

УДК 621.9.048.6

С.В. Здрілюк, М.П.Ярошевич

Луцький національний технічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КРАТНОЇ САМОСИНХРОНІЗАЦІЇ ДЕБАЛАНСНИХ ВІБРОЗБУДНИКІВ

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

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 привод. Для створення високоефективних і надійних вібромашин важливе значення має явище самосинхронізації механічних віброзбудників. Воно з успіхом використовується в самих різноманітних вібромашинах, які серійно випускаються у багатьох країнах світу. Однак, можливості практичного застосування самосинхронізації ще далеко не використані: широке розповсюдження отримали лише вібромашини з двома збудниками, що самосинхронізуються; приклади використання самосинхронізації збудників, що обертаються з кратними частотами невідомі.

Аналіз відомих досліджень та публікацій. На даний час явище динамічної синхронізації вивчене 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 вимагають додаткових досліджень, це зокрема задачі про синхронізацію збудників, одні з яких обертаються з кутовою швидкістю, кратною кутовій швидкості інших. У існуючих малочисельних роботах, присвячених кратній самосинхронізації віброзбудників, розглядаються 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 наводиться, а констатується лише факт можливості досягнення кратної самосинхронізації віброзбудників.

Мета статті. Експериментальне підтвердження можливості отримання стійких режимів кратної самосинхронізації дебалансних збудників вібраційних машин з тримким тілом, що здійснює плоскі коливання, порівняння експериментальних та існуючих теоретичних результатів [3-5], а також перевірка запропонованих практичних рекомендацій для підсилення ефекту.

Виклад основного матеріалу. Для експериментальних досліджень було 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 незв'язаних між собою дебалансні віброзбудники, які приводяться в обертання від окремих електродвигунів асинхронного типу. Вісь центрального збудника проходить близько до центру 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 наступні (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 $\varepsilon_i = 0,018 - 0,048 \text{ м}$; 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 приводу 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 $n_c = 3000 \text{ об/хв}$.

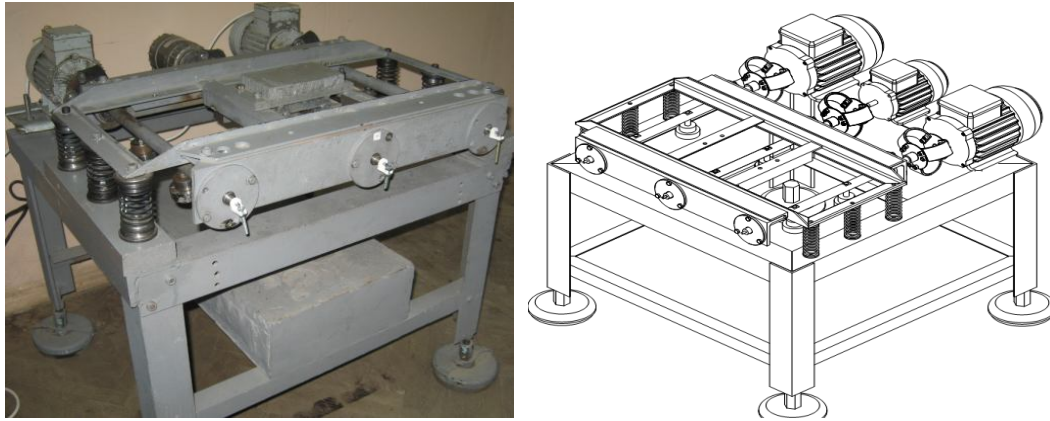


Рис. 1. Експериментальна вібраційна установка та її твердотіла модель

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

У процесі досліджень характер усталених режимів руху роторів збудників визначався візуально та фотографувався у стробоскопічному освітленні з регульованою частотою спалахів лампи (рис. 2, б). Віброграми горизонтального та вертикального пришвидшень центра мас тримкого тіла знімалися з використанням трьохкоординатного акселерометра MMA 7260 QT та аналого-цифрового перетворювача Е14-440. Зсув фаз обертання між роторами віброзбудників визначався за допомогою цільових 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 рекомендацій [4], максимально однакових параметрів усіх збудників, для них використовувалися двигуни одного типорозміру ($n_c = 1500 \text{ об/хв}$); при цьому, ротор центрального збудника, який обертається з подвійною частотою, був з'єднаний з двигуном через зубчасту передачу з передатним відношенням 1:2. Під час проведення цих дослідів, ефекту кратної синхронізації не спостерігалось за жодних параметрів вібраційної установки. Таким чином, незважаючи на існуючий динамічний зв'язок між збудниками, що обертаються з кратними частотами [3-5], практично досягти ефекту кратної самосинхронізації неможливо. У той же час, проста самосинхронізація крайніх збудників встановлювалася завжди.

