

УДК 622.8:331.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.7.1055

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

БЕЛІКОВ А. С.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
ЯЛАНСЬКИЙ О. А.², канд. техн. наук, доц.,
БАРАБАНОВ С. С.³, асп.,
СЛАЩОВА О. А.⁴, канд. техн. наук, с. н. с.,
ІКОННИКОВ М. Ю.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра електропривода, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

³ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁴ Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁵ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: ikonnikovm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2977-2007

Анотація. Постановка проблеми. Довготривала безпечна експлуатація будівель і споруд неможлива без визначення стійкості їх несних елементів, особливо після струсів і динамічних навантажень за впливу вибухів і пожеж. У таких умовах достовірний і продуктивний моніторинг надійності будівель і споруд стає найважливішим елементом підвищення безпеки людей. Віброакустика – ефективний і інформативний метод, який дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін та інших видів конструкцій. Однак для підвищення швидкості та якості визначення стану об'єктів потрібна максимальна автоматизація систем віброакустичного контролю. **Мета дослідження.** – підвищення продуктивності та достовірності віброакустичного контролю будівель і споруд шляхом автоматизації ударної дії із заданими параметрами на базі розробки динамічних моделей складних коливань. **Методика.** Аналітичні дослідження динамічних кінематичних моделей збуджувача механічних коливань, комп'ютерне моделювання, лабораторні випробування системи керування вібраційним збуджувачем. **Результати.** Розроблено моделі складних коливань, які дозволяють підвищити надійність та реалізувати нові закони керування, неможливі для класичних вібраційних систем та необхідні для систем автоматизованого віброакустичного контролю будівель та споруд і забезпечення безпеки їх експлуатації. Обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності у схемі обчислення за алгоритмом Jack W. Stenshaw в більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж із початковими значеннями коефіцієнтів для пристроїв керування вібраційними машинами з обмеженою обчислювальною продуктивністю. Це необхідно для створення виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного моніторингу тріщин та порушень однорідності несних конструкцій будівель і споруд. Збуджувач коливань апробований в лабораторних умовах. **Наукова новизна.** Розроблено нові методи й алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання полічастотних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів із заданими амплітудними та частотними характеристиками. **Практична значимість.** Розроблено збуджувач коливань для системи автоматизованого віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. Це дає необхідну і достатню базу для удосконалення методів оцінювання зміни структури середовища внаслідок прояву тріщин та порушення однорідності.

Ключові слова: моделі складних коливань; віброакустичний моніторинг; безпека будівель і споруд; автоматизація систем контролю

DEVELOPMENT OF MODELS COMPLEX OSCILLATIONS FOR AUTOMATION SYSTEMS OF VIBROACOUSTIC OPERATIONAL SAFETY CONTROL OF BUILDINGS AND STRUCTURES

BYELIKOV A.S.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
YALANSKIY O.A.², *Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BARABANOV S.S.³, *Postgrad. Stud.*,
SLASHCHOVA O.A.⁴, *Ph. D. (Tech.), Sen. Res.*,
IKONNIKOV M.Yu.⁵, *Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

³ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁴ Department of Mineral Mining at Great Depths, the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine, 2a, Simferopolska St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁵ Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: ikonnikovm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2977-2007

Abstract. Problem statement. Long-term safe operation of buildings and structures is impossible without determining the stability of their load-bearing elements, especially after shocks and dynamic loads under the influence of explosions and fires. In such conditions, reliable and productive monitoring of the reliability of buildings and structures is a critical element in increasing human safety. Vibroacoustic is an effective and informative method that allows for non-destructive assessment of the condition of concrete, reinforced concrete, brick, multi-layer walls and other types of structures. However, to increase the speed and quality of determining the state of objects, maximum automation of the vibroacoustic method is required. **Purpose of the study.** Increasing the productivity and reliability of vibroacoustic monitoring of buildings and structures by automating the impact action with specified parameters based on the development of dynamic models of complex oscillations. **Methods.** Analytical studies of dynamic and kinematic models of the exciter of mechanical vibrations, computer modeling, laboratory tests of the vibration generator control system. **Research results.** Models of complex oscillations have been developed to improve reliability and implement new control laws that are impossible for classical vibration systems and are necessary for automated vibroacoustic control of buildings and structures and ensure the safety of their operation. The use of reduced bit depth coefficients in the calculation scheme using the Jack W. Crenshaw algorithm is justified in a wider range of argument values than with initial coefficient values for controlling vibration systems with limited computational performance. This is necessary when creating executive bodies of modern systems for automated vibroacoustic monitoring of the cracks and violations of the homogeneity of load-bearing structures of buildings and structures. The oscillation exciter has been tested in laboratory conditions. **Scientific novelty.** New methods and algorithms for automatic control of vibration exciters have been developed to obtain polyfrequency oscillations, linear waves and wave fields with specified amplitude and frequency characteristics. **Practical significance.** An oscillation exciter has been developed for a system of automated vibroacoustic control of the buildings and structures operation safety. This provides a necessary and sufficient basis for improving methods for assessing changes in the environment as a result of the appearance of cracks and loss of homogeneity.

Keywords: *models of complex oscillations; vibroacoustic monitoring; safety of buildings and structures; automation of control systems*

Постановка проблеми. Актуальність оцінення стану будівель і споруд, насамперед, пов'язана із застарілістю основних фондів, відсутністю своєчасного і якісного їх ремонту. Крім цих факторів на будівлі діють струси і динамічні навантаження під час вибухів і пожеж, що викликає накопичення внутрішніх

пошкоджень, значне руйнування матеріалів споруд і виникнення аварійних ситуацій.

