

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ВИБРАЦИОННИТЕ СМУЩЕНИЯ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАНЕ С МАХАЛОВИ ДАТЧИЦИ ЗА ВЕРТИКАЛА

Димитър Дичев¹⁾, Христофор Коев²⁾

¹⁾ ТУ-Габрово, 5300 Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, dichevd@abv.bg

²⁾ ТУ-Габрово, 5300 Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, koevh@abv.bg

Резюме: В работата са представени математическите модели, определящи поведението на махалови чувствителни елементи в среда на вибрационни смущения. Моделите са съставени за условия, при които работят подобни измервателни средства, монтирани на подвижни обекти. Изведени са зависимостите, чрез които могат да бъдат определени систематичните отклонения на чувствителните елементи от местната вертикала. Резултатите от направените изследвания показват, че вибрационното изместване от нулата води до появата на "лъжлив" сигнал в уреда за наличието на отклонение на основата от вертикалата.

Ключови думи: вибрационни смущения, датчици за вертикала, физично махало, подвижни обекти, динамична грешка, математически модели.

1. Въведение

Съвременният свят е наситен с разнообразни подвижни обекти, движещи се в околното пространство - на сушата и във въздуха, по водата и под водата. За обезпечаване на определена ориентация на тези обекти и за управление на тяхното движение е необходимо на борда им да са разположени измервателни средства. Последните трябва да включват в себе си устройства, моделиращи базовата (опорната) координатна система. Това позволява да се определя положението на подвижния обект при неговото въртене относно масовия му център и движението му заедно с него, а също и да се поддържа зададеното направление на движението. Ето защо част от измервателните уреди, разположени на подвижни обекти, трябва да притежават свойства, които да осигуряват непрекъснатото съхраняване на определени направления, свързани със Земята.

Една от тези характеристики, която е задължителна част от системите за ориентация на повечето подвижни обекти, е местната вертикала. Съществуват различни методи и средства за построяване и поддържане на местната вертикала в измервателен режим [1]. Функционалните елементи, изграждащи вертикалата, заемат първостепенна роля при организиране на общата метрологична структура на измервателните средства. Затова те имат определящо значение при формиране на качествените характеристики на измервателните уреди и системи в това направление.

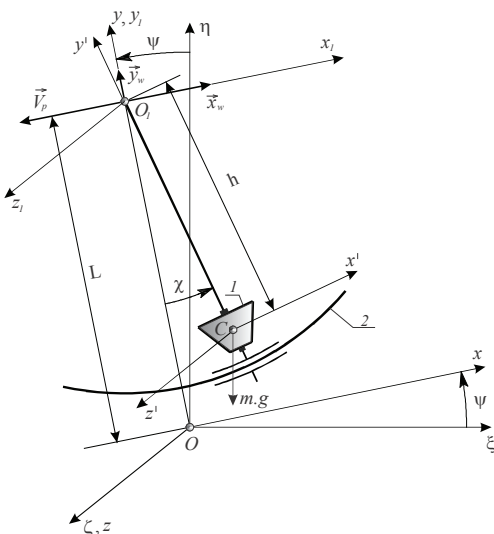
Най-опростеният способ за построяване на вертикала в измервателните средства и системи е посредством сферично физично махало. Физичните махала обаче, установени на подвижен обект, изпитват смущаващите въздействия от вибрациите в мястото на монтиране. Това води до нестабилност при моделиране на вертикалата от тези елементи. От друга страна обаче, единствено физичното махало притежава позиционни свойства, обусловени от неговата естествена избирателност по отношение на местната вертикала. Това е важно свойство, което се използва преди всичко при реализация на коригиращи системи в средствата за измерване на параметри на подвижни обекти. Освен това достигнатото високо ниво в днешно време и непрекъснатото усъвършенстване на измервателната техника [2], както и на микропроцесорната и компютърната техника [3, 4, 5, 6] дават нови възможности за коригиране [7] на недостатъците на физичното махало в динамичен режим на работа и успешното му интегриране към системите за построяване на вертикала.

За изследване на поведението на тези чувствителни елементи в условията на вибрационни смущения е необходимо да се разработят базовите математически модели, което е и основната цел на настоящата работа. Съставянето на тези модели е необходимо да се реализира за условия максимално близки до реалните, което е предпоставка за изпълнение на точен и всеобхватен анализ на точностните характеристики.