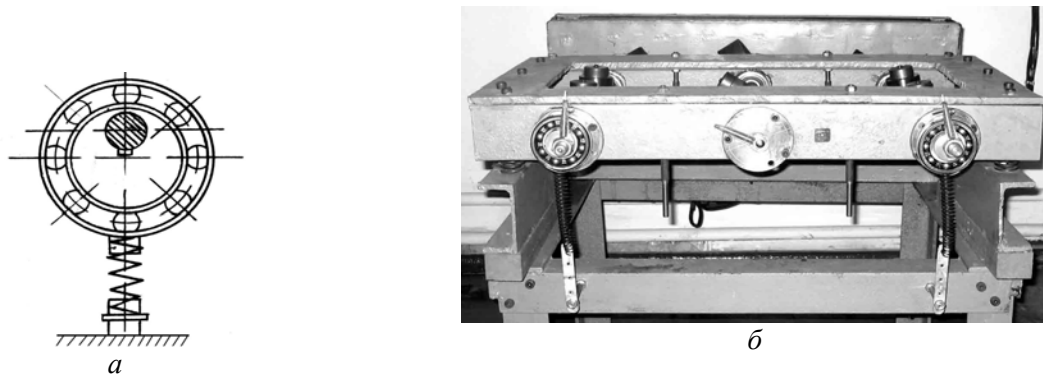


Рис. 2. Схема пристрою для підсилення ефекту кратної самосинхронізації (а) та вібраційна установка з підсилюючими пристроями в роботі (б)

Далі проведено дослід, які мали за мету перевірку можливості отримання двукратної самосинхронізації вібробудників з використанням для підсилення ефекту пристрою [7]. При цьому, конструктивна реалізація пристрою виконувалася згідно [4] (рис. 2).

Показано, що з використанням для підсилення ефекту розглядуваного пристрою, досягти кратної самосинхронізації роторів вібробудників досить проблематично, як, до речі, й за допомогою пружного зв'язку роторів збудників між собою (рис. 4) [1]. У останньому випадку, під час розбігу вібромашини виникають істотні коливання пружини, пуск машини супроводжується підвищеним шумом та ударами витків пружини.

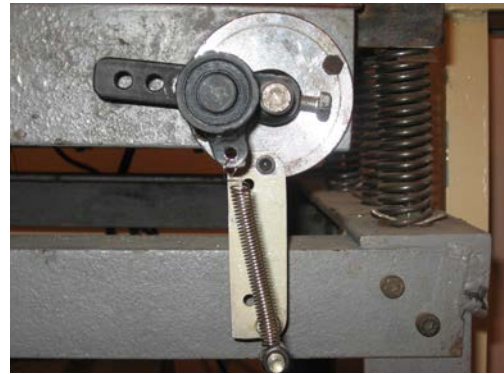


Рис. 3. Щільовий фотодатчик, закріплений біля торця ротора збудника (а); удосконалений пристрій для підсилення ефекту кратної самосинхронізації (б)

У зв'язку з цим, в усіх наступних дослідів 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 $n_c = 3000 \text{ об/хв}$.

У цій серії дослідів, враховуючи рекомендації [8], взяли у три рази меншу потужність двигуна центрального збудника порівняно з потужностями двигунів крайніх збудників ($P_3 = 0,09 \text{ кВт}$ проти $P_1 = P_2 = 0,180 \text{ кВт}$) й кратнo-синхронне обертання вібробудників було одержано за максимальних амплітуд коливань тримкого тіла ($A \geq 5 \text{ мм}$). При цьому у підсилюючому пристрої було використано запропоноване більш ефективне конструктивне рішення пружного зв'язку ротора збудника з тримким тілом (рис. 3, б). Встановлено, що стійке кратнo-синхронне обертання збудників досягається в разі максимальних статичних моментів крайніх збудників за жорсткості пружини підсилюючого пристрою $c \geq 2,7 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$. У цьому випадку крайні збудників обертаються майже синфазно, а центральний – з кутом зсуву фаз приблизно 90° .

