

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.065:620.178.5

Р. Д. ІСКОВИЧ-ЛОТОЦЬКИЙ¹, Я. В. ІВАНЧУК^{2*}, Я. П. ВЕСЕЛОВСЬКИЙ³

¹Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, ел. пошта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0003-3920-3019

^{2*}Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (067) 301 83 73, ел. пошта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-4775-6505

³Каф. «Металорізальні верстати та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, ел. пошта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-6665-6278

ОСНОВИ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЇ ТЕОРІЇ ВІБРОУДАРНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Мета. Робота спрямована на застосування основних положень резонансно-структурної теорії для теоретичного дослідження основних фізико-механічних процесів, що відбуваються в розвантажувальному матеріалі під час віброударного розвантаження, з метою обґрунтування ефективності їх застосування. **Методика.** Розвантажувальний матеріал під час віброударного розвантаження в якості досліджуваного об'єкта представляється у вигляді феноменологічної моделі просторового дисперсного середовища. Розглянуто рівняння динаміки невстановленого вимушеного коливання частинок «зв'язаної» структури під дією вібраційних та ударних навантажень, із урахуванням віброреологічного ефекту, із встановленням зон резонансу. **Результати.** При розгляді резонансних зон невстановленого вимушеного коливання частинок «зв'язаної» структури встановлено, що при дії вібраційних навантажень можливо ефективно впливати на систему моногармонійним імпульсом зовнішніх сил. Даний імпульс має вигляд синусоїдальної хвилі з кутковою частотою, яка рівна основній частоті власних коливань розвантажувального матеріалу. При ударному навантаженні необхідно впливати на неї сукупністю імпульсів зовнішніх сил у вигляді одиночного миттєвого імпульсу. За даних умов навантаження в даних системах має місце явище резонансу, що забезпечує в розвантажувальній системі «зв'язаної» структури матеріалу абсолютну деформацію за рахунок дискретного зростання в інтервалі пластичних деформацій. Абсолютні деформації, що виникають при цьому в розвантажувальному матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок даної системи; до того ж відбувається руйнування зон контактів даних частинок. **Наукова новизна.** Авторами досліджені невстановлені вимушені коливання частинок «зв'язаної» структури на основі феноменологічної моделі просторового дисперсного середовища розвантажувального матеріалу. При цьому, для кожного типу віброударного навантаження, що представлялося відповідним видом збуджуючої сили, розраховано умови для проходження резонансних процесів. **Практична значимість.** Основні положення резонансно-структурної теорії при теоретичному дослідженні процесів віброударного розвантаження дозволяють обґрунтувати ефективність використання віброударного обладнання для підвищення інтенсивності розвантаження транспортних засобів. Використання резонансно-структурної теорії дозволяє спрогнозувати необхідні параметри віброударного навантаження на розвантажувальний матеріал, у залежності від його фізико-механічних властивостей. Це забезпечує йому найефективніше розвантаження за рахунок руйнування силових зв'язків частинок розвантажувального матеріалу.

Ключові слова: реологія; коливання; резонанс; розвантаження; деформація; напруження

Вступ

У сучасних умовах науково-технічного розвитку широко використовуються вібраційні та віброударні технології для інтенсифікації виробничих процесів у різних галузях промисловості [1–3, 8, 10].

У ході дослідження [5, 6] було виявлено, що для підвищення ефективності процесів розвантаження доцільно застосовувати примусові вібрації та удари, які впливають на фізико-механічні параметри оброблюваного матеріалу.

Ці технології реалізуються за допомогою машин та пристроїв з різними типами приводів – механічним, електричним, гідравлічним, пневматичним, комбінованим.

Під час дії віброударного навантаження на дисперсійний матеріал, в останньому відбувається низка перетворень [2, 11], характер яких залежить від інтенсивності і виду віброударного навантаження.

Мета

Для обґрунтування усіх особливостей протікання процесу віброударного розвантаження необхідно, застосовуючи основні положення резонансно-структурної теорії, теоретично дослідити основні фізико-механічні процеси, що відбуваються в розвантажувальному матеріалі під час віброударного розвантаження, з метою обґрунтування ефективності їх застосування на транспортних засобах.

Методика

Розглядаючи резонансно-структурну теорію, процес віброударного (імпульсного) руйнування кускових і змерзлих вантажів можна подати як попадання в резонанс головних коливань системи, коли усі частинки зв'язаної структури коливаються з однією і тією ж власною частотою, яка відповідає частоті зовнішньої коливної дії [4] від збуджуючої сили $F_{із}$. Під час попадання системи в резонанс між частинками зв'язаної структури порушуються початково-встановлені силові зв'язки R_i , контакти і зчеплення – відбувається руйнування матеріалу. Процес руйнування супроводжується як відносним проковзуванням частинок, що викликає між частинками зв'язаної структури критичні напруження зсуву і розтягу, так і відносним повертанням частинок матеріалу вантажу, що

також викликає між частинками зв'язаної структури критичні напруження згину і розтягу, яке може виникнути у разі руйнації пружних зон контакту в точках 1–4 (рис. 1).

