

**О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***А.Г. Ткачук, к.т.н., доц.***Житомирський державний технологічний університет*

## Дослідження поведінки динамічно-настроюваного чутливого елемента

Присвячено дослідженню поведінки динамічно-настроюваного чутливого елемента (ДНЧЕ) стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки (ЛБТ) за допомогою ЦОМ при впливі на нього збурюючих факторів різного характеру (частоти, амплітуди) і виявлення найбільш небезпечних режимів його роботи. Проведено дослідження на ЦОМ поведінки ДНЧЕ і визначено його реакцію на зовнішні впливи для різних значень власних параметрів і параметрів збурень. Отримано рівняння руху ДНЧЕ зі змінними коефіцієнтами та перетворити це рівняння до виду, зручного для моделювання. Розроблено алгоритм розрахунку на ЦОМ, що відображає характер поведінки ДНЧЕ для різних значень частот амплітуд збурюючих факторів. Проведено аналіз отриманих результатів моделювання, виявлено найбільш небезпечні режими роботи ДНЧЕ і визначено оптимальні значення його власних параметрів. Показано, що найбільш несприятливим є випадок збігу частоти збурення з частотою власних коливань і частотою обертання ротора. Врахування отриманих результатів, при подальшому проектуванні чутливого елемента стабілізатора озброєння, дозволить підвищити точність, швидкість обробки та аналізу інформації та підвищить конкурентоспроможність вітчизняних чутливих елементів стабілізатора озброєння.

**Ключові слова:** вимірювання прискорення; стабілізатор; похибки вимірювання; динамічно-настроюваний чутливий елемент.

**Галузь використання.** Викладені у статті результати сприяють вирішенню науково-технічної проблеми, що має важливе народно – господарське значення, – підвищення точності і швидкодії стабілізатора озброєння (СО) з використанням динамічно-настроюваного чутливого елемента з цифровою обробкою інформації [1, 7, 10].

Застосування ЦОМ для вирішення прикладних задач дає можливість попередньо, на стадії проектування, оцінити характер поведінки розроблюваного пристрою шляхом дослідження чисельними методами його уточненої математичної моделі. Це, у низці випадків, дозволяє обійтись без створення макетних зразків і, тим самим, скоротити час від початку проектування до випуску промислових виробів. Основна вимога при проведенні моделювання – найбільш повна і точна відповідність використаної при розрахунках математичної моделі майбутній реальній конструкції.

**Сучасний стан проблеми.** Математичну модель СО на базі динамічно-настроюваного чутливого елемента було отримано у роботі [1]. Розроблено методи оцінки та автокомпенсації похибок [2, 3]. Порівняльний аналіз отриманих результатів з існуючими світовими розробками [4–9] довели можливість створення СО на базі динамічно-настроюваного чутливого елемента на рівні світових аналогів. Виникла необхідність дослідити отриману попередньо математичну модель динамічно-настроюваного чутливого елемента спочатку за допомогою цифрової обчислювальної машини (ЦОМ), а потім.

**Постановка задачі.** У даній статті необхідно вирішити наступні задачі:

- отримати рівняння руху динамічно-настроюваного чутливого елемента (ДНЧЕ) зі змінними коефіцієнтами та перетворити це рівняння до виду, зручного для моделювання;
- розробити алгоритм розрахунку на ЦОМ, що відображає характер поведінки ДНЧЕ для різних значень частот амплітуд збурюючих факторів;
- провести аналіз отриманих результатів моделювання, виявити найбільш небезпечні режими роботи ДНЧЕ і визначити оптимальні значення його власних параметрів.

**Мета статті.** Метою цього дослідження є дослідження за допомогою ЦОМ поведінки динамічно-настроюваного чутливого елемента при впливі на нього збурюючих факторів різного характеру (частоти, амплітуди) і виявлення найбільш небезпечних режимів його роботи.

