

В.П.ШПАЧУК, докт.техн.наук, проф., ХНАМГ;

Г.О.НІКІТИНА, асп., ХНАМГ

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ЕФЕКТ ОПС З НЕЛІНІЙНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ ЖОРСТКОСТІ В УМОВАХ БАГАТОКООРДИНАТНОГО ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В статті досліджено зміну динамічних характеристик об'єкта просторової структури при різних типах його завантаженості на базі теорії синергетичного ефекту. Визначено коефіцієнти синергізму у випадку нелінійних характеристик жорсткості пружних елементів підвіски об'єкта. Виконаний порівняльний аналіз вібраційної активності об'єкта, при різних типах багатокоординатного імпульсного навантаження.

The change of space structure object dynamical characteristics at different types of it's work-load on the base of synergistic effect theory is elucidated in the paper. Synergistic coefficients are definite in the case of nonlinear descriptions of inflexibility of resilient elements of object pendant. Comparative analysis of object vibration activity at different types of the multi-coordinate impulsive loading is pursued.

Постановка проблеми. Вузли більшості споруд, будівель та агрегатів являють собою систему просторово орієнтованих інерційних та пружних елементів, які мають різні характеристики жорсткості і по-різному кріпляться до корпусу. Вони відносяться до класу об'єктів просторової структури.

У процесі експлуатації зазначені об'єкти піддаються впливу знакозмінних зовнішніх і внутрішніх збуджуючих сил, дії яких змінюються в часі. Вузли і блоки виробів при цьому виконують складні просторові коливання, що визначаються сукупністю багатокоординатних вібрацій [1,2,3].

Задача випробувальної техніки полягає в тому, щоб максимально наблизити умови випробувань до умов експлуатації, кількісно і якісно визначити і проаналізувати можливі зміни в цих умовах основних властивостей, функцій і характеристик вузлів, блоків і їхніх матеріалів [4,5]. Тому при програмуванні рухів блоків і вузлів агрегатів необхідно враховувати взаємопідсилювальну та взаємоослаблювальну дію багатокоординатного силового, кінематичного або комбінованого детермінованого гармонійного, імпульсного та випадкового вібронавантажень. Зробити це можна за допомогою використання у процесі вібраційних досліджень моделювання та розрахунків теорії синергетичних ефектів стосовно динаміки ОПС при їх багатокоординатному навантаженні. Неврахування цієї синергетичної дії зовнішнього збудження призводить до непередбачених відмов об'єктів просторової структури в процесі експлуатації.

Актуальність досліджень синергетичних ефектів просторових вібрацій обумовлена необхідністю вирішення комплексу задач пов'язаних з підвищенням надійності експлуатації таких об'єктів: машинобудування, космічної,

авіаційної техніки і комунального.

У роботі проведено аналіз впливу завантаженості ОПС на параметри його амплітудно-шпарувато-часових характеристик на базі теорії синергетичного ефекту.

Метою роботи є встановити для об'єкта просторової структури при різних типах його завантаженості, на базі теорії синергетичного ефекту величини коефіцієнтів синергізму, проаналізувати характер їхньої зміни для нелінійних характеристик жорсткості пружних елементів підвіски об'єкта при тривалості $\tau = Var$, періоду $T = Var$ імпульсного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми. У роботі [6] розглянуті вібраційні тестування різних об'єктів промисловості, як один з найважливіших засобів перевірки їхньої якості і надійності в експлуатації. Проте питання багатокординатних тестувань не піднімається.

У роботах [7,8] досліджені основні особливості прояву синергетичних ефектів першого та другого родів в задачах випробувань об'єктів просторової структури на вібронадійність. Показано, що при цьому виключаються занижені оцінки показників вібраційної активності об'єктів, діагностуємих при стенових випробуваннях, а також непередбачені їхні відмови за вібронадійністю в експлуатації.