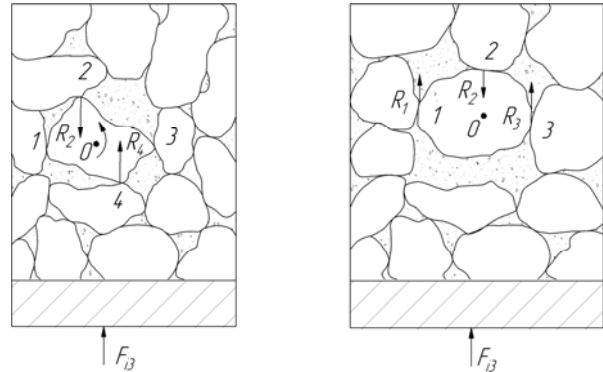


Рис. 1. Принципова система зв'язаної структури матеріалу вантажу

Fig. 1. Principle system of linked structure of the freight material

Розвантажувальний матеріал у загальному вигляді може бути поданий феноменологічною моделлю просторового багатомасового дисперсного середовища у вигляді пружнов'язкопластично-інерційних систем (рис. 2). Кожна реологічна комірочка такої системи має свої інерційні властивості, які характеризуються її масами m_{i-1} , m_i , m_{i+1} , пружними властивостями, які закладені в пружних елементах $c_{x,y,z}^i$, а також гістерезисними властивостями, які моделюються в'язкими $\varepsilon_{x,y,z}^i$. Реологічні комірочки взаємодіють через пружні елементи та пари в'язкого і сухого тертя.

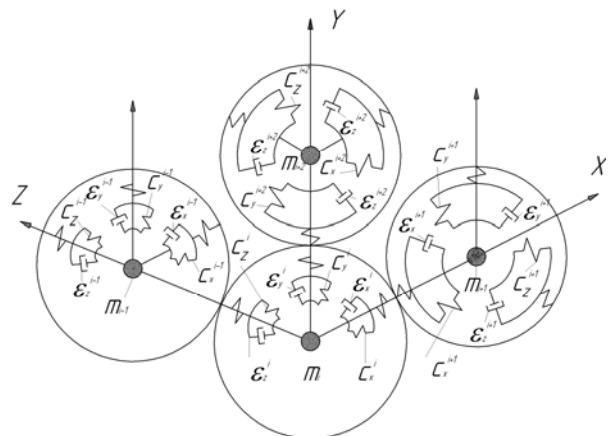


Рис. 2. Феноменологічна модель просторового дисперсного середовища

Fig. 2. Phenomenological model of spatial dispersion medium

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

Розвантажувальний матеріал в замкненому об'ємі кузова транспортного засобу є складною системою структурних утворень, що складається з простих окремих твердих частинок з w ступенями вільності. Коливальні рухи в складній системі описуються r координатами, вибір яких довільний, а число ступенів вільності визначається мінімальним числом змінних, що описують рух простих систем. Фактичний рух частинок основи розвантажувального матеріалу є зв'язаним, тобто коливання в будь-якій з простих систем впливають на коливання в іншій і навпаки.

Для фізичного аналізу коливальних явищ в складній системі розвантажувального матеріалу необхідно знати характер коливань в окремих простих, як їх прийнято називати, парціальних системах, з яких вона складається [12]. З цією метою слід визначити: парціальні системи, що утворюють складну систему; встановити зв'язок – взаємодію між коливаннями в парціальних системах; оцінити величину цього зв'язку за ступенем його впливу на характер коливань. Для виділення парціальної системи в складній системі розвантажувального матеріалу скористаємось відомим правилом, [12] згідно з яким парціальна система, поведінка якої описується даною узагальненою координатою, виходить з системи, якщо решту координат беремо рівними нулю. Тоді частоти коливань виділених парціальних систем називаються парціальними частотами складної системи і завжди лежать між її власними частотами. Зменшення інтенсивності зв'язку між парціальними системами збільшує ступінь збіжності власної частоти системи з найближчою парціальною частотою. Тому у низці випадків для оцінювання власних частот складної системи, що має слабкі зв'язки, достатньо визначити її парціальні частоти [8].

В складній системі розвантажувального матеріалу, умовно названої зв'язаною структурою, типова парціальна система може бути подана у вигляді елементарного просторового анізотропного осцилятора (рис. 3) – твердої частинки розвантажувального матеріалу масою m_i , що взаємодіє з нерухомими частинками основи, що оточують її [3].

Загалом віброударний процес можна розглядати як послідовний вплив на розвантажувальний матеріал полігармонійних імпульсів зовнішніх сил, у вигляді косинусоїдальних (си-

нусоїдальних) хвиль з кутовими частотами ω_j , результатом якого є суперпозиція гармонійних коливань, що відповідає складному імпульсу зовнішніх сил кінцевої тривалості [8]. Віброударний процес, який подається у вигляді полігармонійного зовнішнього впливу, складається з низки частотних компонент з постійною різницею частот $\delta\omega$ і утворює хвильовий пакет, що лежить у вузькому частотному інтервалі $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$ (рис. 3, а). Аналіз поведінки такого хвильового пакету $\Delta\omega$ з однаковою, наприклад амплітудою r у часі, дає можливість синтезувати зовнішнє навантаження у вигляді імпульсу сили.

