

Силивонюк А.В.  
*Луцький національний технічний університет*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ З БІГАРМОНІЧНИМИ ЗБУДНИКАМИ В ПАКЕТІ SIMULINK, СЕРЕДОВИЩА MATLAB

Розроблено динамічну модель для дослідження вібраційної машини з бігармонічними збудниками та плоским характером руху несучого тіла в пакеті Simulink, середовища MATLAB. Показані переваги щодо використання бібліотек Simulink і SimPowerSystems при моделюванні такого класу машин. Приводяться результати комп'ютерного моделювання в усталеному режимі роботи.

**Ключові слова:** вібраційна машина, самосинхронізація, дебалансний віброзбудник, бігармонічна вібраційна машина, MATLAB, Simulink, SimPowerSystems.

**Постановка проблеми.** Вібраційні машини успішно працюють у найрізноманітніших галузях промисловості та господарствах країни. Найпоширенішим приводом більшості з них є дебалансний завдяки компактності при великій збурювальній силі та відносній простоті конструкцій. В останні роки інтенсифікація технологічного процесу відбувалася єдиним шляхом – за рахунок підвищення частоти коливань. У виробництво було запущено велику кількість так званих «високочастотних» вібраційних машин практично ідентичних конструкцій. Однак, основним напрямком інтенсифікації процесу тонкого грохочення або ущільнення є застосування нових конструктивних схем, що реалізують високодинамічні режими роботи, наприклад, полігармонічні. Перспективною конструкцією вібраційних машин нового типу є бігармонічні машини з чотирма дебалансними віброзбудниками. Виявити переваги та недоліки такої машини доцільно на етапі ескізного проектування з використанням комп'ютерного моделювання. Для цих цілей необхідно розробити математичну модель вібраційної машини з бігармонічним інерційним приводом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У процесі створення високоефективних та надійних вібраційних машин важливе значення має явище самосинхронізації механічних віброзбудників. На теперішній час це явище вивчене досить повно, розроблена теорія і методи розрахунку вібраційних машин зі збудниками, що самосинхронізуються. Самосинхронізація широко використовується у вібраційній техніці як в Україні, так і за кордоном. Основний вклад в розробці теорії синхронізації належить І.І. Блехману. Ним з єдиної точки зору розглянуті різні аспекти теорії синхронізації, при цьому велика увага приділена вивченню синхронізації механічних збудників [1–3]. Випадки кратної самосинхронізації механічних віброзбудників розглянуті в [4–6], де звертається увага на те, що вібраційні моменти, які характеризують динамічний зв'язок між роторами збудників, порівняно малі і використовувати ефект кратної самосинхронізації (на відміну від простої) досить складно.

На сьогоднішній час спостерігається підвищений інтерес щодо використання полігармонічних (частковий випадок – бігармонічних) коливань несучого тіла вібраційних машин у різних галузях промисловості та господарствах країни. В більшості праць [7–18] основна увага приділяється дослідженню процесу грохочення, концентрації на столах, ущільненню. Робота [10] присвячена детальному аналізу існуючих конструкцій бігармонічних грохотів і перспективність їх застосування не лише для розділення звичайних сипучих матеріалів (піску, гіпсу, гравію, цементу), але й вологих матеріалів (мокре грохочення). Однак можливості практичного використання бігармонічних коливань несучого тіла ще далеко не вичерпані. Розглядається перспективна можливість застосування таких коливань несучого тіла для ущільнення залізобетонних виробів [16–18] і для сегрегації сипучих матеріалів.

**Опис системи.** При дослідженні динаміки вібраційних машин та пристроїв різної складності доцільно застосовувати пакет Simulink середовища MATLAB. Диференціальні рівняння в цьому середовищі записуються у вигляді структурної моделі Simulink з використанням блоків, тобто система подається у вигляді діаграми, у якій блоки зв'язуються між собою певним чином. Також, в Simulink є можливість додаткового встановлення бібліотеки SimMechanics, яка призначена для моделювання просторових рухів твердотільних машин і механізмів на стадії інженерного проектування, використовуючи закони теоретичної механіки [19, 20], однак використання даної бібліотеки в даній роботі не розглядається.

До пакету Simulink входить потужна бібліотека SimPowerSystems, яка на даний час вважається однією з кращих бібліотек для моделювання електротехнічних пристроїв і систем. Вона містить набір блоків для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв. До складу SimPowerSystems входять моделі пасивних і активних електротехнічних елементів, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, ліній електропередачі тощо. Є також розділ, що містить блоки для моделювання пристроїв силової електроніки, включаючи системи управління для них. Використовуючи можливості Simulink і SimPowerSystems, можна розрахувати сталий режим роботи системи на змінному струмі, виконати розрахунок імпедансу (повного опору) ділянки ланцюга, отримати частотні характеристики, проаналізувати стійкість, а також виконати гармонічний аналіз струмів і напруг [21, 22].

Таким чином, використання Simulink і SimPowerSystems дозволить: оцінити енерговитрати, що виникають при пуску електромеханічної системи при ударних навантаженнях на вібраційну машину в усталеному режимі роботи; розробити рекомендації щодо підбору типу і потужності приводних електродвигунів для вібраційної машини з метою зменшення витрат електроенергії в усталеному режимі роботи; виробити наукові основи і технічні рекомендації для проектування нових перспективних типів вібраційних машин.

