

PNEUMATINIŲ RAUMENŲ DINAMINIŲ PARAMETRŲ IR POZICIONAVIMO
TIKSLUMO TYRIMAIEdvard Sadovskij¹, Valdemar Prokopovič², Vadim Mokšin³*Vilniaus Gedimino technikos universitetas**El. paštas: ¹sadovskij@gmail.com; ²prokopovicvaldemar@gmail.com; ³vadim@vgtu.lt*

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamas pneumatinis raumuo MAS-20-200N-AA-MC-O, jo dinaminės savybės ir pozicionavimo tikslumas. Apžvelgti eksperimentiniai ir teoriniai darbai. Pateikti vibracijų pagreičių grafikai, poslinkio priklausomybės nuo slėgio ir nuo apkrovos, pateikta grafinė greičio priklausomybė nuo darbinio slėgio. Vibracijų pagreitis matuojamas dviem akcelerometrais. Matavimai atliekami trimis tarpusavyje statmenomis kryptimis: x , y , z . Svarbiausia laikoma z kryptis, nes jos kryptimi raumuo atlieka naudingą poslinkį, einantį išilgai raumens ašies, ši kryptis yra darbinis raumens judesys.

Reikšminiai žodžiai: pneumatinis dirbtinis raumuo, vibracijų pagreitis, amplitudė, dažnis, pozicionavimo tikslumas.

Įvadas

Dirbtiniai raumenys, kaip pavaros, yra artimiausi biologiniams raumenims, todėl jie gali būti sėkmingai naudojami robotų technikoje, kai reikia gauti panašius į žmogaus rankos manipulatoriaus judesius. Jie turi nemažai privalumų: puikus slopinimas, geras jėgos ir masės koeficientas ir galimybė naudoti agresyvioje aplinkoje. Dėl šių požymių dabartiniu metu yra didelis susidomėjimas dirbtiniais raumenimis. Dažniausiai naudojami pneumatiniai raumenys, pavyzdžiui, gerai žinomas Makkibeno raumuo (Kerscher *et al.* 2006).

Pneumatiniai raumenys dažniausiai naudojami kaip jėginės pavaros ir retai kaip pozicionavimo pavaros.

Pirmasis pneumatinis raumuo buvo sukurtas XX a. viduryje. Nuo to laiko jo konstrukcija ir naudojamos medžiagos pasikeitė. Nors pats raumuo patobulintas, tačiau iki šiol taip ir netapo labai populiaria pavaros rūšimi. Pramonėje jis plačiau pradėtas naudoti tik XX a. pabaigoje, tačiau per paskutinį dešimtmetį šio pavaros tipo tyrimai ir pritaikymo galimybės pasistūmėjo gerokai į priekį. Lietuvoje, kaip pavaros tipas, pneumatiniai raumenys pramonėje naudojami retai (Van den Brink 2007).

Pozicionavimo tikslumo tyrimai

Dėl pneumatinių raumenų medžiagos elastingumo judėjimo metu yra sunku tiksliai valdyti jų padėtį. Tikroji padėtis dėl histerezės ir didelių pagreičių nukrypsta nuo nominalios ir norimos padėties, todėl pasiekti didelio tikslumo

naudojant didelius greičius neįmanoma. Padėties tikslumas judesio pabaigoje priklauso nuo keleto veiksnių:

- slėgio raumenyje;
- raumens medžiagos tampriųjų savybių;
- apkrovos.

Iš pradžių pozicionavimo tikslumas buvo tiriamas išleidžiant orą iš raumens (grįžtančio į pradinę padėtį). Jo matavimo eiga buvo tokia: įtvirtinus pneumatinį raumenį prie tyrimų stendo po raumeniu pritvirtinamas indikatorius. Kai jis nustatomas į nulinę padėtį, tada į raumenį tiekiamas oras, paskui oras išleidžiamas ir matuojamas nuokrypis, vėliau į raumenį vėl tiekiamas oras ir išleidžiamas ir matuojamas nuokrypis. Tokie bandymai kartojami 10 kartų. Pneumatinis raumuo dirba esant skirtingoms apkrovoms (2, 3 ir 5 kg). Pozicionavimo matavimai atliekami esant 2, 4, 6 atmosferų slėgiui.