2. Уравнения на движение

Уравненията на движение са изведени въз основа на геометричната интерпретация на динамичната грешка на махаловите датчици за вертикала. На фиг.1 е показан динамичният модел на махалов чувствителен елемент. Съгласно този модел подвижната част на уреда представлява махало с маса m , която е съсредоточена в една точка, наричана приведен център на масите. Тази маса е съединена с оста на окачване с помощта на абсолютно твърд прът с дължина h . Махалото има една степен на свобода и се завърта около хоризонтална ос, преминаваща през точката на окачване. Динамичната грешка се дефинира от координатата χ , която определя отклонението на махалото от местната вертикала. Координатната система $O\xi\eta\zeta$, въведена на фиг.1, е свързана със Земята като осите $O\xi$ и $O\zeta$ са разположени в равнината на местния хоризонт, а ос $O\eta$ е местната вертикала. За определяне на движението на корпуса на махаловия датчик спрямо неподвижната система $O\xi\eta\zeta$ е въведена втора координатна система $Ox_1y_1z_1$. С точката на окачване на махалото O_1 е свързана допълнителната координатна система $O_1x_2y_2z_2$, която се използва за дефиниране на външните въздействия.

Центърът на тежест на махалото е разположен в точка C , а на фиг.1 са въведени означенията $OO_1=L$, $O_1C=h$. Преносното движение на оста на окачване на махалото се определя от линейната



Фиг.1. Модел на физическото махало

скорост $V_p = L.\dot{\psi}$ и вибропреместванията x_w, y_w .

Кинетичната енергия на махалото можем да определим по теоремата на Кьониг за твърдо тяло

$$E_k = \frac{1}{2}.J_C.\omega^2 + \frac{1}{2}.m.V_C^2, \quad (1)$$

където първото събираемо представлява кинетичната енергия на тялото от въртенето му около моментна ос $C_{\omega}/\bar{\omega}$ през масовия център C на тялото, а второто е кинетичната енергия на тялото от транслационното му движение заедно с центъра на тежестта.

За да се преmine към постоянни инерционни моменти свързваме координатната система $Sx'y'z'$ неизменно с тялото. При което за кинетичната енергия на махалото при релативното му движение получаваме:

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{1}{2}.J_C.\omega^2 = \\ &= \frac{1}{2}.J_z.\omega_z^2 = \frac{1}{2}.J_z.(\dot{\chi} + \dot{\psi})^2 \end{aligned} \quad (2)$$

къдет J_z е инерционният момент на махалото спрямо ос Cz' , през масовия център C , успоредна

на O_1z_1 ; $\omega_z = (\dot{\chi} + \dot{\psi})$ е проекцията на ъгловата скорост върху осите на тази координатна система.

Тогава кинетичната енергия на махалото ще се определи от израза:

$$E_k = \frac{1}{2}.J_z.(\dot{\chi} + \dot{\psi})^2 + \frac{1}{2}.m.(\dot{x}_C^2 + \dot{y}_C^2). \quad (3)$$

След извършване на необходимите преобразувания се получава следният израз за кинетичната енергия:

$$\begin{aligned} E_k &= 1/2.(J_z + m.h^2).(\dot{\chi} + \dot{\psi})^2 + \\ &+ 1/2.m.\{L^2.\dot{\psi}^2 + \dot{x}_w^2 + \dot{y}_w^2 + (x_w.\dot{\psi})^2 + (y_w.\dot{\psi})^2 + \\ &+ 2.[x_w.\dot{y}_w.\dot{\psi} - y_w.\dot{x}_w.\dot{\psi} - L.h.\dot{\psi}.(\dot{\chi} + \dot{\psi}).\cos \chi + \\ &+ h.\dot{x}_w.(\dot{\chi} + \dot{\psi}).\cos \chi - \\ &- L.\dot{x}_w.\dot{\psi} + L.y_w.\dot{\psi}^2 + h.x_w.\dot{\psi}.(\dot{\chi} + \dot{\psi}).\sin \chi + \\ &+ h.y_w.(\dot{\chi} + \dot{\psi}).\sin \chi - \\ &- h.y_w.\dot{\psi}.(\dot{\chi} + \dot{\psi}).\cos \chi]\} \end{aligned} \quad (4)$$