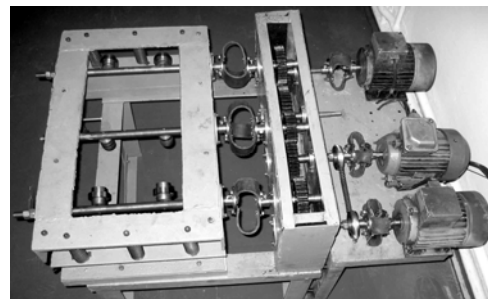
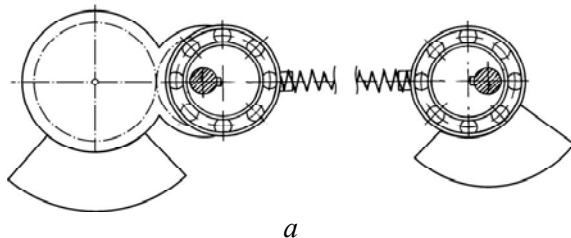


Рис. 4. Ротори збудників, зв'язані пружиною між собою: а) схема; б) фото

У той же час, при найменшому включенні гальмівного пристрою чи за зменшення статичних моментів збудників, їх кратна самосинхронізація не встановлювалася. Досягалася лише проста синхронізація крайніх збудників. Зазначимо, що подальше збільшення жорсткості пружини підсилюючого пристрою, коли теоретично ефект мав би покращитися, призводило до низькочастотних коливань великої амплітуди та розгойдування тримкого тіла.

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

Необхідно відзначити, що при встановленні синхронного обертання збудників, воно продовжувалося необмежено довго; при вимкненні та повторному вмиканні двигунів, кратно-синхронний режим обертання, як правило, мав місце. У протилежному випадку, достатньо було незначного регулювання частоти. Усе це свідчить про можливість забезпечення достатньо високої стабільності досліджуваного кратно-синхронного режиму.

На рис. 5 наведені 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 їх руху, віброграма пришвидшень має вигляд типового бігармонічного коливного процесу в разі відношення частот гармонік 1:2, приблизно однакових амплітуд і зсуву фаз, близького до 90^0 [9]. При невстановленні кратного режиму руху, графіки вібропришвидшень мають вигляд нестационарного коливного процесу, характеризується змінною амплітудою, що свідчить про несталість фаз між гармоніками.

Звичайно, що при обертанні тільки центрального ротора віброзбудника чи синхронного руху лише крайніх збудників, траєкторія руху центра мас тримкого тіла буде близькою до кола. На рис. 6 наведені траєкторії центра мас при обертанні усіх трьох віброзбудників. Як слідує 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 випадку відношення частот гармонік 1:2 з кутом різниці фаз між ними близьким до 90^0 . У разі, коли кратно-синхронний режим обертання збудників не встановився, траєкторія є незамкненою і з кожним обертом дещо зміщується, поступово повністю «замальовуючи» усю можливу область її розміщення.

