

УДК 621+567.2

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ДЕМПФУВАННЯ НА КОЕФІЦІЄНТ ЕФЕКТИВНОСТІ СИМЕТРИЧНО-КОНСОЛЬНОГО ВІБРОІЗОЛЯТОРА ТЕЛЕСКОПІЧНОЇ СТРИЛИ АВТОКРАНА

© **В. С. Ловейкін, д.т.н, професор, Ю. В. Човнюк, к.т.н.,**
доцент, Національний університет біоресурсів
і природокористування України, Київ,
К. І. Почка, к.т.н., доцент, Київський національний
університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Рассмотрено влияние демпфирования на коэффициент эффективности симметрично-консольного виброизолятора (СКВ) телескопической стрелы автокрана. Показано, что если все формы колебаний промежуточной массы «балочного» или Т-образного СКВ связаны между собой, тогда возможна реализация виброизолирующей характеристики, которая имеет даже при учёте демпфирования на рабочей частоте локальный минимум коэффициента передачи, равный нулю.

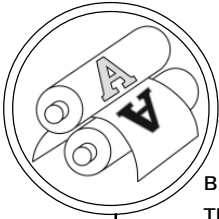
Influence of damping over the efficiency factor of the symmetric cantilever vibration isolator of the automobile's crane telescopic boom has been considered. It's been shown that if all forms of the intermediate mass oscillations of beam type or T-shaped symmetric cantilever vibration isolator are related then realization of vibro-isolated characteristics is possible which has a local minimum of transfer ratio equaled to zero even taking into consideration damping at the operating frequency.

Постановка проблеми

Відомо, що наявність дисипативних сил справляє суттєвий вплив на величину коефіцієнта ефективності вібраційного захисту, зокрема, телескопічних стріл автокранів. Зазвичай дослідники подібних систем роблять висновки про те, що з точки зору ефективності наявність дисипативних сил вигідна тільки на резонансних частотах і у дорезонансному діапазоні частот. На інших частотах ця обставина

приводить до збільшення значень коефіцієнту передачі.

При вивченні впливу демпфування на ефективність Т-подібного симетрично-консольного виброізолятора (СКВ) телескопічних стріл автокранів для випадку, коли поступальна (у напрямку, перпендикулярному вісі симетрії виброізолятора) форма коливань проміжної маси не пов'язана з двома іншими її формами коливань, то саме у даному окремому випадку демпфу-



вання справляє на ефективність СКВ такий самий вплив, як і на інші пасивні віброізолюючі пристрої. Однак подальші дослідження показують, що якщо всі форми коливань проміжної маси «балочного» чи Т-подібного СКВ пов'язані між собою, тоді можлива реалізація віброізолюючої характеристики, яка має навіть при врахуванні демпфування на робочій частоті локальний мінімум коефіцієнту передачі, рівний нулю. Це показано у даній роботі на прикладі «балочного» СКВ.

Аналіз попередніх досліджень

Вплив демпфування на ефективність традиційних пасивних систем віброзахисту добре вивчений та викладений у роботах [1, 4, 6, 7] та ін. У роботі [3] розглянутий вплив демпфування на ефективність саме Т-подібного СКВ для випадку, коли поступальна (у напрямку, перпендикулярному вісі симетрії віброізолятора) форма коливань проміжної маси не пов'язана з двома іншими її формами коливань. Автори [3] встановили, що демпфування у даному випадку справляє на ефективність СКВ такий самий вплив, як і на інші пасивні віброізолюючі пристрої. Однак досліджен-

ня, проведені у [2, 5, щодо всіх форм коливань проміжної маси «балочного» чи Т-подібного СКВ показали, що у випадку їх (форм) зв'язку між собою можлива реалізація віброізолюючої характеристики, яка має (навіть при врахуванні демпфування на робочій частоті) локальний мінімум коефіцієнту передачі, рівний нулю.

Розгляд роботи «балочного» СКВ [2] покладений у основу даного дослідження.

Мета роботи

Мета даної роботи полягає у встановленні основних закономірностей руху/коливань «балочних» СКВ, які слугують у якості віброізоляторів шкідливих коливань телескопічних стріл автокранів [8] при їх розгортанні (встановленні) у робоче положення.

