

<sup>1</sup>Кафедра «Металорізальних верстатів та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, Вінниця, Україна, (0432) 59-85-23, ел. пошта: ivanchuck@ukr.net

<sup>2\*</sup>Кафедра «Металорізальних верстатів та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, Вінниця, Україна, (067) 301-83-73, ел. пошта: ivanchuck@ukr.net

<sup>3</sup>Кафедра «Металорізальних верстатів та обладнання автоматизованих виробництв», Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, Вінниця, Україна, (0432) 59-85-23, ел. пошта: ivanchuck@ukr.net

## ОСНОВИ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЇ ТЕОРІЇ ВІБРОУДАРНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Мета.** 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, представлявся у вигляді феноменологічної моделі просторового дисперсного середовища. Розглянуто рівняння динаміки невстановленого вимушеного коливання частинок «зв'язаної» структури під дією вібраційних і ударних навантажень, з 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 ефективно на систему впливати моногармонійним імпульсом зовнішніх сил, у вигляді синусоїдальної хвилі з кутовою частотою, яка рівна основній частоті власних коливань розвантажувального матеріалу. При ударному навантаженні, необхідно впливати на неї сукупністю імпульсів зовнішніх сил, у вигляді одиничного 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 і відбувається руйнування зон контактів даних частинок. **Наукова новизна.** 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 представлялося відповідним видом збуджуючої сили, розраховані 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, в залежності від його фізико-механічних властивостей, що забезпечує йому найефективніше розвантаження за рахунок руйнування силових зв'язків частинок розвантажувального матеріалу.

*Ключові слова:* реологія, коливання, резонанс, розвантаження, деформація, напруження.

### Вступ

В сучасних умовах науково-технічного розвитку широко використовуються вібраційні та віброударні технології для інтенсифікації виробничих процесів у різних галузях промисловості [1-3, 10, 14].

Дослідження [7, 8] показали, що для підвищення ефективності процесів розвантаження доцільно застосовувати примусові вібрації та удари, які впливають на фізико-механічні параметри матеріалу оброблюваного матеріалу.

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

При дії віброударного навантаження на дисперсійний матеріал, в останньому відбудеться ряд перетворень [2, 4], 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 представити 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 коливальної дії [6] від збуджуючої сили  $F_{\text{в}}$ . При попаданні 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 провертанням 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, 2, 3, 4 (рис. 1).

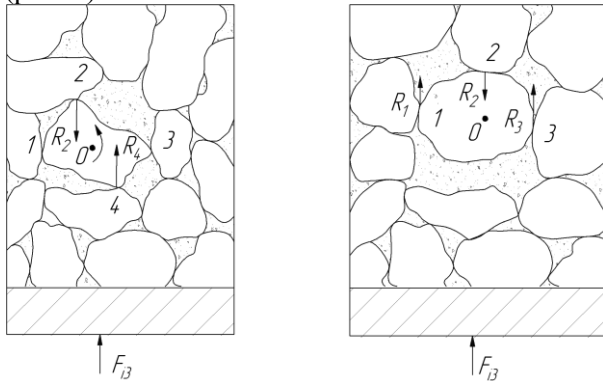


Рис. 1. Принципова система «зв'язаної» структури матеріалу вантажу

Розвантажувальний матеріал у загальному вигляді може бути представлений «феноменологічною моделлю просторового багатомасового дисперсного середовища у вигляді пружнов'язкопластично-інерційних систем» (рис. 2). Кожна реологічна комірка 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 комірки взаємодіють через пружні елементи та пари в'язкого і сухого тертя.

Розвантажувальний матеріал в замкненому об'ємі кузова транспортного засобу представ-

ляє собою складну систему 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.