У таких умовах достовірний і продуктивний моніторинг характеристик надійності та стійкості конструкцій будівель виявляється найважливішим елементом підвищення безпеки людей.

Для оцінення стійкості у працях [1; 2] запропоновано застосовувати метод

математичного моделювання, за допомогою якого можуть бути визначені сценарії зміни напружень у разі зміни умов, що впливають на стійкість об'єкта контролю. Разом із тим прогноз розвитку процесів руйнування вимагає якісного програмного забезпечення, великих обчислювальних витрат і наукоємного аналізу даних. У праці [3] позначено, що моніторинг просторових та тимчасових варіацій продуктів розпаду радону може допомогти відслідковувати зміни небезпечних руйнівних процесів, що дозволяє знизити ризики втрати стійкості об'єктів.

Вирішення питань безпеки пов'язане з частковою невизначеністю поведінки об'єкта контролю у певних умовах. Для подолання невизначеностей у працях [4; 5] запропоновано оперувати діапазонами значень параметрів, межі яких визначаються, зокрема, й аналітичними методами з урахуванням різних нечітких моделей. При цьому будь-які оцінки стійкості та безпеки об'єктів контролю мають базуватися на первинних даних, отриманих шляхом якісного та об'єктивного моніторингу.

Разом із тим, для моніторингу і діагностики стійкості споруд найкраще застосовувати геофізичні методи неруйнівного контролю, зокрема, віброакустичний [6]. Віброакустика – ефективний та інформативний метод, який апробований в різних умовах, дозволяє провести неруйнівну оцінку стану бетонних, залізобетонних, цегляних, багатошарових стін перекриттів та інших видів конструкцій.

Суть віброакустичного контролю полягає в аналізі сигналів акустичного відгуку контрольованого об'єкта на збурювальний вплив із метою оперативного визначення стану об'єкта. Віброакустичний контроль безпеки функціонування будівель і споруд дозволяє виконувати такі завдання:

- контролювати структуру, тріщинуватість у процесі їх експлуатації;
- контролювати структуру, тріщинуватість та міцність після обрушення окремих частин конструкції;

- контролювати допустиме навантаження частин конструкції після підсилення;

- визначати потенційні загрози та ідентифікувати ризики втрати стійкості після пожежі та вибухів.

Однак для підвищення швидкості й якості визначення стану об'єктів і структури накопичення в їх елементах суттєвих пошкоджень потрібна максимальна автоматизація віброакустичного методу. Для систем автоматизації необхідне розроблення нових моделей складних коливань

Тому питання забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з урахуванням удосконалення віброакустичного методу актуальне та потребує подальших досліджень.

Мета дослідження – підвищення продуктивності та достовірності віброакустичного контролю будівель і споруд шляхом автоматизації ударної дії з заданими параметрами на базі розробки динамічних моделей складних коливань.

Результати досліджень. Механічні коливання – фізичне явище, один із характерних станів природних об'єктів, зокрема, масивів, а також спостерігається в роботі значної кількості механічних (наприклад, геотехнічних) та електромеханічних систем. Збудження коливань із заданими енергетичними, кінематичними, динамічними та геометричними параметрами становить основне завдання приводів (зокрема, електричних) вібраційних систем, які широко застосовуються в усіх галузях промисловості та в прикладних наукових дослідженнях (рис. 1).

У рамках вирішення питання безпеки експлуатації будівель і споруд, в тому числі гірничих виробок, вкрай важливі своєчасність та швидкість контролю об'єктів. У переважній більшості для віброакустичного контролю при збудженні механічних коливань використовуються удари, що проводяться вручну з різною інтенсивністю та амплітудою. Це негативно впливає на якість одержуваних результатів. Зрозуміло, що необхідна автоматизація процесу збудження коливань, створення

різних форм і амплітуди вібраційних впливів на контрольований об'єкт.

Автоматизацію і підвищення якості процесу контролю можна виконати з використанням, наприклад, привода з електричною машиною обертального руху, редуктором, передачею та механізмом перетворення обертального руху на коливальний (хитання, прямолінійний або пласко-паралельний рух, рис. 2). В різних вібраційних системах комбінація ланок

цього ланцюга передачі та перетворення руху може варіюватися. Електропривід або нерегульований, або регульований з низькою якістю керування і кількістю регульованих величин від однієї до трьох у деяких випадках. Такі системи привода мають низку суттєвих недоліків, серед яких: значна маса передачі та неможливість зміни параметрів коливань, характер яких визначається конструктивно кінематикою механізму перетворення руху.