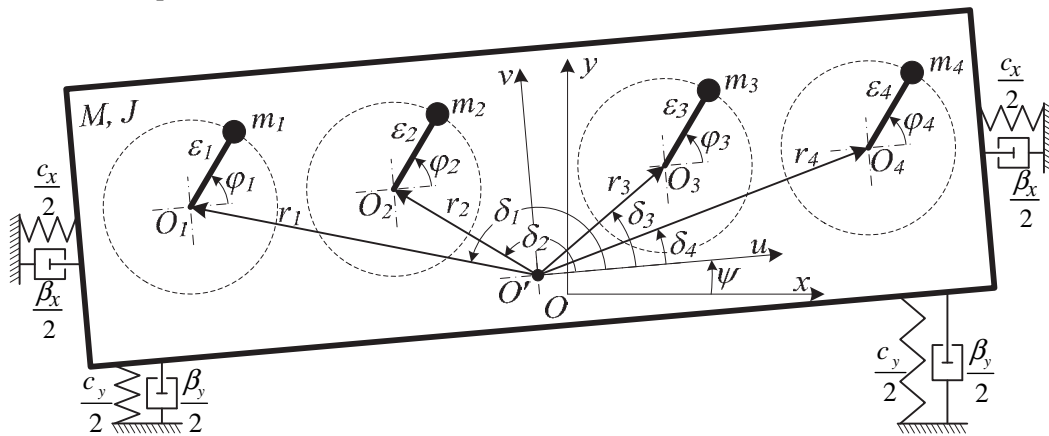


Рисунок 1. Схема коливальної системи

**Рівняння руху системи.** Більшість вібраційних машин і пристроїв може бути ідеалізовано у вигляді схеми, у якій несуче тверде тіло, зв'язаного з нерухою основою системою пружних і демпфуючих елементів. У якості збудників коливань найчастіше використовують дебалансні віброзбудники, що являють собою незрівноважені ротори. У розглянутому випадку чотири таких збудники розміщені на м'яко-амортизованому твердому тілі (віброуючому робочому органі), яке може рухатися паралельно площині, перпендикулярній осям обертання роторів  $O_1, O_2, O_3, O_4$  збудників (Рис. 1). Центр ваги  $O$  несучого тіла лежить у площині, що проходить через зазначені осі. Ротори віброзбудників приводяться в обертання незалежними асинхронними електродвигунами.

Нехай  $x$  та  $y$  – координати центру ваги  $O$  в нерухомій системі координат  $xOy$ , а  $\psi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – відповідно, кути повороту несучого тіла і роторів збудників. Диференціальні рівняння руху коливальної системи запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} + \beta_x \dot{x} + c_x x &= \sum_{i=1}^n m_i \varepsilon_i (\ddot{\varphi}_i \sin \varphi_i + \dot{\varphi}_i^2 \cos \varphi_i), \\
 M\ddot{y} + \beta_y \dot{y} + c_y y &= \sum_{i=1}^n m_i \varepsilon_i (\ddot{\varphi}_i^2 \sin \varphi_i - \ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i), \\
 J\ddot{\psi} + \beta_\psi \dot{\psi} + c_\psi \psi &= \sum_{i=1}^n m_i \varepsilon_i r_i (\dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_i - \delta_i - \psi) - \ddot{\varphi}_i \cos(\varphi_i - \delta_i - \psi)), \\
 I_i \ddot{\varphi}_i &= L_i(\dot{\varphi}_i) - R_i(\varphi_i) + m_i \varepsilon_i \begin{bmatrix} \ddot{x} \sin \varphi_i - \ddot{y} \cos \varphi_i - g \cos \varphi_i - \\ -r_i \ddot{\psi} \cos(\varphi_i - \delta_i - \psi) - r_i \dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_i - \delta_i - \psi) \end{bmatrix}, \\
 &(i = 1, \dots, 4).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $M$  – загальна маса несучого тіла;  $J$  – момент інерції несучого тіла відносно осі, яка проходить через центр ваги;  $I_i$  – момент інерції  $i$ -го ротора збудника щодо осі його обертання;  $m_i, \varepsilon_i$  – відповідно, маса  $i$ -го ротора збудника і його ексцентриситет;  $\beta_x, \beta_y, \beta_\psi$  – коефіцієнти в'язкого опору;  $c_x, c_y$  – жорсткості

пружин на зсув і розтяг–стиск відповідно;  $c_{\psi} = c_y l^2$ ;  $r_i$  – відстань від осі ротора  $i$ -го збудника до центру мас несучого тіла;  $l$  – відстань, що визначає положення осей пружин;  $L_i(\dot{\phi}_i)$ ,  $R_i(\dot{\phi}_i)$  – обертовий момент  $i$ -го двигуна і момент сил опору обертанню;  $g$  – прискорення вільного падіння. Положення  $i$ -го віброзбудників у рухомій системі координат визначається полярними координатами з радіус-вектором  $r_i$  та полярним кутом  $\delta_i$ .

Перші три рівняння системи (1) описують коливання несучого тіла в площині  $xOy$ , інші рівняння – обертання роторів віброзбудників. В загальному випадку ми отримаємо систему з семи нелінійних диференціальних рівнянь. Однак для того, щоб система була замкнута необхідно задатися обертовими моментами  $L_i(\dot{\phi}_i)$  двигунів. Для аналізу впливу електромагнітних перехідних процесів в електродвигуні на динаміку руху роторів збудників можна застосувати, так звану, А-модель асинхронного двигуна у косокутних координатах струмів [14, 28] або спрощену динамічну модель асинхронного двигуна [24]. Застосування таких моделей дозволяє досліджувати не лише усталений режим роботи вібраційної машини, але і перехідні процеси (розбій, вибій). Однак перша модель асинхронного двигуна дозволяє отримати і значення пускових струмів, які негативно впливають на електромережу.