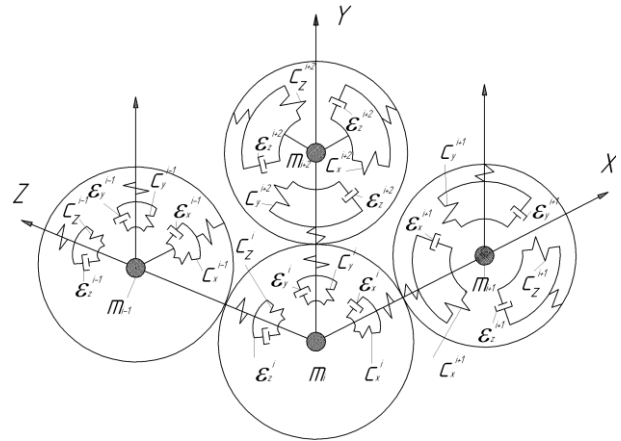


Рис. 2. Феноменологічна модель просторового дисперсного середовища

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 [5]. З цією метою слід визначити: «парціальні» системи, що утворюють складну систему; встановити «зв'язок» - взаємодію між коливаннями в «парціальних» системах; оцінити величину даного «зв'язку» за ступенем його впливу на характер коливань. Для виділення парціальної системи в складній системі розвантажувального матеріалу скористаємось відомим правилом [5], 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 ряді випадків для оцінювання власних частот складної системи, що має слабкі зв'язки, достатньо визначити її парціальні частоти [10].

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 [13].

Загалом віброударний процес можна розглядати як послідовний вплив на розвантажувальний матеріал полігармонійних імпульсів зовнішніх сил, у вигляді косинусоїдальних (синусоїдальних) хвиль з кутовими частотами  $\omega_j$ , результатом якого є суперпозиція гармонійних коливань, що відповідає складному імпульсу зовнішніх сил кінцевої тривалості [10]. Віброударний процес, який представляється у вигляді полігармонійного зовнішнього впливу, складається з ряду 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.

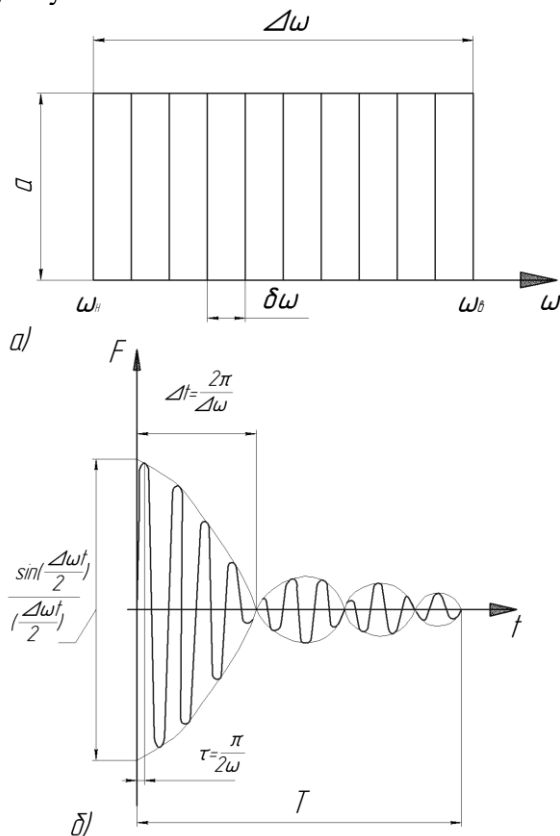


Рис. 3. Схема полігармонійного зовнішнього навантаження:  
а) - пакет хвиль; б) - сумарна амплітуда

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

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

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

Сума ряду 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 представити 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 ( $\Delta t$ ) 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'язкими  $\varepsilon_{iq}$  елементами.

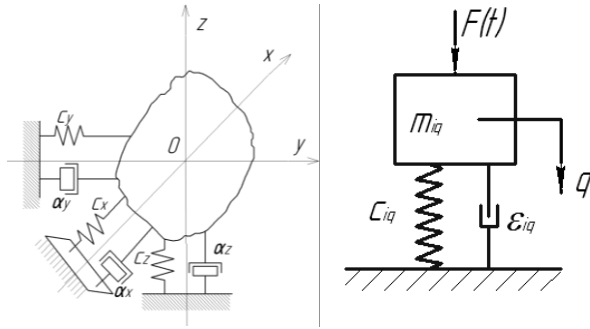


Рис. 4. Розрахункова модель коливання зв'язаної структури матеріалу вантажу

Рівняння динаміки частинок «зв'язаної» структури розвантажуючого ударними імпульсами матеріалу з урахуванням віброреологічного ефекту при зовнішній ударній дії на вантаж, розглядається, як невстановлені коливання в системі і описуються рівнянням:

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

з початковими умовами  $q(0) = q_0, \dot{q}(0) = \dot{q}_0$ , де  $\omega_0$  – 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) [4].

