

УДК 621.01

В.М. БОРОВЕЦЬ, В.С. ШЕНБОР, А.Л. БЕСПАЛОВ

Національний університет “Львівська політехніка”

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У РЕЗОНАНСНІЙ ВІБРАЦІЙНІЙ МАШИНИ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ

Ї Боровець В.М., Шенбор В.С., Беспалов А.Л., 2008

*Розглянуто та проаналізовано електромеханічні процеси в резонансній вібраційній машині з шестифазним електромагнітним вібробудником. Розглянуті приводи вібраційних машин дають змогу розширити технологічні можливості забезпеченням плавного регулювання амплітуди коливань та збільшити силу різання за рахунок протифазного руху елементів машини.*

*In this work electromechanics processes are considered and analysed in a resonance oscillation machine with a hexaphase electromagnetic vibroexciter. The occasions of oscillation machines are considered allow to extend technological possibilities by providing of the smooth adjusting of amplitude of vibrations and increase cutting force for an account against phase motion of elements of machine.*

**Постановка задачі.** У роботі розглянуто систему керування електромагнітним шестифазним вібробудником у вібраційних машинах. Запропоновані диференціальні рівняння руху якоря вібрмашини щодо корпусу, а також рівняння балансу напруги живлення, що дозволяють виконати необхідні розрахунки основних параметрів електромагнітного шестифазного вібробудника. Одним із важливих завдань, під час проектування цього типу машин, є підвищення їх енергоощадності з одночасним забезпеченням надійності роботи вібрмашини і зменшенням до мінімуму споживаної потужності машини.

**Аналіз останніх досліджень.** Ефективність роботи вібраційної машини залежить від багатьох факторів, основними з яких є режим обробки; маса оброблюваних деталей і абразивних тіл; характеристики технологічних параметрів обробки; тип приводу; система керування приводом машини.

Колівальним системам з електромагнітним приводом присвячено велику кількість наукових праць [1–7]. Викладена методика в її нульовому приближенні аналогічна методиці, викладеній у роботах [2–3, 6].

**Виклад основного матеріалу.** Обробку довгомірних плоских деталей доцільно виконувати у вібраційних машинах шляхом їх закріплення в пристроях. Ці машини складаються з прямокутного контейнера 9 (рис. 1), в якому знаходиться обробляюче середовище 8 та розташовані з обох боків піврами 3, що зв'язані з контейнером стрижневими пружинами 2, які встановлені по периферії, окрім верхньої частини машини. Контейнер вібраційної машини почергово, за допомогою пружин, з'єднується з лівою та правою піврамами. У верхній частині піврами з'єднані між собою пристроєм 4, до якого закріплена деталь 8, що повністю занурена в середовище, яке обробляють.

Привод вібрмашини виконаний у вигляді чотирьох шестиполюсних електромагнітів 5, що симетрично встановлюються з обох бортів контейнера і якорів 6, які кріпляться з однаковим зазором до відповідних піврам.

Вібрмашина встановлена на основі 11 через гумові напіввтулки 10, що розміщені в нерухомих, під час коливань машини, точках стрижневих пружин 2. На контейнері та піврамах розташовані гумові пружні елементи 12.

