

Par lodes autobalansiera autobalansēšanas režīma stabilitāti

Guntis Strautmanis, Rīgas Tehniskā universitāte

Kopsavilkums. Darbā izskatīts lodes autobalansieris ar vertikālu asi, kam korpuss izvietots ar ekscentricitāti attiecībā pret rotācijas asi. Autobalansieris ar korpusa tora formu satur vienu lodveida koriģējošo masu, kas brīvi ripo autobalansiera korpusā gan pa riņķi, gan šķērsgrīzumā. Tas līdz minimumam samazina pretestības spēkus lodītes kustības režīmā, bet tajā pašā laikā samazina iespēju iedarbināt autobalansieri.

Eksperimentālie pētījumi ar lodes balansieri parādīja, ka vienlaicīgi ar darba režīmu, kad lodīte apstājas attiecībā pret rotējošo korpusu apstājas relatīvi rotējošajam korpusam preti disbalansam, ir režīms, kad lodīte nepārtraukti kustas attiecībā pret balansiera korpusu. Konstatēts, ka uz lodīti darba režīmā darbojas spēki, kas cenšas pārvietot to autobalansiera korpusā preti disbalansam. Jo lodīte tuvāk optimālajai vietai, jo mazāks tangenciālais spēks uz to darbojas. Eksperimentāli iegūta autobalansiera konstrukcija, kas nodrošina darba režīmu, kad lodītes apstājas attiecībā pret korpusu preti disbalansam rotora rotācijas laikā. Saņemts patents balansiera konstrukcijai. Autobalansierim ir sastādīts matemātiskais modelis no diviem diferenciāliem vienādojumiem. Aprēķinu rezultātā secināts, ka balansiera (ar toroidālu korpusu) lodītei ir vismaz divi kustības režīmi, no kuriem viens ir darba režīms, otrs – lieks režīms.

Atslēgas vārdi: autobalansieris, darba režīms, lodīte, rotors, toroidāls korpuss.

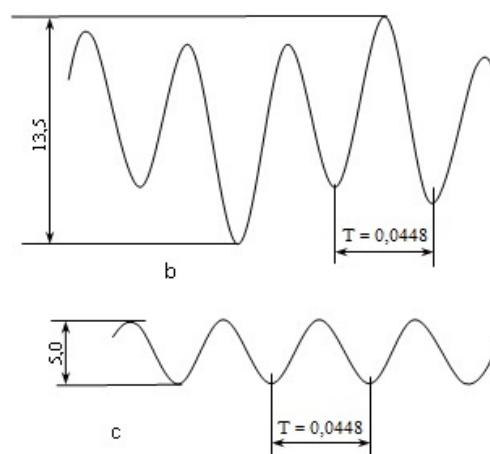
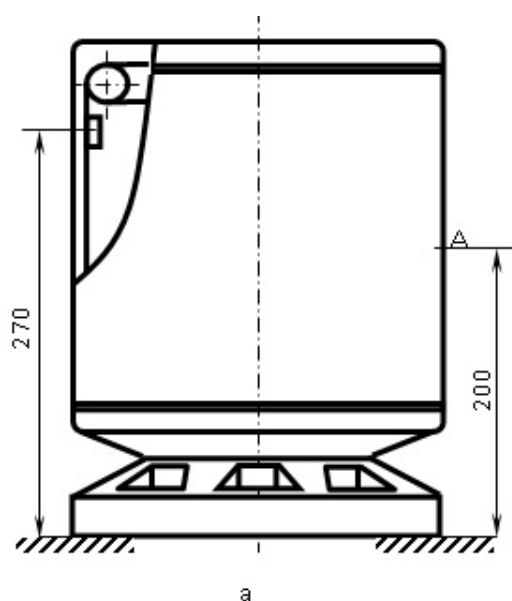
I. IEVADS

Lai izstrādātu paaugstinātas kvalitātes konstrukcijas, nepieciešams samazināt rotoru vibrācijas. Ļoti svarīgi samazināt vibrācijas kā nostabilizētā, tā arī pārējos rotora kustības režīmos. Starp iekārtām, kas spēj samazināt rotora vibrācijas, ir automātiskie balansieri ar lodītēm, šķidrumu u.c.