Розв'язок має вигляд:

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

Нехай початкові умови - нульові. Представимо 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  $[0, t]$ , отримуємо 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.

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

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

де  $\omega_\varepsilon$  – вимушена частота коливання частинки зв'язаної структури матеріалу вантажу.

Загальний розв'язок рівняння (2). Його представляють 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:

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

Аналізуючи процесу віброударного руйнування необхідно розглядати окремо вібраційний і ударний режим навантаження.

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

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

Відповідно до положень фізико-хімічної механіки дисперсних систем розвиток деформації в структурованому твердоподібному тілі характеризується тим, що при збільшенні напруження зсуву вище межі текучості відбувається руйнація структури, внаслідок чого ефективна узагальнена в'язкість  $\varepsilon_i$  системи різко знижується, і при гранично повній руйнації структури дося-

гає найменшого значення. Для вищевказаного випадку, коли  $\varepsilon_i=0$ , розв'язок інтеграла (7) представлена на графіку залежності коефіцієнту динамічного підсилення –  $\chi = \frac{q}{q_{cm}}$  і співвід-

ношення  $\frac{bt}{\omega_{0i}}$  (рис. 5), де  $q_{cm}$  – 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 приводить до виникнення критичних напружень руйнування між частинками зв'язаної структури розвантажуючого матеріалу. Для кожного параметра  $\frac{\omega_0^2}{2\pi a} = 80$ , змінюючи фазовий кут  $\varphi$ , можна отримати сімейство подібних кривих по яким можна визначити найбільшу амплітуду, що спричиняє. Чим більше кутове прискорення  $b$ , тим менше максимальна амплітуда коливань і тим більше її зміщення від резонансу  $\omega_0 = bt^*$ .

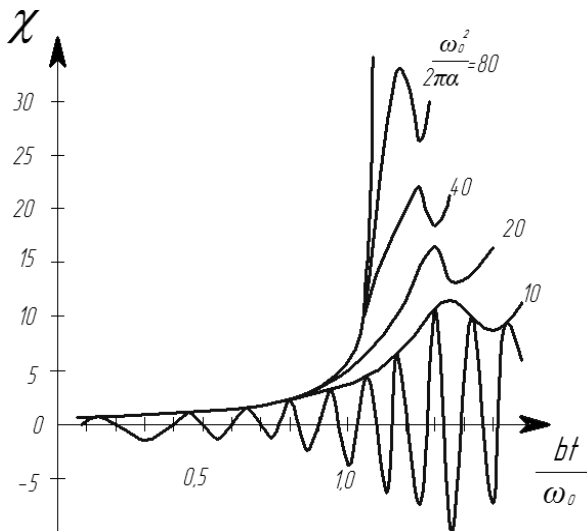


Рис. 5. Діаграма амплітудно-частотної характеристики системи коливальної частинки «зв'язаної» структури матеріалу при віброударному розвантаженні

Якщо ми представляємо систему «зв'язаної» структури матеріалу однорідною, ти 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  $bt$ , що рівна основній частоті  $\omega_0$  і власних коливань розвантажувального матеріалу, то в останній повинні мати місце коливання (хвилі деформацій), що проходять в умовах резонансу. Абсолютні деформації, що виникають при цьому в розвантажувальному

матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок даної системи. Відбувається руйнування зон контактів даних частинок [8].

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

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

де  $\omega_{\varepsilon_i}$  – вимушена частота коливання частинки «зв'язаної» структури розвантажувального матеріалу.

