

Канд. техн. наук ЗАДОРЖНИЙ А.О., Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

д-р. техн. наук СТАХОВСЬКИЙ О. В., Національний Університет Оборони

канд. техн. наук ЧОВНЮК Ю.В., Київський національний університет будівництва і архітектури

КЛІМОВ О.П., Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

ГРИНЮК В.В. Національний Університет Оборони.



Мехатронні модулі руху гусеничних машин: моделювання, теоретичний аналіз періодичних та стохастичних автоколивань у системах «двигун – регулятор швидкості обертання ротора»

Анотація: робота присвячена моделюванню та теоретичному аналізу нелінійних стохастичних й періодичних коливань, які виникають у гусеничних машинах, із урахуванням ефекту інерційності регулятора швидкості обертання їх двигунів. У системах регулювання швидкості обертання машин, які належать до класу мехатронних модулів руху (ММР), зі зростанням чутливості регуляторів неминує виникати небезпека втрати стійкості до збудження автоколивань. Такі коливання, як показано у статті, можуть виявитись корисними, наприклад, для підвищення чутливості ММР.

Ключові слова: мехатронні модулі руху, гусеничні машини, моделювання, теоретичний аналіз, періодичні та стохастичні автоколивання, інерційність, чутливість, регулятор швидкості обертання ротора, двигун, динамічний хаос, метод точкових відображень, відображення Пуанкаре, діаграми Ламерея, біфуркації подвоєння циклів коливань.

Вступ.

Мехатронні системи управління рухом сучасних гусеничних машин (так звані мехатронні модулі руху – ММР) відрізняються збільшеною чутливістю регуляторів швидкості обертання таких механічних систем і, зокрема, їх двигунів. Але зі збільшенням чутливості регуляторів неминує виникати небезпека втрати стійкості регулювання швидкості обертання ротора двигуна, а це, у свою чергу, призводить до збудження автоколивань (як періодичних, так і стохастичних). У багатьох практичних випадках такі коливання-автоколивання можуть виявитись навіть корисними, наприклад, для підвищення чутливості керування регуляторів швидкості обертання ротору двигуна ММР гусеничних машин.

У сучасних керованих гусеничних машинах подібного типу (із вбудованим ММР) тенденція до зменшення моментів інерції частин, котрі обертаються, й збільшення жорсткості статичної характеристики двигуна призводить до необхідності враховувати перехідні процеси у самому двигуні. Дуже часто, час встановлення перехідних процесів, після закінчення котрого механічна система переходить до усталеного руху, у приводі двигуна виявляється одного порядку з постійною часу регулятора швидкості обертання ротора двигуна ММР. У даній роботі наведені результати дослідження стійкості стаціонарного режиму обертання валу двигуна-привода й характеру автоколивань поза межею стійкості функціонування регулятора ММР.

© ЗАДОРЖНИЙ А.О., СТАХОВСЬКИЙ О. В., ЧОВНЮК Ю.В., КЛІМОВ О.П., ГРИНЮК В.В., 2025

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Автори [1-15] досліджували різноманітні особливості режимів функціонування та коливання, які виникають у (гусеничних) машинах із урахуванням інерційності регулятора швидкості обертання двигуна, пропонували вібраційний спосіб лінеаризації деяких нелінійних систем, вивчали автоколивання у системах з інерційним збудженням, зокрема, це стосується робіт [1-5]. При цьому автори останніх цитованих робіт часто використовували метод точкових відображень задля дослідження динамічних систем та виникаючих у них режимів функціонування типу «динамічного хаосу», котрі, взагалі кажучи, є некерованими (або слабо керованими), як правило. Проте, подібні режими функціонування регуляторів швидкості обертання приводної системи ротора-двигуна гусеничної машини, котрі інтенсивно використовуються у сучасному виробництві, будівництві, різноманітних

технологічних процесах (і які до того ж керовані сучасними ММР), не досліджені. Саме цьому й присвячене дане дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження.

Мета даної статті полягає у обґрунтуванні методу аналізу нелінійних коливань-автоколивань (періодичних та стохастичних), умов переходу регуляторів швидкості обертання ротора двигуна машини (за допомогою регулятора ММР) у режим функціонування типу «динамічного хаосу» та спряжених з ним біфуркацій подвоєння циклів (періодів) коливань.

Основна частина дослідження.

Схема регулювання швидкості обертання приводу (приводної системи двигуна) гусеничної машини за допомогою ММР наведена на рис. 1.

