

УДК 534.1, 621.81-192

В.П. Шпачук¹, В.В. Дудко², І.В. Костенко²¹Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків²Державне підприємство "ХКБМ" ім. О.О. Морозова, Харків

МЕТОДИ Й УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА БАГАТОКООРДИНАТНИЙ ЗОВНІШНІЙ ВІБРАЦІЙНИЙ ВПЛИВ

Удосконалено методи й схеми установок для випробувань на багатокординатну вібрацію. Досліджено вплив одно і двокоординатного вібронавантаження на параметри амплітудно-частотних характеристик тривимірного об'єкта при випробуваннях на вібронадійність. Практичне значення отриманих результатів проявляється при вирішенні задач вібростійкості, віброміцності об'єктів, призначених для експлуатації в умовах багатокординатного навантаження.

Ключові слова: вібронадійність, тривимірний об'єкт випробувань, амплітудно-частотна характеристика, метод випробувань, схема установки.

Постановка проблеми. У комплексі заходів щодо підвищення надійності і поліпшення експлуатаційних параметрів об'єктів техніки, призначеної для роботи в умовах інтенсивних динамічних перевантажень, центральною ланкою є випробування і прогнозування міцності й усталеності функціонування. Обумовлено це тим, що вібраційні динамічні навантаження – постійні супутники транспортних засобів, судів, літальних апаратів, промислових будинків, споруджень і інших об'єктів з вузлами, агрегатами, машинами, що рухаються й обертаються. Дія їх обумовлює зниження міцності виробів, передчасний вихід їх із ладу в результаті порушення функціонування або поломки окремих деталей і вузлів. Тому найбільше ефективними для більшості апаратів, агрегатів, приладів, машин, конструкцій, що створюються і випускаються енергетичними, машинобудівними, автомобільними, авіаційними, космічними, радіотехнічними, електронними, приладобудівними, суднобудівними галузями промисловості є випробування виробів при багатокординатному вібраційному впливі. Вібраційні дослідження відносяться до одного з основних видів випробувань на вібронадійність, ціллю яких є визначення спроможності виробу виконувати свої функції в межах установлених норм, а також їхньої можливості протистояти руйнуючому впливу виникаючих при цьому вібраційних навантажень. Застосування їх на практиці забезпечує підвищення достовірності результатів, скорочення тривалості і вартості випробувань, підвищення якості досліджень по фізиці вібраційних відмов, особливо нелінійних, електромеханічних об'єктів, об'єктів із розподіленою структурою, та інше, яким властиві багатомірні параметричні коливання.

Теоретичні дослідження і практика використання синергетичного ефекту (ефекту взаємопідсилювальної дії складових просторової вібрації) стосовно до задач механіки об'єктів просторової структури (ОПС) на зовнішній вібраційний вплив при їх багатокординатному навантаженні є актуальними і мають широкий спектр застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільше розробленими на даний час є методи випробувань на однокоординатних стендах горизонтальної, вертикальної й похилої вібрації. Відомі методи [1-6] припускають необхідність переустановлення виробу на столі вібростенда з одночасною зміною його орієнтації в послідовності: із столу вертикального вібростенда на стіл горизонтального і двічі на столі горизонтального. Також у незалежності від конструктивної схеми об'єкта випробувань узагальнена тривалість T_{y3} стенового вібраційного впливу при випробуваннях розподіляється при однокоординатному збудженні (індекс 1_k) між напрямками порівну: $T_{1k} = T_{y3} / 3$. При цьому встановлено що по-перше, збільшується в 2 і більше разів тривалість впливу вібраційного навантаження на об'єкт випробувань, яке призводить до передчасної його відмови за вібростійкістю. По-друге, знижуються точність відтворення при стенових випробуваннях експлуатаційного вібраційного стану об'єкта, а також достовірність випробувань виробу на вібраційний вплив. Відбувається це в силу таких причин: відсутності конкретності у визначенні координат контрольної точки конструктивного елементу об'єкта досліджень; реальності геометричних розмірів об'єкта, а також пристосування до корпусу виробу; наявності кутових вібрацій об'єкта і корпусу виробу. У

роботах [2,4-6], наприклад, показано, що розміри похибок завдання координатних складових вектора трьохкоординатних поступальних вібрацій контрольної точки платформи при цьому можуть досягати відповідно: $\delta_x=80\%$; $\delta_y=80\%$; $\delta_z=20\%$.

В роботах [2,4-7] показано, що на практиці метод створення установок для стендових випробувань об'єктів просторової структури на зовнішній вібраційний вплив встановлює залежність структурної схеми установки від розмірності і законів зміни в часі вектора багатокординатної експлуатаційної вібрації, конструктивної схеми випробовуваного об'єкта, критеріїв його нормального функціонування і відмов, методу стендових випробувань, способів завдання і відтворення на установці зовнішнього впливу, конструктивної схеми стенда, геометричних розмірів платформи, випробовуваного об'єкта і пристосування для його установки на платформі, типів вібровимірювальних перетворювачів, коефіцієнтів їхнього поперечного перетворення і т.п.

Відмінні особливості, наприклад, двокоординатного вібронавантаження в порівнянні з методами випробувань на однокоординатних вібростендах розглянуті в роботах [4-7]. При цьому на базі тривимірного об'єкта випробувань встановлено, що спостерігається істотне розходження (у 1,5 разів і більш) у параметрах амплітудних спектрів поступальних вібрацій об'єкта. Проте фундаментальна задача випробувань на вібронадійність, яка складається з дослідження (аналізу і вивчення) залежності амплітуд змущених, у тому числі резонансних, коливань об'єкта від параметрів багатокординатного зовнішнього кінематичного (силового) впливу, що прикладається до об'єкта, в цих роботах не розглядається. Тому при випробуваннях мають місце занижені оцінки показників вібраційної активності об'єкта, що діагностуються, які призводять в експлуатації до непередбачених відмов по вібронадійності.

