программа образования, 1997. – 336 с. 3 Батуев Г.А. и др. Инженерные методы исследования ударных процессов. – М.: Машиностроение, 1969. – 324 с. 4. Битюрин А.А., Манжосов В.К. Моделирование продольного удара однородным стержнем при неудерживающих связях // Вестн. УлГТУ. – Ульяновск, 2005. – № 3. – С. 67–71. 5. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с. 6. Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 293 с. 7. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 232 с. 8. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник: В 2 кн. / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1978. 9. Савельев Ю.Ф. Метод эффективной виброзащиты подвижного состава и экипажа на основе дополнительных механических устройств со знакопеременной упругостью: Монография. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 107 с.

УДК 621.867.52

І.Й. Врублевський
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра нарисної геометрії і графіки

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПОЛІГАРМОНІЧНИХ НОРМАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ПІД ЧАС БЕЗВІДРИВНОГО ВІБРОТРАНСПОРТУВАННЯ

© Врублевський І.Й., 2008

Розглянуто процес вібраційного транспортування з полігармонічними нормальними коливаннями та гармонічними поздовжніми. Показано, що під час збільшення кількості гармонік швидкість транспортування та граничний кут підйому збільшуються, але приріст цього збільшення з кожною наступною гармонікою зменшується.

Vibratory conveying with harmonic longitudinal and polyharmonic normal oscillations is considered. It is shown that the increasing of the harmonics' number increases the conveying velocity and inclined track angle. But the augment of this increasing decreases with each next harmonic.

Постановка проблеми. Використання полігармонічних нормальних коливань дає істотне підвищення швидкості вібраційного транспортування у безвідривних режимах порівняно з гармонічними коливаннями. Але це підвищення, яке зростає зі збільшенням кількості гармонік, можливе за оптимальних співвідношень амплітуд гармонік та кутів зсуву фаз між ними.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженню вібраційного транспортування з полігармонічними (зокрема, бігармонічними) коливаннями, незалежними у напрямку x вздовж транспортної площини і по нормалі y до неї, присвячено роботи [1–3], в яких процес розглядається як безвідривне переміщення матеріальної точки. Знайдено оптимальні за швидкістю значення параметрів коливань, зокрема, амплітуд та кутів зсуву фаз, розроблено методику розрахунку швидкості транспортування. Але параметри полігармонічних коливань за кількості гармонік $n > 3$ не досліджено.

Формулювання мети дослідження. Мета дослідження полягає у визначенні оптимальних співвідношень параметрів нормальних полігармонічних коливань та швидкості вібротранспортування за різних кількостей гармонік та величин кутів підйому.

Виклад основного матеріалу. Найоптимальнішим за швидкістю законом коливань транспортної площини є закон з кусково-постійним прискоренням на певних етапах періоду коливань [4].

Оптимальний закон нормальної складової коливань з кусково-постійним прискоренням можна описати рівняннями

$$\frac{d^2y}{d(\omega t)^2} = -1(0 < \omega t < \tau_{\max} - m, \tau_{\max} + m < \omega t < 2\pi),$$

$$\frac{d^2y}{d(\omega t)^2} = n(\tau_{\max} - m < \omega t < \tau_{\max} + m), \quad (1)$$

де $m = \frac{\pi}{2(n+1)}$, $\tau_{\max} = \frac{3\pi}{2}$.

Під час застосування найпоширеніших електромагнітних віброзбуджувачів такий закон коливань реалізувати доволі важко. Доцільніше використовувати полігармонічні коливання, а за достатньо великої кількості гармонік закон з кусково-постійним прискоренням можна апроксимувати полігармонічним за допомогою рядів Фур'є. На рис. 1 показано закон з кусково-постійним прискоренням та його апроксимацію полігармонічним при *n=7.*