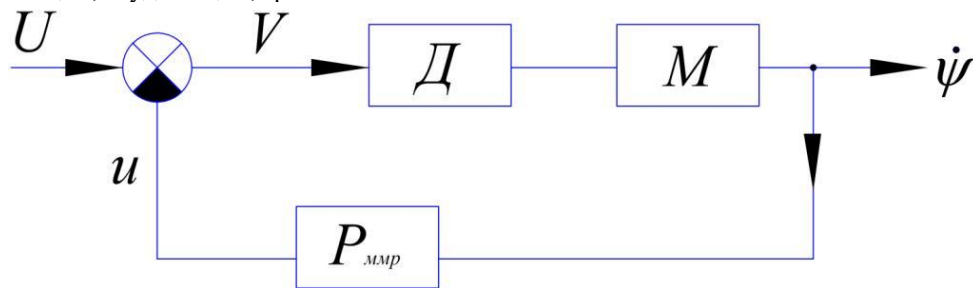


Рис. 1. Схема регулювання швидкості обертання приводу (приводної системи двигуна) гусеничної машини за допомогою ММР

На рис. 1 введені наступні позначення: U – програмне управління, u – сигнал зворотного (негативного) зв’язку, $v = U - u$ – керована величина, яка регулюється ММР, $Д$ – двигун, $М$ – механізм, $\dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt}$, Ψ – кут повороту ротора двигуна, t – поточний час, $P_{ММР}$ – регулятор ММР.

Рівняння обертання ротора двигуна гусеничної машини із урахуванням приведених мас передаточних та виконавчих механізмів має вид:

$$J \cdot \ddot{\Psi} = M_{\partial} - M_{on.}(\dot{\Psi}), \quad (1)$$

де: J – приведений момент інерції (J не залежить від кута повороту ротора);

M_{∂} – обертальний момент двигуна;

$M_{on.}(\dot{\Psi}) = \beta \cdot \dot{\Psi}$ – приведений момент сил

опору, $\ddot{\Psi} = \frac{d^2\Psi}{dt^2}$.

Рівняння для обертального моменту M_{∂} , із урахуванням часу τ встановлення перехідних процесів у двигуні машини, має вид [6,7]:

$$\tau \cdot \dot{M}_{\partial} + M_{\partial} = M(v, \dot{\Psi}), \quad (2)$$

де: $M(v, \dot{\Psi})$ – характеристика двигуна гусеничної машини, у якій присутні лінійна та нелінійна складові, залежні від v та $\dot{\Psi}$.

Рівняння регулятора, що здійснює негативний зворотний зв’язок за швидкістю обертання ротора двигуна, запишемо наступним чином:

$$\tau_p^2 \cdot \ddot{u} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau_p \cdot \dot{u} + u = \kappa \cdot \dot{\Psi} + \Phi(\dot{\Psi}), \quad (3)$$

де: τ_p – постійна часу регулятора ММР;

ζ – безрозмірна величина, яка характеризує демпфування у регуляторі ММР;

κ – коефіцієнт чутливості регулятора ММР;

$\Phi(\dot{\Psi})$ – нелінійна функція, яка описує насичення регулятора ММР.

Розглянемо розв'язки системи рівнянь (1) – (3) для лінійної та нелінійної моделей руху даної механічної системи.

І. Лінійна постановка задачі. Стационарні розв'язки, які відповідають рівномірному обертанню ротора двигуна гусеничної машини з кутовою швидкістю Ω_0 .

1.1. Для лінійної постановки задачі й знаходження стаціонарних розв'язків системи рівнянь (1) – (3) використаємо наведені нижче співвідношення.

При рівномірному обертанні ротора двигуна гусеничної машини зі швидкістю Ω_0 маємо:

$$\begin{cases} M_{\partial 0} = \beta \cdot \Omega_0; & M_{\partial 0} = M(u_0, \Omega_0); & u_0 = \kappa \cdot \Omega_0; & U = 2 \cdot u_0; \\ u_0 = \Phi(\Omega_0) + \kappa \cdot \Omega_0; & \Phi(\Omega_0) \equiv 0. \end{cases} \quad (4)$$

Виділимо лінійні члени у околі стаціонарної точки характеристики двигуна:

$$M(v, \dot{\Psi}) = M(u_0, \Omega_0) - r \cdot (u - u_0) - \alpha \cdot (\dot{\Psi} - \Omega_0) - M^*(\dot{\Psi} - \Omega_0), \quad (5)$$

де: $M^*(\dot{\Psi} - \Omega_0)$ – доданок у (5), котрий відображає нелінійні властивості характеристики двигуна гусеничної машини, а тому для лінійної постановки задачі дорівнює нулю.