Результати проведених досліджень

«Балочний» СКВ (рис. 1) [2] описується системою рівнянь руху для проміжної маси за дії на останню вимушеної сили $P \cos \omega t$ та моменту $M \cos \omega t$ ($P \cdot M$ — амплітуди вимушеної сили та моменту, відповідно; ω — кругова частота вимушеної сили; t — час):

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{y} + \gamma_1 \cdot (\dot{y} - d \cdot \dot{\varphi}) + \gamma_2 \cdot (\dot{y} + b \cdot \dot{\varphi}) + \\ + c_1 \cdot (y - d \cdot \varphi) + c_2 \cdot (y + b \cdot \varphi) = P \cdot \cos \omega t; \\ J \cdot \ddot{\varphi} - \gamma_1 \cdot d \cdot (\dot{y} - d \cdot \dot{\varphi}) + \gamma_2 \cdot b \cdot (\dot{y} + b \cdot \dot{\varphi}) - \\ - c_1 \cdot d \cdot (y - d \cdot \varphi) + c_2 \cdot b \cdot (y + b \cdot \varphi) = M \cdot \cos \omega t, \end{cases} \quad (1)$$

де γ_1 та γ_2 — коефіцієнти опору у пружних елементах c_1 та c_2 відповідно.

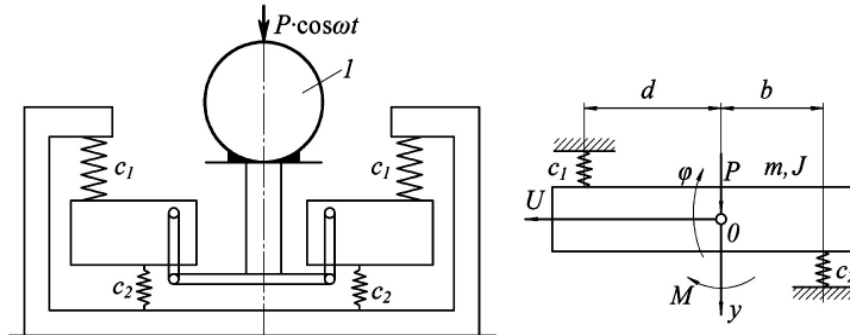


Рис. 1. Динамічна схема «балочного» СКВ для телескопічної стріли автокрану: 1 — поперечний переріз стріли автокрану

Частинні розв'язки системи

(1) знаходимо у вигляді:

$$y = Y \cdot \cos(\omega t + \beta_1);$$

$$\varphi = \Phi \cdot \cos(\omega t + \beta_2). \quad (2)$$

З рівнянь системи (1) та (2) визначимо координати V та U центру коливань проміжної маси СКВ, коефіцієнт передачі з та фазові зсуви β_1 , β_2 і β_F — кут відставання по фазі сумарної сили, переданої на фундамент автокрану через пружні зв'язки c_1 та c_2 від вимушеної:

$$V = 0;$$

$$U = \frac{Y \cdot [\cos \beta - \operatorname{tg}(\omega t + \beta_2) \cdot \sin \beta]}{\Phi}. \quad (3)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{C^2 + D^2}}. \quad (4)$$

$$\frac{Y}{\Phi} = \sqrt{\frac{E^2 + G^2}{Q^2 + N^2}};$$

$$\beta_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{G}{E}\right) - \alpha;$$

$$\beta_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{N}{Q}\right) - \alpha;$$

$$\beta_F = \operatorname{arctg}\left(\frac{B}{A}\right) - \alpha;$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{D}{C}\right), \quad (5)$$