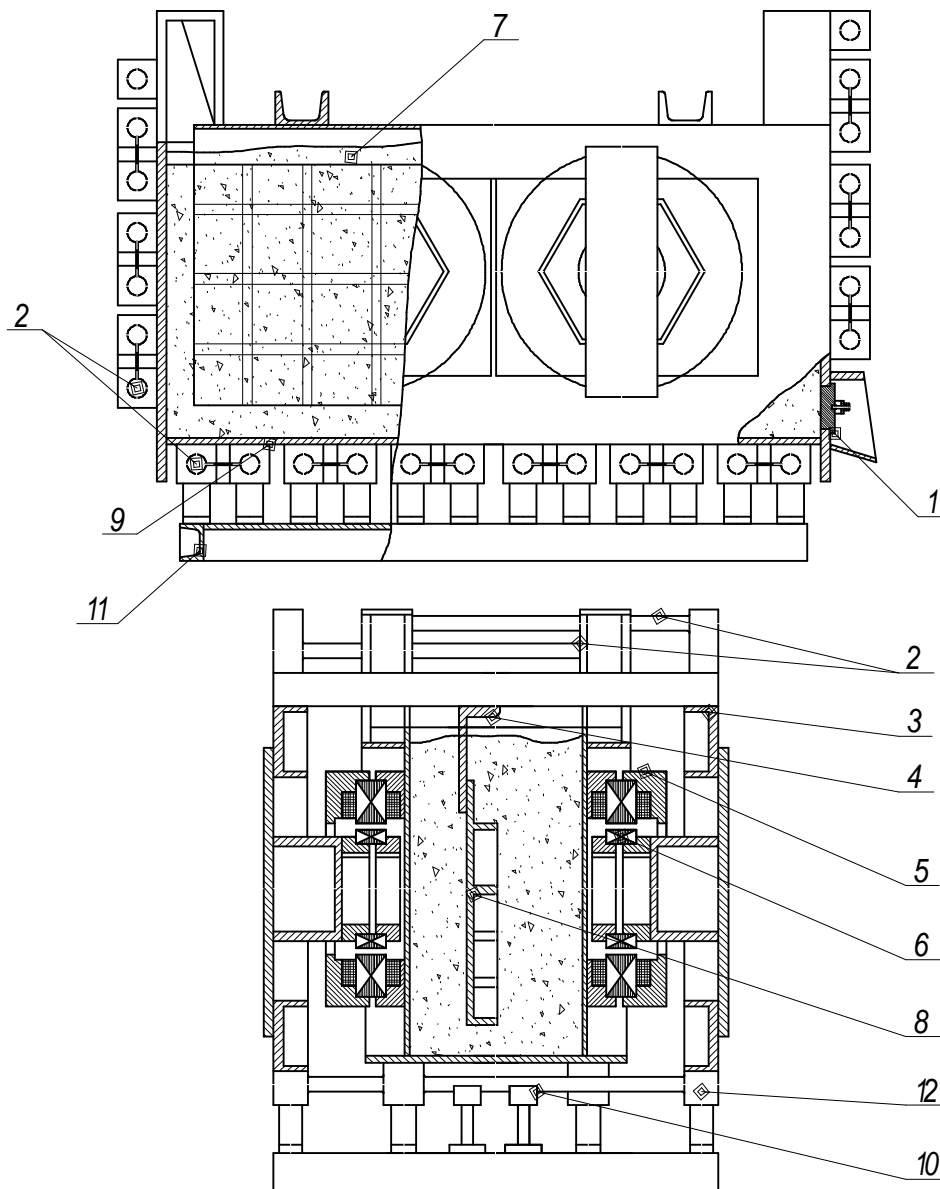


Рис. 1. Конструктивна схема вібромашини для обробки плоских великогабаритних деталей

Контейнер з електромагнітами утворює одну коливну масу, а піврами з пристроєм і деталлю іншу, які з'єднані між собою пружними стрижневими елементами та утворюють двомасову коливальну систему. Параметри пружних елементів підбираються так, щоб жорсткість їх в усіх напрямках у площині коливань машини була однаковою.

Під час подачі пульсуючої напруги на котушки шестиполюсних віброзбудників між електромагнітами і якорями виникає сила взаємодії, що збуджує колові коливання мас машини, а саме рух в протифазі контейнера з середовищем, яке обробляють і піврам з пристроєм та деталлю. При цьому інтенсивність обробки залежить від відносної швидкості деталей і тіл середовища, яке обробляють [1].