Параметри r та α – додатні, причому:

$$r = - \left(\frac{\partial M}{\partial v} \right) \Big|_{v=u_0, \dot{\Psi}=\Omega_0}; \quad \alpha = - \left(\frac{\partial M}{\partial \dot{\Psi}} \right) \Big|_{v=u_0, \dot{\Psi}=\Omega_0}. \quad (6)$$

У результаті отримаємо лінеаризовану систему рівнянь виду:

$$\begin{cases} J \cdot \ddot{\Psi} = M_{\partial} - \beta \cdot \dot{\Psi}; \\ \tau \cdot M_{\partial} + M_{\partial} = -r \cdot u - \alpha \cdot \dot{\Psi}; \\ \tau_p^2 \cdot \ddot{u} + 2 \cdot \zeta \cdot \tau_p \cdot \dot{u} + u = \kappa \cdot \dot{\Psi}. \end{cases} \quad (7)$$

Система рівнянь (7) може бути зведена до одного звичайного диференціального рівняння для $u(t)$ четвертого порядку:

$$A \cdot u^{(IV)} + B \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + D \cdot u + E = 0, \quad (8)$$

де:

$$A = \tau \cdot J \cdot \tau_p^2; \quad B = \{ 2 \cdot \zeta \cdot \tau \cdot \tau_p \cdot J + (J + \tau \cdot \beta) \cdot \tau_p^2 \}; \quad C = \{ \tau \cdot J + 2 \zeta \cdot$$

$$D = \{ J + \tau \cdot \beta + 2 \cdot \zeta \cdot \tau_p \cdot (\beta + \alpha) \}; \quad E = (\beta + \alpha + \kappa \cdot r).$$

Характеристичне рівняння для знаходження коренів λ (8) може бути розв'язане за алгоритмом й формулами Феррарі. У загальному випадку (8) має для $u = f \cdot \exp(\lambda \cdot t)$ чотири різних корені (які можуть, зокрема, бути дійсними, або комплексно спряженими) $\lambda_{1,2,3,4}$, які можна знайти з алгебраїчного рівняння четвертої степені для λ :

$$A \cdot \lambda^4 + B \cdot \lambda^3 + C \cdot \lambda^2 + D \cdot \lambda + E = 0. \quad (9)$$

Тоді загальний розв'язок (8) набуває виду:

$$u(t) = \sum_{j=1}^4 f_j \cdot \exp(\lambda_j \cdot t) \quad (10)$$

Невизначені константи f_j можна знайти з термінальних (початкових та кінцевих) умов задачі:

$$u|_{t=0} = u_0; \quad \dot{u}|_{t=0} = \dot{u}_0; \quad u|_{t=\tau_p} = u_p; \quad \dot{u}|_{t=\tau_p} = \dot{u}_p. \quad (11)$$

Тоді для коефіцієнтів f_j , $j = \overline{1,4}$, з урахуванням (8) та (11), матимемо лінійну алгебраїчну систему чотирьох рівнянь, яка легко розв'язується за алгоритмом і правилом Крамера.

Знаючи закон зміни у часі t $u(t)$ з третього рівняння (7) знаходимо $\dot{\Psi}(t)$, а потім – з першого рівняння (7) $M_{\partial}(t)$.

1.2. Для стаціонарного розв'язку, що відповідає рівномірному обертанню ротора двигуна гусеничної машини з кутовою швидкістю Ω_0 слід розв'язати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} M_{\partial 0} = \beta_0; & M(v_0, \Omega_0) = M_{\partial 0}; \\ u_0 = \kappa \cdot \Omega_0; & \dot{\Psi} \equiv \Omega_0. \end{cases} \quad (12)$$

II. Нелінійна постановка задачі. Дослідження стійкості стану рівноваги системи.

Введемо відхилення від стаціонарного розв'язку: $x = \dot{\Psi} - \Omega_0$, $y = u - u_0$, а також відключимо M_∂ – функцію з рівнянь (1) та (2), замінюючи її через інші змінні задачі, тоді прийдемо до наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2 \cdot \delta \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = -k \cdot y - f(x); \\ \mu \cdot \ddot{y} + \dot{y} + \gamma \cdot y = a \cdot x + \varphi(x), \end{cases} \quad (13)$$

