

УДК 621.9.048.6

М.П. Ярошевич, І.П. Забронець, А.В. Силивонюк  
Луцький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ З ДЕБАЛАНСНИМИ ЗБУДНИКАМИ, ЩО САМОСИНХРОНІЗУЮТЬСЯ

© Ярошевич М.П., Забронець І.П., Силивонюк А.В., 2013

*Наведено результати числового моделювання процесів пуску вібромашини з двома дебалансними збудниками для випадків одночасного та почергового пуску їх електродвигунів. Показано, що важливими перевагами машин зі збудниками, що самосинхронізуються, є можливість зменшення резонансних амплітуд, динамічного навантаження та потужності приводу за допомогою використання почергового пуску двигунів.*

*The findings of numerical modeling of the vibratory machine start with two unbalanced agents in the case of their synchronous and regular start are included in the article. It is shown that main advantages of the machines with self-synchronizing agents are the ability to reduce resonant amplitudes, dynamic amount of work to be done and gear capacity by using regular start of engines.*

**Постановка проблеми.** Вібраційні машини з інерційними збудниками, що самосинхронізуються, серійно випускаються й успішно працюють на найрізноманітніших виробництвах. Основними перевагами використання явища самосинхронізації у приводі вібромашин є: усунення високонавантажених кінематичних зв'язків між збудниками; розосередження збурювальної сили по несучому тілі (для забезпечення більшої його жорсткості); зменшене навантаження на підшипники роторів збудників; можливість прикладання збюрювальної сили строго у центрі інерції системи та компонування машини з окремих модулів (віброблоків). Зазначимо, що привід з використанням кінематичних передач не можна використовувати у разі значної відстані між роторами збудників. Передбачається, що додатковими перевагами вібромашин зі збудниками, що самосинхронізуються, є можливість зменшення резонансних коливань несучого тіла, динамічного навантаження на елементи конструкції машини та потужності електроприводу.

**Аналіз відомих досліджень та публікацій.** Теоретичні положення пуску вібраційних машин з інерційним збудником коливань розглядалися різними методами у багатьох працях, огляд яких можна знайти в [1, 2]. У [3, 4] для дослідження процесу розбігу вібромашин з дебалансним приводом використано числове моделювання. Проте у цих та інших працях з проблем пуску розглядалися лише машини з одним збудником коливань. У роботі [5] методом прямого розділення рухів продемонстровано теоретичну можливість покращення динамічних та енергетичних характеристик вібраційних машин з дебалансними збудниками за допомогою почергового пуску їх електродвигунів.

**Метою роботи** є порівняльний аналіз перебігу процесів розбігу вібраційної машини з двома дебалансними збудниками за одночасного та почергового пуску їх електродвигунів.

**Схема системи та рівняння руху.** Два дебалансних віброзбудники, симетрично розміщені на м'якоамортизованому несучому твердому тілі (вібруючому робочому органі), яке може рухатися паралельно до площини, перпендикулярної до осей обертання збудників коливань (рис. 1). Центр

ваги  $O$  несучого тіла лежить у площині, що проходить через зазначені осі, і віддалений від них на однакові відстані  $r$ . З нерухомою основою несуче тіло пов'язане системою пружних і демпфувальних елементів. Ротори збудників обертаються незалежними асинхронними електродвигунами.

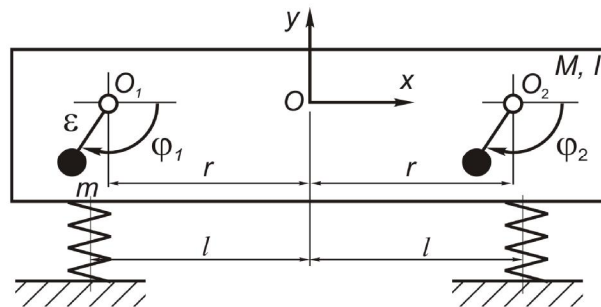


Рис. 1. Схема коливної системи

Нехай  $x$  і  $y$  – координати центра ваги  $O$  в нерухомій системі координат  $xOy$ , а  $j, j_1, j_2$  – відповідно, кути повороту несучого тіла та роторів віброзбудників. Диференціальні рівняння руху коливної системи запишемо у такому вигляді (див., наприклад, [1])