У роботах [2,7] також показано, що більш ніж 55% відмов авіаційного устаткування обумовлено неповним урахуванням чинників зовнішніх одночасно діючих механічних (вібраційних, ударних) і кліматичних (температура, тиск, вологість) впливів, тобто ігноруванням синергетичного ефекту амплітудних, часових і частотних параметрів компонентів впливу. Встановлено, що ціллю випробувань устаткування на багатоконтактний зовнішній вплив є, по-перше, використання при випробуваннях рівнів навантажень, які значно перевищують експлуатаційні, що забезпечує високий ступінь достовірності. По-друге, їхнє проведення призводить до скорочення тривалості випробувань до практично можливих розмірів. Третью

причиною є те, що екстремальні властивості навантажень повинні враховувати місця їх прикладання. При цьому жорсткість умов випробувань призводить до відтворення спеціальних екстремальних умов експлуатації, що забезпечують успішну роботу виробів в умовах реальної експлуатації. У результаті при випробуваннях забезпечується одержання (прояв) відмов, що не можуть бути отримані через відсутність впливу окремих чинників, що входять у зовнішній вплив, тобто через відсутність умов прояву синергетичного (взаємопідсилювального) впливу окремих факторів. Основні принципи даного підходу знайшли відбиток у модифікації Д стандарту США MIL-STD. Деякі з цих принципів пройшли практичну перевірку і їхнє застосування дало позитивний ефект. Прикладом цього можуть служити комплексні випробування на втому функціонування і тривкість радіоелектронного устаткування програми «Аполлон» відвідання Місяця на човниковому кораблі по програмі «Спейс Шаттл», а також випробування на надійність авіаційного устаткування по програмі CERT (іспити на надійність при комбінованих зовнішніх впливах).

Відомі також роботи [8, 20], присвячені дослідженню впливу параметрів гармонік кінематично збуджуваних одномірних об'єктів у резонансній області частот. При цьому встановлені властивості гармонік, що як взаємопідсилювальні, так і взаємопослаблювальні. Відзначено вплив нерезонансних гармонік на резонансні і навпаки, а також зміна амплітуд резонуючих гармонік у випадку двочастотного збудження.

В роботах [2,5-7] досліджено вплив кінематичного збудження ОПС на параметри поступальних коливань їх центра мас і кутових відносно (навколо) осей, що проходять через центр мас. Створено методи випробувань і визначено параметри, при яких амплітуди коливань об'єкта досліджень на частоті ω_k , де k – параметр розкладу кінематичного впливу в ряд Фур'є, задовольняють умовам екстремальності. Проте дослідження [7] показують, що при цьому не враховуються конструктивні особливості закріплення вузлів і агрегатів на корпусі виробу з урахуванням функціонального призначення, тобто взаємопідсилювальний вплив від добуток статичних передатних функцій кутів повороту і динамічних передатних функцій об'єкта випробувань. В результаті обмежуються функціональні можливості відомих методів випробувань, а також виникає невизначеність, а, отже, і недостовірність висновків про фізику вібраційних відмов, реальні рівні вібраційної активності об'єктів в умовах експлуатації, експлуатаційну надійність.

Формулювання мети статті. В роботі надано комплексний підхід до проблеми створення методів просторового віброзбудження стосовно задачі динамічних випробувань об'єктів просторової структури на вібронадійність при багатокординатному зовнішньому механічному впливі. Теоретично обґрунтовано сфери застосування і ефективності стендових випробувань на вібронадійність при двокоординатному навантаженні. Ефективність використання дво й більше координатного вібраційного навантаження стосовно об'єктів просторової структури розглянуто на прикладі тривимірного об'єкта механічної структури. В основу методу, що розглядається, покладена схема установки, яка впливає з узагальнення результатів робіт [1-10] і приведена на

рис. 1. Тут: 1 – підсистема формування вектора \bar{Q}^* заданого зовнішнього впливу; 2 – підсистема керування стендом, що моделює зовнішній вплив \bar{Q}^e на випробуваний об'єкт, 3 – підсистема відтворення зовнішнього впливу \bar{Q}^c , що включає стенд, об'єкт випробувань і пристосування для його установки на платформі стенду; 4 – підсистема виміру вектору \bar{Q}_a^n стендового зовнішнього впливу в контрольній точці платформи вібростенда або об'єкта випробувань; \bar{Q}^d – вектор експлуатаційної вібрації об'єкта.

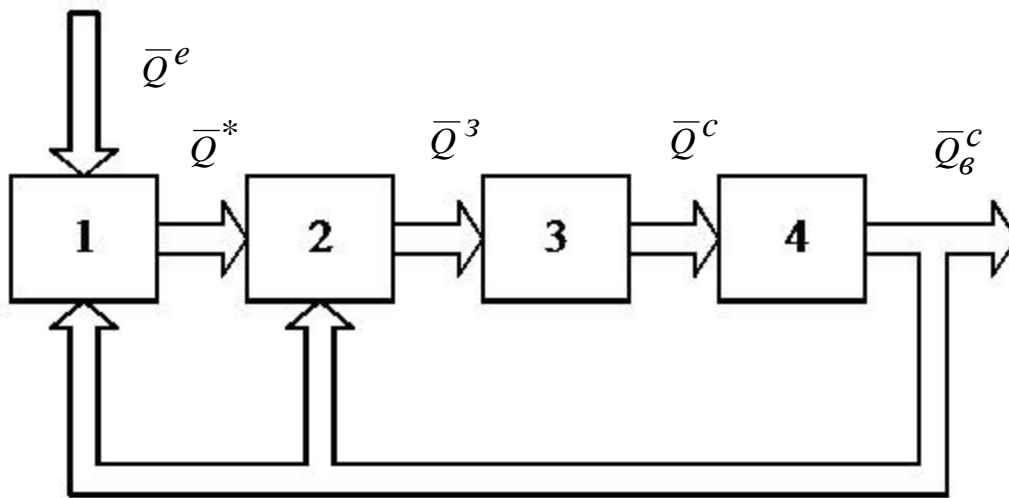


Рис. 1. Схема випробувальної установки

Виклад основного матеріалу. В умовах двокоординатного навантаження при розв'язанні задачі дослідження вібраційного стану тривимірного об'єкта його масові, інерційні і геометричні характеристики точок закріплення пружних елементів до конструктивного елементу і платформи вібростенда, характеристики жорсткості і опору кожного із шести пружних елементів відповідають прийнятим у роботах [2,6,7] і на рис.2. Де: 1 – платформа двокоординатного вібростенда; 2 - 6 – корпусні деталі пристосування; 7 – конструктивний елемент, що моделює інерційні властивості об'єкта; 8-13 – пружні елементи підвіски об'єкта; A_{1-4} – геометричні розміри конструктивного елементу. Він має наступні параметри: $M = 16$ кг; $J_{xx} = 0,2$ кг·м²; $c_{iy} = 12,5 \cdot 10^4$ кг/с²; $b_{iy} = 0,5 \cdot 10^2$ кг/с; $c_{iz} = 12,5 \cdot 10^4$ кг/с²;

