УДК 539.3:517.926.4

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗБУРЮВАНЬ-ВКБ-ГАЛЬОРКІНА ДО РОЗРАХУНКУ КОЛИВАНЬ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ, ЩО ОПИСУЄТЬСЯ НЕЛІНІЙНИМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ РІВНЯННЯМ З ПАРАМЕТРАМИ, ЗАЛЕЖНИМИ ВІД ЧАСУ*

Грищак В.З., д.т.н., професор, Лисенко В.В., аспірант

Запорізький державний університет

У роботі розглядається метод збурювань-ВКБ-Гальоркіна, який базується на методі подвійного асимптотичного розвинення, для отримання наближеного аналітичного розв'язку нелінійного диференційного рівняння другого порядку з кубічною нелінійністтю та параметрами, залежними від часу. Застосовуються методи, які базується на умові ортогональності Гальоркіна, а саме метод ВКБ-Гальоркіна (внутрішня асимптотика) та метод збурювань-Гальоркіна (зовнішня асимптотика). Наведено чисельні результати.

Ключові слова: змінні параметри, наближений розв'язок, гібридний підхід, нелінійність

Грищак В.З., Лысенко В.В. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВОЗМУЩЕНИЙ-ВКБ-ГАЛЕРКИНА К РАСЧЕТУ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, КОТОРАЯ ОПИСЫВАЕТСЯ НЕЛИНЕЙНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЕМ С ПАРАМЕТРАМИ, ЗАВИСЯЩИМИ ОТ ВРЕМЕНИ / Запорожский государственный университет, Украина

В работе рассмотрен метод возмущений-ВКБ-Галеркина, который базируется на методе двойного асимптотического разложения, для нахождения приближенного аналитического решения нелинейного дифференциального уравнения второго порядка с кубической нелинейностью и параметрами, зависящими от времени. Используются методы, которые базируется на условии ортогональности Галеркина, а именно метод ВКБ-Галеркина (внутренняя асимптотика) и метод возмущений-Галеркина (внешняя асимптотика). Приведены численные результаты.

Ключевые слова: переменные параметры, приближенное решение, гибридный подход, нелинейность

Gristchak V.Z., Lysenko V.V. THE APPLICATION OF THE PERTURBATION-WKB-GALERKIN METHOD TO CALCULATION OF VIBRATIONS OF MECHANICAL SYSTEM, WHICH IS DESCRIBED BY THE NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATION WITH TIME-DEPENDED PARAMETERS / Zaporizhzhia state university, Ukraine

In the paper the perturbation-WKB-Galerkin method to obtain approximate analytical solution of nonlinear differential equation of the second order with cubic nonlinearity and time-dependent parameters is applied. The methods are used which are based on the Galerkin condition of orthogonality, namely the ВКБ-Galerkin method (internal expansion) and the perturbation-Galerkin method (external expansion). The numerical results are offered.

Key words: time-depended parameters, approximate solution, hybrid method, non-linearity

1. ВСТУП

У літературі детально висвітлене питання розрахунку коливань різноманітних механічних систем, які описуються лінійними диференційними рівняннями з постійними параметрами. Але лінійні диференційні рівняння з'являються, як правило, в процесі спрощення математичної моделі системи, хоча дуже часто нелінійні диференційні рівняння більш точно описують поведінку реальних об'єктів. Параметри реальної системи часто також не є постійними за часом. Тому є актуальним дослідження саме нелінійних диференційних рівнянь зі змінними параметрами, причому має сенс використовувати різноманітні гібридні підходи, які дозволяють отримати наближені аналітичні розв'язки задач, що більш точніше описують поведінку системи, ніж розв'язки з використанням тільки асимптотичних методів.

У цій роботі розглядається метод збурювань-ВКБ-Гальоркіна, який базується на методі подвійного асимптотичного розвинення [1, 2, 3], для отримання наближеного аналітичного розв'язку нелінійного диференційного рівняння другого порядку у вигляді (1) або (2) з кубічною нелінійністтю та параметрами, залежними від часу. До розв'язання такого рівняння зводиться, наприклад, процес розв'язання задачі про коливання прямокутної пластинки без початкового прогину методом Бубнова-Гальоркіна [4]. Застосовуються методи, які базується на умові ортогональності Гальоркіна, а саме метод ВКБ-Гальоркіна

* Робота виконувалась згідно з держбюджетною темою №3/2000 Міністерства освіти і науки України в Запорізькому державному університеті

(внутрішня асимптотика) [5] та метод збурювань-Гальоркіна (зовнішня асимптотика) [6]. Розв'язання задачі поділено на чотири етапи: розв'язання вихідного нелінійного диференційного рівняння методом збурювань, розв'язання лінійних диференційних рівнянь методом ВКБ, отримання гібридного ВКБ-розв'язку методом ВКБ-Гальоркіна та отримання гібридного збурювань-ВКБ-розв'язку методом збурювань-Гальоркіна.