Изразът (4) може да бъде приведен към динамична система, която е под въздействие само на вибрационни смущения, т.е.

$$E_k = 1/2(J_z + m.h^2).\dot{\chi}^2 + 1/2.m[\dot{x}_w^2 + \dot{y}_w^2 + 2.h.\dot{\chi}(\dot{x}_w.\cos \chi + \dot{y}_w.\sin \chi)]$$

След извършване на необходимите преобразувания и използване на метода на Лагранж от втори род се получава следното диференциално уравнение за движението на махалото:

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + b.\dot{\chi} + m.h \times (g.\cos \psi - L.\ddot{\psi}^2 + \ddot{y}_w + x_w.\ddot{y} + 2.\dot{x}_w.\dot{y} - y_w.\dot{\psi}^2) \times \sin \chi + m.h.(g.\sin \psi - L.\ddot{y} + \ddot{x}_w - y_w.\ddot{y} - 2.\dot{y}_w.\dot{\psi} - x_w.\dot{\psi}^2) \cos \chi = -(J_z + m.h^2).\ddot{\psi} - M_o.\text{sign}(\dot{\chi} + \dot{\psi}) \quad (5)$$

От (5) може да бъде получено диференциалното уравнение на движение на махалото при положение, че в точката на окачване действат вибрационни смущения, а ъгловите колебания на основата са с нулева стойност ($\psi = 0$), т.е.:

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + b.\dot{\chi} + m.h(\ddot{x}_w.\cos \chi + \ddot{y}_w.\sin \chi) = -M_o.\text{sign}\dot{\chi} \quad (6)$$

Ако направлението на вектора на вибросмущението е в най-общо положение, а приложната точка съвпада с точката на окачване на махалото, то съставните вибродвижения ще се определят от следните зависимости:

$$x_w = A_1.\cos \omega_w.t; \quad y_w = A_2.\cos \omega_w.t, \quad (7)$$

където A_1 и A_2 - амплитудите на вибропреместванията; ω_w - кръговата честота на вибрациите.

От (7) следва, че виброускоренията ще бъдат:

$$\ddot{x}_w = -A_1.\omega_w^2.\cos \omega_w.t, \quad \ddot{y}_w = -A_2.\omega_w^2.\cos \omega_w.t$$

След заместване в (6) се получава

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + b.\dot{\chi} + m.g.h.\sin \chi = A.m.h.\omega_w^2.\cos(\omega_w.t) \sin(\chi + \varepsilon) - M_o.\text{sign}\dot{\chi}, \quad (8)$$

където $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$ - модул на вибрац. смущение; $\varepsilon = \text{arctg}(A_1 / A_2)$ - ъгъл, определящ направл. на вектора на вибрационното смущение.

При малки ъгли уравнение (8) се преобразува

във вида (полагаме също така, че $M_o = 0$)

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + b.\dot{\chi} + m.h.(g - A.\omega_w^2.\cos \varepsilon.\cos \omega_w.t).\chi = A.m.h.\omega_w^2.\sin \varepsilon.\cos \omega_w.t. \quad (9)$$

3. Теоретично изследване влиянието на вибрациите в точката на окачване

След заместване на $M_o = 0$ и $b = 0$, $\omega_w = \omega$, уравнение (9) придобива вида

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + m.g.h.\sin \chi = A.m.h.\omega^2.\cos \omega.t.\sin(\chi + \varepsilon). \quad (10)$$

Могат да се разгледат два частни случая на уравнение (10). Ако съществуват само хоризонтални вибрационни колебания на точката на окачване

$x_w = A.\cos \omega.t$ уравнението на колебание на махалото ще бъде:

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + m.g.h.\sin \chi = A.m.h.\omega^2.\cos \chi.\cos \omega.t. \quad (11)$$

От уравнение (11) следва, че характерът на движение на махалото е същия като този под въздействието на зададена външна хармонична сила.

