

## МЕТОД ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ВІБРОЗАХИСНОГО ПРОЦЕСУ

*Анотація.* У статті запропоновано метод побудови цифрових двійників віброзахисного процесу для висотних гнучких будівель. В основі методу лежить використання кульового гасника, що дозволяє підбирати оптимальні значення для зменшення руйнівного впливу коливань.

*Ключові слова:* цифровий двійник, віброзахисна система, кульовий гасник, швидкодія методу, вимушені коливання.

**Постановка проблеми.** Технологія цифрових двійників набуває все більшого значення, як для виробничих підприємств, так і для побутового життя. Попри всю потужність технології та велику кількість переваг вона не завжди може бути застосована через ряд різноманітних причин. Одним із таких випадків є створення цифрового двійника віброзахисного процесу для висотних гнучких споруд. При експлуатації висотних гнучких споруд (телевеж, радіощогл, металевих вентиляційних труб, димарів тощо) часто виникають вимушені коливання, боротьба з якими перетворюється на велику технічну проблему. Оскільки даний вид споруд є надзвичайно важливим для людства, постає науково-технічна задача створення методу побудови цифрового двійника віброзахисного процесу для висотних гнучких будівель. При цьому важливою задачею є знаходження оптимальних параметрів цифрового двійника для зменшення руйнівного впливу від коливань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз основних підходів до створення цифрових двійників [1] показує, що жоден з них не має явних переваг над іншим, а найкращий результат досягається при їх комбінації. Проте варто зауважити, що підхід на основі даних вимагає збору великої кількості інформації за допомогою сенсорів на існуючих об'єктах. У випадку з віброзахисними системами для висотних гнучких будівель даний варіант не можливий, оскільки у більшості випадків вони не були впроваджені. Ось чому потрібно розглядати підхід на основі моделювання фізичних об'єктів/систем за допомогою високоточних математичних моделей [2]. Для аналізу існуючих математичних

моделей віброзахисного процесу, розглянемо детальніше сам процес появи та гасіння вимушених коливань.

Вимушені коливання висотних об'єктів виникають при їх взаємодії із повітряним потоком і здійснюються як у площині вектора повітряного потоку (коливання під дією вітрової пульсації), так і в ортогональній напрямку вектора повітряного потоку площині (автоколивання типу "повітряний резонанс"). При цьому частота основного тону власних коливань низькочастотних висотних споруд, що розглядаються, знаходиться в діапазоні 0,2–2,0 рад/с [3].

До останнього часу для розв'язання цієї проблеми використовувались динамічні гасники маятникового типу на підвісі [4]. Функціонування маятників такої конструкції однозначно визначається довжиною підвісу їх робочого тіла. Для телевеж та баштових споруд розрахункова довжина підвісу таких гасників має знаходитись у межах від 4 до 15 м. Тому спроби використати маятникові гасники на малих частотах (менше 2,0 рад/с) були невдалими. Ситуація, що склалася, і обумовила необхідність розробки гасителів такої конструкції, яка б була компактною, надійною та безпечною і яка б дозволила зберегти маятниковий характер функціонування робочого тіла гасителя.

В цих умовах найбільш ефективним є новий метод віброзахисту низькочастотних висотних споруд із використанням гасителів коткового типу [5]. Ефект віброзахисту таких гасителів ґрунтується на перекочуванні важких куль, циліндрів, роликів без ковзання по сферичних або циклоїдальних поверхнях несучих тіл. Експериментальні дослідження функціонування коткових гасителів довели їх ефективність при демпфіруванні вимушених коливань гнучких висотних споруд у низькочастотному діапазоні (до 2,0 рад/с) та при великих переміщеннях верхніх перерізів споруд (до 2,5 – 3 м).

У дослідженні [6] було запропоновано та математично обґрунтовано новий метод оптимального налаштування (тюнінгу) основних параметрів кульових гасників цього класу на власну частоту несучого тіла, що дозволяє використовувати його у сучасній практиці віброзахисту висотних гнучких об'єктів.

**Мета дослідження.** Основною метою даної роботи є побудова методу створення цифрових двійників віброзахисного процесу, який забезпечить можливість визначення регулюючих параметрів кульового гасника для оптимального гасіння вимушених коливань.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** У даній роботі розглядається процес придушення вимушених коливань віброзахисної системи з ви-

користанням кульових гасників (BVA - Ball Vibration Absorber). Принципова схема одної із таких систем показана на рис. 1.