де:

$$2 \cdot \delta = \frac{\beta}{J} + \frac{1}{\tau}, \quad \omega_0^2 = \frac{(\alpha + \beta)}{\tau \cdot J}, \quad k = \frac{r}{\tau \cdot J}, \quad \beta = \left(\frac{\partial M_{on}}{\partial \dot{\Psi}} \right) \Big|_{\dot{\Psi} = \Omega_0}, \quad a = \frac{\kappa}{2 \cdot \zeta \tau_p}, \quad \mu = \frac{\tau_p}{2 \cdot \zeta}, \quad \gamma = \frac{1}{2 \cdot \zeta \cdot \tau_p}. \quad (18)$$

$$f(x) = \frac{M^*(x)}{\tau \cdot J}, \quad \varphi(x) = \frac{\Phi(\Omega_0 + x) - \Phi(\Omega_0)}{2 \cdot \zeta \cdot \tau_p}. \quad (14)$$

Слід зазначити, що функція $f(x)$ є непарною, тобто: $f(-x) = -f(x)$.

Обмежуючи розклад нелінійних функцій кубічними членами, покладемо:

$$f(x) = h \cdot x^3, \quad \varphi(x) = -p \cdot x^2 - q \cdot x^3. \quad (15)$$

Для нормального функціонування регулятора необхідно, щоб його власна частота $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ була більшою ω_0 , тобто:

$$\frac{1}{\tau_p} > \sqrt{\frac{(\alpha + \beta)}{\tau \cdot J}}. \quad (16)$$

Звідси випливає, що μ можна вважати малим параметром, оскільки:

$$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} > \omega_0 \Leftrightarrow \frac{\gamma}{\mu} > \omega_0^2 \Leftrightarrow \mu < \frac{\gamma}{\omega_0^2}. \quad (17)$$

Дослідимо стійкість стану рівноваги $x = \dot{x} = y = \dot{y} = 0$. Згідно критерію Рауса – Гурвіца, особлива точка, яка відповідає цьому стану, аперіодично стійка. Умова коливної нестійкості у першому наближенні по μ має вид:

$$4 \cdot \delta^2 \cdot \gamma + 2 \cdot \delta \cdot \omega^2 + 2 \cdot \delta \cdot \gamma^2 - a \cdot k + \mu \cdot \left\{ \beta \cdot \delta^3 \cdot \gamma + 4 \cdot \delta^2 \cdot \omega^2 - 4 \cdot \delta \cdot a \cdot k - 4 \cdot \delta \cdot \gamma \cdot \omega^2 \right\} < 0. \quad (18)$$

З (18) видно, що самозбудження коливань виникає за рахунок інерційної взаємодії між змінними x та y (параметр γ не повинен перевищувати деякого критичного значення):

$$\gamma_{\text{крит.}} = -\delta + \left\{ \delta^2 + \frac{(a \cdot k - 2 \cdot \delta \cdot \omega^2)}{2 \cdot \delta} \right\}^{1/2}. \quad (19)$$

Порівняння умови (18) для редукованої системи ($\mu = 0$) показує, що зі зростанням μ область нестійкості розширюється, тобто $\gamma_{\text{крит.}}$ (19) менше

$\gamma_{\text{крит.}}$ при $\mu \neq 0$:

$$\gamma_{\text{крит.}} < \gamma^*, \quad \gamma^* = \gamma_{\text{крит.}}(\mu \neq 0). \quad (20)$$

Дослідження характеру автоколивань регулятора ММР даної механічної системи у області нестійкості стану рівноваги проводилось за допомогою ПЕОМ.

Чисельний аналіз задачі виявив, що у залежності від параметрів виникаючі автоколивання механічної системи можуть бути як періодичними, так і стохастичними.

На рис. 2 у якості прикладу показані зони стохастичності на площині параметрів $(2\delta; k)$ для низки значень μ за фіксованих інших параметрів. З рис.2 видно, що зі зростанням μ не відбувається суттєвих змін розмірів зон стохастичності.

