

## MECHATRONINIO KAMPO MATAVIMO KOMPARATORIAUS DINAMIKOS TYRIMAI

Valdemar PROKOPOVIČ<sup>1</sup>, Vytautas MAKARSKAS<sup>2</sup>, Artūras KILIKEVIČIUS<sup>3</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>valdemar.prokopovic@vgtu.lt; <sup>2</sup>vytautas.makarskas@vgtu.lt; <sup>3</sup>arturas.kilikevicius@vgtu.lt*

**Santrauka.** Straipsnyje aprašyti precizinės kampo komparatoriaus mechaninės sistemos dinamikos tyrimai. Tyrimo tikslas nustatyti precizinės kampo komparatoriaus mechaninės sistemos stabilumą. Sudarytas precizinės kampo komparatoriaus kariatėlės dinaminis modelis, kuriuo pasitelkus buvo atliktas teorinis tyrimas „Matlab“ aplinkoje. Atlikti tyrimai leidžia nustatyti sistemos dinamines charakteristikas, kurios parodo sistemos trūkumus.

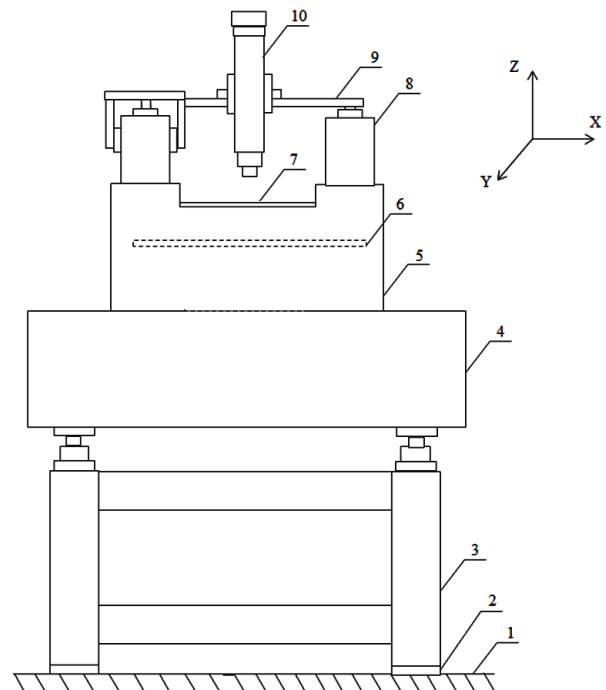
**Reikšminiai žodžiai:** komparatorius, kariatėlė, virpesiai, dinaminės charakteristikos.

### Įvadas

Šiuolaikinėje pramonėje bei statyboje svarbią vietą užima tikslūs kampų matavimo prietaisai – limbai. Todėl jiems yra keliami labai dideli reikalavimai ir jiems tikrinti yra išrasti specialūs įrenginiai (Augustinavičius, Čereška 2010; Kasparaitis *et al.* 2012; Vekteris, Kasparaitis 2012). Vienas iš įrenginių, kuris tikrina limbų brūkšnius, yra UAB „Precizika Metrology“ sukurtas kampo komparatorius (1 pav.) (Kilikevičius *et al.* 2006; Kasparaitis *et al.* 2007; Prielaidas, Lazdinis 2011).

Kampo komparatorius yra sudėtinis įrenginys, kurio pagrindinės dalys yra šios: atspari vibracijai bazė, pavyzdinio kampo sistema (precizinis sūklis, pavaros ir posūkio matavimo sistema), detektavimo sistema (fiksuojanči limbo brūkšnių padėti), mechaninės sistemos ir mazgai (kalibratoriaus funkcionalumui užtikrinti), skaičiavimo ir valdymo kompleksas (Rudokas, Kasparaitis 2013).