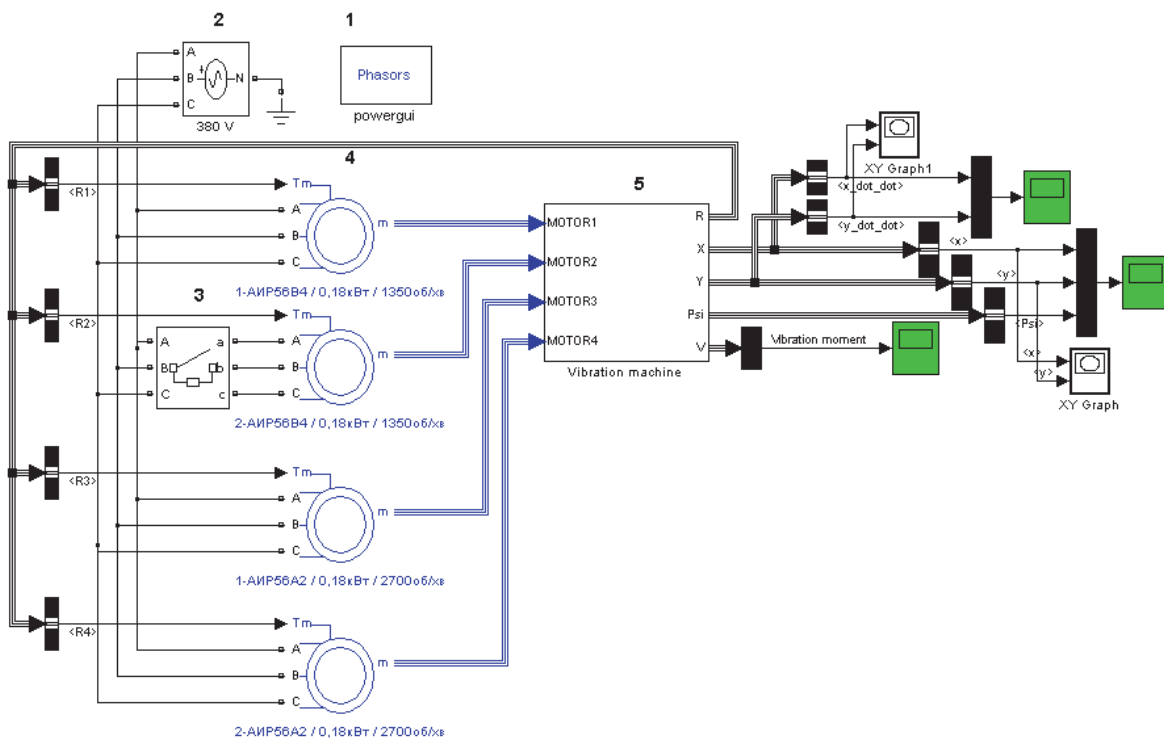


Рисунок 2. Блок-схема вібраційної машини

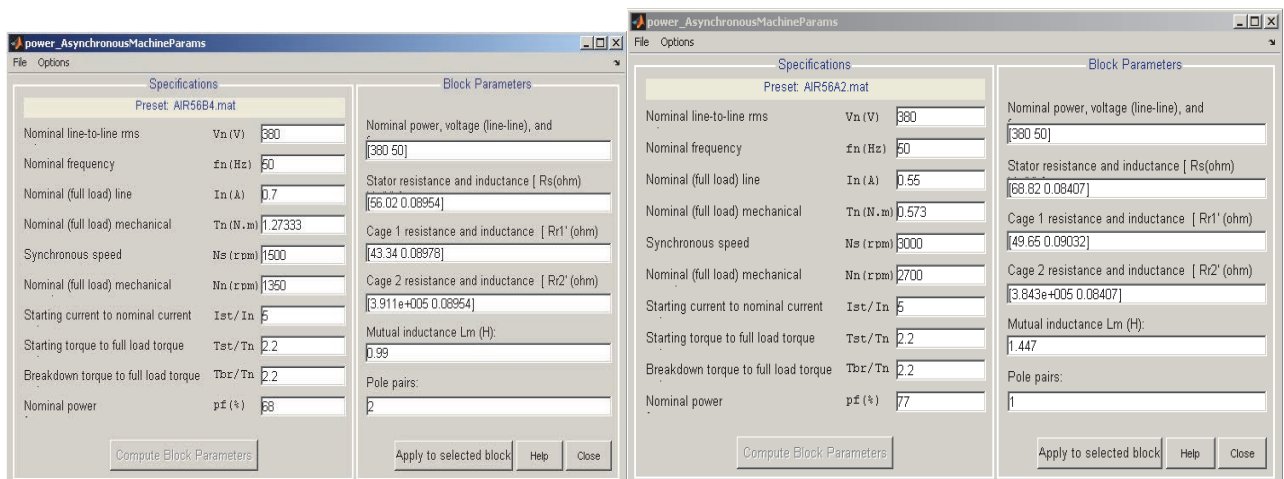


Рисунок 3. Діалогове вікно для визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

