

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КРАТНОЇ САМОСИНХРОНІЗАЦІЇ ДЕБАЛАНСНИХ ВІБРОЗБУДНИКІВ

© Ярошевич М.П., Тимошук В.М., Силивонюк А.В., 2011

**Здійснено експериментальну перевірку можливості отримання стійких режимів кратної самосинхронізації дебалансних збудників вібраційних машин з тримким тілом, що здійснює плоскі коливання.**

**The experimental testing of possibility of gaining the multiple self-synchronization stable modes disbalance exciters of vibration machines containing carrying body that makes plane vibration is carried out.**

**Постановка проблеми.** Перспективним шляхом інтенсифікації багатьох виробництв у різних галузях промисловості є використання вібраційної техніки. Найпоширенішим приводом переважної більшості великогабаритних та потужних вібраційних машин є дебалансний. Для створення високоефективних і надійних вібромашин важливе значення має явище самосинхронізації механічних віброзбудників. Воно з успіхом використовується в різноманітних вібромашинах, які серійно випускають у багатьох країнах світу. Однак можливості практичного застосування самосинхронізації ще далеко не використано: поширення набули лише вібромашини з двома збудниками, що самосинхронізуються; приклади використання самосинхронізації збудників, що обертаються з кратними частотами, невідомі.

**Аналіз відомих досліджень та публікацій.** Нині явище динамічної синхронізації вивчено достатньо повно, розроблено теорію та методи розрахунку вібраційних машин із збудниками, що самосинхронізуються [1, 2]. Разом з тим, у теорії синхронізації існують задачі, названі «непростими», що потребують додаткових досліджень. Це, зокрема, задачі про синхронізацію збудників, одні з яких обертаються з кутовою швидкістю, кратною кутовій швидкості інших. У небагатьох роботах, що стосуються кратної самосинхронізації віброзбудників, розглянуто лише системи з одним коливальним ступенем вільності тримкого тіла або дуже спрощені системи з кількома ступенями вільності [3–5]: зокрема, у роботі [3] нехтують навіть жорсткістю пружної підвіски тримкого тіла. У цих роботах результатів експериментальних досліджень не наведено, а констатовано лише факт можливості досягнення кратної самосинхронізації віброзбудників.

**Мета статті.** Експериментально підтвердити можливість отримання стійких режимів кратної самосинхронізації дебалансних збудників вібраційних машин з тримким тілом, що здійснює плоскі коливання, порівняти експериментальні та теоретичні результати [3–5], а також перевірити запропоновані практичні рекомендації для підсилення ефекту.

**Виклад основного матеріалу.** Для експериментальних досліджень використано вібраційну установку (рис. 1), відповідно до динамічної схеми, розглянутої у [3]. Основною частиною вібраційної установки є пружно підвішене тримке тверде тіло, встановлене за допомогою гвинтових циліндричних пружин на масивній опорній рамі. На тримкому тілі розміщені три не зв'язані між собою дебалансні віброзбудники, які приводяться в обертання від окремих електродвигунів асинхронного типу. Вісь центрального збудника проходить близько до центра мас тримкого тіла, осі крайніх збудників лежать в одній площині з віссю центрального та рівновіддалені від неї. Центральний збудник обладнаний спеціальним гальмом, за допомогою якого можна змінювати момент опору обертанню ротора збудника.

Основні технічні параметри вібраційної установки такі (базовий варіант): маса тримкого тіла  $M = 45 \text{ кг}$ ; момент інерції тримкого тіла  $I = 1,09 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; моменти інерції роторів збудників

$I_1 = I_3 = 0,011 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $I_2 = 0,005 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; маси дебалансів  $0,1$  та  $0,2 \text{ кг}$  (передбачено можливість встановлення від двох до шести дебалансів); діапазон зміни ексцентриситетів дебалансів  $e_i = 0,018 - 0,048 \text{ м}$ ; відстань між осями крайніх роторів збудників  $r = 0,23 \text{ м}$ ; сумарна жорсткість шести пружин підвіски у вертикальному й горизонтальному напрямках  $c_y = 2,98 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ ,  $c_x = 3,06 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ . Для привода крайніх збудників використовували двигуни потужністю  $P = 0,18 \text{ кВт}$  або  $P = 0,12 \text{ кВт}$  з синхронною частотою обертання  $n_c = 1500 \text{ об/хв}$ ; для центрального збудника – двигун потужністю  $P = 0,18 \text{ кВт}$  з частотою  $n_c = 1500 \text{ об/хв}$  або двигуни  $P = 0,12 \text{ кВт}$ ,  $P = 0,09 \text{ кВт}$  з частотою  $n_c = 3000 \text{ об/хв}$ .