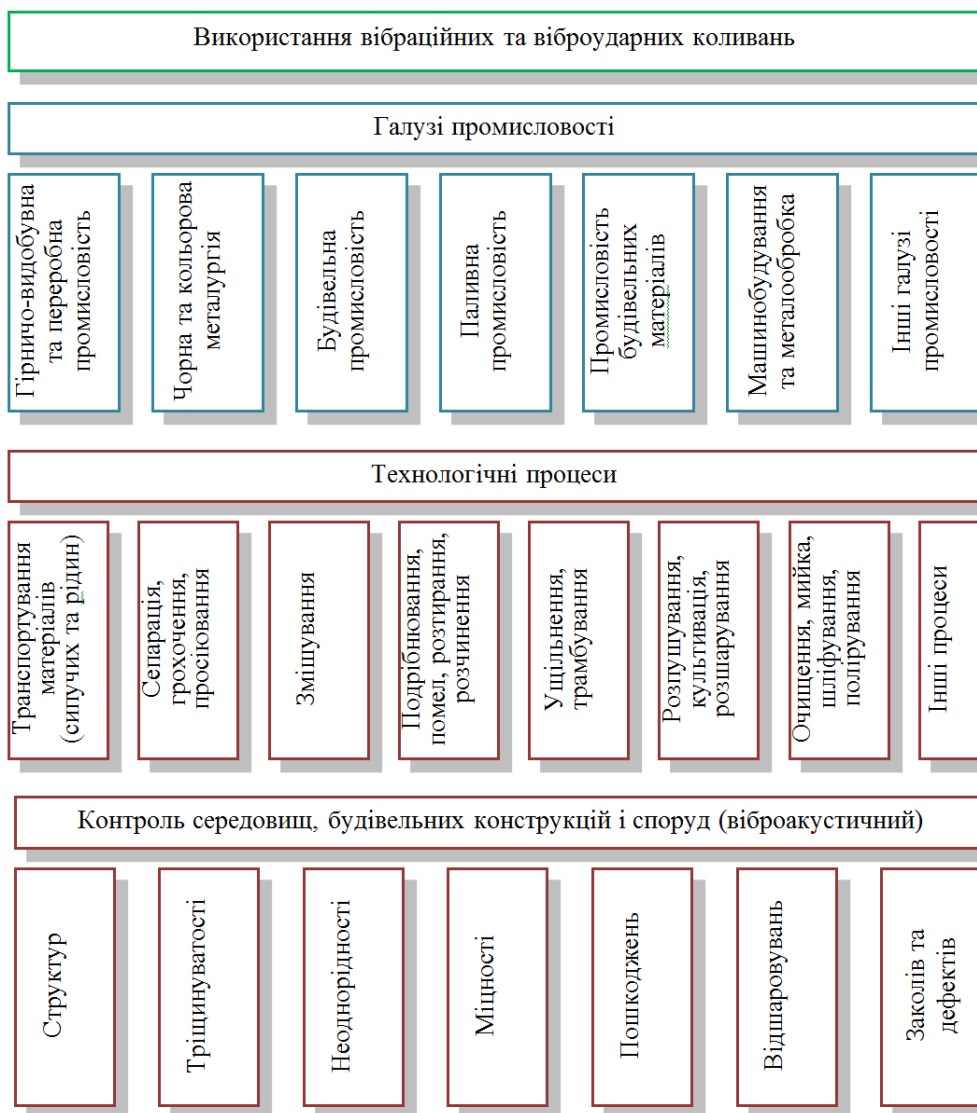


Рис. 1. Застосування вібраційних коливань у виробничій сфері та наукових дослідженнях

Отож, найслабшою ланкою виявляється саме цей механізм. Тому запропоновано прямий керований привід (генератор-збуджувач коливань), який дозволяє виключити цю ланку і не тільки позбутися зазначених недоліків, а й поліпшити технологічні характеристики вібраційної

системи, а також розширити сферу застосування такого привода.

Можливі такі способи застосування запропонованого генератора – збуджувача коливань:

- дослідження сейсмостійкості фізичних моделей будівель, промислових та гідротехнологічних споруд, їх окремих

конструкцій та елементів (фундаментів, каркасів, арок, балок, стін, перекриттів тощо);

- дослідження лінійно-протяжних та висотних споруд, схильних до виникнення коливань, резонансів та розповсюдження хвиль (мостів, шляхопроводів, підвісних канатних та монорельсових доріг, трубопроводів, тунелів, стволів, виробок, висотних будівель, башт, елеваторів, доменних печей, димових труб, градирень) тощо;

- генерація електричного задавального сигналу та збудження механічних коливань у мобільних комплексах віброакустичної сейсмозвідки, стаціонарних системах та в автономних приладах віброударного та віброакустичного контролю кріплення виробок, оздоблення тунелів, контролю навантаженості кріплення та взаємодії в системі «кріплення – породний масив», контролю стійкості будівель і споруд для забезпечення безпеки їх експлуатації.