Literatūroje precizinių matavimo komparatorių ir jų konstrukcijų dinamika yra nepakankamai ištirta (Kilikevičius *et al.* 2014, 2010). Atsižvelgiant į tai, mažai dėmesio yra skirta ir pagrindiniam kampo komparatoriaus sistemos junginiui – kariatėlei, ant kurios įtvirtinta limbo padėties nustatymo ir brūkšnių detektavimo optinė sistema (mikroskopas su keičiamais objektyvais). Komparatorius kampą matuoja ir kalibruoja dinaminio režimu ir kampo matavimo sistemai dirbant šiuo režimu atsiranda šalutinių poveikių: 1) iš aplinkos ateinantys išoriniai žadinimai; 2) taip pat poveikių atsiranda dėl kampo komparatoriaus sistemos vidinių elementų (kampo komparatoriaus kariatė-



1 pav. Kampo komparatoriaus stendas: 1 – pamatas, 2 – vibroizoliacija, 3 – stovas, 4 – granitinė plyta, 5 – granitinė atrama, 6 – sliekratis, 7 – sukamas staliukas, 8 – granitiniai kreipikliai, 9 – kariatėlė, 10 – mikroskopas

Fig. 1. Stand of the angle measurement comparator: 1 – foundation; 2 – vibration isolators; 3 – frame; 4 – granite plate; 5 – granite support; 6 – worm wheel; 7 – indexing table; 8 – granite guides; 9 – carriage; 10 – microscope.

tėlė, oro guoliai) judesių ir deformacijų, o šių judesių ir deformacijų atsiranda dėl dinaminių reiškinių (dinaminių poveikių). Bet kokie išoriniai ar vidiniai trikdžiai gali paveikti kampo matavimo tikslumą (Kilikevičius *et al.* 2009).

Pagrindinis straipsnyje nagrinėjamų tyrimų tikslas – kampo matavimo sistemos nestabilumas, kurį sukelia iš aplinkos ateinantys virpesiai.

### Teoriniai tyrimai

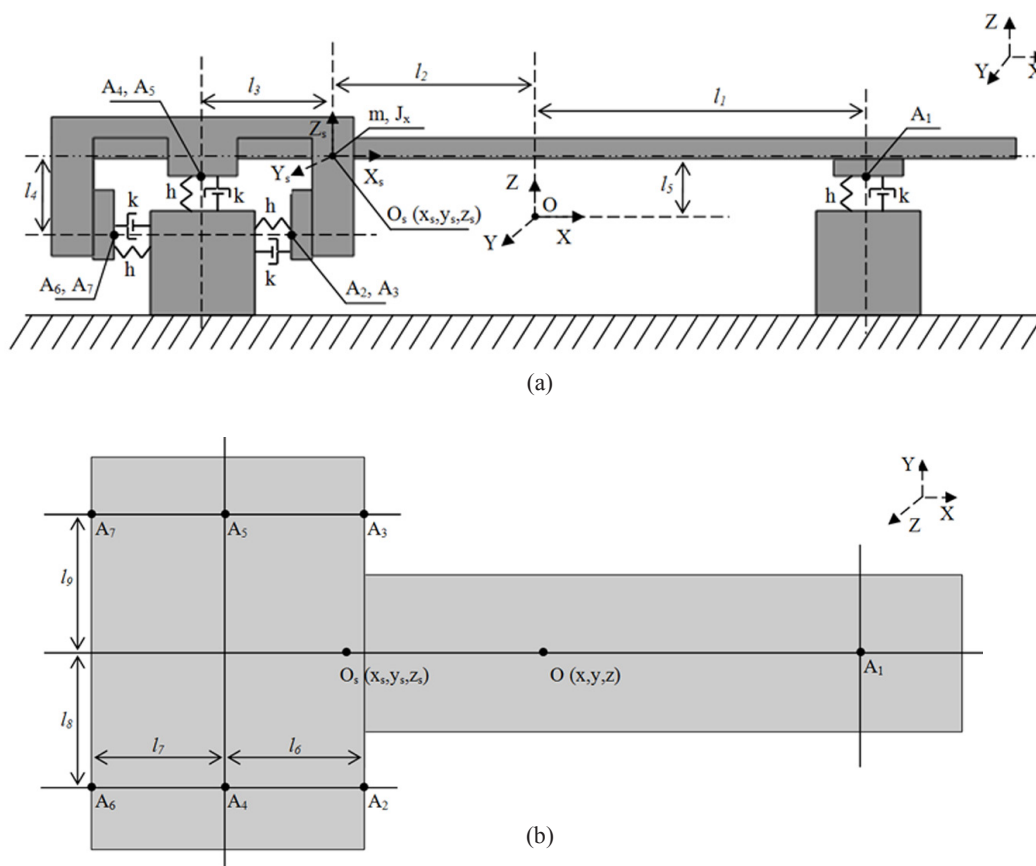
Kadangi norint patobulinti komparatoriaus konstrukciją, pirmiausia reikia pakeisti kariatėlės konstrukciją, darbe buvo tiriama kariatėlės sistema. Tam tikslui sudarytas tos kariatėlės dinaminis modelis (2 pav.). Atmetus granitinio pagrindo posistemę, trūkstami ryšiai yra pakeičiami pamatuotais eksperimentiškai išoriniais pagrindo žadinimais  $x_0, y_0, z_0, a_0, b_0, g_0$ , esančiais prie atitinkamų koordinatinių.