$$b_{iz} = 0,5 \cdot 10^2 \text{ кг/с}; \quad A_1 = 0,2 \text{ м}; \quad A_2 = 0,1 \text{ м}; \\ A_3 = 0,05 \text{ м}; \quad A_4 = 0,03 \text{ м}.$$

У частотній області динамічною моделлю об'єкта, з огляду на [2,7], буде вираз:

$$W_1(j\omega)Q_1(j\omega) = W_2(j\omega)Q_2(j\omega), \quad (1)$$

де:

$$Q_1(j\omega) = [y_1(j\omega), z_1(j\omega), \theta_1(j\omega)]';$$

$$Q_2(j\omega) = [y_2(j\omega), z_2(j\omega)]';$$

$$W_1(j\omega) = \begin{bmatrix} W_{1y} & 0 & -W_{1y\theta} \\ 0 & W_{1z} & W_{1z\theta} \\ -W_{1y\theta} & W_{1z\theta} & W_{1\theta} \end{bmatrix};$$

$$W_2(j\omega) = \begin{bmatrix} W_{2y} & 0 \\ 0 & W_{2z} \\ -W_{2y\theta} & W_{2z\theta} \end{bmatrix};$$

$$W_{1\theta}(j\omega) = \sum_{i_y} c_{i_y} - M\omega^2 + j \sum_{i_y} b_{i_y} \omega,$$

$$i_y \in \{12, 13\};$$

$$W_{1z}(j\omega) = \sum_{i_z} c_{i_z} - M\omega^2 + j \sum_{i_y} b_{i_y} \omega,$$

$$i_z \in \{8,9,10,11\};$$

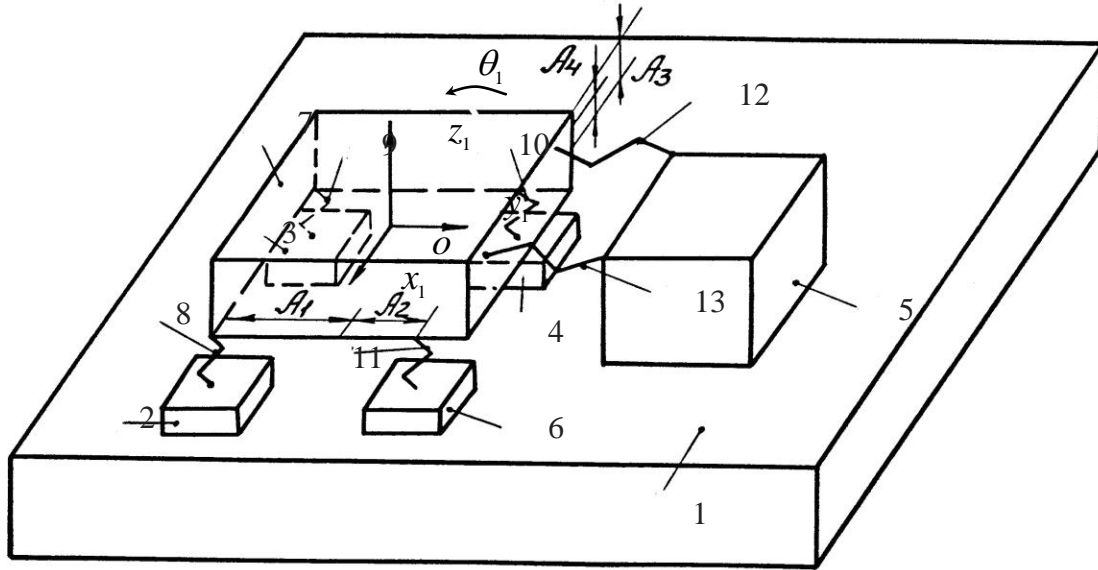


Рис. 2. Конструктивна схема об'єкта досліджень

$$W_{1y\theta} = W_{2y\theta} = \sum_{i_y} c_{i_y} z_{i_y}^{i\alpha} + j \sum_{i_y} b_{i_y} z_{i_y}^{i\alpha} \omega;$$

$$W_{1z\theta} = W_{2z\theta} = \sum_{i_z} c_{i_z} z_{i_z}^{i\alpha} + j \sum_{i_z} b_{i_z} z_{i_z}^{i\alpha} \omega;$$

$$W_{1\theta} = \sum_{i_y} c_{i_y} (z_{i_y}^{i\alpha})^2 + \sum_{i_z} c_{i_z} (y_{i_z}^{i\alpha})^2 - J_{x_1 x_1} \omega^2 + j (\sum_{i_y} b_{i_y} (z_{i_y}^{i\alpha})^2 + \sum_{i_z} b_{i_z} (y_{i_z}^{i\alpha})^2) \omega;$$

$$W_{2y} = \sum_{i_y} c_{i_y} + j \sum_{i_y} b_{i_y} \omega; \quad W_{2z} = \sum_{i_z} c_{i_z} + j \sum_{i_z} b_{i_z} \omega;$$

$$y_2(j\omega) = A_{y_2} (1 + j \cdot 0);$$

$$z_2(j\omega) = A_{z_2} (\cos \alpha + j \sin \alpha);$$

$A_{y_2} = A_{z_2} = 0,003 \hat{1}$; $y_{i_z}^{i\alpha}$, $z_{i_y}^{i\alpha}$ - координати точок закріплення пружних елементів 8-13 до об'єкта 7.

