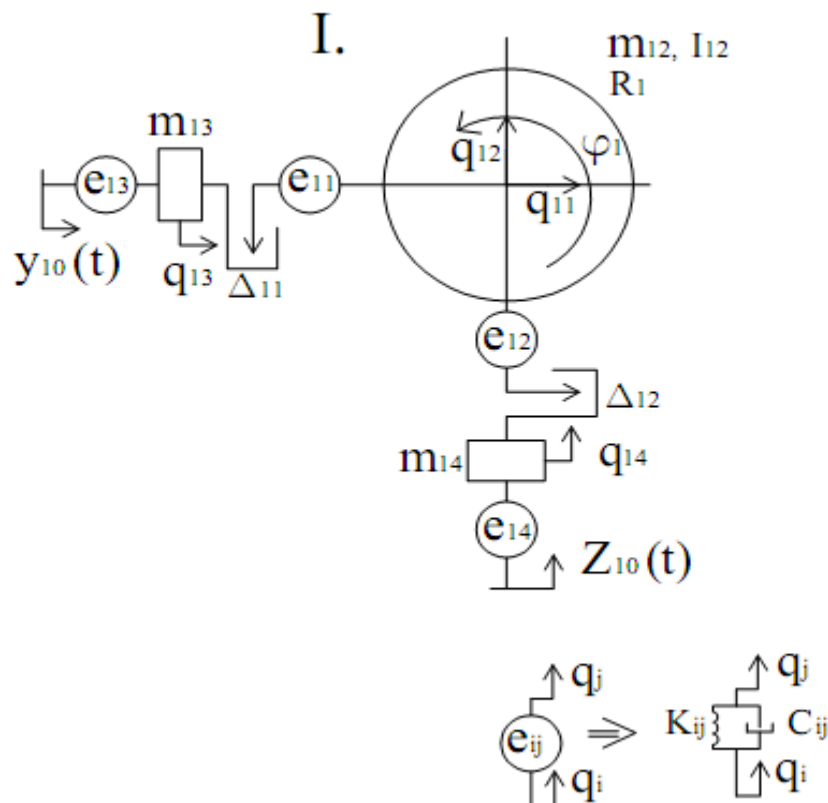
$$E_{popieriaus} = \frac{F}{0,01\varepsilon} = \frac{6}{0,01 \cdot 15} = 40 N / m^2;$$

$$K_{popieriaus} = \frac{EA}{\delta} = \frac{1,6 \cdot 10^4 \cdot 0,1^2}{70 \cdot 10^{-6}} = 0,02285 \cdot 10^8 N / m$$



3.3 Pirmojo popieriaus vyniotuvo būgno matematinis modelis

Nagrinėjama pirmojo vyniotuvo būgno schema. Iš bendros schemos (3 pav.) išskeliame pirmąjį būgną,



17 pav. BELOIT popieriaus vyniotuvo pirmojo būgno dinaminis modelis

Pagal (4 pav.), pirmojo būgno dinaminis modelis aprašomas lygčių sistema.

Popieriaus vyniotuvo būgno elektros variklio sukimo momento ir rotoriaus sukimosi lygtys:

$$\dot{M}_{v1} = C_{v1} \left(w_{v0} - \dot{\phi}_1 \right) - d_{v1} M_{v1}; \quad (1)$$

$$I_{11} \ddot{\phi}_1 = M_{v1} - M_{pas1}; \quad (2)$$

Čia: $\dot{M}_{v1}$ – pirmojo vyniojimo būgno variklio sukimosi momentas; w_{v0} – būgno kampinis greitis; I_{11} – Inercijos momentas; d_{v1} – vyniotuvo variklio veleno diametras.

Popieriaus vyniotuvo pirmojo būgno mechaninės sistemos lygčių sistema:

$$m_{11} \ddot{q}_{11} = \sum F_{1b11} + F_{1,2,11} + F_{t13} \cos \alpha_1 + m_{b11} R_{b1} \dot{\phi}_1^2 \cos(\alpha_{b1} + \varphi_1); \quad (3)$$

$$m_{11} \ddot{q}_{12} = \sum F_{1b12} + F_{1,2,12} + F_{t13} \sin \alpha_1 - m_{11} g + m_{b11} R_{b2} \dot{\phi}_1^2 \sin(\alpha_{b1} + \varphi_1); \quad (4)$$

$$m_{11} \ddot{q}_{13} = -f(\delta_{11}) + F_{1b13}; \quad (5)$$

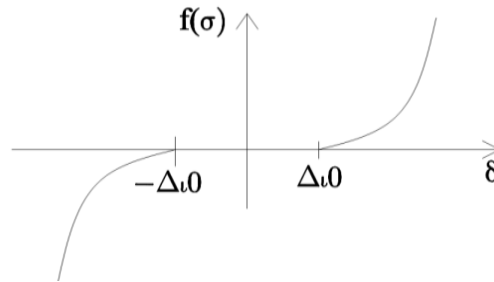
$$\delta_{11} = q_{13} - q_{15}; \quad (6)$$

$$m_{12} \ddot{q}_{14} = -f(\delta_{12}) + F_{1b14}; \quad (7)$$

$$m_{13} \ddot{q}_{15} = f(\delta_{11}) - K_{13}(q_{15} - y_{10}) - C_{13}(\dot{q}_{15} - \dot{y}_{10}) \quad (8)$$

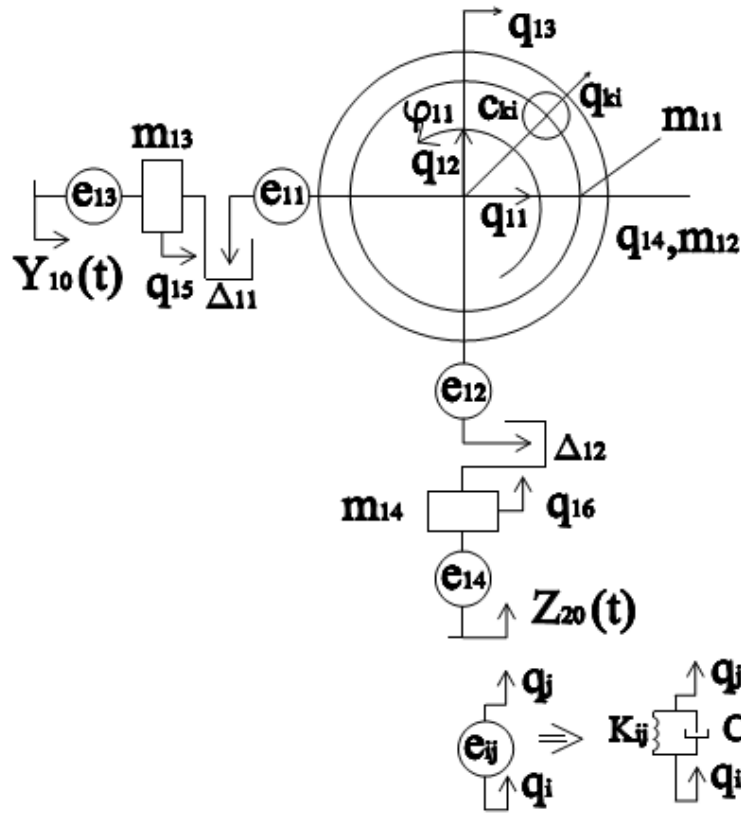
$$m_{14} \ddot{q}_{16} = f(\delta_{12}) - K_{14}(q_{16} - z_{10}) - C_{14}(\dot{q}_{16} - \dot{z}_{10}); \quad (9)$$

Čia: m_{11} – pirmojo vyniojimo būgno masė; m_{13}, m_{14} – vyniotuvo būgno guoliavietės masės; F_i – pašalinės būgną veikiančios jėgos; q_{11}, q_{12} – vyniotuvo būgno poslinkiai; q_{13}, q_{14} – vyniotuvo būgno guoliaviečių poslinkiai; q_{15}, q_{16} – būgno variklio sukelti poslinkiai; R_{b1} – pavaros pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys; R_{b2} – veidinės pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys.



18 pav. Vyniotuvo būgno guolio laisvumo tarpelio kitimas

Pirmojo popieriaus vyniotuvo būgno guolio matematinis modelis:



19 pav. Dinaminis pirmojo vyniotuvo būgno guolio modelis

Ritinėlio radialinio judėjimo lygtis:

$$m_{RKi} \ddot{q}_{Ki} = f(\sigma_{Ki}) - f_{out}(\sigma_{out, Ki}) - m_{RKi} g \sin(\varphi_{Ki}) + m_{RKi} - \Omega_{eK}^2 (R_{CK} + q_{Ki}); \quad (10)$$

Ritinėlio ašinio judėjimo lygtis:

$$m_{RDi} \ddot{q}_{Di} = f(\sigma_{in, Di}) - f_{out}(\sigma_{out, KD_i}) - m_{RDi} g \sin(\varphi_{Di}) + m_{RDi} - \Omega_{eD}^2 (R_{CD} + q_{Di}); \quad (11)$$

Popieriaus vyniotuvo pirmojo būgno guolio mechaninės sistemos lygčių sistema:

$$m_{11} \ddot{q}_{11} = F_{in, KX} + F_{in, DX} - \frac{1}{2} F_{13} \sin \alpha_1 + m_b R_{b1} \dot{\varphi}_1^2 \cdot \cos(\alpha_{b1} + \varphi_1) + F_{T13} \cos \alpha_1; \quad (12)$$

$$m_{11} \ddot{q}_{12} = F_{in, KX} + F_{in, DX} - \frac{1}{2} F_{13} \cos \alpha_1 + m_b R_{b1} \dot{\varphi}_1^2 \cdot \sin(\alpha_{b1} + \varphi_1) + \frac{1}{2} m_{11} g + F_{T13} \sin \alpha_1; \quad (13)$$

$$m_{12} \ddot{q}_{13} = F_{out, KX} + F_{out, DX} - f(\delta_{11});$$

$$m_{12}\ddot{q}_{14} = F_{out,KZ} + F_{out,DZ} - f(\delta_{12}) - m_{12}g; \quad (14)$$

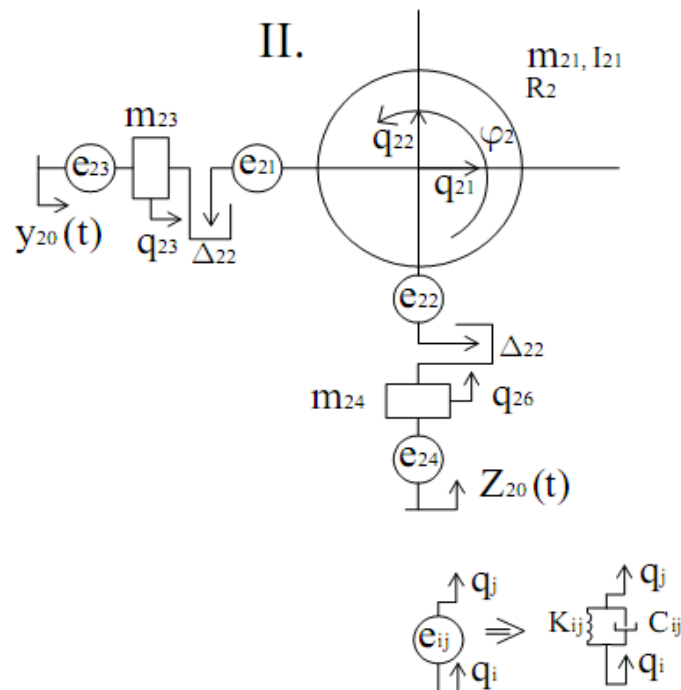
$$m_{13}\ddot{q}_{15} = f(\sigma_{11}) - K_{13}(q_{15} - y_{10}) - C_{13}(\dot{q}_{15} - \dot{y}_{10}); \quad (15)$$

$$m_{14}\ddot{q}_{16} = f(\delta_{12}) - m_{14}g - K_{14}(q_{16} - z_{10}) - C_{14}(\dot{q}_{16} - \dot{z}_{10}); \quad (16)$$

Čia: m_{11} – pirmojo vyniojimo būgno masė; m_{13}, m_{14} – vyniotuvo būgno guoliavietės masės; F_i – pašalinės būgną veikiančios jėgos; q_{11}, q_{12} – vyniotuvo būgno poslinkiai; q_{13}, q_{14} – vyniotuvo būgno guoliaviečių poslinkiai; q_{15}, q_{16} – būgno variklio sukeliama poslinkiai; R_{b1} – pavaros pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys; R_{b2} – veidinės pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys.

3.4 Antrojo popieriaus vyniotuvo būgno matematinis modelis

Nagrinėjama antrojo vyniotuvo būgno schema. Iš bendros schemos (3 pav.) iškeliamo pirmąjį būgną,



20 pav. BELOIT popieriaus vyniotuvo antrojo būgno dinaminis modelis

Pagal (4 pav.), antrojo būgno dinaminis modelis aprašomas lygčių sistema

Poperiaus vyniotuvo būgno elektros variklio sukimo momento ir rotoriaus sukimosi lygtys:

$$\dot{M}_{v2} = C_{v2} \left(w_{v20} - \dot{\varphi}_2 \right) - d_{v2} M_{v2}; \quad (17)$$

$$I_{21} \ddot{\varphi}_2 = M_{v2} - M_{pas2}; \quad (18)$$

Čia: $\dot{M}_{v2}$ – pirmojo vyniojimo būgno variklio sukimosi momentas; w_{v20} – būgno kampinis greitis; I_{21} – Inercijos momentas; d_{v2} - vyniotuvo variklio veleno diametras.

Popieriaus vyniotuvo pirmojo būgno mechaninės sistemos lygčių sistema:

$$m_{21} \ddot{q}_{21} = \sum F_{2b21} + F_{2,3,22} - F_{t23} \cos \alpha_2 + m_{b2} R_{b2} \dot{\varphi}_2^2 \cos(\alpha_{b2} + \varphi_2); \quad (19)$$

$$m_{21} \ddot{q}_{22} = \sum F_{2b22} + F_{2,3,22} + F_{t23} \sin \alpha_2 - m_{21} g + m_{b2} R_{b2} \dot{\varphi}_2^2 \sin(\alpha_{b2} + \varphi_2); \quad (20)$$

$$m_{22} \ddot{q}_{23} = -f(\delta_{21}) + \sum F_{2b23}; \quad (21)$$

$$\delta_{21} = q_{23} - q_{25}; \quad (22)$$

$$m_{22} \ddot{q}_{24} = -f(\delta_{22}) + F_{1b14} - m_{22} g; \quad (23)$$

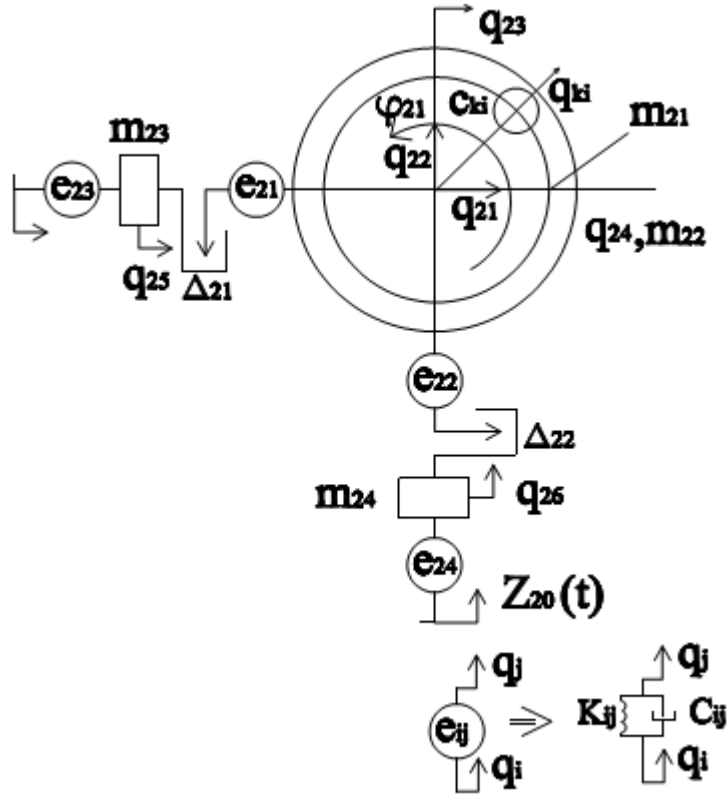
$$m_{23} \ddot{q}_{25} = f(\delta_{21}) - K_{23}(q_{25} - y_{20}) - C_{23}(\dot{q}_{25} - \dot{y}_{20}); \quad (24)$$

$$m_{14} \ddot{q}_{16} = f(\delta_{12}) - K_{14}(q_{16} - z_{10}) - C_{14}(\dot{q}_{16} - \dot{z}_{10}); \quad (25)$$

$$m_{24} \ddot{q}_{26} = f(\delta_{22}) - K_{24}(q_{26} - z_{20}) - C_{24}(\dot{q}_{26} - \dot{z}_{20}); \quad (26)$$

Čia: m_{21} – antrojo vyniojimo būgno masė; m_{23}, m_{24} – vyniotuvo būgno guoliavietės masės; F_i – pašalinės būgną veikiančios jėgos; q_{21}, q_{22} – vyniotuvo būgno poslinkiai; q_{23}, q_{24} – vyniotuvo būgno guoliaviečių poslinkiai; q_{25}, q_{26} – būgno variklio sukeliama poslinkiai; R_{b1} – pavaros pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys; R_{b2} – veidinės pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys.