Lai nodrošinātu lodītēm optimālo vietu balansiera iekārtas korpusā, jāsamazina berzes spēks līdz minimumam. Tas ir iespējams, ja lodītei ar korpusa virsmu ir tikai viens kontakta punkts, t.i., korpusam jābūt toroidālā formā ar apaļu šķērsgrīzumu. Eksperimentālos pētījumos ar reālām autobalansiera iekārtām ar vertikālo rotācijas asi ir konstatēts, ka lodītēm ir dažādi kustības režīmi, kad rotors rotē ar darba ātrumu. Balansēšanas režīmā lodītes nekustīgi apstājas attiecībā pret balansiera korpusu preti disbalansam [1]. Otrajā režīmā lodītes stabili un nepārtraukti kustas attiecībā pret balansiera iekārtas korpusu un rotoram palielinās vibrācijas. Šis lodītes nepārtrauktās kustības gadījums tiek eksperimentāli realizēts centrifūgas pētīšanā [2]. Lai autobalansierim nodrošinātu darba režīmu, eksperimentāli iegūta konstrukcija [3], kurā realizējas tikai darba režīms, t.i., rotora rotācijas laikā lodītes apstājas attiecībā pret korpusu preti disbalansam.

II. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Eksperimentālā centrifūgas shēma un korpusa vibrāciju amplitūdas divos lodītes kustības režīmos redzamas 1. attēlā. Rotora disbalanss tiek imitēts ar masu, kas piestiprināta pie centrifūgas tvertnes. Masa, 50 g, tiek piestiprināta 270 mm attālumā no pamata. Korpusa vibrācijas tiek mērītas A punktā 200 mm attālumā no pamata (1.a att.). Centrifūgas rotors rotē ar leņķisko ātrumu $\omega = 140 \text{ s}^{-1}$.



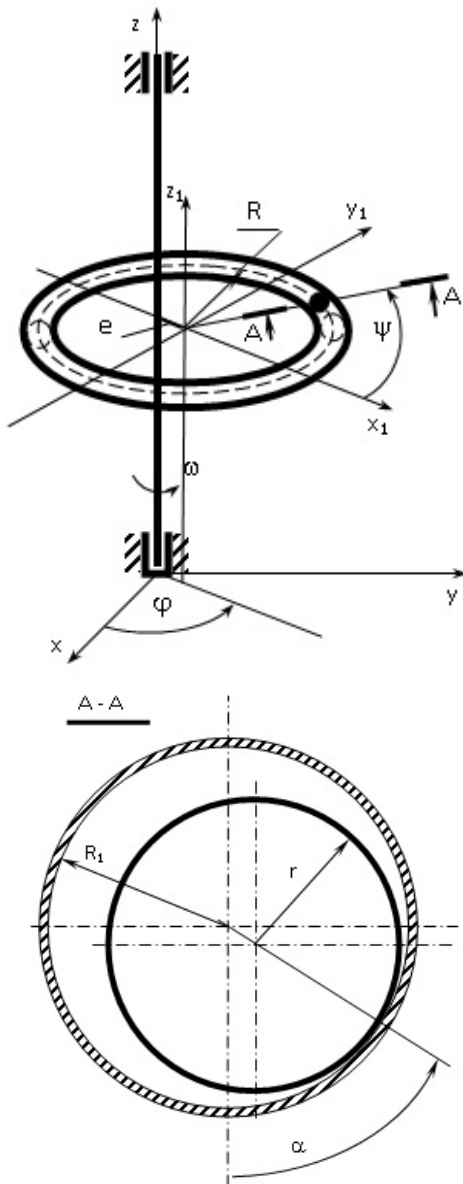
1. att. a – eksperimentālā centrifūgas shēma; korpusa vibrāciju amplitūdas A punktā divos režīmos: b – lodītes stabili un nepārtraukti kustas attiecībā pret balansiera iekārtas korpusu; c – autobalansēšanas gadījumā ($T = 0,0448 \text{ s}^{-1}$ – rotācijas periods).

