

SolidWorks є параметричною **CAD**-програмою. Це дає принципову можливість звертатись і відповідно змінювати параметри моделі. Для повноцінного використання цієї можливості було створено макрос, який виконує побудову профілю кулачка за даними з текстових файлів (стандартними функціями такі побудови не виконуються). Використання стандартних можливостей параметризації, тобто створення повністю визначеної моделі (термін запозичено у [5]), а також створеного макроса дає широкі можливості для дослідження механізмів.

Таким чином для вказаних вище розмірів і синтезованого кулачка виконана тривимірна модель механізму (рис. 8) і проведено моделювання руху для одного циклу. На графіках чітко спостерігається зона з постійною швидкістю. Величина цієї зони відповідає заданій.

Висновки

- запропонована структурна схема комбінованого механізму;
- створено математичний апарат і програмне забезпечення по синтезу пропонуваного механізму;
- віртуальний експеримент виконаний у середовищі **SolidWorks+Cosmos-Motion** підтверджує працездатність механізму загалом і коректність отриманих аналітичних залежностей зокрема.

Література

1. Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1967. – 720 с.
3. Полюдов О.М. Механіка поліграфічних автоматів. – К.: НМК ВО, 1991. – 168 с.
4. Теория механизмов и машин: Учеб. для ВТУЗов/ К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др./ Под ред. К.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1987. – 496 с.
5. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. – СПб.: Питер, 2005. – 768 с.
6. Тир К.В. Механика полиграфических автоматов. – М.: Книга, 1965. – 496 с.

УДК 517.9

Аспір. І.І. Назар¹ – НУ "Львівська політехніка"

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КРАЙОВИХ УМОВ НА АЧХ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ ГНУЧКОГО РОБОЧОГО ЕЛЕМЕНТА МЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ

Досліджується вплив неоднорідних крайових умов та змінної в часі сили натягу гнучкого робочого елемента приводу на його параметричні коливання. За допомогою методу Бубнова-Гальоркіна диференціальне рівняння поперечних коливань гнучкого елемента приводу приведено до нелінійного рівняння типу Мат'є. Для конкретного вигляду крайових умов отримано співвідношення, які визначають вплив кінематичних і силових чинників на АЧХ коливань.

Post-graduate I.I. Nazar – NU "L'viv's'ka Politekhnik"

Method of determination of influencing of initial conditions on AFD of nonlinear vibrations of flexible working element of mechanical drive

Influence of heterogeneous initial conditions and variable in time force of draw of flexible working element of drive is explored on his parametrical vibrations. By the met-

¹ Науковий керівник: проф. П.М. Гашук, д-р. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

hod of Bubnov-Galerkin differential equalization of transversal vibrations of flexible element of drive is resulted to nonlinear equalization as Mat'e. For the concrete type of initial conditions correlations which determine influencing of kinematics and power factors on AFD of vibrations are got.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Задача в тому, щоб визначити поперечні коливання гнучкого робочого елемента приводу, проте за відсутності переміщень у фіксованих точках (однорідні крайові умови), тому це завдання розглядалось раніше, а, наприклад, у [1] викладеній методиці дослідження коливань нелінійно-пружного середовища за умови, що його натяг є сталою величиною.

Слід зазначити, в багатьох випадках сила натягу у гнучкому елементі приводу через різного роду причини є змінною. Тому, **метою роботи** є комплексне дослідження: а) змінної сили натягу гнучкого елемента приводу, б) збурених крайових умов на динаміку процесу у механічному приводі. Такі задачі у нелінійній постановці не розглядались.