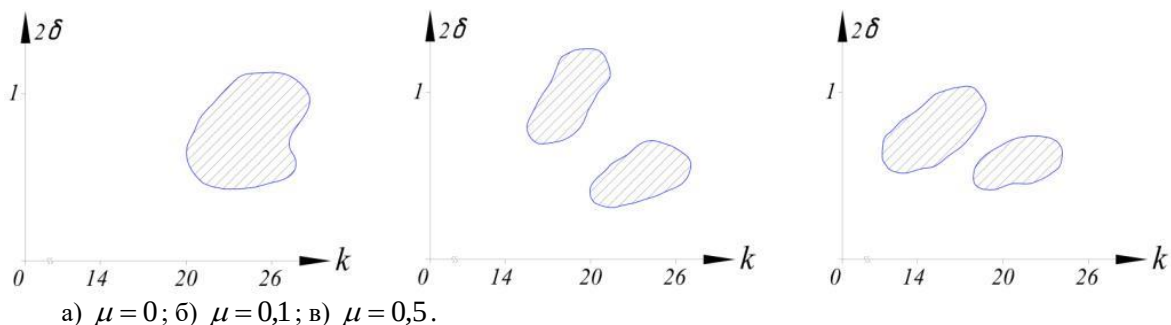


Рис. 2. Зони стохастичності на площині параметрів $(2\delta; k)$ для різних значень μ ($\omega_0 = 1$, $h = 20$, $\gamma = 1$, $p = 1$, $q = 1$, $a = 1$)

У зонах стохастичності збуджувані автоколивання мають суцільний спектр (Рис. 3, а) й автокореляційну функцію (Рис. 3, б). Поза зоною стохастичності спостерігаються періодичні автоколивання.

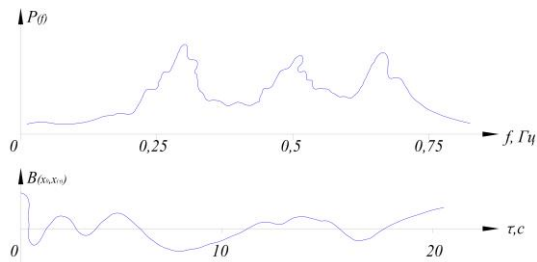


Рис. 3. Спектр (а) та автокореляційна функція (б) процесу $x(t)$ при $\omega_0 = 1$, $h = 20$, $\gamma = 1$, $p = 1$, $q = 1$, $\mu = 0,1$, $a = 1$, $k = 23$, $2\delta = 0,5$

У зв'язку із сучасними уявленнями про виникнення стохастичності у динамічних системах цікаво дослідити процес переходу від періодичних автоколивань до стохастичних.

III. Аналіз переходу механічної системи «двигун – регулятор швидкості обертання ротору ММР» від періодичних автоколивань до стохастичних при варіації коефіцієнту k .

Варіація коефіцієнту $k = \frac{r}{\tau \cdot J}$ здійснювалась при чисельному аналізі на ПЕОМ за сталих значень інших параметрів задачі ($2\delta = 0,5$; $h = 20$; $p = q = \omega_0 = \gamma = a = 1$).

З'ясувалось, що при: $k \geq k_0$, $k_0 = 1,25$ при $\mu = 0$; $k_0 = 1,08$ при $\mu = 0,1$ особлива точка з нульовими координатами (для $\dot{\Psi}$ та u , M_∂), а саме: $x = \dot{x} = y = \dot{y} = 0$, - втрачає стійкість й виникає граничний цикл, амплітуда котрого зростає при збільшенні k як $\sqrt{k - k_0}$. При $k = k_1$ ($k_1 = 13,8$, $\mu = 0$; $k_1 = 12,5$ при $\mu = 0,1$) одноктактний цикл з періодом T_0 втрачає стійкість – народжується двотактний цикл з періодом $2T_0$, котрий існує при $k_1 < k < k_2$, де $k_2 = 18,8$ для $\mu = 0$ й $k_2 = 17,9$ для $\mu = 0,1$. При $k = k_2$ двотактний

цикл втрачає стійкість й народжується чотирьохтактний цикл з періодом $4T_0$. При подальшому зростанні k – коефіцієнта чотирьохтактний цикл втрачає стійкість і народжується восьмитактний цикл з періодом $8T_0$. Графіки залежності від параметра k координати x точки перетину граничного циклу, площиною $\dot{x} = 0,2$ наведені на рис. 4 для $\mu = 0$ та $\mu = 0,1$.