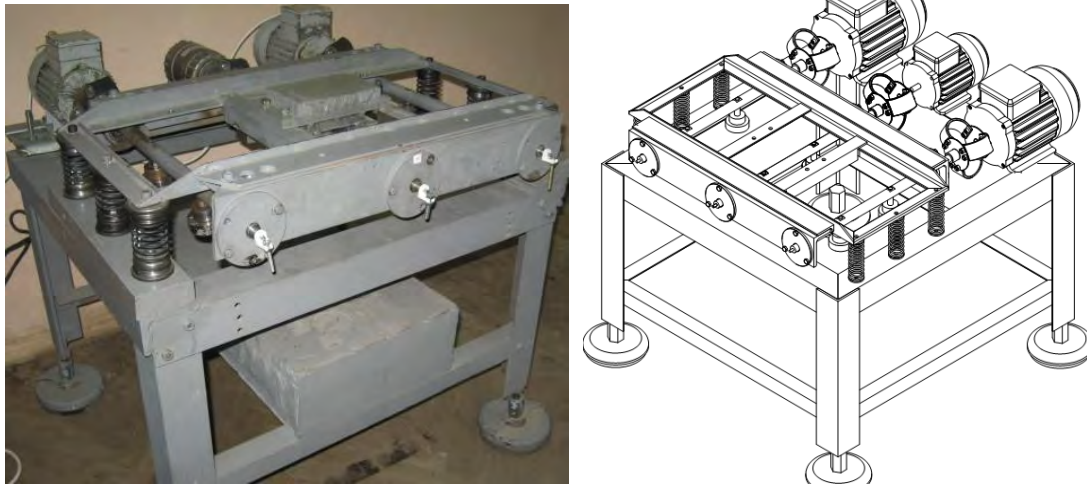


Рис. 1. Експериментальна вібраційна установка та її твердотіла модель

Для уточнення параметрів коливної системи (зокрема, моментів інерції тримкого тіла та роторів збудників, положення центра мас тримкого тіла тощо) поряд з традиційним обчисленням за формулами опору матеріалів та експериментальним визначенням використано програму Solid Works, у якій створено тривимірну твердотілу модель вібраційної установки (рис. 1).

Під час досліджень характер усталених режимів руху роторів збудників визначали візуально та фотографували у стробоскопічному освітленні з регульованою частотою спалахів лампи (рис. 2, б). Віброграми горизонтального та вертикального пришвидшень центра мас тримкого тіла знімали з використанням трикоординатного акселерометра ММА 7260 QT та аналого-цифрового перетворювача Е14-440. Зсув фаз обертання між роторами віброзбудників визначали за допомогою щільових фотодатчиків (рис. 3, а).

Траєкторії центра мас установки отримувалися додаванням горизонтального й вертикального пришвидшень центра мас тримкого тіла за допомогою програми PowerGraph [6].

**Результати експериментальних досліджень.** У першій серії дослідів з метою забезпечення, згідно із рекомендаціями [4], максимально однакових параметрів усіх збудників, для них використано двигуни одного типорозміру ( $n_c = 1500 \text{ об/хв}$ ); ротор центрального збудника, який обертається з подвійною частотою, був з'єднаний з двигуном через зубчасту передачу з передатним відношенням 1:2. Під час цих дослідів ефекту кратної синхронізації не спостерігалось за жодних параметрів вібраційної установки. Отже, незважаючи на динамічний зв'язок між збудниками, що обертаються з кратними частотами [3–5], практично досягти ефекту кратної самосинхронізації неможливо. Водночас, проста самосинхронізація крайніх збудників встановлювалася завжди.

Виконано досліді, які мали за мету перевірку можливості отримання двократної самосинхронізації віброзбудників з використанням для підсилення ефекту пристрою [7]. Конструктивна реалізація пристрою виконана згідно з [4] (рис. 2).