де

$$\beta = \beta_1 - \beta_2; \quad r = \frac{M}{P};$$

$$A = c_1 \cdot c_2 \cdot (b+d)^2 -$$

$$- [(c_1 + c_2) \cdot J + (c_2 \cdot b - c_1 \cdot d) \cdot m \cdot r +$$

$$+ \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (c_1 + c_2) \cdot (b+d)^2 \cdot m] \cdot \omega^2$$

$$B = (c_1 \cdot \lambda_2 + c_2 \cdot \lambda_1) \cdot (b+d)^2 \cdot \omega -$$

$$- [(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot J +$$

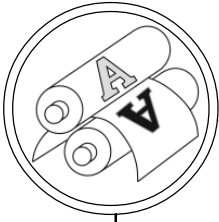
$$+ (\lambda_2 \cdot b - \lambda_1 \cdot d) \cdot m \cdot r] \cdot \omega^3;$$

$$C = J \cdot m \cdot \omega^4 - [(c_1 + c_2) \cdot J +$$

$$+ (c_1 \cdot d^2 + c_2 \cdot b^2) \cdot m +$$

$$+ \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (c_1 + c_2) \cdot (b+d)^2 \cdot m] \cdot \omega^2 +$$

$$+ c_1 \cdot c_2 \cdot (b+d)^2;$$



$$D = \left\{ \left[(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot J + (\lambda_1 \cdot d^2 + \lambda_2 \cdot b^2) \cdot m \right] \cdot \omega^2 - (\lambda_1 \cdot c_2 + \lambda_2 \cdot c_1) \cdot (b + d)^2 \right\} \cdot \sqrt{(c_1 + c_2) \cdot m} \cdot \omega;$$

$$E = c_1 \cdot d \cdot (d + r) + c_2 \cdot b \cdot (b - r) - J \cdot \omega^2;$$

$$G = \left[\lambda_1 \cdot d \cdot (d + r) + \lambda_2 \cdot b \cdot (b - r) \right] \cdot \sqrt{(c_1 + c_2) \cdot m} \cdot \omega;$$

$$N = \left[\lambda_1 \cdot (d + r) + \lambda_2 \cdot (b - r) \right] \cdot \sqrt{(c_1 + c_2) \cdot m} \cdot \omega;$$

$$Q = c_1 \cdot (d + r) + c_2 \cdot (b - r) - m \cdot r \cdot \omega^2,$$

а коефіцієнти демпфування λ_1 і λ_2 зв'язані з коефіцієнтами опору γ_1 та γ_2 співвідношеннями:

$$\lambda_i = \frac{\gamma_i}{m \cdot \sqrt{(c_1 + c_2) / m}},$$

де $i = 1, 2$.

З рівняння (4) випливає, що у разі $A = 0$ та $B = 0$ за одного й того ж значення частоти збудження коефіцієнт передачі віброізолятора на цій частоті з $\eta = 0$. Дана частота й буде визначати робочу частоту ω_0 «балочного» СКВ із врахуванням демпфування.

З умови:

$$\omega_0^2 = \frac{c_1 \cdot c_2 \cdot (b + d)^2}{c_1 \cdot (J - m \cdot d \cdot r) + c_2 \cdot (J + m \cdot b \cdot r) + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (c_1 + c_2) \cdot (b + d)^2 \cdot m} = \frac{c_1 \cdot \lambda_2 + c_2 \cdot \lambda_1}{\lambda_1 \cdot (J - m \cdot d \cdot r) + \lambda_2 \cdot (J + m \cdot b \cdot r)} \quad (6)$$

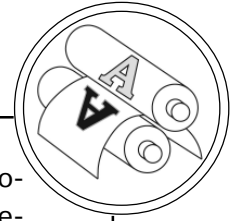
після спрощення отримуємо наступний вираз:

$$\lambda_2^2 \cdot \left(\frac{c_2}{c_1} + 1 \right) \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{c_2}{c_1} \right) \cdot (b + d)^2 \cdot m = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot (m \cdot d \cdot r - J) - \frac{c_2^2}{c_1^2} \cdot (J + m \cdot b \cdot r) \right\}, \quad (7)$$

котрий має зміст при умові:

$$\frac{J}{m \cdot d \cdot r} + \frac{c_2^2}{c_1^2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \left(\frac{J}{m \cdot d \cdot r} + \frac{b}{a} \right) < 1.$$