Наведено чисельні результати.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Досліджуються вимушені коливання механічної системи, параметри якої залежать від часу, що описується нелінійним неоднорідним диференціальним рівнянням другого порядку вигляду:

$$m_0 m(t) f''(t) + c(t) f'(t) + k_0 k(t) f(t) + \mu \cdot p(t) f^3(t) = 0, \quad (1)$$

або

$$f''(t) + 2E(t) f'(t) + \omega_0^2 \cdot \varphi(t) f(t) + \alpha \cdot q(t) f^3(t) = 0, \quad (2)$$

де $m_0 m(t)$ – маса; $c(t)$ – змінний коефіцієнт, який характеризує демпфірування, наприклад коефіцієнт в'язкого тертя; $k_0 k(t)$ – жорсткість пружного зв'язку або коефіцієнт, який характеризує силу, яку необхідно прикласти к механічній системі, щоб отримати одиничне переміщення в момент часу t; $\mu \cdot p(t)$ коефіцієнт, який характеризує нелінійність системи; $2E(t) = \dfrac{c(t)}{m_0 m(t)}$; $\omega_0^2 = \dfrac{k_0}{m_0}$; $\varphi(t) = \dfrac{k(t)}{m(t)}$; $\alpha = \mu / m_0$; $q(t) = p(t) / m(t)$.

Будемо шукати розв'язок цього рівняння на відрізку часу від нуля до деякого заданого T та у припущені, що він існує і є єдиним. Для отримання розв'язку нелінійного диференційного рівняння (2) застосуємо метод збурювань-ВКБ-Гальоркіна [5, 6], який складається з чотирьох етапів: розв'язання вихідного нелінійного диференційного рівняння методом збурювань, розв'язання лінійних диференційних рівнянь методом ВКБ, отримання гібридного ВКБ-розв'язку методом ВКБ-Гальоркіна та отримання гібридного збурювань-ВКБ-розв'язку методом збурювань-Гальоркіна.

3. ПЕРШИЙ ЕТАП. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗБУРЮВАНЬ

На першому етапі, відповідно до методу збурювань [7], наближений розв'язок рівняння (2) будемо шукати у вигляді

$$f(t) = f_0(t) + \alpha f_1(t) + \alpha^2 f_2(t) + \dots, \quad (3)$$

де $f_0(t)$, $f_1(t)$, ... – невідомі функції часу. У другому наближенні рівняння (3) запишеться як

$$f(t) = f_0(t) + \alpha f_1(t). \quad (4)$$

Після підстановки останнього виразу (4) та його перших двох похідних у рівняння (2) та прирівнюючи параметри при однакових степенях α отримаємо систему лінійних диференціальних рівнянь відносно невідомих функцій $f_0(t)$ та $f_1(t)$:

$$f_0''(t) + 2E(t) f_0'(t) + \omega_0^2 \cdot \varphi(t) f_0(t) = 0, \quad (5)$$

$$f_1''(t) + 2E(t) f_1'(t) + \omega_0^2 \cdot \varphi(t) f_1(t) = -q(t) f_0^3(t), \quad (6)$$

4. ДРУГИЙ ЕТАП. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВКБ

На другому етапі, знайдемо наближений розв'язок диференційного рівняння (5) за допомогою методу ВКБ [8]. Зробивши заміну

$$f_0(t) = u(t) \cdot \exp\left(-\int_{t_0}^{t} E(\tau) d\tau \right), \quad (7)$$

отримаємо рівняння

$$\varepsilon^2 \cdot u''(t) + g_0(t)u(t) = 0\,, \tag{8}$$

де $g_0(t) = \varphi(t) - \omega_0^{-2}E(t)^2 - \omega_0^{-2}E'(t)$; $\varepsilon = \omega_0^{-1}$. Згідно з методом ВКБ наближений розв'язок диференційного рівняння (8) будемо шукати у вигляді [8]:

$$u(t) = \exp\left(\int_{t_0}^{t}(\varepsilon^{-1}\psi_0(\tau) + \psi_1(\tau) + \varepsilon\psi_2(\tau) + ...)d\tau\right), \tag{9}$$

де $\psi_0(t)$, $\psi_1(t)$, ... – невідомі функції часу. В першому наближенні формула (9) запишеться як

$$u(t) = \exp\left(\int_{t_0}^{t}\varepsilon^{-1}\psi_0(\tau)d\tau\right), \tag{10}$$