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

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

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

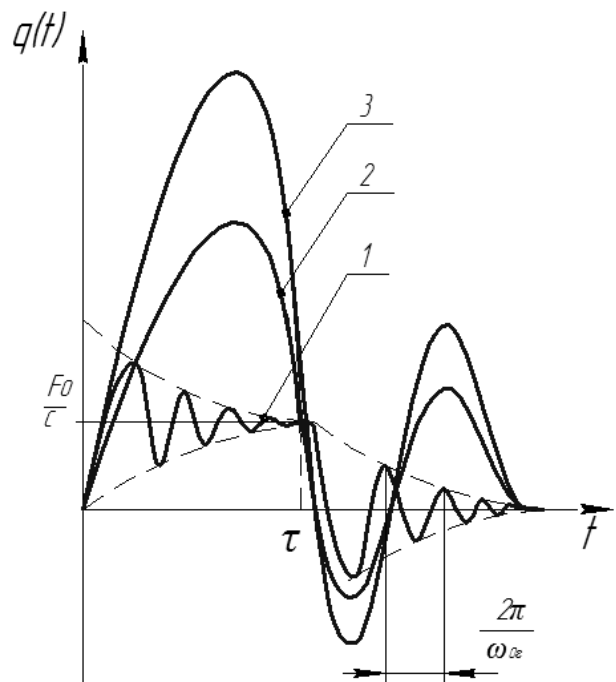


Рис. 6. Графік реакції системи коливальної частинки «зв'язаної» структури розвантажувального матеріалу при віброударному розвантаженні:

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

## Наукова новизна та практична значимість

Так як імпульсом сили  $S$  називають величину  $F_0\tau$ , і якщо  $\tau$  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  $\tau$  однакові ударні імпульси. При співпадінні  $\tau$  з періодом коливань  $T_\varepsilon = 2\pi/\omega_{ei}$  має місце ударний резонанс.

Максимальне значення в порівнянні з дією одиночного імпульсу 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 [8], у вигляді одиничного миттєвого імпульсу.

### Результати

При розгляді резонансних зон невстановленого вимушеного коливання частинок «зв'язаної» структури встановлено, щоб забезпечити в розвантажувальній системі «зв'язаної» структури матеріалу абсолютну деформацію, за рахунок дискретного зростання в інтервалі пластичних деформацій, в залежності від типу матеріалу, необхідно діяти прикладати як вібраційне так і віброударне навантаження. При цьому встановлено, що при 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). При ударному навантаженні, 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 при даних режимах навантаження в розвантажувальному матеріалі, перевищують допустимі пружні деформації для частинок даної системи і відбувається руйнування зон контактів даних частинок.

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 представлялося відповідним видом збуджуючої сили, розраховані умови для проходження резонансних процесів. Основні положення резонансно-структурної теорії при теоретичному дослідженні 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, в залежності від його фізико-механічних властивостей, що забезпечує йому найефективніше розвантаження за рахунок руйнування силових зв'язків частинок розвантажуючого матеріалу. Результати досліджень знайшли своє наукове використання в низці публікацій авторів у спеціальних та науково-популярних виданнях, виступах на наукових конференціях.

### Висновки

Основні положення резонансно-структурної теорії при теоретичному дослідженні процесів віброударного розвантаження, дозволяють обґрунтувати ефективність використання віброударного обладнання для підвищення інтенсивності розвантаження транспортних засобів [15].

### 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.: Высшая школа, 1977. – 255 с.
3. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник / Под ред. В. А. Баумана, Н. И. Быховского и Б. Г. Голдштейна. – М.: Машиностроение, 1970. – 548 с.
4. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / Ред. Совет: В. Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 1. Колебание

- линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. – 352 с.
5. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / Ред. Совет: В. Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 2. Колебание нелинейных механических систем / Под ред. И. И. Блехмана. – 351 с.
  6. Гончаревич И. Ф. Теория вибрационной техники и технологи / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 365 с.
  7. Глушак Б. Л. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках / Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. И. Рузанов, А. И. Садырин. – Нижний Новгород: Нижегородский ун-т, 1992. – 192 с.
  8. Искович-Лотоцкий Р. Д. Вибрационные процессы: Обзор / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев. – М.: НИИМаш, 1979. – 50 с.
  9. Искович-Лотоцкий Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування: монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – В.: 2006. – 338с.
  10. Искович-Лотоцкий Р. Д. Вібраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів: монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук. – В.: ВНТУ, 2012-156 с.
  11. 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.
  12. 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.
  13. Nejez, J. Cableway oscillation problems / J. Nejez // Intern. Ropeway Review. – 2011. – № 6. – Р. 47.
  14. Cheli, F. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism / F. Cheli, R. Corradi // Journal of Sound and Vibration. – 2011. – Vol. 330.– Issue 15. – Р. 3744–3765.
  15. Thelisson, G. Overhead line from start to finish / G. Thelisson // Railway Gazette Intern. – 2012. – July. – Р. 48–49.