$$\begin{aligned}
 I_i \ddot{j}_i &= L_i(t) - R_i(j_i) + m_i e_i (\ddot{\phi}_i \sin j_i + \dot{\phi}_i^2 \cos j_i - \ddot{\phi}_i \cos j_i + g \cos j_i), \\
 M \ddot{x} + b_x \dot{x} + c_x x &= \sum_{i=1}^2 m_i e_i (\dot{\phi}_i^2 \sin j_i + j_i^2 \cos j_i), \quad M \ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y = \sum_{i=1}^2 m_i e_i (j_i^2 \cos j_i - \dot{\phi}_i^2 \sin j_i), \\
 J \ddot{j} + b_j \dot{j} + c_j j &= \sum_{i=1}^2 m_i e_i r_i (\dot{\phi}_i^2 \cos j_i + j_i^2 \sin j_i), \quad i=1, 2
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $M, J$  – загальна маса несучого тіла та його момент інерції щодо осі, яка проходить через центр ваги;  $I_i$  – момент інерції  $i$ -го ротора збудника відносно осі обертання;  $m_i, e_i$  – відповідно, маса  $i$ -го ротора збудника та його ексцентриситет;  $b_x, b_y, b_j$  – коефіцієнти в'язкого опору пружин;  $c_x, c_y$  – жорсткості пружин на зсув і розтяг-стиск, відповідно;  $c_j = c_y l_i^2$ ;  $r_i$  – відстань від осі  $i$ -го ротора збудника до центра ваги несучого тіла, де  $r_1 = -r, r_2 = r$ ;  $l_i$  – відстань, що визначає положення осей пружин стосовно центра ваги несучого тіла;  $L_i(t), R_i(j_i)$  – обертальний момент на валу  $i$ -го електродвигуна та момент сил опору обертанню;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Для аналізу впливу електромагнітних перехідних процесів у електродвигуні на динаміку руху роторів збудників застосовано так звану  $A$ -модель асинхронного двигуна у косокутних координатах струмів [6]

$$\begin{aligned}
 \frac{di_S}{dt} &= A_S(u_m - R_S i_S) + A_{SR}(\Omega_R \Psi_R - R_R i_R), \\
 \frac{di_R}{dt} &= A_{RS}(u_m - R_S i_S) + A_R(\Omega_R \Psi_R - R_R i_R),
 \end{aligned} \tag{2}$$

де  $i_S, i_R$  – матриці-колонки фазних струмів обмотки статора й ротора;  $u_m$  – матриці-колонки фазних напруг електричної мережі;  $A_S, A_{SR}, A_{RS}, A_R$  – матриці зв'язків;  $\Omega_R$  – матриця частот обертання;  $\Psi_R$  – матриці-колонки потокозчеплень;  $R_S, R_R$  – матриці опорів.

Обертальний момент  $i$ -го двигуна має вигляд  $L_i(t) = \sqrt{3} \frac{p_0}{a_m} (i_{RA} i_{SB} - i_{RB} i_{SA})$ , де  $i_{RA}, i_{SB}, i_{RB}, i_{SA}$  – проекції струмів статора та ротора на координатні осі;  $p_0$  – кількість пар магнітних полюсів;  $a_m$  – обернена основна індуктивність двигуна. Момент сил опору обертанню  $i$ -го ротора збудника обчислюється за формулою  $R_i = 0,5 f^* m_i e_i j_i^2 d$ , де  $f^*$  – зведений коефіцієнт тертя в підшипнику;  $d$  – діаметр його внутрішнього кільця. Зазначимо, що, порівняно з цим моментом, втрати від тертя в підшипниках електродвигуна є незначними внаслідок зрівноваженості його ротора.