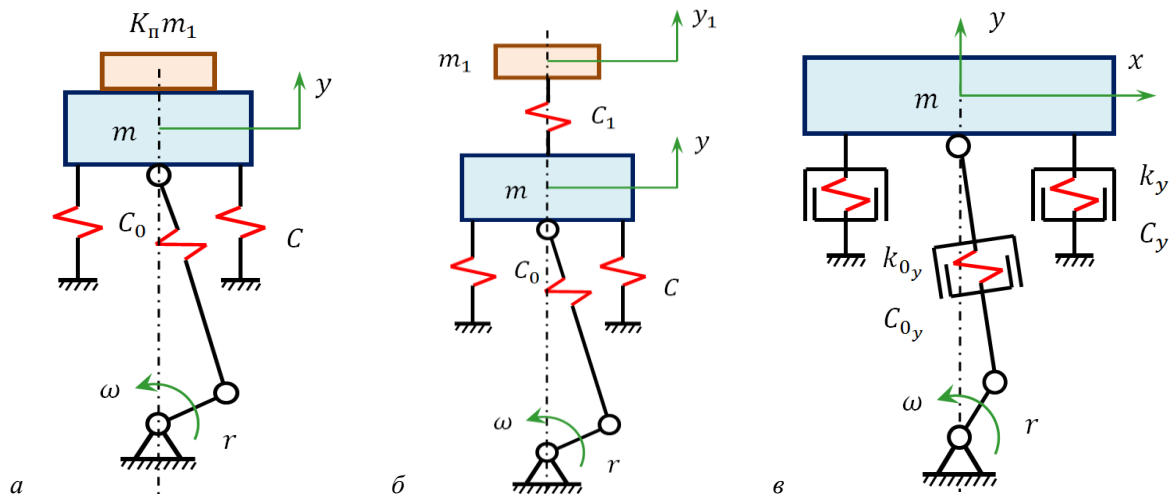


Рис. 2. Типові динамічні моделі збуджувача механічних коливань: а, б – з урахуванням технологічного навантаження; в – з нелінійним демпфером; C_y, C_{0y} – жорсткості вздовж осі y ; k_y, k_{0y} – коефіцієнти гістерезисних в'язких опорів

У загальному випадку це дослідження відгуку природних та штучних технічних об'єктів та їх масштабних плоских і просторових фізичних моделей на імпульсні, коливальні гармонічні і негармонічні та хаотичні збуджувальні впливи [7; 8], спостереження резонансних та інтерференційних явищ, а також розроблення методів та алгоритмів пасивної та/або активної корекції/компенсації за автоматизованого керування такими об'єктами.

Розглянемо типові динамічні моделі класичних вібраційних систем (рис. 2, а, б). Ці моделі є лінійними коливальними системами. Перша з них (рис. 2, а) враховує технологічне навантаження як приєднану масу m_1 з еквівалентним коефіцієнтом приєднання K_n до основної зведеної маси m . Друга модель (рис. 2, б) враховує пружні та інерційні властивості технологічного

навантаження. Диференційні рівняння руху цих систем запишемо як суперпозицію усіх сил, що прикладені до центрів мас:

$$\begin{cases} (m + K_n m_1) \ddot{y} + C_y = C_0 r \sin \omega t, \\ m \ddot{y} + C_y + C_1 (y - y_1) = C_0 r \sin \omega t, \\ m_1 \ddot{y}_1 + C_1 (y_1 - y) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

де C – зведена жорсткість основних пружних зв'язків; C_0 – жорсткість пружних елементів; r – радіус ексцентриситету привода; ω – кутова швидкість обертання привода віброзбуджувача.

Амплітудні показники коливань робочого органа визначаються таким чином:

- без урахування технологічного навантаження:

$$A = p_0^2 r / (p^2 - \omega^2); \quad (2)$$

- з урахуванням технологічного навантаження, як приєднаної маси:

$$A = p_0^2 r / (p^2 - [1 + K_1 K] \varpi^2); \quad (3)$$

- для системи, що враховує пружні та інерційні властивості технологічного навантаження у вигляді зосередженої маси та пружного елемента:

$$A_1 = \frac{p_0^2 r}{Km \varpi^4} \left(1 - \frac{Km \varpi^2}{C_1} \right) \times \left(C_1 - \left[\frac{KC}{C_1} + K + 1 \right] \varpi^2 + p_1^2 \right), \quad (4)$$

де $p^2 = C/m$, $p_0^2 = C_0/m$, $p_1^2 = C_1/m$ – квадрати парціальних частот, $K = m_1/m_2$ – співвідношення маси технологічного навантаження до маси частин системи, що коливаються [9; 10].

Друга модель (рис. 2, б) точніше описує вплив навантаження на коливальні процеси в системі, оскільки, на відміну від першої, враховує характер взаємодії основної зведеної маси з масою навантаження як пружний зв'язок. Однак навантаження розглядається як зосереджена маса, що є значним припущенням для більшості технологічних процесів і вібраційних систем. Система рівнянь (1) описує рух центрів мас лише уздовж однієї осі. А лінійність системи зумовлює гармонічний характер коливань у ній. Подальше уточнення моделей може полягати в урахуванні розосередженого характеру навантаження та електромеханічної системи, опису коливань у просторі в трикоординатній системі відліку.

Ефективність роботи вібраційних систем визначається якістю збуджуваних коливань робочого органа установки. Тому необхідно виконати такі завдання:

- уточнення динамічних моделей існуючих вібраційних систем;
- розроблення нових кінематичних схем та механізмів для вібраційних систем;
- розроблення нових методів та алгоритмів автоматичного керування рухом вібраційних збуджувачів із метою отримання полічастотних та хаотичних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів із заданими амплітудними та частотними

характеристиками з дотриманням метрологічних вимог.

Для збудження полічастотних асиметричних коливань відомий ексцентриковий нелінійний пружно-в'язкий привід (рис. 2, в). Він спроектований на основі класичної кінематичної схеми ексцентрикового привода і складається з ексцентрикового вала, що встановлений на опорній рамі віброустановки, та прикріплених гумовими елементами до робочого органа шатунів. Нелінійний елемент передає на робочий орган змінні збурювальні зусилля, які хаотизують коливання робочого органа і його навантаження, впливаючи як на частотні характеристики, так і на характер руху.

Проте очевидно, що напрям та величина збурювальних зусиль (і, відповідно, характер коливань) визначаються конструкцією системи, її кінематичною схемою та конструктивним виконанням демпфера. Це не критично для вібраційної установки, яка вбудована в технологічний процес підприємства на усталеному виробництві, але неефективно у разі змінного навантаження і неприйнятно для стендів, апаратури контролю, наукового обладнання тощо.

