

ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ДИНАМІЧНИМ І СТАТИЧНИМ КОЕФІЦІЄНТАМИ ТЕРТЯ НА ШВИДКІСТЬ ВІБРОТРАНСПОРТУВАННЯ ПІД ЧАС ЕЛІПТИЧНИХ КОЛИВАНЬ

© Врублевський І. Й., 2017

Розглянуто вплив співвідношення динамічного і статичного коефіцієнтів тертя (тертя ковзання та спокою) на безрозмірний коефіцієнт швидкості вібротранспортування під час еліптичних коливань у безвідривних режимах переміщення. Показано, що зі зменшенням відношення коефіцієнта тертя ковзання до коефіцієнта тертя спокою величина коефіцієнта швидкості за оптимальних параметрів горизонтального транспортування зменшується. Зі збільшенням кута нахилу транспортної площини це зменшення стає менш істотним і за граничних кутів підйому фактично зникає. Величина оптимального кута зсуву фаз між компонентами еліптичних коливань зі зменшенням співвідношення динамічного і статичного коефіцієнтів тертя зменшується.

Ключові слова: вібраційне транспортування, еліптичні коливання, коефіцієнт тертя.

THE INFLUENCE OF THE RATIO BETWEEN KINETIC AND STATIC FRICTIONAL COEFFICIENTS ON THE CONVEYING VELOCITY WITH ELLIPTICAL OSCILLATIONS

The influence of the ratio between kinetic and static frictional coefficients on the dimensionless velocity coefficient is considered for non-jumping vibratory conveying modes with elliptical oscillations. It is shown that with decreasing of this ratio the value of velocity coefficient decreases. This decreasing is less essential with the track inclination angle increasing and it almost disappears with the extreme inclination angles. The decreasing of the ratio between kinetic and static frictional coefficients reduces the optimal phase difference angle between the longitudinal and normal components of elliptical oscillations.

Key words: vibratory conveying, elliptical oscillation, coefficient of friction.

Постановка проблеми. Вібраційне транспортування крихких деталей, а також штучних виробів великої ваги потребує застосування безвідривних режимів переміщення – режимів без підкидання деталей. У таких режимах висока швидкість транспортування можлива лише за незалежних двокомпонентних коливань робочого органа вібротранспортної машини у напрямку транспортування (поздовжні коливання) та напрямку, перпендикулярному до нього (нормальні коливання) із зсувом по фазі на певний кут ε , при цьому транспортний орган коливається по еліптичній траєкторії. Швидкість вібротранспортування V можна визначити за формулою [1]:

$$V = A_x \omega K_v,$$

де A_x – амплітуда поздовжніх коливань; ω – кругова частота коливань; K_v – безрозмірний коефіцієнт швидкості, який залежить від кількох безрозмірних параметрів, на величину яких впливає коефіцієнт тертя. Оскільки збільшення амплітуди і частоти коливань обмежене конструктивними параметрами вібротранспортної машини, велике значення має збільшення коефіцієнта швидкості, а дослідження його залежності від коефіцієнта тертя є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорія вібраційного переміщення матеріальної точки детально розглянута у монографії [2], виведено диференціальні рівняння, які його описують, розглянуто способи розв'язання, зокрема, спосіб поетапного інтегрування (припасовування), який дає можливість чисельними методами отримати розв'язок з будь-якою заданою точністю. Відповідність теорії вібропереміщення матеріальної точки вібротранспортуванню штучних виробів доведена експериментально [3]. Безвідривний режим вібротранспортування за еліптичних коливань розглянуто у [4], наближеним методом отримано максимально можливе значення коефіцієнта швидкості під час горизонтального транспортування – 0,67. Детально досліджена залежність коефіцієнта швидкості від параметрів еліптичних коливань у [5] та в подальших роботах, отримані графіки та формули для визначення коефіцієнта швидкості та оптимальних значень кута зсуву фаз між компонентами коливань. В усіх цих роботах, за винятком монографії [2], значення коефіцієнта тертя ковзання (динамічного) f і коефіцієнта тертя спокою (статичного) f_1 приймаються рівними. Але на практиці їхні значення відрізняються і для деяких матеріалів істотно, тому було б цікаво дослідити вплив цієї різниці на величину коефіцієнта швидкості та оптимальні значення кутів зсуву фаз.

Формулювання мети дослідження. Мета роботи – аналітично дослідити вплив співвідношення динамічного і статичного коефіцієнтів тертя на коефіцієнт швидкості вібраційного транспортування, який є відношенням швидкості до амплітуди і частоти коливань, у безвідривних режимах у межах математичної моделі переміщення матеріальної точки по віброуючій площині за еліптичних коливань несучої поверхні.