Р. Д. ИСКОВИЧ-ЛОТОЦКИЙ<sup>1</sup>, Я. В. ИВАНЧУК<sup>2\*</sup>, Я. П. ВЕСЕЛОВСКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кафедра «Металлорежущих станков и оборудования автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, 21021, Винница, Украина, (0432)59-85-23, эл. почта: ivanchuck@ukr.net

<sup>2\*</sup>Кафедра «Металлорежущих станков и оборудования автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, 21021, Винница, Украина, (067)301-83-73, эл. почта: ivanchuck@ukr.net

<sup>3</sup> Кафедра «Металлорежущих станков и оборудования автоматизированных производств», Винницкий национальный технический университет, ул. Хмельницкое шоссе, 95, 21021, Винница, Украина, (0432)59-85-23, эл. почта: ivanchuck@ukr.net

## ОСНОВЫ РЕЗОНАНСНО-СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ВИБРОУДАРНОЙ РАЗГРУЗКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Цель.** 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 эффективно влиять на систему моногармоническим импульсом внешних сил, в виде синусоидальной волны с угловой частотой, которая равна основной частоте собственных колебаний разгрузочного материала. При ударной нагрузке, необходимо воздействовать на нее совоку-

пностью 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 и 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, позволяющие 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, что обеспечивает ему эффективную разгрузку за счет разрушения силовых связей частиц разгружаемого материала.

*Ключевые слова:* реология, колебания, резонанс, разгрузка, деформация, напряжения

R. D. ISKOVYCH-LOTOTSKYI<sup>1</sup>, Ya. V. IVANCHUK<sup>2\*</sup>, Ya. P. VESELOVSKYI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Metal-cutting machines and equipment automation facilities, Vinnitsya National Technical University, Khmelnytske shoes st. 95, 21021, Vinnytsia, Ukraine, tel. (0432)59-85-23, e-mail: ivanchuck@ukr.net.

<sup>2\*</sup>Department of Metal-cutting machines and equipment automation facilities, Vinnitsya National Technical University, Khmelnytske shoes st. 95, 21021, Vinnytsia, Ukraine, tel. (067)301-83-73, e-mail: ivanchuck@ukr.net.

<sup>3</sup> Department of Metal-cutting machines and equipment automation facilities, Vinnitsya National Technical University, Khmelnytske shoes st. 95, 21021, Vinnytsia, Ukraine, tel. (0432)59-85-23, e-mail: ivanchuck@ukr.net.

## THE BASIS OF RESONANCE-STRUCTURE THEORY FOR VIBROIMPACT UNLOADING OF THE VEHICLE

**Purpose.** The use of the main provisions of the resonance-structure theory for theoretical study of basic physical and mechanical processes in handling the material during the vibroshock of the discharge for the purpose a substantiation of efficiency their application. **Methodology.** Unloading material during vibroimpact unloading, as the study object, appeared as phenomenological model spatial dispersion medium. Considered the equations of unsteady dynamics of forced oscillations particles "related" structures under the action of vibration and shock loads, taking into account vibriruyushchego effect, with the establishment of resonance zones. **Finding.** When considering resonance zones unsteady forced oscillations of particles "related" structure found that the vibration effectively influence the management system pulse external forces, in the form of a sine wave with an angular frequency, which is equal to the main frequency of the self-oscillation handling of the material. Shock load, you need to work on it, allowing a synergy of pulses external forces, in the form of single instant boost. Under these conditions on-load in these systems is the phenomenon of resonance, which provides in handling system "associated" the structure of the material absolute deformation due to discrete growth in the range of plastic deformations. Absolute strain, resulting in handling the material exceeding provide a valid elastic deformation for particles of this system and destructed the contact zones of these particles. **Originality.** The authors studied the unsteady forced oscillations hour "related" structure, based on a phenomenological model of the spatial dispersion medium handling material. Thus, for each type of vibro-impact loads that seemed relevant views of the driving force, calculated conditions for the passage of resonant processes. **Practical value.** The main provisions of the resonance-structural theory in theoretical the study of the processes of vibroimpact discharge, allows to prove the efficiency of the use of vibroimpact equipment for increase an intensity of unloading vehicle. The use of resonance-structural theory allows to predict the required parameters shocking on-load on the unloading material, depending on its physical and mechanical properties, which ensures efficient unloading due to the destruction the power relations of particles discharged material.