Po to buvo tiriamas pozicionavimo tikslumas pripučiant į raumenį oro (darbo pabaigoje) (Fluidic-Muscle-DMSP/MAS ... 2012).

Tyrimų rezultatai

Oro išleidimas

Matavimo eiga: indikatorius įtvirtinamas prie stendo taip, kad galėtume išmatuoti pripūsto pneumatinio raumens poslinkį (1 pav.). Į raumenį tiekiamas oras, nustatoma nulinė padėtis, vėliau oras išleidžiamas ir vėl į raumenį tiekiamas oras. Matuojamas nuokrypis nuo pradinės padėties. Tokie bandymai kartojami 10 kartų.



1 pav. Pneumatinė sistema
Fig. 1. Pneumatic system

Matavimo duomenys buvo tikrinami pagal Ramonovskio kriterijų. Kiekvienas matavimo rezultatas turi atitikti tokią sąlygą:

$$|\bar{x} - x_i| < \sigma, \quad (1)$$

čia: \bar{x} – pozicionavimo nuokrypių vidurkis; x – pozicionavimo nuokrypis; σ – matavimo rezultatų kvadratinis nuokrypis.

Apskaičiuojame σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}, \quad (2)$$

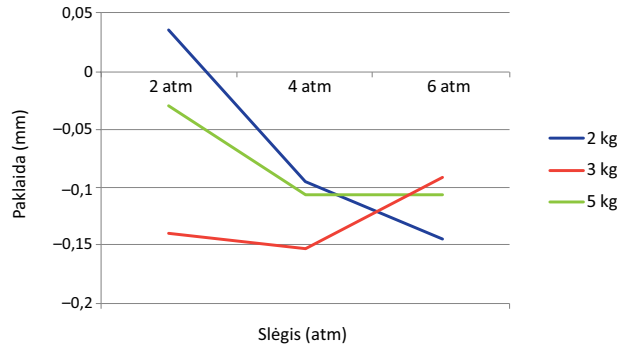
čia: n – bandymų kiekis

Atlikus bandymus nustatyta, kad geriausias pneumaticinio raumens pozicionavimo tikslumas pasiekiamas esant 5 kg apkrovai ir didžiausiam slėgiui (1, 2 lentelė). Iš pateiktų tyrimo duomenų galima teigti, kad pneumaticinis raumuo turi mažiausią vidutinį pozicionavimo nuokrypį, kai yra didžiausia apkrova (Zdeněk, Moučka 2009). Pozicionavimo paklaidų vidurkių grafikais pateikti 2 ir 3 pav.

1 lentelė. Matavimo duomenų statistiniai rodikliai

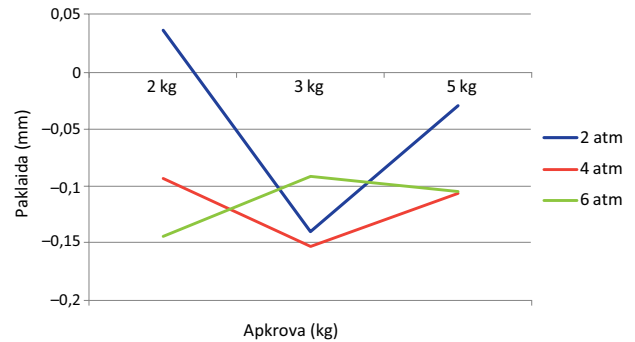
Table 1. Measurement results of statistical indexes

Slėgis, atm	Apkrova, kg	Vidurkis, mm	Sklaida, mm	Vidutinis kvadratinis nuokrypis, σ
2	2	0,036	0,25	0,08072
	3	-0,139	0,13	0,04175
	5	-0,03	0,2	0,06289
4	2	-0,094	0,16	0,04695
	3	-0,152	0,14	0,0478
	5	-0,106	0,08	0,03062
6	2	-0,144	0,1	0,03471
	3	-0,091	0,12	0,03985
	5	-0,105	0,07	0,02506