Параметри коливань об'єкта (y_{1kt} , z_{1kt}) у контрольних точках ($k = 1, \dots, 4$), фазовий зсув α , частота ω й амплітуди A_{y_2} , A_{z_2} зовнішнього кінематичного впливу, що реалізується платформою двокоординатного вібростенда, варіюються і визначаються з урахуванням вихідних параметрів векторів $Q_1(j\omega)$ і $Q_k(j\omega) = W_{3k} Q_1(j\omega)$, де $Q_{1k}(j\omega) = [y_{1kt}(j\omega), z_{1kt}(j\omega)]'$;

$$W_{3k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -z_k \\ 0 & 1 & y_k \end{bmatrix}.$$

На рис. 3-5 подано залежності $y_1(\omega)$, $z_1(\omega)$, $Q_1(j\omega)$, $y_{1kt}(\omega)$, $z_{1kt}(\omega)$ в умовах $\omega = [0 - 300]$ рад/с, отримані при тільки горизонтальному (контрольні точки K_{T1} ($y_k = -0,2$ м, $z_k = 0,05$ м), K_{T2} ($y_k = 0,2$ м, $z_k = 0,05$ м), K_{T3} ($y_k = 0,2$ м, $z_k = -0,05$ м), K_{T4} ($y_k = -0,2$ м, $z_k = -0,05$ м)) на рис. 2) і тільки вертикальному (контрольні точки K_{T1} , K_{T4} і K_{T2} , K_{T3}) вібронавантаженні. Тут координати y_1 , z_1 , θ_1 відповідають центру мас конструктивного елементу 8 на рис.2.

Аналізуючи АЧХ на рис 3-5, а також порівнюючи їх з амплітудно - фазо - частотними характеристиками в роботах [2, 6, 7] отримаємо наступне.

У випадку застосування тільки вертикального вібростенда відбувається зменшення амплітуд коливань тривимірного об'єкта досліджень в напрямку кутової координати θ_1 відповідно: на частот спряженого резонансу від горизонтальної лінійної координати y_1 об'єкта досліджень на рівні 460,98%; на частоті спряженого резонансу від вертикальної лінійної координати z_1 - на рівні 14,78%; на частоті власного резонансу - на рівні 21,27%. Також при тільки горизонтальному вібронавантаженні об'єкта досліджень отримано:

на частотах спряжених резонансів від горизонтальної координати y_1 – на рівні 12,38% й

вертикальної координати z_1 – на рівні 609,57%; на частоті власного резонансу – на рівні 470,06%.

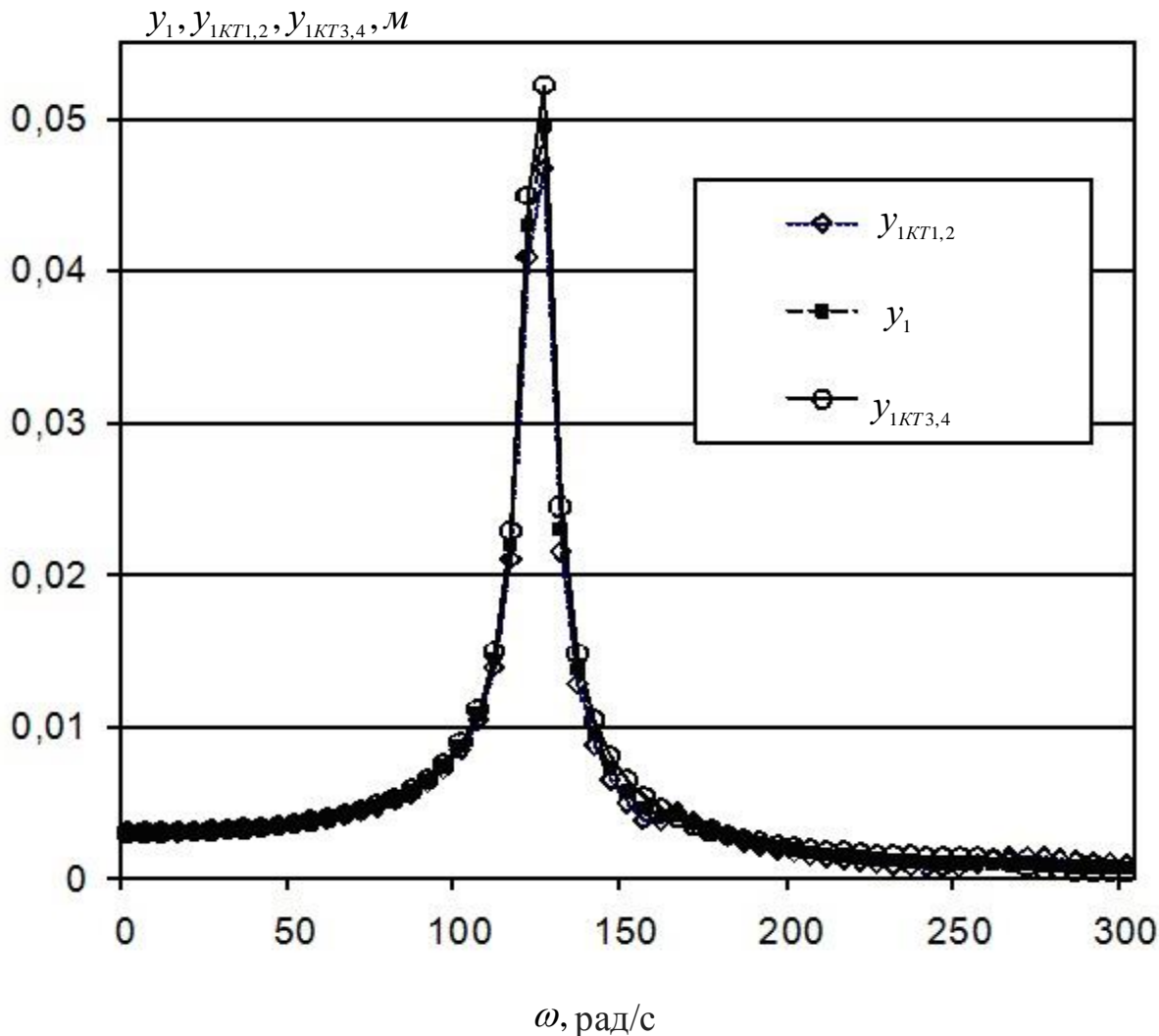


Рис.3. Залежності $y_1(\omega)$, $y_{1kt}(\omega)$ для тільки горизонтального (контрольні точки (1,2) і (3,4) об'єкта) вібронавантаження