Фізичні і теоретичні аспекти взаємного впливу параметрів вібрації на прикладі коливань фундаментів споруд розглянуто в роботах [9,10,11,12] стосовно задачі сейсмодинаміки споруд. Термінологічно дане явище, з точки зору прикладної теорії коливань, визначено як подвійний фазочастотний резонанс коливальних систем. Вказане явище також може мати місце при вимушених коливаннях суцільних середовищ [13-15]. В цій роботі, а також в роботах [16-18], взаємопідсилювальна дія параметрів багатокординатної вібрації, проаналізована стосовно задач вібронадійності багатомірних об'єктів і розглянута з позицій синергетичного ефекту першого роду.

У роботі [19] розглядаються просторові вібрації гіроскопів у випадку трикоординатного віброзбудження в залежності від розмірів гіроскопів. Показано, що розмір гіроскопів по-різному впливає на параметри вібрації у випадку лінійної і нелінійної моделі.

Особливості вібраційної динаміки вантажного залізничного вагону стосовно взаємодії колеса з рейкою досліджуються у роботі [20]. Проте для спрощення моделі розглядається тільки випадок лінійної характеристики жорсткості підвіски.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. У роботі Отримано, досліджено та узагальнено кількісні оцінки параметрів взаємопідсилювальної та взаємоослаблювальної дії

параметрів збудження по кожній координаті стосовно абсолютних рухів об'єкту. Синергетичний ефект першого роду формалізовано через параметри багатокоординатного кінематичного імпульсного зовнішнього механічного навантаження, а також відповідних амплітудно-шпарувато-часових характеристик ОПС.

Виклад основного матеріалу дослідження У роботі розглянуто варіанти використання пружної підвіски об'єкту у вигляді нелінійних характеристик жорсткості за умов варіювання маси базового елемента, а також маси адитивного інерційного елемента.

Досліджуваним є об'єкт просторової структури, механічна схема якого приведена на рис. 1, де 1-4 – деталі, що моделюють корпус об'єкта; 5-8 – пружні елементи з коефіцієнтом жорсткості c і опору b , що моделюють блок пружної підвіски об'єкта; 9- конструктивний елемент, що моделює інерційні властивості об'єкта. Розглядається тривимірна модель ОПС. Об'єкт має три ступені вільності: можливість переміщатись уздовж осі Oy (координата y), осі Oz (координата z) і можливість обертатися навколо точки O (координата θ), тобто навколо центра мас [4,21,22].

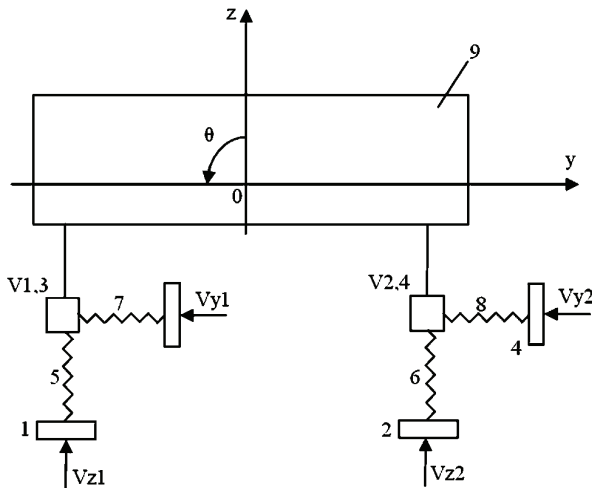


Рисунок 1 – Узагальнена механічна схема ОПС

При цьому в якості зовнішніх впливів, що збуджують, на об'єкт прийняті кінематичні впливи двох типів, які моделюються (рис.2) ударними імпульсами виду:

– перший варіант збудження:

$$V_{z_1}(t) = \begin{cases} A, t \in [0, \tau]; \\ 0, t \in (\tau, +\infty); \end{cases} \quad V_{z_2}(t) = \begin{cases} 0, t \in [0, T] \cup (T + \tau, +\infty); \\ A, t \in (T, T + \tau); \end{cases}$$

$$V_{y_1}(t) = V_{y_2}(t) = 0;$$

– другий варіант збудження:

$$V_{z_1}(t) = V_{z_2}(t) = \begin{cases} A, t \in [0, \tau] \\ 0, t \in (\tau, +\infty) \end{cases}; \quad V_{y_1} = V_{y_2} = \begin{cases} 0, t \in (0, T) \cup (T + \tau, +\infty) \\ A, t \in [T, T + \tau] \end{cases},$$

де A , τ , T – амплітуда, тривалість і період імпульсного впливу.