Išrenkamos apibendrintosios Lagranžo koordinatės, nustatančios komparatoriaus kariatėlės padėtį virpesių metu. Tuo tikslu pradžioje sudaroma koordinatinių sistema  $O_s, X_s, Y_s, Z_s$ , kuri yra kietai sujungta su kampo kompara-

toriaus kariatėle, kartu judančia su ja virpesių metu. Šios sistemos pradžios taškas  $O_s$  parenkamas sutampantis su kampo komparatoriaus kariatėlės standumo centru. Paskui sudaroma kita, nejudanti, koordinatinių sistema  $O, X, Y, Z$ , kuri būdama kampo komparatoriaus kariatėlės ramybės būsenos, kai ją veikia tik svorio jėga, sutampa su sistema  $O_s, X_s, Y_s, Z_s$  (tokioje padėtyje sistemos  $O_s, X_s, Y_s, Z_s$  ir  $O, X, Y, Z$  parodytos 2 pav.). Kampo komparatoriaus kariatėlei virpant laiko momentu  $t$  sistemos  $O_s, X_s, Y_s, Z_s$  pradinis taškas  $O_s$  nesutampa su tašku  $O$  ir jo padėtis nejudančioje koordinatinių sistemoje  $O, X, Y, Z$  apibrėžiama koordinatėmis  $x, y, z$ . Be to, laikoma, kad kampo komparatoriaus kariatėlė pasisuka mažais kampais  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  apie koordinatinių ašis  $X_s, Y_s, Z_s$ .

Tokių atveju kampo komparatoriaus kariatėlės padėtis virpesių metu apibrėžiama šešiomis apibendrintosiomis Lagranžo koordinatėmis  $x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ .

Tai bendras kampo komparatoriaus kariatėlės, kai ją galima laikyti kietuoju kūnu, dinaminio modelio atvejis. Modeliui supaprastinti laikome, kad kampo komparatoriaus kariatėlės atramos deformuojasi tikta vertikalia kryptimi (jų vienodi standumo ir pasipriešinimo koeficientai  $k, h$ ).



2 pav. Kampo komparatoriaus kariatėlės dinaminis modelis (a – vaizdas iš priekio, b – vaizdas iš viršaus)

Fig. 2. Dynamic model of carriage of angle comparator (a – front view, b – a top view)

Sistemos lygtį išsprendžiame sudarydami lygtis, atsižvelgdami į dvi atitinkamas ilgio koordinates  $x$ ,  $z$  ir tris posūkio koordinates  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ,  $\varphi_z$ :

$$x = \frac{1}{a_{1,1}(p)} F_1(t);$$

$$z = \frac{1}{a_{2,2}(p)} F_2(t);$$

$$\varphi_x = \frac{1}{a_{3,3}(p)} [F_3(t) - a_{3,4}(p)\varphi_y - a_{3,5}(p)\varphi_z - h_{\varphi_x}];$$

$$\varphi_y = \frac{1}{a_{4,4}(p)} [F_4(t) - a_{4,3}(p)\varphi_x - a_{4,5}(p)\varphi_z - h_{\varphi_y}]; \quad (1.1)$$

$$\varphi_z = \frac{1}{a_{5,5}(p)} [F_5(t) - a_{5,3}(p)\varphi_x - a_{5,4}(p)\varphi_y - h_{\varphi_z}].$$