У випадку застосування вертикального вібростенда аналогічно відбувається зменшення амплітуд коливань об'єкта досліджень в напрямку лінійних координат z_1 , $z_{1kt1,4}$, $z_{1kt2,3}$ на частоті власного резонансу на рівні відповідно 14,07%, 13,38%, 14,37%, а при горизонтальному вібронавантаженні для координат y_1 , $y_{1kt1,2}$, $y_{1kt3,4}$ – на рівні 9,98%, 9,89%, 10,05% відповідно.

Таким чином встановлено, що в результаті проведення випробувань багатовимірного об'єкта просторової структури тільки на горизонтальному або тільки вертикальному вібростендах переключуються енергетичні характеристики механічних коливань об'єкта в напрямку лінійних і кутових координат. Доведено, що установки багатокоординатного вібраційного впливу забезпечують відтворення реальних механічних вібронавантажень і дозволяють реалізувати цей вплив у будь-якому напрямку.

З огляду на рис.1, задачу створення установок для стендових випробувань об'єктів на зовнішній вплив доцільно з позицій системного аналізу [1-2] представити сукупністю наступних взаємозалежних стадій: розробки конструктивної схеми стенду; розробки структурної схеми установки. Стадія розробки конструктивної схеми стенду є найбільш трудомісткої і включає етапи: аналізу; обґрунтування коректності стендових випробувань; розробки методу випробувань; обґрунтування способу завдання і відтворення стендового зовнішнього впливу; розробки конструктивної схеми стенду. З урахуванням наведеного, на стадії розробки конструктивної схеми стенду, що витворює багатокоординатне вібраційне навантаження на об'єкт досліджень просторової структури [2,7], до основних її етапів слід віднести етап розробки методу випробувань виробу. Він припускає визначення: законів зміни за часом

координатних складових вектора заданого зовнішнього впливу; точності його відтворення в стендових умовах; форми, орієнтації годографа і діапазону робочих частот вектора заданого вібраційного впливу; кількості одночасно випробовуваних об'єктів.

Використання на практиці наведених методу й схеми установок, що генерують багатокоординатний вібраційний вплив на об'єкт досліджень, забезпечують відтворення реальних механічних вібронавантажень і реалізацію такого збудження у будь-якому напрямку. За рахунок прояву взаємопідсилювальної дії вони дозволяють істотно підвищити ефективність і достовірність проведених випробувань у порівнянні з одноосовими у випадку послідовного

вібронавантаження об'єкта по декількох напрямках, крім того при цьому немає необхідності в призупиненні процесу випробувань й переустановленні об'єкта для зміни напрямку дії вібраційного впливу. Також дозволяють оцінити поточний вібраційний стан та простежити зміну вібраційних характеристик (форми коливань і траєкторії руху в площинах і просторі) елементів конструкцій, їх взаємодію між собою, виявити дефекти на ранніх стадіях за допомогою аналізу характеристик і форм коливань, параметрів абсолютної вібрації в контрольних точках. Причому, чим складніше об'єкт випробувань, тим ціннішою являється інформація, що отримана в результаті цього аналізу, внаслідок впливу на результати випробувань ефекту взаємопідсилювальної дії.