Показано, що, з використанням для підсилення ефекту розглядуваного пристрою, досягти кратної самосинхронізації роторів віброзбудників доволі проблематично, як, до речі, й за

допомогою пружного зв'язку роторів збудників між собою (рис. 4) [1]. У останньому випадку під час розбігу вібростанини виникають істотні коливання пружини, пуск машини супроводжується підвищеним шумом та ударами витків пружини.

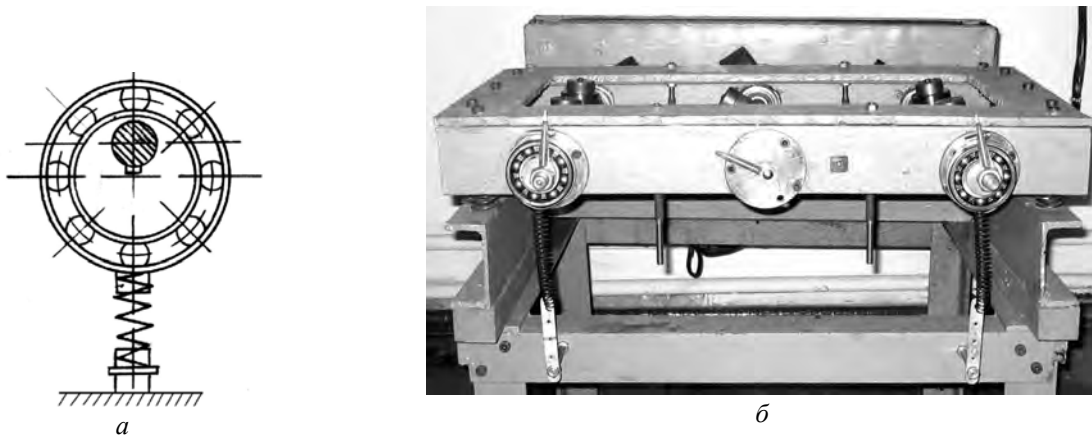


Рис. 2. Схема пристрою для підсилення ефекту кратної самосинхронізації (а) та вібраційна установка з підсилювальними пристроями в роботі (б)



Рис. 3. Щільовий фотодатчик, закріплений біля торця ротора збудника (а); удосконалений пристрій для підсилення ефекту кратної самосинхронізації (б)

У зв'язку з цим в усіх наступних дослідах для привода центрального збудника відмовилися від двигуна з частотою обертання  $n_c = 1500 \text{ об/хв}$  та кінематичної передачі. Центральний збудник за допомогою муфти був безпосередньо з'єднаний з двигуном із частотою  $n_c = 3000 \text{ об/хв}$ .

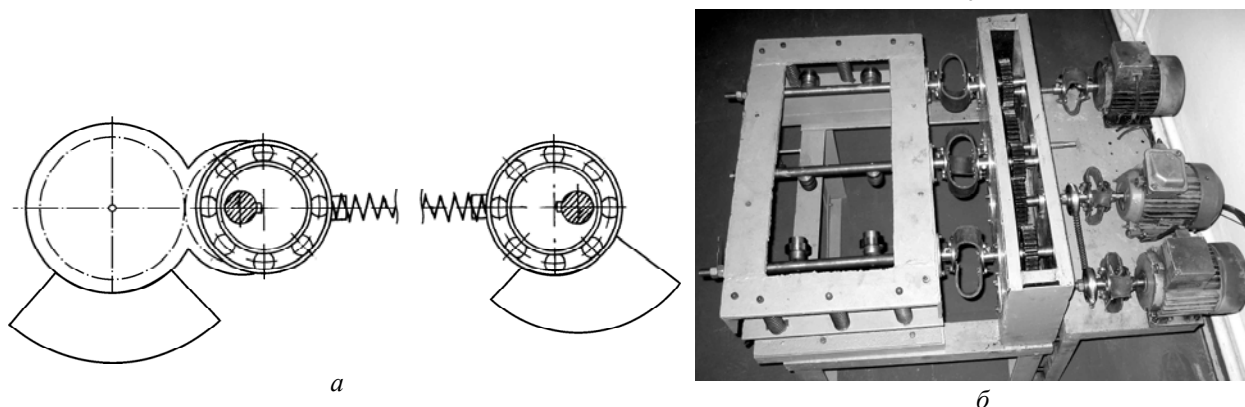


Рис. 4. Ротори збудників, зв'язані пружиною між собою: а – схема; б – фото

У цій серії дослідів, враховуючи рекомендації [8], вибрано у три рази меншу потужність двигуна центрального збудника порівняно з потужностями двигунів крайніх збудників ( $P_3 = 0,09 \text{ кВт}$  проти  $P_1 = P_2 = 0,180 \text{ кВт}$ ). Кратно-синхронне обертання віброзбудників одержано