**Викладення основного матеріалу статті.**

**Приведення рівняння руху до вигляду, зручного для моделювання**

Для вирішення поставленої задачі скористаємось рівнянням ДНЧЕ з урахуванням моментів – перешкод і позначень запишемо у вигляді [1]:

$$I\ddot{\alpha} + f\dot{\alpha} + k\alpha = -ml(g + W'_{AZ}) - ml(W'_{AX} \sin \dot{\gamma}t - W'_{AY} \cos \dot{\gamma}t)\alpha + \\ + M(\omega_{XO} \sin \dot{\gamma}t - \omega_{YO} \cos \dot{\gamma}t) - I_X(\omega_{XO} \cos \dot{\gamma}t - \omega_{YO} \sin \dot{\gamma}t) - N\alpha\omega_{ZO} \quad (1)$$

Поділивши всі члени рівняння (1) на  $k$  і зробивши групування, одержимо

$$T^2\ddot{\alpha} + 2\xi T\dot{\alpha} + (K + D \sin \dot{\gamma}t + E \cos \dot{\gamma}t)\alpha = A + B \sin \dot{\gamma}t + C \cos \dot{\gamma}t, \quad (2)$$

де  $T^2 = \frac{I}{k}$ ,  $\xi = \frac{f}{2kT}$ ,  $A = -mlk^{-1}(g + W'_{AZ})$ ,  $B = (M\omega_{XO} + I_X\dot{\omega}_{YO})k^{-1} \sin \dot{\gamma}t$ ,  
 $C = -(M\omega_{YO} + I_X\dot{\omega}_{XO})k^{-1} \cos \dot{\gamma}t$ ,  $D = mlk^{-1}W'_{AX} \sin \dot{\gamma}t$ ,  $E = -mlk^{-1}W'_{AY} \cos \dot{\gamma}t$ ,  $K = 1 + N\omega_{ZO}$ .

Отриманий вираз (2) з періодичними коефіцієнтами, візьмемо як вихідний для складання алгоритму розрахунку. Позначимо  $a = y_1$ ,  $a = y_2$  і приведемо рівняння (2) до форми Коші:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} = \{AW(t) + (B \sin \dot{\gamma}t + C \cos \dot{\gamma}t)\omega(t) - 2\xi Ty_2 - \\ - [K + (D \sin \dot{\gamma}t + E \cos \dot{\gamma}t)\omega(t)]y_1\}T^{-2}, \end{cases} \quad (3)$$

де позначено  $W(t)$  і  $\omega(t)$  – вхідні впливи.

Для інтегрування системи рівнянь (3) застосуємо метод Рунге-Куты IV порядку. При цьому інтегрування здійснюється за допомогою кінцево-різницевої формули:

$$y_1(\tau + h) = y_1(\tau) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \\ y_2(\tau + h) = y_2(\tau) + \frac{1}{6}(n_1 + 2n_2 + 2n_3 + n_4),$$

де  $h$  – крок інтегрування,

$$k_1 = h y_2, \quad k_2 = h \left( y_1 + \frac{1}{2} k_1 \right), \quad k_3 = h \left( y_1 + \frac{1}{2} k_2 \right), \quad k_4 = h \left( y_1 + \frac{1}{2} k_3 \right), \\ n_1 = -h (F(\nu\tau) - 2\xi Ty_2 - P y_1), \\ n_2 = -h \left\{ F \left[ \nu \left( \tau + \frac{h}{2} \right) \right] - 2\xi T \left( y_2 + \frac{1}{2} n_1 \right) - P y_1 + \frac{1}{2} n_1 \right\}, \\ n_3 = -h \left\{ F \left[ \nu \left( \tau + \frac{h}{2} \right) \right] - 2\xi T \left( y_2 + \frac{1}{2} n_2 \right) - P y_1 + \frac{1}{2} n_2 \right\}, \\ n_4 = -h \left\{ F[\nu(\tau + h)] - 2\xi T (y_2 + n_3) - P y_1 + n_3 \right\}, \\ F = A + B \sin \dot{\gamma}t + C \cos \dot{\gamma}t, \\ P = K + D \sin \dot{\gamma}t + E \cos \dot{\gamma}t.$$

Дослідження будемо проводити при гармонійно змінному вхідному впливі, що має вигляд:

$$W[t] = a \sin(\omega t + \varphi).$$

де  $a$  – амплітуда синусоїди,  $\omega$  – частота,  $\varphi$  – початкова фаза.