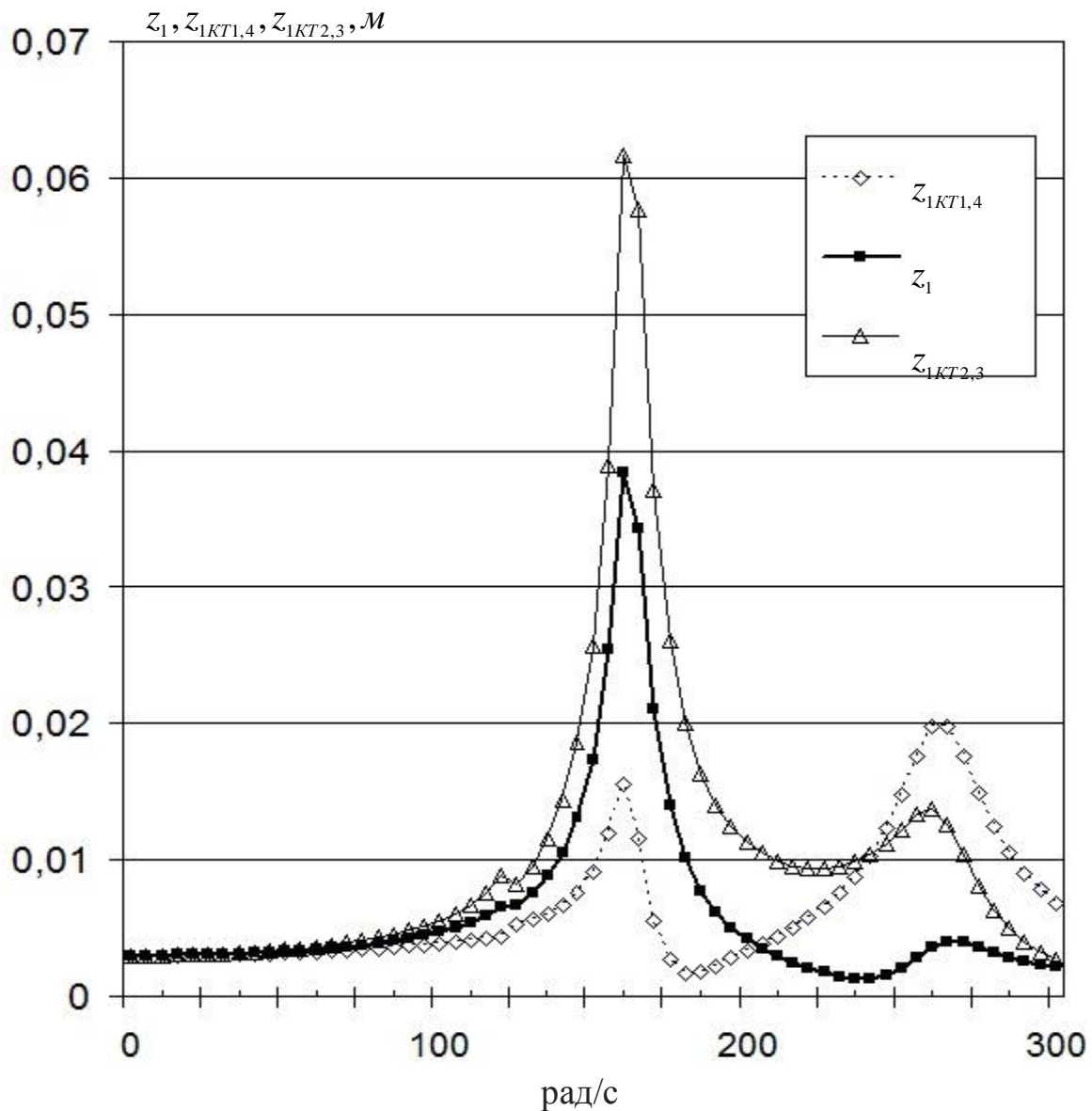


Рис. 4. Залежності $z_1, z_{1_{кт}}(\omega)$ для тільки вертикального(контрольні точки (1,4) і (2,3) об'єкта) вібронавантаження

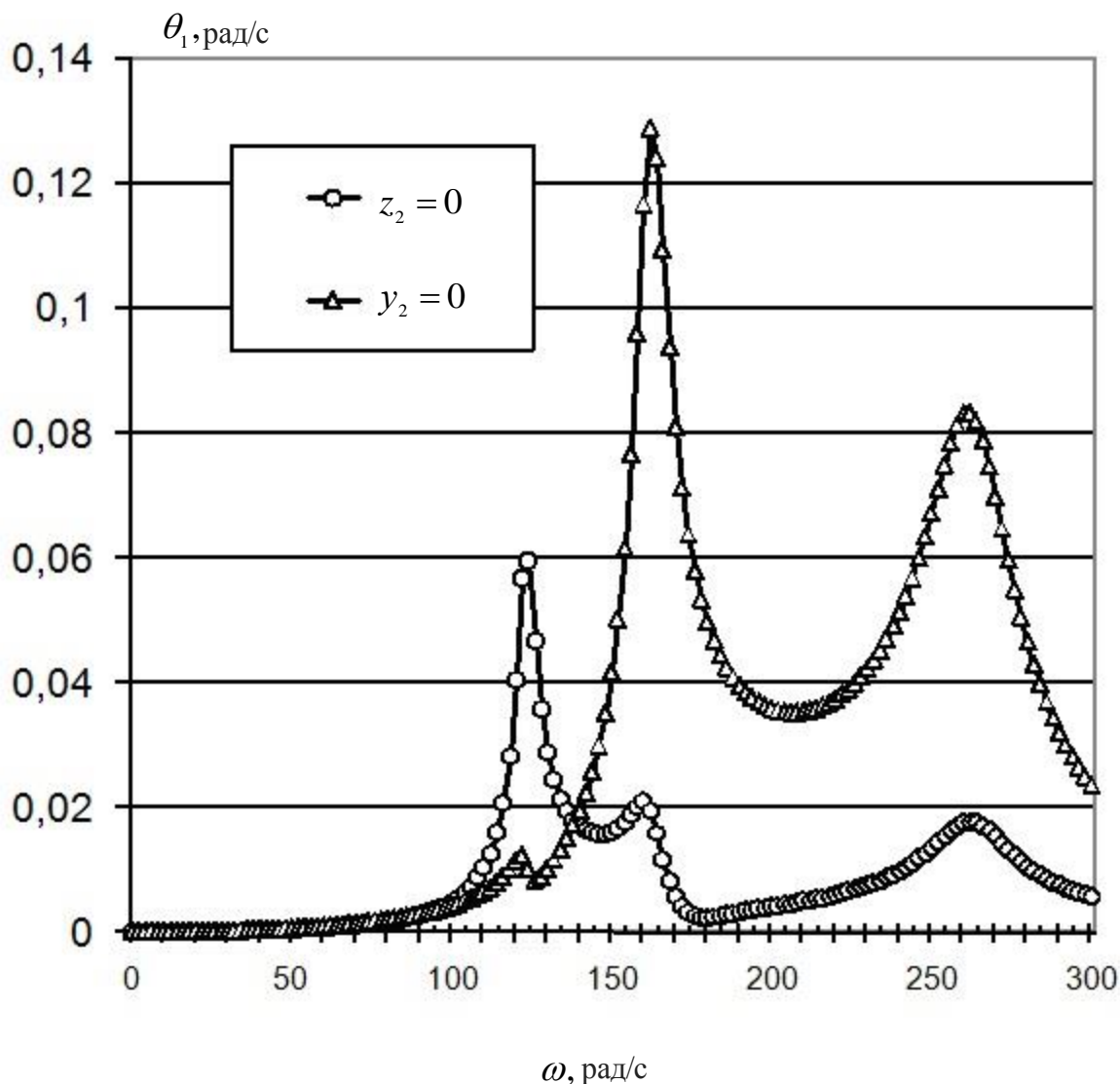


Рис. 5. Залежність $\theta_1(\omega)$ для тільки горизонтального ($z_2 = 0$) і тільки вертикального ($y_2 = 0$) вібранаантаження

Висновки. Значимість проведених у роботі досліджень полягає у встановлених особливостей прояву синергетичного ефекту стосовно до об'єктів просторової структури при багатокоординатному вібраційному впливі з боку несучої конструкції відносно до задач вібронадійності. Отримані результати необхідно враховувати при визначенні нормативного експлуатаційного режиму об'єкта. Ігнорування синергетичного ефекту координатних складових у разі багатокоординатного вібранаантаження призводить до зниження довговічності і надійності об'єкта в експлуатації.