Turint (1.1) lygtis, gaunama nagrinėjamosios sistemos struktūrinė schema, parodyta 3 pav. Į šią schemą įeina keturkampiai blokai su jų viduje įrašytais funkcijomis  $a_{ij}(p)$ ,  $h_i(p, x, t)$ ,  $W_i(p, x, t)$ .

Išanalizavus struktūrinę schemą (žr. 3 pav.) bei išreiškus atitinkamas (1.1) lygtis, buvo gautos 1.2, 1.3 ir 1.4 formulės pagal koordinates  $x$ ,  $z$ ,  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  ir  $\varphi_z$ .

$$x = \frac{1}{mp^2 + 3hp + 3k}; \quad (1.2)$$

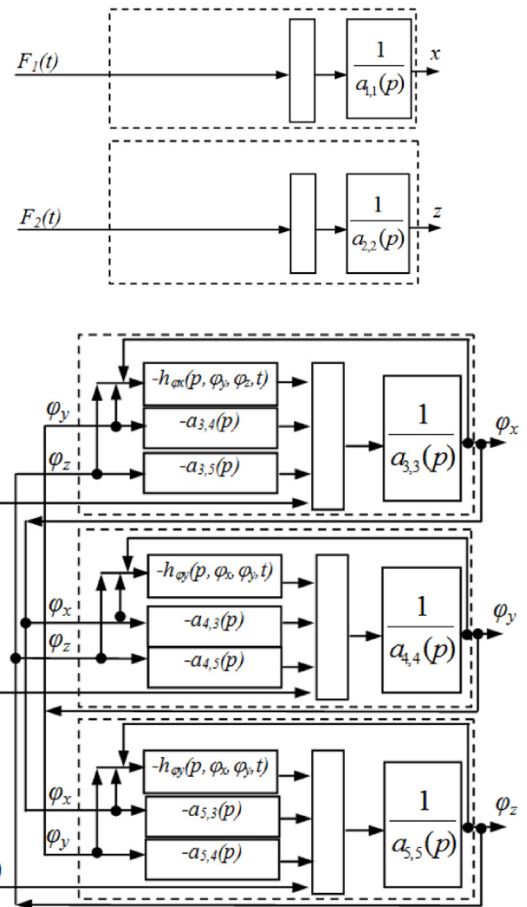
$$z = \frac{1}{mp^2 + 3hp + 3k}; \quad (1.3)$$

$$\varphi_x = \frac{p^2(-J_{xsys}\varphi_y - J_{xszs}\varphi_z) + F_3}{J_{xs}p^2};$$

$$\varphi_y = \frac{p^2(-J_{xsys}\varphi_x - J_{yszs}\varphi_z) + F_4}{J_{ys}p^2 + 2kl_1^2p + 2kl_1^2};$$

$$\varphi_z = \frac{p^2(J_{xszs}\varphi_x + J_{yszs}\varphi_y) + F_5}{J_{ys}p^2}. \quad (1.4)$$

Prieš pradėdant modeliavimą reikia turėti skaitines reikšmes, kurios turi būti įvestos į reikiamus langelius. Masės ir inercijos momentų parametrai buvo paimti iš „SolidWorks“ programa sukurtos kariatėlės modelio. Standumo ir slopinimo koeficientai buvo paimti iš A. Slocum, M. Basaran, R. Cortesi, A. J. Hart straipsnio (Slocum *et al.* 2003). Modelio parametrų reikšmės pa-



3 pav. Mechaninės sistemos struktūrinė schema, atitinkanti (1.1) lygtių sistemą

Fig. 3. Mechanical systems flowchart corresponding to (1.1) the system of equations

teiktos 1 lentelėje. Šuolinio žadinimo signalų parametrų reikšmės parodytos 2 lentelėje.