Antrojo popieriaus vyniotuvo būgno guolio matematinis modelis:



21 pav. Dinaminis antrojo vyniotuvo guolio modelis

Aprašomas vyniotuvo guolis matematinėmis lygtimis:

Ritinėlio radialinio judėjimo lygtis:

$$m_{RKi} \ddot{q}_{Ki} = f(\sigma_{Ki}) - f_{out}(\sigma_{out, Ki}) - m_{RKi} g \sin(\varphi_{Ki}) + m_{RKi} - \Omega_{eK}^2 (R_{CK} + q_{Ki}); \quad (27)$$

Ritinėlio ašinio judėjimo lygtis:

$$m_{RD_i} \ddot{q}_{Di} = f(\sigma_{in, Di}) - f_{out}(\sigma_{out, KD_i}) - m_{RD_i} g \sin(\varphi_{Di}) + m_{RD_i} - \Omega_{eD}^2 (R_{CD} + q_{Di}); \quad (28)$$

Popieriaus vyniotuvo pirmojo būgno guolio mechaninės sistemos lygčių sistema:

$$m_{21} \ddot{q}_{21} = F_{in, KX} + F_{in, DX} - \frac{1}{2} F_{23} \sin \alpha_2 + m_{b2} R_{b2} \dot{\varphi}_2^2 \cdot \cos(\alpha_{b2} + \varphi_2) + F_{T23} \cos \alpha_2; \quad (29)$$

$$m_{21} \ddot{q}_{22} = F_{in, KZ} + F_{in, DZ} - \frac{1}{2} F_{23} \cos \alpha_2 + m_{b2} R_{b2} \dot{\varphi}_2^2 \cdot \sin(\alpha_{b2} + \varphi_2) + F_{T23} \sin \alpha_2; \quad (30)$$

$$m_{22}\ddot{q}_{23} = F_{out,KX} + F_{out,DX} - f(\delta_{21}); \quad (31)$$

$$m_{22}\ddot{q}_{24} = F_{out,KZ} + F_{out,DZ} - f(\delta_{22}) - m_{21}g; \quad (32)$$

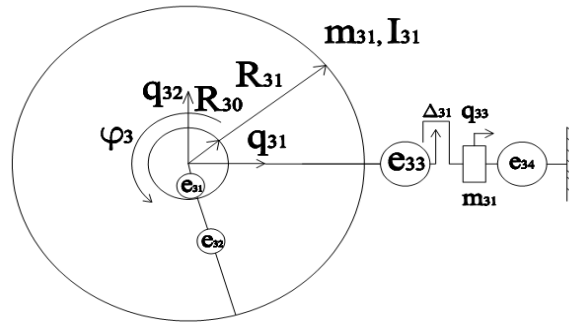
$$m_{23}\ddot{q}_{25} = f(\sigma_{21}) - K_{23}(q_{25} - y_{20}) - C_{23}(\dot{q}_{25} - \dot{y}_{20}); \quad (33)$$

$$m_{24}\ddot{q}_{26} = f(\delta_{22}) - m_{24}g - K_{24}(q_{26} - z_{20}) - C_{24}(\dot{q}_{26} - \dot{z}_{20}); \quad (34)$$

Čia: m_{21} – antrojo vyniojimo būgno masė; m_{23}, m_{24} – vyniotuvo būgno guoliavietės masės; F_i – pašalinės būgną veikiančios jėgos; q_{21}, q_{22} – vyniotuvo būgno poslinkiai; q_{23}, q_{24} – vyniotuvo būgno guoliaviečių poslinkiai; q_{25}, q_{26} – būgno variklio sukeltami poslinkiai; R_{b1} – pavaros pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys; R_{b2} – veidinės pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys.

3.5 Vyniojamo popieriaus rulono matematinis modelis

Nagrinėjama popieriaus rulono schema. Iš bendros schemos (3 pav.) iškeliamo pirmąjį būgną,



22 pav. BELOIT popieriaus rulono dinaminis modelis

Popieriaus vyniotuvo popieriaus rulono mechaninės sistemos lygčių sistema:

$$m_{31}\ddot{q}_{31} = -F_{13,11} - F_{T13} \cos \alpha_1 - F_{23,21} - F_{T23} \cos \alpha_2 - f(\sigma_{31}) - F_{T34} - \dot{m}_{31}\dot{q}_{31} + F_{34,34}; \quad (35)$$

$$m_{31}\ddot{q}_{32} = -F_{2,3,12} - F_{T13} \sin \alpha_1 - F_{2,3,22} - F_{T23} \cos \alpha_2 - m_{31}g - m_{31}(t)\dot{q}_{32}; \quad (36)$$

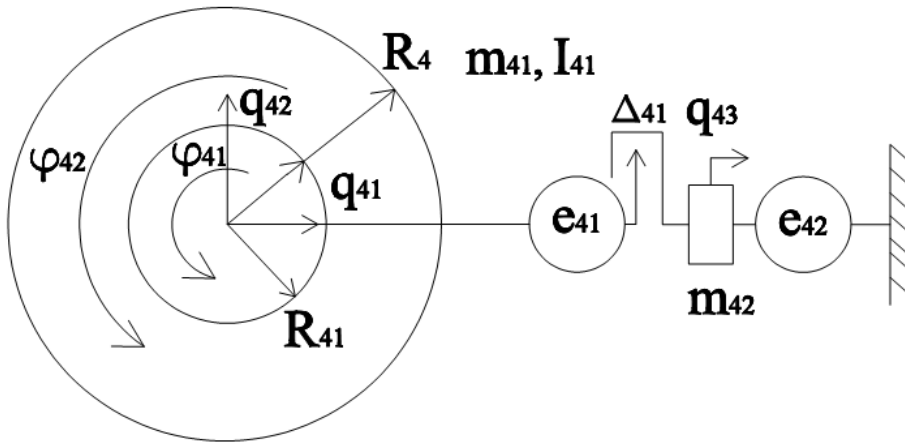
$$I_{31}\ddot{\alpha}_3 = -F_{T13} \cdot R_{31} - F_{T23} \cdot R_{31} + F_{T34} \cdot R_{31} - M_{pas}; \quad (37)$$

$$m_{32}\ddot{q}_{33} = f(\sigma_{31}) - K_{34}(q_{33} - y_{30}) - C_{34}(q_{34} - y_{30}); \quad (38)$$

Čia: m_{21} – antrojo vyniojimo būgno masė; m_{23}, m_{24} – vyniotuvo būgno guoliavietės masės; F_i – pašalinės būgną veikiančios jėgos; q_{21}, q_{22} – vyniotuvo būgno poslinkiai; q_{23}, q_{24} – vyniotuvo būgno guoliaviečių poslinkiai; q_{25}, q_{26} – būgno variklio sukelti poslinkiai; R_{b1} – pavaros pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys; R_{b2} – veidinės pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys.

3.6 Prispaudimo veleno matematinis modelis

Nagrinėjama prispaudimo veleno schema. Iš bendros schemos (3 pav.) iškeliamo pirmąjį būgną,



23 pav.. BELOIT prispaudimo veleno dinaminis modelis

$$m_{41}\ddot{q}_{41} = F_{T34} - f(\sigma_{41}); \quad (38)$$

$$m_{41}\ddot{q}_{42} = -F_{34,34} - F_{45,42} - F_{40,42} m_{41}g; \quad (39)$$

$$I_{41}\ddot{\phi}_{41} = F_{T34} \cdot R_{31} - M_{pas}; \quad (40)$$

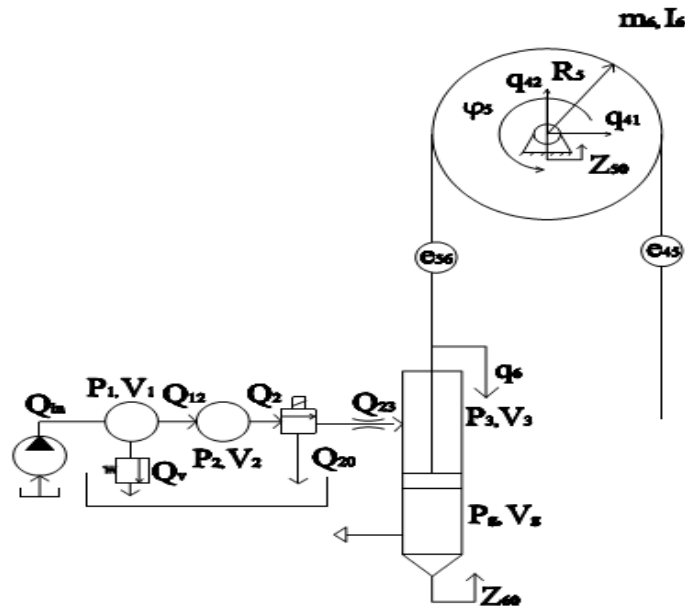
$$m_{42}\ddot{q}_{43} = f(\sigma_{41}) - K_{42}(q_{43} - y_{40}) - C_{42}(\dot{q}_{43} - \dot{y}_{40}); \quad (41)$$

$$I_{41} \ddot{\varphi}_{42} = -K_{45}[(z_{50} + R_5 \varphi_5) - (q_{42} - R_{41} \cdot \varphi_{42})] - C_{42}(\dot{q}_{43} - \dot{y}_{10} - K_{40}(q_{42} + R_{41} \varphi_{42})R_{41} - C_{40}(\ddot{q}_{42} + R_4 \dot{\varphi}_{42})R_{41}; \quad (42)$$

m_{21} – antrojo vyniojimo būgno masė; m_{23}, m_{24} – vyniotuvo būgno guoliavietės masės; F_i – pašalinės būgną veikiančios jėgos; q_{21}, q_{22} – vyniotuvo būgno poslinkiai; q_{23}, q_{24} – vyniotuvo būgno guoliaviečių poslinkiai; q_{25}, q_{26} – būgno variklio sukeliama poslinkiai; R_{b1} – pavaros pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys; R_{b2} – veidinės pusės būgno guolio vidinio žiedo spindulys

3.7 Prispaudimo mechanizmo matematinis modelis

Nagrinėjama prispaudimo mechanizmo matematinis modelis. Iš bendros schemos (3 pav.) išskeliame patį prispaudimo mechanizmą, su hidrauline sistema.



24 pav. BELOIT prispaudimo mechanizmo dinaminis modelis

Mechanininės sistemos lygčių sistema:

$$I_5 \ddot{\varphi}_5 = -K_{45}R_5[Z_{50} + R_5\varphi_5 - (q_{42} - R_{41}\varphi_{42})] - C_{45}R_5[\dot{Z}_{50} + R_5\dot{\varphi}_5 - (\dot{q}_{42} - R_{41}\dot{\varphi}_{42})] - K_{56} \cdot [q_6 - (R_5\varphi_5 - \dot{Z}_{50})](-R_5) - C_{56}[\dot{q}_6 - (R_5\dot{\varphi}_5 - \dot{Z}_{50})] - M_{pask}; \quad (43)$$

$$m_6 \ddot{q}_9 = -K_{56}[q_9 - (R_5\varphi_5 - Z_{50})] - C_{56}[\dot{q}_6 - (R_5\dot{\varphi}_5 - \dot{Z}_{50})] - F_{T6} \text{sign}(\dot{q}_9 + \dot{Z}_{60}) + p_3 A_{31} \cdot A_{32} pg + m_6 g;$$

(44)

I_5 - žvaigždutės inercijos momentas; R_5 - žvaigždutės spindulys; R_{41} - žvaigždutės dalijamasis spindulys; q_{42}, q_{42} - žvaigždutės poslinkiai; q_6 - hidraulinio cilindro stumoklio poslinkis; q_9 - hidraulinio cilindro poslinkis; F_{T6} - cilindro riebokšlių trinties jėga; p_3 - prispaudimo slėgis; A_{31} - hidraulinio cilindro stumoklio plotas; A_{32} - hidraulinio cilindro plotas (išmetimo dalies); $\dot{Z}_{60}$ - Cilindro žadinimo greitis (pašalinių jėgų); m_6 - cilindro masė; C_n - slopinimo koeficientas; K_n - standumo koeficientas.

Slėgio kitimas hidrodinaminėje sistemoje aprašomas lygtimis (Bogdevičius 2012):

$$\dot{p}_1 = \frac{K}{V_1} [Q_{in} - Q_v(p_v) - Q_{12}]; \quad (45)$$

$$Q_v(p_v) = A_v \mu_v \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_1 - p_{v1}|}; \quad (46)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{K}{V_2} [Q_{12} - Q_{23} - Q_{20}(p_2)]; \quad (47)$$

$$Q_{12} = (A_{12} \mu_{12}) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_1 - p_{v1}|} \text{sign}(p_1 - p_2); \quad (48)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{K}{V_3 + A_{31} q_6} [Q_{23} - A_{31} \dot{q}_6]; \quad (49)$$

$$Q_{23} = (A_{23} \mu_3) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_2 - p_3|} \text{sign}(p_2 - p_3); \quad (50)$$

$$\dot{p}_g = \frac{\gamma RT}{V_{g0} + A_{31} q_6} [-G_{out} \text{sign}(p_g - p_\infty) - \frac{\gamma p_g \cdot (-A_{31} \dot{q}_6)}{V_{g0} - A_{31} q_6}]; \quad (51)$$

p_1 - hidraulinės stotelės sukiamas slėgis, prieš trieigį vožtuvą; p_v - išmetamas slėgis iš trieigio vožtuvo; p_2 - magistralinis slėgis prieš slėgio reguliatorių; p_3 - popieriaus prispaudimo slėgis; Q_{in} - hidraulinio siurblio paduodamas debitas; Q_v - trieigio vožtuvo numetamas debitas į baką; Q_{12} - debitas į slėgio reguliatorių; Q_{23} - debitas į hidraulinį cilindrą; V_1 - tūris iki trieigio vožtuvo; V_2 - tūris iki slėgio regulatoriaus; V_3 - hidraulinio cilindro darbinės kameros; A_v - trieigio vožtuvo pratekėjimo slėgio numetimo akučių plotis; A_{12} - slėgio regulatoriaus akučių plotis; A_{23} - droselio pratekėjimo angos plotis; A_{31} - hidraulinio cilindro stūmoklio plotas.

4. BELOIT įrangos dinaminių ir hidrodinaminių procesų eksperimentavimas

4.1 Eksperimente naudojama įranga

Eksperimentiniame tyrime matuojamos vibracijos vyniotuvo būgno guoliavietėse bei hidrauliniame siurblyje. Tyrime buvo naudojamas mikrologas.

SKF Microlog Analyzer GX series CMXA 75

Parametrai:

1. Matavimo ribos nuo 1 iki 99,999 [aps/min]

2. Spektrų filtrai:

1. 5 Hz – 100 Hz
2. 50 Hz – 1,000 Hz
3. 500 Hz – 10 kHz
4. 5 kHz – 40 kHz

3. Matavimo paklaida - 5%



38 pav. SKF Microlog Analyzer GX series CMXA 75

Eksperimentiniam tyrime matuojamos slėgio pulsacijos hidraulinėje sistemoje. Tyrime buvo naudojamas **Danfoss MBS 4050 slėgio jutiklis**.

Danfoss MBS 4050

Parametrai:

1. Matuojamos medžiagos: oras, dujos, skystis.
2. Maksimalus matuojamas slėgis: 400 bar
3. Išėjimo signalas: 4 to 20 mA



75 pav. Danfoss MBS 4050 slėgio daviklis

4.2 Įrangos diaminių procesų (vibracijų) eksperimentinis tyrimas naudojantis SKF mikrologu

Eksperimento tikslas: nustatyti hidraulinės stotelės slėgio pulsacijos įtaką vyniojimo būgnams (guoliams).

Tyrimo metu: buvo atliktas hidraulinės sistemos slėgio matavimas hidraulinių cilindrų darbinėje kameroje.

Slėgio jutiklio pagalba, buvo gauti slėgių pokyčiai (pulsacijos) prispaudimo mechanizmo hidrauliniuose cilindruose.

Eksperimento tikslas: nustatyti hidraulinės stotelės slėgio pulsacijos įtaką vyniojimo

būgnams (guoliams), bei pagal gautus vibracijų spektrus, palyginti su hidraulinės stotelės vibracijomis.

Tyrimo metu: buvo atliktas vyniotuvo būgno vibracijų matavimas, bei hidraulinės sistemos siurblio vibracijų analizės.

Mikrologu buvo gauti vyniotuvo būgno guoliavietės horizontalūs ir vertikalūs greičių spektrai: $\dot{q}_{11}$ – horizontalus greitis $\dot{q}_{12}$ – vertikalus greitis, $\dot{q}_{21}$ $\dot{q}_{11}$ – horizontalus greitis $\dot{q}_{22}$ $\dot{q}_{12}$ – vertikalus greitis, (pagal dinaminį modelį 10 pav.). Taip pat vibracijų matavimo metu gauti ir hidraulio siurblio vibracijų spektrai.

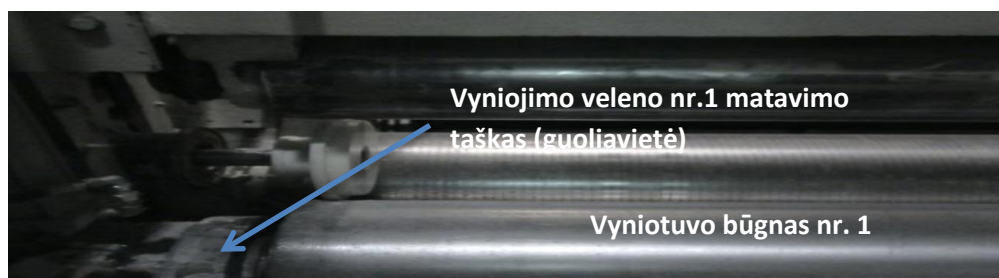
Eksperimento eiga:

Eksperimentas su popieriaus vyniojimo būgnais atliekamas, kai vykdomas popieriaus vyniojimo procesas, priklausomai nuo suvynioto popieriaus storio (mm), kartu vykdomas ir slėgio matavimas hidrauliniame ciline manometru (RMM 50), kuris yra įmontuotas pačioje sistemoje.

