

УДК 621-752

Коруняк П. С., к.т.н., Малащенко В. О., д.т.н., Ніщенко І. І., к.ф-м.н.
Національний університет „Львівська політехніка”

ДИНАМІКА ПЕРЕМІЩЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ПЕРЕСУВНОГО ПРИБОРУ ПО ШОРСТКІЙ ПОВЕРХНІ

Постановка проблеми. Підвищення ефективності роботи обладнання автоматизованого виробництва з точки зору їх конструкції та енергозатрат завжди залишається актуальним завданням для конструкторських колективів. Важливим фактом в цьому набуває впровадження у виробничі процеси специфічних вібраційних механізмів. Так, застосування вібраційних транспортних модулів, вібраційних транспортно-маніпулювальних модулів як допоміжного обладнання значно розширює функціональні можливості схем і конструкцій існуючого обладнання, що створене на традиційних засадах [1]. Цікавим та особливим у вирішенні подібних завдань є використання вібраційних пересувних пристроїв. За допомогою цих пристроїв можна переміщати вироби у будь якому напрямку та траєкторіями у межах робочої зони, також монтувати на них невеличкі маніпулятори [2 – 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впровадження вібраційних транспортних модулів і вібраційних транспортно-маніпулювальних модулів, у яких число ступенів вільності може сягати до трьох (за потреби, деякі конструкції можуть мати чотири), у гнучку виробничу систему уможливує здійснення маніпуляцій з деталями (заготовками, виробами, пристроями) на площині. Змінюючи параметри вібрації несучої поверхні, можна реалізувати як прямолінійні рухи у взаємно перпендикулярних напрямках і під кутом до них, так і рух за криволінійною траєкторією, зокрема, по колу у прямому і зворотному напрямках [1].

Вібраційне пересування є одним із проявів ефекту вібраційного переміщення тіла внаслідок одержання направлених рухів за рахунок направленої дії збурювального зусилля. Взаємодія цього пристрою з даним середовищем або силовим полем визначає швидкість руху транспортованого матеріалу. Енергія, яка необхідна для пересування, може надходити як з внутрішнього джерела пристрою так і ззовні.

В роботах [2, 3] представлений самохідний вібраційний пересувний пристрій, у якому завдяки дебалансного вібробудника направленої дії генерується гармонійна збурювальна сила $F_0 \sin \omega t$, під заданим кутом α до поверхні, що створює ефект пересування об'єкта (вправо або вліво). Такий рух описуються диференціальними

рівняннями

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mA\omega^2 \sin(\omega t + \varepsilon) - F(\dot{x}); \\ m\ddot{y} &= mB\omega^2 \sin \omega t - mg \cos \alpha + N, \end{aligned} \quad (1)$$

де $F(\dot{x})$ і N – сила сухого тертя і нормальна реакція;

A і B – амплітуди коливань у взаємно перпендикулярних напрямках;

ω – кругова частота;

ε – зсув фаз.

Іншим прикладом вібраційного пересування є пристрій, схему якого наведено в [2, 3, 4]. Там механічна система складається з двох тіл, перше з яких (масою m_1) може переміщатися у горизонтальній площині, а друге (масою m_2) кріпиться до тіла 1 за допомогою пружних елементів і переміщається відносно нього вздовж напрямних, що похилені до горизонту під кутом α . Такий рух механічної системи з внутрішнім ступенем вільності під дією зовнішніх сил, сил пружності і збурювальної електромагнітної сили описується:

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 x}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 s}{dt^2} \cos \alpha &= T_1; \\ m_2 \frac{d^2 s}{dt^2} \sin \alpha &= N - Mg. \end{aligned} \quad (2)$$

де N - нормальна реакція;

T_1 – сила тертя;

$M = m_1 + m_2$ – загальна маса механічної системи;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – пришвидшення вільного падіння.

Ще одним диференціальним рівнянням, що описує відносний рух маси m_2 під дію збурювальної сили є

$$m_2 \frac{d^2 s}{dt^2} = -cs + F(t), \quad (3)$$

де c - жорсткість пружини.