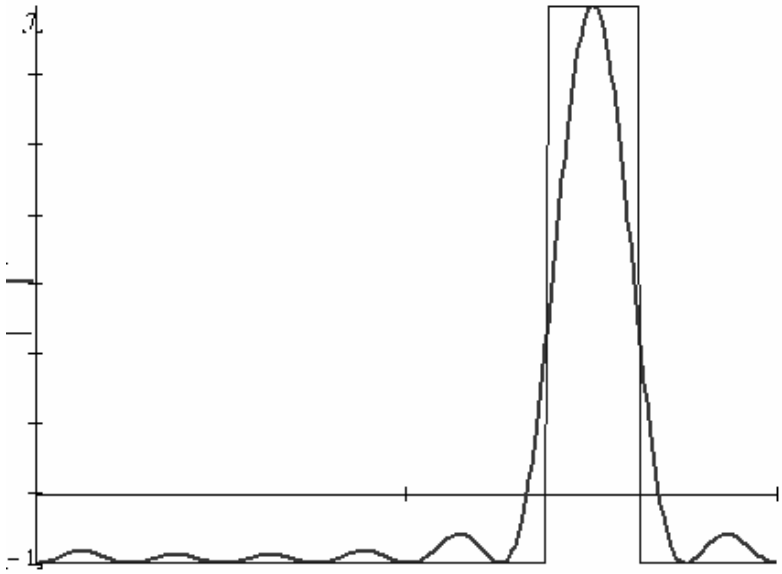

Рис. 1. Оптимальний закон нормальних коливань з кусково-постійним прискоренням та його апроксимація відповідними полігармонічними коливаннями

Як показали дослідження [3], полігармонічні коливання дають перевагу над гармонічними тільки за достатньо великих кутів α нахилу несучої площини до горизонту. Для швидкісного вібротранспортування потрібні великі амплітуди поздовжніх коливань, а їх власна частота пружної системи повинна забезпечити білярезонансний режим, за якого реалізувати полігармонічні коливання складно. Натомість амплітуди нормальних коливань обмежені вимогою безвідривності переміщення, реалізувати полігармонічні коливання вдалині від резонансу на малих амплітудах значно легше. Відтак оптимальний по фазі закон зміни поздовжньої x та нормальної y складових незалежних полігармонічних коливань [3]

$$x = B \cdot \sin(\omega t + \varepsilon_0)$$

$$y = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot \sin(i\omega t + \frac{\pi}{2}(i-1)), \quad (2)$$

де B – амплітуда поздовжніх коливань, A_i – амплітуда i-ї гармоніки нормальних коливань, i – номер гармоніки, ω – кругова частота коливань, ε_0 – оптимальний кут зсуву фаз, t – час.

Ефективність процесу вібраційного транспортування визначається безрозмірним коефіцієнтом швидкості, значення якого визначає середню швидкість v за одиничних значень поздовжньої амплітуди і кругової частоти:

$$K_v = \frac{v}{B \cdot \omega}. \tag{3}$$

У разі швидкісного вібротранспортування, коли $B >> A_i$, реалізується режим з двома етапами ковзання вперед і назад протягом періоду коливань, і коефіцієнт швидкості можна визначити за формулою [1]

$$K_v = \cos(\pi - \psi) \cdot \cos\varepsilon_0, \tag{4}$$

де $\psi = \frac{\omega(t_к - t_n)}{2}$, t_n і $t_к$ – відповідно моменти початку та кінця етапу ковзання вперед.

Значення ψ задовольняють рівняння [3]

$$1 - K_\alpha - \frac{2}{\pi}(\psi + \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i}{i}(-1)^i \sin i\psi) = 0, \tag{5}$$

де $K_\alpha = \frac{\tan\alpha}{f}$ – коефіцієнт кута нахилу, f – коефіцієнт тертя, $w_i = \frac{i^2 A_i \omega^2}{g\cos\alpha}$ – коефіцієнти перевантажень гармонік – їх безрозмірні амплітуди прискорень, g – прискорення вільного падіння. Крім того, при $B >> A_i$ $\varepsilon_o \to \frac{\pi}{2}$, тому рівняння (4) можна записати так:

$$K_v = -\cos\psi \ , \tag{6}$$

причому $\pi/2 < \psi < \pi$. Отже, за оптимальних співвідношень амплітуд гармонік і кутів зсуву фаз між ними коефіцієнт швидкості залежить тільки від коефіцієнта кута підйому.

Для забезпечення безвідривності транспортування за найбільшої сумарної амплітуди нормальних коливань необхідне виконання умов [2]:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i \sin(i\omega t_m + \frac{\pi}{2}(i-1)) = 1 \ ,$$

$$\sum_{i=1}^{n} i w_i \cos(i\omega t_m + \frac{\pi}{2}(i-1)) = 0 \ , \tag{7}$$

де t_m – момент мінімального значення амплітуди нормального прискорення.

Максимуму значення швидкості K_v відповідає згідно з (6) максимальне значення ψ. Щоби визначити, за яких співвідношень амплітуд воно досягається, визначимо частинні похідні рівнянь (5), (7) по w_i, складемо за допомогою метода Лагранжа систему $n+2$ рівнянь, невідомими якої будуть w_i, t_m та невизначений множник Лагранжа. Розв'язавши цю систему рівнянь за заданого K_α, визначимо значення w_i, і підставивши їх у (5), знайдемо ψ, а потім – K_v з рівняння (6).