Eksperimento schema:

Tyrime SKF mikrologo daviklis yra pridedamas prie vyniotuvo būgno guoliavietės horizontalia ir vertikalio guoliavietės kryptimi (14 pav.)

Vyniotuvo būgno nr. 1 eksperimento schema



39 pav. Eksperimento schema

Vyniotuvo būgno nr. 2 eksperimento schema



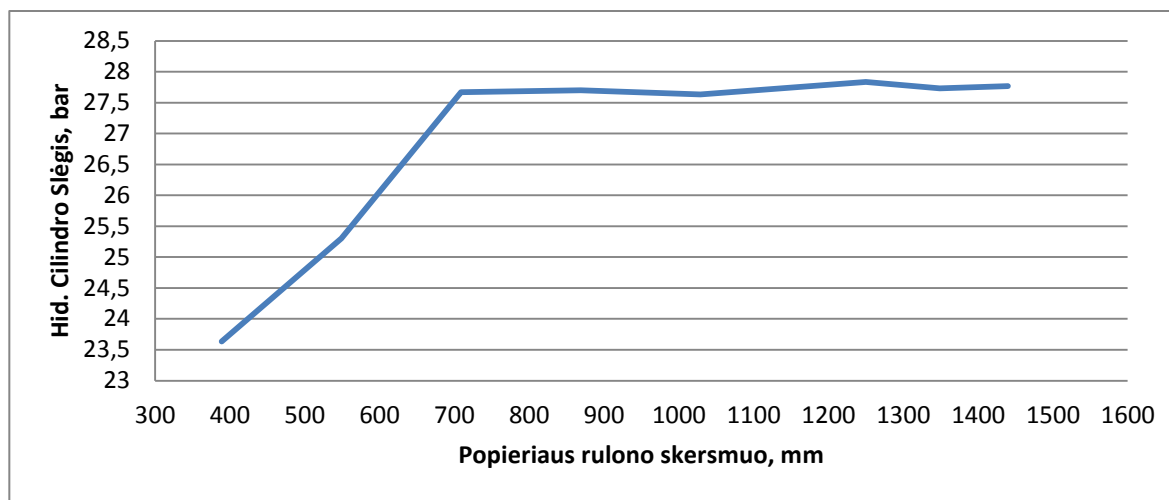
40 pav. Eksperimento schema

Vibracijų matavimas atliekamas 8 kartus, pagal 1 lentelėje pateiktus rulono skersmenius, tyrime matuojamas ir slėgis hidrauliniame cilindre priklausomai, nuo rulono skersmens. Slėgis matuojamas, naudojantis manometru (RMM 50).

1 lentelė. Eksperimento eigos lentelė

Pirmas vyniojimo būgnas		
Vibracijų matavimo nr.	Popieriaus rulono diametras (mm)	Hidraulinio cilindro slėgis (bar)
1	389	23.63
2	549	25.3
3	709	27.67
4	869	27.7
5	1029	27.63
6	1250	27.83
7	1349	27.73
8	1440	27.77

Hidraulinio cilindro darbo kameros slėgis priklausomai, nuo rulono skersmens.

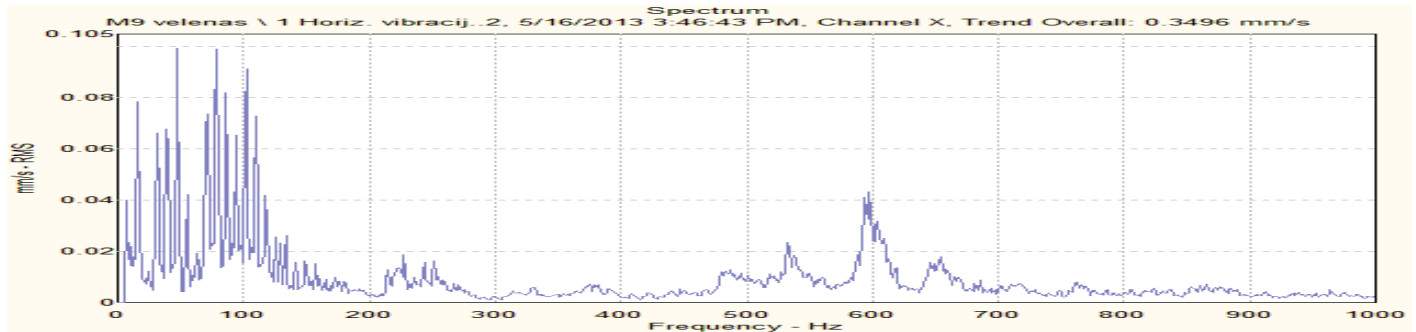


41 pav. Hidraulinio cilindro slėgio nuo rulono skersmens priklausomybė

4.2.1 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai:

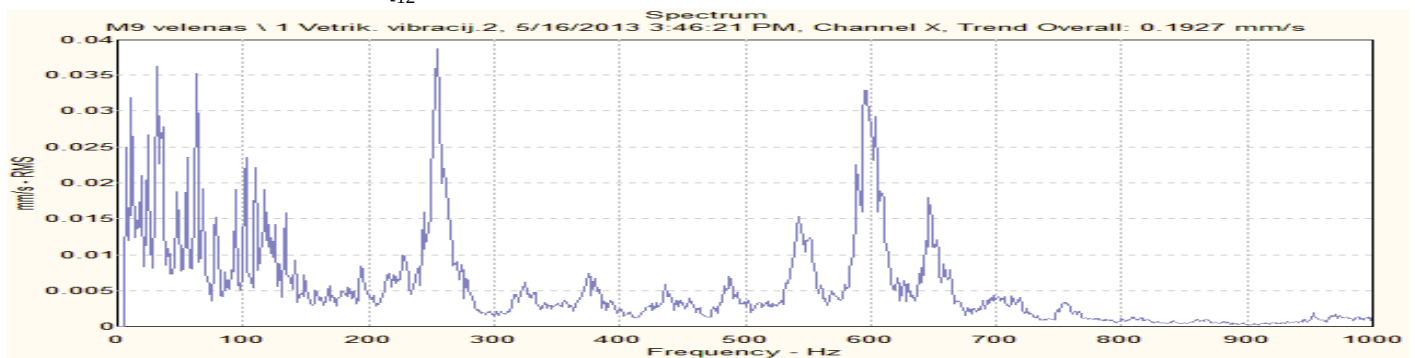
4.2.1.1 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant skersmeniui - 289 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$ (pagal dinaminį modelį 10 pav.)



42 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras

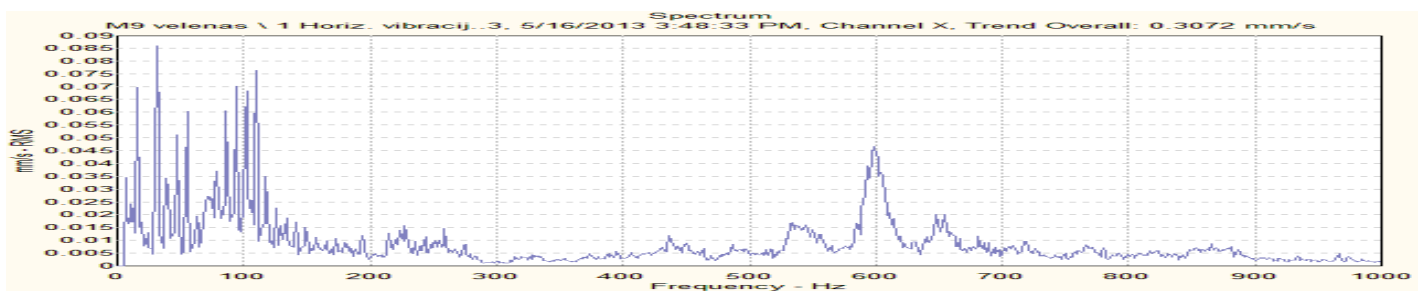
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$ (pagal dinaminį modelį 10 pav.)



43 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

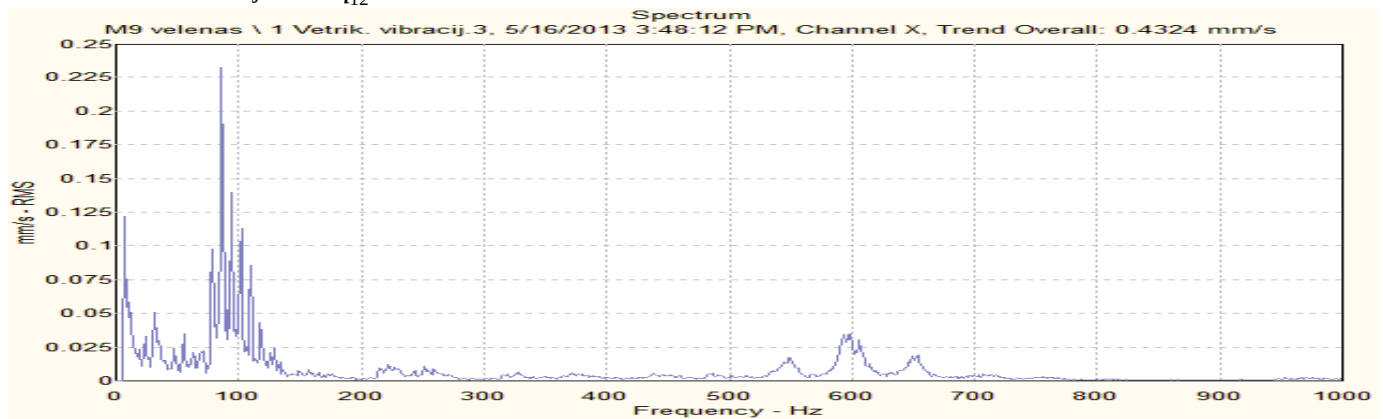
4.2.1.2 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 549 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



44 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras

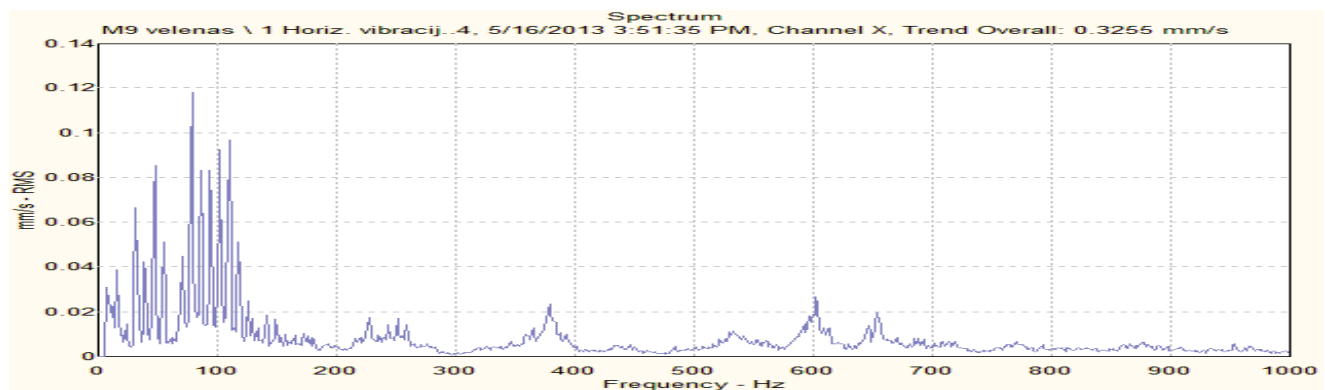
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



45 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

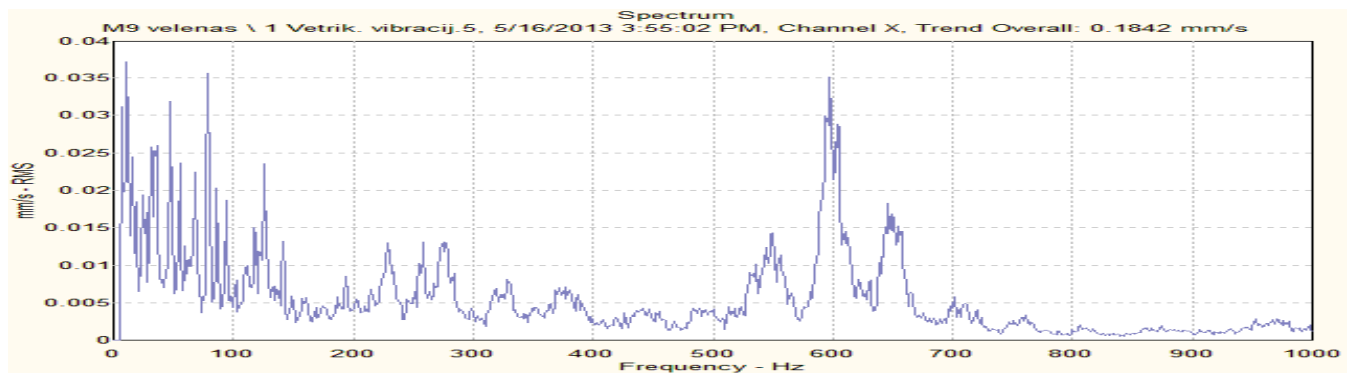
4.2.1.3 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 709 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



46 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras

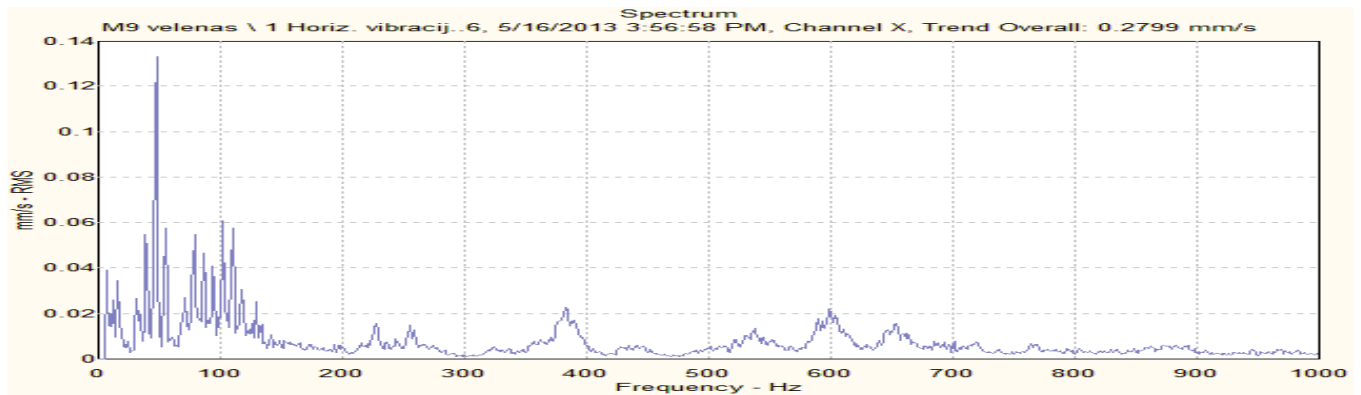
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



47 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

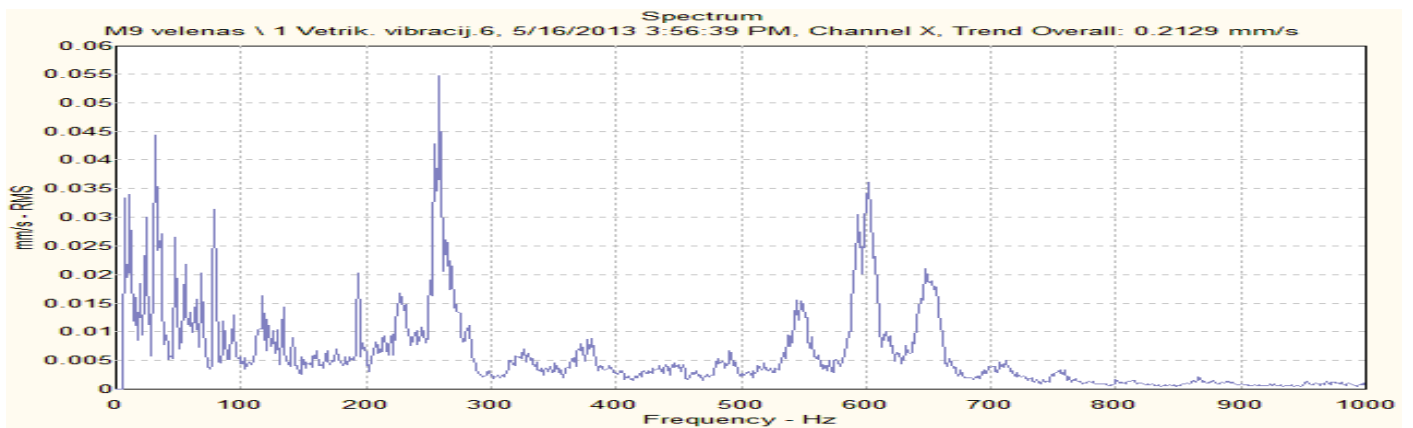
4.2.1.4 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 1189 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



48 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras

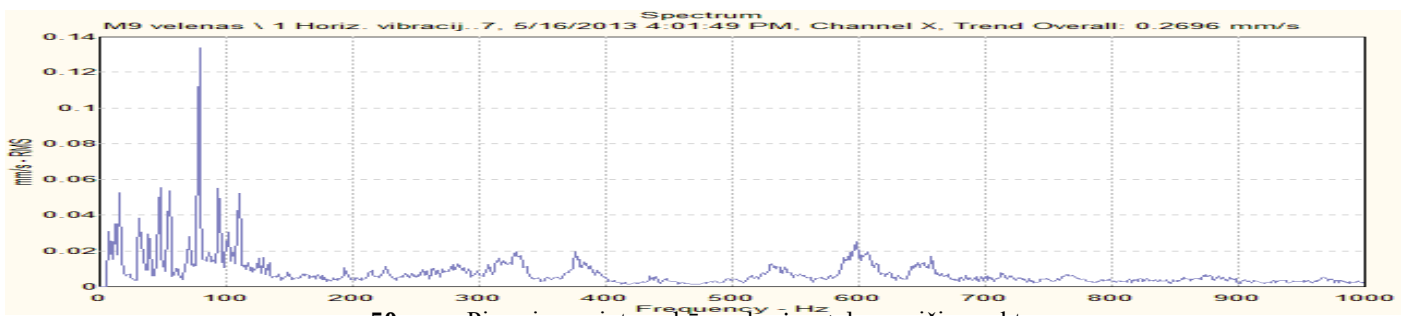
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