Підставивши останній вираз (10) та його перші дві похідні у рівняння (8) і збираючи коефіцієнти при ε^0, дістанемо рівняння для визначення шуканої функції $\psi_0(t)$:

$$\psi_0^2(t) = -g_0(t)\,, \tag{11}$$

звідки витікає, що

$$\psi_0(t) = \pm i\sqrt{g_0(t)}\,. \tag{12}$$

Тоді ВКБ-розв'язок рівняння (8) виглядає так:

$$u(t) = C_1\cos\left(\int_{t_0}^{t}\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right) + C_2\sin\left(\int_{t_0}^{t}\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right), \tag{13}$$

де

$$\omega_\varepsilon(t) = \sqrt{\omega_0^2\varphi(t) - E(t)^2 - E'(t)}\,. \tag{14}$$

Загальній ВКБ-розв'язок рівняння (5) виглядає так:

$$f_0(t) = \exp\left(-\int_{t_0}^{t}E(\tau)d\tau\right)\cdot\left(C_1\cos\left(\int_{t_0}^{t}\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right) + C_2\sin\left(\int_{t_0}^{t}\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right)\right), \tag{15}$$

де C_1 та C_2 – постійні, які знаходяться з початкових умов.

Розв'язок рівняння (6) знайдемо за допомогою методу функцій Гріна

Нехай зворотному оператору рівнянь (5), (6) відповідає оператор Вольтерра з функцією Гріна $h(t,\tau)$. Тоді розв'язок рівняння (6) представимо у вигляді [9]:

$$f_1 = -\int_{t_0}^{t}h(t,\tau)q(\tau)f_0^3(\tau)d\tau\,. \tag{16}$$

Функція Гріна $h(t,\tau)$ визначається як розв'язок рівняння

$$\frac{\partial^2 h(t,\tau)}{\partial t^2} + 2E(t)\frac{\partial h(t,\tau)}{\partial t} + \omega_0^2\cdot\varphi(t)h(t,\tau) = \delta(t-\tau)\,, \tag{17}$$

з нульовими початковими умовами у момент часу τ, тобто для цього рівняння $t_0 = \tau$. Замість того щоб розв'язувати неоднорідне рівняння (17), можна розв'язати відповідне однорідне рівняння

$$\frac{\partial^2 h(t,\tau)}{\partial t^2} + 2E(t)\frac{\partial h(t,\tau)}{\partial t} + \omega_0^2\cdot\varphi(t)h(t,\tau) = 0 \tag{18}$$

з початковими умовами вигляду

$$h(t,\tau)\big|_{t=\tau}=0,\ \left.\frac{\partial h(t,\tau)}{\partial t}\right|_{t=\tau}=0. \tag{19}$$

Аналогічно (15), розв'язком однорідного рівняння (18) методом ВКБ у першому наближенні буде:

$$h(t,\tau)=\exp\left(-\int_{\tau}^{t}E(\theta)d\theta\right)\cdot\left(C_1\cos\left(\int_{\tau}^{t}\omega_{\varepsilon}(\theta)d\theta\right)+C_2\sin\left(\int_{\tau}^{t}\omega_{\varepsilon}(\theta)d\theta\right)\right). \tag{20}$$

Знайшовши довільні постійні C_1, C_2 з початкових умов (19), отримаємо вираз для функції Гріна:

$$h(t,\tau)=\frac{1}{\omega_{\varepsilon}(\tau)}\exp\left(-\int_{\tau}^{t}E(\theta)d\theta\right)\sin\left(\int_{\tau}^{t}\omega_{\varepsilon}(\theta)d\theta\right). \tag{21}$$

5. ТРЕТІЙ ЕТАП. ВКБ-ГАЛЬОРКІН РОЗВ'ЯЗОК

На третьому етапі, згідно до методу ВКБ-Гальоркіна, гібридний розв'язок $u_H(t)$ рівняння (8) представимо у вигляді [5]:

$$u_H(t)=\exp\left(\int_{t_0}^{t}(\delta_0(\varepsilon)\psi_0(\tau)+\delta_1(\varepsilon)\psi_1(\tau)+...)d\tau\right), \tag{22}$$

де $\psi_0(t)$, $\psi_1(t)$, ... – координатні функції часу, визначені на другому етапі; $\delta_0(\varepsilon)$, $\delta_1(\varepsilon)$, ... – невідомі функції параметра ε, які необхідно знайти. У першому наближенні останній вираз (22) запишеться так:

$$u_H(t)=\exp\left(\int_{t_0}^{t}\delta_0(\varepsilon)\psi_0(\tau)d\tau\right). \tag{23}$$

У результаті підставлення останнього співвідношення (23) та перших двох його похідних у рівняння (8), дістанемо вираз для відхилу:

$$R(\psi_0,\psi_0',\delta_0,\varepsilon,t)=\varepsilon^2(\delta_0^2(\varepsilon)\psi_0^2(t)+\delta_0(\varepsilon)\psi_0'(t))+g_0(t), \tag{24}$$