Зазначимо, що на робочій частоті центр коливань проміжної маси змінюється протягом періоду від $-\infty$ до $+$ оскільки взагалі фазові зсуви поступальної та кутової форм коливань не дорівнюють одна одній ($\beta_1 \neq \beta_2$). Тільки у частинному випадку за рівності коефіцієнтів пружного $c_1 = c_2$ та непружного $\gamma_1 = \gamma_2$ опорів координата $U(\omega_0) = \text{const}$. Однак умова рівності фазових зсувів β_1 та β_2 на робочій частоті не є визначальною, оскільки відомо, що за врахування демпфування сила, подана на фундамент (раму автокрану), зсувається по фазі відносно переміщення. Тому у протилежність Т-подібному СКВ, для якого на робочій частоті необхідно забезпечити певне й незмінне у часі положення центру коливань проміжної маси, у даному випадку важливо забез-



печити рівні за величиною та зсунуті по фазі на π відносно одна до одної сили F_1 та F_2 , що передаються на корпус «балочного» СКВ для телескопічних стріл автокранів через пружні елементи c_1 та c_2 відповідно. У цьому випадку на корпус віброізолятора передаються реакції тільки у вигляді двох змінних моментів сил, які взаємно компенсуються внаслідок симетрії конструкції СКВ. Отже, якщо параметри системи задовольняють рівнянню (7), тоді на робочій частоті (6) коефіцієнт передачі віброізолятора (конструкції телескопічної стріли автокрану) $\eta = 0$, не дивлячись на те, що $\beta_1 \neq \beta_2$, оскільки при цьому $F_1 = F_2$, а $|\beta_{F_1} - \beta_{F_2}| = \pi$.

Для ілюстрації наведеного вище на рис. 2 показані частотні залежності модуля різниці кутів відставання за фазою $\Delta\beta_F = |\beta_{F_1} - \beta_{F_2}|$ сил, які передані на основу автокрану через

пружні елементи c_1 та c_2 від діючого збудження і коефіцієнту передачі віброізолятора $\eta(f)$, де f – лінійна частота коливань, Гц. Суцільна лінія на рис. 2, а, б відповідає випадку відсутності демпфування $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, а штриховими дані залежності $\Delta\beta_F(f)$ та $\eta(f)$ при $\lambda_1 = 0,1$ і $\lambda_2 = 0,2$, які для прийнятих значень параметрів СКВ задовольняють рівнянню (7). Без врахування демпфування власні частоти f_1 та f_2 відповідно дорівнюють 22 та 69 Гц, а робоча частота $f_0 = 85$ Гц.

При $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ зміна модуля різниці кутів відставання по фазі сил F_1 та F_2 відбувається стрибкоподібно від значення фази $\Delta\beta_F = 0$ до $\Delta\beta_F = \pi$ на частоті f^* і пояснюється тим, що на частотах збудження $f > f^*$ центр коливань проміжної маси знаходиться між пружними елементами c_1 та c_2 .

При врахуванні демпфування зміна частоти збудження у діапа-

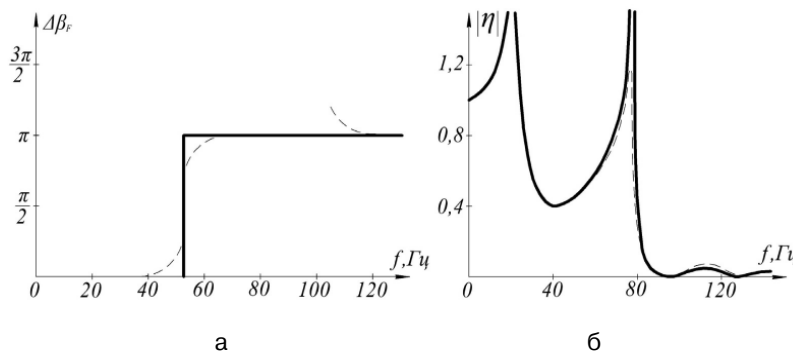
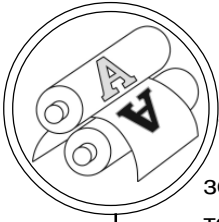