Перетворюючи систему рівнянь (2), одержуємо

$$M \frac{d^2 s}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 s}{dt^2} (\cos \alpha + f \sin \alpha) = -fMg, \quad (4)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання.

Мета роботи. На підставі аналізу відомих схем пристроїв запропонувати конструкцію прогресивного вібраційного пересувного пристрою з внутрішнім ступенем вільності та дослідити його рух по шорсткій поверхні у довільному напрямку.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 показані дослідні взірці вібраційних пересувних пристроїв. Вони відрізняється від [4] тим, що вібропривід знаходиться на горизонтальній осі і може переміщатися

вдвож неї (рис. 1. б, привід непоказаний). У центральному положенні пристрою, відбуватиметься прямолінійний рух, а із зміщенням від нього – криволінійний рух. Зміна траєкторії руху пояснюється зміною центру ваги механічної системи. Таким чином, виконаний за такою схемою пристрій може рухатись будь-якою траєкторією.

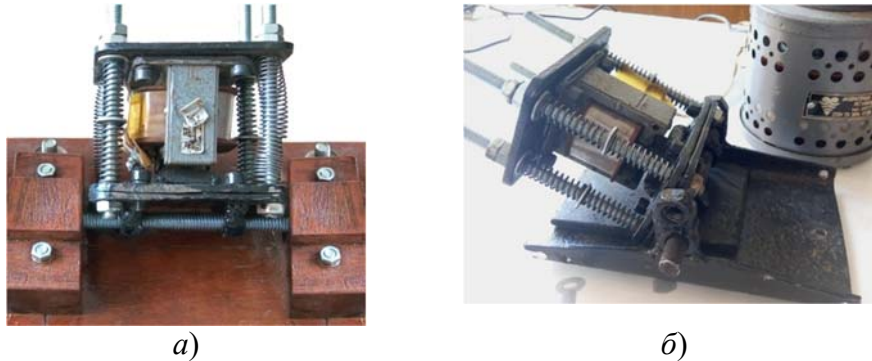


Рис. 1. Дослідні взірці пересувних вібраційних пристроїв: а) – з циліндричним шарніром; б) – з циліндричним шарніром та можливістю пересування вдвож його осі

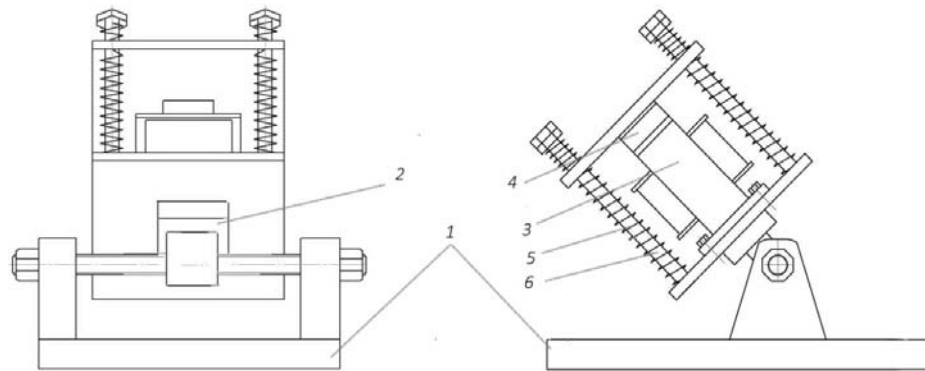


Рис. 2. Пересувний вібраційний пристрій з циліндричним шарніром та можливістю пересування вдвож його осі: 1 – платформа; 2 – циліндричний шарнір; 3, 4 - статор і якорь електромагнітного віброприводу, 5 - циліндричні пружини; 6 – напрямні