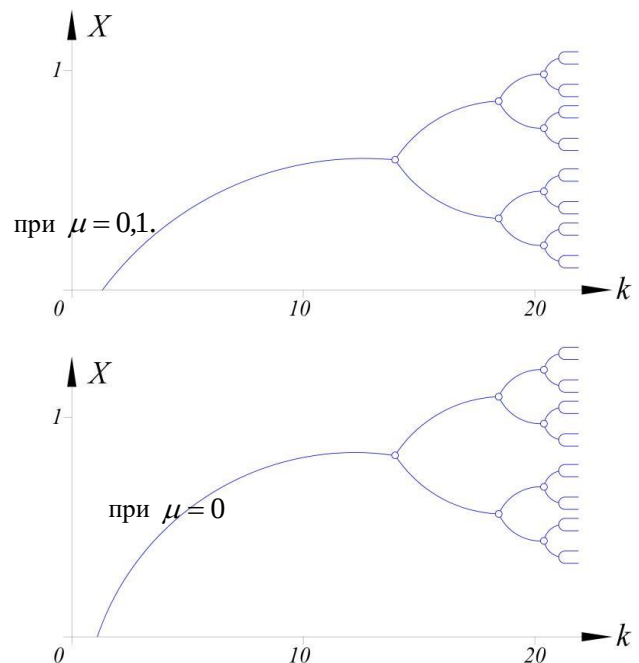


Рис. 4. Картина послідовних подвоєнь циклів.

На жаль, точно не вдалося визначити межу існування восьмитактного й наступного за ним при збільшенні параметра k шістнадцятитактного циклу (з періодом $16T_0$, $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$, бо $\omega_0 = 1$). Наявність у розглядуваній механічній системі біфуркацій подвоєння періоду при зміні k – параметра нашої моделі наводить на думку про можливість опису їх за

допомогою модельного одновимірного відображення. З цією метою було побудоване відображення Пуанкаре [5]. Для розглядуваної системи січна «поверхня» відображення тривимірна. Виявляється, що на цій поверхні у зонах стохастичності відображення Пуанкаре витягнуте у тонкий джгут (Рис. 5).

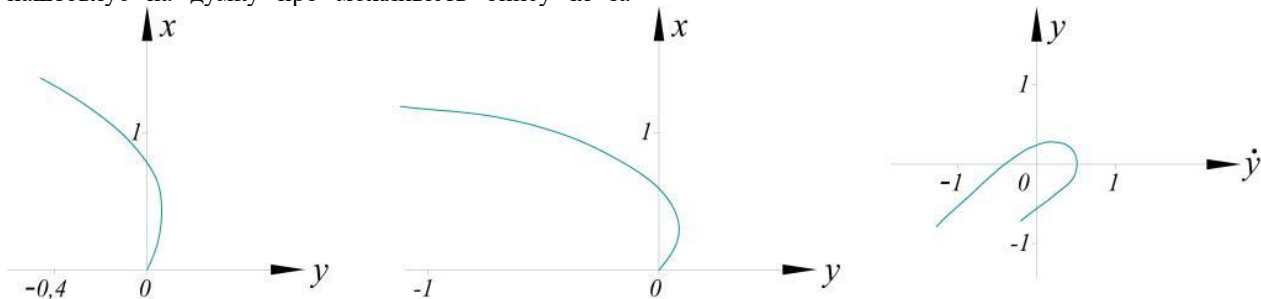


Рис. 5. Відображення Пуанкаре поверхні $(x, \dot{y}, y)$ у зонах стохастичності

Саме такий підхід дозволяє наближено замінити вказані відображення одновимірними у сенсі роботи [5], а потім побудувати відповідну їм діаграму

Ламерея $l_k = T(l_{k-1})$, де l_k – координата, яка відраховується вдовж джгута. Отримані діаграми для низки значень l_k (у вигляді діаграм Ламерея) подані на рис. 6.