Виклад основного матеріалу. Під дією незалежних поздовжніх і нормальних коливань транспортна площина, що нахилена до горизонту на кут α , здійснює еліптичні коливання у площині X_1OY_1 у нерухомій системі координат (рис. 1) за законом

$$x_1 = A_x \sin wt, \quad y_1 = A_y \sin(wt - e),$$

де A_y – амплітуда нормальних коливань; t – час.

У системі координат XOY , жорстко поєднаній з транспортним органом, диференціальні рівняння руху деталі [2] будуть:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -m\ddot{x}_1 - mg \sin \alpha + F_T; \\ m\ddot{y} &= -m\ddot{y}_1 - mg \cos \alpha + N, \end{aligned} \quad (1)$$

де m – маса деталі; g – прискорення вільного падіння; F_T – сила тертя; N – нормальна реакція; причому $F_T = -fN \operatorname{sign} \dot{x}$ за $\dot{x} \neq 0$; $-f_1N < F_T < f_1N$ за $\dot{x} = 0$.

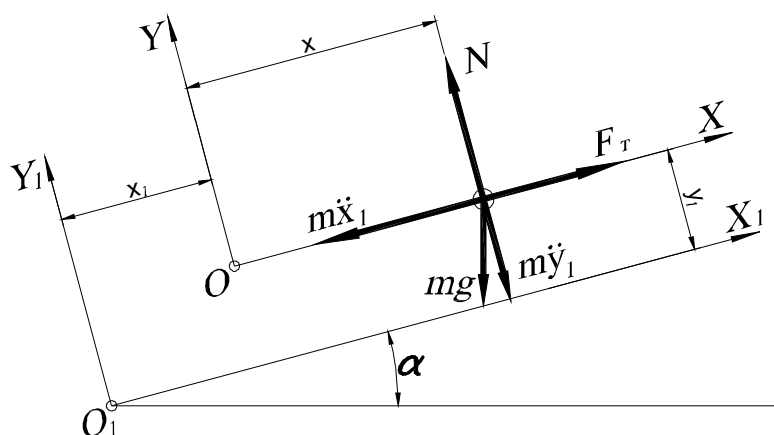


Рис. 1. Схема сил, що діють на деталь під час вібраційного транспортування

Використаємо безрозмірні параметри; K_α – параметр кута нахилу; K_β – параметр кута вібрації; w – параметр перевантаження; μ – відношення коефіцієнтів тертя ковзання і спокою:

$$K_\alpha = \frac{\tan \alpha}{f}, \quad K_\beta = \frac{A_x}{A_y f}, \quad w = \frac{A_y w^2}{g \cos \alpha}, \quad m = \frac{f}{f_1}. \quad (2)$$

Систему (1) у безвідривних режимах транспортування, увівши безрозмірний шлях $s = x / A_x$ і безрозмірний час $\tau = \omega t$, можна звести до такого рівняння [6]:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = \sqrt{1 + K_\beta^2} \pm K_\beta \cos e K_\beta^{-1} \sin(t \operatorname{arctg} \frac{\sin e}{\cos e \pm K_\beta}) m \frac{1 \pm K_\alpha}{K_\beta w}, \quad (3)$$

причому верхній і нижній знаки $+$ і $-$ відповідають етапам відносного ковзання уперед і назад, на етапах спокою у (3) замість K_α і K_β використовуються величини $K_\alpha \mu$ і $K_\beta \mu$.

Рівняння (3) розв'язується методом поетапного інтегрування з використанням числового розв'язку системи нелінійних рівнянь для знаходження фазових кутів – моментів переходу від одного етапу до іншого у межах періоду коливань. Блок-схему розв'язку наведено у [6], задавши на вході модернізованої блок-схеми параметри K_α , K_β , w , μ і змінюючи кут зсуву фаз ε від 0° до 90° , на виході отримаємо значення коефіцієнта швидкості K_v і оптимального кута $\varepsilon = \varepsilon_0$, за якого K_v максимальний. Максимум швидкості забезпечує величина параметра $w=1$, K_α залежить від заданого кута нахилу α . Отже, можна побудувати графіки залежності K_v і ε_0 від параметрів K_β і μ , тобто отримати для різних співвідношень коефіцієнтів тертя оптимальні за швидкістю співвідношення амплітуд складових коливань і кута зсуву фаз між ними та значення коефіцієнта швидкості. Розрахунки виконувались за допомогою комп'ютерної системи MathCAD з використанням модернізованої програми, розробленої у [7].