Застосовуючи тепер критерій ортогональності Бубнова-Гальоркіна у формі

$$\int_{t_0}^{T}R(\psi_0,\psi_0',\delta_0,\varepsilon,t)\psi_0(t)dt=0 \tag{25}$$

і враховуючи, що

$$\psi_0'(t)=\pm\frac{i\cdot g_0'(t)}{2\sqrt{g_0(x)}}, \tag{26}$$

дістанемо квадратне рівняння для визначення невідомого параметра $\delta_0(\varepsilon)$ такого вигляду

$$\mp\delta_0^2\varepsilon^2\int_{t_0}^{T}g_0^{\frac{3}{2}}(t)dt-\delta_0\frac{\varepsilon^2}{2}\int_{t_0}^{T}g_0'(t)dt\pm\int_{t_0}^{T}g_0^{\frac{3}{2}}(t)dt=0. \tag{27}$$

Розв'язок цього рівняння запишеться таким чином

$$\delta_{0_{1,2}}(\varepsilon)=-\frac{g_0(T)-g_0(t_0)}{4\omega_0\int_{t_0}^{T}g_0^{\frac{3}{2}}(t)dt}\pm i\cdot\sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2}+\left(\frac{g_0(T)-g_0(t_0)}{4\omega_0\int_{t_0}^{T}g_0^{\frac{3}{2}}(t)dt}\right)^2}. \tag{28}$$

Гібридним ВКБ-Гальоркін розв'язком рівняння (8) з урахуванням того, що $\varepsilon=\omega_0^{-1}$, буде

$$u(t)=\exp\left(\int_{t_0}^{t}a_0(t_0,T)\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right)\cdot\left(C_1\cos\left(\int_{t_0}^{t}b_0(t_0,T)\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right)+C_2\sin\left(\int_{t_0}^{t}b_0(t_0,T)\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right)\right),\quad(29)$$

де

$$a_0(t_1,t_2)=\frac{g_0(t_1)-g_0(t_2)}{4\omega_0\int_{t_1}^{t_2}g_0^{\frac{3}{2}}(\tau)d\tau},\ b_0(t_1,t_2)=\sqrt{1+a_0^2(t_1,t_2)},\quad(30)$$

Остаточно гібридний ВКБ-Гальоркін розв'язок рівняння (5) з урахуванням (7), набуває вигляду

$$f_{0_H}(t)=\exp\left(\int_0^t(a_0(t_0,T)\omega_\varepsilon(\tau)-E(\tau))d\tau\right)\times$$
$$\times\left(C_1\cos\left(\int_0^t b_0(t_0,T)\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right)+C_2\sin\left(\int_0^t b_0(t_0,T)\omega_\varepsilon(\tau)d\tau\right)\right).\quad(31)$$

Аналогічно (31), гібридний ВКБ-Гальоркін розв'язок рівняння (18), тобто функція Гріна $h_H(t,\tau)$, має вигляд:

$$h_H(t,\tau)=\frac{1}{b_0(\tau,T)\omega_\varepsilon(\tau)}\exp\left(\int_\tau^t(a_0(\tau,T)\omega_\varepsilon(\theta)-E(\theta))d\theta\right)\sin\left(\int_\tau^t b_0(\tau,T)\omega_\varepsilon(\theta)d\theta\right),\quad(32)$$

а гібридний ВКБ-Гальоркін розв'язок рівняння (6) набуває вигляду:

$$f_{1_H}=-\int_{t_0}^{t}h_H(t,\tau)q(\tau)f_0^3(\tau)d\tau.\quad(33)$$

6. ЧЕТВЕРТИЙ ЕТАП. ЗБУРЮВАНЬ-ВКБ-ГАЛЬОРКІН РОЗВ'ЯЗОК

На останньому, четвертому, етапі, згідно з методом збурювань-Гальоркіна, гібридний розв'язок $f_H(t)$ вихідного диференціального рівняння (2) представимо у вигляді [6]:

$$f_H(t)=\delta_0 f_{0_H}(t)+\delta_1 f_{1_H}(t)+\dots,\quad(34)$$

де $f_0(t)$, $f_1(t)$, ... – координатні функції часу, визначені на першому етапі; δ_0, δ_1, ... – невідомі функції параметра ε, які необхідно знайти. У першому наближенні останній вираз (34) запишеться так:

$$f_H(t)=\delta_0 f_{0_H}(t)+\delta_1 f_{1_H}(t).\quad(35)$$

У результаті підставлення останнього співвідношення (35) та перших двох його похідних у вихідне рівняння (2), дістанемо вираз для відхилу:

$$R(f_{0_H},f'_{0_H},f''_{0_H},f_{1_H},f'_{1_H},f''_{1_H},\delta_0,\delta_1,\varepsilon,t)=\delta_0(f''_{0_H}(t)+2E(t)f'_{0_H}(t)+\omega_0^2\cdot\varphi(t)f_{0_H}(t))+$$
$$+\delta_1(f''_{1_H}(t)+2E(t)f'_{1_H}(t)+\omega_0^2\cdot\varphi(t)f_{1_H}(t))+$$
$$+\delta_0^3 f^3_{0_H}(t)+\delta_1^3 f^3_{1_H}(t)+3\delta_0^2\delta_1 f^2_{0_H}(t)f_{1_H}(t)+3\delta_0\delta_1^2 f_{0_H}(t)f^2_{1_H}(t).\quad(36)$$

Застосовуючи тепер критерій ортогональності Бубнова-Гальоркіна у формі

$$\begin{cases} \int_{t_0}^{T} R(f_{0_H}, f'_{0_H}, f''_{0_H}, f_{1_H}, f'_{1_H}, f''_{1_H}, \delta_0, \delta_1, \varepsilon, t) f_{0_H}(t) dt = 0, \\ \int_{t_0}^{T} R(f_{0_H}, f'_{0_H}, f''_{0_H}, f_{1_H}, f'_{1_H}, f''_{1_H}, \delta_0, \delta_1, \varepsilon, t) f_{1_H}(t) dt = 0, \end{cases} \tag{37}$$

дістанемо систему з двох рівнянь для визначення невідомих параметрів δ_0 та δ_1, яку розв'яжемо чисельно. Маючи знайдені значення параметрів δ_0 та δ_1 ми маємо остаточний розв'язок задачі.

7. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 1-7 зображені наближені розв'язки рівняння (2) залежно від величин параметрів ω_0 та α при $E = 0.1.$, $\varphi(t) = t + 1$, $q = 1$, $T = 2\pi / \omega_0$ і початкових умовах $f(0) = 0$, $f'(0) = 1$.

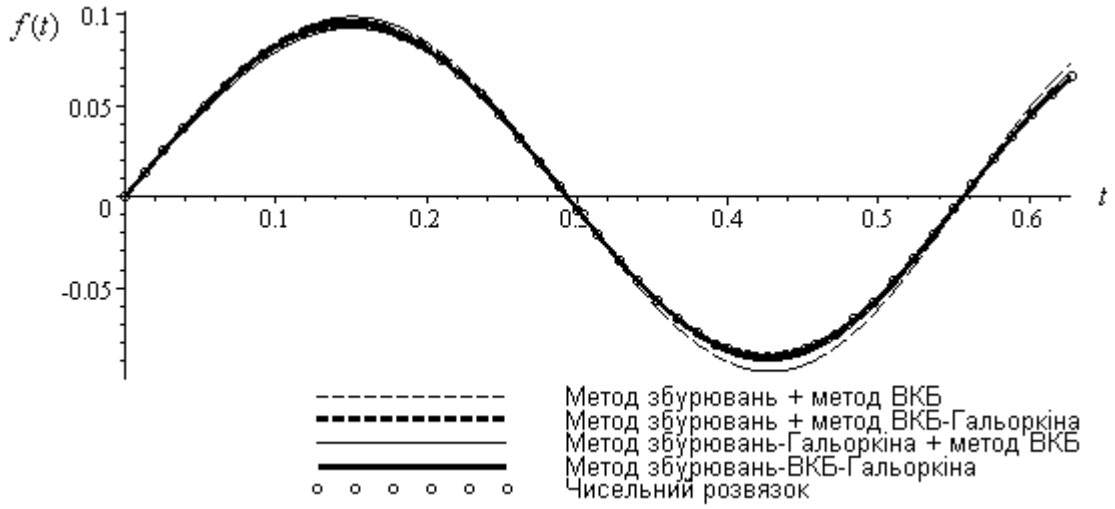

Рис. 1. Графік розподілу зміщень при $\omega_0 = 10$, $\alpha = 1/10$.