2 pav. Pozicionavimo paklaidų vidurkių grafikas, kai yra vienodos apkrovos ir skirtingi slėgiai

Fig. 2. Diagram of the averages of positioning errors under the same load and different pressure



3 pav. Pozicionavimo paklaidų vidurkių grafikas, kai yra vienodi slėgiai ir skirtingos apkrovos

Fig. 3. Diagram of the averages of positioning errors under the same pressure and a different load

2 lentelė. Matavimo duomenų statistiniai rodikliai

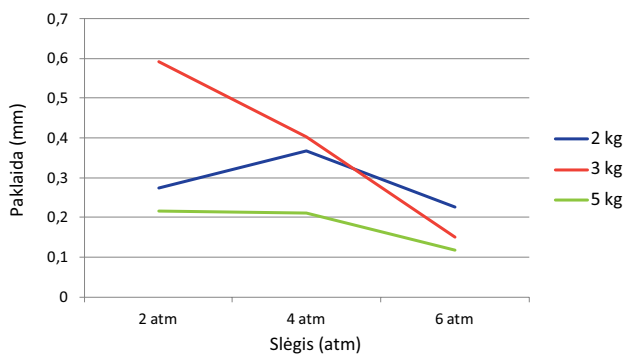
Table 2. Measurement results of statistical indexes

Slėgis, atm	Apkrova, kg	Vidurkis, mm	Sklaida, mm	Vidutinis kvadratinis nuokrypis, σ
2	2	0,2741	0,723	0,27478
	3	0,5907	0,71	0,2395
	5	0,2168	0,302	0,09569
4	2	0,3663	0,405	0,13387
	3	0,4023	0,479	0,18391
	5	0,2119	0,3	0,09445
6	2	0,2275	0,339	0,10842
	3	0,1497	0,229	0,07773
	5	0,118	0,172	0,06914

Oro tiekimas

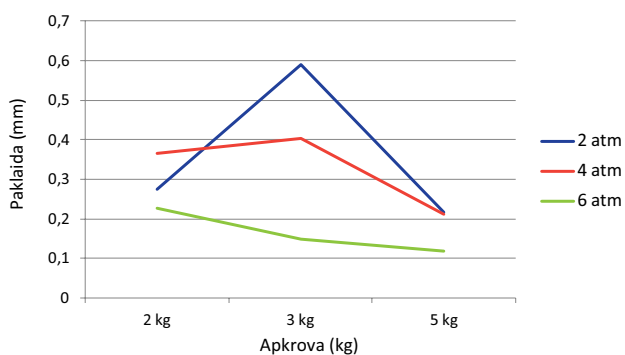
Apibendrinti rezultatai pateikti 4, 5 paveikslų grafikuose.

Iš 4 ir 5 pav. aiškiai matyti, kad tiksliausiai pneumaticinis raumuo dirba esant didžiausiai bandymų apkrovai (0,118 mm pozicionavimo paklaida). Stabiliausiai sistema dirba esant didžiausiam leistinam slėgiui (0,172 mm pozicionavimo sklaida).



4 pav. Pripūsto raumens pozicionavimo paklaidų vidurkių grafikas, kada vienodos apkrovos ir skirtingi slėgiai

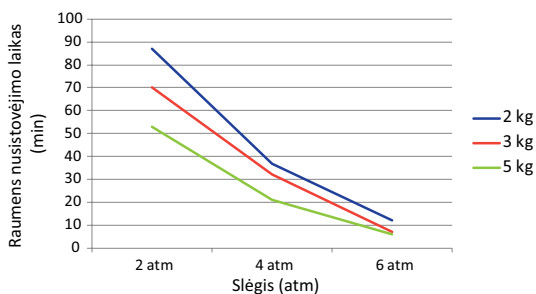
Fig. 4. Diagram of the averages of positioning errors of the inflated muscle under the same load and different pressure



5 pav. Pripūsto raumens pozicionavimo paklaidų vidurkių grafikas, kada vienodi slėgiai ir skirtingos apkrovos