Розглянемо вимушені коливання вібраційної машини з шестифазним електромагнітним віброзбудником колових коливань, обмотки якого живляться від мережі змінного струму через вентилі, як єдину електромеханічну систему. Принципова схема вібромашини (рис. 2) містить *n*

вібробудників. Вібраційна машина складається з робочого контейнера 9 (рис. 1) масою  $m_k$ , на якому розміщені шестифазні електромагнітні вібробудники з однаковими електромагнітами 5, що розміщені з кутовим кроком  $60^\circ$  із початковим повітряним проміжком  $\Delta$  відносно якорів 6, встановлених на піврамі 3, загальною масою  $m_p$ , яка зв'язана з контейнером пружною системою 2.

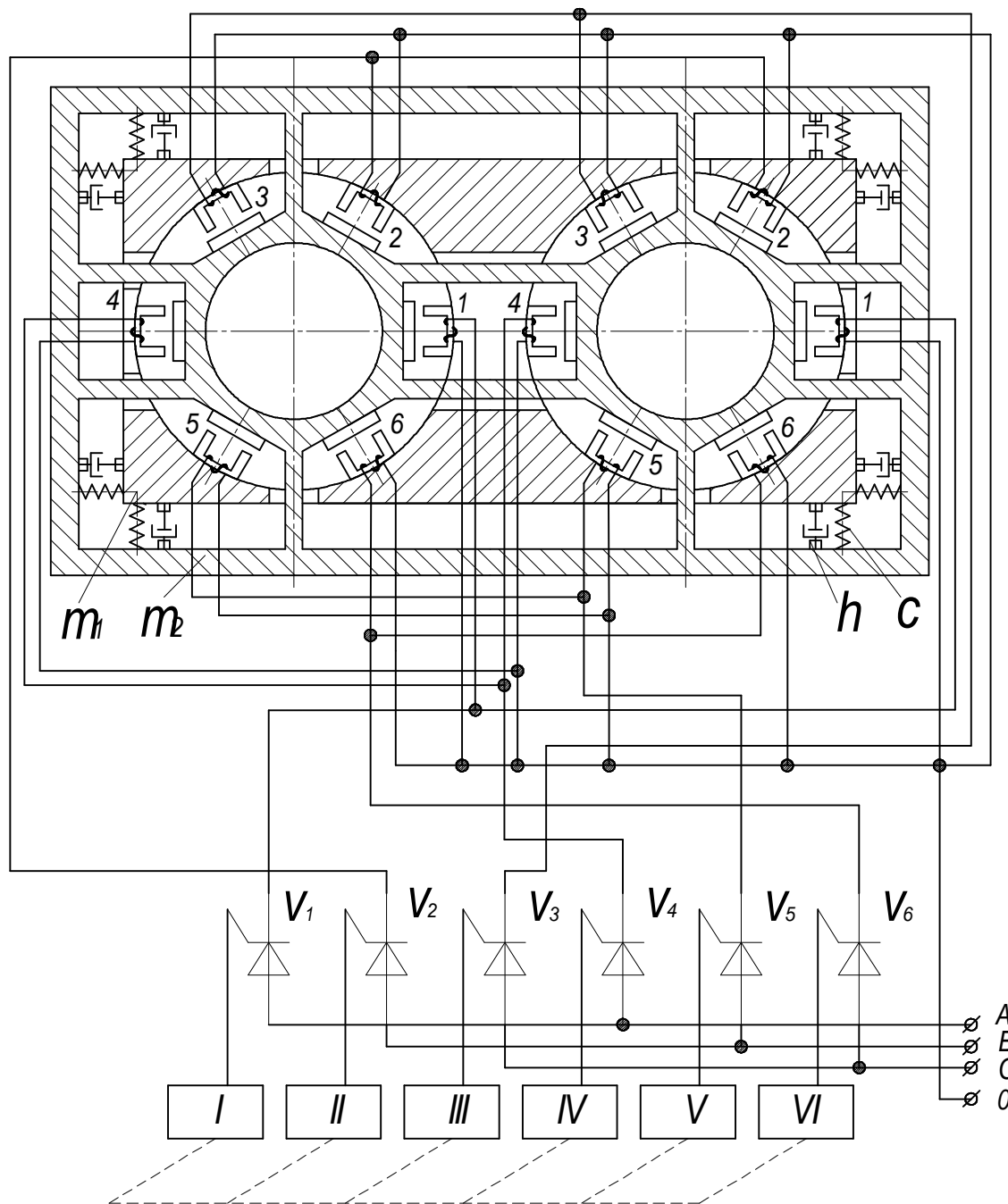


Рис. 2. Принципова схема керування резонансною вібромашиною з шестифазним електромагнітним вібробудником колових коливань

Оскільки пружна система виконана у вигляді круглих пружинних стрижнів, то вона має однакову жорсткість у напрямках координат  $X$  і  $Z$  та однаковий коефіцієнт демпфування  $h$ . Пари обмоток протилежно розташованих електромагнітів під'єднані через тиристри  $V_k$  ( $k=1\div 6$ ) до

трифазної мережі змінного струму за схемою зірка. Дільник частоти і пристрої фазового регулювання забезпечують чергування півхвиль напруги та регулювання кутів відкриття тиристорів. Під час роботи між кожним електромагнітом і якорем виникають зусилля взаємодії, сумарний вектор яких обертається з частотою, вдвічі меншою від частоти коливання мережі, що забезпечується схемою керування тиристорами. Ці зусилля призводять до коливань якоря з рамою і антифазних коливань контейнера з електромагнітами по осях  $X$  і  $Z$  за траєкторією, близькою до колової. Особливість процесів, які відбуваються у цій вібромашині, обумовлена наявністю шести