No lodes autobalansiera ar vertikālo rotācijas asi eksperimentālā pētījuma redzams, ka balansierim ir dažādi darba režīmi. Viena režīmā lodītes stabili un nepārtraukti kustas attiecībā pret balansiera iekārtas korpusu, un tā rezultātā centrifūgas korpusam palielinās vibrācijas (1.b att.).

Otrajā režīmā lodītes apstājas attiecībā pret balansiera korpusu relatīvi nekustīgi pretī disbalansam, un tas ir balansēšanas režīms. Centrifūgas korpusam šajā režīmā samazinās vibrācijas (1.c att.).

III. LODES BALANSIERA SKAITLISKĀ SHĒMA UN MATEMĀTISKAIS MODELIS

Šajā darbā tiek izskatīts stingrs, simetrisks, vertikāls rotors, kas iestiprināts gultņos bez iespējas pārvietoties telpā. Balansiera iekārtas korpusam ir toroidāla forma, un tā iekšpusē atrodas lodīte ar masu m . Toroidālā korpusa ģeometriskā ass tiek nobīdīta attiecībā pret rotācijas asi par lielumu e .



2. att. Ratora shēma.

Koriģējošās masas (lodītes) stāvvieta tiek noteikta ar divām koordinātām α un ψ kustīgā koordinātu sistēmā, kas tiek savienota ar rotoru un rotē ar leņķisko ātrumu ω . Ratora skaitliskā shēma ar divām brīvības pakāpēm parādīta 2. attēlā. Rotors rotē ar konstantu leņķisko ātrumu $\omega = 140 \text{ s}^{-1}$.

Lodītes smaguma centra koordinātas nekustīgajā koordinātu sistēmā ir:

$$x = e \cdot \cos(\omega t) + [R + (R_1 - r) \cdot \sin \alpha] \cdot \cos(\omega t + \psi); \quad (1)$$

$$y = e \cdot \sin(\omega t) + [R + (R_1 - r) \cdot \sin \alpha] \cdot \sin(\omega t + \psi); \quad (2)$$

$$z = -(R_1 - r) \cdot \cos \alpha. \quad (3)$$

Diferenciālie kustības vienādojumi rotora sistēmās ar automātisko balansieri saskaņā ar skaitlisko shēmu ir:

$$\ddot{\psi} = -\frac{10(R_1 - r)}{7R}(\omega + \dot{\psi})\dot{\alpha} \cos \alpha + \frac{5e\omega^2}{7R}[\cos \varphi \sin(\varphi + \psi) - \sin \varphi \cos(\varphi + \psi)] - \frac{5N \cdot k}{7 \cdot R \cdot r} \text{sign}(\dot{\psi}), \quad (4)$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{5e\omega^2 \cos \alpha}{7(R_1 - r)}[\cos \varphi \cos(\varphi + \psi) + \sin \varphi \sin(\varphi + \psi)] + \frac{5R \cos \alpha}{7(R_1 - r)}(\omega + \dot{\psi})^2 - \frac{5g \sin \alpha}{7(R_1 - r)} - \frac{5N \cdot k \cdot R_1}{7 \cdot (R_1 - r)^2 \cdot r} \text{sign}(\dot{\alpha}), \quad (5)$$

kur

ψ – leņķis, kas nosaka koriģējošās masas smaguma centra stāvokli attiecībā pret taisni, kas savieno rotora asi ar balansiera korpusu ass rotācijas virzienā;

α – leņķis, kas nosaka koriģējošās masas smaguma centra stāvokli korpusa šķērs griezumā attiecībā pret vertikālo taisni, kura iet caur korpusa šķērs griezumam centru;

k – rotācijas berzes koeficients starp lodītes un balansiera korpusu rotācijas virzienā un šķērs virzienā, m;

$\varphi = \omega \cdot t$ – rotora pagrieziens leņķis ap savu asi, rad;

R – tora viduslīnijas rādiuss, m;

R_1 – tora šķērs griezumam rādiuss, m;

r – lodītes rādiuss, m;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – brīvās krišanas paātrinājums;

e – rotora ekscentricitāte;

N – lodītes īpatnējais normālais spēks pret balansiera virsmu, m/s^2 .