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

### REFERENCES

1. Babichev A. P., Trunin V. B., Samodumskiy Yu. V. *Vibratsionnye stanki dlya obrabotki detaley* [Vibrating machines for machining]. Moscow. Mashinostroenie, 1984. 168 p.
2. Bauman V. A., Bykhovskiy N. N. *Vibratsionnye mashiny i protsessy v stroitelstve* [Vibration machines and processes in construction]. Moscow. Vysshaya shkola, 1977. 255 p.
3. *Vibratsionnye mashiny v stroitelstve i proizvodstve stroitelnykh materialov: Spravochnik* [Vibrating machines in the construction and production of building materials]/ Pod red. V. A. Baumana, N. I. Bykhovskogo, B. G. Goldshteyna. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1970. 548 p.



4. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik v 6-ti t. [Vibrations in engineering]. Red. Sovet: Chelomey V. N. (pred.). Moscow. Mashinostroenie Publ., 1979. V. 1. Kolebanie lineynykh sistem / Pod red. Bolotina V. V. 352 p.
5. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik v 6-ti t. [Vibrations in engineering]. Red. Sovet: Chelomey V. N. (pred.). Moscow. Mashinostroenie Publ., 1979. V. 2. Kolebanie nelineynykh mekhanicheskikh sistem. Pod red. Blekhmana I. I. 351 p.
6. Goncharevich I. F., Frolov K. V. *Teoriya vibratsionnoy tekhniki i tekhnologi* [The theory of vibrating equipment and technology]. Moscow. Nauka Publ., 1981. 365 p.
7. Glushak B. L., Novikov S. A., Ruzanov A. I. *Sadyrin Razrushenie deformiruemyykh sred pri impulsnykh nagruzkakh* [The destruction of deformable media under pulse loading]. Nizhniy Novgorod. Nizhegorodskiy un-t Publ., 1992. 192 p.
8. Iskovich-Lototskiy R. D., Matveev I. B. *Vibratsionnye protsessy: Obzor* [Vibratory processes]. Moscow. NIIMash Publ., 1979. 50 p.
9. Iskovych-Lototskiy R. D. *Osnovy teorii rozrakhunku ta rozrobka protsesiv i obladnannia dlia vibroudarnoho presuvannia: monografiia* [Fundamentals of the theory for calculation and development of processes and equipment for vibro-pressing]. Vinnitsya. Universum Publ., 2006. 338 p.
10. Iskovych-Lototskiy R. D., Ivanchuk Ya. V. *Vibratsiini ta vibroudarni prystroi dlia rozvantazhennia transportnykh zasobiv: monografiia* [Vibration and vibro-removal device for unloading of the vehicle]. Vinnitsya. VNTU Publ., 2012. 156 p.
11. Volkova V. Ye. Dinamicheskoe povedenie sistem s nesimmetrichnymi kusochno-lineynymi uprugimi kharakteristikami [Dynamic behavior of systems with nonsymmetric piecewise linear elastic characteristics]. *Visnik Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2003, issue 1, pp. 137–141.
12. Volkova V. Ye. Chislennoe modelirovanie poligarmonicheskikh kolebaniy nelineynykh dinamicheskikh sistem [Numerical simulation polyharmonicity fluctuations nonlinear dynamical systems]. *Visnik Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznichnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2004, issue 3, pp. 115–120.
13. Nejez, J. Cableway oscillation problems/ *Intern. Ropeway Review*, 2011. № 6, p. 47.
14. 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.
15. Thelisson, G. Overhead line from start to finish. *Railway Gazette Intern*, 2012. July, pp. 48–49.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром.тех.наук, проф. І. О. Сиваком (Україна), д-ром.тех.наук, проф. В. Ф. Анісімов (Україна)*

Надійшла до редколегії  
Прийнята до друку