Моделювання процесу розбігу вібростанини зводиться до числового інтегрування диференціальних рівнянь руху електромеханічної системи (1), (2) за допомогою програмного продукту Maple за таких значень параметрів:  $r_i = 0,185 \text{ м}$ ,  $f^* = 0,003$ ,  $l = 0,215 \text{ м}$ ,  $d = 0,02 \text{ м}$ ,  $c_x = c_y = 48000 \text{ Н/м}$ ,  $c_f = 2220 \text{ Нм}$ ,  $b_x = b_y = 150 \text{ кг/с}$ ,  $b_j = 15 \text{ кг м}^2/\text{с}$ ,  $M = 52,4 \text{ кг}$ ,  $J = 2,4 \text{ кг м}^2$ ,  $m_1 = 7,37 \text{ кг}$ ,  $e_1 = 0,014 \text{ м}$ ,  $I_1 = 0,0062 \text{ кг м}^2$ ,  $m_2 = 7,375 \text{ кг}$ ,  $e_2 = 0,0145 \text{ м}$ ,  $I_2 = 0,00625 \text{ кг м}^2$ ; передбачено, що у вібраційній машині використано трифазні асинхронні електродвигуни серії 4А з короткозамкненим ротором, потужністю 0,12 кВт та частотою обертання 1500 об/хв. При цьому власні частоти коливної системи (несучого тіла на пружинах) становлять:  $p_x = p_y = 30,26 \text{ с}^{-1}$ ;  $p_j = 30,4 \text{ с}^{-1}$ . Зазначимо, що у початковому положенні дебаланси займають максимально нижнє вертикальне положення, яке відповідає кутам  $j_{01} = j_{02} = 90^\circ$ .

Згідно з рис. 2, а та рис. 3, 4, у випадку одночасного пуску двох електродвигунів у протилежних напрямках прямолінійні коливання несучого тіла вздовж осі  $Oy$  спостерігаються вже з моменту пуску вібраційної машини; горизонтальні та поворотні коливання є неістотними. У разі пуску лише одного двигуна відбувається плоскопаралельний рух несучого тіла зі складною траєкторією руху його центра мас (рис. 2, б).

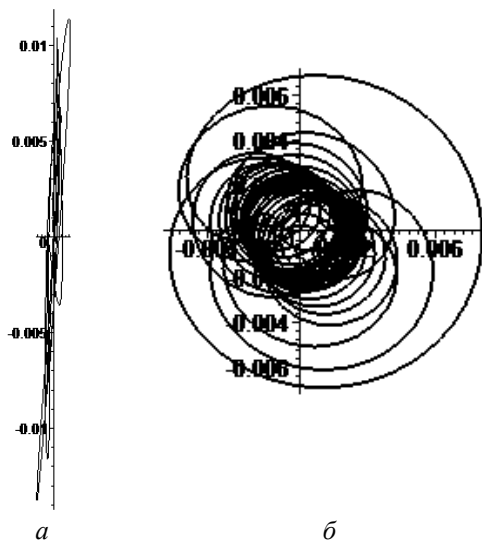


Рис. 2. Траєкторія руху центра мас несучого тіла: а – одночасний пуск двигунів; б – пуск одного двигуна

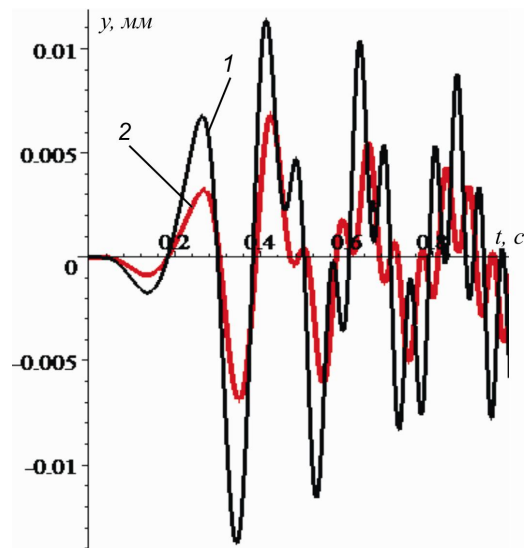


Рис. 3. Часові залежності вертикального зміщення несучого тіла: 1 – одночасний пуск двигунів; 2 – пуск одного двигуна