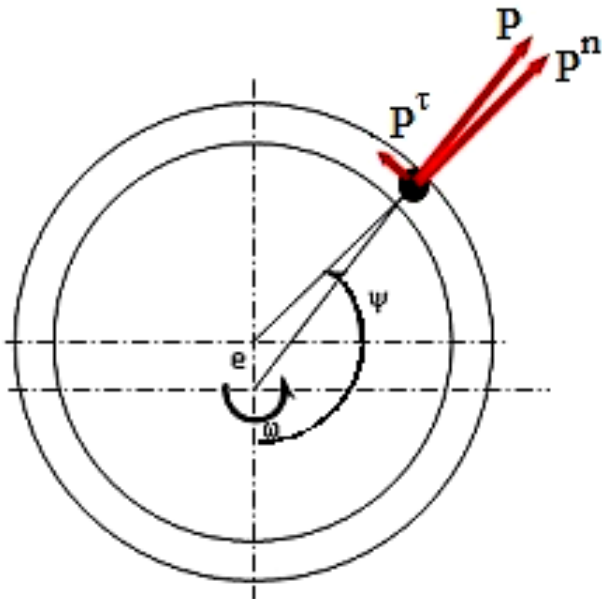
$$N = g \cdot \cos(\alpha) + R \cdot (\dot{\phi} + \dot{\psi})^2 \sin(\alpha) + (R_1 - r) \cdot \dot{\alpha}^2. \quad (6)$$

IV. MATEMĀTISKĀ MODEĻA PĒTĪŠANA

Diferenciālie kustības vienādojumi (1) un (2) rotora sistēmās ar automātisko balansieri tiek pētīti ar *Spring* programmu [4], ar kuru iespējams aprēķināt lodītes kustību gan darba, gan liekajā režīmā.

Lodītei, kas atrodas autobalansiera toroidālā korpusā, rotora rotācijas laikā ir dažādi kustības režīmi. Viens no tiem ir tāds, ka lodīte apstājas attiecībā pret autobalansiera korpusu no disbalansa pretējās malas uz tora sānu malu, t.i., $\psi = 3,14156$ rad un $\alpha = 1,56825$ rad. Šo lodītes kustības veidu kopā ar autobalansiera korpusu nosaucam par darba režīmu. Šajā režīmā uz lodīti darbojas spēks, kas sadalās divās komponentēs. Viena spēka komponente darbojas radiālā virzienā, bet otra – tangenciālā. Tangenciālā komponente darba režīmā cenšas pārvietot lodīti pretēji rotora disbalansam. Taču – jo tuvāk lodīte atrodas darba režīma vietai ($\psi = 3,14156$ rad), jo mazāks tangenciālais spēks $P\tau$ darbojas uz lodīti (3. att.). Tieši darba režīma vietā, kur $\psi = 3,14156$ rad, tangenciālais spēks $P\tau = 0$. Ja lodīte izies no šīs vietas, tad parādīsies tangenciālais spēks, kas atgriezīs lodīti atpakaļ vietā.