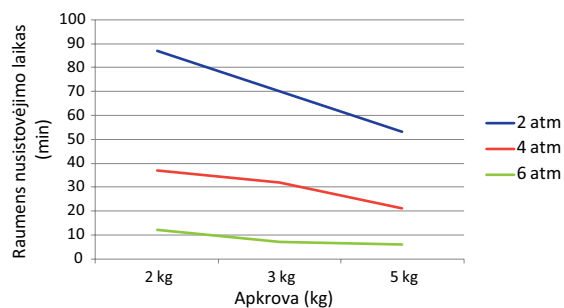
Fig. 5. Diagram of the averages of positioning errors of the inflated muscle under the same pressure and a different load

Atliekant bandymus buvo pastebėta viena gana įdomi pneumatinių raumenų savybė – slinkimas. Pneumatinio raumens poslinkis priklauso ir nuo laiko. Kuo mažesnis slėgis pneumatinio raumens sistemoje ir apkrovoje, tuo ilgiau raumuo nusistovi ir būna didesnė pozicionavimo paklaida (pozicionavimo sklaida yra didžiausia). Rezultatai pateikti 6 ir 7 pav.



6 pav. Pneumatinio raumens nusistovėjimo priklausomybė nuo slėgio

Fig. 6. The dependence of settling a pneumatic muscle on pressure



7 pav. Pneumatinio raumens nusistovėjimo priklausomybė nuo apkrovos

Fig. 7. The dependence of settling a pneumatic muscle on a load

Dinaminių parametru tyrimai

Vibracijų pagreitis buvo matuojamas pneumatinio raumens z ašies krypties atžvilgiu. Ši ašis yra svarbiausia, nes jos kryptimi raumuo atlieka naudingą poslinkį. PDR buvo tiriama dinamiškai žadinant z ašies atžvilgiu (8 pav.), raumens viduje išlaikant skirtingą darbinį slėgį:

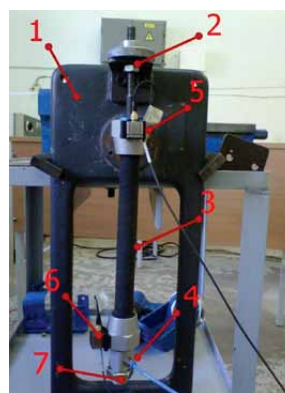
1. 2 atm;
2. 4 atm;
3. 6 atm.

Stendo rėmas 1 tvirtinamas prie nejudamo stalo. Prie raumens laikiklio 2 prisukamas pneumatinis dirbtinis raumuo 3. Per oro įėjimo / išėjimo 4 vietą raumuo atlieka darbinį judesį. Raumens viršuje ir apačioje sumontuoti du akcelerometrai 5 ir 6, kurie fiksuoja vibracijų pagreičių reikšmes. Prie laisvojo galo 7 tvirtinamos papildomos apkrovos.

Pneumatinis raumuo buvo tiriamas nenaudojant papildomų apkrovų. Vibracijų pagreičių reikšmės buvo nustatomos esant skirtingam slėgiui:

- 2 atm;
- 4 atm;
- 6 atm.

Kitame etape prie pneumatinio raumens buvo tvirtinama papildoma 5 kg apkrova. Keičiant slėgį buvo fiksuojami vibracijų pagreičiai.