Важливо, що амплітуди вертикальних резонансних коливань під час почергового пуску двигунів досягають значно менших величин, ніж за одночасному пуску; максимальне значення, якого вони набувають, у розглядуваному випадку становить  $A_y^{pe3} = 7 \text{ мм}$  (рис. 2, б, рис. 3), тоді як у разі одночасного пуску максимальні амплітуди майже удвічі більші й становлять –  $A_y^{pe3} = 13,8 \text{ мм}$  (за амплітуди усталених коливань  $A_y^{ycm} = 4 \text{ мм}$ ). Звичайно, під час розбігу одного ротора збудника з'являються горизонтальні та поворотні коливання несучого тіла, яких практично немає у разі одночасного пуску двигунів (рис. 4). Проте резонансні амплітуди цих коливань істотно менші – приблизно у два рази, порівняно з резонансними амплітудами вертикальних коливань:  $A_x^{pe3} = 8 \text{ мм}$ ,  $A_j^{pe3} = 0,024 \text{ рад}$ .

Зауважимо, що тривалість перехідного процесу під час розбігу вібростанини є незначною (1,5 – 2 с) та приблизно однаковою для обох досліджуваних варіантів пуску електродвигунів.

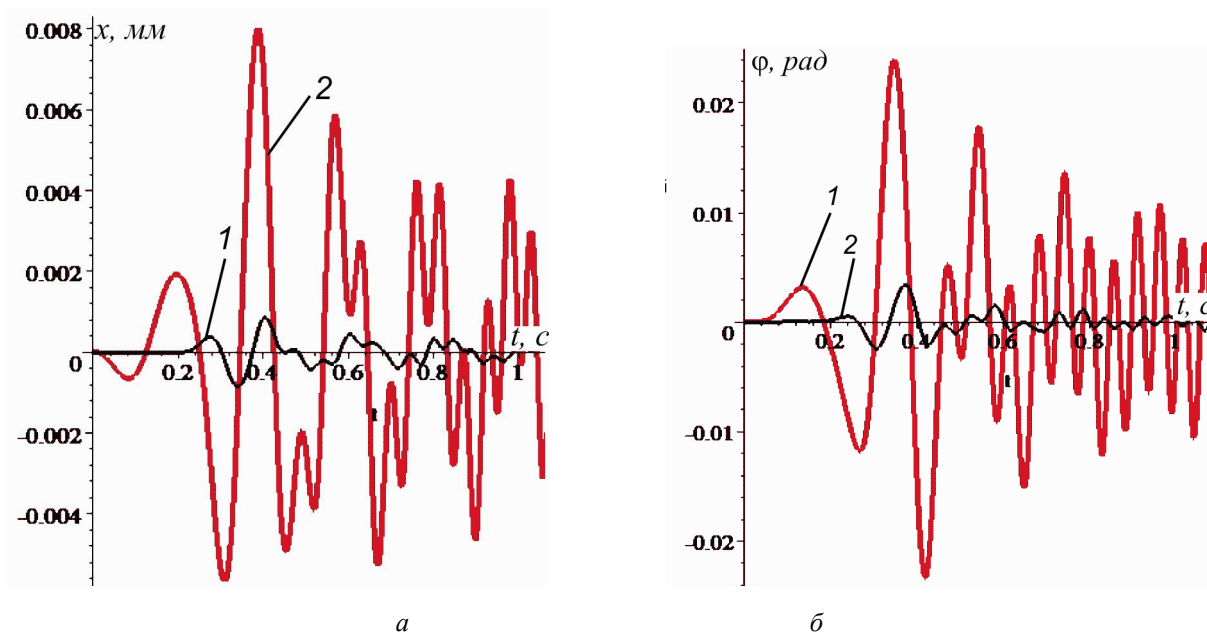


Рис. 4. Часові залежності узагальненої координати: а – горизонтального зміщення; б – поворотних коливань несучого тіла: 1 – одночасний пуск двигунів; 2 – пуск одного двигуна

Для розглядуваної динамічної схеми вібромашини з двома симетрично розташованими збудниками початковий зсув фаз між ними відповідає величині різниці фаз у можливному синхронному русі, якщо ротори обертаються у протилежних напрямках ( $j_1 - j_2 = 180^0$ ), що сприяє проходженню ними зони резонансних частот. Під час розбігу обох збудників величина зсуву їх фаз коливається близько значення  $3,16 \text{ рад}$  з “повільною” частотою  $q = 20,8 \text{ с}^{-1}$  (рис. 5). Зазначимо, що цю частоту можна обчислити за формулою, наведеною у [5], але вона не має збігатися з власними частотами системи; максимальне відхилення зсуву фаз становить  $0,19 \text{ рад}$ . Звернемо увагу, що зазначені “повільні” коливання величини зсуву фаз порівняно швидко згасають, натомість виникають “швидкі” коливання з подвійною частотою збуджуючої сили.