Рис. 2. Частотні залежності модуля різниці кутів відставання по фазі $\Delta\beta_F(f)$ (а) та коефіцієнту передачі $\eta(f)$ (б)



зоні від 0 до ∞ призводить до того, що величина модуля різниці фазових зсувів змінюється від $\Delta\beta_F = 0$ при $f = 0$ до $\Delta\beta_F = \pi$ при $f \rightarrow \infty$, приймаючи значення, яке дорівнює $\pi/2$, при $f = f^*$. На робочій частоті $\Delta\beta_F = \pi$ і, як показано на рис. 2, б, наявність демпфування дає змогу уникати розриву при резонансі не зменшуючи коефіцієнту ефективності віброізолятора на робочій частоті. У дорезонансному та зарезонансному діапазонах зміна коефіцієнту передачі у порівнянні з випадком відсутності демпфування незначна.

З рівняння (7) видно, що даним значенням параметрів віброізолятора та визначеному раніше відношенню коефіцієнтів демпфування λ_1/λ_2 відповідає тільки одне значення величини λ_2 . Це свідчить про те, що умова, за якої $\eta = 0$, критична до зміни величин параметрів віброізолятора. Іншими словами, відхилення, наприклад, значень коефіцієнтів демпфування від розрахункових призведе до зміни фазових зсувів сил F_1 та F_2 і до погіршення коефіцієнта передачі на робочій частоті. Однак

розрахунки показують, що при умові забезпечення одного й того ж співвідношення коефіцієнтів демпфування λ_1/λ_2 зміна величини λ_2 (наприклад, у 23 рази) при $\lambda_1 < \lambda_2$ призводить до деякого зниження робочої частоти і незначного погіршення коефіцієнту передачі.

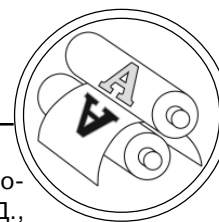
Висновки

1. Проведений динамічний аналіз функціонування симетрично-консольного віброізолятора телескопічної стріли автокрану, зокрема, вплив демпфування на коефіцієнт ефективності його роботи, дозволив встановити умови, за яких існує локальний мінімум (що дорівнює нулю) віброізолюючої характеристики (навіть при врахуванні демпфування) на робочій частоті.

2. Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення та вдосконалення існуючих методів розрахунку віброізоляторів телескопічних стріл автокранів, що суттєво зменшують наявні коливання останніх у процесі їх розгортання у робоче положення.

1. Беляковский Н. Г. Конструктивная амортизация механизмов, приборов и аппаратуры на судах / Н. Г. Беляковский. – Л.: Судостроение, 1965. — 525 с. 2. А. с. № 832166 (СССР). Амортизатор. / Вальнин Н. В., Генкин М. Д., Гринкевич В. К. – Опубл. в Б. И., 1981, № 19. 3. Вальнин Н. В. Влияние сил вязкого трения на эффективность симметрично-консольного виброизолятора / Н. В. Вальнин, В. К. Гринкевич. // Машиноведение. — 1981. — № 2. — С. 3–7. 4. Вибрация в технике: Справочник. В 6-ти т. Т. 6.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



Защита от вибраций и ударов / Под ред. К. В. Фролова. – М. : Машиностроение, 1981. — 456 с. 5. А. с. № 700718 (СССР). Амортизатор / Генкин М. Д., Гринкевич В. К., Вальнин Н. В. — Оpubл. в Б. И., 1978, № 44. 6. Тартаковский Б. Д. Методы и средства вибропоглощения / Б. Д. Тартаковский. — В кн.: Борьба с шумом и звуковой вибрацией. — М. : Наука, 1974. — С. 70–74. 7. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. / С. П. Тимошенко. — М. : Наука, 1967. — 444 с. 8. Пенчук В. А. Основы механизации малообъемных и рассредоточенных строительных и коммунальных работ / В. А. Пенчук, В. М. Даценко, В. В. Пенчук. — Донецк : изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2011. — 257 с.

Рецензент — В. В. Гайдачук, д.т.н.,
професор, КНУБіА

Надійшла до редакції 23.03.12