У машинних змінних вигляд вхідного впливу буде:

$$r[0] = A \sin(W \cdot it + fi).$$

Для розрахунків приймемо наступні значення параметрів вхідного впливу і коефіцієнта затухання:

Амплітуди

– лінійного прискорення $G, X, Y, Z, m \cdot c^{-2}$	– $10^{-6}; 10^{-4}; 10^{-2}; 1,0$
– кутової швидкості $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z, c^{-1}$	– $10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$
– кутового прискорення $\Omega_x, \Omega_y, c^{-2}$	– $10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 1,0$
– частоти $\omega, c^{-1}$	– $0,001; 0,1; 1; 20; 180$
– коефіцієнта $\xi$	– $0,1; 0,4; 0,7; 1,0$

**Аналіз результатів моделювання.** Для можливості співставлення результатів моделювання з теоретичними, дослідження на ЦОМ проводилися по тій же схемі: визначалася реакція ДНЧЕ по кожному збурюванню окремо і при їх спільному впливі. Відповідно до цього проведемо аналіз.

**Вплив прискорення уздовж осі чутливості.**

Аналіз результатів дозволив зробити наступні висновки:

1. На частоті  $0,5c^{-1}$  (частота збурення  $\omega$  значно менше частоти власних коливань  $\omega_0$ ) для будь-яких значень коефіцієнта  $\xi$  спостерігаються гармонійні коливання з частотою  $\omega$ . При цьому зі збільшенням  $\xi$  відбувається зменшення амплітуди цих коливань;

2. На частоті  $\omega = \omega_0 = 20c^{-1}$  при  $\zeta = 0,1$  спостерігається спочатку ріст коливань, що переходять потім у сталі. При  $\zeta = 0,7$  і  $1,0$  коливання практично одразу встановлюються. Як і в першому випадку, зі збільшенням  $\zeta$  зменшується амплітуда коливань.

3. На частоті  $\omega = 180c^{-1}$  тобто  $\omega \gg \omega_0$  при  $\zeta = 0,1$ , спочатку відбуваються биття з частотою  $\omega_0$  і поступово коливання переходять у сталі. При  $\zeta = 0,7$  цей процес відбувається швидше.

4. Збільшення амплітуди вхідного впливу викликає пропорційний зріст вихідного сигналу чутливого елемента.

**Вплив кутових прискорень.** Реакція чутливого елемента на кутові рухи основи для різних частот і амплітуд і для різних значень  $\zeta$  дозволяє зробити наступні висновки:

1. Вплив з частотою  $\omega = 1c^{-1}$  призводить до появи коливань з тією ж частотою, модульованих коливаннями з частотою  $\gamma = 180c^{-1}$ ;

2. На частоті  $\omega = 20c^{-1}$  при  $\zeta = 0,7$  спочатку спостерігається невеликий сплеск, а потім характер поведінки чутливого елемента такий же, як і в першому випадку;

3. На частоті  $\omega = 180c^{-1}$  поведінка така ж на тій же частоті, але, на відміну від останнього, з'являється зсув сталих коливань від нульового положення;

4. Збільшення амплітуди збурення веде до збільшення амплітуди коливань частотою  $\gamma$ .

Таким чином, кутові збурення гармонійного характеру модулюють корисний сигнал частотою  $\gamma$  і викликають зсув сталих коливань від нульового положення.

**Вплив перехресних лінійних прискорень.** На підставі отриманих даних можна зробити наступні висновки:

1. Збурення малої частоти ( $\omega \ll \omega_0$ ) викликають появу коливань ротора тієї ж частоти, модульованих частотою  $\gamma$ . При цьому, зі збільшенням амплітуди збурень зростає і амплітуда коливань з частотою  $\gamma$ . Амплітуда вихідних коливань з частотою  $\omega$  при цьому практично не змінюється. Зі збільшенням коефіцієнта демпфірування  $\zeta$  амплітуда вихідних коливань з частотою  $\omega$  і  $\gamma$  зменшується.