49 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

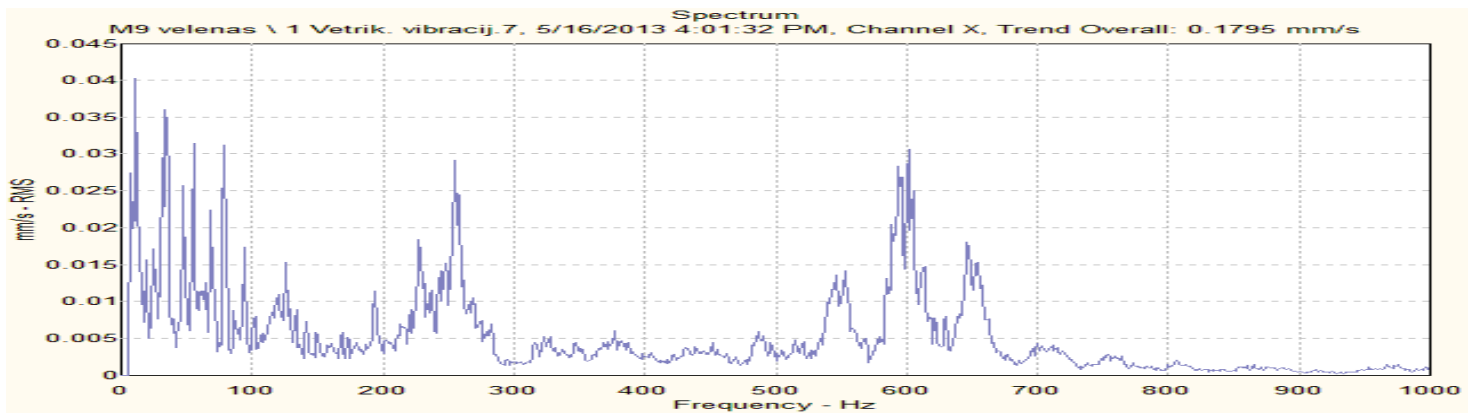
4.2.1.5 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 1250 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



50 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras

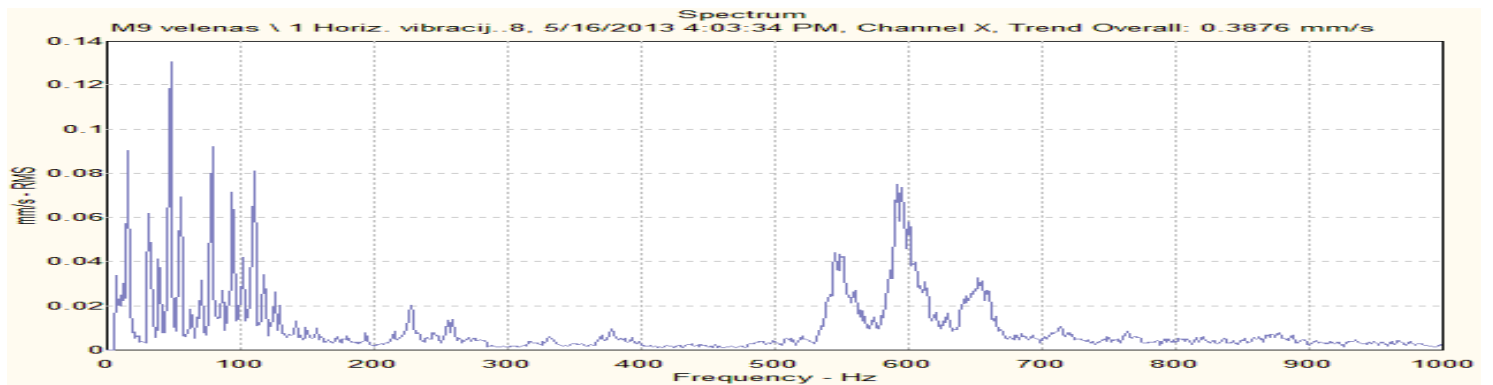
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



51 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

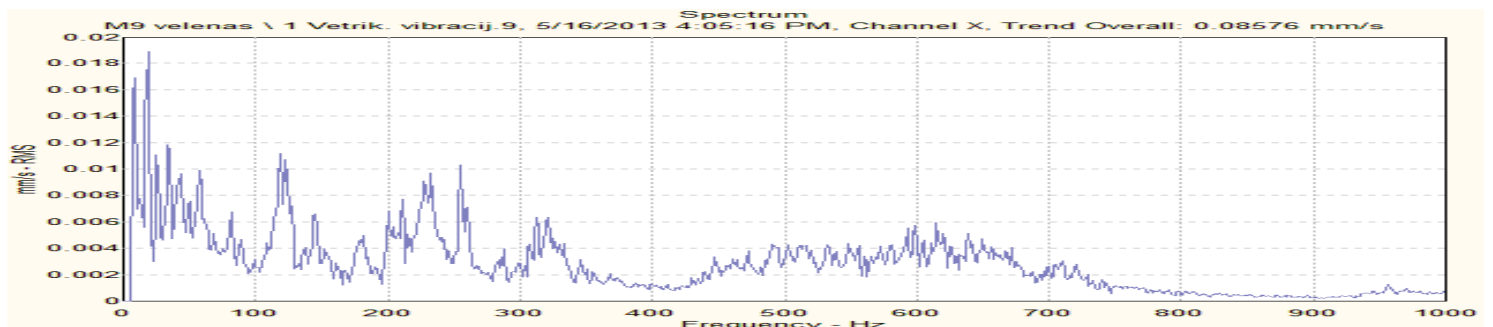
4.2.1.6 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 1349 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



52 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras

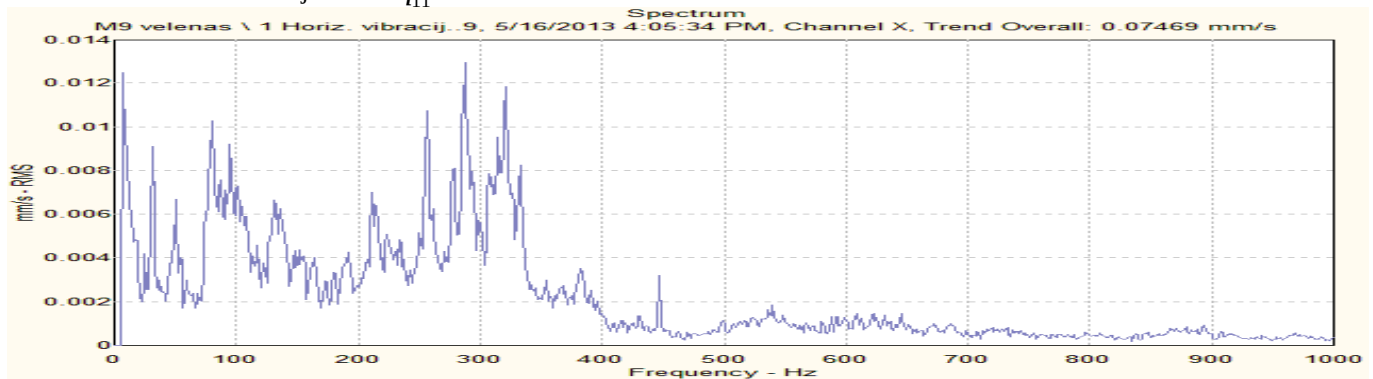
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



53 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

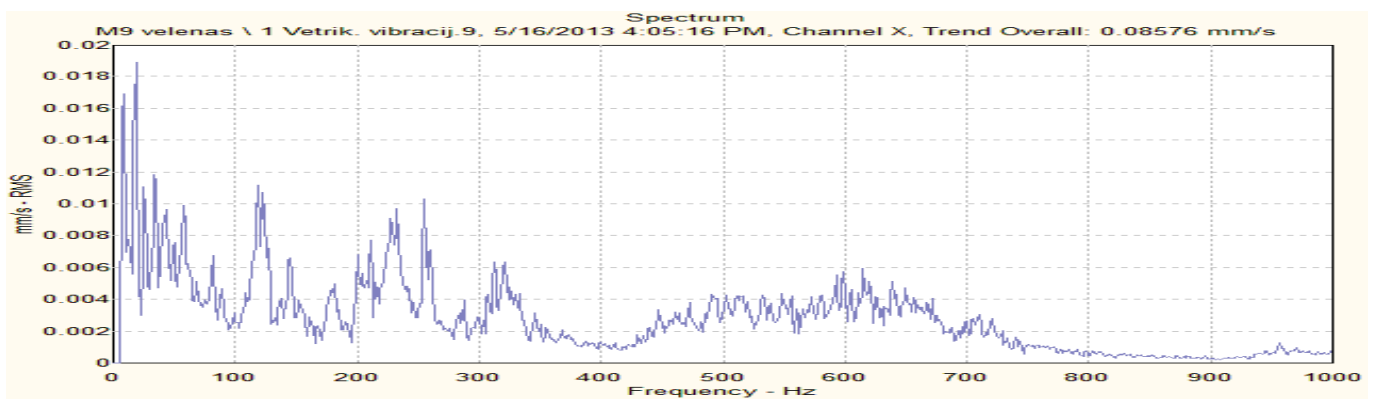
4.2.1.7 Pirmojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrai - 1440 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



54 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras

Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$

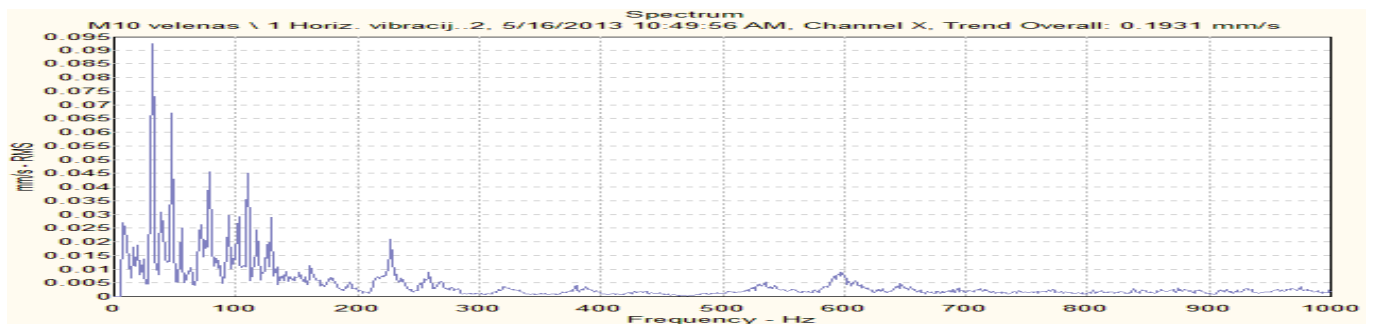


54 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

4.2.2 Antrojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai:

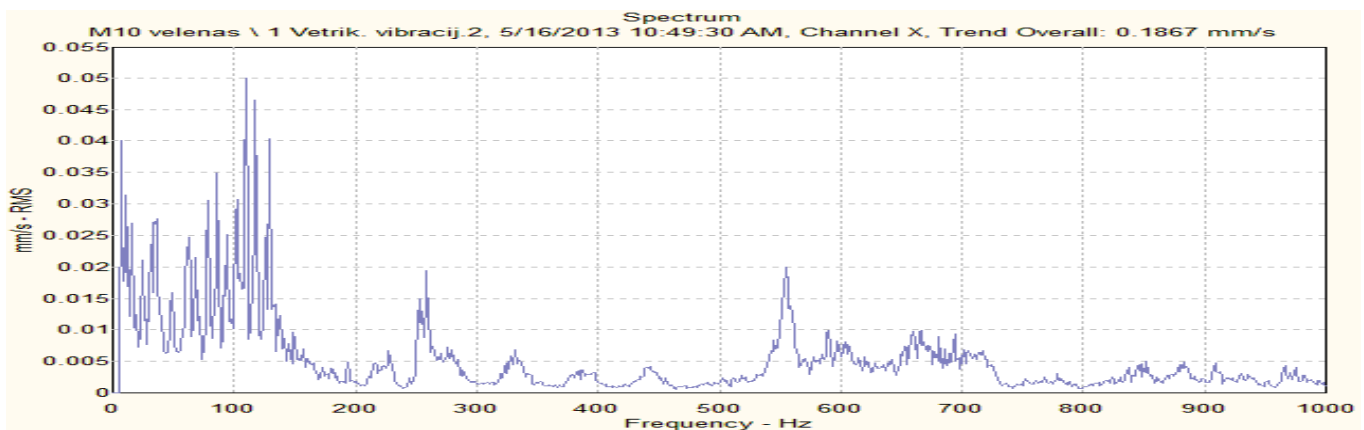
4.2.2.1 Antrojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrai - 289 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



56 pav. Pirmojo vyniotuvo būgno horizontalus greičių spektras

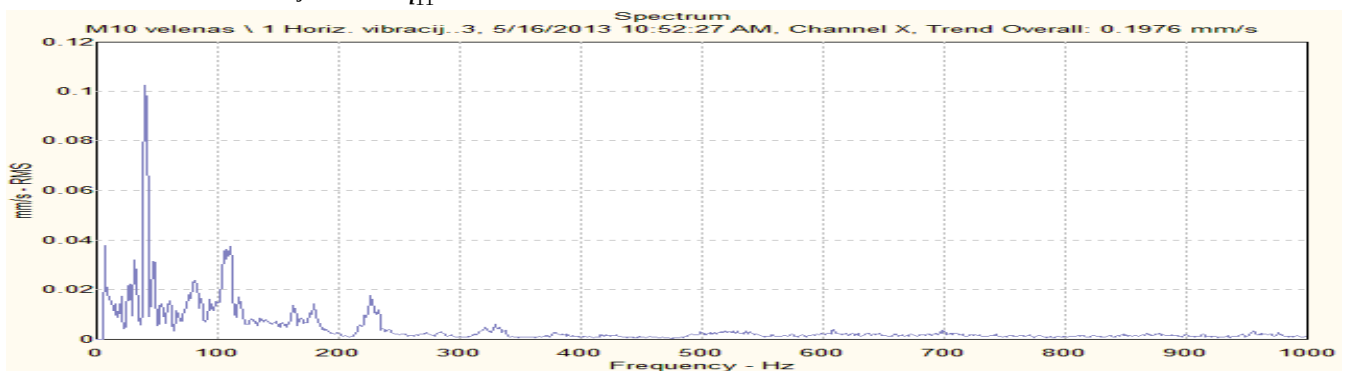
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



57 pav. Pirmojo vinytuvo vertikalus greičių spektras

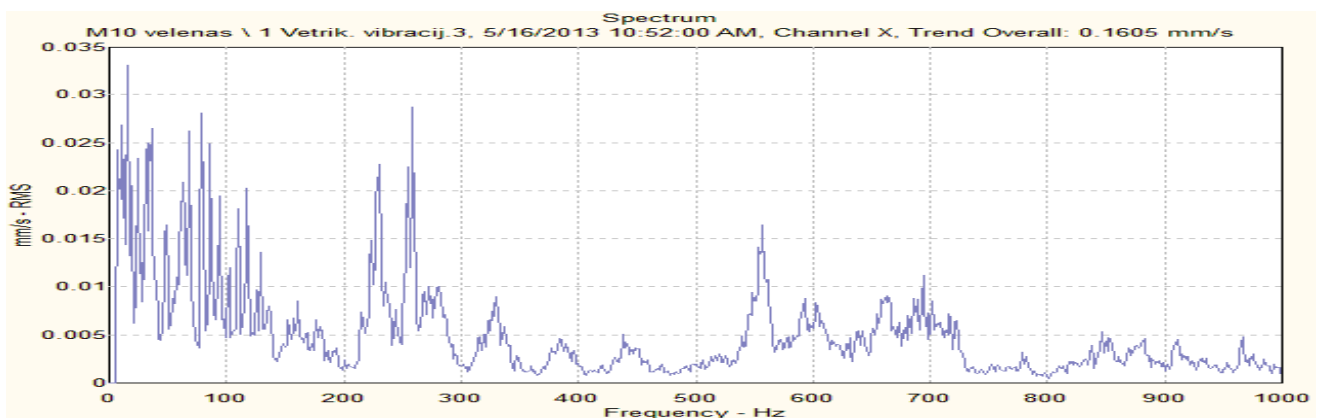
4.2.2.2 Antrojo vinytuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 549 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