Дослідимо динаміку руху пристрою, зображеного на рис. 1 і 2. Механічна система складається з двох тіл. Тіло 1, центр мас якого знаходиться у точці С, має масу m_1 і момент інерції відносно центра мас I_1 . Це тіло здійснює плоско паралельний рух. Оскільки воно контактує із зовнішньою площиною своєю плоскою поверхнею, то задамо її трьома точками, тобто тіло 1 контактує з нерухомою основою в точках А, В, Д (рис. 3). Тіло 2 розглядаємо як маса m_2 з центром мас у точці C_2 , яка може здійснювати відносний прямолінійний рух вдвож напрямної n , що кріпиться до тіла 1 у точці К. Слід зауважити, що відрізок СК – перпендикулярний до напрямної n , яка, у свою чергу,

утворює з горизонтальною площиною кут α . Під час руху на механічну систему діють зовнішні сили: сили ваги m_1g, m_2g ; нормальні реакції $\vec{N}_A, \vec{N}_B, \vec{N}_D$; сили тертя $\vec{T}_A, \vec{T}_B, \vec{T}_D$ та внутрішня збурювальна сила $F(t)$, яка приводить у відносний рух масу m_2 , причому

$$F(t) = \begin{cases} F_o \sin \omega t, & F \geq 0, \\ 0, & F < 0, \end{cases} \quad (5)$$

де F_o – амплітуда збурювальної сили; ω – кругова частота.

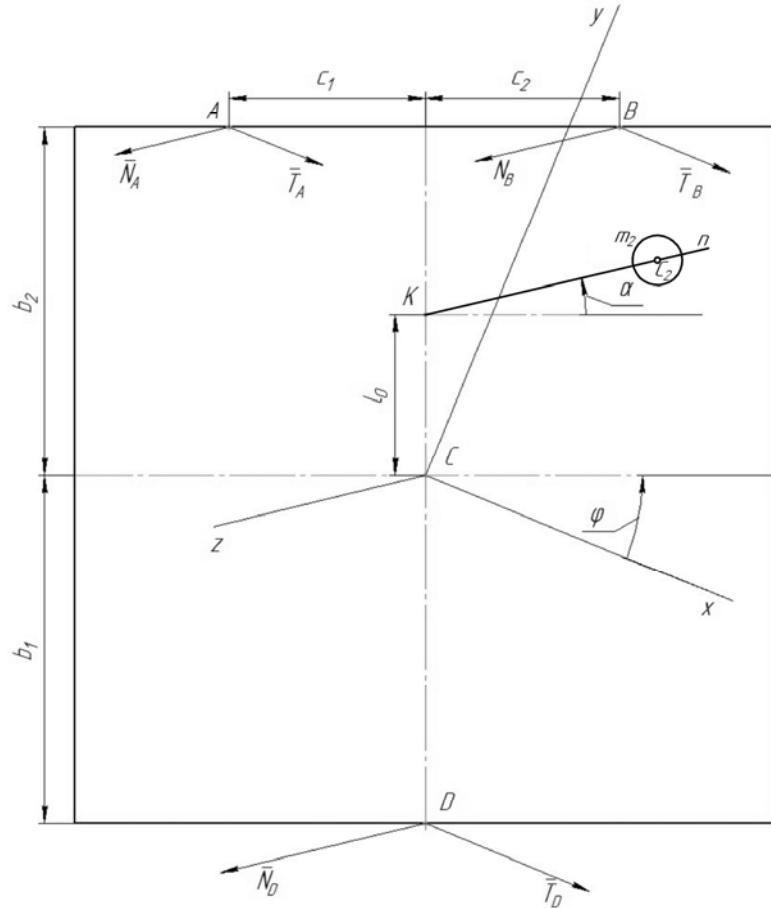


Рис. 3. Розрахункова схема вібраційного пересувного пристрою

Врахуємо у механічній системі головний вектор $(-m\vec{a}_c)$ і головний момент $(-I_1\ddot{\varphi})$ сил інерції тіла 1, а також силу інерції $(-m\vec{a}_2)$ тіла 2. Згідно принципу Даламбера, система сил є зрівноваженою, а тому можна записати для неї шість рівнянь рівноваги:

$$\sum_{k=1}^n (\vec{F}_{kz}) = 0; \quad N_A + N_B + N_D - (m_1 + m_2)g - m_2 a_{rz} = 0;$$

$$\begin{aligned}
 \sum \mathbf{M}_{AB}(\overrightarrow{F_K}) &= 0; m_1 g b_2 + m_2 g (b_2 - l_o) - N_D (b_1 + b_2) + \\
 m_2 a_{rz} (b_2 - l_o) - m_2 (a_{rx} \sin \varphi - a_{ry} \cos \varphi) K C_2 \sin \alpha &= 0; \\
 \sum_{k=1}^n (\overrightarrow{F_{kx}}) &= 0; T_{Ax} + T_{Bx} + T_{Dx} - m_1 a_{cx} - m_2 a_{2x} = 0; \\
 \sum \mathbf{M}_{DC}(\overrightarrow{F_K}) &= 0; N_A c_1 - N_B c_2 + m_2 a_{2z} K C_2 \cos \alpha - \\
 - m_2 (a_{2x} \cos \varphi + a_{2y} \sin \varphi) K C_2 \sin \alpha &= 0; \tag{6} \\
 \sum_{k=1}^n (\overrightarrow{F_{ky}}) &= 0; T_{Ay} + T_{By} + T_{Dy} - m_1 a_{cy} - m_2 a_{2y} = 0; \\
 \sum \mathbf{M}_z(\overrightarrow{F_k}) &= 0; \\
 - (T_{Ax} \cos \varphi + T_{Ay} \sin \varphi) b_2 + (T_{Ax} \sin \varphi - T_{Ay} \cos \varphi) c_1 - \\
 - (T_{Bx} \cos \varphi + T_{By} \sin \varphi) b_2 - (T_{Bx} \sin \varphi - T_{By} \cos \varphi) c_2 - \\
 - (T_{Dx} \cos \varphi + T_{Dy} \sin \varphi) b_1 - I_1 \ddot{\varphi} + m_2 (a_{2x} \cos \varphi + \\
 + a_{2y} \sin \varphi) l_o + m_2 (a_{rx} \sin \varphi - a_{ry} \cos \varphi) K C_2 \cos \alpha &= 0.
 \end{aligned}$$

Ще одне рівняння можна одержати, якщо відокремити тіло 2 і спроектувати всі сили, що діють на нього (включаючи сили інерції) на напрямок відносного руху n

$$-m_2 a_{2s} - cs + F(t) = 0, \tag{7}$$

де a_{2s} – проекція вектора пришвидшення тіла 2 на напрямку n , c – жорсткість пружини; $K C_2 = s_o + s(t)$; s – відхилення маси m_2 від положення статичної рівноваги внаслідок дії збурювальної сили $F(t)$.

Розглянемо кінематику даної механічної системи. Оскільки тіло 1 здійснює плоско паралельний рух, досить знати як рухається полюс (точка С) – $x_c(t)$, $y_c(t)$ і закон обертального руху $\varphi(t)$ навколо полюса. Тоді маємо:

$$\begin{aligned}
 a_{cx} &= \frac{d^2 x_c}{dt^2}; \quad a_{cy} = \frac{d^2 y_c}{dt^2}; \\
 V_{Ax} &= \frac{dx_c}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} (c_1 \sin \varphi - b_2 \cos \varphi); \quad V_{Ay} = \frac{dy_c}{dt} - \frac{d\varphi}{dt} (c_1 \cos \varphi + b_2 \sin \varphi); \\
 V_{Bx} &= \frac{dx_c}{dt} - \frac{d\varphi}{dt} (c_2 \sin \varphi + b_2 \cos \varphi); \quad V_{By} = \frac{dy_c}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} (c_2 \cos \varphi - b_2 \sin \varphi); \\
 V_{Dx} &= \frac{dx_c}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} b_1 \cos \varphi; \quad V_{Dy} = \frac{dy_c}{dt} - \frac{d\varphi}{dt} b_1 \sin \varphi; \tag{8} \\
 V_A &= \sqrt{V_{Ax}^2 + V_{Ay}^2}; \quad V_B = \sqrt{V_{Bx}^2 + V_{By}^2}; \quad V_D = \sqrt{V_{Dx}^2 + V_{Dy}^2}.
 \end{aligned}$$