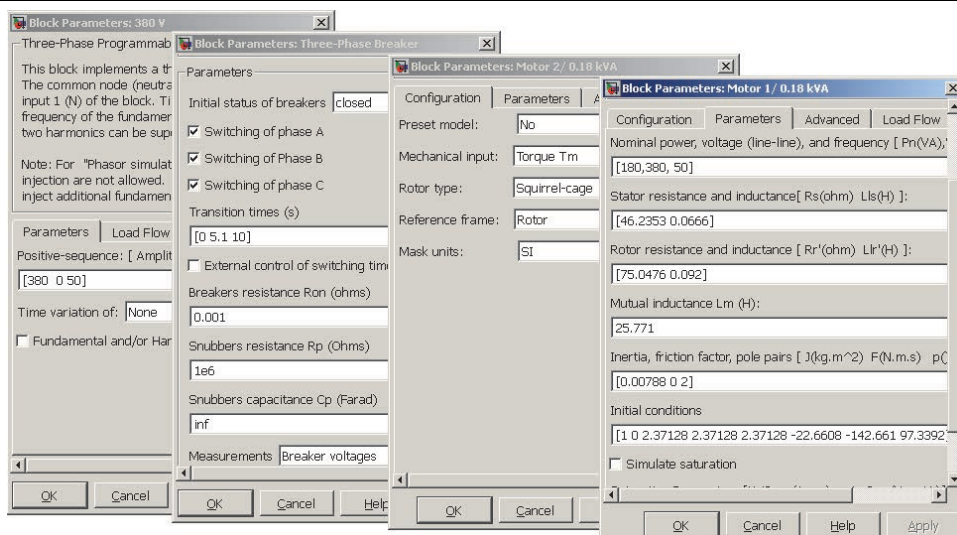


Рисунок 4. Зображення діалогових вікон та параметри блоків

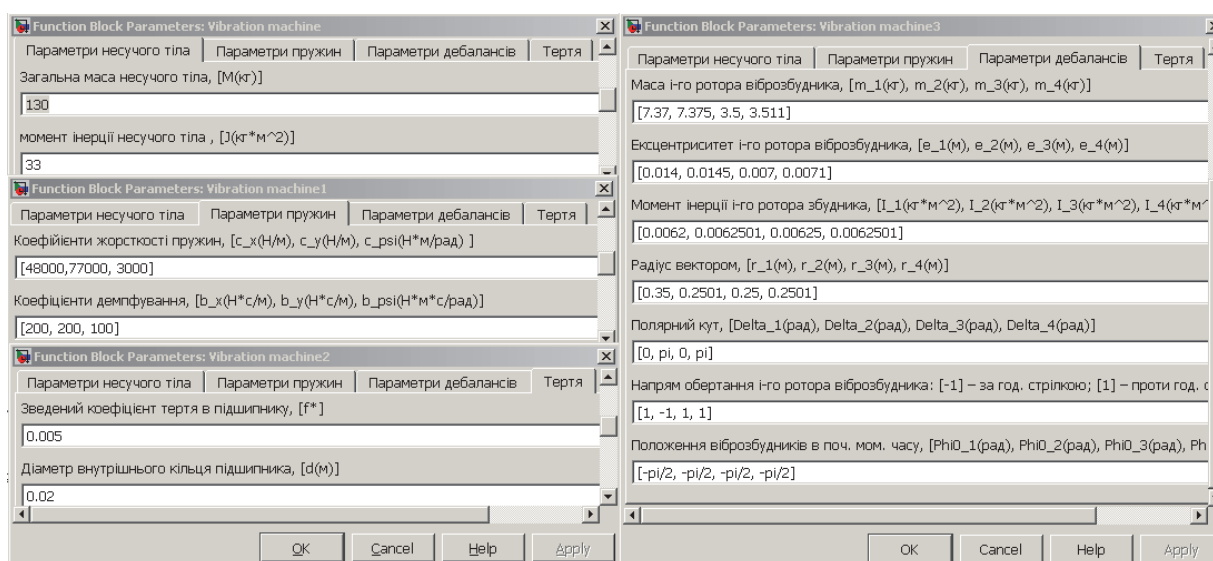


Рисунок 5. Зображення діалогового вікна та параметри блоку вібраційної машини

**Створення моделі бігармонічної вібраційної машини в пакеті Simulink.** На рис. 2 зображена блок-схема вібраційної машини, яка створена в пакеті Simulink із використанням бібліотеки SimPowerSystems. Динамічна модель складається з декількох блоків. Блок Powergui не має ні входів, ні виходів. Він призначений для акумулювання інформації про модель, а також результатів моделювання. Вікно Powergui (поз. 1) дозволяє контролювати змінні моделі в момент ініціалізації і після моделювання. Блок 3-Phase Source (поз. 2) – це джерело енергії. Даний блок використовується для генерації трифазної синусоїдальної напруги. 3-Phase Breaker (поз. 3) – це своєрідний контактор, який призначений для роз'єднання електричного кола. Даний блок використовується для того, щоб симулювати увімкнення/вимкнення асинхронного двигуна у заданий момент часу. 3-Phase Breaker використовують при моделюванні почергового пуску або вібраційного підтримання обертання. Asynchronous Machine (поз. 4) – це асинхронний двигун із короткозамкнутим ротором. У моделі присутні чотири двигуни з яких два обертаються з основною частотою (AIP56B4), а два – з подвійно (AIP56A2). Для визначення параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів можна скористатись роботами [25, 26], в яких використовуються різні методики для знаходження цих параметрів. Однак, вони не завжди точні і є складними у використанні. Параметри схем заміщення двигунів розраховувалась за допомогою команди Matlab – power\_AsynchronousMachineParams. Параметри схеми заміщення для трифазних асинхронних електродвигунів (AIP56B4) із короткозамкнутими роторами потужністю 0,18 кВт та синхронними частотами обертання 1500 об/хв та для AIP56A2 – потужністю 0,18 кВт із синхронними частотами обертання 3000 об/хв приведені на рис. 3. Інші блоки та графічні елементи, що присутні в моделі (рис. 2), призначені для відображення інформації. На рис.

4 наведено зображення діалогових вікон та параметри блоків 3-Phase Source, 3-Phase Breaker, Asynchronous Machine.