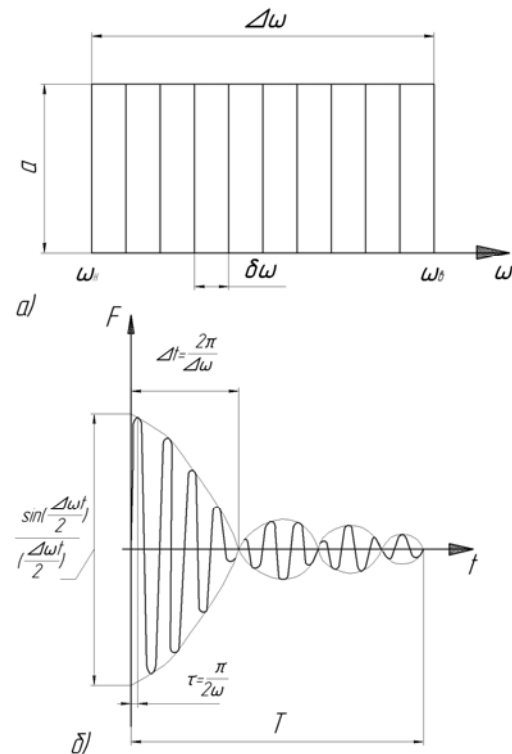


Рис. 3. Схема полігармонійного зовнішнього навантаження:

a – пакет хвиль; b – сумарна амплітуда

Fig. 3. The scheme of polyharmonic external loading: a – wave packet; b – the total amplitude

Цей висновок підтверджує особливу ефективність вібраційного або ударного зовнішнього навантаження під час віброударного розвантаження матеріалів. Як приклад синтезування імпульсного зовнішнього навантаження досить розглянути вплив на систему хвильового пакету $\Delta\omega$, кожна компонента якого відповідає гармонійному коливанню:

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

$$F_i = r \sin(\omega_i t),$$

де $\omega_i = \omega_H + (i-1) \delta\omega$; $k = \Delta\omega/(\delta\omega) + 1$; $i = 1, 2, 3, \dots$.

Сума низки таких гармонійних компонент забезпечує вплив:

$$F(t) = r \sum_{i=1}^{k-1} \sin(\omega_H t + k\delta\omega t).$$

Середнє значення частоти хвильового пакету $\Delta\omega$:

$$\bar{\omega} = \omega_H + \frac{k-1}{2} \delta\omega,$$

а залежність сумарної амплітуди від часу при великих k можна навесити у вигляді:

$$F(t) = kr \frac{\sin\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta\omega t}{2}\right)} \sin \bar{\omega} t. \quad (1)$$

Графік тимчасової зміни $F(t)$ (рис. 3, б) побудований на основі виразу (1) і відповідає окремому згасальному імпульсу, є результатом додавання гармонічних компонент, частоти яких обмежені хвильовим пакетом $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$. Значні амплітуди $F(t)$ спостерігаються тільки в інтервалі $0 < t < 2\pi/(\Delta\omega)$, а тривалість цієї основної частини синтезованого імпульсу (Δt) визначається величиною $\Delta\omega$. При зменшенні хвильового пакета ($\Delta\omega \rightarrow 0$) відбувається перехід до одночастотного гармонійного впливу $\omega = \omega_B = \omega_H$, тривалість якого не обмежена (теоретично); збільшення $\Delta\omega$ характерно для ударної дії, коли $\Delta t = 2\pi/(\Delta\omega) \rightarrow 0$.

Розглянемо вимушене коливання окремої i -ої частинки дисперсного середовища (рис. 4), в узагальнених координатах q , на яку діє збуджуюча сила $F(t)$. Кожна i -та частинка системи вантажу має свої інерційні властивості, які характеризуються її масами m_i , пружними властивостями, що закладені в пружних елементах c_{iq} , а також гістерезисними властивостями, що моделюються узагальненими в'язками ε_{iq} елементами.

Рівняння динаміки частинок зв'язаної структури розвантажуючого ударними імпульсами матеріалу з урахуванням віброреологічного

ефекту під час зовнішньої ударної дії на вантаж, розглядається, як невстановлені коливання в системі і описуються рівнянням:

$$\ddot{q} + 2\varepsilon_i \dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{1}{a} F(t), \quad (2)$$

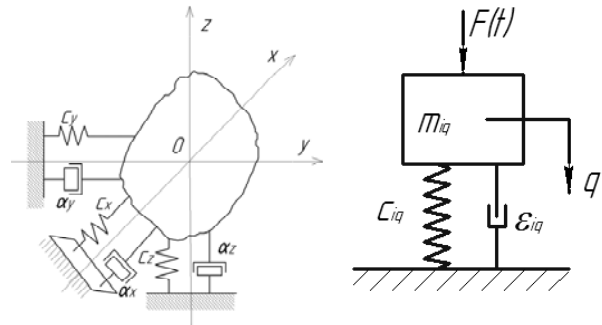


Рис. 4. Розрахункова модель коливання зв'язаної структури матеріалу вантажу

Fig. 4. The estimated model of «linked» structure oscillation of the freight material

з початковими умовами $q(0) = q_0, \dot{q}(0) = \dot{q}_0$, де ω_0 – власна частота коливання частинки зв'язаної структури матеріалу вантажу.