58 pav. Pirmojo vinytuvo horizontalus greičių spektras

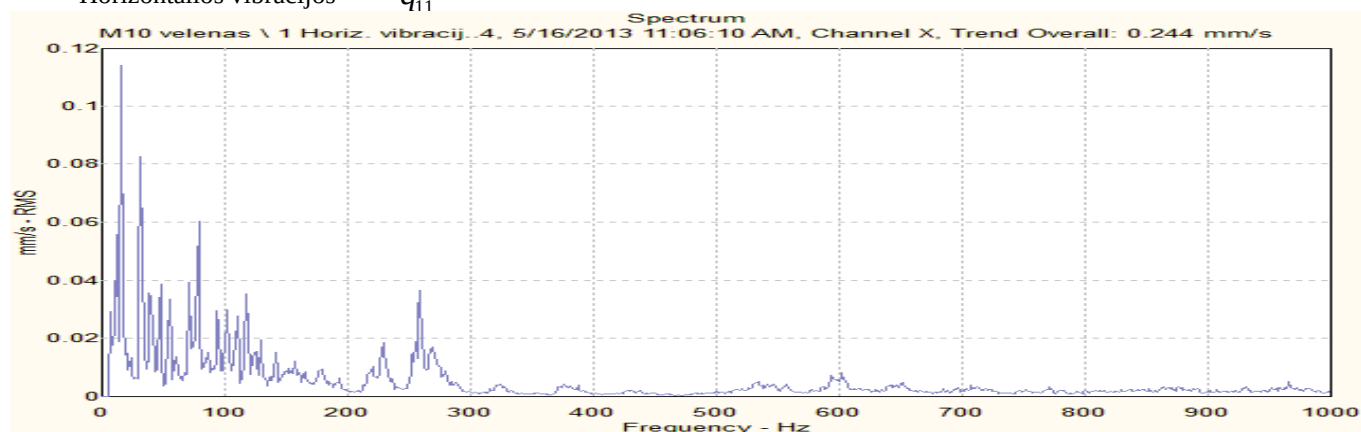
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



58 pav. Pirmojo vinytuvo vertikalus greičių spektras

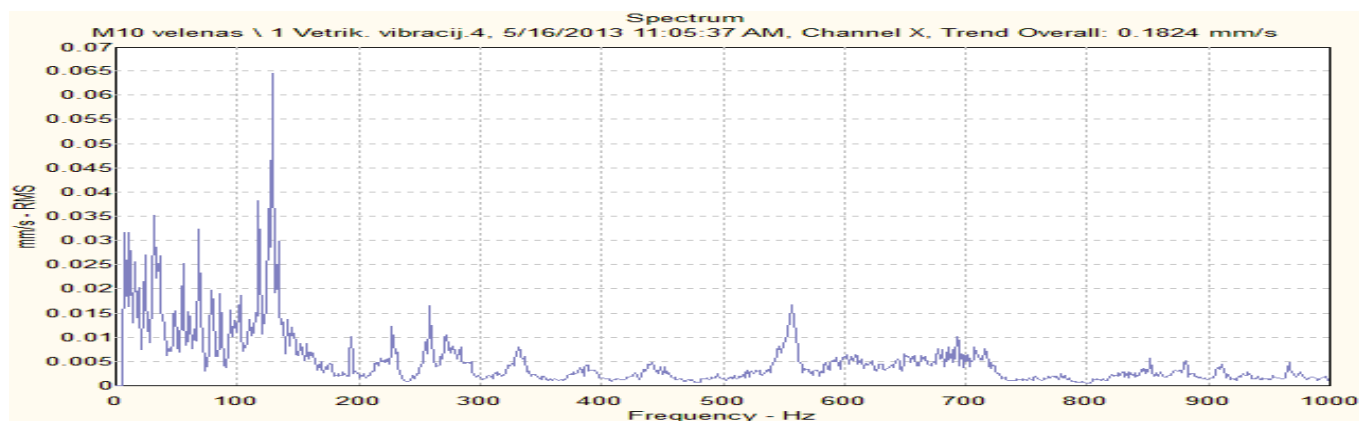
4.2.2.3 Antrojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 709 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



60 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras

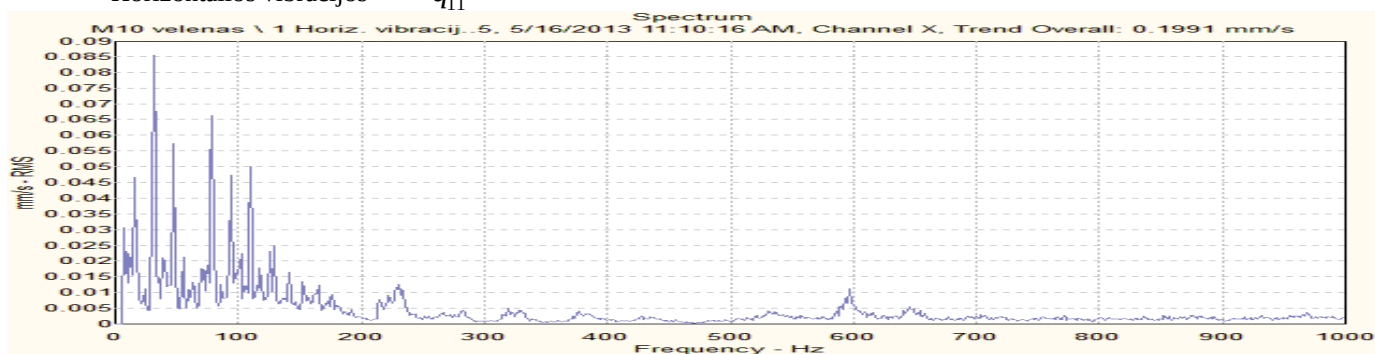
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



61 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

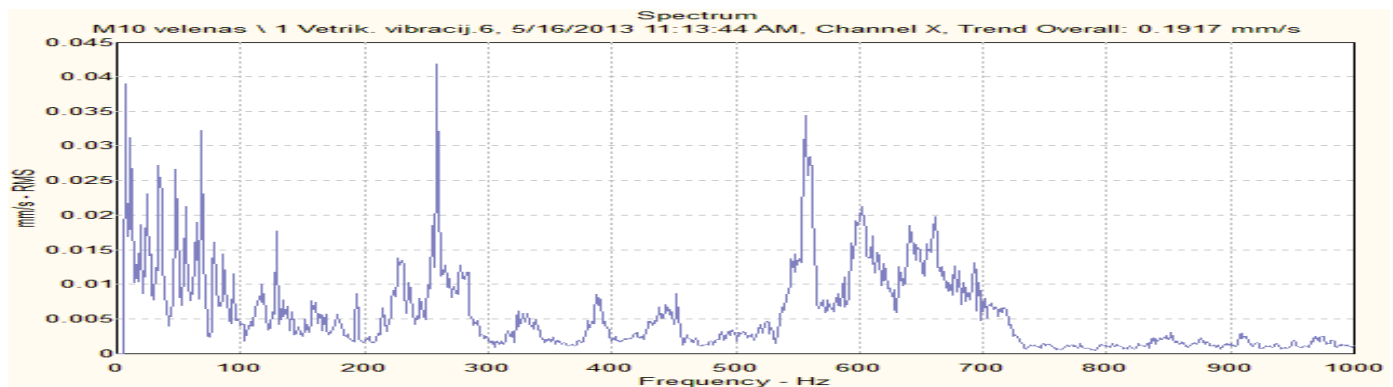
4.2.2.4 Antrojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 1189 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



62 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras

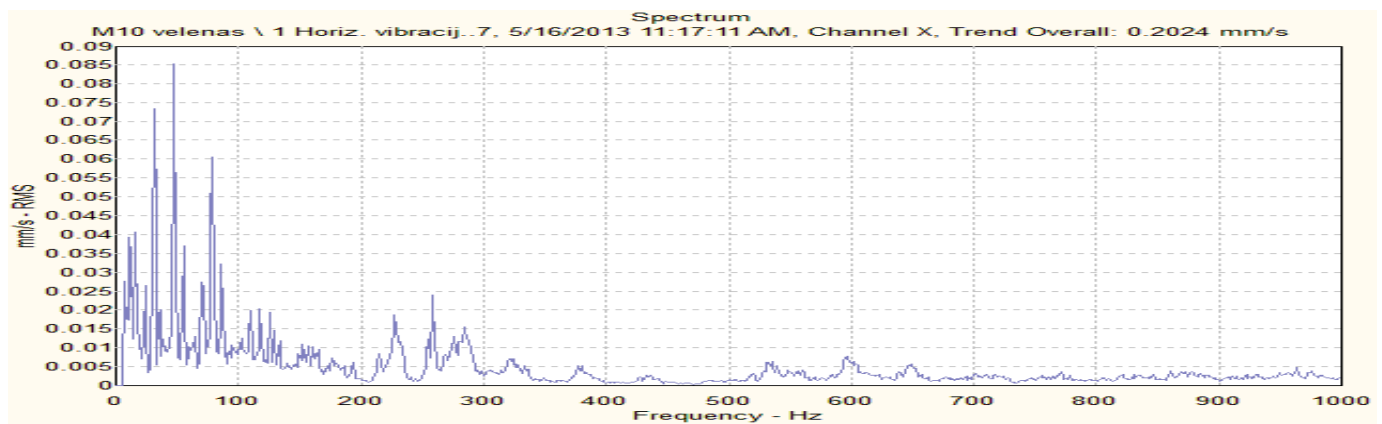
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



63 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

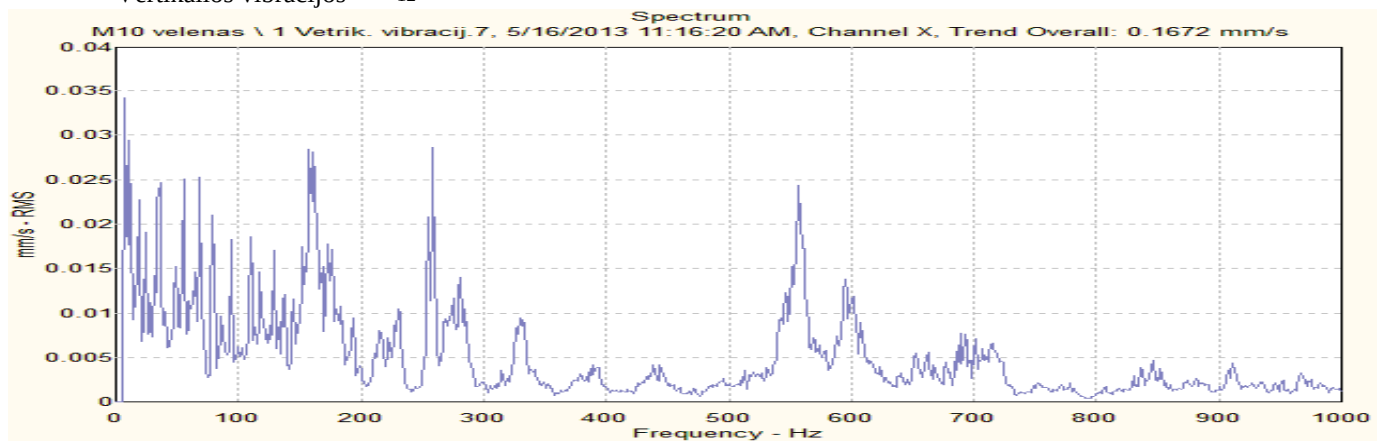
4.3.2.5 Antrojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 1250 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



64 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras

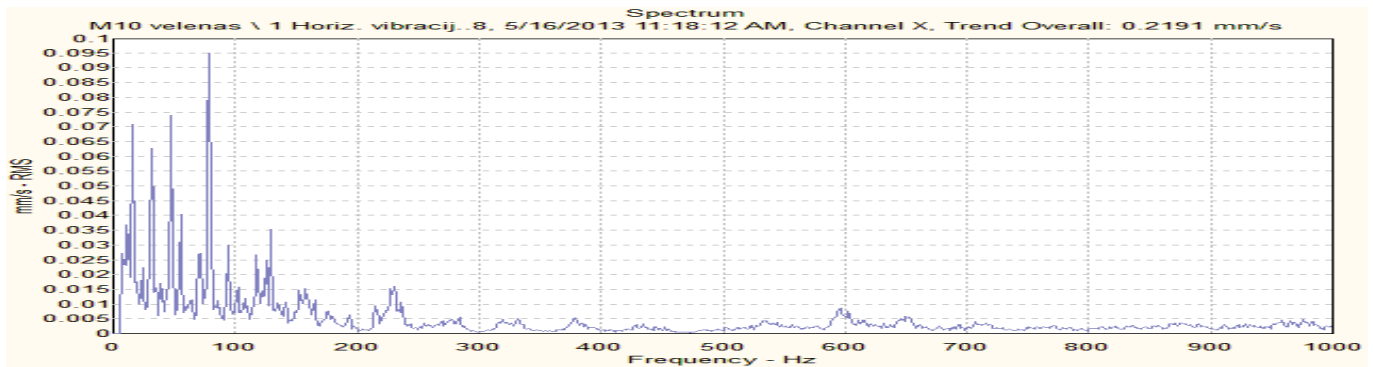
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



65 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

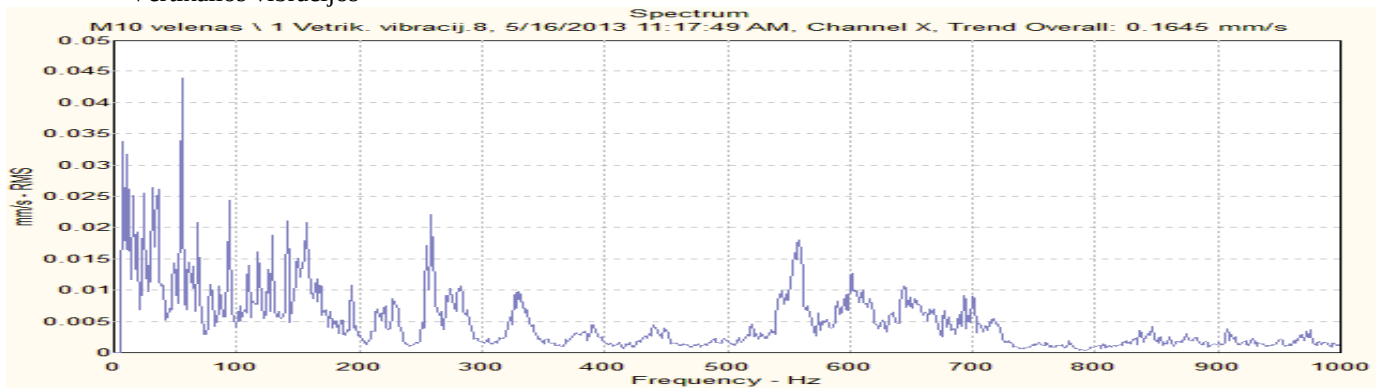
4.3.2.6 Antrojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 1349 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



65 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras

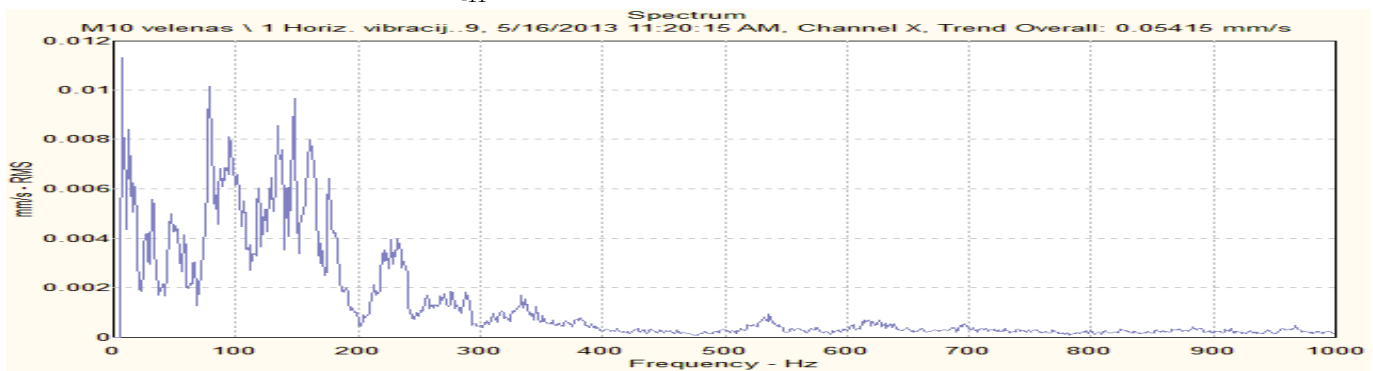
Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{12}$



66 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

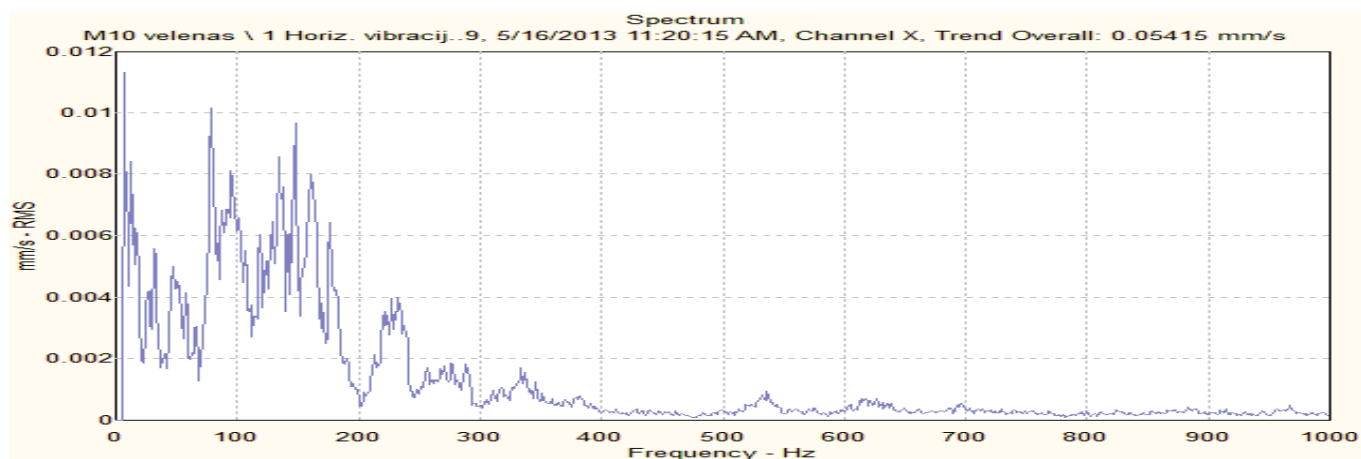
4.3.2.7 Antrojo vyniotuvo būgno matavimo rezultatai, esant diametrui - 1440 mm

Horizontalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



67 pav. Pirmojo vyniotuvo horizontalus greičių spektras

Vertikalios vibracijos - $\dot{q}_{11}$



68 pav. Pirmojo vyniotuvo vertikalus greičių spektras

Atliktas vyniotuvo būgnų guolio vertikalų ir horizontalių greičių eksperimentinis tyrimas, tyrimo metu gauti vibracijų greičių spektrai. Pagal vibracijų greičių spektrus matome, kad vibracijų greičiai neviršija leistinų (trend overall), kurios yra nustatytos pagal įrangos nusidevėjimo lygi (įmonėje maksimalios leistinos vibracijų greičių ribos yra 5 mm/s).