2. Впливи з частотою  $\omega = \omega_0$ , при малому значенні коефіцієнта  $\zeta$  викликають появу модульованих коливань зі зростаючою амплітудою в початковий період часу ( $t \approx 2$  і при  $\zeta = 0,1$ ), які потім переходять у сталі. Зі збільшенням  $\zeta$  коливання практично відразу встановлюються ( $t = 0,4c$  при  $\zeta = 0,7$ ).

3. На частоті  $\omega \gg \omega_0$  спочатку спостерігається биття з частотою  $\omega_0$ . При  $\zeta = 0,1$  коливання переходять у сталі через 2 с, а при  $\zeta = 0,7$  – через 0,4 с.

4. В усіх випадках спостерігається зсув сталих коливань від нульового положення, який залежить від частоти й амплітуди збурення, а також від значення коефіцієнта  $\zeta$ .

**Спільна дія прискорень.** З аналізу залежності вихідного сигналу ДНЧЕ для даного випадку, випливає:

1. На малих частотах збурення спостерігаються коливання, модульовані частотою  $\gamma$ , амплітуда яких залежить від амплітуди вхідного впливу;

2. На частоті  $\omega = \omega_0$  і  $\zeta = 0,1$  спостерігається спочатку ріст коливань модульованих частотою  $\gamma$ , які потім приймають стале значення;

3. На частоті  $\omega \gg \omega_0$ , при  $\zeta = 0,7$  спостерігаються биття модульованих коливань. При цьому також спостерігається зсув сталих коливань від нульового положення.

**Висновки.** Внаслідок проведених досліджень отримано наступні результати:

1. Перетворено до машинного виду отримане рівняння ДНЧЕ, розроблено алгоритм і складено програму досліджень на ЦОМ.

2. Проведено дослідження на ЦОМ поведінки ДНЧЕ і визначено його реакцію на зовнішні впливи для різних значень власних параметрів і параметрів збурень:

- гармонійно змінюваний корисний сигнал викликає відповідні коливання ротора, амплітуда яких пропорційно зростає зі збільшенням амплітуди вхідного впливу і зменшується зі збільшенням коефіцієнта демпфірування;
  - на низьких частотах ( $\omega \ll \omega_0$ ) вхідний сигнал передається практично без його зміни, змінюється лише його амплітуда в залежності від  $\omega$  і  $\zeta$ ;
  - на частотах, близьких до частоти власних коливань  $\omega_0$  і при малому  $\zeta$ , спостерігається значний ріст амплітуди коливань;
  - на частотах, близьких до частоти обертання ротора  $\gamma$  і при малих значеннях  $\zeta$  виникають биття з частотою  $\omega_0$ ;
  - наявність гармонійно змінюваних зовнішніх прискорень викликає появу модульованого частотою  $\gamma$  вихідного сигналу чутливого елемента, сталі коливання якого мають зсув щодо нульового положення, амплітуда їх пропорційна амплітуді вхідного впливу.
3. Показано, що найбільш несприятливим є випадок збігу частоти збурення з частотою власних коливань і частотою обертання ротора.

Врахування отриманих результатів, при подальших дослідженнях динамічно настроюваного чутливого елементу СО дозволить підвищити точність, швидкість обробки та аналізу інформації та підвищить конкурентоспроможність вітчизняних чутливих елементів СО.