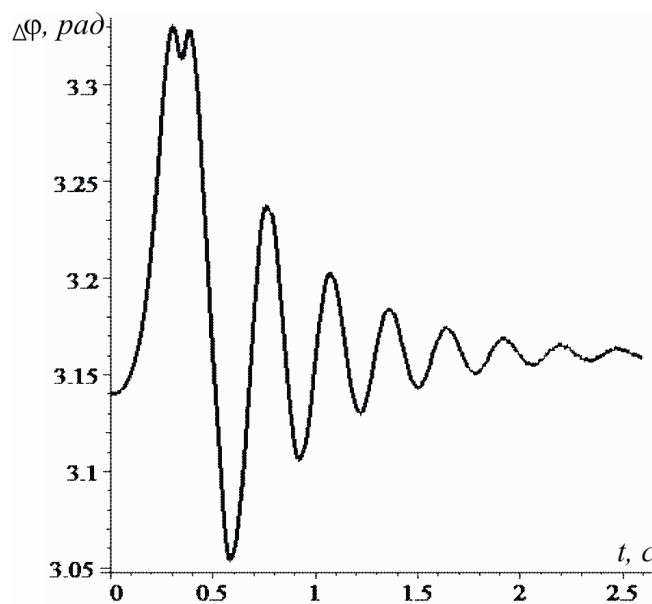


Рис. 5. Зсув фаз між роторами збудників у разі одночасного пуску двигунів

На рис. 6 продемонстровано зміну в часі вібраційних моментів, що діють на ротори збудників та електродвигунів під час розбігу вібраційної машини. Згідно з наведеними графічними залежностями (рис. 6, а), вібраційні моменти є змінними як за величиною, так і за напрямком; під час проходження зони резонансу ( $t = 0,1 - 0,3$  с) динамічне навантаження, яке вони чинять на ротори двигунів, стрімко зростає; при цьому в зоні резонансу середні значення цих моментів є істотно гальмівним. З порівняння кривих 1 та 2 випливає, що у випадку розбігу спочатку одного ротора збудника коливання вібраційного моменту є помітно меншими, порівняно з його коливаннями в разі одночасного розбігу двох збудників. Так, максимальні значення гальмівного вібраційного моменту в зоні резонансу для випадків одночасного і почергового пусків двигунів становлять, відповідно,  $1,61 \text{ Н м}$  і  $1,07 \text{ Н м}$ . Тобто у другому випадку діючий динамічний момент менший на третину; при цьому середні значення вібраційних моментів наближено однакові для обох випадків пуску двигунів.

На рис. 6, б продемонстровано, що встановлення демпфера поворотних коливань ( $b_j = 90 \text{ кг м}^2 / \text{с}$ ) призводить до помітного зменшення резонансних амплітуд таких коливань і, відповідно, величини гальмівних вібраційних моментів. При цьому максимальні амплітуди вертикальних та горизонтальних коливань залишаються практично такими самими.