**Результати комп'ютерного моделювання.** При комп'ютерному моделюванні параметри вібраційної машини вибирались у відповідності до існуючої експериментальної машини:  $M = 130 \text{ кг}$ ;  $J = 33 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0,0062 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $m_1 = m_2 = 7,37 \text{ кг}$ ;  $m_3 = m_4 = 3,5 \text{ кг}$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,014 \text{ м}$ ;  $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0,007 \text{ м}$ ;  $\delta_1 = \delta_3 = 0 \text{ рад}$ ;  $\delta_2 = \delta_4 = \pi \text{ рад}$ ;  $r_1 = r_2 = 0,35 \text{ м}$ ;  $r_3 = r_4 = 0,25 \text{ м}$ ; початкові положення роторів збудників відповідають кутам:  $\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = \varphi_3(0) = \varphi_4(0) = -\pi/2 \text{ рад}$ ;  $c_x = 48000 \text{ Н/м}$ ;  $c_y = 77000 \text{ Н/м}$ ;  $c_\psi = 3000 \text{ Н/м}$ ;  $\beta_x = \beta_y = 200 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ ;  $\beta_\psi = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$ .

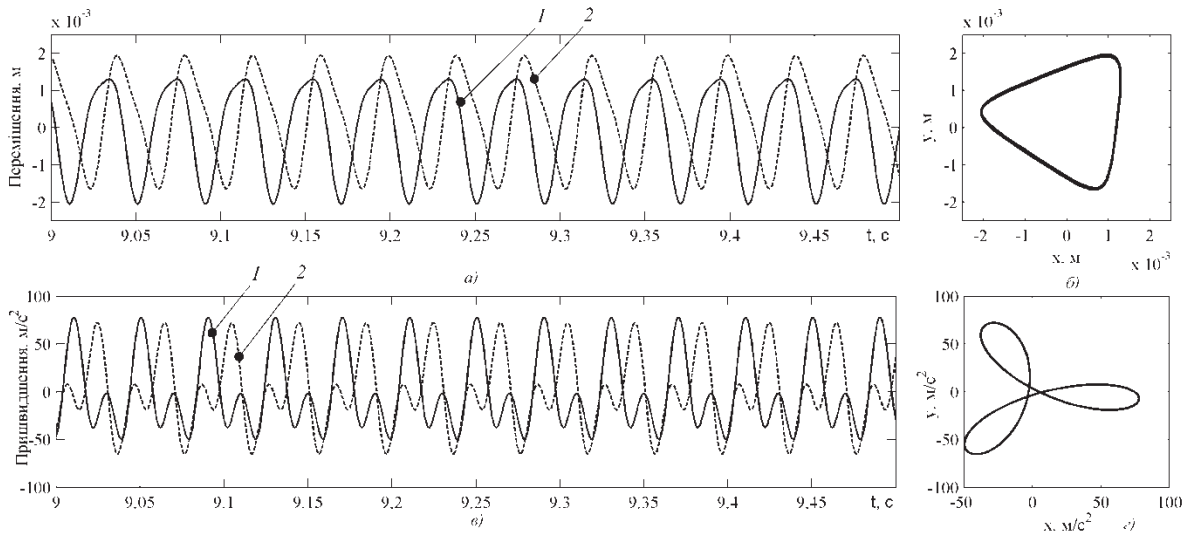


Рис. 6. Залежність від часу переміщення а) та пришвидшення в) центра мас, поля траєкторії б) та віброграма пришвидшення г) несучого тіла: 1 – вздовж осі x; 2 – вздовж осі y

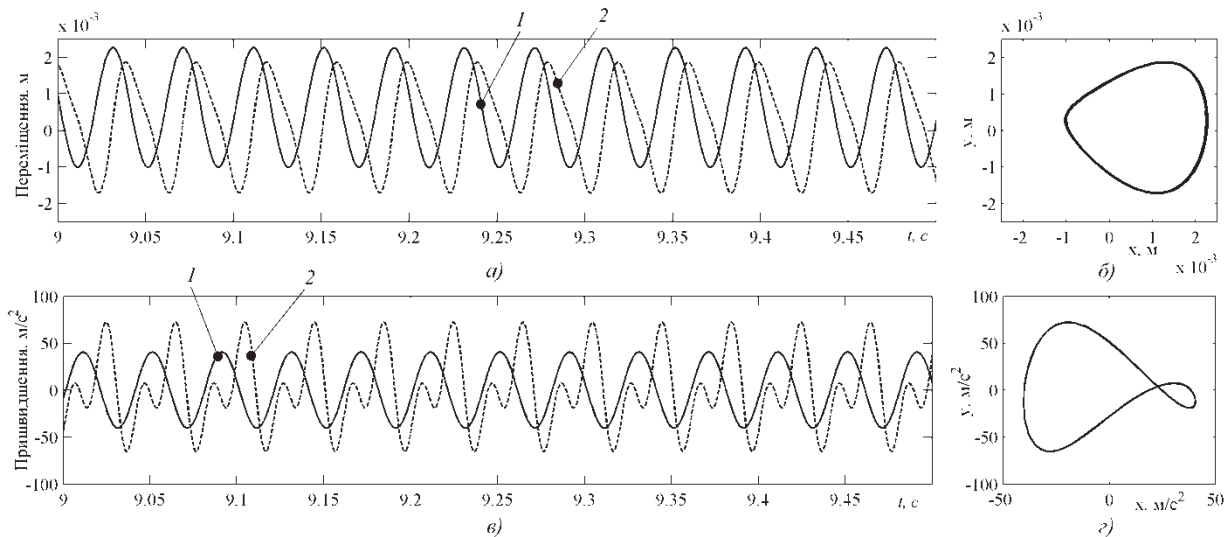


Рис. 7. Залежність від часу переміщення а) та пришвидшення в) центра мас, поля траєкторії б) та віброграма пришвидшення г) несучого тіла: 1 – вздовж осі x; 2 – вздовж осі y