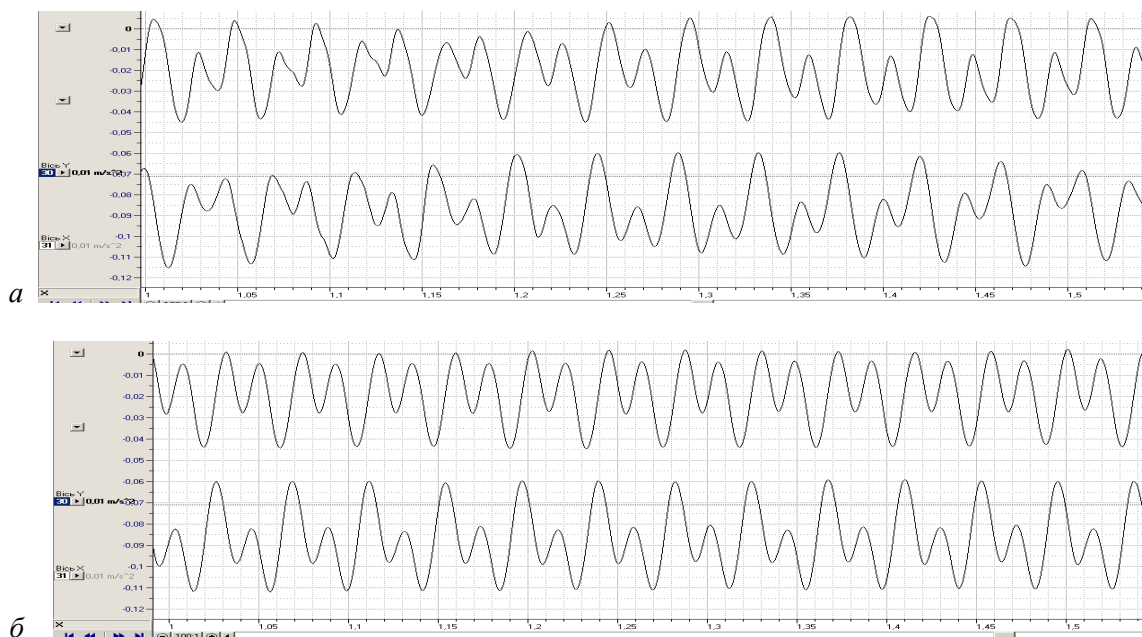


Рис. 6. Віброграма пришвидшення центра мас тримкого тіла у вертикальному та горизонтальному напрямках: а) кратна самосинхронізація не встановилася; б) кратна самосинхронізація встановилася

Результати спектрального аналізу свідчать, що сплески амплітуди вібропришвидшень відбуваються на частотах збудюючих 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 при обертанні усіх трьох віброзбудників у разі невстановлення кратного-синхронного режиму (рис. 8, а).

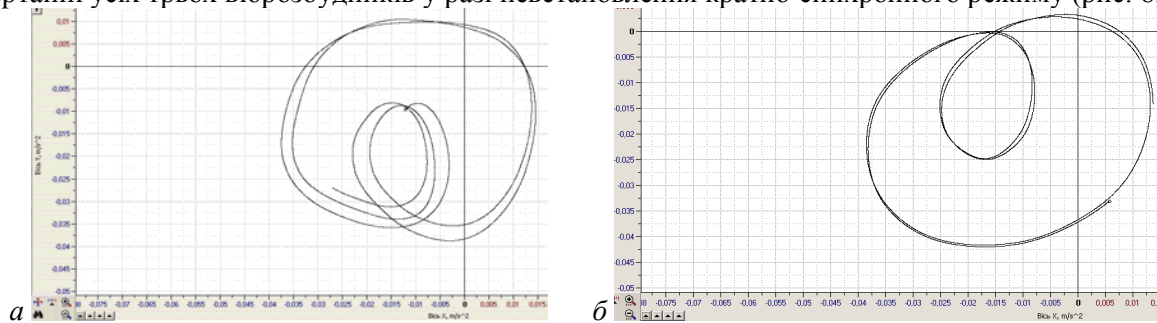


Рис. 7. Траєкторія руху центра мас тримкого тіла в разі: а) не встановлення кратної самосинхронізації збудників; б) встановлення кратної самосинхронізації

У випадку встановлення кратної самосинхронізації збудників (рис. 8, б), сплески вібропришвидшень відбуваються вже на дещо інших частотах – $23,46\text{Гц}$ та $46,92\text{Гц}$, які, як і має 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.