за максимальних амплітуд коливань тримкого тіла ( $A \geq 5 \text{ мм}$ ). У підсилювальному пристрої використано запропоноване ефективніше конструктивне рішення пружного зв'язку ротора збудника з тримким тілом (рис. 3, б). Встановлено, що стійке кратно-синхронне обертання збудників досягається в разі максимальних статичних моментів крайніх збудників за жорсткості пружини підсилювального пристрою  $c \geq 2,7 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$ . У цьому випадку крайні збудники обертаються майже синфазно, а центральний – з кутом зсуву фаз приблизно  $90^\circ$ .

Водночас під час найменшого увімкнення гальмівного пристрою чи за зменшення статичних моментів збудників їхня кратна самосинхронізація не встановлювалася. Досягалася лише проста синхронізація крайніх збудників. Зазначимо, що подальше збільшення жорсткості пружини підсилювального пристрою, коли теоретично ефект мав би покращитися, призводило до низькочастотних коливань великої амплітуди та розгойдування тримкого тіла.

Істотно розширити область існування кратно-синхронних режимів руху збудників вдалося в разі використання, поряд із запропонованим удосконаленим пристроєм (або навіть і без нього), перетворювача частоти для корекції синхронної кутової швидкості збудників; потужність двигуна центрального збудника вибрано утричі меншою за потужність двигунів крайніх збудників. У процесі досліджень їх синхронну кутову швидкість встановлювали такою, щоб подвійною вона дорівнювала швидкості обертання центрального збудника. Зазначимо, що за різниці частот, меншої, ніж  $0,5\text{--}1\%$ , вже відбувалося захоплення роторів збудників у кратно-синхронний режим обертання. У разі використання перетворювачів частоти кратна самосинхронізація збудників спостерігалася навіть за доволі невеликої ( $A=0,6 \text{ мм}$ ) амплітуди коливань тримкого тіла чи за незначної дії гальмівного пристрою.

Зазначимо, що коли встановлювалось синхронне обертання збудників, воно продовжувалося необмежено довго; при вимкненні та повторному вмиканні двигунів кратно-синхронний режим обертання, як правило, виникав. У протилежному випадку достатньо було незначного регулювання частоти. Усе це свідчить, що можливо забезпечити достатньо високу стабільність досліджуваного кратно-синхронного режиму.

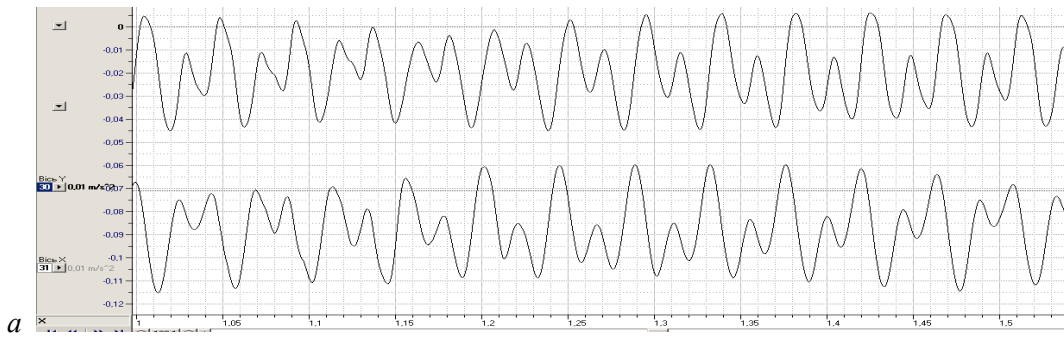
На рис. 5 наведено віброграми вертикального та горизонтального пришвидшень центра мас тримкого тіла для різних режимів руху роторів збудників. У випадку обертання роторів усіх трьох віброзбудників та встановлення кратно-синхронного режиму їхнього руху віброграма пришвидшень має вигляд типового бігармонічного коливного процесу в разі відношення частот гармонік  $1:2$ , приблизно однакових амплітуд і зсуву фаз, близького до  $90^\circ$  [9]. Якщо не встановлено кратного режиму руху, графіки вібропришвидшень мають вигляд нестационарного коливного процесу, характеризується змінною амплітудою, що свідчить про несталість фаз між гармоніками.