електромагнітів, що живляться із зсувом фаз і які рівномірно розміщені по колу відносно спільного якоря кожного віброзбудника. Під час утворення збуджувальної сили одночасно діє декілька електромагнітів, процеси в яких за рахунок спільного якоря взаємопов'язані.

Запишемо диференціальні рівняння електромеханічної системи машини, зробивши такі припущення:

- кутові переміщення якоря відносно корпусу відсутні;
- магнітне поле в повітряних проміжках, площа яких визначається площею виступів магнітопроводів, приймається однорідним;
- магнітний опір магнітопроводів визначається тільки повітряним проміжком;
- активний та реактивний опір ланок обмоток не залежить від струму, що протікає через них;
- вольтамперні характеристики тиристорів замінені прямими так, що ліва їх вітка збігається з віссю абсцис, а права з віссю ординат.

Диференціальні рівняння руху з урахуванням зроблених припущень мають вигляд

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + h \frac{dX}{dt} + cX = n \sum_{k=1}^6 P_{kx}; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} + h \frac{dZ}{dt} + cZ = n \sum_{k=1}^6 P_{kz}; \quad (2)$$

де

$$P_k = 0,5 I_k^2 L'_k D^{-1} \quad (k = 1, 2, \dots, 6); \quad (3)$$

$$L_k \frac{dI_k}{dt} + I_k \frac{dL_k}{dt} + R I_k = U_k. \quad (4)$$

$$U_k = U_m Y_{1k}(t);$$

$$Y_{1k}(t) = \begin{cases} \sin[wt + (k-1)2p/3] n p u & 4pn/w + (k-1)2p/3 + t_a \leq t \leq t_k \\ 0 & n p u \quad t_k \leq t \leq 4p(n+1)/w + (k-1)2p/3 + t_a \end{cases}$$

Рівняння (1), (2) описують відносні коливання електромагнітів з рамою і якорів з контейнером по осях  $X$  і  $Z$ , а рівняння (4) виражає баланс напруги в ланцюгу обмотки  $k$ -го електромагніту. У рівняннях  $X, Z$  – переміщення контейнера відносно рами по координатних осях;