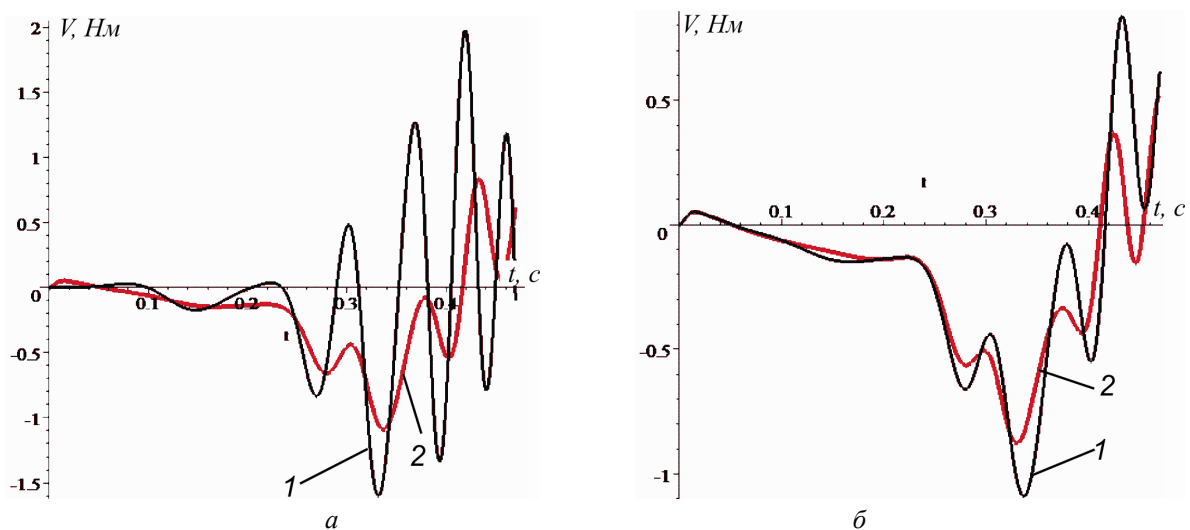


Рис. 6. Часові залежності вібраційних моментів: а – 1 – одночасний пуск двох двигунів; 2 – пуск лише одного двигуна; б – 1 –  $b_j = 15 \text{ кг м}^2 / \text{с}$ ; 2 –  $b_j = 90 \text{ кг м}^2 / \text{с}$

Згідно з рис. 7, а, б, до такого ж позитивного ефекту призводить зменшення відстаней від осей роторів збудників до центра мас несучого тіла (з  $r = 0,185$  м до  $r = 0,135$  м) та зниження частоти власних поворотних коливань з  $p_j = 30,2 \text{ с}^{-1}$  до  $p_j = 22,6 \text{ с}^{-1}$  (зменшено відстань між пружними опорами несучого тіла з  $l = 0,215$  м до  $l = 0,160$  м). І навпаки, за вищої частоти власних поворотних коливань несучого тіла та більшої відстані  $r$  позитивний ефект від почергового пуску двигунів дещо зменшився: тривалість розбігу ротора збудника помітно зросла; максимальна величина гальмівного вібраційного моменту в зоні резонансу також істотно збільшилася.

Треба зазначити, що у разі одночасного пуску обох двигунів зниження власної частоти поворотних коливань практично не змінює картину розбігу. Звичайно, для вібростанини з прямолінійними коливаннями несучого тіла величина власної частоти поворотних коливань не має принципового значення, на відміну від випадку його плоских коливань.

Зазначимо, що у разі завищеної потужності приводу вібростанини позитивний ефект від почергового пуску двигунів дещо зростає. При цьому в обох досліджуваних випадках зменшуються амплітуди резонансних коливань несучого тіла, тривалості перехідного процесу та величин гальмівних вібраційних моментів у зоні резонансу, що діють на ротори двигунів.