Звичайно, під час обертання тільки центрального ротора віброзбудника чи синхронного руху лише крайніх збудників траєкторія руху центра мас тримкого тіла буде близькою до кола. На рис. 6 наведено траєкторії центра мас при обертанні усіх трьох віброзбудників. Як впливає з аналізу траєкторії руху, тримке тіло коливається за бігармонічним законом – видно, що траєкторія руху є замкненою кривою, яка нагадує фігуру Ліссажу. Порівнюючи вигляд теоретичних [9] та отриманих експериментально траєкторій, бачимо, що її вигляд відповідає відношенню частот гармонік  $1:2$  з кутом різниці фаз між ними, близьким до  $90^\circ$ . Якщо кратно-синхронний режим обертання збудників не встановився, траєкторія є незамкненою і з кожним обертом дещо зміщується, поступово повністю «замальовуючи» усю можливу область її розміщення.

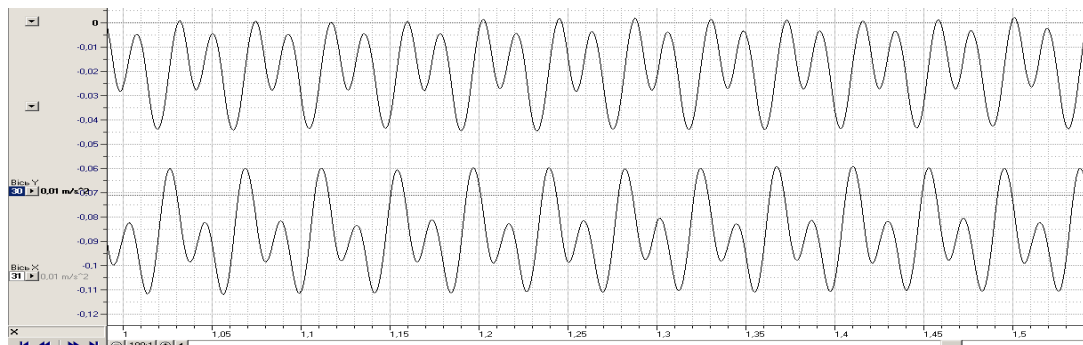
Результати спектрального аналізу свідчать, що сплески амплітуди вібропришвидшень відбуваються на частотах збурювальних сил  $23,65 \text{ Гц}$  чи  $45,20 \text{ Гц}$ , відповідно при обертанні лише двох крайніх або одного центрального роторів збудників чи на обох вказаних частотах під час обертання усіх трьох віброзбудників у разі невстановлення кратно-синхронного режиму (рис. 8, а).

У разі встановлення кратної самосинхронізації збудників (рис. 8, б) сплески вібропришвидшень відбуваються вже на дещо інших частотах –  $23,46 \text{ Гц}$  та  $46,92 \text{ Гц}$ , що, як і повинно бути у разі синхронізації, є строго кратними. З цього можна зробити висновок, що крайні збудники дещо пригальмовуються, а центральний починає обертатися з більшою швидкістю – його пришвидшують крайні електродвигуни.

На рис. 9 наведено віброграми сигналів щільових фотодатчиків. З графіків впливає, що різниця фаз між роторами віброзбудників, які обертаються з кратними частотами, є сталою та близькою до  $90^\circ$ .