$m = m_k (1 + m_k / m_p)^{-1}$  – приведена маса системи;  $P_k, P_{kx}, P_{kz}$  – сила, що розвивається  $k$ -тим електромагнітом і проекції її на відповідні осі координат;  $I_k$  – сила струму  $k$ -го електромагніту;

$R$  – активний опір обмотки кожного електромагніту;  $U_k$  – напруга мережі, що прикладена до обмоток  $k$ -го електромагніту;  $U_m$  – амплітудне значення напруги;  $\omega$  – колова частота коливань напруги живлення мережі;  $t$  – час (за початок відліку часу приймаємо момент, коли напруга в фазі А в непарному періоді коливання під час зростання дорівнює нулю;  $t_k$  – додатний корінь рівняння

$I_k(t) = 0$  в діапазоні  $4p(n+1)/w + (k-1)p/3 + t_a > t_k > 4pn/w + (k-1)p/3 + t_a$ ;  $n$  – порядковий номер періоду коливачь;  $k$  – порядковий номер електромагніту;  $D_k$  – повітряний проміжок  $k$ -го електромагніту;  $L_k$  – індуктивність  $k$ -го електромагніту;  $L'_k$  – індуктивність  $k$ -го електромагніту з урахуванням зменшення магнітного потоку у магнітопроводі електромагніту внаслідок розсіювання.

Вираз для індуктивностей має вигляд

$$L_k = 0,5m_o w^2 S D_k^{-1}; \quad L'_k = h L_k, \quad (5)$$

де  $m_o$  – магнітна проникливість вакууму;  $w$  – кількість витків обмотки кожного електромагніту;  $h$  – коефіцієнт зменшення магнітного потоку.

Повітряний проміжок  $k$ -го електромагніту пов'язаний із переміщенням  $X$  і  $Z$  співвідношенням

$$D_k = D - (X^2 + Z^2)^{0,5} \cos[(k-1)p/3 - e], \quad (6)$$

де  $e$  – кут між додатним напрямком осі  $X$  і вектором зміщення контейнера відносно рами.

Система рівнянь (1) – (6) є нелінійною, оскільки зазор  $D_k$  є функцією  $X$ ,  $Z$  і входить у вираз для індуктивностей, які своєю чергою входять в праві частини рівнянь (1), (2) і рівняння (4) балансу напруги живлення.

Ввівши безрозмірні переміщення  $x = X/D$ ,  $z = Z/D$ ,  $d_k = D_k/D$ ,  $r = (x^2 + z^2)^{0,5}$ ,  $t = wt$ ,  $j_k = I_k R/U_m$  і безрозмірні параметри:  $b = h/2mw$ ,  $z = w_o/w$ ,  $a = wt_a$  де  $r$  – безрозмірна амплітуда коливачь контейнера відносно рами, а  $w_o = (c/m)^{0,5}$  – власна частота коливачь механічної системи, диференціальні рівняння (1), (2), (4) і вирази (3), (6) матимуть вигляд

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2b \frac{dx}{dt} + z^2 x = n \sum_{k=1}^q p_{kx}; \quad (7)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2b \frac{dz}{dt} + z^2 z = n \sum_{k=1}^6 p_{kz}; \quad (8)$$

$$p_k = 0,5 I_k^2 L'_k D_k^{-1} D^{-1} w^{-2} m^{-1}, \quad (9)$$

де  $p_{kx}$  і  $p_{kz}$  – проєкції безрозмірної сили  $p_k$  по осях координат  $X$  і  $Z$ .

$$\frac{dj_k}{dt} + \frac{R}{wL_k} \left( \frac{w}{R} \frac{dL_k}{dt} + 1 \right) j_k = \frac{R}{wL_k} y_{1k}(t), \quad (10)$$