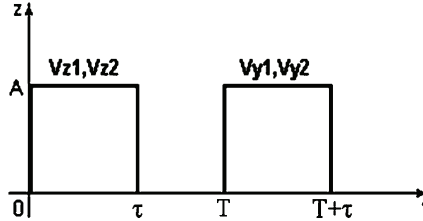


Рисунок 2 – Узагальнена схема імпульсного впливу

Таблиця 1 – Основні параметри ОПС першого та другого типів

№ п/п	Параметри ОПС	I тип	II тип
1	Маса базового інерційного елемента, кг	17000	
2	Маса адитивного елемента, кг	0	8050
3	Маса узагальненого інерційного елемента, кг	17000	25050
4	Координати центра мас базового елемента, м	$y_n = 0; z_n = 0,57$	$y_n = 0; z_n = 0,64$
5	Момент інерції узагальненого інерційного елемента, кг·м ²	250692,67	251589,33
6	Коефіцієнти опору пружин, паралельних осі Oz і осі Oy, Н·с/м	$24 \cdot 10^3$	
7	Коефіцієнт жорсткості пружин, паралельних осі Oy, Н/м	$0,475 \cdot 10^5$	
8	Коефіцієнти нелінійної жорсткості паралельних осі Oz пружних елементів, Н/м	$c1_z = c2_z = 5 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{6 \cdot 10^3 z + 1}$	
9	Координати точок закріплення пружних елементів, м	$V1,3 (-3,2; 1,12),$ $V2,4 (3,2; -1,12)$	$V1,3(-3,2; -1,19),$ $V2,4 (3,2; -1,19)$
10	Координати контрольних точок, м	$K1 (-3,2м; 2,0м);$ $K2 (-6,0м; 0,5м)$	$K1(-3,2м; 1,93м),$ $K2(-6,0м; 0,43м)$

Конструктивний елемент 9 на рис. 1, з ціллю надання результатам досліджень універсального механічного характеру, представлено у вигляді сукупності базового інерційного елемента і ізотропного інерційного адитивного елемента, який вкладається у базовий і надає узагальненому інерційному

елементу властивостей параметричної нерегулярності динамічної моделі ОПС [1,4,23].

Основні параметри ОПС зведено у табл. 1.

Механічна схема узагальненого інерційного елемента представлено на рис. 3, де 1 – базовий інерційний елемент; 2 – інерційний адитивний елемент; 3 – основа, яка моделює зовнішні ударні впливи; $C_{п}$ – центр мас базового інерційного елемента; $C_{а}$ – центр мас адитивного інерційного елемента; $K1, K2$ – контрольні точки базового інерційного елемента [24,25].

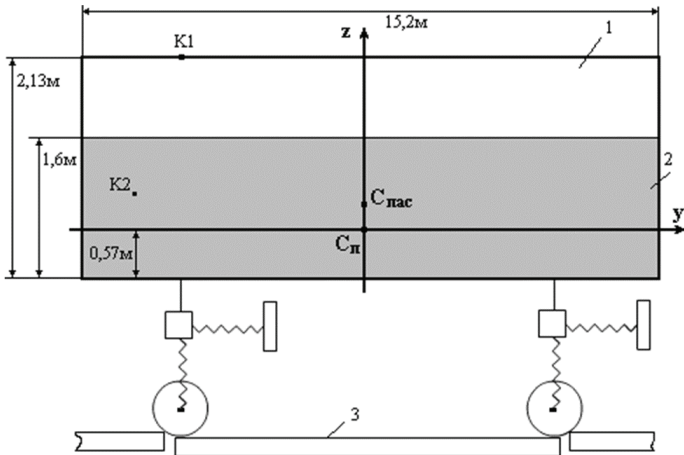


Рисунок 3 – Механічна схема узагальненого інерційного елемента

В основу досліджень покладені фундаментальні рівняння коливань ОПС в частотній області, отримані методом комплексних амплітуд, а також в формі Коши методом Рунге-Кутта четвертого порядку точності.