Розглянемо допоміжну задачу про дію на систему одиничного миттєвого імпульсу $\delta(t - \tau)$, прикладеного в момент часу $t = \tau$, при нульових початкових умовах. Розв'язком диференціального рівняння (2) є імпульсна перехідна функція $h(t, \tau)$ (іноді цю функцію називають ваговою функцією або функцією Гріна) [11].

Розв'язок має вигляд:

$$h(t, \tau) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau \\ \frac{1}{\omega_\varepsilon} e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin \omega_{\varepsilon_i}(t-\tau), & t > \tau. \end{cases} \quad (3)$$

Нехай початкові умови – нульові. Подамо зовнішню збуджуючу силу $F(t)$ у вигляді сукупності нескінченно малих імпульсів $F(\tau)d\tau$. Складаючи реакцію системи від кожного такого імпульсу на відрізок часу $[0, t]$, отримаємо розв'язок, який ще називається інтегралом Дюамеля:

$$q_*(t) = \frac{1}{a} \int_0^t h(t, \tau) F(\tau) d\tau, \quad (4)$$

де a – коефіцієнт підсилення.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

Якщо збуджуючу силу $F(t)$ можна подати у вигляді послідовності нескінченно малих приростів $dF(\tau)d\tau$, тоді частинний розв'язок рівняння (4):

$$q_*(t) = \frac{1}{c} F(t) \frac{1}{c} F(0) e^{-\varepsilon_i t} (\cos \omega_{\varepsilon_i} t + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{\varepsilon_i}} \sin \omega_{\varepsilon_i} t) - \frac{1}{c} \int_0^t \dot{F}(\tau) e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} [\cos \omega_{\varepsilon_i} (t-\tau) + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{\varepsilon_i}} \sin \omega_{\varepsilon_i} (t-\tau)] d\tau, \quad (5)$$

де ω_{ε_i} – вимушена частота коливання частинки зв'язаної структури матеріалу вантажу.

Загальний розв'язок рівняння (2). Його подають у вигляді суми загального розв'язку відповідного однорідного рівняння, що задовольняє початковим умовам, і частинного розв'язку, записаного у формі (4) або (5). Наприклад, використовуючи вираз (5), отримаємо:

$$q(t) = q_0 e^{-\varepsilon_i t} (\cos \omega_{\varepsilon_i} t + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{\varepsilon_i}} \sin \omega_{\varepsilon_i} t) + \frac{\dot{q}}{\omega_{\varepsilon_i}} e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_{\varepsilon_i} t + \frac{\dot{q}_0}{a \omega_{\varepsilon_i}} \int_0^t F(\tau) e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin \omega_{\varepsilon_i} (t-\tau) d\tau. \quad (6)$$

Аналізуючи процес віброударного руйнування, необхідно розглядати окремо вібраційний і ударний режими навантаження.

Для вібраційного навантаження збуджуюча сила виражається у вигляді полігармонійної сили $F(t) = F_0 \sin(\frac{1}{2}bt^2 + \varphi)$, де b – кутове прискорення; φ – початковий фазовий кут збуджуючої сили; $\omega = bt$ – миттєва частота сили (в момент резонансу t^* миттєва частота дорівнює частоті власних коливань системи ω_{0i} , тобто $t^* = \omega_{0i} / b$). Реакцію системи визначимо, використовуючи розв'язок (3):

$$q(t) = \frac{F_0}{2a\omega_0} \int_0^t e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin(\omega_{\varepsilon_i}(t-\tau)) - \sin(\frac{1}{2}bt^2 + \varphi) d\tau. \quad (7)$$

Відповідно до положень фізико-хімічної механіки дисперсних систем розвиток деформації в структурованому твердоподібному тілі характеризується тим, що під час збільшення напруження зсуву вище межі текучості відбувається руйнація структури, внаслідок чого ефективна узагальнена в'язкість ε_i системи різко знижується, і при гранично повній руйнації структури досягає найменшого значення. Для вищевказаного випадку, коли $\varepsilon_i = 0$, розв'язок інтеграла (7) наведено на графіку залежності коефіцієнта динамічного підсилення – $\chi = \frac{q}{q_{ст}}$ і співвідно-

шення $\frac{bt}{\omega_{0i}}$ (рис. 5), де $q_{ст}$ – статичне зміщення,

а q – динамічне зміщення коливальної частинки «зв'язаної» структури розвантажуючого матеріалу. На діаграмі (рис. 5) видно, як коливальна система переходить у резонансний стан, що призводить до виникнення критичних напружень руйнування між частинками зв'язаної структури розвантажуючого матеріалу. Для кожного параметра $\omega_0^2/2\pi b$, змінюючи фазовий кут φ , можна отримати сімейство подібних кривих, за якими можна визначити найбільшу амплітуду, що спричиняє. Чим більше кутове прискорення b , тим менше максимальна амплітуда коливань і тим більше її зміщення від резонансу $\omega_0 = bt^*$.