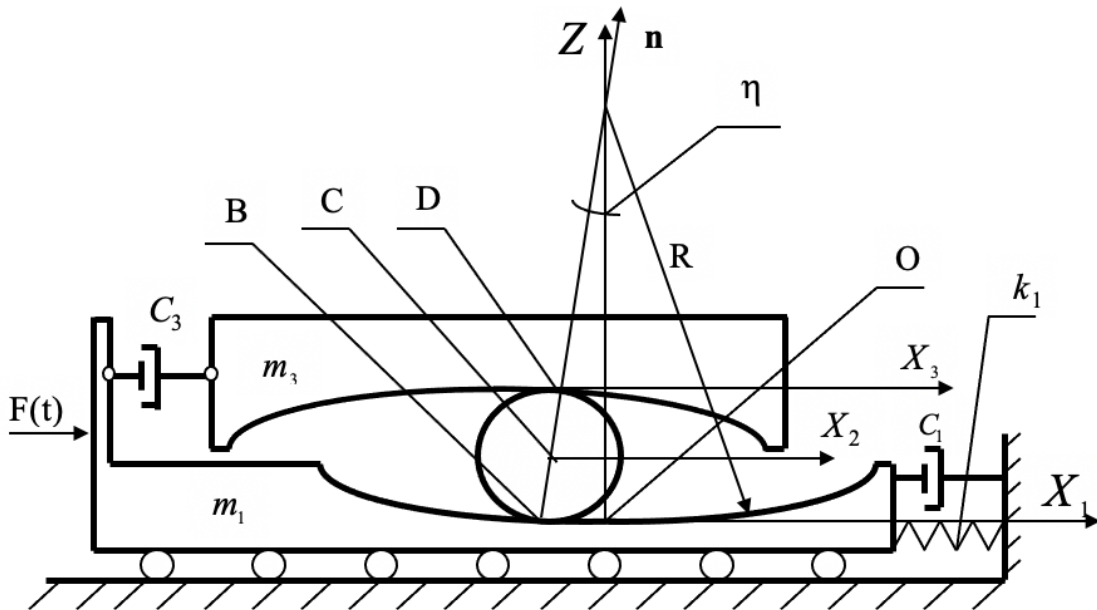


Рисунок 1 - Принципова схема кульового гасника

У ході попереднього дослідження [6] для такої системи було описано наступне рівняння амплітудно-частотної характеристики  $A(\omega)$  системи “несуче тіло – котковий гасник”:

$$A(\omega) = \frac{\bar{F}_0 \sqrt{F_6(\omega)}}{\sqrt{F_6(\omega)F_7(\omega) + F_9(\omega) + F_{10}(\omega)}}, \quad (1)$$

де  $F_1(\omega) = \omega_0^2 - \omega^2(1 + \nu)$ ;  $F_2(\omega) = 2n_X \omega$ ;  $F_3(\omega) = g - 2\bar{R}\omega^2$ ;  $F_4(\omega) = 4n_\eta \bar{R}\omega$ ;  $F_5(\omega) = 2\nu \bar{R}\omega^4$ ;  $F_6(\omega) = (F_3(\omega))^2 + (F_4(\omega))^2$ ;  $F_7(\omega) = (F_1(\omega))^2 + (F_2(\omega))^2$ ;  $F_8(\omega) = F_2(\omega)F_4(\omega) - F_1(\omega)F_3(\omega)$ ;  $F_9(\omega) = 2F_5(\omega)F_8(\omega)$ ;  $F_{10}(\omega) = (F_5(\omega))^2$ .

Визначимо параметри віброзахисної системи, базують на принциповій схемі системи (рис. 1) та отриманому рівнянні амплітудно-частотної характеристики (1).

У результаті отримуємо наступний набір параметрів:

- $m_1$  – маса несучого тіла;
- $m_3$  – маса робочого тіла;
- $g$  – прискорення вільного падіння;
- $\omega_0$  – кругова або циклічна частота;
- $\bar{F}_0$  – максимальна амплітуда гармонічної збуджуючої сили;
- $k_1$  – коефіцієнт пружності несучого тіла;
- $R$  – радіус виїмок;

- $r$  – радіус кулі, що знаходиться всередині виїмок;
- $v$  – відношення мас робочого та несучого тіл;
- $C_1$  – коефіцієнт в'язкого опору демпфера, пов'язаного з несучим тілом;
- $C_3$  – коефіцієнт в'язкого опору демпфера, пов'язаного з робочим тілом;
- $n_x$  – коефіцієнт демпфірування демпфера, пов'язаного з несучим тілом;
- $n_\eta$  – коефіцієнт демпфірування демпфера, пов'язаного з робочим тілом;
- $\bar{R}$  – різниця радіусів сферичних виїмок і кулі, що перекочується між ними.

Беручи до уваги те, що з будівельної точки зору віброзахисна система найлегше буде конфігуруватися через параметри саме робочого тіла гасника [7], тобто коефіцієнт демпфірування  $n_\eta$  та різницю радіусів виїмок та кулі  $\bar{R}$ , оберемо їх за вихідні параметри методу. У такому випадку ми будемо мати п'ять вхідних параметрів:  $\bar{F}_0$  – максимальна амплітуда зовнішнього силового збудження;  $v$  – відношення мас робочого та несучого тіл;  $n_x$  – коефіцієнт демпфірування демпфера, пов'язаного з несучим тілом;  $\omega_0$  – кругова частота власних коливань несучого тіла, яка є найменшою (або головною) з його спектру частот та точність пошуку вихідних параметрів.