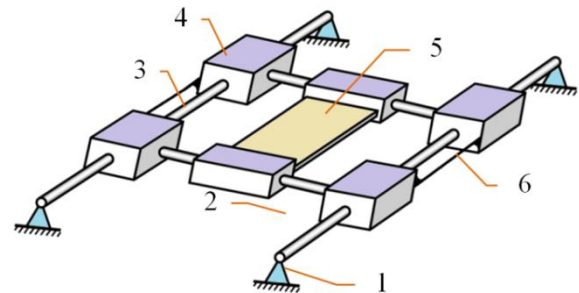


Рис. 3. Спрощена кінематична схема вібраційної системи з прямим лінійним приводом:
1 – станина; 2 – опора; 3 – напрямна; 4 – лінійний двигун або привідний механізм; 5 – рухома платформа; 6 – ланка жорсткості

Також механізми вібраційних систем з обертовим рухом привідної ланки, в яких робочий орган виконує лінійні зворотно-поступальні рухи, підлягають прямій заміні керуванням лінійним електроприводом, хоча це рішення дороге й доцільне лише для лабораторно-діагностичного, медичного та іншого високотехнологічного обладнання (рис. 3). Механізми вібраційних систем із

коливальним рухом привідної ланки та лінійним зворотно-поступальним рухом робочого органа (як от механізми Ватта, Чебишова, Хойкена, Ліпкіна–Посельє) також можуть бути замінені керованим лінійним електроприводом.

На рисунку 4 наведено кінематичні схеми механізмів вібраційних систем, що підлягають прямій заміні на керований електропривід за умови забезпечення динамічних характеристик та рівня керованості. Зокрема, таким є кривошипно-коромислова система (рис. 4, а).

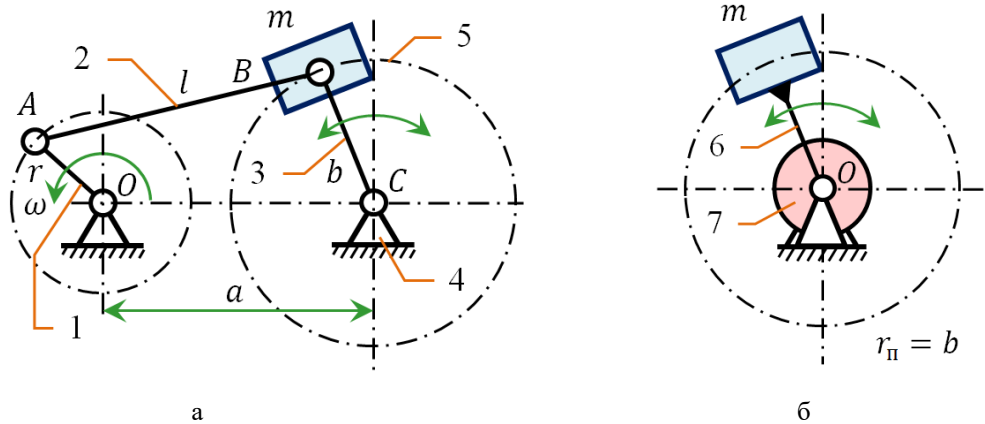


Рис. 4. Типові кінематичні схеми механізмів вібраційних систем, що підлягають прямій заміні на електропривід прямої дії: а – з обертальною ведучою ланкою; б – з прямим приводом. 1 – кривошип (корба) довжиною $|OA| = r$; 2 – гонок довжиною $|AB| = l$; 3 – балансір довжиною $|BC| = b$; 4 – станина з відстанню $|OC| = a$ між осями обертання; 5 – дугава напрямна радіусом b ; 6 – важіль; 7 – привід; O – центр осі обертання ведучої ланки

Під «рівнем керованості» маємо на увазі спроможність системи керування реалізувати заданий закон керування, який забезпечить необхідні швидкісні діаграми руху робочого органа. Для випадку вхідної (початкової) швидкісної діаграми робочий орган системи з прямим електроприводом має рухатися так само, як робочий орган системи-прототипк. При цьому необхідно розробити відповідний закон керування прямим електроприводом. У разі використання нових швидкісних діаграм є можливість отримання якісно нових властивостей для спеціалізованого обладнання (наприклад, отримання детерміновано-хаотичної траєкторії коливань для автоматизації віброакустичних досліджень без використання нелінійних механічних елементів).

Необхідний рівень керованості забезпечується достатньою обчислювальною потужністю цифрової системи керування, заданою точністю та динамічним діапазоном подання сигналів та величин, точністю вимірювань фізичних величин датчиками з урахуванням перетворювачів, достатньою пропускну

спроможністю каналів даних, шин та інтерфейсів і, залежно від закону керування, наявністю зворотних зв'язків за координатами (положенням, швидкістю).

Система керування вібраційним збуджувачем у загальному випадку може складатися з підсистем людино-машинного інтерфейсу, програмованого логічного контролера, збору й обробки інформації. В разі необхідності система доповнюється підсистемою забезпечення безпеки і запобігання нештатних ситуацій.