Слід також зазначити, що при стендових випробуваннях на вібронадійність розглянутий варіант коливань корпусу виробу реалізується платформою двокоординатних вібростендів, розробка і впровадження яких належить до актуальних завдань сучасної випробувальної техніки. Практичне значення отриманих у роботі результатів проявляється при вирішенні задач вібростійкості, віброміцності й вібродіагностики об'єктів просторової структури, призначених для експлуатації в умовах впливу багатокоординатних вібранаантажень, а також при синтезі їх конструктивних схем.

Література

1. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. М.: Машиностроение, 1981.– Т. 5. Измерения и испытания/ под ред. М.Д. Генкина. 1981–496 с.
2. Пространственное вибровозбуждение / Божко А.Е., Гноевой А.В., Шпачук В.П.- Киев: Наук. думка, 1987.-192 с.
3. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. - М.: Машиностроение, 1969.-364 с.
4. Shpachuk V. P. The synergetic effect in space-structure objects under multicoordinate vibration loading // *International Applied Mechanics*, Springer US, 1999, vol. 35, no.10.
5. Shpachuk V. P. Analysis of freatures of multicoordinate vibration of three-dimensional objects // *International Applied Mechanics*, Springer US, 1994, vol. 30, no.1.
6. Shpachuk V. P. Problem of Vibration Testing of Space Structures // *International Applied Mechanics*, Springer US, 2005, vol. 41, no.7, pp. 805-808.
7. Шпачук В.П. Синергетичний ефект стосовно задач вібраційної активності об'єктів просторової структури / В.П. Шпачук, Г.О. Нікітіна // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка. – 2009. – Вип. 3 (25). – Т.3. – С. 239–244.
8. Чекарчев А.И. Взаимное влияние гармоник в нелинейных системах. -В кн. Динамика и прочность коленчатых валов. - М.: Изд-во АН СССР, 1950. - С.75-96.
9. Воспроизведение полигармонических вибраций при стендовых испытаниях / Божко А.Е., Штейнвольф А.Л. - Киев: Наук. думка, 1985.-168 с.
10. Бекцинов Ц.Д. Анализ резонансных режимов в нелинейной системе при бигармоническом возмущении//*Прикладная механика*. - 1975.- № 11.- С. 94-98.
11. Bureika G. Mathematical model of dynamic interaction between wheel-set and rail track / Bureika G., Subachius R.// *Transport*. – Vilnius: Technika, 2002, Vol. 17, № 2 , p. 46-51.
12. Dailydka S. Modelling the interaction between railway wheel and rail / Dailydka S., Lingaitis L.P., Myamlin S., Prichodko V. // *Transport* 2008, 23(3), pp. 236-239.
13. Miamlin S.V. Correlation dynamics of freight wagons with cargo position. *Proceedings of the 6th International Scientific Conference/ Miamlin S.V., Reidemeister A.G., Sorokolet A.V., Jastremskas V. // TRANSBALTICA 2009*. – Vilnius. Vilnius Gediminas Technical University. Transport Engineering Faculty, 2009, pp. 167-172.
14. Plakhtienko N. P. Double Transient Phase-Friquency Resonance in Vibratory Systems // *Int. Appl. Mech.* – 2002.– 38, № 1.–P. 113 - 120.
15. Plakhtienko N. P. Nonlinear Translational Vibrations of a Rigid Body with the Gravitational-Frictional Seismoabsorber//*Int. Appl. Mech.*-2003.- 39, № 9.- P. 1093 - 1098.
16. Skinner R. J. An introduction to Seismic isolation/ Skinner R. J., Robinson W.H., Mc. Verry G.H. – New York: John Wiley and Sons, 1993.- 423 p.
17. Senchenkov I.K. Modeling the Termomechanical Behavior of Physically Nonlinear Materials under Monoharmonic Loading/ Senchenkov I.K., Zhuk Ya.A, Karnaukhov V.G. // *Int. Appl. Mech.*-2004.- 40, № 9.- P. 943 – 969.
18. Zhuk Ya.A. Resonance Vibrations and Dissipative Heating of Thin-Walled Laminated Elements Made of Physically Nonlinear Materials/ Zhuk Ya.A, Senchenkov I.K. // *Int. Appl. Mech.*-2004.- 40, № 7.- P. 794 - 802.
19. Ганиев Р.Ф. Колебания твердых тел/ Р.Ф.Ганиев, В.О.Кононенко. – М.: Наука, 1976.-431 с.
20. Коловский М.З. Нелинейная теория виброзащитных систем / М.С.Коловский. – М.: Наука, 1966. – 320 с