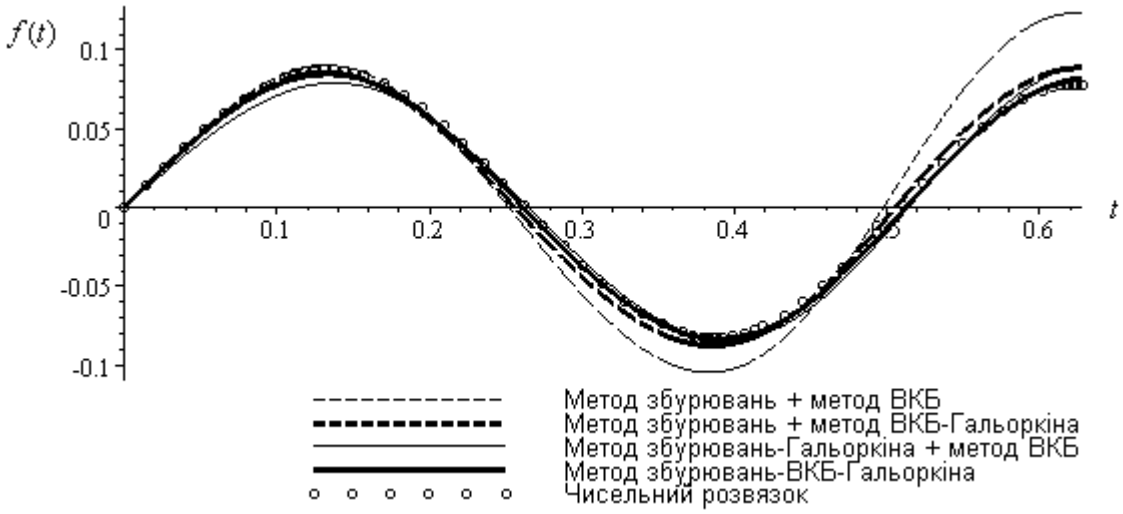

Рис. 2. Графік розподілу зміщень при $\omega_0 = 10$, $\alpha = 1000$.

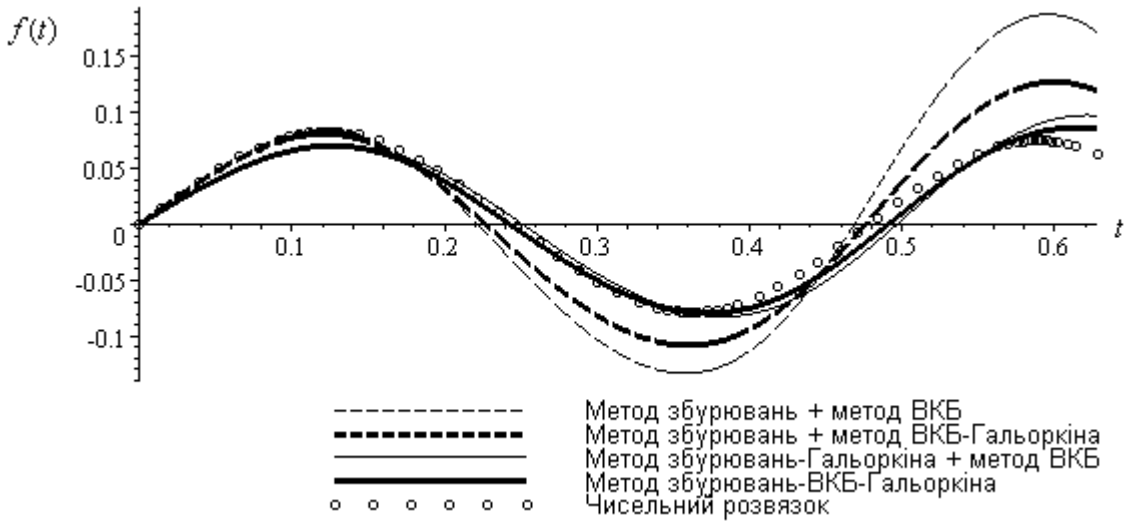

Рис. 3. Графік розподілу зміщень при $\omega_0 = 10$, $\alpha = 10000$.