Išorinio žiedo vibracijos pikas (24,3 Hz) pasiekia didžiausią reikšmę ties **709 mm** vibracijų greitis - **0,11 mm/s**. Išorinio žiedo būklė **gera**.

Guolio separatoriaus vibracijų didžiausią piką (10,5 Hz) matome rulono skersmeniui esant **1189 mm** ir yra **0,039 mm/s** – separatoriaus būklė **gera**.

Guolio ritinėlio sukeliamų vibracijų greičio piką (85,6 Hz), matome rulono skersmeniui esant **1250 mm** ir vibracijų greitis yra **0,13 mm/s**, guolio ritinėlių būklė **gera**.

Pagal atliktą tyrimą guolio judėjimo greičiai nuo dažnio, priklausomai nuo rulono skersmens yra skirtingi. Pagal guolio 22216 E nominalius veikimo dažnius guolio būklė yra gera.

4.2.3 Hidraulinio siurblio vibracijų matavimas

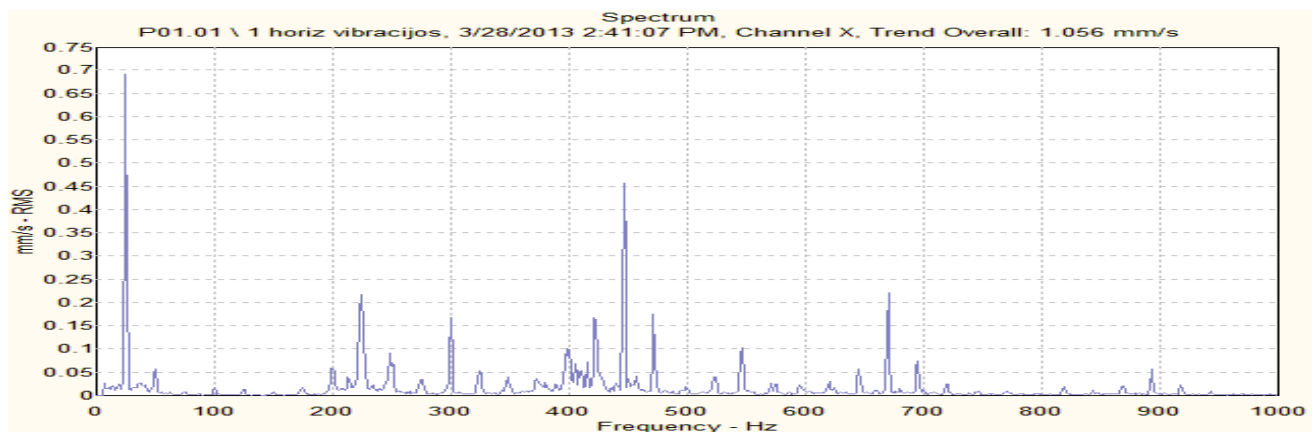
Hidraulinio siurblio eksperimento schema:



69 pav. Hidraulinio siurblio eksperimento schema

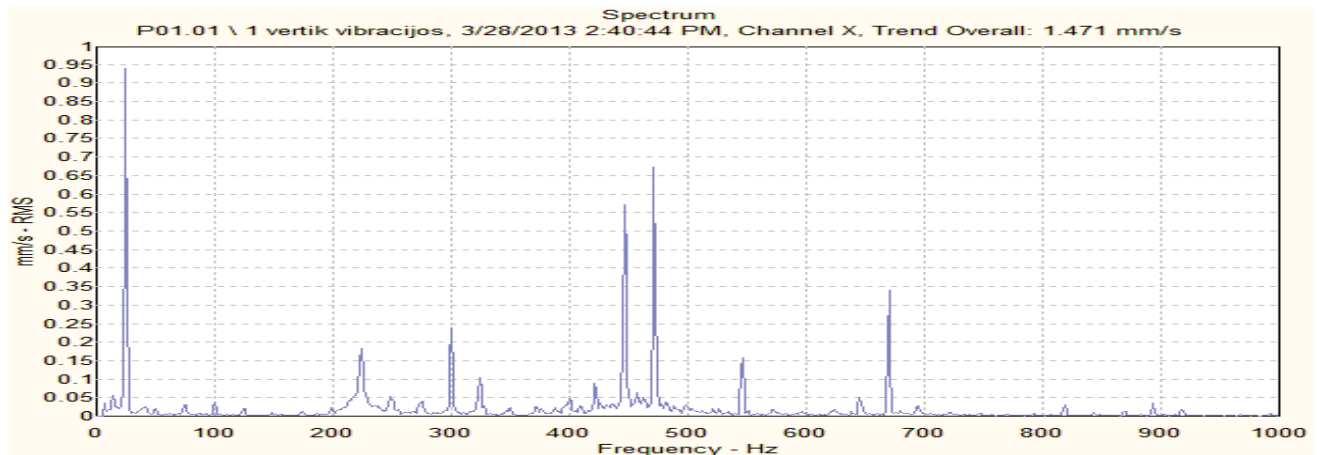
Eksperimento eiga: vibracijų matavimas atliekamas 3 kartus, naudojantis SKF mikrologu. Matuojamos siurblio horizontalios ir vertikalios vibracijos.

Horizontalių vibracijų spektras



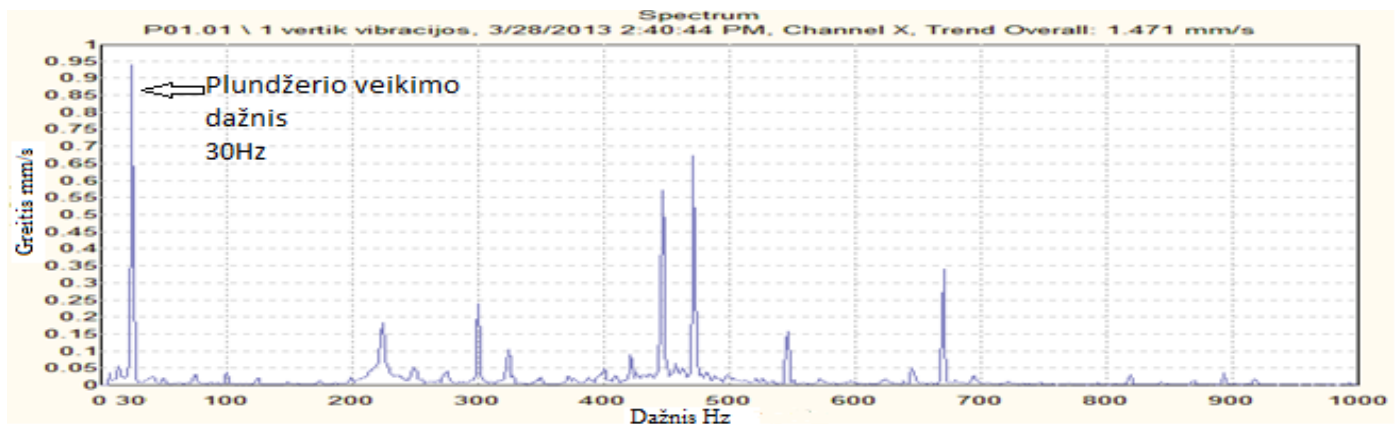
70pav. Hidraulinio siurblio horizontalių vibracijų spektras

Vertikalių vibracijų spektras



71 pav. Hidraulinio siurblio vertikalų vibracijų spektras

Atliktas eksperimentinis vibracijų tyrimas, naudojantis SKF mikrologu. Išmatuotos vyniotuvo būgno ir hidraulinės stotelės vibracijos, bei hidraulinio cilindrų darbinės kameros slėgis. Pagal vibracijų grafikus matome, kad hidrauliniame siurblyje esantys plundžeriai veikia 30 Hz dažniu (pav 72). Pagal plundžerio veikimo dažnį, mes kartu ir matome hidraulinės stotelės įtaką vynioniotuvo būgno guoliams:

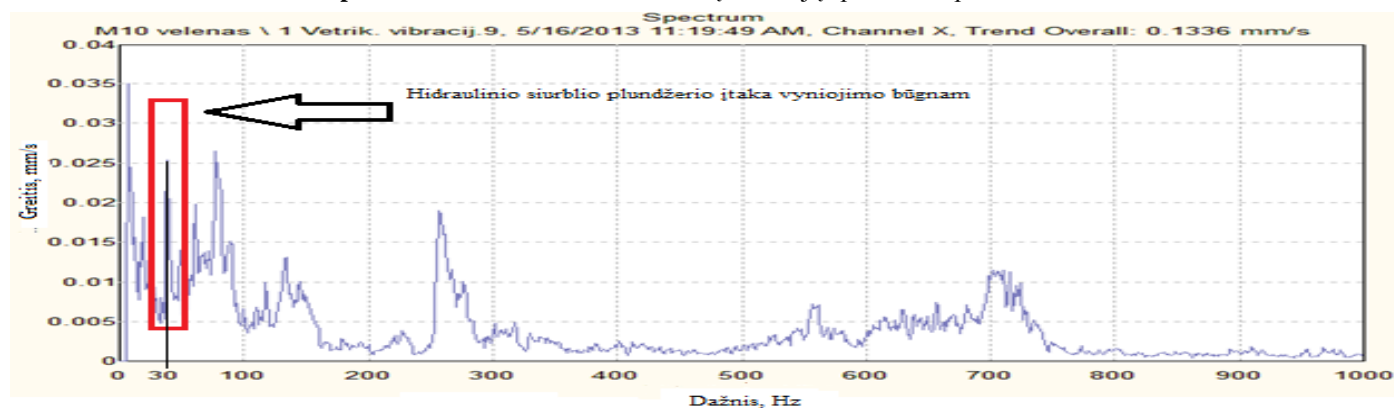


72 pav. Hidraulinio siurblio vertikalų vibracijų spektras su plundžerio veikimo dažniu

Pagal hidraulinės stotelės plundžerio veikimo dažnį (30.517 Hz) matome, kad hidraulinės stotelės siurblio sukeltos slėgio pulsacijos tiesiogiai įtakoja vyniojimo būgnų guoliavietes.



73 pav. Hidraulinio siurblio vertikalųjų vibracijų spektras su plundžerio veikimo dažniu



74 pav. Hidraulinio siurblio vertikalųjų vibracijų spektras

4.3 Beloit popieriaus vyniotuvo slėgio pulsacijų eksperimentinis tyrimas

Eksperimento eiga:

Tyrime slėgis matuojamas 6 kartus, po 10s. Eksperimentas su hidrauline sistema atliekamas, kai vykdomas popieriaus vyniojamo procesas, priklausomai nuo suvynioto popieriaus storio (mm).

Eksperimento schema:

Tyrime slėgio daviklis yra įsukamas į hidraulinės sistemą (76 pav.).

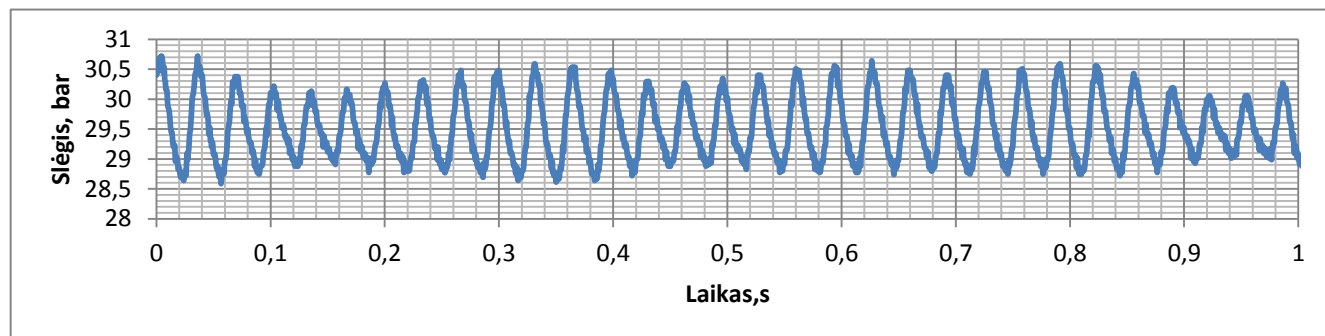
Hidraulinės sistemos eksperimento schema:



76 pav. Hidraulinės sistemos eksperimento schema

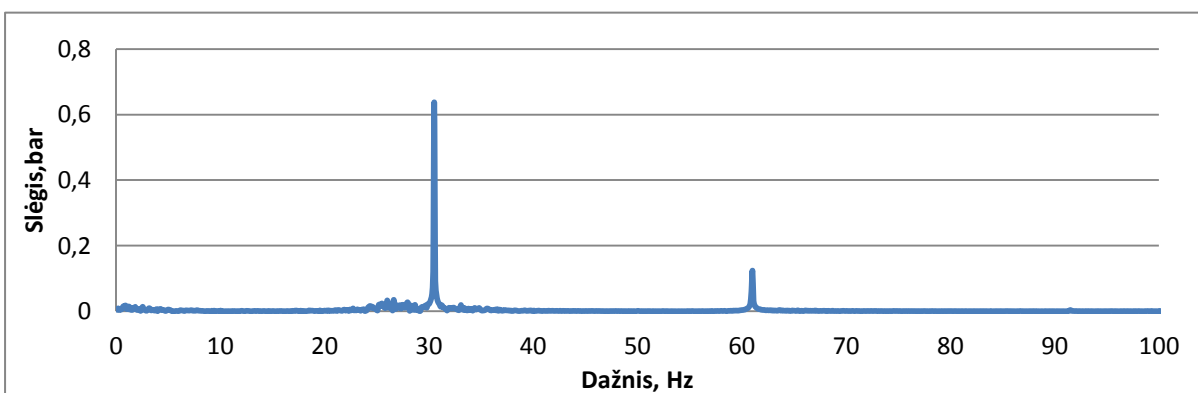
4.3.1 Prispaudimo cilindrų slėgis esant, esant popieriaus rulono diametrui – 490 mm

Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko.



77 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko

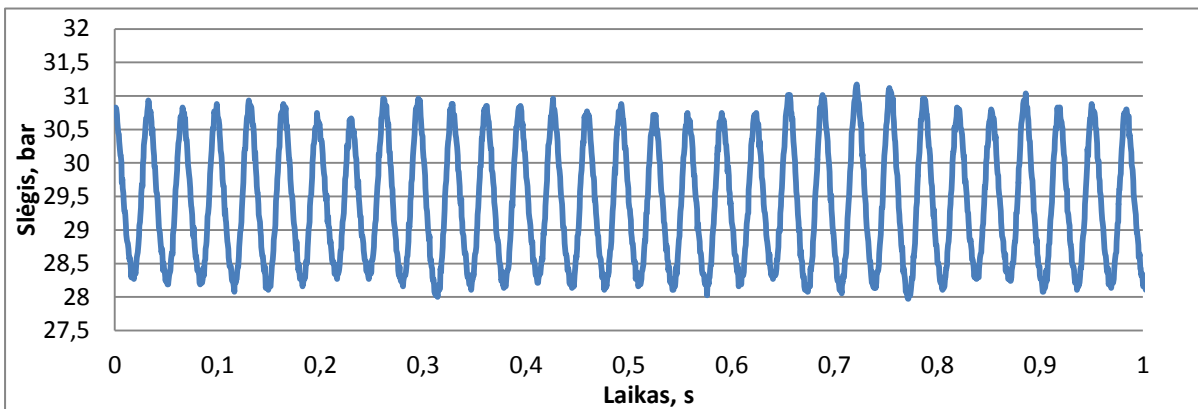
- Slėgis kitimas priklausomai nuo dažnio.