В якості міри синергетичного впливу параметрів амплітудно-шпарувато-часових характеристик на динамічний стан ОПС прийнято коефіцієнти синергізму, що визначаються по формулах [2,25,26]:

$$K_{S_y} = \frac{\max Y - \max Y^*}{\max Y^*} \cdot 100\%, \quad K_{S_z} = \frac{\max Z - \max Z^*}{\max Z^*} \cdot 100\%,$$

$$K_{S_\theta} = \frac{\max \theta - \max \theta^*}{\max \theta^*} \cdot 100\%, \quad K_{S_r} = \frac{\max r - \max r^*}{\max r^*} \cdot 100\%.$$

де $\max Y$, $\max Z$, $\max \theta$, $\max r$ – максимальні значення функцій $\max|y(t)| = f_1(T, \tau)$, $\max|z(t)| = f_2(T, \tau)$, $\max|\theta(t)| = f_3(T, \tau)$, $\max|r_{K1,2}(t)| = f_4(T, \tau)$; r – радіус-вектор контрольної точки $K1, 2$.

Величини $\max y^*$, $\max z^*$, $\max \theta^*$, $\max r^*$ обчислюються по формулах $\max y^* = f_1(5, 1)$, $\max z^* = f_2(5, 1)$, $\max \theta^* = f_3(5, 1)$, $\max r = f_4(5, 1)$. При цьому в

якості $\max X_i^*$ приймаються максимальні значення підмодульної функції у випадку, коли ОПС встигає прийти у стан рівноваги до приходу наступних збуджень $Vz1, Vz2$. У нашому випадку це має місце при $\tau = 1$ с і $T = 5$ с. Коефіцієнти синергізму при дії зазначених впливів дорівнюють нулю.

В роботі синергетичний ефект виявляється в результаті накладення коливальних рухів об'єкта при послідовному в часі додатку збуджень при $T \leq 5$ с. Такі випадки призводять до непередбачених відмов у роботі ОПС по стійкості функціонування і міцності, передчасному виходу з ладу техніки.

Результати досліджень амплітудно-шпарувато-часових характеристик ОПС представлено на рис. 4-7, а також у табл. 2, 3.

На рис.4-5 представлено графічні характеристики максимальних відхилень координат центра мас ОПС першого типу, контрольних точок K1 і K2 відповідно від стану рівноваги при варіюванні τ і T у межах від 0 до 5 с.

На рис. 6-7 представлено характеристики для ОПС другого типу.

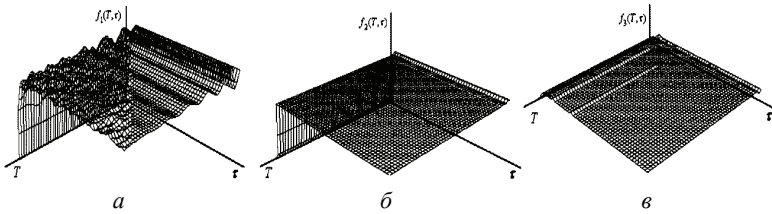


Рисунок 4 – Максимальні відхилення центра мас ОПС:
а, б, в – відхилення координат Y, Z, θ

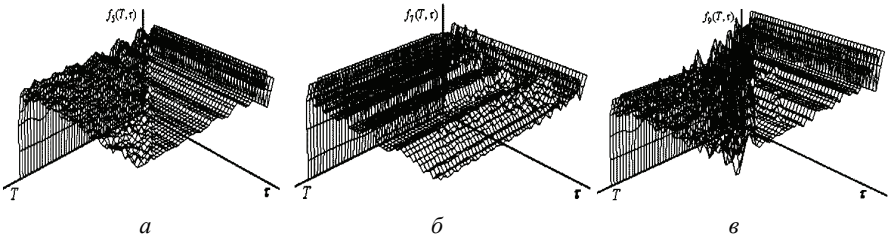


Рисунок 5 – Максимальні відхилення контрольної точки K2 ОПС:
а, б, в – відхилення координат Y, Z, θ

У табл. 2 наведено значення основних параметрів амплітудно-шпарувато-часових характеристик для ОПС першого типу при нелінійних коефіцієнтах жорсткості, при цьому часові характеристики ударних імпульсів $Vz1, Vz2$ варіюються в межах від 0 до 5 с.