Постановка задачі. Гнучкий робочий елемент приводу моделюється як середовище зі сталим поперечним перерізом і рівномірно розподіленою вздовж довжини масою. Вважатимемо, що він рухається зі сталою за модулем поздовжньою швидкістю. Математичною моделлю поперечних його коливань є диференціальне рівняння [2]

$$u_{tt}(x,t) + 2Vu_{xt}(x,t) - \left(\frac{S}{\rho} - V^2 \right) u_{xx}(x,t) = \varepsilon f(u, u_x, u_t, \theta), \quad (1)$$

де: $u(x,t)$ – поперечне переміщення перерізу гнучкого робочого елемента приводу з координатою x у довільну мить часу t ; V – модуль швидкості V його руху; S – модуль натягу S у гнучкому елементі приводу; ρ – погонна маса гнучкого елемента; $\varepsilon f(u, u_x, u_t, \theta)$ – аналітична функція, яка характеризує періодичні та різної природи нелінійні сили, ε – малий параметр, $\theta = \mu t$ – фаза зовнішніх періодичних сил, μ – їх частота. До диференціального рівняння (1) долучимо крайові умови

$$\begin{aligned} u(x,t)|_{x=0} &= \varepsilon f_1(u, u_x, u_t, \theta)|_{x=0}, \\ u(x,t)|_{x=l} &= \varepsilon g_1(u, u_x, u_t, \theta)|_{x=l}, \end{aligned} \quad (2)$$

які показують, що у точках з фіксованими координатами (скажімо, в точках дотику гнучкого елемента до шківів) існують певного роду переміщення. Праві частини крайових умов (2) є 2π – періодичними за θ функціями. Таким чином, метою роботи є дослідження впливу параметрів V, S та правих частин співвідношень (1), (2) на коливний процес у приводі з гнучким робочим елементом.

Методика дослідження. Як і у [2] знайти розв'язок диференціального рівняння (1), безпосередньо застосовувавши метод Бубнова-Гальоркіна [3], не вдається. З цією метою введемо заміну

$$u(x,t) = v(x,t) + \varepsilon w(x,t), \quad (3)$$

за допомогою якої задачу з неоднорідними крайовими умовами можна звести до задачі з однорідними крайовими умовами. Нехай функція $w(x, t)$ є розв'язком диференціального рівняння $w_{xx} = 0$ і справджує крайові умови

$$\begin{aligned} w(x, t)|_{x=0} &= f_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=0}, \\ w(x, t)|_{x=l} &= g_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=l}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тоді, виходячи із (3), (4), функція $v(x, t)$ повинна бути розв'язком диференціального рівняння

$$v_{tt} + 2Vv_{xt} - \left(\frac{S}{\rho} - V^2 \right) v_{xx} = \varepsilon (f(v, v_x, v_t, \theta) - w_{tt} - 2Vw_{xt}) \quad (5)$$

і справджувати однорідні крайові умови

$$v(x, t)|_{x=0} = v(x, t)|_{x=l} = 0. \quad (6)$$

Знайти розв'язок крайової задачі для функції $w(x, t)$ у першому наближенні не становить значних математичних труднощів

$$w(x, t) = \frac{1}{l} \left[\left(g_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=l} - f_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=0} \right) x + l f_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=0} \right],$$

$$w_{tt}(x, t) = \frac{1}{l} \left[x \left(\frac{\partial^2 g_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=l}}{\partial t^2} \right) + l \frac{\partial^2 f_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=0}}{\partial t^2} \right],$$

$$w_{xt}(x, t) = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial g_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=l}}{\partial t} - \frac{\partial f_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=0}}{\partial t} \right).$$

Підставляючи $w_{tt}(x, t)$, $w_{xt}(x, t)$ в (5), отримуємо диференціальне рівняння виду

$$v_{tt} + 2Vv_{xt} - \left(\frac{S}{\rho} - V^2 \right) v_{xx} = \varepsilon F(x, v, v_x, v_t, \theta),$$

$$\begin{aligned} \text{де } F(x, v, v_x, v_t, \theta) = \varepsilon \left(f(v, v_x, v_t, \theta) - \frac{1}{l} \left[x \left(\frac{\partial^2 g_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=l}}{\partial t^2} \right) + l \frac{\partial^2 f_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=0}}{\partial t^2} \right] - \right. \\ \left. - 2V \frac{1}{l} \left(\frac{\partial g_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=l}}{\partial t} - \frac{\partial f_1(v, v_x, v_t, \theta)|_{x=0}}{\partial t} \right) \right). \end{aligned}$$

У випадку змінної сили натягу гнучкого елемента приводу (що становить значний інтерес як з теоретичної так і практичної точки зору) параметр S є функцією від часу. Нехай натяг змінюється відповідно до закону $S = S_0 + S_1 \cos mt$ (m – натуральне або близьке до нього число). Таке представлення натягу охоплює багато практичних задач.