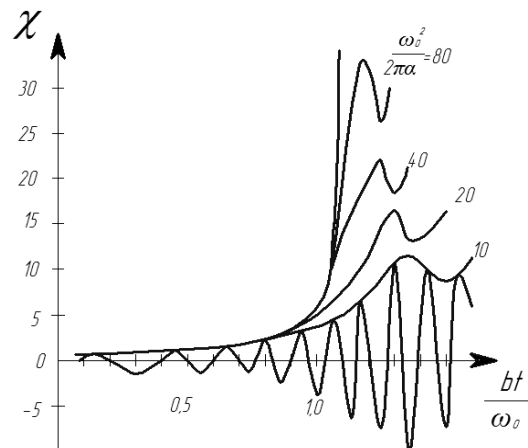


Рис. 5. Діаграма амплітудно-частотної характеристики системи коливальної частинки зв'язаної структури матеріалу під час віброударного розвантаження

Fig. 5. Diagram of amplitude frequency response of oscillation particle of linked structure of the material at vibroimpulsive unloading

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

Якщо ми подаємо систему зв'язаної структури матеріалу однорідною, тим самим підкреслюючи континуальний характер зв'язаної структури розвантажувального матеріалу, і на таку систему будемо впливати моногармонійним імпульсом зовнішніх сил, що триває нескінченно, у вигляді синусоїдальної хвилі з кутовою частотою ω , що рівна основній частоті ω_0 і власних коливань розвантажувального матеріалу, то в останній повинні бути коливання (хвилі деформацій), що проходять в умовах резонансу. Абсолютні деформації, що виникають при цьому в розвантажувальному матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок цієї системи. Відбувається руйнування зон контактів цих частинок [6].

Для ударного навантаження постійна збуджуюча сила F_0 , раптово прикладена до системи в момент часу $t = 0$, діє протягом певного проміжку часу τ . Коливання системи при нульових початкових умовах ($t < \tau$) описуються за формулою:

$$q(t) = \frac{F_0}{a\omega^2} \left[1 - e^{-\varepsilon_i t} \left[(\cos \omega_{ei} t + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{ei}} \sin \omega_{ei} t) \right] \right], \quad (8)$$

де ω_{ei} – вимушена частота коливання частинки зв'язаної структури розвантажувального матеріалу.

Після припинення дії сили рух системи стає вільним і здійснюється за рахунок початкових умов q_τ і \dot{q}_τ , що надаються системі в момент часу $t = \tau$:

$$q(t) = q_\tau e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \left[(\cos \omega_{ei}(t-\tau) + \frac{\varepsilon_i}{\omega_{ei}} \sin \omega_{ei}(t-\tau)) \right] + \frac{\dot{q}_\tau}{\omega_{ei}} e^{-\varepsilon_i(t-\tau)} \sin \omega_{ei}(t-\tau). \quad (9)$$

Виходячи з рівняння (8) і (9), графік коливань зображено на рис. 6, крива 1.

Оскільки імпульсом сили S називають величину $F_0\tau$, і якщо τ зменшується, а величина $F_0\tau$ залишається постійною, то межу $F = \lim(F_0\tau)$ називають ударним імпульсом. Після переходу у виразі (10) до межі отримуємо:

$$q(t) = F(a\omega_{ei})^{-1} e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_{ei} t. \quad (10)$$

Нехай на систему діють через рівні проміжки часу τ однакові ударні імпульси. При співпа-

дінні τ з періодом коливань $T_\varepsilon = 2\pi / \omega_{ei}$ має місце ударний резонанс.

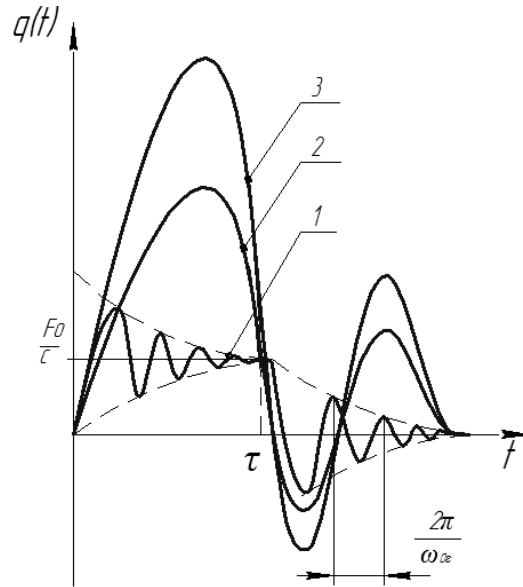


Рис. 6. Графік реакції системи коливної частинки зв'язаної структури розвантажувального матеріалу під час віброударного розвантаження:

1 – графік коливання системи при дії однієї постійної сили; 2 – графік коливання системи при дії ударних імпульсів; 3 – графік коливання системи при дії ударних імпульсів, для системи без дисипативних сил ($\varepsilon_i = 0$)

Fig. 6. Reaction diagram of the system of oscillation particles of the linked structure of unloading material at vibroimpulsive unloading

Максимальне значення порівняно з дією однієї постійної сили збільшується в $\frac{[1 - \exp(-n\varepsilon T_\varepsilon)]}{[1 - \exp(-\varepsilon T_\varepsilon)]}$

раз, крива 2 на рис. 6. При $\varepsilon_i = 0$ це збільшення буде відбуватися в n раз, крива 3 на рис. 6.