Ако се разглеждат само вертикалните колеба-

ния в точката на окачване $y_w = A.\cos \omega.t$, то уравнението на движение на махалото ще има вида:

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + m.h.(g - A.\omega^2.\cos \omega.t).\sin \chi = 0. \quad (12)$$

От (12) следва, че вертикалните вибрации в точката на окачване не създават периодична външна сила, но предизвикват появата на параметрични колебания, защото променят параметър от системата, а именно - коефициента пред $\sin \chi$. Съвместното влияние на хоризонталните и вертикалните вибрации води до възникването на ефект, предизвикващ появата на систематична грешка, защото в този случай вибрациите изместват равновесното положение на махалото от нулевото направление.

Уравнение (12) можем да препишем във вида

$$\ddot{\chi} + \omega_0^2.\sin \chi = \left[\frac{A.\omega^2}{l} \right].\cos \omega.t.\sin(\chi + \varepsilon), \quad (13)$$

където $l = \frac{(J_z + m.h^2)}{m.h}$ - дължината на матема-

тическо махало, чийто период на собствените колебания е равен на периода на колебание на физическото махало.

Тъй като физичните махала, използвани в датчиците за вертикала, обикновено извършват малки колебания, то можем да приемем, че $\sin \chi = \chi$, $\sin(\chi + \varepsilon) = \sin \varepsilon$. Можем да предположим още, че $A \cdot \omega^2 \ll g$, а величината $\mu = A \cdot \omega^2 / l$ е достатъчно малка. В този случай решението на уравнение (13) може да бъде получено във вид на разлагане по степените на малкия параметър μ , т.е.

$$\chi = \mu \cdot \chi_1 + \mu^2 \cdot \chi_2 + \dots \quad (14)$$

където χ_1 и χ_2 са първите два члена, получени при разлагането, които можем да считаме за първо и второ приближение към търсеното решение.

Поставяйки (14) в уравнение (13) и, запазвайки само членовете, съдържащи параметъра μ в първата му степен, получаваме

$$\ddot{\chi}_1 + \omega_0^2 \cdot \chi_1 = \cos \omega \cdot t \cdot \sin \varepsilon \quad (15)$$

Решението на (15) определя първото приближение на решението на задачата, т.е.

$$\chi_1 = \frac{\sin \varepsilon}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \cos \omega \cdot t + C_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + C_2) \quad (16)$$

където C_1 и C_2 се определят от началните условия.

От уравнение (16) се вижда, че при ниски честоти на вибрационните смущения ($\omega < \omega_0$) тяхната фаза съвпада с фазата на колебания на махалото. При $\omega > \omega_0$ фазите на колебание се различават с 180° , при което колебанията на махалото и тези в точката на окачване се намират в противофаза.

При съставяне на уравненията с второ приближение можем да приемем, че $\sin \chi = \chi$, $\sin(\chi + \varepsilon) = \chi \cos \varepsilon + \sin \varepsilon$. Замествайки разлагането по степените на μ , т.е. - изрази (15) в (14)

и, съхранявайки членовете, съдържащи вторите степени на μ , получаваме

$$\begin{aligned} \mu \cdot \ddot{\chi}_1 + \mu^2 \cdot \ddot{\chi}_2 + \omega_0^2 \cdot \mu \cdot \chi_1 + \omega_0^2 \cdot \mu^2 \cdot \chi_2 = \\ = \mu \cdot \cos \omega \cdot t \cdot [\sin \varepsilon + \\ + (\mu \cdot \chi_1 + \mu^2 \cdot \chi_2) \cdot \cos \omega \cdot t \cdot \cos \varepsilon] \end{aligned} \quad (17)$$

Използвайки уравнението за χ_1 , получаваме израза с второто приближение

$$\begin{aligned} \ddot{\chi}_2 + \omega_0^2 \cdot \chi_2 = \\ = \left[\frac{\sin \varepsilon}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \cos \omega \cdot t + C_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + C_2) \right] \times \\ \times \cos \omega \cdot t \cdot \cos \varepsilon = \\ = \frac{\sin 2\varepsilon}{4(\omega_0^2 - \omega^2)} (1 + \cos 2\omega \cdot t) + \\ + C_1 \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \omega \cdot t \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + C_2) \end{aligned} \quad (18)$$