З урахуванням зазначеного вище, рівняння поперечних коливань гнучкого елемента приводу набуває вигляду

$$v_{tt} + 2Vv_{xt} - \left(\frac{S_0}{\rho} - V^2 \right) v_{xx} = \frac{S_1}{\rho} v_{xx} \cos mt + \varepsilon F(x, v, v_x, v_t, \theta). \quad (7)$$

Оскільки функція $v(x, t)$ справджує однорідні крайові умови (6), для дослідження диференціального рівняння (7) можна застосувати метод Бубнова-Гальоркіна. Відповідно до нього функцію $v(x, t)$ шукатимемо у вигляді

$$v(x, t) = \sum_{k=1}^s X_k(x) T_k(t),$$

де $X_k(x)$ – функції, що справджують однорідні крайові умови: $X_k(0) = X_k(l) = 0$. Легко переконатись в тому, що такими функціями буде система функцій $\{X_k(x)\} = \left\{ \sin \frac{k\pi}{l} x \right\}$. У такому разі, враховуючи повноту і ортонормованість цієї системи функцій, із (7) після нескладних перетворень, для знаходження невідомих функцій $T_k(t)$, отримуємо звичайне диференціальне рівняння

$$\ddot{T} + \left(\frac{S_0}{\rho} - V^2 \right) \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2 T = \frac{S_1}{\rho} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2 T \cos mt + \varepsilon \bar{F}(T, \dot{T}, \theta),$$

$$\text{де } \bar{F}(T, \dot{T}, \theta) = \frac{1}{p} \int_0^l F(x, v, v_x, v_t, \theta) X(x) dx, \quad p = \frac{l}{2}.$$

Примітка. Тут і нижче індекс "k", який вказує на форму коливань, для простоти запису опускається.

Значний теоретичний і практичний інтерес становить випадок, коли виконується рівність

$$\left(\frac{S_0}{\rho} - V^2 \right) \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2 = n^2 - \alpha n^2,$$

$$\text{де: } n - \text{натуральне число, } \alpha = 1 - \left(\frac{S_0}{\rho} - V^2 \right) \left(\frac{k\pi}{nl} \right)^2$$

Для вказаного випадку функція $T(t)$ визначається рівнянням

$$\ddot{T} + n^2 T = n^2 \alpha T + \gamma T \cos mt + \varepsilon \bar{F}(T, \dot{T}, \theta),$$

$$\text{де } \gamma = \frac{S_1}{\rho} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^2 - \text{коефіцієнт параметричного збурення.}$$

Нижче зупинимось на випадку $f(x, u, u_x, u_t, \theta) = k_1 u_x^2 u_{xx} - k_2 u_t^3$ та крайових умовах вигляду

$$u(x, t)|_{x=0} = 0, \quad u(x, t)|_{x=l} = H \sin \mu t,$$

які показують, що в точці з координатою $x=l$ існують гармонійні переміщення. Використовуючи наведене вище, маємо

$$\ddot{T} + n^2 T = n^2 \alpha T + \gamma T \cos mt + \delta T^3 + \chi \cos \mu t + \Delta \sin \mu t - \beta \dot{T}^3, \quad (8)$$

$$\text{де: } \delta = -\frac{k_1}{4} \left(\frac{k\pi}{l} \right)^4, \quad \chi = -\frac{8VH\mu}{k\pi l}, \quad \Delta = \frac{0,029\mu^2 H}{l^2} \int_0^l x \sin \frac{k\pi}{l} x dx, \quad \beta = \frac{3}{4} k_2.$$

Нехай $n \approx \mu$, тоді розв'язок рівняння (8) шукатимемо у вигляді

$$T = r \cos nt + s \sin nt + (n^2 - \mu^2)^{-1} (\chi \cos \mu t + \Delta \sin \mu t). \quad (9)$$