У табл. 3 наведено значення $\max X_r, \max X_i^*, Ks_{X_i}$ для ОПС другого типу, де $\bar{X} = \{Y, Z, \theta\}$.

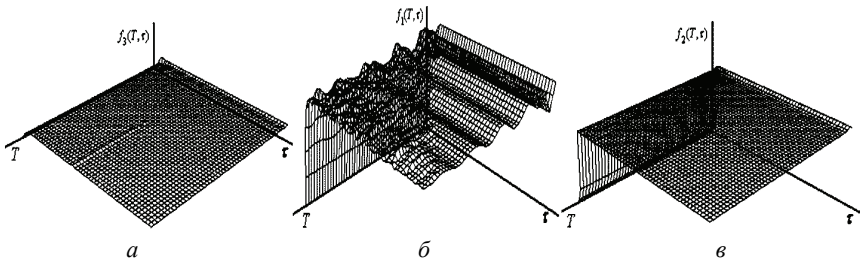


Рисунок 6 – Максимальні відхилення центра мас ОПС:
a, б, в – відхилення координат Y, Z, θ

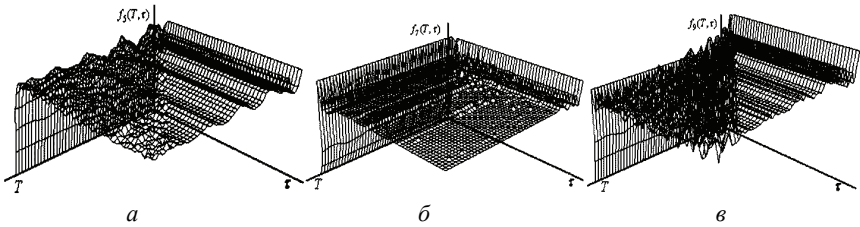


Рисунок 7 – Максимальні відхилення контрольної точки K2 ОПС:
a, б, в – відхилення координат Y, Z, θ

Таблиця 2 – Параметри амплітудно-шарувато-часових характеристик для ОПС першого типу

Визначені параметри	Контрольні точки		
	Центр мас	K1 (-3,2; 1,93)	K2 (-6; 0,43)
max Y	0,007788 ($\tau = 1,10; T = 0,6$)	0,009322 ($\tau = 0,9; T = 0,9$)	0,007992 ($\tau = 0,9; T = 0,4$)
K_{S_y}	21,9 %	38,4 %	23,9 %
max Z	0,005188 ($\tau = 0,3; T = 0,4$)	0,005431 ($\tau = 0,6; T = 0,1$)	0,007956 ($\tau = 0,9; T = 1,3$)
K_{S_z}	5,3 %	0,6 %	35,2 %
max r	-	0,010034 ($\tau = 0,9; T = 0,4$)	0,010432 ($\tau = 1,9; T = 1,6$)
K_{S_r}	-	47 %	58,8 %
max θ	0,001263 ($\tau = 0,9; T = 1,3$)	-	-
K_{S_θ}	20,1 %	-	-

Висновки з даного дослідження. Таким чином, аналіз наведених в табл. 2, 3 результатів досліджень показав, що для розглянутого в роботі об'єкта просторової структури коефіцієнти синергізму при нелінійних коефіцієнтах жорсткості c_{1z}, c_{2z} пружних елементів змінюються в наступних межах:

1. об'єкт просторової структури першого типу:

$$K_{S_y} = [21,9 \% - 38,4 \%];$$

$$K_{S_z} = [0,6 \text{ \%}-35,2 \text{ \%}];$$

$$K_{S_\theta} = [20,1 \text{ \%}];$$

$$K_{S_r} = [47 \text{ \%}-58,8 \text{ \%}].$$

2. об'єкт просторової структури другого типу:

$$K_{S_y} = [9,3 \text{ \%}-26,1 \text{ \%}];$$

$$K_{S_z} = [3,7 \text{ \%}-25,4 \text{ \%}];$$

$$K_{S_\theta} = [14,9 \text{ \%}];$$

$$K_{S_r} = [40,4 \text{ \%}-48,5 \text{ \%}].$$

Таблиця 3 – Параметри амплітудно-шпарувато-часових характеристик для ОПС другого типу