Отже, щоб забезпечити в розвантажувальній системі зв'язаної структури матеріалу абсолютну деформацію за рахунок дискретного зростання в інтервалі пластичних деформацій, необхідно впливати на неї сукупністю n імпульсів зовнішніх сил [6], у вигляді одиничного миттєвого імпульсу.

Результати

У ході розгляду резонансних зон невстановленого вимушеного коливання частинок зв'язаної структури встановлено, щоб забезпечити в розвантажувальній системі зв'язаної структури матеріалу абсолютну деформацію, за раху-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

нок дискретного зростання в інтервалі пластичних деформацій, залежно від типу матеріалу, необхідно прикладати як вібраційне, так і віброударне навантаження. До того ж встановлено, що під час дії вібраційного навантаження найкраще на систему впливати моногармонійним імпульсом зовнішніх сил, у вигляді синусоїдальної хвилі з кутовою частотою, яка рівна основній частоті власних коливань частинок розвантажувального матеріалу, що призводить до резонансного явища (виникають хвилі деформацій). Під час ударного навантаження необхідно впливати на систему сукупністю імпульсів зовнішніх сил у вигляді одиничного миттєвого імпульсу, час проходження яких рівний періоду власних коливань частинок розвантажувального матеріалу, що також призводить до резонансного явища (виникають хвилі деформацій). Абсолютні деформації, що виникають за даних режимів навантаження в розвантажувальному матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок цієї системи і відбувається руйнування зон контактів цих частинок.

Наукова новизна та практична значимість

Авторами досліджено невстановлені вимушені коливання частинок зв'язаної структури на основі феноменологічної моделі просторового дисперсного середовища розвантажувального матеріалу. При цьому, для кожного типу віброударного навантаження, що подавалося відповідним видом збуджуючої сили, розраховані умови для проходження резонансних процесів. Основні положення резонансно-структурної теорії під час теоретичного дослідження процесів віброударного розвантаження дозволяють обґрунтувати ефективність використання віброударного обладнання для підвищення інтенсивності розвантаження. Використання резонансно-структурної теорії дозволяє спрогнозувати необхідні параметри віброударного навантаження на розвантажувальний матеріал, залежно від його фізико-механічних властивостей, що забезпечує йому найефективніше розвантаження за рахунок руйнування силових зв'язків частинок розвантажувального матеріалу. Результати досліджень знайшли своє наукове використання в низці публікацій авторів у спе-

ціальних та науково-популярних виданнях, виступах на наукових конференціях.

Висновки

Основні положення резонансно-структурної теорії під час теоретичного дослідження процесів віброударного розвантаження дозволяють обґрунтувати ефективність використання віброударного обладнання для підвищення інтенсивності розвантаження транспортних засобів [9].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабичев, А. П. Вибрационные станки для обработки деталей / А. П. Бабичев, В. Б. Трунин, Ю. В. Самодумский. – М. : Машиностроение, 1984. – 168 с.
2. Бауман, В. А. Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. А. Бауман, Н. Н. Быховский. – М. : Высш. шк., 1977. – 255 с.
3. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. / Ред. совет : В. Н. Челомей (пред.). – Т. 1 : Колебание линейных систем / под ред. В. В. Болотина. – М. : Машиностроение, 1979. – 352 с.
4. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. / Ред. совет : В. Н. Челомей (пред.). – Т. 2 : Колебание нелинейных механических систем / под ред. И. И. Блехмана. – М. : Машиностроение, 1979. – 351 с.
5. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов : справочник / под ред. В. А. Баумана, Н. И. Быховского, Б. Г. Гольдштейна. – М. : Машиностроение, 1970. – 548 с.
6. Волкова, В. Е. Динамическое поведение систем с несимметричными кусочно-линейными упругими характеристиками / В. Е. Волкова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2003. – Вип. 1. – С. 137–141.
7. Волкова, В. Е. Численное моделирование полигармонических колебаний нелинейных динамических систем / В. Е. Волкова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2004. – Вип. 3. – С. 115–120.
8. Гончаревич, И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. – М. : Наука, 1981. – 365 с.
9. Искович-Лотоцкий, Р. Д. Вибрационные процессы: обзор / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев. – М. : НИИМаш, 1979. – 50 с.
10. Искович-Лотоцкий, Р. Д. Вибраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів : монографія / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Я. В. Иванчук. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 156 с.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

11. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : Універсум, 2006. – 338 с.
12. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках / Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. И. Рузанов, А. И. Садырин. – Ниж. Новгород : Нижегород. ун-т, 1992. – 192 с.
13. Cheli, F. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism / F. Cheli, R. Corradi // J. of Sound and Vibration. – 2011. – Vol. 330. – Iss. 15. – P. 3744–3765. doi: 10.1016/j.jsv.2011.02.025.
14. Nejez, J. Cableway oscillation problems / J. Nejez // Intern. Ropeway Review. – 2011. – № 6. – P. 47.
15. Thelisson, G. Overhead line from start to finish / G. Thelisson // Railway Gazette Intern. – 2012. – July. – P. 48–49.

Р. Д. ИСКОВИЧ-ЛОТОЦКИЙ¹, Я. В. ИВАНЧУК^{2*}, Я. П. ВЕСЕЛОВСКИЙ³

¹Каф. «Металлорежущие станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, эл. почта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0003-3920-3019

^{2*}Каф. «Металлорежущие станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. +38 (067) 301 83 73, эл. почта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-4775-6505

³Каф. «Металлорежущие станки и оборудование автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, Винница, Украина, 21021, тел. +38 (0432) 59 85 23, эл. почта ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-6665-6278

ОСНОВЫ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ВИБРОУДАРНОЙ РАЗГРУЗКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Цель. Работа направлена на применение основных положений резонансно-структурной теории для теоретического исследования основных физико-механических процессов, происходящих в разгрузочном материале во время виброударной разгрузки, с целью обоснования эффективности их применения.

Методика. Разгрузочный материал во время виброударной разгрузки в качестве исследуемого объекта представлялся в виде феноменологической модели пространственной дисперсной среды. Рассмотрены уравнения динамики неустановившихся вынужденных колебаний частиц «связанной» структуры под действием вибрационных и ударных нагрузок, с учетом виброреологического эффекта, с установлением зон резонанса.

Результаты. При рассмотрении резонансных зон неустановившихся вынужденных колебаний частиц «связанной» структуры установлено, что при воздействии вибрационных нагрузок возможно эффективно влиять на систему моногармоническим импульсом внешних сил. Данный импульс имеет вид синусоидальной волны с угловой частотой, которая равна основной частоте собственных колебаний разгрузочного материала. При ударной нагрузке необходимо воздействовать на нее совокупностью импульсов внешних сил в виде единичного мгновенного импульса. При данных условиях нагрузки в данных системах имеет место явление резонанса, которое обеспечивает в разгрузочной системе «связанной» структуры материала абсолютную деформацию за счет дискретного роста в интервале пластических деформаций. Абсолютные деформации, возникающие при этом в разгрузочном материале, превышают допустимые упругие деформации для частиц данной системы; к тому же происходит разрушение зон контактов данных частиц. **Научная новизна.** Авторами исследованы неустановившиеся вынужденные колебания частиц «связанной» структуры на основе феноменологической модели пространственной дисперсной среды разгрузочного материала. При этом, для каждого типа виброударной нагрузки, что представлялось соответствующим видом возбуждающей силы, рассчитаны условия для прохождения резонансных процессов. **Практическая значимость.** Основные положения резонансно-структурной теории при теоретическом исследовании процессов виброударной разгрузки позволяют обосновать эффективность использования виброударного оборудования для повышения интенсивности разгрузки транспортных средств. Использование резонансно-структурной теории позволяет спрогнозировать необходимые параметры виброударной нагрузки на разгрузочный материал в зависимости от его физико-механических свойств. Это обеспечивает ему эффективную разгрузку за счет разрушения силовых связей частиц разгружаемого материала.

Ключевые слова: реология; колебания; резонанс; разгрузка; деформация; напряжение

R. D. ISKOVYCH-LOTOTSKYI¹, YA. V. IVANCHUK^{2*}, YA. P. VESELOVSKYI³

¹Dep. «Machine Tools and Automated Production Equipment», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske shose St., 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (0432) 59 85 23, e-mail ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0003-3920-3019

^{2*}Dep. «Machine Tools and Automated Production Equipment», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske shose St., 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (067) 301 83 73, e-mail ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-4775-6505

³Dep. «Machine Tools and Automated Production Equipment», Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske shose St., 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, tel. +38 (0432) 59 85 23, e-mail ivanchuck@ukr.net, ORCID 0000-0002-6665-6278