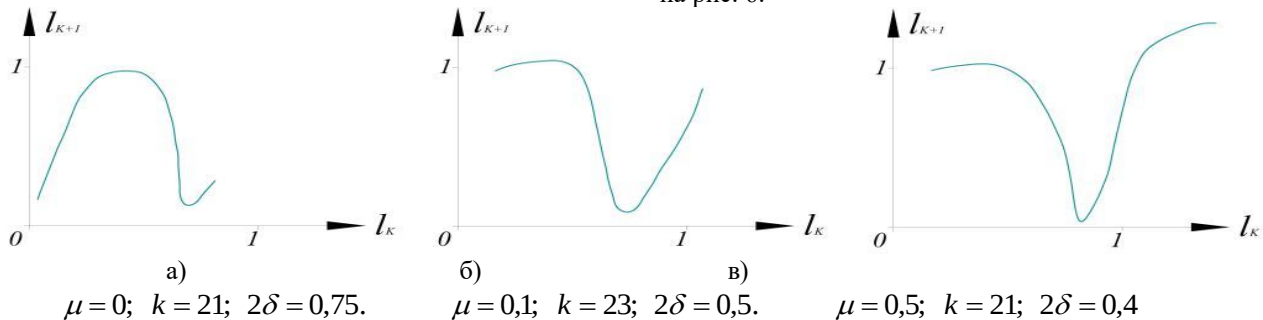


Рис. 6. Вид діаграми Ламерея при $\omega_0 = 1$; $h = 20$; $\gamma = 1$; $p = q = a = 1$.

Стохастичність у системі (13) стійка до зміни нелінійних характеристик. Так, при додаванні до функцій $f(x)$ виду (14) квадратичного члену $d \cdot x^2$ та варіювання знаку і величини d у широких межах – області стохастичності у просторі параметрів й характер автоколивань змінювались несуттєво.

Висновки.

Знайдені та досліджені у роботі стохастичні коливання у механічній системі «двигун гусеничної машини – регулятор швидкості обертання ротора ММР» за допомогою за допомогою мехатронної системи управління рухом (мехатронного модуля руху) можуть виявитись більш ефективними для цілей підвищення чутливості ММР, ніж традиційно застосовувані для цього періодичні автоколивання, оскільки останні часто призводять до небажаних ефектів резонансного типу.

Розроблені та науково обґрунтовані фізико-механічна та математична моделі дозволяють суттєво підвищити чутливість регулятора швидкості

обертання ротора двигуна гусеничної машини при застосуванні саме ММР, якщо механічну систему «двигун гусеничної машини – регулятор швидкості обертання ротора ММР» ввести у режим стохастичних автоколивань.

Доведено, що подібний підхід може бути використаний у подальшому для проектування, моделювання подібних механічних систем як на стадії їх розробки, так і у режимах реальної експлуатації, а також задля уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку параметрів двигуна гусеничної машини та регулятора швидкості обертання його ротора при використанні сучасних мехатронних модулів руху (ММР).

Слід зазначити, що рівняння системи (13) мають узагальнюючий характер, описують доволі широке коло технічних та фізичних систем, у яких, мабуть, теж можуть спостерігатись автоколивання (періодичні та стохастичні), аналогічні дослідженим, котрі описані у роботах [8-15].

Список використаних джерел

1. David G. Alciatore. Introduction to mechatronics and measurement systems. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 609 p.
2. Erika Ottaviano. Mechatronics for cultural heritage and civil engineering. Cham : Springer International Publishing, 2018. 372 p.
3. Гашук П. М., Зорій М. М. Лінійні моделі дискретно-неперервних механічних систем. – Львів: Українські технології, 1999. – 372 с.
4. Стоцько З. А., Сокіл Б. І., Топільницький В. І. Нелінійна модель руху шару середовища робочого контейнера вібраційних машин об'ємного оброблення виробів зі змінним параметром нелінійності // Машинознавство. – 2001. – №1(43). – С.19–23.
5. Антощенко Р.В., Нанка О.В., Лебедев А.Т., Антощенко В.М., Кісь В.М., Галич І.В. Мехатронні системи автомобілів і тракторів. Підручник. Харків. 2020. 219 с.
6. Uwe Kiencke, Lars Nielsen. Automotive control systems for engine, driveline, and vehicle. Berlin : Springer-Verlag, 2005. 521 p.
7. Robert H. Bishop. Mechatronics. An Introduction. Boca Raton : CRC Press, 2006. 285 p.
8. Пересада С.М., Пушкар М.В. Основи мехатроніки. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 136с.
9. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник. – К., 2012. 357с.
10. Andrew I. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2020. 517p.
11. David G. Alciatore. Introduction to mechatronics and measurement systems. – New York: McGraw – Hill Education, 2018. 609p.
12. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Крушельницький В.В. Мехатроніка. Підручник. – К., 2020. 404с.
13. Артюх О.М., Дударенко О.В., Кузьмін В.В. та ін. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 372с.
14. Чумак В.В., Коваленко М.А., Котлярова В.В. Безконтактні регульовані електричні машини: практикум. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 55с.
15. Vladimir Rajs, Nikola Lj. Rasevic, Milan Z. Bodic, Miodrag M. Zukovic, Kalman B. Babkovic. PID Controller Design for Motor Speed Regulation with Linear and Non – Linear Load. IFAC PapersOnline 55-4 (2022). P. 225-229.