де

$$y(t) = \begin{cases} \sin[t + (k-1)2p/3] \quad n p u \quad 4pn + (k-1)p/3 + a \leq t \leq t_k; \\ 0 \quad n p u \quad t_k \leq t \leq 4p(n+1) + (k-1)p/3 + a \end{cases}$$

$$d_k = 1 - r \cos[(k-1)2p/3 - e] \quad (11)$$

Прийmemo, що коливачь контейнера відносно рами здійснюютьcь за коловою траєкторією з частотою, вдвічі меншою від частоти коливачь мережі, що відповідає експериментальним даним

для білярезонансного режиму роботи вібрмашини. Тоді розв'язання системи (7)–(11) можна записати у вигляді

$$e = t + q, \tag{12}$$

$$x = r \sin(t/2 + q), \quad z = -r \cos(t/2 + q), \tag{13}$$

де  $q$  – кут між вектором від'ємного переміщення контейнера і додатного напрямку осі  $X$  при  $t = 0$ .

Вказане розв'язання доречне, коли  $r < 1$ , оскільки при  $r = 1$  настає сумісний удар якорів і електромагнітів. З врахуванням (5), (11) та (12) рівняння (10) стає нелінійним рівнянням зі змінним коефіцієнтом в правій частині, і його інтеграл матиме вигляд

$$j_k = \left\{ \int_{a+(k-1)\frac{p}{3}}^t \frac{g y_{1k}(t')}{y_{2k}(t')} \exp \int_{a+(k-1)\frac{p}{3}}^{t'} \left[ \frac{g}{y_{2k}(t'')} + y_{3k}(t'') \right] dt'' dt' \right\} x \exp^{-1} \times$$

$$\times \int_{a+(k-1)\frac{p}{3}}^t \left[ \frac{g}{y_{2k}(t')} + y_{3k}(t') \right] dt', \tag{14}$$

а безрозмірна сила

$$p_k = q \ j_k^2 (g')^{-2} y_{2k}^2(t), \tag{15}$$

де  $t'$ ,  $t''$  – змінні під час інтегрування;

$$g = R/wL, \quad g' = R/wL', \quad q = U_m^2 / w^4 L' D^2 m,$$

$$y_{2k}(t) = \{1 - r \cos[(k-1)p/3 - t/2 - q]\}^{-1},$$

$$y_{3k}(t) = 0,5 r \sin[(k-1)p/3 - t/2 - q] \{1 - r \cos[(k-1)p/3 - t/2 - q]\}^{-1},$$

$L = 0,5 m_0 w^2 S D^{-1}$  – розрахункова індуктивність кожного із електромагнітів під час початкового повітряного проміжку  $D$ ,  $L' = hL$ .

Розклавши безрозмірне зусилля  $p_k$  в ряд Фур'є і підставивши перші члени рівнянь у праві частини рівнянь (7), (8), а також підсумувавши, отримаємо вирази для сил в рівняннях (7) та (8), які стають лінійними і їх розв'язання з врахуванням (16) і (13) матиме вигляд

$$r = 1,5 q p^{-1} (g')^{-2} z^{-2} (G_1^2 + G_2^2)^{0,5} \left[ (1 - z^{-2})^2 + 4 b^2 z^{-4} \right]^{-0,5},$$

$$q = J + x, \tag{17}$$

де

$$\operatorname{tg} x = -2b (z^2 - 1)^{-1}$$

Амплітудно-частотні і струмочастотні характеристики, отримані за результатами обчислень (рис. 3, а, б), а також їх значення для лінійної системи, в якій праві частини рівнянь (1) і (2) визначаються постійними зазорами, показують незначний вплив нелінійності на амплітуду коливань та істотне збільшення струмів з наближенням до резонансу, які можуть відрізнитись від розрахованих за лінійним наближенням до 30%. Розрахунки виконували для вібрмашини об'ємом контейнера 250 дм<sup>3</sup> і значеннях наведених параметрів  $a = 0$ ,  $b = 0,23$ ,  $g = 0,0168$ ,  $g' = 0,0224$ .