References

1. Vibracyi v tehnikе: Spravochnik. V 6-ti t. M.: Mashinostroenie, 1981.–T. 5. Izmereniya i ispitaniya/ pod red. M.D. Genkina. 1981 – 496 s.
2. Prostranstvennoe vibrozobuzhdenie / Bojko A.E., Gnoevoi A.V., Shpachuk V.P.- Kiev: Nauk. dumka, 1987.-192 s.
3. Bihovskiy I.I. Osnovi teoryi vibracionnoi tehniki. – М.: Mashinostroenie, 1969. – 364 s.
4. Shpachuk V. P. The synergetic effect in space-structure objects under multicoordinate vibration loading // *International Applied Mechanics*, Springer US, 1999, vol. 35, no.10.
5. Shpachuk V. P. Analysis of freatures of multicoordinate vibration of three-dimensional objects // *International Applied Mechanics*, Springer US, 1994, vol. 30, no.1.
6. Shpachuk V. P. Problem of Vibration Testing of Space Structures // *International Applied Mechanics*, Springer US, 2005, vol. 41, no.7, pp. 805-808.
7. Shpachuk V.P. Sinergetichnyi efekt stosovno zadach vibracyinoi aktivnosti objektiv prostorovoi strukturi / V.P. Shpachuk, G.O. Nikitina // Zbirnik naukovih prac Poltavskogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu imeni Yuriya Kondratjuka. Seriya: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnictvo. – Poltava: PoltNTU im. Ju. Kondratjuka. – 2009. – Vip. 3 (25). – T. Z. – S. 239 - 244.
8. Chekmarev A.I. Vzaimnoe vliyanie garmonik v nelineinix sistemah. – V kn. Dinamika i prochnost kolenchatih valov. – М.: Izd-vo AN SSSR, 1950/ S. 75-96.
9. Vosproizvedenie poligarmonicheskix vibracyi pri stendovih ispitaniyah / Bojko A.E., Shteynvolf A.L. – Kiev: Nauk. dumka, 1985. – 168 s.
10. Bekcinov C.D. Analiz rezonansnih rejimov v nelineinoi sisteme pri bigarmonicheskom vozmuscheniy // *Prikladnaya mehanika*. -1975.- №11. – S. 94 – 98.

11. Bureika G. *Mathematical model of dynamic interaction between wheel-set and rail track* / Bureika G., Subachius R. // *Transport*. – Vilnius: Technika, 2002, Vol. 17, № 2, p. 46-51.
12. Dailydka S. *Modelling the interaction between railway wheel and rail* / Dailydka S., Lingaitis L.P., Myamlin S., Prichodko V. // *Transport* 2008, 23(3), pp. 236-239.
13. Miamlin S.V. *Correlation dynamics of freight wagons with cargo position. Proceedings of the 6th International Scientific Conference* / Miamlin S.V., Reidemeister A.G., Sorokolet A.V., Jastremskas V. // *TRANSBALTICA* 2009. – Vilnius. Vilnius Gediminas Technical University. *Transport Engineering Faculty*, 2009, pp. 167-172.
14. Plakhtienko N. P. *Double Transient Phase-Frequency Resonance in Vibratory Systems* // *Int. Appl. Mech.* – 2002. – 38, № 1. – P. 113 - 120.
15. Plakhtienko N. P. *Nonlinear Translational Vibrations of a Rigid Body with the Gravitational-Frictional Seismoabsorber* // *Int. Appl. Mech.* - 2003. - 39, № 9. - P. 1093 - 1098.
16. Skinner R. J. *An introduction to Seismic isolation* / Skinner R. J., Robinson W.H., Mc. Verry G.H. – New York: John Wiley and Sons, 1993. - 423 p.
17. Senchenkov I.K. *Modeling the Termomechanical Behavior of Physically Nonlinear Materials under Monoharmonic*

- Loading* / Senchenkov I.K., Zhuk Ya.A, Karnaukhov V.G. // *Int. Appl. Mech.* - 2004. - 40, № 9. - P. 943 – 969.
18. Zhuk Ya.A. *Resonance Vibrations and Dissipative Heating of Thin-Walled Laminated Elements Made of Physically Nonlinear Materials* / Zhuk Ya.A, Senchenkov I.K. // *Int. Appl. Mech.* - 2004. - 40, № 7. - P. 794 - 802.
19. Ganiev R.F. *Kolebaniya tverdih tel* / R.F. Ganiev, V.O. Kononenko. M.: Nauka, 1976. – 431 s.
20. Kolovskiy M.Z. *Nelineinaya teoriya vibrozashchitnih sistem* / M.S Kolovskiy. – M.: Nauka, 1966. – 320 s.

Автор: ШПАЧУК Володимир Петрович
доктор технічних наук, професор, професор кафедри Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,
E-mail–shpachukvp@mail.ru

Автор: ДУДКО Вадим Валентинович
начальник лабораторії
Державне підприємство "ХКБМ" ім. О.О. Морозова

Автор: КОСТЕНКО Ігор Володимирович
начальник сектору технологічного бюро
Державне підприємство "ХКБМ" ім. О.О. Морозова

МЕТОДЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА МНОГОКООРДИНАТНОЕ ВНЕШНЕЕ ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

В.П. Шпачук, В.В. Дудко, И.В. Костенко

Усовершенствованы методы и схемы установок для испытаний на многомерную вибрацию. Исследовано влияние одно- и двухкомпонентного вибрационного нагружения на параметры амплитудно-частотных характеристик трехмерного объекта при испытаниях на вибрационную надежность. Практическое значение полученных результатов проявляется при решении задач виброустойчивости, вибропрочности объектов, предназначенных для эксплуатации в условиях многокоординатного нагружения.

Ключевые слова: вибронадежность, трехмерный объект испытаний, амплитудно-частотная характеристика, метод испытаний, схема установки.

METHODS AND INSTALLATIONS FOR TESTS FOR MULTICOORDINATE EXTERNAL VIBRATIONAL INFLUENCE

V. Shpachuk, D. Dudko, I. Kostenko

The work provided a comprehensive approach to the problem of creating spatial methods of vibrational excitation in regard to the problem of dynamic tests of the spatial structure of objects on vibration reliability for multi-axis external mechanical force. Theoretically proved the scope and effectiveness of bench tests on vibration reliability for two-axis loading. The effectiveness of two or more coordinate vibrational loading in relation to the spatial structure of objects considered by the example of a three-dimensional object with a discrete structure. Improved methods and schematics of systems for testing multi-axis vibration. The influence of one and two-coordinate vibrational loading on the parameters of amplitude-frequency characteristics of a three-dimensional object when the vibration reliability tests. Theoretical research and practical use of the mutually reinforcing effect of the action of components of the external vibration as applied to the vibration reliability of the spatial structure of objects with their multi-axis loading are relevant and have a wide range of applications. Practical significance of the obtained results is evident when solving problems of vibration and vibration resistance durability of objects designed for operation in conditions of multiaxial mechanical loading.

Keywords: vibration reliability, three-dimensional test object, the amplitude-frequency characteristic test method, the setup diagram.