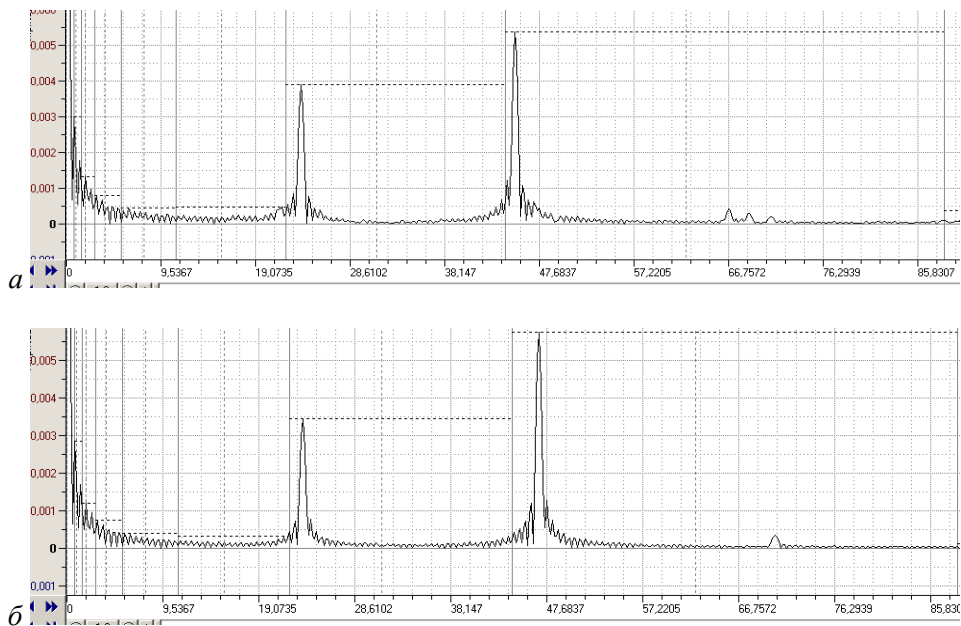


Рис. 8. Спектральний аналіз вібропришвидшень центра мас тримкого тіла в вертикальному напрямку в разі: а) не встановлення кратної самосинхронізації; б) встановлення кратної самосинхронізації

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

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

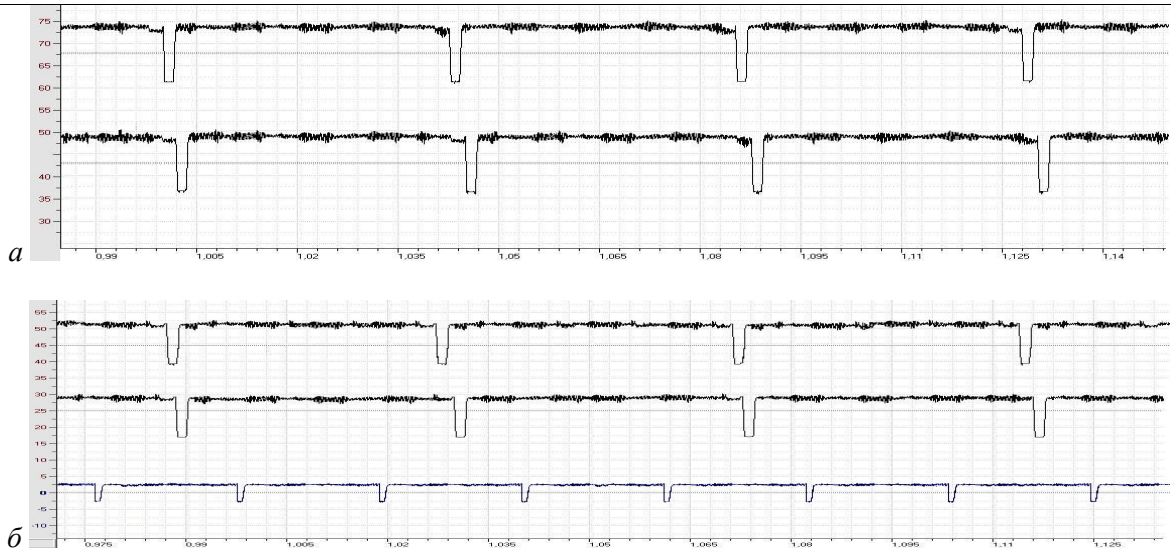


Рис. 9. Віброграми сигналів цільових фотодатчиків роторів збудників: а) двох крайніх збудників; б) трьох збудників

Висновки. Показано можливість посилення тенденції віброзбудників до кратної самосинхронізації за допомогою удосконаленого підсилюючого пристрою, однак воно є недостатнім для практичного використання ефекту. Суттєво розширити стабільність кратносинхронного режиму обертання дебалансних віброзбудників можливо в разі використання перетворювачів частоти для корекції кутових швидкостей електродвигунів, при цьому розбіжність між частотою ротора збудника, який обертається з подвійною кутовою швидкістю та подвійною синхронною частотою збудників, що обертаються з основною швидкістю, не повинна перевищувати $0,5-1\%$.

Проведені 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. – 789с.
2. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. – 352с.
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 / ПиКАД: 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. Иориш Ю.И. Виброметрия / М.: Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1963. – 771 с.