Розглянемо для прикладу пряму заміну системи на рисунку 4, а керованим електроприводом прямої дії. Для реалізації прямим приводом таких самих швидкісних діаграм руху робочого органа, які були до модернізації, встановлюємо, що зв'язок між кутом φ_3 повороту балансіра та кутом φ_1 повороту кривошипа визначається на основі співвідношень через розміри балансіра і є передавальною функцією механізму:

$$\varphi_3 = \arctg \frac{r \sin \varphi_1}{r \cos \varphi_1 - a} +$$

$$+ \arccos \frac{l^2 - b^2 - a^2 - r^2 + 2ar \cos \varphi_1}{2b\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \varphi_1}}. \quad (5)$$

Для визначення системою керування поточної кутової координати робочого органа в реальному часі за виразом (5) необхідно обрати алгоритми обчислення обернених тригонометричних функцій $\alpha = \arctg x$ та $\alpha = \arccos x$, де α – довільний кут, рад. Що важливо, алгоритми обов'язково повинні забезпечувати задану точність для роботи виконавчих органів пристроїв та швидкість обчислень.

У разі використання контролерів із високою обчислювальною продуктивністю доцільно застосовувати числові ІЕС-оператори (International Electrotechnical Commission, Міжнародна електротехнічна комісія) тригонометричних функцій. Програма користувача розробляється текстовими мовами програмування: мовою Структурованого Тексту (Structured Text, ST), мовою Списку Інструкцій (Instruction List, IL); або графічною мовою програмування, яка дозволяє вільно розташовувати програмні елементи та охоплювати їх зворотними зв'язками – мовою Безперервних Функціональних Схем (Continuous Function Chart, CFC).

Для мікроконтролерів загального призначення традиційно використовуємо мову програмування C++ з розробкою найбільш критичного обчислювального блока програми мовою Асемблера. Такий інструментарій надає зручні засоби розроблення програмних застосунків та забезпечує необхідну обчислювальну продуктивність і швидкодію системи, яка має працювати в режимі реального часу.

Найскладніший варіант – це розроблення та реалізація збуджувача коливачів на основі мікропроцесорної системи саме з обмеженими обчислювальними можливостями та апаратними ресурсами (наприклад, на основі одноплатної міні ЕОМ з однокристальним мікроконтролером або цифровим сигнальним процесором). У той же час цей варіант становить найбільший інтерес, тому що дозволяє отримати компактний автономний недорогий

пристрій, що не вимагає ліцензійного системного програмного забезпечення. А досвід, отриманий у процесі розроблення такого пристрою, може бути корисним у подальшому багатьом проектантам, що працюють у галузі створення компактних високотехнологічних пристроїв, наприклад, цифрових вимірювальних приладів, діагностичних комплексів, систем керування тощо.

Відомо, що значення тригонометричних функцій можна обчислити з використанням рядів Маклорена з будь-якою необхідною точністю, проте для апаратних засобів з обмеженою обчислювальною продуктивністю (до яких може бути віднесена апаратура віброакустичного контролю), існують алгоритми швидких обчислень.

Такими є алгоритми Jack W. Crenshaw [11], які дозволяють обчислювати, зокрема, деякі прямі та зворотні функції. За одним із них маємо:

$$\alpha = \frac{x(A + Bx^2)}{1 + Cx^2}, \quad (6)$$

де $A=0,9999990202289$, $B=0,2579776588114$, $C=0,5912045052131$ – коефіцієнти, що задаються як константи подвійної точності, причому $\alpha \leq 15^\circ$ з похибкою не більшою за 4×10^{-7} одиниць.

Існує ще одна реалізація цього алгоритму (Jack G. Ganssle):

$$\alpha = \frac{x(k_1 + k_2x^2)}{k_3 + x^2}, \quad (7)$$

де $k_1=1,6867629106$, $k_2=0,4378497304$, $k_3=1,6867633134$, причому $\alpha \leq 15^\circ$.

Для більшості реальних практичних застосунків (у технічних системах) така точність надмірна та ресурсномістка. Тому виконано дослідження впливу розрядності перелічених коефіцієнтів на значення абсолютної похибки $\Delta\alpha$ обчислення кута α за допомогою алгоритмів Jack W. Crenshaw (рис. 5).

Для співставлення значень похибок обчислення кута α з початковими значеннями коефіцієнтів (графік 2, рис. 5) та з коефіцієнтами зменшеної до двох десяткових знаків розрядності (графік 3,

рис. 5). Отримано абсолютні похибки (графік 4) та різниці їх модулів (графік 5).