8 pav. Tyrimų stendas

Fig. 8 Test stand

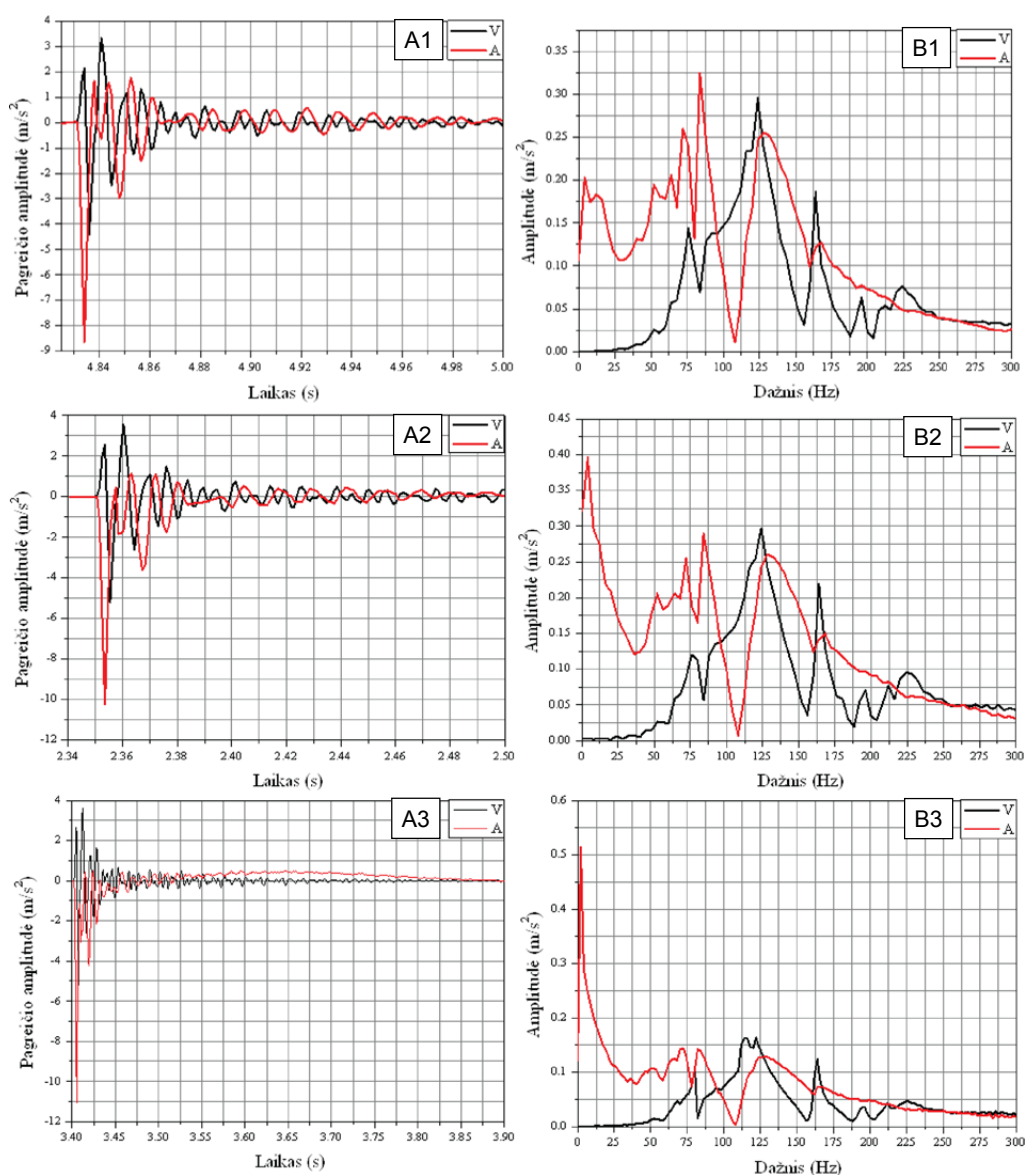
Vibracijų pagreičių spektrų rezultatai

Iš 9 pav. A1–A3 matyti, kad pripūtimo metu didžiausios pagreičio amplitudžių reikšmės yra apatinio taško, kurios didėjo didinant slėgį. Kaip matyti iš 9 pav. B1–B3, viršutinio taško vibracijų aktyvumas prasideda nuo 25 Hz, o didžiausios amplitudės reikšmės visai atvejais užfiksuotos 122–124 Hz dažnio diapazone. Maksimali reikšmė užfiksuota esant 4 atm slėgiui $0,2967 \text{ m/s}^2$. Apatinio taško maksimalios amplitudžių reikšmės visai atvejais užfiksuotos esant mažam dažnio diapazonui – 2–4 Hz, tačiau oro pripūtimo metu laisvasis galas virpa 82–84 Hz dažnių diapazone. Iš 9 pav. matyti, kad slėgis veikia tik amplitudžių reikšmes, tačiau dažniai, kuriems esant jos užfiksuotos, visais atvejais

yra to paties diapazono. Dažnių priklausomybė nuo slėgio pateikta 10 pav.