Paleidus „Matlab“ programą buvo gauti virtualių oscilografų rezultatai (4 pav.), kurie rodo sistemos reakciją į pateiktus 2 lentelėje žadinimo signalus.

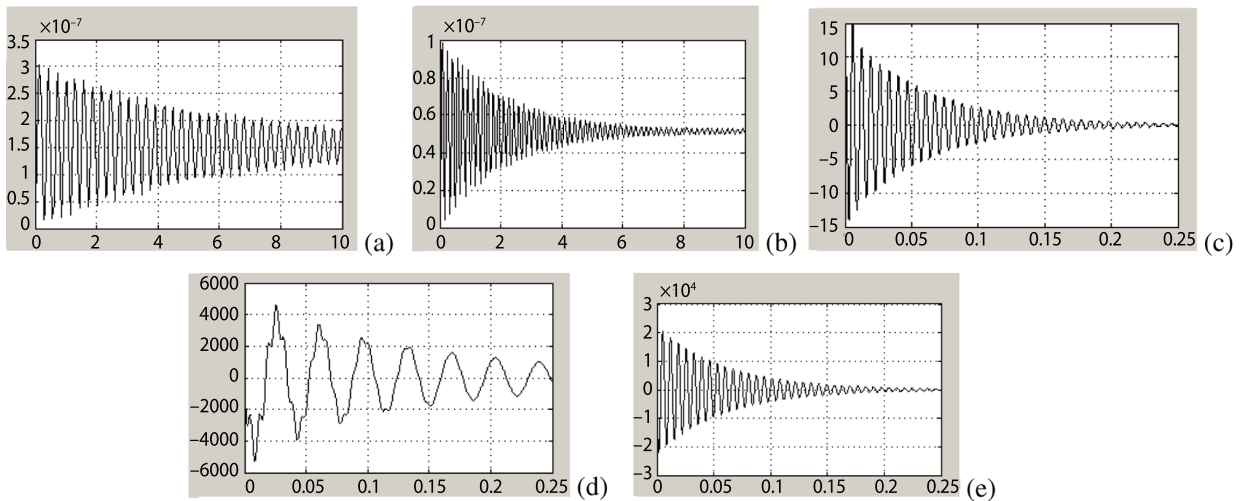
Sistemos amplitudinės dažninės ir fazinės dažninės charakteristikos (Bodė diagramos) pateiktos 5, 6 ir 7 pav., jos buvo gautos taikant LTI objektų stebėtoją.

5 pav. gauta sistemos amplitudinė dažninė charakteristika rodo, kad kai kampo matavimo komparatoriaus kariatėlė juda tik ilgio koordinatė  $x$  ašyje, sistemos rezonansinis dažnis yra 3,45 Hz. 6 pav. gauta sistemos amplitudinė dažninė charakteristika rodo, kad kai kampo matavimo

1 lentelė. Modelio parametrų reikšmės

Table 1. The model of parameter values

Parametras	Masė $m$ , kg	Inercijos momentas					Atstumas $l_j$ , m	Standumo koeficientas $k$ , N/m	Slopinimo koeficientas $h$ , Ns/m
		$J_{xs}$ , kgm <sup>2</sup>	$J_{ys}$ , kgm <sup>2</sup>	$J_{xsys}$ , kgm <sup>2</sup>	$J_{yszs}$ , kgm <sup>2</sup>	$J_{xszs}$ , kgm <sup>2</sup>			
Skaitinė reikšmė	13,83	0.08	0,54	-0,02	0	0	0,15	22 000	$2,5 \times e7$