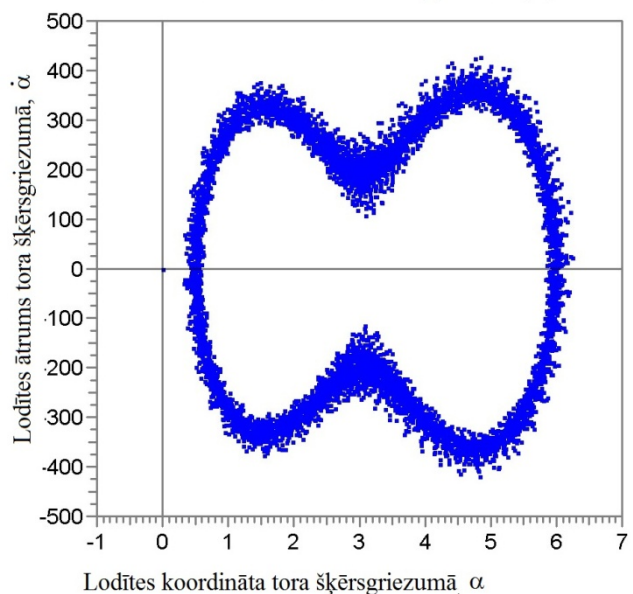
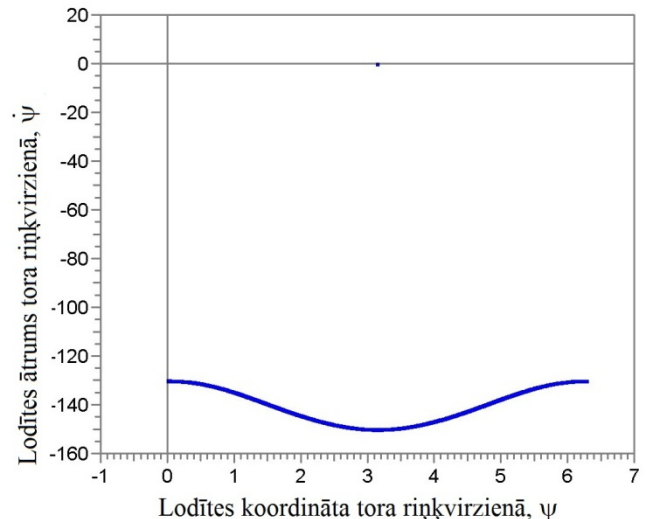
Otrajā lodītes kustības režīmā tā nepārtraukti kustas attiecībā pret autobalansiera korpusu gan tora riņķa virzienā, gan šķērsvirzienā. Šo lodītes kustības veidu nosaucam par stabilo lieko kustības režīmu (4. att.).



3. att. Spēku sistēma, kas darbojas uz lodīti darba režīmā.

Pirmais kustības režīms tiek pētīts, ja ir šādi rotora sistēmas parametri:

- $R = 0,2$ m – balansiera viduslīnijas rādiuss;
- $R_1 = 0,015$ m – balansiera šķērsgrīzuma rādiuss;
- $r = 0,0125$ m – lodītes rādiuss;
- $\omega = 140$ s⁻¹ – rotora leņķiskais ātrums;
- $e = 0,02$ m – balansiera korpusa ekscentricitāte attiecībā pret rotācijas asi;
- $k = 10^{-5}$ m – berzes koeficients.



4. att. Lieka kustības režīma fāžu portrets.