Розглянемо випадок, коли два збудники, що обертаються з основною частотою, обертаються в одному напрямі, а збудники з подвійною частотою – в протилежному напрямі. В результаті чисельного моделювання отримано залежність від часу переміщення та пришвидження (рис. 6 а, в), а також поле траєкторії (рис. 6, б) і віброграма пришвидження (рис. 6, г) центра мас несучого тіла в усталеному режимі роботи вібраційної машини. Згідно з [14] поля траєкторії центра мас у вигляді «трикутника» не застосовують в операції мокрого грохочення корисних копалин, однак така траєкторія виправдана і ефективна при грохоченні тяжкогрохочених матеріалів. З іншої сторони, така

форма траєкторії і пришвидшення може мати місце при ущільненні залізобетонних виробів. Подібну форму траєкторії можна отримати тоді, коли віброзбудники з основними частотами обертання і один з подвійною, обертаються в одному напрямі, а інший (збудник з подвійною частотою) в протилежному напрямі, форма траєкторії центра мас несучого тіла набуває вигляду (рис. 7 а, б). При цьому трикутник має більш округлі сторони, а пришвидшення суттєво змінює форму (рис. 7 в, г).

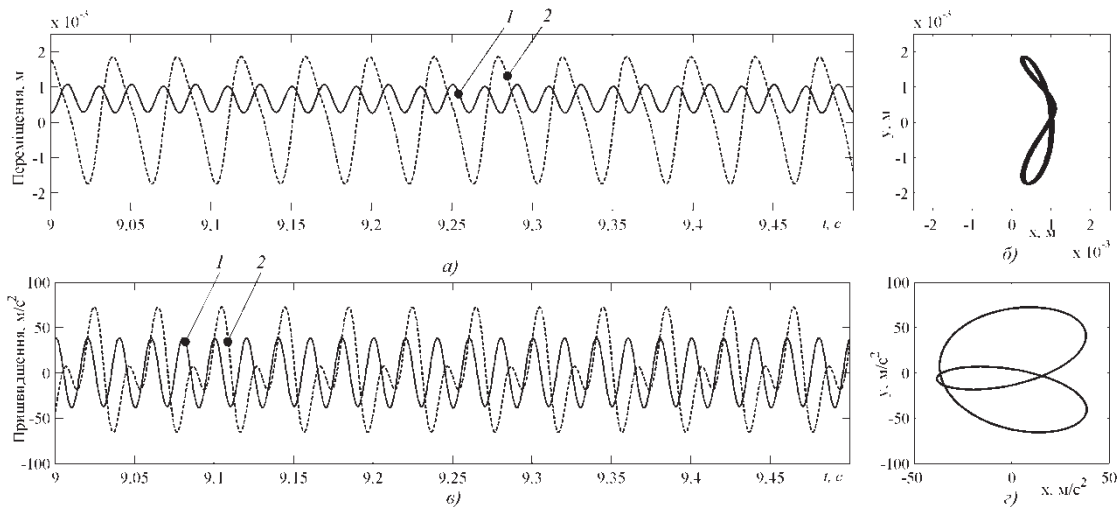


Рис. 8. Залежність від часу переміщення а) та пришвидшення в) центра мас, поля траєкторії б) та віброграма пришвидшення г) несучого тіла: 1 – вздовж осі  $x$ ; 2 – вздовж осі  $y$

У випадку обертання віброзбудників (з основними частотами обертання) в протилежних напрямках, а віброзбудників із подвійними – в одному напрямі, форма траєкторії центра мас несучого тіла (рис. 8 а, б) набуває складної форми видовженої відносно осі  $y$  та зміщеної вздовж осі  $x$  у додатному напрямі. При цьому спостерігається високоєфективна знакозмінна значення пришвидшення (рис. 7 в, г). Такий режим роботи найбільш корисний і ефективний при мокрому грохоченні корисних копалин.

**Висновок.** Чисельно продемонстровано, що вібраційні машини з бігармонічними збудниками є досить ефективними. При цьому продемонстровано, що не змінюючи масо-інерційних параметрів коливної системи, а змінюючи лише напрями обертання віброзбудників, можна отримати різний характер руху несучого тіла. Чисельне моделювання в пакеті Simulink середовища MATLAB, значно полегшує процес моделювання вібраційних машин.

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. – СПб: ИД «Руда и Металлы», 2013. – 640 с.
2. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
3. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. – М.: Наука, 1971. – 896 с.
4. Рагульскис К.М. Кратная синхронизация механических вибраторов // Труды АН ЛитССР. Сер. Б. – 1963. – №. 1 (32). – С. 139–143.
5. Ярошевич Н.П. Сложные случаи в теории самосинхронизации механических вибровозбудителей. – Луцк: ЛДТУ, 2005. – 192 с.
6. Томчина О.П., Кудрявцева И.М., Галицкая В.А. Алгоритмы управление кратной синхронизацией для двухроторных вибрационных установок // В кн. Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика. ИПМаш РАН. – СПб.: Наука, 2009. – С. 456–475.
7. Гончаревич И.Ф. Вибротехника в горном производстве [Текст]/И.Ф. Гончаревич. – М.: Недра, 1992.-319 с.
8. Erlenstadt G. Die DF-Siebmaschine [Text] // Aufbereitungs-Technik. – 1972. – V.13. – №7. – S. 432–434.
9. Modrzewski R. Oscillating Motion of a Double-Frequency Screen [Text] / R. Modrzewski. P. Wodziski // Gornictwo I Geoinżynieria. 33, z.4, 2009. – S. 209-219.
10. Букин С.Л. Интенсификация технологических процессов вибромашин путем реализации бигармонических режимов работы [Текст] / С.Л. Букин, С.Г. Маслов, А.П. Лютый, Г.Л. Резниченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36 (77) - 37 (78). – С. 81–89.
11. Шевченко Г.А. Поличастотные грохоты для разделения тонких сыпучих материалов [Текст] / Г.А. Шевченко, В.Г. Шевченко, А.Р. Кадыров // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36 (77)–38 (79). – С. 44–50.