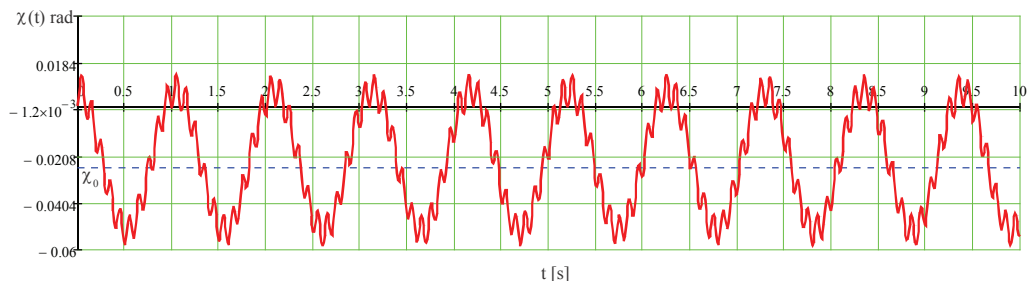
Постоянната съставляваща

$$D = \frac{\sin 2\varepsilon}{4(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (19)$$

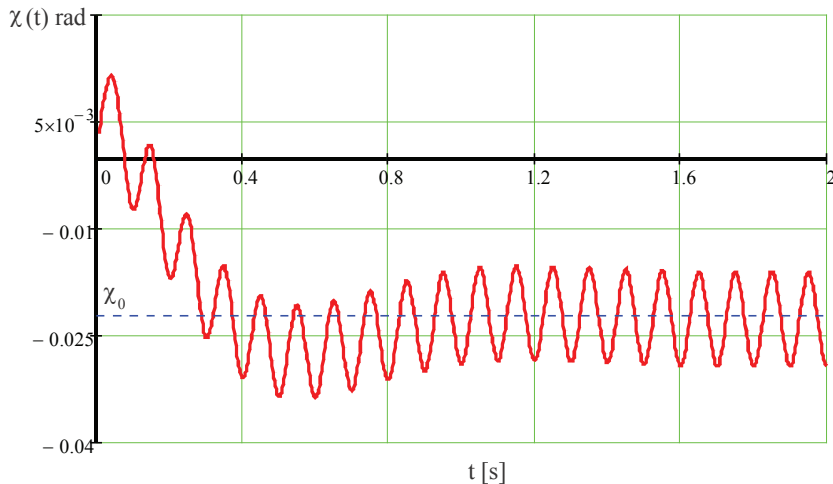
в дясната част на уравнение (19) обяснява произхода на изместването от нулата, т.е. изменението на средното положение на махалото, спрямо което то извършва колебателното си движение. Частното решение на уравнение (19), съответстващо на тази постоянна съставляваща, има следния вид:

$$\chi_2^{const} = \frac{\sin 2\varepsilon}{4 \cdot \omega_0^2 \cdot (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (20)$$

Както се вижда от (16) решението, получено с първо приближение, няма постоянна съставляваща. Затова, използвайки (14), получаваме частното решение на уравнение (13) при направените



Фиг.2. Недемфирани колебания на чувствителния елемент на махалов датчик



Фиг.3. Демпфирани колебания на чувствителния елемент на махалов датчик

по-горе предположения

$$\chi_0 = \mu^2 \cdot \chi_2^{const} = \frac{A^2 \cdot \omega_0^4 \cdot \sin 2\varepsilon}{4 \cdot \omega_0^2 \cdot J^2 \cdot (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (21)$$

Формула (21) описва физичен ефект, известен като вибрационно изместване на нулата, или още като ефект на Максвел. Според (21) вибрациите в точката на окачване на физичното махало водят до изменение на неговото равновесно положение, спрямо което то извършва колебателното си движение. При нискочестотни колебания ($\omega < \omega_0$) положението на динамично равновесие на махалото за $\varepsilon < \pi/2$ се измества в дясно, а при $\omega > \omega_0$ - в ляво.