Точкова маса m_2 здійснює складний рух, а тому її пришвидшення можна визначити з рівняння

$$a_2 = a_{\text{від}} + a_{\text{нер}} + a_{\text{кор}}. \quad (9)$$

Відносне пришвидшення $a_{\text{від}} = \frac{d^2 s}{dt^2}$ направлене вздовж напрямної n , а пришвидшення Коріоліса дорівнює

$$a_{\text{від}} = 2 \frac{ds}{dt} \frac{d\varphi}{dt} \cos \alpha, \quad (10)$$

і направлене перпендикулярно до напрямної n і осі Cz. Переносне пришвидшення складається з пришвидшення полюса (точка C) і пришвидшення маси m_2 в обертальному русі площини навколо осі Cz.

Проекції прискорення \vec{a}_2 маси m_2 на осі координат та напрямну n (a_{2s}) записано:

$$\begin{aligned} a_{2z} &= \frac{d^2 s}{dt^2} \sin \alpha; \\ a_{2x} &= \frac{d^2 s}{dt^2} \cos \alpha \cos \varphi + \frac{d^2 x_C}{dt^2} - \dot{\varphi}^2 (KC_2 \cos \alpha \cos \varphi - l_o \sin \varphi) - \\ &- \frac{d^2 \varphi}{dt^2} (l_o \cos \varphi + KC_2 \cos \alpha \cos \varphi) - 2 \frac{ds}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cos \alpha \sin \varphi; \\ a_{2y} &= \frac{d^2 s}{dt^2} \cos \alpha \sin \varphi + \frac{d^2 y_C}{dt^2} - \dot{\varphi}^2 (KC_2 \cos \alpha \sin \varphi - l_o \cos \varphi) - \\ &- \frac{d^2 \varphi}{dt^2} (KC_2 \cos \alpha \cos \varphi - l_o \sin \varphi) - 2 \frac{ds}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cos \alpha \cos \varphi; \\ a_{2s} &= \frac{d^2 s}{dt^2} - \dot{\varphi}^2 l_o (\cos \varphi)^2 - \frac{d^2 \varphi}{dt^2} l_o \cos \alpha + \frac{d^2 x_C}{dt^2} \cos \alpha \cos \varphi + \\ &+ \frac{d^2 y_C}{dt^2} \cos \alpha \sin \varphi. \end{aligned} \quad (11)$$

Під час руху сила тертя визначається через нормальні реакції:

$$\vec{T}_A = -fN_A \frac{\vec{V}_A}{|\vec{V}_A|}; \quad \vec{T}_B = -fN_B \frac{\vec{V}_B}{|\vec{V}_B|}; \quad \vec{T}_D = -fN_D \frac{\vec{V}_D}{|\vec{V}_D|}, \quad (12)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання.

Підставляючи вирази (10), (11), (12) в рівняння (6), (7) і одержуємо систему диференціальних рівнянь, з яких можна знайти закони руху $x_c(t), y_c(t), \varphi(t), s(t)$ та нормальні реакції $\vec{N}_A, \vec{N}_B, \vec{N}_D$, а

розв'язок її чисельними методами у середовищі *MATLAB*, одержані залежності, які відображені графічно на рис. 4 – 5.