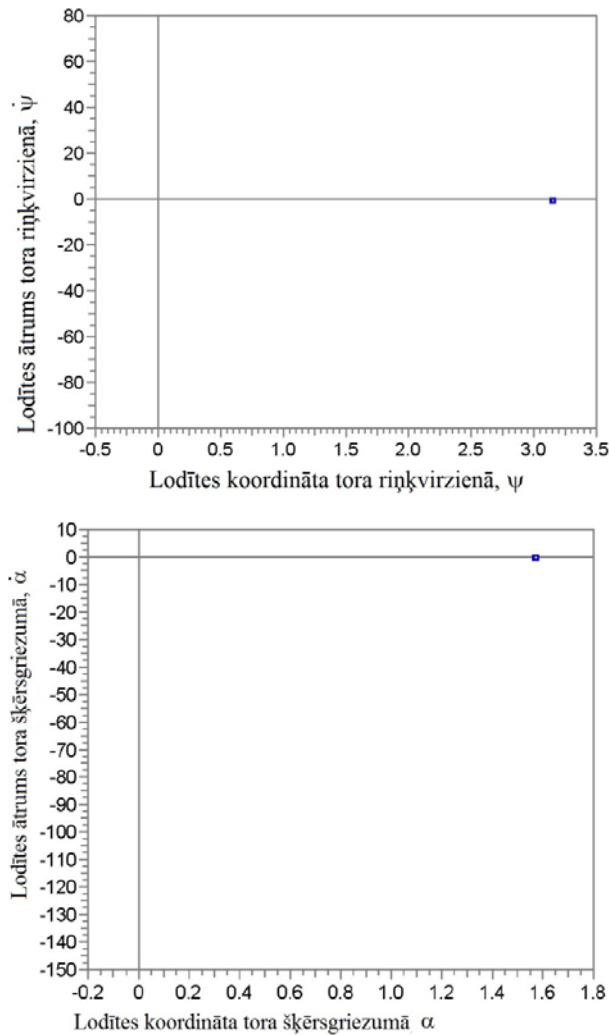
V. PĒTĪŠANAS REZULTĀTI

5. attēlā redzams, ka lodīte darba režīmā apstājas toroidālā korpusā rotācijas virzienā $\psi = 3,14156$ rad, un šķērsvirzienā uz korpusa virsmas ar koordinātu $\alpha = 1,56825$ rad.

Lai atrastu sākuma nosacījumus, pie kuriem lodīte izies darba režīmā, tiek konstruēti grafiki lodītes fāžu koordinātu sistēmā. Tumšais laukums nozīmē, ka pie šiem ψ un ψ sākuma nosacījumiem (sākuma fāžu koordinātas šķērsgrīzumā $\alpha = 0$ un $\dot{\alpha} = 0$) balansieriem tiek nodrošināts darba režīms. Ja sākuma nosacījumi ψ un ψ tiks ņemti ārpus tumšā laukuma (ja $\alpha = 0$ un $\dot{\alpha} = 0$), balansierī notiks lieks lodītes kustības režīms. Modelis tiek pētīts ar dažādiem berzes koeficientiem: $k = 10^{-4}$ m; $k = 10^{-5}$ m (6. att.).

VI. SECINĀJUMI

Aprēķinu rezultātā secināts, ka balansiera (ar toroidālu korpusu) lodītei ir vismaz divi kustības režīmi, no kuriem viens ir darba režīms, otrs – lieks režīms. Palielinot berzes koeficientu, palielinās arī iespēja nodrošināt darba režīmu.