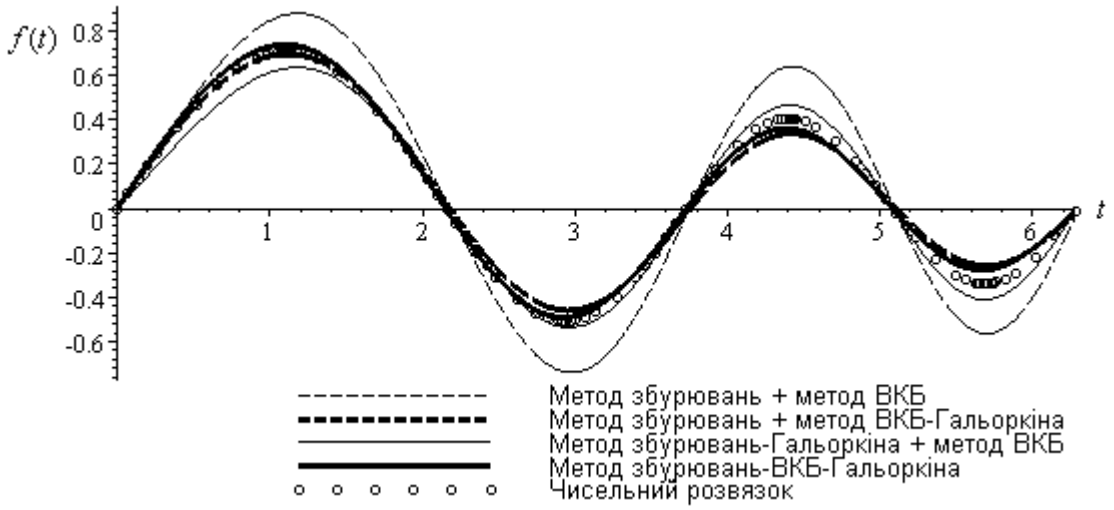

Рис. 4. Графік розподілу зміщень при $\omega_0 = 1$, $\alpha = 1/10$.

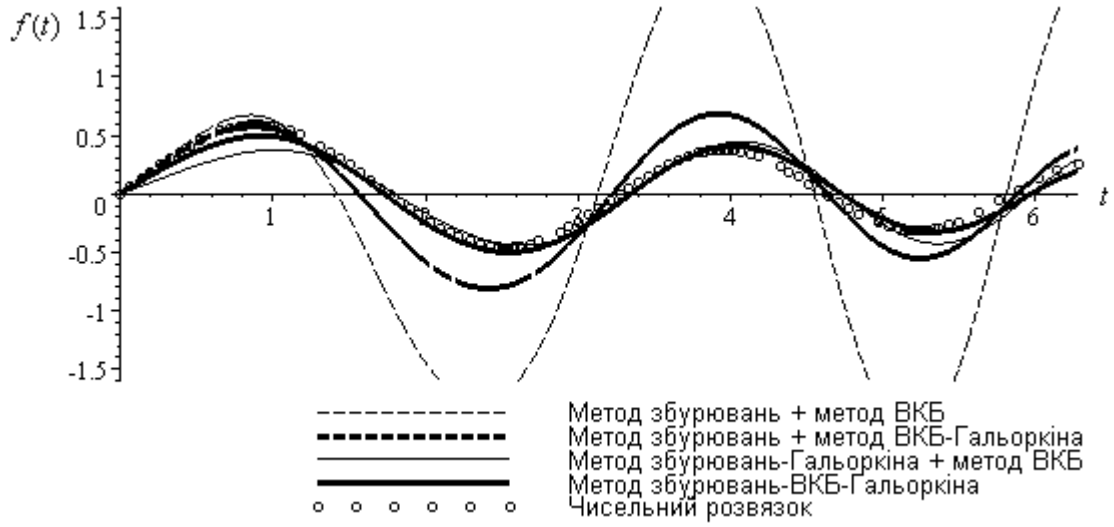

Рис. 5. Графік розподілу зміщень при $\omega_0 = 1$, $\alpha = 5$.

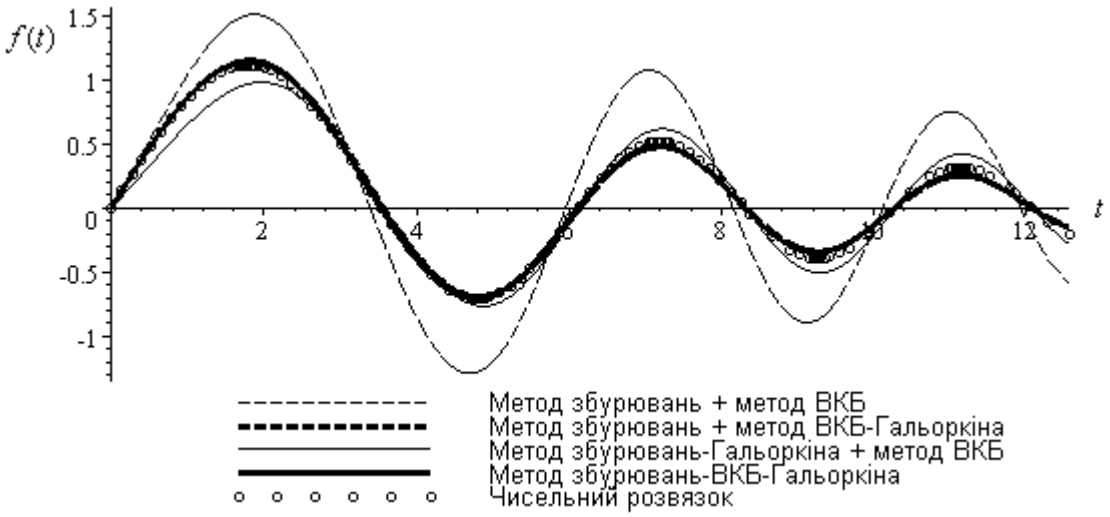

Рис. 6. Графік розподілу зміщень при $\omega_0 = 1/2$, $\alpha = 1/10$.