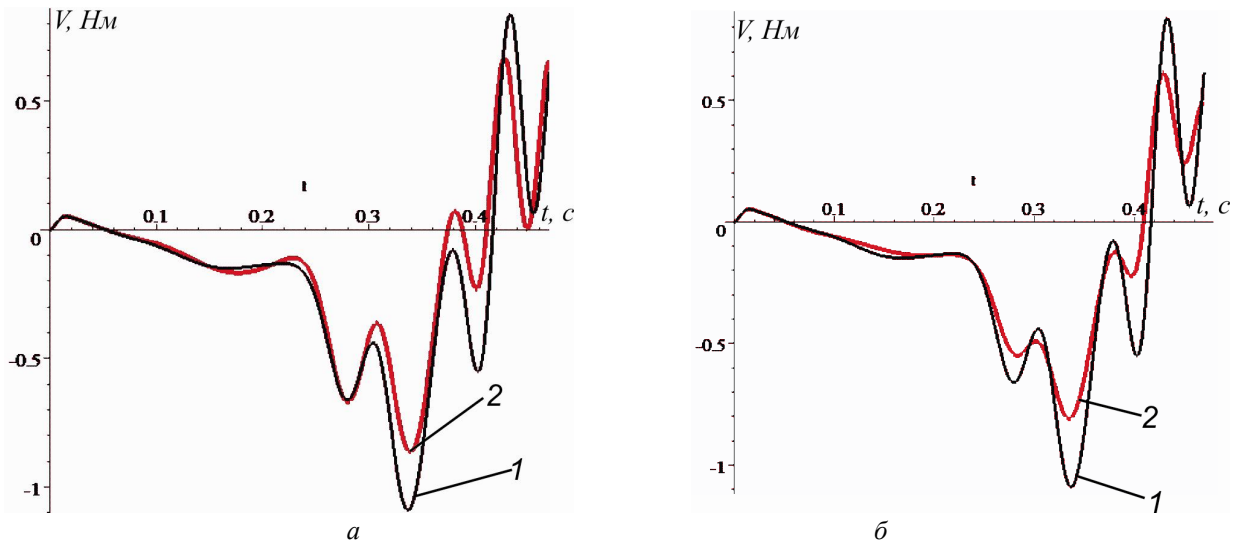


Рис. 7. Часові залежності вібраційних моментів у разі пуску лише одного двигуна:

а  $1 - p_x = p_y = p_j = 30,2 c^{-1}$ ;  $2 - p_x = p_y = 30,2 c^{-1}$ ;  $p_j = 22,6 c^{-1}$ ; б  $1 - r = 0.185 м$ ;  $2 - r = 0.135 м$

Звичайно, за почергового пуску електродвигунів вібромашин зі збудниками, що самосинхронізуються, істотно зменшується величина ударного пускового струму, який негативно впливає як на двигуни, так і на живильну електромережу.

**Висновки.** Числово продемонстровано, що додатковими перевагами вібраційних машин зі збудниками, що самосинхронізуються, у випадку почергового пуску електродвигунів є можливість зменшити амплітуди резонансних коливань несучого тіла та динамічного навантаження на ротори двигунів, що, своєю чергою, дає змогу зменшити потужність приводу.

Встановлено, що для розглядуваних вібромашин, у разі почергового пуску двигунів, амплітуди резонансних коливань центра мас несучого тіла знижуються у 1,5–2 рази, порівняно з одночасним пуском; максимальні величини гальмівного вібраційного моменту в зоні резонансу зменшуються на 25–35 %. Подальшого зниження амплітуди коливань та зменшення динамічного навантаження у зоні резонансних частот можна досягти введенням демфера поворотних коливань несучого тіла, зниженням власної частоти таких коливань, зменшенням відстаней від центра мас несучого тіла до осей роторів збудників, збільшенням моменту інерції несучого тіла.

1. Blekhman I.I. *Vibrational Mechanics* / I.I. Blekhman. Singapore et al.: World Scientific. – 2000. – 509 p. 2. Блехман И.И. Медленные движения в системах с инерционным возбуждением колебаний / И.И. Блехман, Д.А. Индейцев, А.Л. Фрадков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 1. – С. 25–32. – Библиогр.: С. 31–32. 3. Ярошевич Н.П. Компьютерное моделирование двойного пуска вибрационных машин с инерционным возбуждением колебаний / Н.П. Ярошевич // в кн.: Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика. – СПб.: Наука, 2009. – С. 170–192. 4. Ярошевич М.П. Динамика разбегу вибрационных машин с дебалансным приводом / М.П. Ярошевич, Т.С. Ярошевич. – Луцьк: ЛНТУ, 2010. – 220 с. 5. Блехман И.И. О некоторых возможностях совершенствования вибрационных машин с самосинхронизирующимися инерционными возбудителями / И.И. Блехман, Н.П. Ярошевич // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. – 2013. – № 3. – С. 25–32. 6. Чабан В. Й. Математичне моделювання електромеханічних процесів / В.Й. Чабан. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 1997. – 342 с.