Формула (21) е получена за условия, при които $A \cdot \omega^2 \ll g$. От друга страна обаче резултатите от изчисляване на стойностите на χ_0 за вибрации, при които е изпълнено условието $A \cdot \omega^2 \gg g$, не съвпадат със значенията на ъгъла χ , спрямо когото махалото извършва колебателното си движение, получени по резултатите от численото интегриране на (10). Ето защо за случаите, при които $A \cdot \omega^2 \gg g$, е необходимо да се използва следната формула за χ_0 :

$$\chi_0 = \frac{2,5 \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{A \cdot \omega^2}{g}}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (22)$$

Като илюстрация на представените по-горе

зависимости на фиг.2 са показани резултатите от численото интегриране на уравнение (10) в средата на програмния продукт Mathcad за чувствителния елемент на махалов датчик за вертикала при вибрации с амплитуда $A = 2,6 \cdot 10^{-3}$ m, $\omega = 188,49$ rad/s (30 Hz), $\varepsilon = 45^\circ$.

4. Изводи

От фиг.2 следва, че собствените колебания на махалото имат период $T = 1,044$ s, който съответства на честота $\omega_0 = 6,017$ rad/s. Върху собствените колебания се натрупват високо-честотни принудени трептения с честота на външната вибрация $f = 30$ Hz. Както се вижда от фиг.2 колебателното движение на махалото се извършва относно равновесно положение, което е отклонено от нулата на ъгъл $\chi_0 = -0,022$ rad ($1^\circ 15,7'$). Стойността на вибрационното изместване, спрямо което се изпълняват колебанията на махалото, изчислено по формула (2.57), е $\chi_0 = -0,024$ rad ($1^\circ 22,5'$).

Очевидно е, че с течение на времето свободните колебания затихват, и преходният процес на махалото се отклонява на величината χ_0 , спрямо която протичат принудените колебания, обусловени от вибрационните смущения, приложени в точката на окачване. На фиг.3 са показани резултатите от численото интегриране на демпфираните колебания на махалото, които се описват от уравнение (10), в което е въведен демпфираща компонента, т.е.

$$(J_z + m.h^2).\ddot{\chi} + b.\dot{\chi} + m.g.h.\sin \chi = \\ = A.m.h.\omega^2.\cos \omega.t.\sin(\chi + \varepsilon).$$

където b - коефициент на демпфиране, равен на момента, създаван от демпфера, когато ъгловата

скорост $\dot{\chi}$ е равна на 1 rad/s .

Решението е получено, както и в предходния случай, за параметри на махалото и вибрационните смущения, имащи следните стойности: $A = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $\omega = 188,49 \text{ rad/s}$ (30 Hz), $\varepsilon = 45^\circ$, $b = 0,7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. От фиг.3 се вижда, че вибрационното отклонение има същата стойност $\chi_0 = -0,022 \text{ rad}$ ($1^\circ 15,7'$).

Вибрационното изместване от нулата води до появата на "лъжлив" сигнал в уреда за наличието на отклонение на основата от вертикалата. Затова е важно да се установят вибрационните смущения в мястото на монтиране на измервателните средства, както и да се вземат необходимите мерки за отстраняване на тяхното влияние върху резултата от измерване.

5. Литература

[1] **Dichev, D., H. Koev, T. Bakalova, P. Louda.** A Gyro-Free System for Measuring the Parameters of Moving Objects. *Measurement Science Review*, Issue 5, Vol. 14, 2014, 263-269, ISSN 1335-8871.

[2] **Sotirov, B., Tonev, D.** Measurement uncertainty of simple effective diameter using measuring wires. *In Third National Conference with international participation: Metal, hydro and aerodynamics, national security*, 24-25 October 2013 (pp. 74-80). Sofia, Bulgaria: Bulgarian Academy of Sciences.

[3] **Илев, Т.** Modeling of thermal processes in transformers. *12th international conference*

"Research and development in mechanical industry" RaDMI 20012, Vrnjacka banja, Serbia, September 2012, 1013-1015.

[4] **Karadzhev, Tz.** Determining of the resonant transverse oscillations of a beam fixed at one end. *Int. Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*. Issue 12, Vol. 1, March-May 2015, 43-46, ISSN 2279-0047.

[5] **Pulov, D.** Design of laser beam expander for LWIR spectrum range. *Int. Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*. Issue 12, Vol. 3, March-May 2015, 276-280, ISSN 2279-0047.

[6] **Ormandzhiev K., Ivanov, P.** Control optimization of parallel working water turbines fed by means of common pressure pipeline. *In 2nd International Conference on Heat Transfer: Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 23-26 June 2003 (pp. 56-63). Victoria Falls, Zambia.