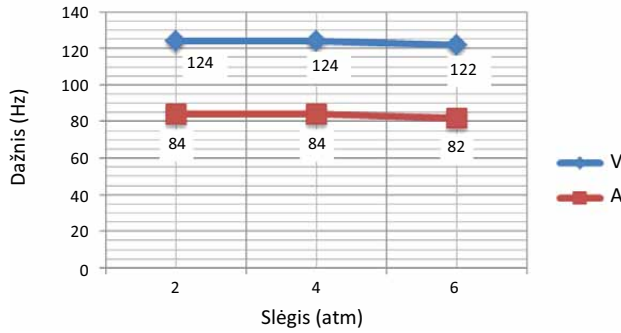
11 pav. pateikti grafikai, kai pneumatinis raumuo apkrautas papildoma 5 kg apkrova. Iš 11 pav. A1–A3 matyti, kad apkrova sumažino apatinio taško amplitudžių reikšmes. Pripūtimo metu, kai raumuo nebuvo apkrautas papildoma apkrova, amplitudžių reikšmės sumažėjo 3 kartus.

Iš 11 pav. B1–B3 matyti, kad apkrova sumažino tiek viršutinio, tiek apatinio taškų dažnius. Viršutinio taško dažniai sumažėjo 10 %, apatinio – 5 kartus. Abiem atvejais viršutinio ir apatinio taško mažiausi dažniai užfiksuoti esant 6 atm slėgiui. Dažnių priklausomybė nuo slėgio, esant 5 kg papildomai apkrovai, pateikta 12 pav.

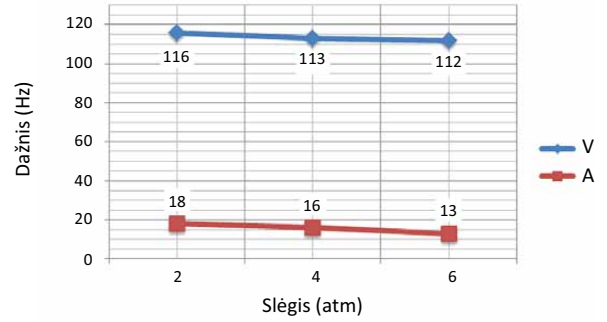


9 pav. Vibracijų pagreičių amplitudžių priklausomybė nuo laiko (A1 – 2 atm, A2 – 4 atm, A3 – 6 atm), dažnių spektrai (B1 – 2 atm, B2 – 4 atm, B3 – 6 atm)