Підставляючи (9) в (8), після нескладних перетворень отримуємо систему алгебраїчних рівнянь, яка визначає невідомі параметри r, s

$$\begin{aligned} \left(n^2 \alpha + \frac{3}{4} \delta A^2 + k \gamma^2 \right) r + \gamma r - \frac{3}{4} n^3 \beta A^2 s + (n^2 - \mu^2)^{-1} \chi &= 0, \\ \left(n^2 \alpha + \frac{3}{4} \delta A^2 + k \gamma^2 \right) s - \gamma s + \frac{3}{4} n^3 \beta A^2 r + (n^2 - \mu^2)^{-1} \Delta &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

а $\sqrt{r^2 + s^2} = A$.

Система рівнянь (10) зв'язує A з параметрами системи у вигляді

$$\frac{3}{4} \delta A^2 = -n^2 \alpha - k \gamma^2 \pm \sqrt{\gamma^2 - \frac{9}{16} n^6 \beta^2 A^4 + (n^2 - \mu^2)^{-1} \Psi},$$

де: $\Psi = \sqrt{A^{-2} \chi^2 (\Omega - \gamma)^2 + A^{-2} \Delta^2 (\Omega + \gamma)^2 - 3 \gamma \chi \Delta n^3 \beta + \frac{9}{16} n^6 \beta^2 A^2 (\Delta^2 + \chi^2)}$; $\Omega = n^2 \alpha + \frac{3}{4} \delta A^2 + k \gamma^2$.

Нижче, на рисунку, подані графіки залежності параметра A від α при різних значеннях його поздовжньої швидкості та $l = 1$ м, $\rho = 0.5$ кг/м, $S_0 = 200$ Н.