MECHATRONIC MODULES OF TRACKED VEHICLES: MODELING, THEORETICAL ANALYSIS OF PERIODIC AND STOCHASTIC SELF-OSCILLATIONS IN SYSTEMS "ENGINE - ROTOR SPEED CONTROLLER"

PhD (Tech.) A. Zadorozhnyi, Dr. Sc. (Tech.), O. Stakhovsky,
PhD (Tech.) Y. Chovnyuk, O. Klimov, V. Gryniuk.

Abstract. The work is devoted to modeling and theoretical analysis of nonlinear stochastic and periodic oscillations occurring in tracked vehicles, taking into account the effect of inertia of the engine speed controller. In speed control systems for machines belonging to the class of mechatronic motion modules (MMM), with an increase in the sensitivity of the controllers, there is an inevitable danger of losing stability to the excitation of self-oscillations. Such oscillations, as shown in the article, can be useful, for example, for increasing the sensitivity of the MMM.

In modern controlled tracked machines, there is a clear tendency to reduce the moments of inertia of rotating parts and to increase the rigidity of the static characteristic of the engine. This leads to the need to take into account transient processes in the machine engine. As a rule, the time of setting transient actions in the drive is revealed in the same order as the constant controller. This paper presents the results of a study of the stability of the stationary rotation mode and the nature of oscillations outside the stability limits (in the area of dynamic chaos). The stochastic oscillations self-oscillations identified and studied in the work, in particular, can be more effective for the purpose of increasing the sensitivity of the MMR than the traditional periodic self-oscillations, since the latter often lead to undesirable resonance effects. In some technological and testing tracked machines, it is useful to use stochastic self-oscillations as working processes.

Keywords: mechatronic motion modules, tracked vehicles, modeling, theoretical analysis, periodic and stochastic self-oscillations, inertia, sensitivity, rotor speed controller, engine, dynamic chaos, point reflection method, Poincaré map, Lamerey diagrams, oscillation cycle doubling bifurcation.

Задорожний Андрій Олексійович, канд. техн. наук, доцент, старший викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

ORCID iD: 0000-0002-1031-0585. Тел.: +38 (066) 931-28-78. E-mail: zsnj1971@ukr.net

Стаховський Олег Валерійович, доктор техн наук, професор кафедри військової підготовки Національного Університету Оборони. ORCID iD: 0000-0002-9808-6302. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: dr.stahman@gmail.com

Човнюк Юрій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичного виховання і спорту, Київський національний університет будівництва і архітектури, ORCID iD: 0000-0002-0608-0203. Тел.: +38 (096) 570 45 65. E-mail: ychovnyuk@ukr.net

Клімов Олексій Петрович, начальник кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0003-0727-2976. Тел.: +38 (098) 283 50 21. E-mail: klimovaleksej800@gmail.com

Гринюк Володимир Володимирович, начальник кафедри військової підготовки, Національний Університет Оборони. ORCID iD: 0009-0003-0445-4376. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: vova.kira.alla@gmail.com

Zadorozhnyi Andriy Oleksiyovych, Associate Professor, PhD., Senior Lecturer, department of armored weapons and military equipment, Military Institute of Tank Troops of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". ORCID iD: 0000-0002-1031-0585. Тел.: +38 (066) 931-28-78. E-mail: zsnj1971@ukr.net

Stakhovsky Oleg Valeriyovych, Dr. Sc. (Tech.), professor of the department of military training National Defense University. ORCID iD: 0000-0002-9808-6302. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: dr.stahman@gmail.com

Chovnyuk Yuriy Vasyliovych, Associate Professor, PhD., department of physical education and sports, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0002-0608-0203. Тел.: +38 (096) 570 45 65. E-mail: ychovnyuk@ukr.net

Klimov Oleksii Petrovich, Head the Armored weapons and military equipment department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". ORCID iD: 0000-0003-0727-2976. Тел.: +38 (093) 147-66-98. E-mail: klimovaleksej800@gmail.com

Gryniuk Volodymyr Volodymyrovych Head the Armored weapons of the department of military training National Defense University. ORCID iD: 0009-0003-0445-4376. Тел.: +38 (050) 254-75-28. E-mail: vova.kira.alla@gmail.com