Необхідні розрахунки виконано за допомогою комп'ютерної математичної системи MathCAD. У таблиці наведені значення коефіцієнта швидкості K_v та w_i при $\alpha=0$ і різних кількостях гармонік нормальних коливань, а також граничне значення $K_{\alpha\,гр}$ (таке значення K_α, за якого $K_v=0$).

Величини коефіцієнтів швидкості за різних кількостей гармонік

n	K_v	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	$K_{\alpha\,гр}$
1	0,67	1	-	-	-	-	-	-	0,63
2	0,84	1,35	0,64	-	-	-	-	-	0,9
3	0,91	1,53	0,99	0,47	-	-	-	-	0,97
4	0,94	1,61	1,20	0,79	0,4	-	-	-	0,98
5	0,96	1,66	1,33	1	0,66	0,33	-	-	0,98
6	0,97	1,71	1,43	1,14	0,85	0,57	0,28	-	0,99
7	0,98	1,75	1,5	1,25	1	0,75	0,5	0,25	0,99

На рис. 2 показана залежність коефіцієнта швидкості K_v від коефіцієнта кута нахилу K_α за різної кількості гармонік нормальних коливань.

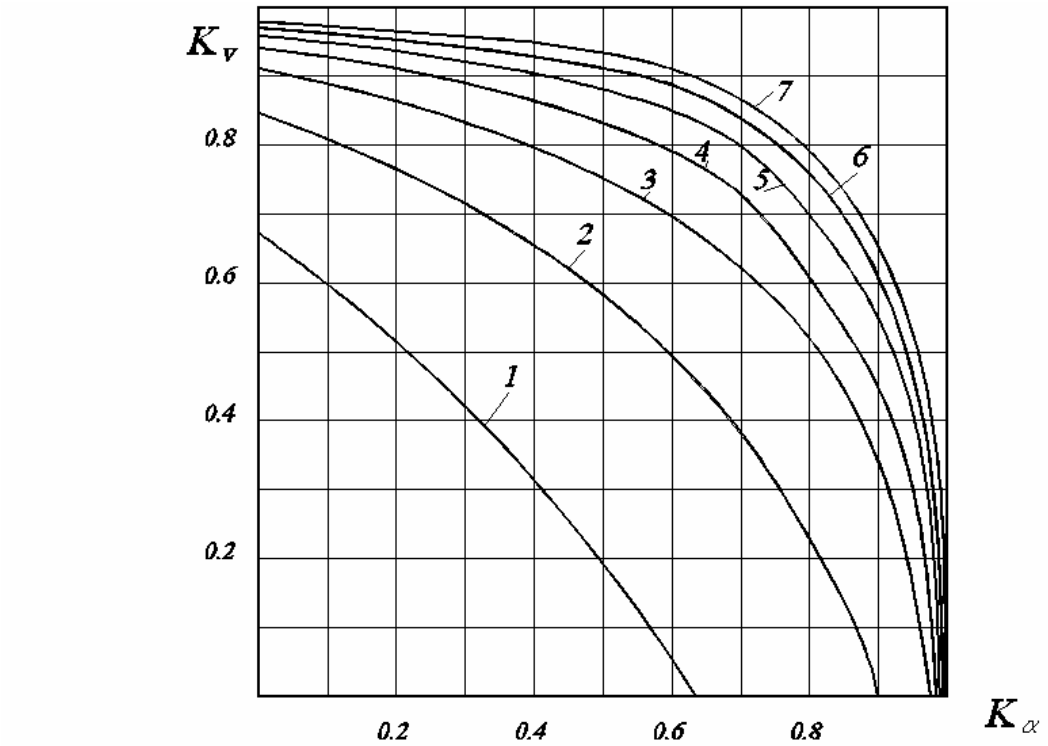

Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта швидкості K_v від коефіцієнта кута нахилу K_α за різної кількості n гармонік полігармонічних нормальних коливань

Висновки. Наведений графік і табличні значення показують, що зі збільшенням кількості гармонік полігармонічних нормальних коливань збільшується швидкість вібраційного транспортування та граничний кут підйому, але приріст цього збільшення з кожною наступною гармонікою зменшується.

1. Дунаевецкий А.В. Синтез независимых бигармонических колебаний для безотрывного вибротранспортирования // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. – Львов: Вища шк., 1973. – Вып. 12. – С. 96–99. 2. Ефимов В.Г. Определение оптимальных параметров полигармонического поперечного закона движения лотка // Вопросы динамики и прочности – Рига: Зинатне, 1977. – Вып. 34. – С. 28–38. 3. Врублевский И.И. Оптимальные параметры полигармонических нормальных колебаний при двухкомпонентном вибротранспортировании // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – № 5. – С. 157–160. 4. Лавендел Э.Э. Синтез оптимальных вибромашин – Рига: Зинатне, 1970.