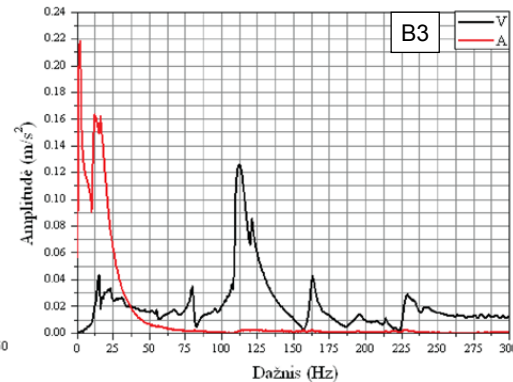
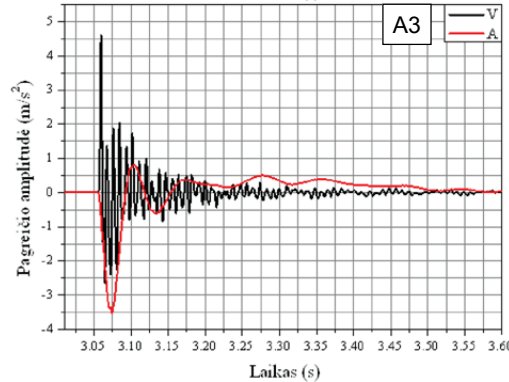
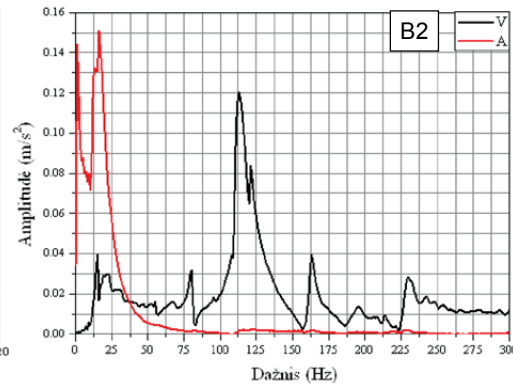
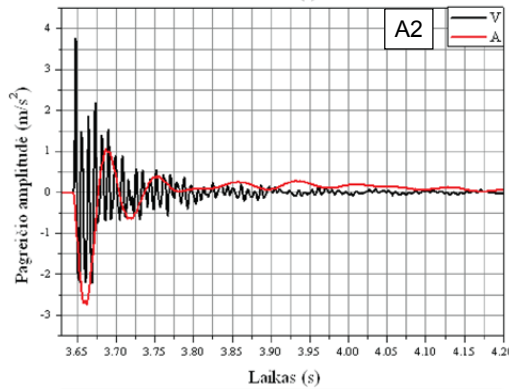
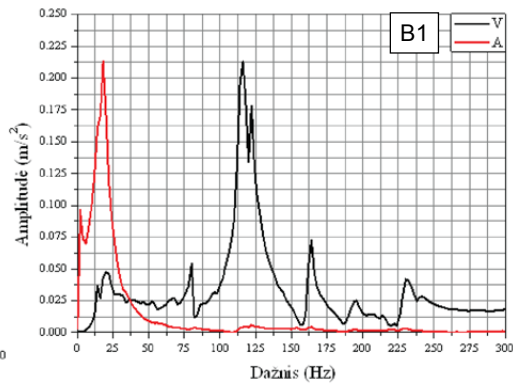
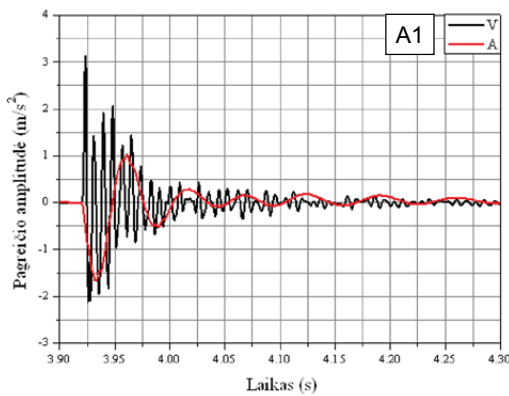
Fig. 9. The dependence of the amplitudes of vibration acceleration on time (A1 – 2 atm, A2 – 4 atm, A3 – 6 atm); frequency spectra (B1 – 2 atm, B2 – 4 atm, B3 – 6 atm)



10 pav. Dažnių priklausomybė nuo slėgio
 Fig. 10. The dependence of frequencies on pressure



12 pav. Dažnių priklausomybė nuo slėgio esant 5 kg apkrovai
 Fig. 12. The dependence of frequencies on pressure under the load of 5 kg



11 pav. Vibracijų pagreičių amplitudžių priklausomybė nuo laiko (A1 – 2 atm, A2 – 4 atm, A3 – 6 atm), dažnių spektrai (B1 – 2 atm, B2 – 4 atm, B3 – 6 atm) esant 5 kg apkrovai

Fig. 11. The dependence of the amplitudes of vibration acceleration on time (A1 – 2 atm, A2 – 4 atm, A3 – 6 atm); frequency spectra (B1 – 2 atm, B2 – 4 atm, B3 – 6 atm) at 5 kg load

Apibendrinant, galima teigti, kad pneumatinio raumens netikslinga naudoti esant mažiems slėgiams ir apkrovoms. Esant didžiausiam slėgiui išvystoma didžiausia jėga, o pagreičių vibracijų dažniai, didinant apkrovą, mažėja. Tolesni pneumatinio raumens tyrimai turėtų būti atliekami esant didžiausioms papildomoms apkrovoms (Wickramatunge, Leephakpreeda 2009).