[7] **Malakov, I., Zaharinov, V., Tzenov, V.** Size Ranges Optimization. *Procedia Engineering*, 100, Elsevier, pp 791–800, 2015.

Данни за авторите:

Димитър Дичев. Висше – механично уредостроене (1987); доктор (2005); доцент (2006), катедра "Машиностроене и уредостроене", факултет "Машиностроене и уредостроене", Технически университет – Габрово. Метрология и измервателна техника.

Христофор Коев. Висше – информационно-измервателна техника (1983); доктор (2011); доцент (2012), катедра "Машиностроене и уредостроене", факултет "Машиностроене и уредостроене", Технически университет – Габрово. Измервателни преобразуватели и метрология.

STUDY THE INFLUENCE OF VIBRATORY INTERFERENCES ON THE ACCURACY OF MEASURING WITH PENDULAR SENSORS FOR VERTICAL

*Dimitar Dichev*¹⁾, *Hristofor Koev*²⁾

¹⁾ Technical University-Gabrovo, 5300 Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., *dichevd@abv.bg*

²⁾ Technical University-Gabrovo, 5300 Gabrovo, 4 H. Dimitar Str., *koevh@abv.bg*

Abstract: The study presents mathematical models defining the behavior of bob sensitive elements in terms of vibratory interferences. The models are composed for conditions under which work similar measuring devices mounted on mobile objects. Through the displayed relations can be identified systematic deviations of sensitive elements of the local vertical. The vibratory offset from zero leads to emergence of "false" signal on the device for the presence of deviations of the basis from the vertical.

Key-Words: vibratory interferences, sensors for a vertical, physical bob, mobile object, dynamic error, mathematical models

References

- [1] **Dichev, D., H. Koev, T. Bakalova, P. Louda.** A Gyro-Free System for Measuring the Parameters of Moving Objects. *Measurement Science Review*, Issue 5, Vol. 14, 2014, 263-269, ISSN 1335-8871.
- [2] **Sotirov, B., Tonev, D.** Measurement uncertainty of simple effective diameter using measuring wires. *In Third National Conference with international participation: Metal, hydro and aerodynamics, national security*, 24-25 October 2013 (pp. 74-80). Sofia, Bulgaria: Bulgarian Academy of Sciences.
- [3] **Iliev, T.** Modeling of thermal processes in transformers. *12th international conference "Research and development in mechanical industry"* RaDMI 20012, Vrnjacka banja, Serbia, September 2012, 1013-1015.
- [4] **Karadzhov, Tz.** Determining of the resonant transverse oscillations of a beam fixed at one end. *Int. Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*. Issue 12, Vol. 1, March-May 2015, 43-46, ISSN 2279-0047.
- [5] **Pulov, D.** Design of laser beam expander for LWIR spectrum range. *Int. Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*. Issue 12, Vol. 3, March-May 2015, 276-280, ISSN 2279-0047.
- [6] **Ormandzhiev K., Ivanov, P.** Control optimization of parallel working water turbines fed by means of common pressure pipeline. *In 2nd International Conference on Heat Transfer: Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 23-26 June 2003 (pp. 56-63). Victoria Falls, Zambia.
- [7] **Malakov, I., Zaharinov, V., Tzenov, V.** Size Ranges Optimization. *Procedia Engineering*, 100, Elsevier, pp 791–800, 2015.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ПОМЕХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАЯТНИКОВЫМИ ДАТЧИКАМИ ВЕРТИКАЛИ

Димитър Дичев ¹⁾, Христофор Коев ²⁾

¹⁾ ТУ-Габрово, 5300 Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, dichevd@abv.bg

²⁾ ТУ-Габрово, 5300 Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, koevh@abv.bg

Резюме: В докладе представлены математические модели, определяющие поведение маятниковых чувствительных элементов в среде вибрационных помех. Модели составлены для условий, при которых работают подобные измерительные средства, установленные на подвижных объектах. Получены зависимости, через которые могут быть определены систематические отклонения чувствительных элементов от локальной вертикали. Результаты исследований показывают, что вибрационное смещение от нуля приводит к появлению "ложного" сигнала в приборе о наличии отклонения основы от вертикали.

Ключевые слова: - вибрационные помехи, датчики вертикали, физический маятник, подвижные объекты, динамическая ошибка, математические модели.