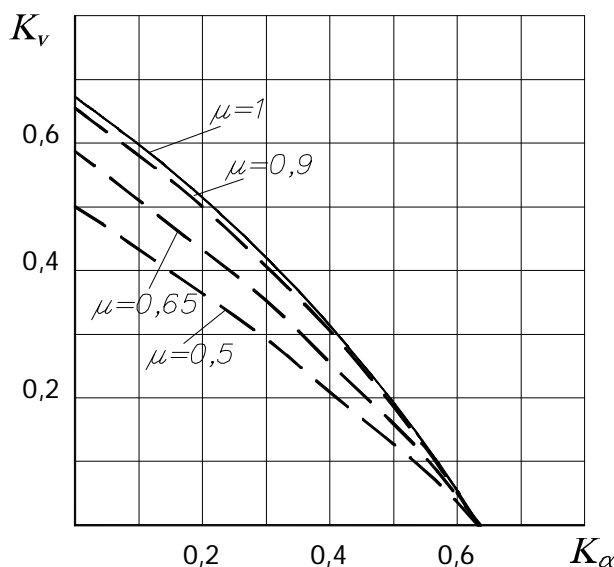


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта швидкості K_v від параметра кута нахилу K_α за різних співвідношень динамічного і статичного коефіцієнтів тертя μ та оптимальних значень параметра кута вібрації K_{β_0} і кута зсуву фаз ε_0

Як відомо, коефіцієнт тертя ковзання рідко буває більшим від одиниці і завжди не є більший від коефіцієнта тертя спокою $f \leq f_1$ [8]. Для більшості матеріалів у виробничих умовах відношення коефіцієнтів тертя $\mu = 0,85 \dots 0,95$. Лише для деяких матеріалів у певних умовах коефіцієнт може бути значно меншим. Комп'ютерна MathCAD-програма розраховувала величину коефіцієнта швидкості за зміни кута зсуву фаз ε від 0° до 90° , зміни параметра кута нахилу K_α від 0 до 0,7 та різних значень параметрів K_β і μ . Крім того, визначалися значення K_β і ε , за яких для заданих K_α і μ

величина коефіцієнта швидкості максимальна – оптимальні значення $K_{\beta 0}$ і ε_0 . Отже, для заданих значень кута підйому α і коефіцієнтів тертя можна визначити співвідношення амплітуд коливань і кут зсуву фаз між ними, які забезпечать максимальну швидкість.

Результати аналітичних досліджень виявили, що на відміну від безвідривного горизонтального вібропереміщення ($K_\alpha = 0$) за $\mu = 1$, коли за великих значень параметра кута вібрації $K_\beta > 20 \dots 30$ величина коефіцієнта швидкості зі збільшенням K_β не змінюється і дорівнює $K_v = 0,673$, залежність K_v від K_β за $\mu < 1$ має максимум у межах $10 < K_\beta < 20$, причому зі збільшенням K_β величина K_v зменшується неістотно. На рис. 2 показана залежність коефіцієнта швидкості K_v від параметра K_α за різних значень K_β : суцільними лініями – за $\mu = 1$, штриховими – за $0,5 \leq \mu < 1$. Як бачимо з рис. 2, за зменшення μ під час горизонтального транспортування ($K_\alpha = 0$) величина коефіцієнта швидкості зменшується, причому за збільшення кута нахилу до горизонту це зменшення стає менш істотним і за граничних кутів нахилу ($K_\alpha = 2/\pi$) зникає. За співвідношення $\mu = 0,85 \dots 0,95$, яке найчастіше зустрічається на практиці, і $K_\beta > 10$ залежність коефіцієнта швидкості від параметрів K_α і K_β достатньо точно описується наближеною формулою, виведеною у [9]:

$$K_v = \left(1 - \frac{1}{K_\beta^2}\right) \sin(\sqrt{3 - p \cdot K_\alpha} - 1).$$

Залежність оптимального кута зсуву фаз ε_0 від параметра кута нахилу K_α за різних співвідношень коефіцієнтів тертя μ та параметра кута вібрації K_β показано на рис. 3: суцільними лініями за $\mu = 1$; штриховими – за $\mu = 0,9$; штрих-пунктирними – за $\mu = 0,65$.