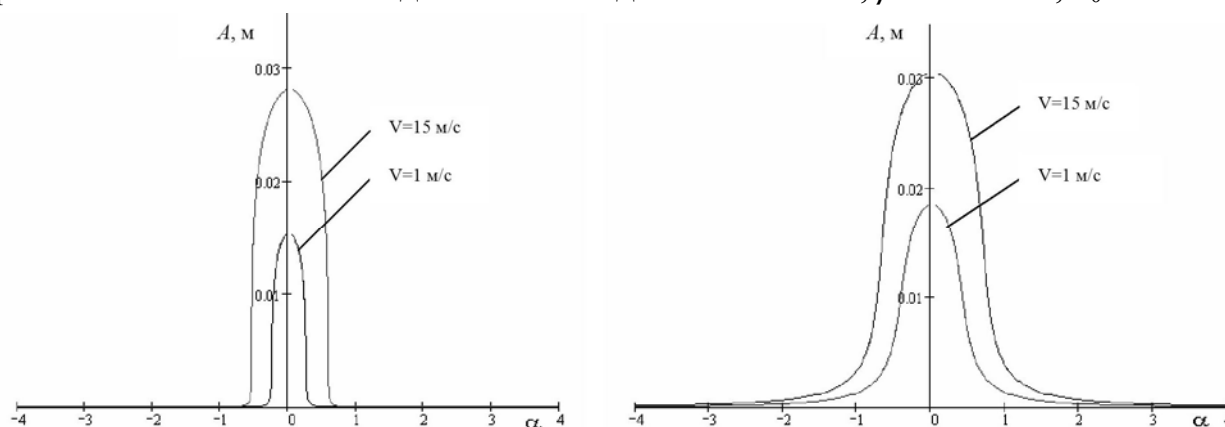


Рис. 1. Резонансні значення параметра A при 1) $H=0,002$ м, 2) $H=0,2$ м

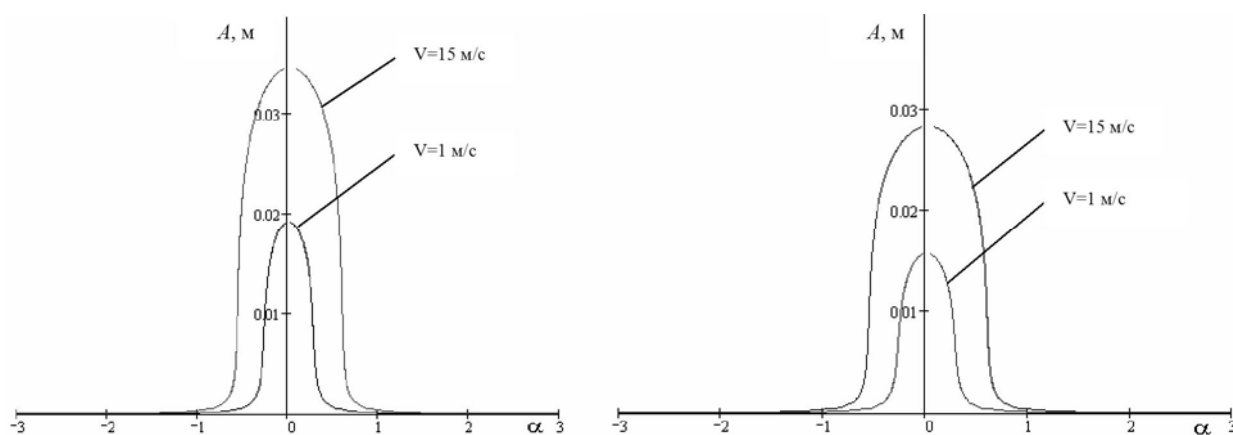


Рис. 2. Резонансні значення параметра A при 1) $\beta = 15$, 2) $\beta = 22,5$

Висновки. На основі представлених графічних залежностей можна стверджувати:

1) із зростанням поздовжньої швидкості руху гнучкого робочого елемента приводу резонансне значення параметра A збільшується (при $V=15$ м/с резонансне значення параметра A більше на 86 % від його величини при $V=1$ м/с);

2) величина амплітуди гармонійного збурення крайових умов впливає незначним чином на величину параметра A – зростання параметра H у 100 разів (від 0,002 м до 0,2 м) спричиняє ріст параметра A лише на 10 %; збільшення параметра H приводить до істотного розширення резонансної області;

3) зростання коефіцієнта β у силі опору зумовлює значне зменшення резонансного значення параметра A (резонансне значення параметра A при $\beta = 22,5$ менше на 20 % від його значення при $\beta = 15$).

Література

1. Вікович І.А., Висоцька Х.А. Нелінійні коливання рухомої струни// Вісник НУ "Львівська політехніка": Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів: НУ "Львівська політехніка". – 2004, № 509. – С. 30-35.

2. Гащук П.М., Назар І.І. Нелінійні коливання гнучкого робочого елемента приводу під дією імпульсних сил// Вісник НУ "Львівська політехніка": Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів: НУ "Львівська політехніка". – 2007, № 588. – С. 20-24.

3. Галеркин Б.Г. Стержни и пластинки// Вестник инженеров техников. – 1915, № 19. – С. 23-32.

УДК 649.8:64.2

Доц. О.О. Маслак, канд. екон. наук;
асист. В.Й. Жезуха – НУ "Львівська політехніка"

ОЦІНЮВАННЯ ІННОВАЦІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Проаналізовано різні методології оцінки ефективності інновацій технологічних процесів, які виникають на машинобудівних підприємствах. З'ясовано, що інновації технологічних процесів, результатом якого і є практичне впровадження інновацій, може спричиняти різноманітні за своїм характером ефекти, як на рівні окремих суб'єктів господарювання так і на рівні економіки регіонів, галузей економіки та економіки країни в цілому. Ці ефекти різняться за стадіями інноваційного процесу, особливостями прояву і оцінки.

Assoc. prof. O.O. Maslak; assist. V.Y. Zhezhukha – NU "L'vivs'ka Politekhnikha"

Evaluation of innovacynosti of technological processes of machine-building enterprises and determination of them economic efficiency

Different methodologies of estimation of efficiency of innovations of technological processes which arise up on machine-building enterprises are analyzed. It is found out, that innovations of technological processes, by the result of which and there is practical introduction of innovations, can draw various after the character effects, as at the level of separate subjects of manage so at the level of economy of regions, industries of economy and economy of country, on the whole. These effects differ after the stages of innovative process, features of display and estimation.