12. Гарковенко Е.Е. Применение вибрационной техники с бигармоническим режимом колебаний при обогащении углей [Текст] / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, С.Л. Букин и др. // Уголь Украины. – Май 2011. – С. 41–44.
13. Букин С.Л. Динамическая модель бигармонического виброгрохота нового типа [Текст] / С.Л. Букин, С.Г. Маслов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». – 2008. – Вип. 16 (142). – С. 51–56.
14. Букин С. Л. Исследования четырехвibratorной инерционной одномассовой вибромашины в стационарном режиме [Текст] / С.Л. Букин, С.Г. Маслов, Р.А. Шолда // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. пр. / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – Вип. 1 (47) – С.49–60.
15. Патент України на винахід №86267 [Текст] / С.Л. Букин, С.Г. Маслов, О.П. Лютыи // Інерційний грохот. Заявка № а2007 04711 В07В1/40, 27.04.2007 р. Дата публікації 10.04.2009, бюл. №7.
16. Ярошевич М.П., Сылывонюк А.В., Ярошевич Т.С., Забродец И.П. О самосинхронизации двух бигармонических виброизбудителей на несущем твердом теле, совершающем плоские колебания. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: Сб. научных статей: Т. 2. – Юго-Западный университет. – Курск, 2014. – С. 333–339.
17. Ярошевич М.П. Самосинхронізація дебалансних збудників з кратними частотами обертання у вібраційних машинах з плоским рухом робочого органа [Текст] / М.П. Ярошевич, В.М. Тимошук, А.В. Силивонюк // Зб. наук. праць Львівського нац. унів.: Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – Вип 45. – С. 256–262.
18. Патент України на винахід № 99494 [Текст] / Т.С. Ярошевич, М.П. Ярошевич, А.В. Силивонюк, І.П. Забродец // Вібраційний майданчик з бігармонічними коливаннями. В28В 1/08 (2006.01), 08.12.2014р. Дата публікації 10.06.2015, бюл. №11.
19. Лазарев Ю. Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB: Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВHV, 2005. – 512 с.
20. SimMechanics User's Guide. Version 2. The MathWorks, Inc., November 2002. – 522 p.
21. И.В. Черных. "Simulink: Инструмент моделирования динамических систем": Электрон. дан. – М., 2012.
22. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems Simulink И.В. Черных. Электрон. дан. – М., 2012 – Режим доступа: <http://radiomechanic.net/procheye-spravochnaya-literatura/1704-modelirovanie-v-matlab.html>. – Загл. с экрана.
23. Чабан В.Й. Математичне моделювання електромеханічних процесів / В.Й. Чабан. – Львів: вид-во держ. ун-ту «Львівська політехніка», 1997. – 342 с.
24. Блехман И.И., Ярошевич М.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.
25. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кириякин. // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
26. Усольцев А.А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев // Известие высших учебных заведений. Приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 35–41.

## REFERENCES

1. Blehman, I. (2013). *Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv. Vibratsionnaya mehanika i vibratsionnaya tehnika*. St. Petersburg, «Ruda i Metallyi» Publ., 640 p.
2. Blehman, I. (1994). *Vibratsionnaya mehanika*. Moscow, Fizmatlit Publ., 400 p.
3. Blehman, I. (1971). *Sinhronizatsiya dinamicheskikh sistem*. – Moscow, Nauka Publ., 896 p.
4. Ragulskis, K. (1963). Kratnaya sinhronizatsiya mehanicheskikh vibratorov. *Trudy AN LitSSR*. Ser. B. no I (32), pp. 139–143.
5. Yaroshevich, N. (2005). *Slozhnyie sluchai v teorii samosinhronizatsii mehanicheskikh vibrovzbuditeley*. Lutsk, LDTU Publ., 192 p.
6. Tomchina, O., Kudryavtseva, I. & Galitskaya, V. (2009). Algoritmy upravlenie kratnoy sinhronizatsiey dlya dvuhrotornykh vibratsionnykh ustanovok. *Nelineynyye problemy teorii kolebaniy i teorii upravleniya. Vibratsionnaya mehanika. IPMash RAN*. St. Petersburg, Nauka Publ., pp. 456–475.
7. Goncharevich, I. (1992). *Vibrotehnika v gornom proizvodstve*. Moscow, Nedra Publ., 319 p.
8. Erlenstadt, G. (1972). Die DF-Siebmaschine. *Aufbereitungs-Technik*. Vol. 13. no. 7., pp. 432–434.
9. Modrzewski, R. & Wodziński, P. (2009). Oscillating Motion of a Double-Frequency Screen. *Gornictwo I Geoinżynieria*. 33, z.4., pp. 209–219.
10. Bukin, S., Maslov, S., Lyutyiy, A. & Reznichenko, G. (2009). Intensifikatsiya tehnologicheskikh protsessov vibromashin putem realizatsii bigarmonicheskikh rezhimov raboty. *Zbagachennya korisnih kopalyn*: nauk.-tehn. zb. Vol. 36 (77) - 37 (78). Pp. 81–89.
11. Shevchenko G. & Kadyirov, A. (2009). Polichastotnyie grohoty dlya razdeleniya tonkikh syipuchih materialov. *Zbagachennya korisnih kopalyn*: nauk.-tehn. zb. Vip. 36 (77)–38 (79). Pp. 44–50.
12. Garkovenko, E., Nazimko, E., Bukin, S. et al. (2011). Primenenie vibratsionnoy tehniki s bigarmonicheskimi kolebaniyami pri obogashenii ugley. *Ugol Ukrainy*. no. 5 May. Pp. 41–44.
13. Bukin, S. & Maslov, S. (2008). Dinamicheskaya model bigarmonicheskogo vibrogrohoty novogo tipa *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu. Seriya: «Girnicno-elektromehanicna»*. Vol. 16 (142). Pp. 51–56.
14. Bukin S., Maslov, S. & Sholda, R. (2014). Issledovaniya chetyrehvibratornoy inertsiionnoy odnomassovoy vibromashiny v statsionarnom rezhime. *Progresivni tehnologiyi i sistemi mashinobuduvannya: mizhnar. zb. nauk. pr.* Vol. 1 (47). Donetsk, DonNTU Publ., pp. 49–60.