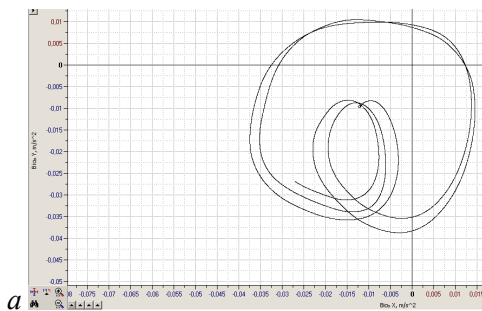


а

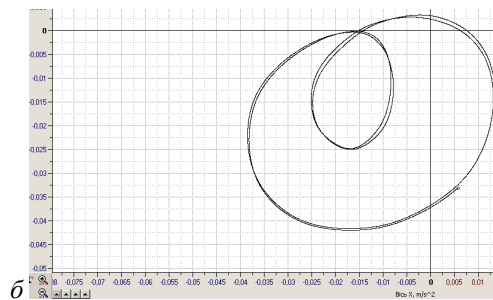


б

Рис. 6. Віброграма пришвидшення центра мас тримкого тіла у вертикальному та горизонтальному напрямках: а – кратна самосинхронізація не встановилася; б – кратна самосинхронізація встановилася

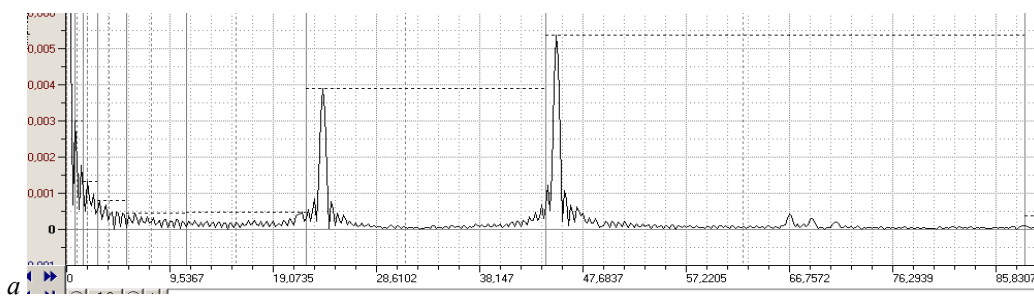


а

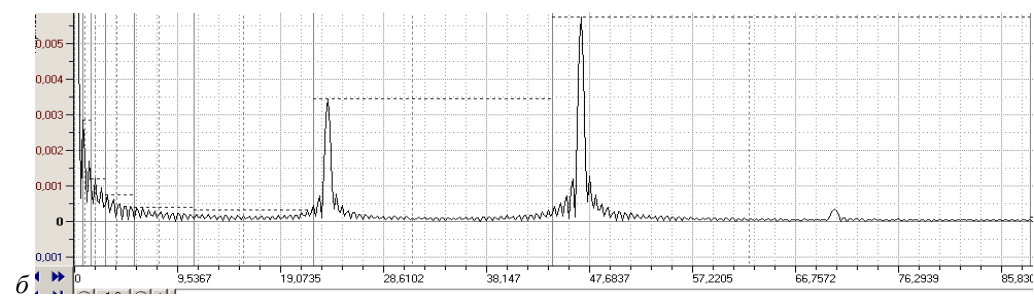


б

Рис. 7. Траєкторія руху центра мас тримкого тіла в разі: а – невстановлення кратної самосинхронізації збудників; б – встановлення кратної самосинхронізації



а



б

Рис. 8. Спектральний аналіз вібропришвидшень центра мас тримкого тіла у вертикальному напрямку в разі: а – невстановлення кратної самосинхронізації; б – встановлення кратної самосинхронізації