THE BASIS OF RESONANCE-STRUCTURE THEORY FOR VIBROIMPACT UNLOADING OF THE VEHICLES

Purpose. The use of the main provisions of the resonance-structure theory for theoretical study of basic physical and mechanical processes taking place in unloading material during the vibroimpact discharge in order to substantiate the efficiency of their application. **Methodology.** Unloading material during vibroimpact unloading, as the study object, appeared as phenomenological model of spatial dispersion medium. The dynamics equations of unsteady forced particle oscillations of the "linked" structure under the action of vibration and impact loadings, taking into account the vibro rheological effect, with the establishment of resonance zones were considered. **Findings.** When considering the resonance zones of unstable forced oscillations of the "linked" structure particles it was found out that under the influence of vibration loadings the system is effectively affected by the monoharmonic pulse of external forces in the form of sinusoidal wave with an angular frequency. This frequency is equal to the main frequency of the natural oscillations of the unloading material. Under the impact loading it is necessary to affect the system by the accumulation of external force pulses in the form of single instant impulse. Under the given load conditions in these systems the phenomenon of resonance, which provides absolute deformation in handling system of the "linked" structure of the material due to discrete growth in the range of plastic deformations takes place. Absolute deformation, resulting in handling material exceed the permissible elastic deformations for the particles of this system and the destruction of the contact zones of these particles takes place. **Originality.** The authors studied unstable forced oscillations of the "linked" structure particles based on the phenomenological model of the spatial dispersion medium of unloading material. Thus, for each type of vibro-impact loads were calculated the conditions for resonant processes. That was presented by the relevant type of the actuating force. **Practical value.** The main provisions of the resonance-structural theory in theoretical study of the vibroimpact load processes prove the use efficiency of the vibroimpact equipment to increase the intensity of the vehicles unloading. The use of resonance-structural theory allows predicting the required parameters of vibro-impact loading on the unloading material, depending on its physical and mechanical properties that ensures the efficient unloading due to the destruction of the power relations of unloading material particles.

Keywords: rheology; oscillations; resonance; unloading; deformation; strain

REFERENCES

1. Babichev A.P., Trunin V.B., Samodumskiy Yu.V. *Vibratsionnyye stanki dlya obrabotki detaley* [Vibration machines for parts processing]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 168 p.
2. Bauman V.A., Bykhovskiy N.N. *Vibratsionnyye mashiny i protsessy v stroitelstve* [Vibration machines and processes in construction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 255 p.
3. Chelomey V.N., Bolotin V.V. *Vibratsii v tekhnike. T. 1: Kolebaniye lineynykh sistem* [Vibrations in engineering, Vol. 1: Oscillations of linear systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 352 p.
4. Chelomey V.N., Blekhman I.I. *Vibratsii v tekhnike. T. 2: Kolebaniye nelineynykh mekhanicheskikh sistem* [Vibrations in engineering, Vol. 2: Oscillations of non-linear mechanical systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 351 p.
5. Bauman V.A., Bykhovskiy N.I., Goldshteyn B.G. *Vibratsionnyye mashiny v stroitelstve i proizvodstve stroitelnykh materialov* [Vibrating machines in the construction and production of building materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 548 p.
6. Volkova V.Ye. *Dinamicheskoye povedeniye sistem s nesimmetrichnymi kusochno-lineynymi uprugimi kharakteristikami* [Dynamic behavior of systems with unsymmetrical piecewise linear elastic characteristics].

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ

- Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 1, pp. 137-141.
7. Volkova V.Ye. Chislennoye modelirovaniye poligarmonicheskikh kolebaniy nelineynykh dinamicheskikh sistem [Numerical simulation of polyharmonic fluctuations of non-linear dynamical systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2004, issue 3, pp. 115-120.
 8. Goncharevich I.F., Frolov K.V. *Teoriya vibratsionnoy tekhniki i tekhnologi* [The theory of vibrating equipment and technology]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 365 p.
 9. Iskovich-Lototskiy R.D., Matveyev I.B. *Vibratsionnyye protsessy* [Vibration processes]. Moscow, NIIMash Publ., 1979. 50 p.
 10. Iskovych-Lototskiy R.D., Ivanchuk Ya.V. *Vibratsiini ta vibroudarni prystroi dlia rozvantazhennia transportnykh zasobiv* [Vibration and vibroimpact devices for unloading of the vehicles]. Vinnytsia, VNTU Publ., 2012. 156 p.
 11. Iskovych-Lototskiy R.D. *Osnovy teorii rozrakhunku ta rozrobka protsesiv i obladnannia dlia vibroudarnoho presuvannia* [Fundamentals of the theory for calculation and development of processes and equipment for vibro-pressing]. Vinnytsia, Universum Publ., 2006. 3308 p.
 12. Glushak B.L., Novikov S.A., Ruzanov A.I. Sadyrin A.I. *Razrusheniye deformiruyemykh sred pri impulsnykh nagruzkakh* [The destruction of deformable media under pulse loading]. Nizhniy Novgorod, Nizhegorodskiy universitet Publ., 1992. 192 p.
 13. Cheli F. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol. 330, issue 15, pp. 3744-3765. doi: 10.1016/j.jsv.2011.02.025.
 14. Nejez J. Cableway oscillation problems. *Intern. Ropeway Review*, 2011, no. 6, pp. 47.
 15. Thelisson G. Overhead line from start to finish. *Railway Gazette Intern.*, 2012, July, pp. 48-49.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. О. Сиваком (Україна); д.т.н., проф. В. Ф. Анісімовим (Україна); д.т.н., проф. С. В. Ракишою (Україна)

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 15.09.2014