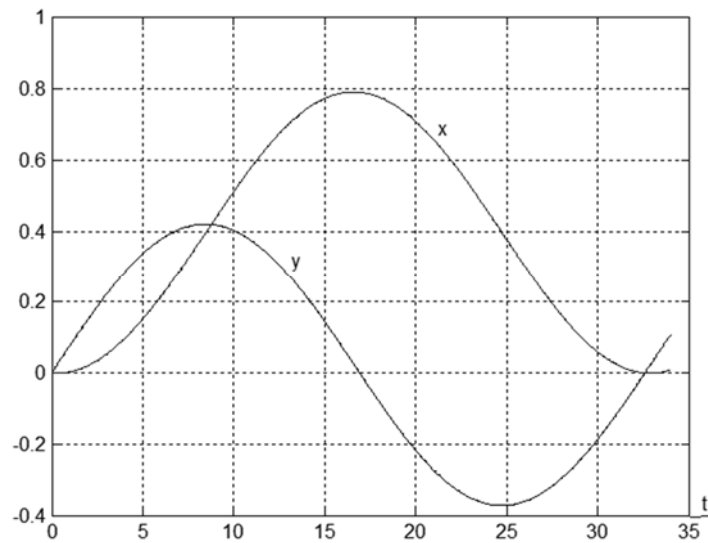


Рис. 4. Графіки зміни координат центра мас платформи у часі

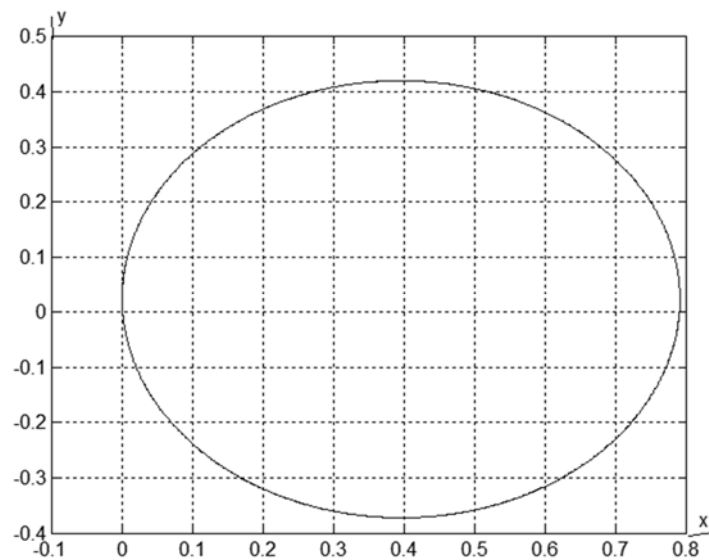


Рис. 5. Траєкторія руху центра мас платформи

Висновок. 1. Запропоновано принципово нову конструкцію та описано принцип функціонування вібраційного пересувного пристрою, що може знайти своє застосування для переміщення вантажів за будь-якими траєкторіями руху;

2. Для конкретних конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного пересувного пристрою одержані аналітичні залежності, які уможливають дослідити кінематику та визначити траєкторію його руху.

3. Отримані графічні значення основних параметрів руху підтверджують можливість існування запропонованих пристроїв та є підґрунтям для подальших досліджень нових транспортних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Повидайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання / В.О. Повидайло // -Львів. Вид. Національного університету “Львівська політехніка”, 2004. – 248 с.
2. Блехман И.И. Что может вибрация? / И.И Блехман // . - М.: Наука, 1988. – 208 с.
3. Блехман И.И. Вибрационная механика / И.И Блехман // . - М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
4. Малащенко В.О. Вібраційне пересування по шорсткій поверхні /П.С. Коруняк, І.І. Ніщенко // Науково-технічний та виробничий журнал: Підйомно-транспортна техніка. № 3 (55), 2017. – С. 33 - 39.
5. Вибрации в технике: Справочник: в 6 т. / ред. совет: В. Н. Чоломей (председ.)//. - М. : машиностроение, 1981.
4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела //.- 1981. - 509 с.
6. Гончаревич И.Ф. Вибрация – нестандартный путь: вибрация в природе и технике / И.Ф. Гончаревич // . - М.: Наука, 1986. – 209 с.