15. BukIn, S., Maslov, S. & Lyutyiy O. (2009). *Inertial vibrating machine*. [Inertsyyniy grohof]. Patent UA no. 86267
16. Yaroshevich, M., Sylyvonyuk, A., Yaroshevich, T. & Zabrodets, I. (2014). O samosinhronizatsii dvuh bigarmonicheskikh vibrozbuditeley na nesuschem tverdom tele, sovershayuschem ploskie kolebaniya. *Vibratsionnyie tehnologii, mehatronika i upravlyаемые mashiny*: Sb. nauchnyih statey: Vol. 2. Kursk, Yugo-Zapadnyiy universitet Publ., pp. 333–339.
17. Yaroshevich M., Timoschuk, V. & Silivonyuk, A. (2011). Samosinhronizatsiya debalansnih zbudnikov z kratnimi chastotami obertannya u vibratsyynih mashinah z ploskim ruhom rabochogo organa. *Avtomatizatsiya virobnychih protsesiv u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni*. Vol. 45. Pp. 256–262.
18. Yaroshevich, T. Yaroshevich, M. Silivonyuk, A. & Zabrodets, I. (2015). *Vibration platform with biharmonic vibrations*. [Vibratsyyniy maydanchik z bigarmonichnymi kolivannyami]. Patent UA no. 99494.
19. Lazarev, Yu. (2005). *Modelirovanie protsessov i sistem v MATLAB: Uchebnyiy kurs*. St. Petersburg, Piter Publ., 512 p.
20. *SimMechanics User's Guide. Version 2*. The MathWorks, Inc., November 2002. 522 p.
21. Chernyih, I. (2012). *Simulink: Instrument modelirovaniya dinamicheskikh system*. Moscow, Elektron. dan. Publ.
22. Chernyih, I. (2012). *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems Simulink*. Moscow, Elektron. dan. Publ. Available at: <http://radiomechanic.net/procheye-spravochnaya-literatura/1704-modelirovanie-v-matlab.html>.
23. Chaban, V. (1997). *Matematichne modelyuvannya elektromechanichnih protsesiv*. Lviv, Lvivska politehnika Publ., 342 p.
24. Blehman, I. & Yaroshevich M. (2009). Perehodnyie rezhimy v inertsionno-vozbuzhdaemyih poslerezonansnyih vibratsyynnyih ustroystvah s neskol'kimi stepenyami svobody nesuschei sistemy. *Nelineynnye problemy teorii kolebaniy i teorii upravleniya. Vibratsionnaya mehanika. IPMash RAN*. – St. Petersburg, Nauka Publ., pp. 110–122.
25. Moschinskiy, Yu., Bepalov, V. & Kiryakin, A. (1998). Opredelenie parametrov shemy zamescheniya asinhronnyih mashin po katalozhnyim dannym. *Elektrichestvo*. No. 4. Pp. 38–42.
26. Usoltsev A. & Lukichev, D. (2005). Opredelenie parametrov modeli asinhronnogo dvigatelya po spravochnyim dannym. *Izvestie vysshih uchebnyih zavedeniy. Priborostroenie*. No. 12. Pp. 35–41.

#### **A. Sylyvonyuk. Research of dynamics of the machine with harmonic vibration exciters in the package Simulink, Matlab environment.**

Developed a dynamic model for research the machine with biharmonic vibration exciters and flat character of the movement of the carrier body in the package Simulink, environment MATLAB. The advantages of the use of Simulink library and SimPowerSystems the simulation of this class of machines. The results of computer simulation in steady-state operation.

**Keywords:** vibration machine, self-synchronization, the unbalance exciter, harmonic vibration machine, MATLAB, Simulink. SimPowerSystems.

#### **A.B. Сильвонюк. Исследование динамики вибрационной машины с бигармоническими возбудителями в пакете Simulink, среды MATLAB.**

Разработана динамическая модель для исследования вибрационной машины с бигармоническими возбудителями и плоским характером движения несущего тела в пакете Simulink, среды MATLAB. Показаны преимущества по использованию библиотек Simulink и SimPowerSystems при моделировании такого класса машин. Приводятся результаты компьютерного моделирования в установленном режиме работы.

**Ключевые слова:** вибрационная машина, самосинхронизация, дебалансный вибровозбудитель, бигармоническая вибрационная машина, MATLAB, Simulink. SimPowerSystems.

#### **АВТОР:**

**СИЛИВОНЮК Андрій Володимирович**, к.т.н., доцент кафедри обладнання лісового комплексу та теорії механізмів машин, Луцький національний технічний університет; e-mail: [andriy.sylyvonyuk@gmail.com](mailto:andriy.sylyvonyuk@gmail.com)

#### **AUTHOR:**

**Andriy SYLYVONYUK**, Ph.D., Assistant Professor of Forest Complex Equipment and Theory of Machines Mechanisms, Lutsk National Technical University; e-mail: [andriy.sylyvonyuk@gmail.com](mailto:andriy.sylyvonyuk@gmail.com)

Стаття надійшла в редакцію 17.09.2015р.