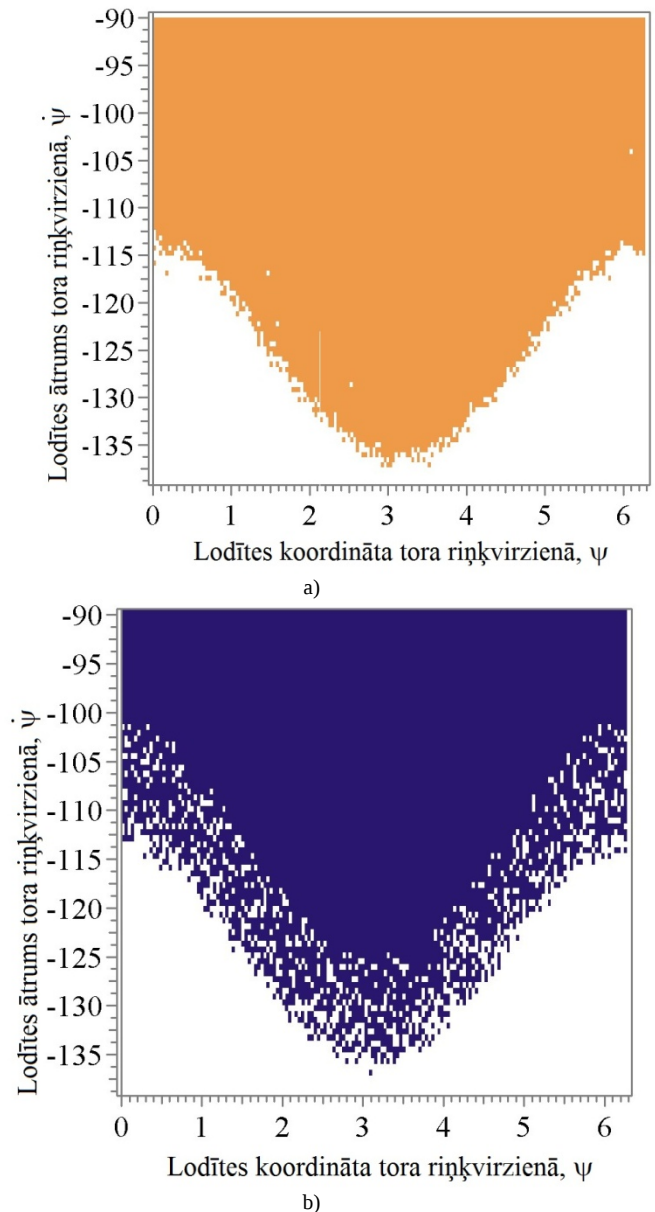


5. att. Darba režīma fāžu portrets.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Блехман, И.И. *Синхронизация в природе и технике*. Москва: Наука, 1981. 352 с.
2. Страутманис, Г. И. *Снижение вибраций бытовых центрифуг в переходном и установившемся режимах*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Рига: РПИ. 1989. 16 с.
3. Strautmanis, G., Jurjevs, V., Cokalo, V. *Veļas mazgājamo mašīnu centrifūgu balansēšanas ierīce*. LV Pat. LV 14368 B, 2011; P.V., 2011, P-11-57.
4. Ščukins, I., Zakrčevskis, M., Ivanov, Y., et. al. Application of Software SPRING and Method of Complete Bifurcation Groups for the Bifurcation

Analysis of Nonlinear Dynamical System // *Journal of Vibroengineering*, vol.10, iss.4 (2008), pp. 510–518



6. att. Sākuma nosacījumi pēc fāžu koordinātām
 ψ un $\psi̇$ $\alpha = 0$ un $\alphȧ = 0$
 ar berzes koeficientu: a) $k = 10^{-4}$ m; b) $k = 10^{-5}$ m.

Guntis Strautmanis, Dr. sc. ing. (the degree was conferred in 1992), Assistant Professor, Daugavpils branch of the Riga Technical University. Address: 90 Smilšu iela, Daugavpils, LV-5410, Latvia. E-mail: guntis@df.rtu.lv

Guntis Strautmanis. On the stability of the autobalancing conditions of a ball autoequalizer

The paper deals with the research of an autoequalizer with a vertical axis, and its body is placed with a relatively eccentric rotation axis. Autoequalizers with a torus-shaped body contain one ball-shaped adjustment mass that can freely roll both in the ring direction and in the cross section. This enables reducing to the minimum the force of resistance at the ball's moving, but simultaneously decreases the chance of launching the autoequalizer in the autobalancing regime. Experimental researches of the autoequalizer have shown that along with the working state in which the ball stops relative to the rotating body from the opposite to the imbalance side, there is another state in which the ball continuously moves relative to the body of the autoequalizer. It has been stated that the ball in the working state is influenced by the forces that are aimed at moving it in the body of the autoequalizer towards the side opposite to the imbalance. The closer the ball is to the optimal state, the less the volume of tangential force influencing the ball is. The design of an autoequalizer that ensures working state in which at rotation the ball stops relative to the autoequalizer's body opposite to the imbalance has been experimentally worked out. A patent of the autoequalizer design has been obtained. The autoequalizer is made up of the mathematical model with two differential equations. In the result of the calculations it has been proved that the ball of the equalizer with the torus-shaped body has at least two movement conditions, one of which is a working state, and another one is a spare state.