78 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko

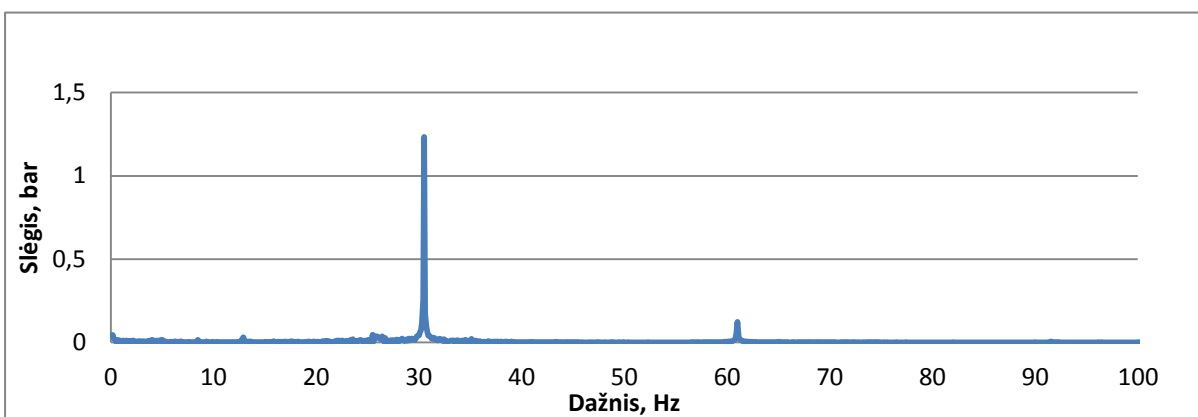
4.3.2 Prispaudimo cilindrų slėgis esant, esant popieriaus rulono diametrui – 660mm

- Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko



79 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko

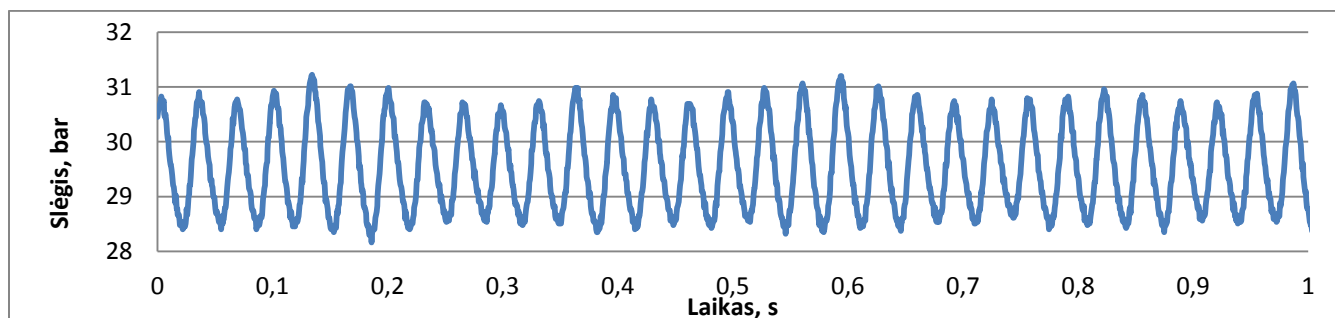
- Slėgis kitimas priklausomai nuo dažnio.



80 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo dažnio

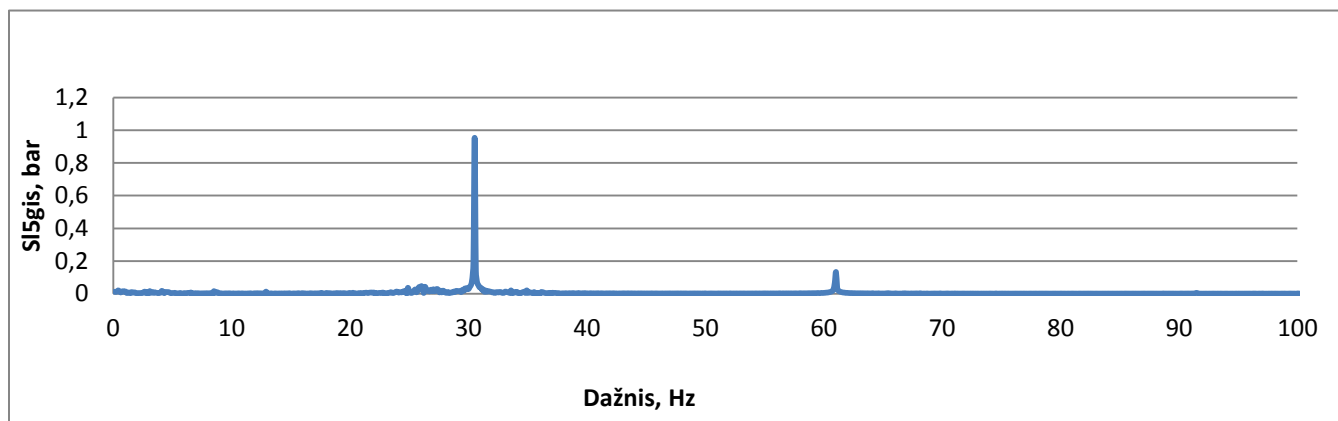
4.3.3 Prispaudimo cilindrų slėgis esant, esant popieriaus rulono diametrui – 860mm

- Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko



81 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko

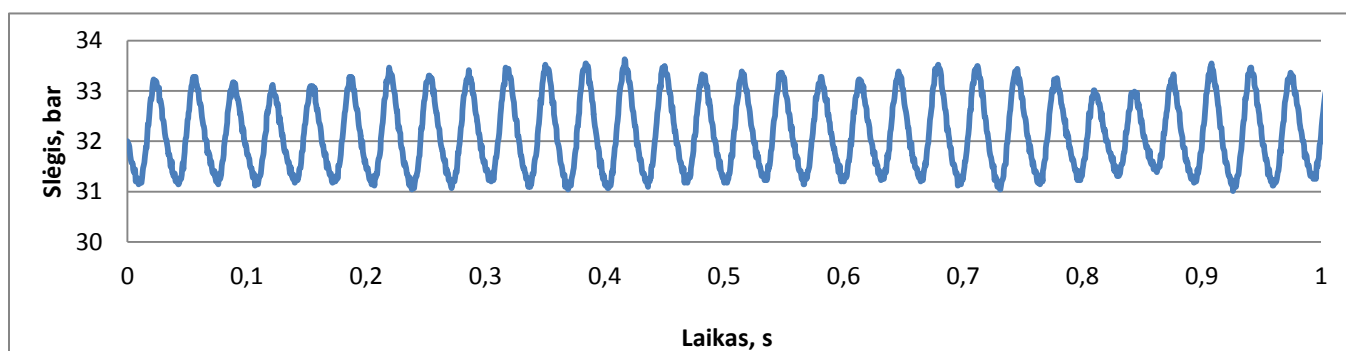
- Slėgis kitimas priklausomai nuo dažnio.



82 pav. Prispaudimo cilindro slėgis, nuo dažnio

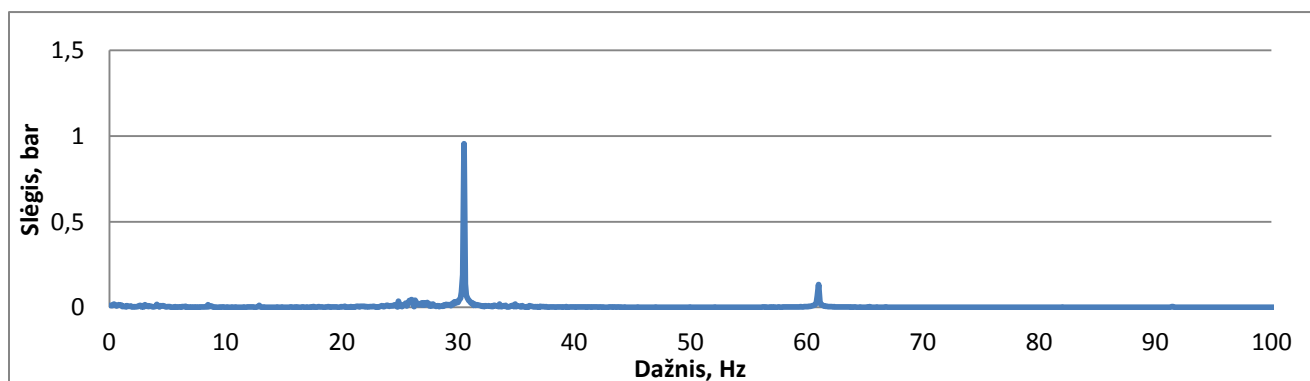
4.3.4 Prispaudimo cilindro slėgis esant, esant popieriaus rulono diametrui - 1000 mm

- Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko



83 pav. Prispaudimo cilindro slėgis, nuo laiko

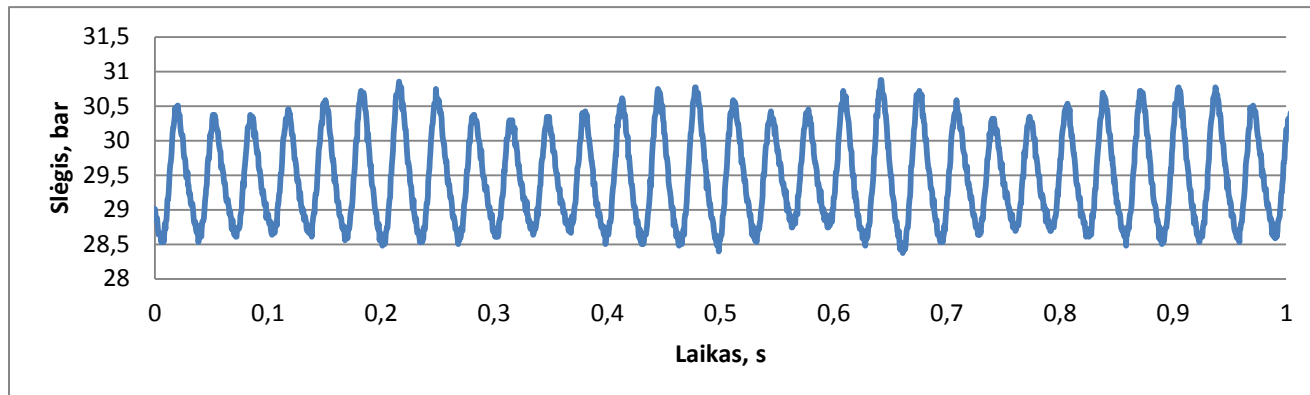
- Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko



84 pav. Prispaudimo cilindro slėgis, nuo dažnio

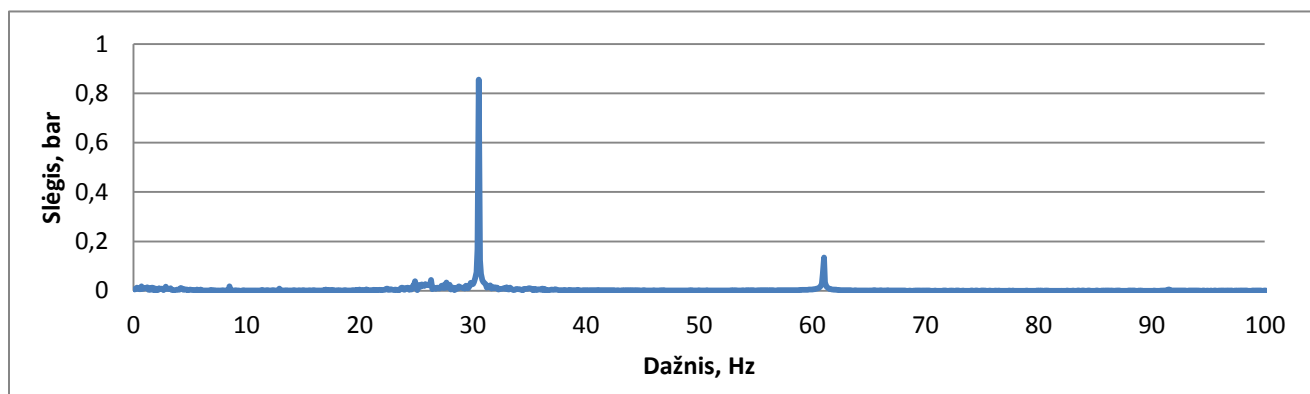
4.3.5 Prispaudimo cilindrų slėgis esant, esant popieriaus rulono diametrui - 1170 mm

- Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko



85 pav. Prispaudimo cilindrų slėgis, nuo laiko

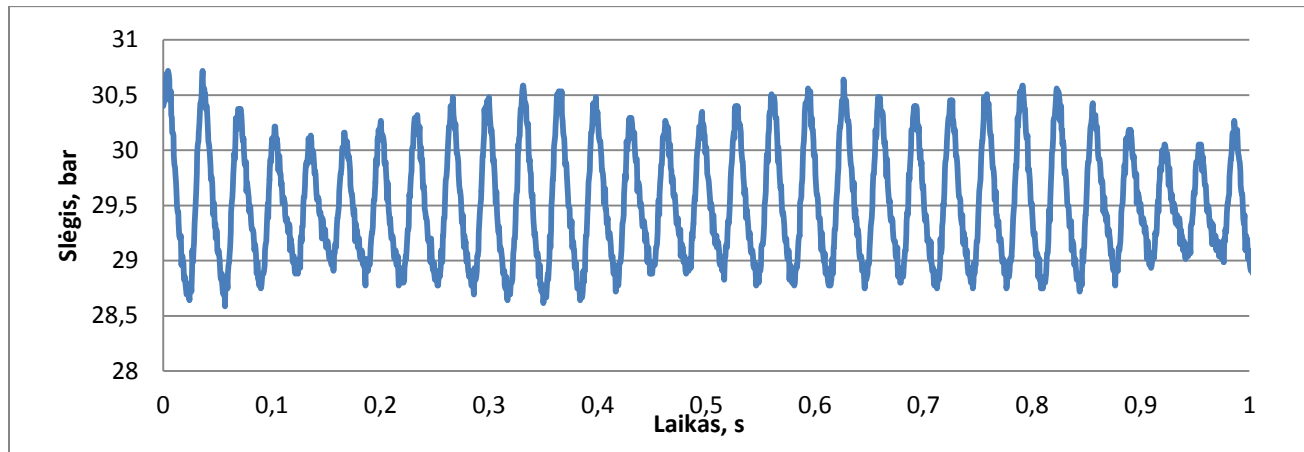
- Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko



86 pav. Hidraulinių cilindrų slėgis, nuo dažnio

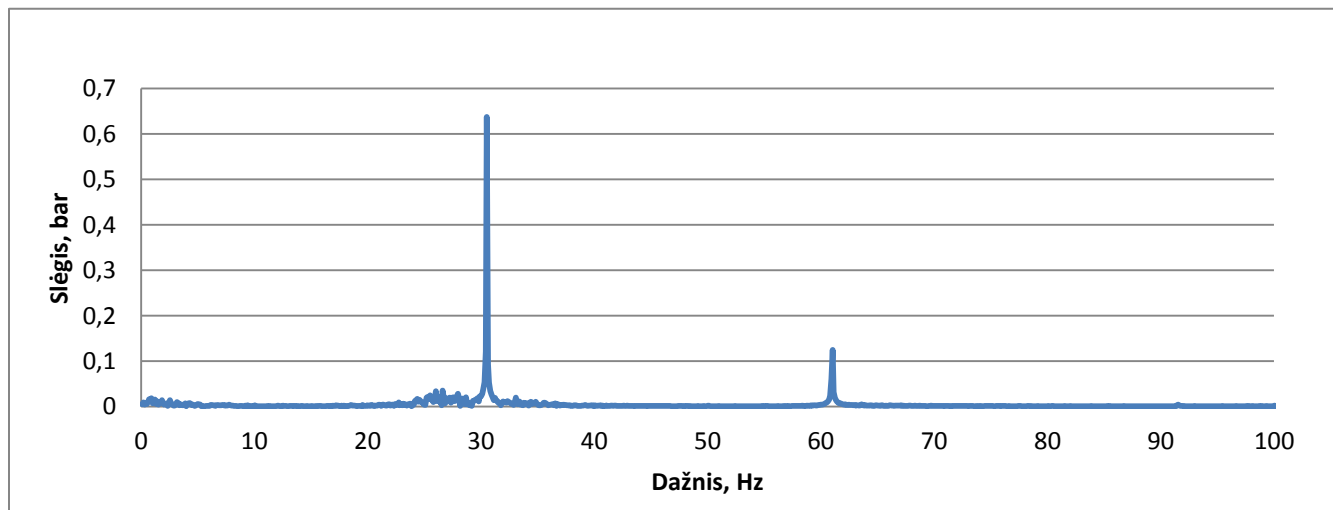
4.3.6 Prispaudimo cilindrų slėgis esant, esant popieriaus rulono diametrui – 1370mm

- Slėgis kitimas priklausomai nuo laiko



87 pav. Hidraulinių cilindrų slėgis, nuo laiko

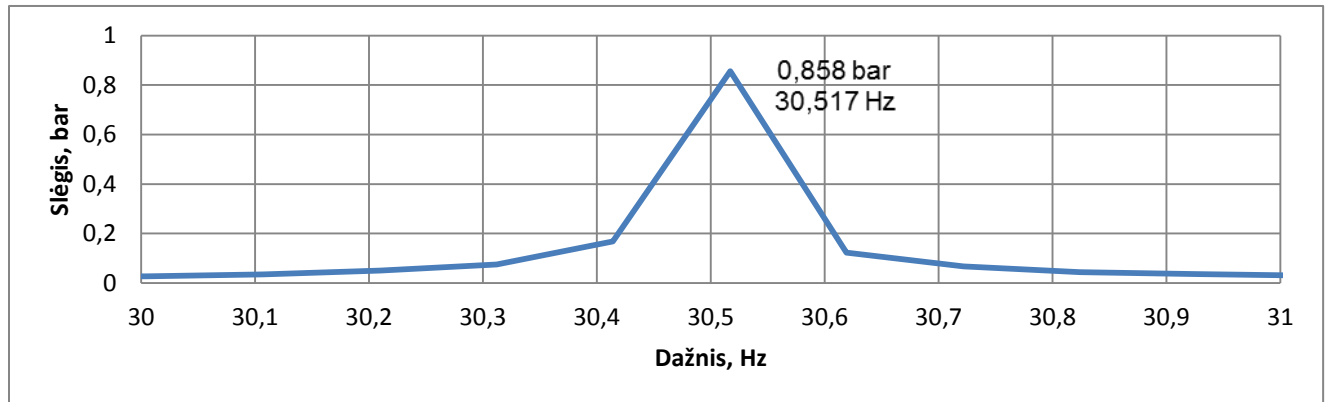
- Slėgis kitimas priklausomai nuo dažnio



88 pav. Hidraulinių cilindrų slėgis, nuo dažnio

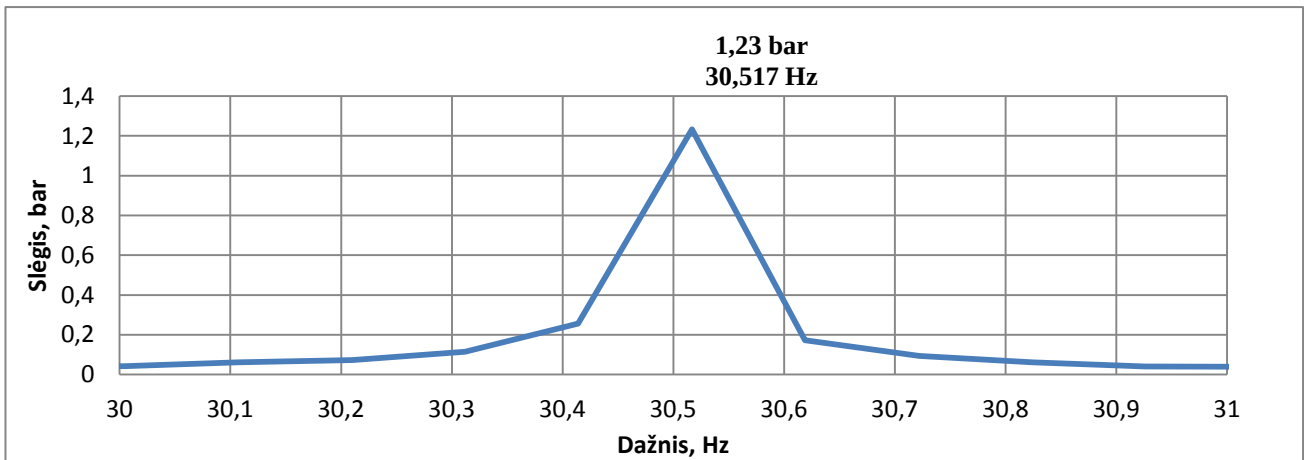
Atliktas slėgio pulsacijų tyrimas naudojantis slėgio jutikliu. Gauti slėgio pulsacijų grafikai nuo laiko, bei veikimo dažnio. Gautas hidraulinės stotelės slėgio pulsacijų dažnis (30,517 HZ).