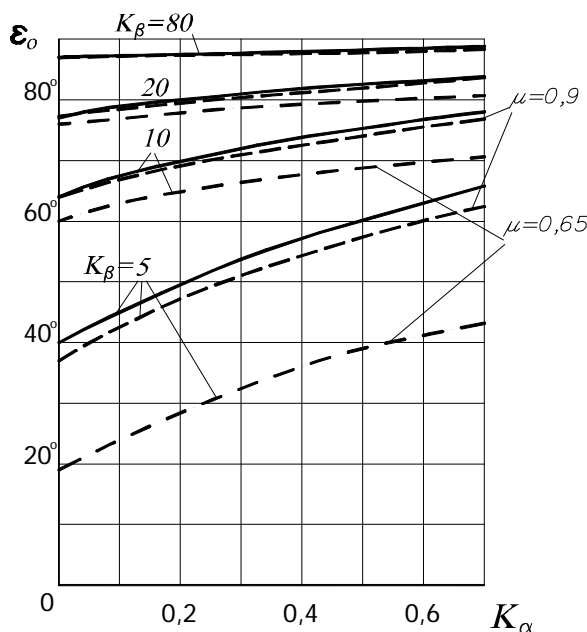


Рис. 3. Графік залежності оптимального кута зсуву фаз ε_0 від параметра кута нахилу K_α за різних співвідношень коефіцієнтів тертя μ і значень параметра кута вібрації K_β .

Як бачимо з рис. 3, за зменшення μ величина оптимального кута зсуву фаз ε_0 зменшується і це зменшення стає істотнішим за зменшення параметра кута вібрації K_β . Для найпоширеніших на практиці значень $\mu = 0,85 \dots 0,95$ і $K_\beta > 10$ вплив співвідношення μ на величину оптимального кута зсуву фаз неістотний, у таких випадках цей кут можна визначити за наближеною формулою, наведеною у [10]:

$$\varepsilon_0 = 90 - \frac{50 A_y}{A_x} (5f - 4 \tan \alpha).$$

Висновки. Досліджено залежність безрозмірного коефіцієнта швидкості – відношення швидкості вібротранспортування до амплітуди і частоти коливань від параметрів кута нахилу та кута вібрації за еліптичних коливань у безвідривних режимах вібротранспортування за різних співвідношень коефіцієнта тертя ковзання до коефіцієнта тертя спокою μ . Показано, що зі зменшенням співвідношення коефіцієнтів тертя величина коефіцієнта швидкості за оптимальних параметрів горизонтального транспортування зменшується. Зі збільшенням кута нахилу транспортної площини це зменшення стає менш істотним і за граничних кутів підйому фактично зникає. Оптимальний кут зсуву фаз між компонентами коливань зі зменшенням співвідношення динамічного і статичного коефіцієнтів тертя зменшується, але за збільшення параметра кута вібрації, тобто збільшення відношення амплітуд позовжніх і нормальних коливань, це зменшення стає неістотним.

1. *Вибрации у технике: Справочник. – Т. 4: Вибрационные процессы и машины. – М.: Машиностроение, 1981.* 2. *Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. – М.: Наука, 1964.* 3. *Redford A. H., Boothroyd G. Vibratory feeding / Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1968. – Vol. 182, No. 6. – P. 135–152.* 4. *Дунаевецкий А. В. Оптимальный синтез параметров безотрывного вибротранспортирования // Технология судостроения и судоремонта. – Калининград: Изд-во судостроительного института, 1968. – С. 50–56.* 5. *Врублевский И. И. Разработка и исследование вибрационных устройств, осуществляющих организацию рабочей среды роботосистем: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Каунас: Каунасский политехнический институт, 1986.* 6. *Повидайло В. А., Врублевский И. И. Сравнительный анализ режимов вибротранспортирования штучных изделий при прямолинейных и эллиптических колебаниях // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. – Львов: Вища шк., 1983. – Вып. 22. – С. 109–115.* 7. *Врублевський І. Й. Визначення швидкості вібраційного транспортування при еліптичних коливаннях за допомогою комп'ютерного редактора MathCAD // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні". – Львів: НУ "ЛПТ", 2003. – № 480. – С. 21–23.* 8. *Friction and Friction Coefficients // Engineering ToolBox – www.EngineeringToolBox.com. – Retrieved, 2008.* 9. *Врублевський І. Й. Наближені обчислення швидкості вібротранспортування та кута зсуву фаз при еліптичних коливаннях // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні". – 2010. – № 679. – С. 45–48.* 10. *Vrublevskiy I. The Phase Difference between Components of Elliptical Oscillations of Vibratory Conveyor Providing Maximum Conveying Velocity // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2015. – Vol. 1, No. 1. – P. 47–54.*