Визначені параметри	Контрольні точки		
	Центр мас	K1 (-3,2; 2)	K2 (-6; 0,5)
max Y	0,007775 ($\tau = 0,7; T = 0,7$)	0,009012 ($\tau = 0,9; T = 0,7$)	0,007904 ($\tau = 0,9; T = 0,7$)
K_{S_y}	9,3 %	26,1 %	11,0 %
max Z	0,005246 ($\tau = 0,4; T = 0,2$)	0,005745 ($\tau = 0,3; T = 0,5$)	0,007900 ($\tau = 0,3; T = 0,5$)
K_{S_z}	3,7 %	6,2 %	25,4 %
max r	-	0,010055 ($\tau = 0,5; T = 0,1$)	0,010591 ($\tau = 0,5; T = 0,1$)
K_{S_r}	-	40,4 %	48,5 %
max θ	0,001267 ($\tau = 0,4; T = 0$)	-	-
K_{S_θ}	14,9 %	-	-

Встановлено, що для нелінійних характеристик жорсткості найбільший коефіцієнт синергізму по координаті Y для об'єкта просторової структури першого типу дорівнює 38,4 % при наступних часових характеристиках імпульсних впливів: $\tau = 0,9$ с, $T = 0,9$ с.

По координаті Z для об'єкта просторової структури першого типу найбільший коефіцієнт синергізму дорівнює 35,2 % при наступних часових характеристиках імпульсних впливів: $\tau = 0,9$ с, $T = 1,3$ с (див. рис. 6, б).

Найбільший коефіцієнт синергізму дорівнює 58,8 % по координаті r для об'єкта просторової структури першого типу при наступних часових характеристиках імпульсних впливів: $\tau = 1,9$ с, $T = 1,6$ с (див. рис. 5, в).

По координаті θ для об'єкта просторової структури першого типу найбільший коефіцієнт синергізму дорівнює 20,1 % при наступних часових характеристиках імпульсних впливів: $\tau = 0,9$ с, $T = 1,3$ с.

Отримані дані необхідно враховувати при визначенні нормативного експлуатаційного режиму об'єкта. Ігнорування синергетичного ефекту у випадку багатокоординатного навантаження призводить до зниження довговічності і надійності об'єкта в експлуатації. Тому дослідження і використання синергетичного ефекту стосовно задач механіки ОПС при їх багатокоординатно-

му навантаженні є актуальними і мають широкий спектр застосування.