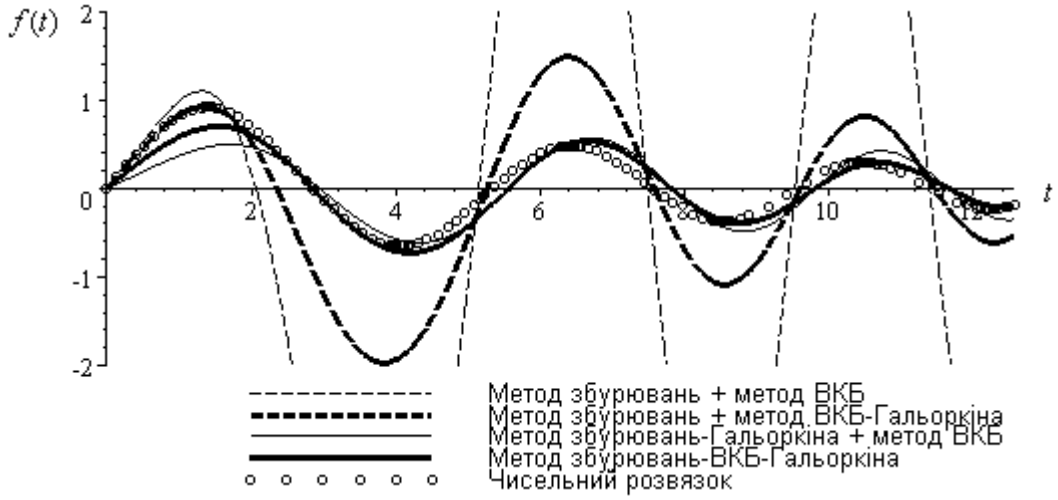

Рис. 7. Графік розподілу зміщень при $\omega_0 = 1/2$, $\alpha = 1$.

Як можна бачити з рисунків, розв'язок, отриманий за допомогою метода збурювань-ВКБ-Гальоркіна дає найкращі результати. При "не великих" значеннях ω_0 та "не малих" значеннях ε збурювань-ВКБ-розв'язки стають непридатними. При цьому гібридний збурювань-ВКБ-Гальоркін підхід добре "тримає" чисельний розв'язок, тобто дає такий розв'язок задачі, що є близьким до чисельних результатів на широкому інтервалі змін параметрів ω_0 та ε. З рисунків 1-3 можна бачити, що при великих значеннях параметра ω_0 зміщення невеликі, тому нелінійність системи проявляється тільки при великих значеннях параметра α, тому розв'язок нелінійної задачі буде значно відрізняється від розв'язка відповідної лінійної задачі тільки при "невеликих" значеннях параметра ω_0, або дуже великих значеннях параметра α, тобто при значної нелінійності. Тому, якщо не лінійність дійсно мала ($0 < \alpha <= 1$), то розглядати нелінійну задачу має сенс лише при "невеликих" значеннях параметра ω_0, але при цьому необхідно застосовувати ВКБ-Гальоркін метод для розв'язання лінійних рівнянь зі змінними параметрами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грищак В.З., Лисенко В.В. Метод подвійного асимптотичного розкладу при аналізі стохастичної поведінки нелінійних механічних систем з коефіцієнтом демпфірування, залежним від часу // Вісник Запорізького державного університету. – 2000. – №2. – С. 60-65.

2. Gristchak V.Z., Kabak V.N. Doudle Asymptotic Method for Nonlinear Forced Oscillations Problem of Mechanical Systems with Time Dependent Parameters // Technishe Mechanik. – 1996. – № 4. – P. 285-296.

3. Грищак В.З., Кабак В.М. Про один асимптотичний підхід до дослідження вимушених коливань механічних систем з демпфіруванням, параметри яких залежать від часу // Вісник Запорізького державного університету. – 1998. – № 1. – С. 28-30.

4. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1975. – 631 с.

5. Gristchak, V.Z., Dmitrijeva, Ye.M. A hybrid WKB-Galerkin method and its application // Technishe Mechanik – 1995. – №3. – P. 281-294.

6. Geer J.F., Andersen C.M. A hybrid peturbation-Galerkin technique for differential equations containing a parameter // Applied Mechanics Reviews. – 1989. – №42(11). – P. S69-S77.

7. Найфе А.Х. Методы возмущений: Пер. с англ. – М: Мир, 1976. – 456 с.

8. Хединг Дж. Введение в метод фазовых интегралов. – М.: Мир, 1965. – 238 с.

9. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1988. – 512 с.