#### Список використаної літератури:

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень / О.М. Безвесільна. – К. : Либідь, 2001. – 261 с.
2. *Безвесільна О.М.* Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри : монографія / О.М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
3. *Лозинская А.М.* Измерения силы тяжести на борту самолета / А.М. Лозинская / Региональная, разведочная и промысловая геофизика. – М. : Изд. ВИЭМС, 1978. – 113 с.
4. *Безвесільна О.М.* Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів / О.М. Безвесільна, Г.С. Тимчик. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – 812 с.
5. Наукові основи побудови прецизійного чутливого елементу комплексу стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, С.П. Малярюв, В.Г. Цірук, П.М. Таланчук, Л.О. Чепюк. – Житомир : ЖДТУ, 2016. – 234 с.
6. *Безвесільна О.М.* Кориолісовий вібраційний гіроскоп як чутливий елемент комплексу управління системи стабілізації / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, А.Г. Ткачук // Технологічні комплекси. – Луцьк. – 2014. – № 2 (10).
7. *Безвесільна О.М.* Наукові дослідження в галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій / О.М. Безвесільна, Г.С. Тимчик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 592 с.
8. *Безвесільна О.М.* Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин / О.М. Безвесільна, Г.С. Тимчик, Ю.О. Подчашинський. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 976 с.
9. *Безвесільна О.М.* Технічні засоби автоматизації / О.М. Безвесільна, І.В. Коробійчук. – Житомир : ЖДТУ, 2014. – 904 с.
10. *Безвесільна О.М.* Системи вібро- та ударозахисту стабілізатора озброєння / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, Ю.В. Киричук. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 160 с.

#### References:

1. Bezvesil'na, O.M. (2001), *Vymirjuvannja pryskoren'*, Lybid', K., 261 p.
2. Bezvesil'na, O.M. (2007), *Aviacijni gravimetrychni systemy ta gravimetry*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 604 p.
3. Lozinskaja, A.M. (1978), *Izmerenija sily tjazhesti na bortu samoleta*, Regional'naja, razvedochnaja i promyslovaia geofizika, M., Izd. VIeMS, 113 p.
4. Bezvesil'na, O.M. and Tymchuk, G.S. (2012), *Tehnologichni vymirjuvannja ta prylady*, Peretvorjujuchi prystroi' pryladiv, ZhDTU, Zhytomyr, 812 p.
5. Bezvesil'na, O.M., Maljarov, S.P., Ciruk, V.G., Talanchuk, P.M. and Chepjuk, L.O. (2016), *Naukovi osnovy pobudovy precyzijnogo chutlyvogo elementu kompleksu stabilizatora ozbrojennja legkoi' bron'ovanoi' tehniky*, ZhDTU, Zhytomyr, 234 p.
6. Bezvesil'na, O.M., Ciruk, V.G. and Tkachuk, A.G. (2014), «Koriolisovij vibracijnyj giroskop jak chutlyvyj element kompleksu upravlinnja systemy stabilizacii'», *Tehnologichni komplekxy*, Luc'k, No. 2 (10).
7. Bezvesil'na, O.M. and Tymchuk, G.S. (2018), *Naukovi doslidzhennja v galuzi avtomatyzacii' ta komp'juterno-integrovanjeh tehnologij*, KPI im. Igorja Sikors'kogo, Kyi'v, 592 p.
8. Bezvesil'na, O.M., Tymchuk, G.S. and Podchashyns'kyj, Ju.O. (2011), *Naukovi doslidzhennja v galuzi vymirjuvannja mehanichnyh velychyn*, ZhDTU, Zhytomyr, 976 p.
9. Bezvesil'na, O.M. and Korobijchuk, I.V. (2014), *Tehnichni zasoby avtomatyzacii'*, ZhDTU, Zhytomyr, 904 p.
10. Bezvesil'na, O.M., Ciruk, V.G. and Kyrychuk, Ju.V. (2015), *Systemy vibro- ta udarozahystu stabilizatora ozbrojennja*, ZhDTU, Zhytomyr, 160 p.

**Безвесільна** Олена Миколаївна – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри приладобудування Приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Наукові інтереси:

– вимірювачі прискорень, вібрацій, сейсмічної активності.

Тел.: +38(095) 160–32–18.

E-mail: o.bezvesilna@gmail.com.

**Ткачук** Андрій Геннадійович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– вимірювачі прискорень, вібрацій, сейсмічної активності.

Тел.: +38(097) 167–53–27.

E-mail: andru\_tkachuk@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2018.