Išvados

Atlikus bandymus nustatyta, kad:

- Didėjant apkrovai pozicionavimo tikslumas didėja. Geriausias pneumatinio raumens pozicionavimo tikslumas pasiekiamas esant didžiausiai 5 kg apkrovai. Vidurkis sudaro 0,2168 mm, esant 2 atm slėgiui, 0,2119 mm, esant 4 atm slėgiui, ir 0,118 mm, esant 6 atm slėgiui.
- Pozicionavimo tikslumas didėja didėjant slėgiui. Pneumatinis raumuo turi mažiausią vidutinį pozicionavimo nuokrypį, kai darbinis slėgis yra didžiausias – 6 atm. Kai yra toks slėgis, jis sudaro 0,06914 mm esant 5 kg apkrovai, 0,07773 mm esant 3 kg apkrovai ir 0,10842 mm esant 2 kg apkrovai.
- Pneumatinius raumenis dėl slinkimo efekto, kai slėgiai yra maži, tikslinga naudoti lėtai dirbančiuose įrenginiuose, norint pasiekti didžiausią tikslumą.
- MAS tipo pneumatinius raumenis tikslinga naudoti pozicionavimo įrenginiuose, kur reikalaujamas tikslumas yra 1 mm.
- Mažiausi vibracijų pagreičių dažniai užfiksuoti, kai buvo 6 atm slėgis ir 5 kg papildoma apkrova, todėl pneumatinius raumenis tikslingiausia naudoti esant maksimaliems leistiniams techniniams reikalavimams.

Literatūra

- Fluidic-Muscle-DMSP/MAS “FESTO“. 2012 [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. vasario 2 d.]. Prieiga per internetą: http://xdki.»Festo“.com/xdki/data/doc_ENGB/PDF/EN/DMSP-MAS_EN.PDF
- Kerscher, T.; Albiez, J.; Zöllner, J. M.; Dillmann, R. 2006. *Evaluation of the Dynamic Model of Fluidic Muscles using Quick-Release* [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. balandžio 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01639161>
- Van den Brink, S. N. 2007. *Modelling and control of a robotic arm actuated by nonlinear artificial muscles* [interaktyvus], [žiūrėta 2010 m. gruodžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/7623.pdf>

Wickramatunge, K. C.; Leephakpreeda, T. 2009. *Empirical Modeling of Pneumatic Artificial Muscle* [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. kovo 3 d.]. Prieiga per internetą: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.148.8.1175&rep=rep1&type=pdf>

Zdeněk, V.; Moučka, M. 2009. *Mechanics of pneumatic artificial muscle* [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. spalio 27 d.]. Prieiga per internetą: http://astfm.tul.cz/ladmin/soubory/casopis/File/pdf/102146varga_moucka_mechanics_of_pneumatic_artificial_muscle.pdf

RESEARCH ON DYNAMIC PARAMETERS AND POSITION ACCURACY OF PNEUMATICS MUSCLES

E. Sadovskij, V. Prokopovič, V. Mokšin

Abstract

The article deals with pneumatic muscle MAS-20-200N-AA-MC-O, its dynamic properties and positioning accuracy as well as overviews experimental and theoretical works. The paper introduces the diagrams of vibration acceleration, discusses displacement dependence on pressure and load and presents a diagram of speed dependence on operating pressure. Vibroacceleration has been measured employing two accelerometers. Measurements have been carried out in three mutually perpendicular directions: *x*, *y* and *z*. The most important one is direction *z*, because this way the muscle performs a valuable displacement along the axis of the muscle, since this direction is the movement of the working muscle.

Keywords: pneumatic artificial muscles, vibration acceleration, amplitude, frequency, positioning accuracy.