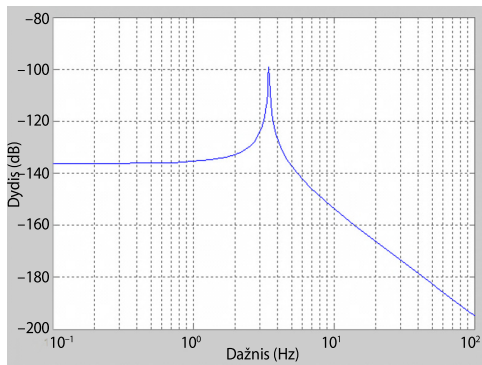


4 pav. Koordinatę  $x$  (a),  $z$  (b),  $\varphi_x$  (c),  $\varphi_y$  (d),  $\varphi_z$  (e) kitimas nuo šuolinių apkrovų, nustatytų 2 lentelėje  
 Fig. 4. Coordinates  $x$  (a),  $z$  (b),  $\varphi_x$  (c),  $\varphi_y$  (d),  $\varphi_z$  (e) during the step load tasks in Table 2

2 lentelė. Šuolinio žadinimo signalų parametrai  
 Table 2. Parameters of jumping excitation signals

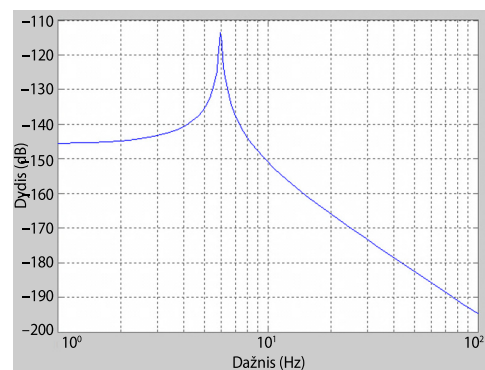
Koordinatė	„Matlab“ žymėjimas	Šuolio laikas, s	Apkrovos dydis
$x$	Px	0	1 N
$z$	Pz	0	1 N
$\varphi_x$	Phix	0	1 Nm
$\varphi_y$	Phiy	0,5	1 Nm
$\varphi_z$	Phiz	1,0	1 Nm

komparatoriaus kariatelė juda tik ilgio koordinatę  $z$  ašyje, sistemos rezonansinis dažnis yra 5,98 Hz. 7 pav. gauti kampo komparatoriaus kariatelės modeliavimo rezultatai rodo, kad a dalyje (kai sistema juda tik posūkiu koordinatėje  $\varphi_x$ ) sistemos rezonansiniai dažniai yra: 27,6 Hz, 28,1 Hz, 143 Hz, 145 Hz, 203 Hz ir 208 Hz. b dalyje (kai sistema juda tik posūkiu koordinatėje  $\varphi_y$ ) sistemos rezonansiniai dažniai yra: 28,1 Hz, 143 Hz, 145 Hz ir 208 Hz. c dalyje



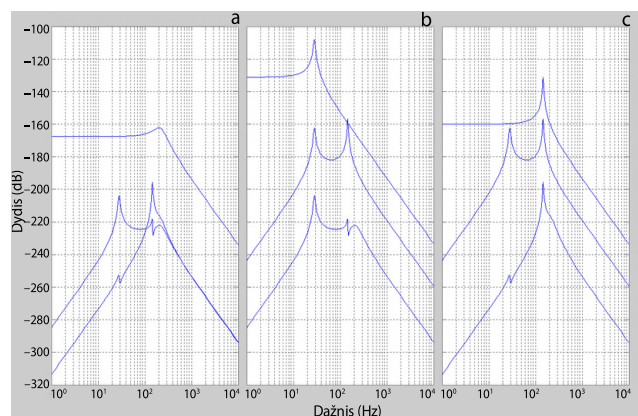
5 pav. Sistemos amplitudinė dažninė charakteristika esant ilgio koordinatės  $x$  šuoliui

Fig. 5. System amplitude frequency response at length coordinates  $x$  leap



6 pav. Sistemos amplitudinė dažninė charakteristika esant ilgio koordinatės  $z$  šuoliui

Fig. 6. System amplitude frequency response at length coordinates  $z$  leap



7 pav. Sistemos amplitudinės dažninės charakteristikos esant posūkių koordinatę  $\varphi_x$  (a),  $\varphi_y$  (b),  $\varphi_z$  (c) šuoliams

Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics of the system at the turn of coordinates  $\varphi_x$  (a),  $\varphi_y$  (b),  $\varphi_z$  (c) leaps

(kai sistema juda tik posūkio koordinatėje  $\varphi_z$ ) sistemos rezonansiniai dažniai yra: 27,6 Hz, 28,1 Hz ir 145 Hz.