Slėgio pulsacijų dažnis :



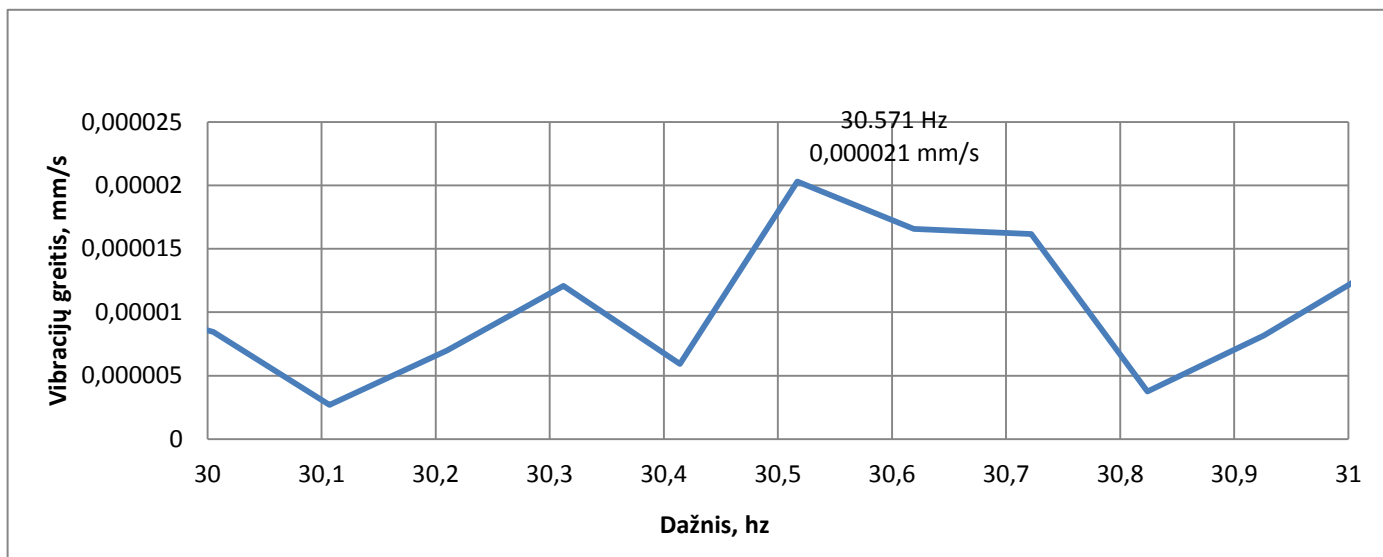
89 pav. Prispaudimo hidraulinių cilindrų slėgis, nuo dažnio, su siurblio plundžerio veikimo dažniu

Slėgio pulsacijų dažnis :



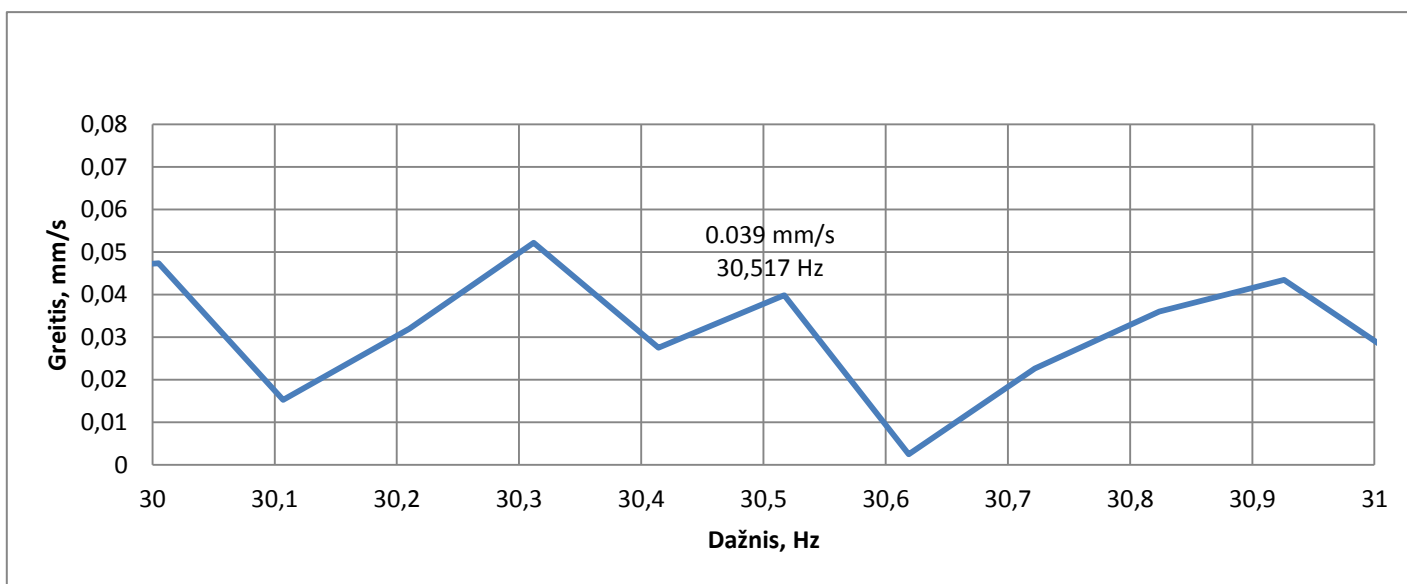
90 pav. Prispaudimo hidraulinių cilindrų slėgis, nuo dažnio, su siurblio plundžerio veikimo dažniu

Kartu matuojant hidraulinės sistemos cilindro slėgi buvo matuojamos ir pirmojo vyniojimo būgnų vibracijos naudojant vibromatuoklę. Pagal nustatytą slėgio pulsacijų dažnį, stebimi ir vyniojimo būgno vibracijų greičių spektrai.



91 pav. Vibracijų greitis, veikiant slėgio pulsacijai

Iš grafiko (pav. 91) matyti, kad veikiant slėgio pulsacijai esant 30, 571 Hz, vyniotuvo būgnų guoliaviečių vibracijų greitis **0,00021 mm/s** , rulono diametras **1370 mm**.



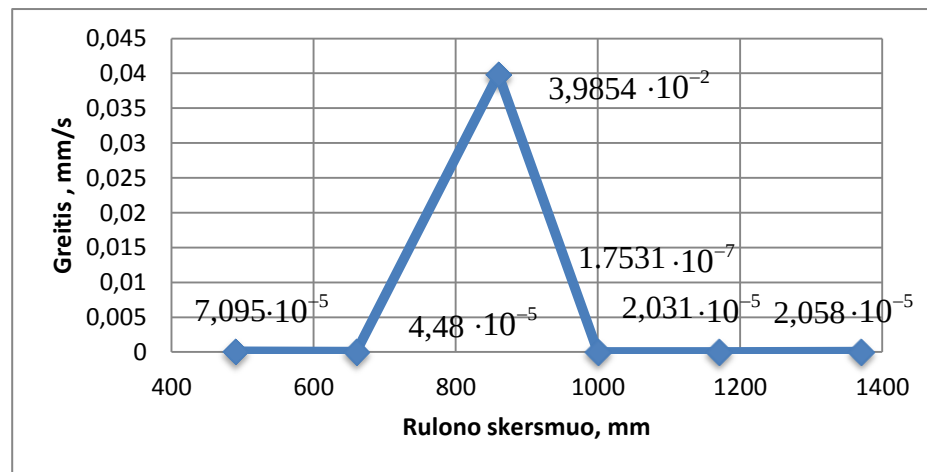
92 pav. Vibracijų greitis, veikiant slėgio pulsacijai

Iš grafiko (pav.) matyti, kad veikiant slėgio pulsacijai esant 30, 571 Hz, vyniotuvo būgnų guoliaviečių vibracijų greitis **0,039 mm/s** , rulono diametras **860 mm**

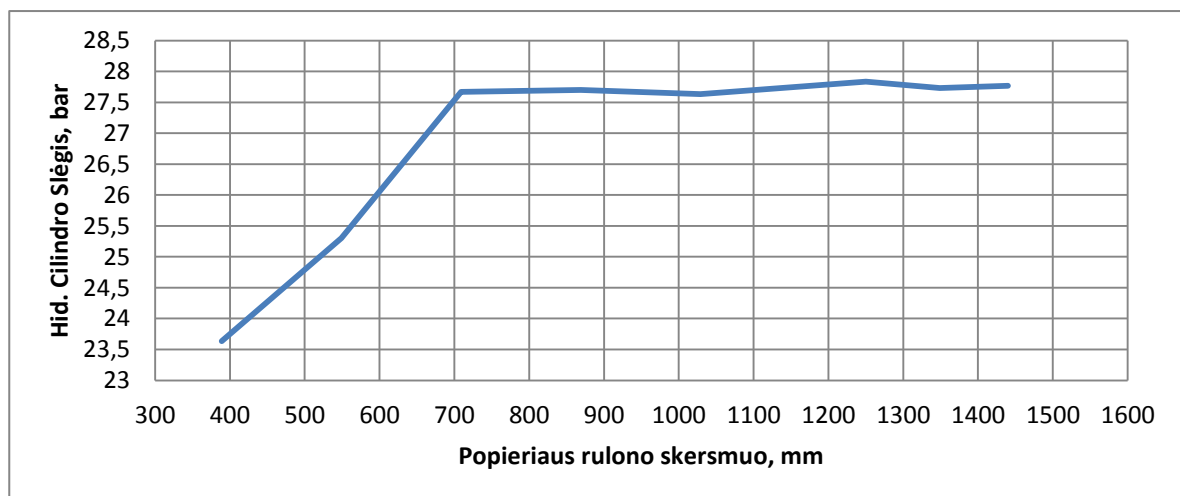
Pagal **2 lentelę** matome slėgio pulsacijų sukeltų vibracijų greičių kitimą, keičiantis rulono skersmeniui.

2 lentelė. Slėgio pulsacijų sukeltų vibracijų greičių kitimas, nuo rulono skersmens.

Eil. Nr	Rulono skersmuo, mm	Greitis, mm/s
1	490	$7,095 \cdot 10^{-5}$
2	660	$4,48 \cdot 10^{-5}$
3	860	$3,9854 \cdot 10^{-2}$
4	1000	$0,017531 \cdot 10^{-5}$
5	1170	$2,031 \cdot 10^{-5}$
6	1370	$2,058 \cdot 10^{-5}$



93 pav. Vibracijų greitis, veikiant slėgio pulsacijai



94 pav. Prispaudimo slėgis kintant rulono skersmeniui

Pagal **93 pav.** Matome, kad vibracijų greitis kyla, kai rulono skersmuo yra tarp 660 mm ir 800 mm. Pagal **94 pav.** Prispaudimo slėgis taip pat didėja hidrauliniuose cilindruose. Slėgio didinamas tiesiogiai įtakoja guoliavietės vibracijų greičius.

Pagal gautus eksperimentinius duomenis, hidraulinės sistemos pulsacijos veikia popieriaus vyniojimo technologinį procesą, tačiau ši įtaka (vibracijos) yra salyginai mažos ir veikia patį popieriaus vyniojimo procesą nežymiai.

Išvados

- 1) Atliktas popieriaus vyniotuvo vibracijų tyrimas naudojant SKF mikrologu. Tyrimo metu nustatytas hidraulinio siurblio plunžerio veikimo dažnis **(30, 517 Hz)** (42 - 68 pav.) , nustatyti hidraulinio siurblio (D7960) greičių spektrai; Nustatytas hidraulinio siurblio plunžerio (prie 30,517 Hz) poveikis popieriaus vyniotuvo būgnams (73, 74 pav.)
- 2) Atliktas popieriaus vynioto hidraulinės stotelės slėgio matavimas, naudojant Danfoss slėgio jutiklį. Gautas hidraulinės sistemos pulsacijos nuo laiko ir dažnio (77 – 88 pav.), pagal pulsacijų dažnį, gauti vyniotuvo būgno guoliavietės greičiai (89, 90 pav.), rasti vibracijų greičiai, kurie yra atsiradę dėl hidraulinio siurblio sukiamų slėgio pulsacijų, veikia nežymiai patį vyniojimo procesą (91, 92 pav.).
- 3) Slėgio pulsacijos gali būti destruktivos vyniotuvo mechanizmui, jeigu plunžerio veikimo dažnis sutaps su vyniotuvo mechaninės sistemos savaisiais dažniais.
- 4) Nustatytas slėgio kitimas nuo vyniojamo popieriaus rulono skersmens. Slėgis hidrauliniame cilindre kinta nuo 24 bar iki 28 bar (87 pav.).

Pasiūlimai

- 1) Atliekant kasmenesinę BELOIT vyniojimo būgnų greičių vibracijų spektro analizę atkreipti dėmesį į greičius, kuriuos sukelia hidraulinės pulsacijos, bei stebėti jų pokytį.
- 2) Atlikti vyniotuvo kreipiančiųjų revizja/remonta pagal rulono skersmens parametrus ties 600 - 800 mm , pastebėtas vibracijų padidėjimas.
- 3) Stebėti hidraulio siurblio vibracijų greičio pokytį, atkreipiant dėmesį į plundžerio veikimo pikus, pastebint iš anksto aretėjančius gedimus.

Literatūros sąrašas

- Alfred Tan C. H., Patrick Chua S. K., Lim G. H. 2003. Fault diagnosis of water hydraulic actuator under some simulated faults, School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University.
- Baradokas P. , Syrus L., 2002. Plokštelės su daugiasluoksne apsaugine dangą priverstiniai virpesiai. AVIACIJA, Nr.6
- Bogdevičius, M. 2000. Simulation of dynamic processes in hydraulic, pneumatic and mechanical drivers and their elements 2000. : *summary of the research report presented for habilitation* / Vilnius Gediminas Technical University.
- Cudina M. 2003, detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1335–1347.
- Dokukova N. A., Konon P. N. and Kaftaikinac E. N. 2008. Nonnatural vibrations of hydraulic shock-absorbers, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 81, No. 6.
- Hahayashi S., Hayase T., Kurahasi T. 1997. CHAOS IN A HYDRAULIC CONTROL VALVE. *Journal of Fluids and Structures*, Vol 11 , 693 – 716
- Jurčius A., Valiulis A., Černašėjus O. 2011. INFLUENCE OF VIBRATORY STRESS RELIEF ON RESIDUAL STRESSES IN BRIDGE STRUCTURAL MEMBERS WELDMENTS, THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE ENGINEERING, *the baltic journal of road and bridge engineering*. Vol 6, 243–248
- Kubilius V., Ramonas Č., Lipnickas A., Rutkauskas R. 2008. Dynamic of a Rewinder with Feedback by Tension Force, Kaunas University of Technology.
- McManus. J. 2002. Evaluation of vibration and shock attenuation performance of a suspension seat with a semi-active magnetorheological fluid damper. , *Journal of Sound and vibration*, Vol 255, No. 6.
- Murat R., Pala Y., 2012. Vibration of a Cracked Cantilever Beam Under Moving Mass Load, *Journal of Civil Engineering and Management*.
- Tang Y., Frolov K. V. , Siniov A. V., 2001. Study on vibration reduction behavior for the hydraulic engine mount, *construction engineering journal*.
- Tomi K. , Jarno P. and Kari T. 2008. Comparison of vibration and pressure signals for fault detection on water hydraulic proportional valve, *Proceedings of the 7th JFPS*

International Symposium on Fluid Power, Tampere University of Technology.

Shen H. Yang J. 2002. Vibration characteristics and transient response of shear deformable functionally graded plates in thermal environments, *Journal of Sound and vibration*, Vol 255, No. 6.

Ramon H., Anthonis J., Baerdemaeker J., Moshou D. 1998. Evaluation of a Cascade Compensator for Horizontal Vibrations of a Flexible Spray Boom, *J. agric. Engng Res.* 71,81-92

Xu-hui H., Xiang-dong Y., Zheng-qing C. 2003. Nonstationarity analysis in wind-rain induced vibration of stay cables

PRIEDAI