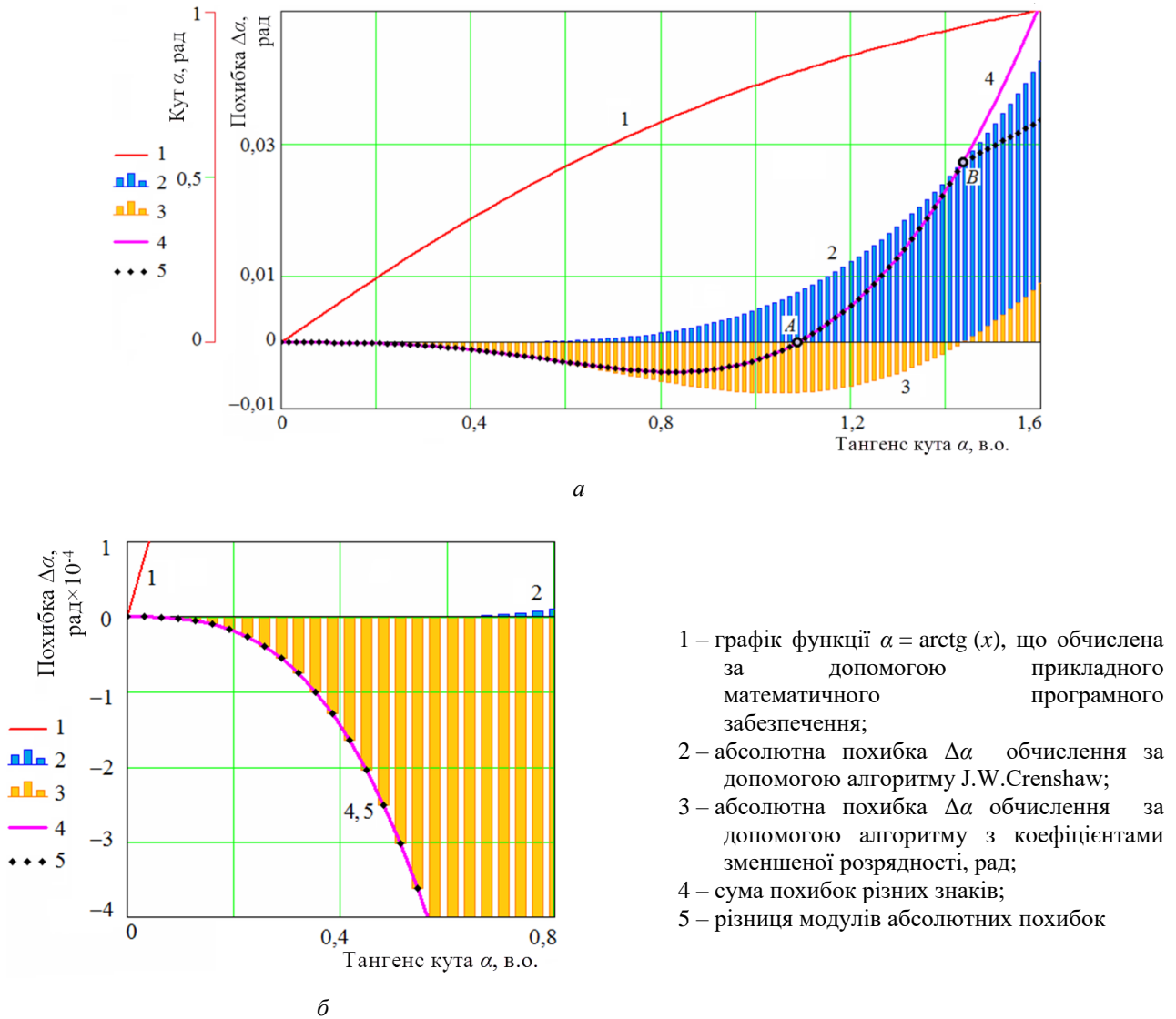


Рис. 5. Аналіз алгоритмів обчислення похибок для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю: а – абсолютні похибки (діапазон 0...1,6 в.о.) графіки функції, б – порівняння результатів абсолютних похибок (діапазон 0...0,8 в.о.)

Як можна побачити, до значення аргументу $\operatorname{tg} \alpha = 1,07$ (т. А на осі абсцис) обчислення кута α з початковими значеннями коефіцієнтів дає меншу абсолютну похибку, аніж обчислення з коефіцієнтами зменшеної розрядності, але її значення при цьому не перевищує 0,01 рад, що задовольняє вимогам для використання в будь-яких технічних системах, окрім деяких метрологічних та науково-дослідницьких (для яких формулюються жорсткі вимоги і питання точності обчислень потребує додаткових досліджень).

За більших значень аргументу обчислення з коефіцієнтами меншої

розрядності забезпечує навіть більшу точність визначення кута. При значенні аргументу $\operatorname{tg} \alpha = 1,45$ (т. В на рис. 5, а) абсолютна похибка обчислень із коефіцієнтами зменшеної розрядності змінює знак. Таким чином, в околиці цієї точки маємо найбільшу точність визначення кута. В подальшому при збільшенні аргументу абсолютні похибки визначення кута α зростають і з використанням початкових значень коефіцієнтів і з коефіцієнтами зменшеної розрядності, що обмежує область визначення (на осі аргументу).

Отже, обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності у схемі обчислення за алгоритмом Jack W. Crenshaw у більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж із початковими значеннями коефіцієнтів у технічних системах керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною продуктивністю. Це необхідно для

створення виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного моніторингу структури, тріщин та порушень однорідності несних конструкцій будівель і споруд.

Апробація розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю проведена в лабораторних умовах (рис. 6).



Рис. 6. Апробація розроблених моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю в лабораторних умовах

Процес розроблення збуджувача коливань включає: вибір системи рівнянь, що описують коливання; визначення діапазонів зміни параметрів; вибір конкретних значень параметрів для реалізації; проведення кореляційного аналізу вихідних сигналів при заданих параметрах із метою визначення якості; визначення амплітудних діапазонів зміни вихідних величин і окремих компонентів рівнянь; складання раціональної обчислювальної схеми розв'язання рівнянь; алгоритмізацію обчислювальної схеми.

Після цього виконується програмування, налагодження та оптимізація програми. Слід зазначити, що наведена вище схема не є строго лінійною,

тому виконання будь-якого з етапів може повторюватися.

Висновки

1. Розроблено моделі складних коливань, які дозволяють підвищити достовірність контролю і реалізувати нові закони керування, неможливі для класичних вібраційних систем, але необхідні для систем автоматизованого віброакустичного контролю будівель та споруд.