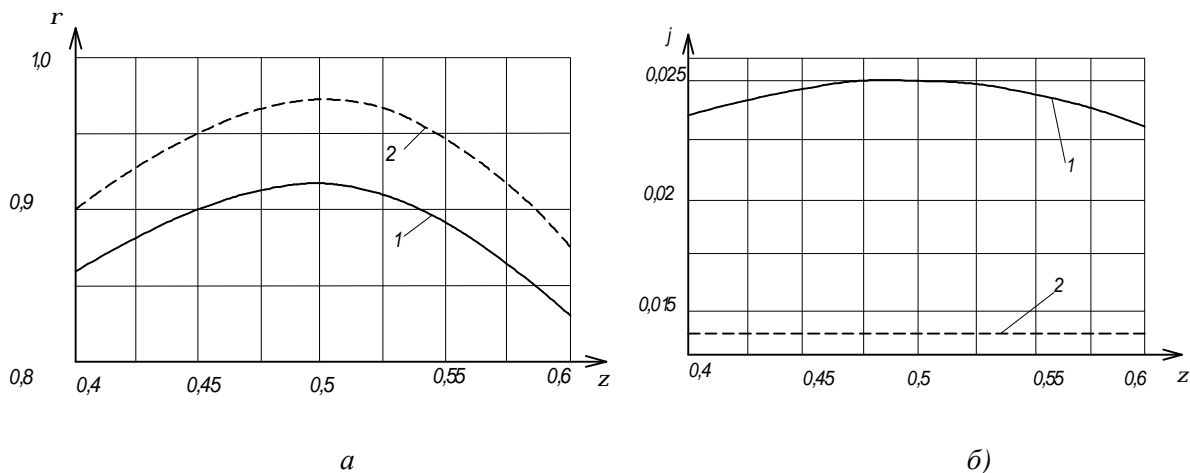


Рис. 3. Амплітудно-частотні (а) та струмочастотні (б) характеристики електромагнітного віброзбудника:  
 1 – для змінних зазорів, 2 – для постійних зазорів

**Висновки.** Застосування запропонованої методики розрахунку шестифазного електромагнітного віброзбудника колових коливань вібраційних машин з електромагнітним приводом, де деталь розміщується нерухомо в спеціальному пристрої, що встановлений між піврамами машини і здійснює коливання в протифазі напрямку руху робочого середовища, дозволить значно спростити виконання інженерного розрахунку приводу цього типу машин. Запропонована конструкція машини з електромагнітним приводом та методика розрахунку забезпечує зменшення споживаної енергії приводу та дозволяє визначити оптимальне зусилля шестифазного електромагнітного віброзбудника. Ця методика розрахунку може бути також застосована для розрахунку електромагнітних приводів вібраційних транспортно маніпулювальних віброконвеєрів.

1. Боровець В.М., Шенбор В.С. Вібраційна обробка плоских довгомірних деталей // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвід. наук-техн. – 2007. – Вип. 41. – С. 9–14. 2. Зарецкий Л.Б. Электромеханические процессы в однократном электромагнитном вибраторе с выпрямителем // Исследование вибрационных машин. – М. НИИИИнфстройдоркоммунмаш, 1965. – С. 16–27. 3. Щигель В.А., Уфимцев В.Д. Электромеханические процессы в шестифазном электромагнитном вибровозбудителе круговых колебаний // Изв. вузов. Электромеханика. – М., 1983. – № 8. – С. 64–72 с. 4. Уфимцев В.Д., Якимец Р.В. Схема управления электромагнитным вибровозбудителем круговых колебаний с рабочей частотой 25 Гц // Вестн. Львов. политехн. ин-та. – 1988. – С. 67–69. 5. Повідайло В. Вібраційні процеси та обладнання: Навч. посібник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2004. – 248 с. 6. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты переменного тока. – М.: Энергия, 1968. – 200 с. 7. Батман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высш. шк., 1977. – 255 с.