## Išvados

Atlikus teorinį tyrimą bei naudojant programinį paketą „Matlab“ buvo ištirta kampo komparatoriaus matavimo sistema (karietėlė, oro guoliai ir granitiniai kreipikliai) kaip kietasis nesideformuojantis kūnas. Šiame tyrime buvo nustatyti kampo komparatoriaus matavimo sistemos rezonansiniai dažniai:  $27 \pm 0,5$  Hz;  $144 \pm 1$  Hz;  $205 \pm 2$  Hz.

Atliktų tyrimų rezultatus reiktų įvertinti eksploatuojant kampo komparatorių, t. y. vengti, kad sistema dirbtų artimais dažniais, kurie nustatyti teorinio tyrimo metu.

## Literatūra

- Augustinavičius, G.; Čereška, A. 2010. Kampų matavimo įrangos apžvalga ir plėtros perspektyvos, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(4): 46–49. [http://dx.doi.org/10.3846/mla.2010.068\\_](http://dx.doi.org/10.3846/mla.2010.068_)
- Kasparaitis, A.; Kilikevičius, A.; Barakauskas, A.; Mokšin, V. 2012. Experimental research of vibrations of angle measurement comparator, *Journal of Vibroengineering* 14(4): 1760–1765. ISSN 1392–8716.
- Kasparaitis, A.; Vekteris, V.; Kilikevičius, A. 2007. Investigation of vibrations acting on mechatronic comparator, *Ultragarsas* 1(62): 38–41. ISSN 1392–2114.
- Kilikevičius, A.; Petraška, A.; Juraitis, S. 2010. Measurement errors of comparator on carriage vibrations, *Journal of Vibroengineering* 11(1): 347–354. ISSN 1392–8716.
- Kilikevičius, A.; Prokopovič, V.; Makarskas, V. 2014. Kampo matavimo komparatoriaus dinaminų charakteristikų tyrimai, *Mokslas – Lietuvos ateitis*: 1–4.
- Kilikevičius, A.; Vekteris, V. 2006. Diagnostic testing of the comparator carriage vibrations, *Ultragarsas* 2(59): 26–30. ISSN 1392–2114.
- Kilikevičius, A.; Vekteris, V.; Slivinskas, K.; Kasparaitis, A. 2009. Investigation of dynamics of the mechatronic comparator, *Ultragarsas* 2(64): 17–23. ISSN 1392–2114.
- Priekšaidas, A.; Lazdinas, R. 2011. Kampų matavimo tikslumo tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 3(6): 15–18. <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2011.103>
- Rudokas, V.; Kasparaitis, A. 2013. Precizinio kampo komparatoriaus vidinių ir išorinių trikdžių temperatūrinių gradientų tyrimas, iš *16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuva ateitis“ teminė konferencija „Biomechanika ir mechatronika“*, 2013 m. balandžio 18–19 d., Vilnius, VGTU mechanikos fakultetas. Vilnius: Technika, 76–80.
- Slocum, A.; Basaran, M.; Cortesi, R.; Hart, A. J. 2003. Linear motion carriage with aerostatic bearings preloaded by inclined iron core linear electric motor, *Precision Engineering* 27: 382–394. [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-6359\(03\)00037-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-6359(03)00037-0)
- Vekteris, V.; Kasparaitis, A. 2012. *Matavimų teorija ir praktika*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 248 p. <http://dx.doi.org/10.3846/1318-S>

## RESEARCH OF DYNAMICS OF MECHATRONICAL ANGLE MEASUREMENT SYSTEM

V. Prokopovič, V. Makarskas, A. Kilikevičius

### Summary

The article describes the dynamics research of mechanical system of angle comparator. The goal of research is to determine the stability of mechanical system of angle comparator. The theoretical research in Matlab environment was conducted and the dynamic model of carriage of angle comparator was created.

**Keywords:** comparator, carriage, vibration, dynamic characteristics.