2. Обґрунтовано використання коефіцієнтів зменшеної розрядності в схемі обчислення за алгоритмом Jack W. Crenshaw у більш широкому діапазоні значень аргументу, ніж із початковими значеннями коефіцієнтів для керування вібраційними системами з обмеженою обчислювальною

продуктивністю. Це необхідно для створення виконавчих органів сучасних систем автоматизованого віброакустичного моніторингу тріщин та порушень однорідності несних конструкцій будівель і споруд.

3. Розроблено нові методи й алгоритми автоматичного керування вібраційним збуджувачем для отримання полічастотних коливань, лінійних хвиль та хвильових полів із заданими амплітудними та частотними

характеристиками. Це дає необхідну і достатню базу для удосконалення оцінки зміни структури середовища внаслідок прояву тріщин та порушення однорідності за допомогою віброакустичного моніторингу.

4. Розроблено та апробовано в лабораторних умовах збуджувач коливань для системи автоматизованого віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Slashchov A., Slashchov I., Siromaschenko I., Kurinnyi V., Ikonnikov M. Development of digital technologies for the systems of remote mining safety monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 168. Pp. 00065.
2. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I., Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Pp. 012010.
3. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A., Slashchova O. Forecast of the mine workings destruction risks by the radiometric control method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1156. Pp. 012033.
4. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V., Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1156. Pp. 012015.
5. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources : 3rd International Sci. and Tech. Conf. Book of Abstracts*. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.
6. Булат А. Ф., Усаченко Б. М., Яланський А. А. та ін. Методичний посібник з комплексної геофізичної діагностики породного масиву та підземних геотехнічних систем. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2004. 75 с.
7. Яланський А. А., Слашов І. М., Яланський Ал. А., Іконнікова Н. А., Цикра А. А. Оцінка хаотичності процесів, що відбуваються в гірничих технічних системах, особливості управління та використання. *Геотехнічна механіка*. Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2010. № 91. С. 159–172.
8. Kesheng Wu, Kiang Zhang. Global dynamics of the generalized Lorenz systems having invariant algebraic surfaces. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2013. Vol. 244 (1). Pp. 25–35.
9. Франчук В. П., Анциферов О. В., Дуганець В. І. Зусилля у приводі вертикального млина. *Геотехнічна механіка*. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2016. № 131. С. 100–107.
10. Франчук В. П. Принципи приведення технологічного навантаження до системи з дискретними параметрами. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011. № 4 (64). С. 5–11.
11. Crenshaw Jack Math Toolkit for Real-Time Development. Taylor & Francis. 2000. 466 p.

REFERENCES

1. Slashchov A., Slashchov I., Siromaschenko I., Kurinnyi V. and Ikonnikov M. Development of digital technologies for the systems of remote mining safety monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 168, pp. 00065. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800065>
2. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 970, pp. 012010. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>
3. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecast of the mine workings destruction risks by the radiometric control method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023, vol. 1156, pp. 012033. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012033>
4. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V. and Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2023, vol. 1156, pp. 012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012015>
5. Slashchova O.A., Yalanskyi O.A. and Slashchov A.I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative Development of Resource-saving Technologies and Sustainable Use of Natural Ources : 3rd International Sc. and Tech. Conf. Book of Abstracts*. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020, pp. 126–127. URL: <https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/1>.
6. Bulat A.F., Usachenko B.M., Yalanskyi A.A. and oth. *Metodychnyy posibnyk z kompleksnoyi heofizychnoyi diahnostryky porodnoho masyvu ta pidzemnykh heotekhnichnykh system* [Methodical manual for complex geophysical

diagnostics of the rock massif and underground geotechnical systems]. Dnipro : IGTM NASU Publ., 2004, 75 p. (in Ukrainian). URL: <https://nvd-nanu.org.ua/afafbfbab-79d0-4e01-5f32-3cca4fd32f49/>

7. Yalansky A.A., Slashchev I.N., Yalansky Alex.A., Ikonnikova N.A. and Tsikra A.A. *Otsinka khaotychnosti protsesiv, shcho vidbuvayut'sya v hirnychkykh tekhnichnykh systemakh, osoblyvosti upravlinnya ta vykorystannya* [Assessment of the chaotic nature of the processes occurring in mining technical systems, features of management and use]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2010, no. 91, pp. 159–172. (in Ukrainian). URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/33532>

8. Kesheng Wu and Kiang Zhang. Global dynamics of the generalized Lorenz systems having invariant algebraic surfaces. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2013, vol. 244 (1), pp. 25–35. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physd.2012.10.011>

9. Franchuk V.P., Antsyferov O.V. and Duhanets V.I. *Zusylyya u pryvodi vertykal'noho mlyna* [The drive force in the vertical vibratory mill]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2016, no. 131, pp. 100–107. (in Ukrainian). URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/138766>

10. Franchuk V.P. *Pryntsypy pryvedennya tekhnolohichnoho navantazhennya do systemy z dyskretnymy parametramy* [Principles of bringing technological load to a system with discrete parameters]. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Vibrations in Engineering and Technology]. 2011, no. 4 (64), pp. 5–11. (in Ukrainian). URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/3459>

11. Crenshaw Jack *Math Toolkit for Real-Time Development*. Taylor & Francis. 2000, 466 p. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=YEyxJyEam0YC>

Надійшла до редакції: 12.04.2024.