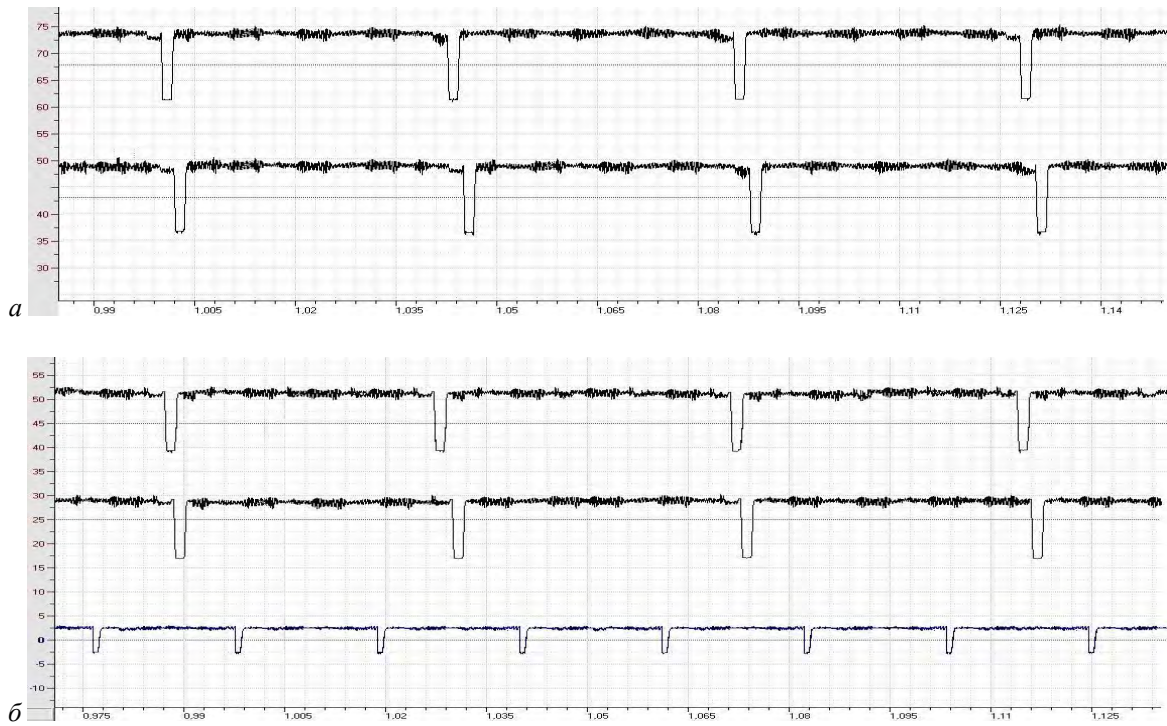


Рис. 9. Віброграми сигналів цільових фотодатчиків роторів збудників: а – двох крайніх збудників; б – трьох збудників

Зазначимо, що спостережуване у разі лише простої синхронізації розузгодження фаз двох крайніх збудників приблизно  $20^\circ$  при встановленні кратного-синхронного режиму обертання усіх трьох збудників зменшується приблизно до  $15^\circ$ .

**Висновки.** Показано можливість посилення тенденції віброзбудників до кратної самосинхронізації за допомогою удосконаленого підсилювального пристрою, однак воно недостатнє для практичного використання ефекту. Суттєво розширити стабільність кратного-синхронного режиму обертання дебалансних віброзбудників можна, використовуючи перетворювачі частоти для корекції кутових швидкостей електродвигунів. Розбіжність між частотою ротора збудника, який обертається з подвійною кутовою швидкістю та подвійною синхронною частотою збудників, що обертаються з основною швидкістю, не повинна перевищувати  $0,5\text{--}1\%$ .

Експериментальні дослідження демонструють можливість практичного використання ефекту кратної самосинхронізації дебалансних віброзбудників у вібраційних машинах і пристроях; спостерігається непогана збіжність експериментальних та теоретичних результатів.

1. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. – М.: Наука, 1974. – 789 с.
2. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. – М.: Наука, 1981. – 352 с.
3. Ярошевич Н.П. Использование эффекта самосинхронизации при возбуждении бигармонических колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 6. – С.23–27.
4. Барзуков О.П. Двукратная синхронизация механических вибраторов, связанных с линейной колебательной системой // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1973. – № 6. – С.22–29.
5. Барзуков О.П. Кратная синхронизация в системе слабосвязанных объектов с одной степенью свободы // Прикладная математика и механика. – 1972. – Т.36. – Вып.2. – С. 225–231.
6. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph / ПуКАД: промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2007. – № 3. – С.42–47.
7. Блехман И.И. Инерционный вибратор: авт. свид. 388974. Б. И. № 29. 1973.
8. Блехман И.И., Ярошевич Н.П. Переходные режимы в инерционно-возбуждаемых послерезонансных вибрационных устройствах с несколькими степенями свободы несущей системы / В кн.: Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика. ИПМаш РАН. – СПб.: Наука, 2009. – С. 110–122.
9. Иорши Ю.И. Виброметрия. – М.: Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1963. – 771 с.