Список літератури: 1. *Шпачук В.П.* К проблеме испытаний объектов пространственной структуры на виброненадежность, реализующих эффект синергизма // Прикладная механика. – 2005. – № 7. – С. 116-121. 2. *Shpachuk V. P.* Problem of Vibration Testing of Space Structures // International Applied Mechanics, Springer US. – 2005. – Vol. 41, no.7. – P. 805-808. 3. *Шпачук В.П.* К синтезу системы вибрационных испытаний объектов пространственной структуры на устойчивость функционирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. – 1993. – № 3. – С. 107-112. 4. Пространственное вибровозбуждение / *Божеко А.Е., Гнюевой А.В., Шпачук В.П.* – Киев: Наукова думка, 1987. – 192 с. 5. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти тт. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 5. Измерения и испытания / Под ред. *М.Д.Генкина.* – 1981. – 496 с. 6. *Rao S.* Mechanical vibrations. – Massachusetts: Edition-Wesley publishing company, 2000. – 718 p. 7. *Шпачук В.П.* К анализу особенностей многокоординатной вибрации объектов пространственной структуры // Прикладная механика. – 1994. – № 1. – С. 82-89. 8. *Шпачук В.П.* К проблеме испытаний объектов пространственной структуры на виброненадежность, реализующих эффект синергизма // Прикладная механика. – 2005. – № 7. – С. 116-121. 9. *Плахтиенко Н.П.* Деякі питання створення Міждержавних норм сейсмостійкого будівництва для країн СНД // Будівництво і стандартизація. – 2000. – № 1. – С. 2-8. 10. *Плахтиенко Н.П.* Про розрахункове визначення коефіцієнтів допустимих пошкоджень та відповідальності споруд // Конструкції гражданських зданий: Сб. науч. тр. КиевЗНИИЭП. – К., 2003. – С. 103-113. 11. *Skinner R.J., Robinson W.H., Vc. Verry G.H.* An introduction to seismic isolation. – John Willy and Sons, 1993. – 423 p. 12. *Plakhtienko N.P.* Double Non-Stationary Phase-Frequency Resonance of Oscillatory Systems // Int. Appl. Mech. – 2002. – 38, № 1. – P. 135-141. 13. *Shul'ga N.A., Bogdanov S.Yu.* Forced Axisymmetric Nonlinear Vibrations of Reinforced Conical shells // Int. Appl. Mech. – 2003. – 39, № 12. – P. 1447-1451. 14. *Shenchenkov I.K., Zhuk Ya.A., Karnaukhov V.G.* Modeling the Thermomechanical Behavior of Physically Nonlinear Materials under Monoharmonic Loading // Int. Appl. Mech. – 2004. – 40, № 9. – P. 943-969. 15. *Zhuk Ya.A., Shenchenkov I.K.* Resonance Vibrations and Dissipative Heating of Thin-Walled Laminated Elements Made of Physically Nonlinear Materials // Int. Appl. Mech. – 2004. – 40, № 7. – P. 794-802. 16. *Шпачук В.П., Головченко М.О.* Пространственные колебания ОПС в условиях многокоординатного виброннагружения // Коммунальное хозяйство городов. – 1998. – № 16 – С. 137-141. 17. *Шпачук В.П.* Особенности проявления синергетического эффекта в объектах пространственной структуры при многокоординатном виброннагружении // Прикладная механика. – 1999. – 35, № 10. – С. 108-112. 18. *Шпачук В.П., Головченко М.О.* Про особливості взаємодіювальної дії багатокординатної вібрації при випробуваннях на виброннадійність // Машинознавство. 2000. – № 6-7. – С. 15-17. 19. *Chang Ch., Chou Ch.* Vibration of resonant gyroscopes. Application to the Gyros of Macro and Micro Sizes. IUTAM Symposium on Vibration Control of Nonlinear Mechanisms and Structures // J. Solid mechanics and its applications. – Vol. 130, Springer. – 2005. – P. 131-140. 20. *True H., Trzepacz L.* On the dynamics of a railway freight wagon wheel set with dry friction damping. IUTAM Symposium on Chaotic Dynamics and Control of Systems and Processes in Mechanics // J. Solid mechanics and its applications. – Vol. 122, Springer. – 2003. – P. 159-168. 21. *Гануєв Р.Ф., Кононенко В.О.* Колебания твердых тел. – М.: Наука, 1976. – 432 с. 22. *Коловский М.З.* Нелинейная теория разбросанных систем. – М.: Наука, 1966. – 317 с. 23. *Стикова динаміка трамвая / Шпачук В.П., Далека В.Х., Коваленко А.В.* – Харків: ХНАМГ, 2005. – 265 с. 24. *Шпачук В.П., Головина Е.И.* К исследованию параметров вибронной активности объектов пространственной структуры на базе амплитудно-скважносно-временных характеристик. – Киев, Техника, 2006. Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов» / Выпуск 72. – С. 226-234. 25. *Шпачук В.П., Головина Е.И.* Синергетический эффект как мера взаимноусиливающегося действия компонент внешней многомерной вибрации объектов пространственной структуры. – Киев, Техника, 2007. Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов» / Выпуск 79. – С. 292-299. 26. *Шпачук В.П.* К синтезу системы вибрационных испытаний объектов пространственной структуры на устойчивость функционирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. – 1993. – № 3. – С. 107-112.

Надійшло до редколегії 11.11.2009