Оскільки було визначено вхідні та вихідні параметри, далі потрібно визначити, яким чином буде здійснюватись пошук оптимальних значень вихідних параметрів. Найпростішим способом знаходження оптимальних значень є звичайні ітеративні операції, де обидва вихідні параметри поступово інкрементуються, а отримані значення амплітуди при них зберігаються у певному словнику, а потім порівнюються. Такий спосіб є доволі очевидним та незалежним від умов, проте дуже повільним.

З точки зору оптимізації швидкодії необхідно виконати певну модифікацію, щоб пришвидшити метод побудови цифрового двійника. Для цього можемо використати аналітично-графічний метод знаходження оптимальних параметрів налаштування гасників коткового типу [8-9]. В основі цього аналітично-графічного методу лежить принцип «рівності двох максимумів», які досягаються на двох частотах  $\omega_1$  і  $\omega_2$  в околі резонансної частоти  $\omega_0$ . Як параметри налаштування розглядаються геометрична характеристика  $\bar{R} = R - r$  гасника та коефіцієнт демпфірування  $n_\eta$  його робочого тіла, що і є вихідними параметрами запропонованого методу.

Аналітично-графічний метод оптимального налаштування гасника по частоті полягає у побудові фрагментів функціональних залежностей амплітуди  $A$  несучого тіла від характеристики  $\bar{R}$  гасника в околі двох частот  $\omega_1$  і  $\omega_2$  за умови фіксації інших параметрів системи. Перетин двох, знайдених таким чином фрагментів кривих АЧХ, і визначає оптимальну величину характеристик  $\bar{R}$  чи  $n_\eta$  гасника. Розглянемо детальніше аналітично-графічний метод.

Спочатку параметри  $\bar{R}$  і  $n_\eta$  аналітично визначаються із умови рівності двох максимумів графіка функції  $A = A(\omega)$ , один з яких відповідає зведеній масі  $m_1$  несучого тіла (споруди), а другий – масі  $m_2$  робочого тіла гасника. Для початку роботи з методом знаходимо початкові частоти  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , на яких досягаються два максимуми амплітудно-частотної характеристики для віброзахисної системи, за формулою (2) [9]:

$$\gamma_{1,2}^2 = \frac{1}{1+\nu} \left( 1 \pm \sqrt{\frac{\nu}{2+\nu}} \right), \text{ де } \gamma_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}}{\omega_0} \quad (2)$$

Далі графічно визначаємо точку перетину двох графіків  $A_1$  та  $A_2$  побудованих для фіксованих частот  $\omega_1 = \gamma_1 \omega_0$  та  $\omega_2 = \gamma_2 \omega_0$  при змінюванні параметра  $\bar{R}$  гасника, на яких функція  $A = A(\omega)$  досягає двох рівних максимумів. Після визначення параметра  $\bar{R}$  гасника застосовуємо такий же підхід з побудовою двох графіків функції для коефіцієнта демпфірування  $n_\eta$ . У результаті отримуємо наступні блок-схеми запропонованих методів (див. рис.2-3).

#### *Аналіз отриманих результатів застосування створеного методу*

Запропонований метод створення цифрових двійників був реалізований за допомогою мови програмування Python та протестований на наборі різних даних, зібраних на основі реальних об'єктів. Для виконання операцій з математичними функціями була використана бібліотека `sympy`. З огляду на пришвидшення роботи методу для знаходження нулів математичних функцій були застосовані чисельні методи бібліотеки `sympy`.

Input:  $F_0, w_0, n_x, v$   
Output:  $R, n_n$



Рисунок 2 - Блок-схема методу побудови цифрового двійника віброзахисної системи з оптимальними параметрами

Input:  $F_0, w_0, n_x, v$   
Output:  $R, n_n$

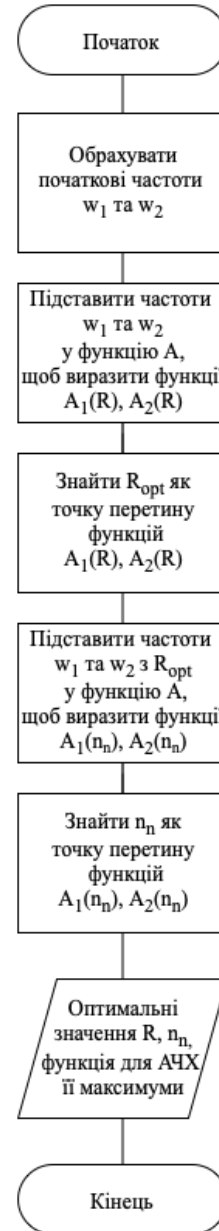


Рисунок 3 - Блок-схема аналітично-графічного методу визначення оптимальних параметрів віброзахисної системи

Далі було проведено дослідження залежності ефективності застосування цифрового двійника віброзахисного процесу з оптимально налаштованими параметрами. Дослідження показало, що метод дозволяє зменшити максимальну амплітуду коливань, а, отже, і руйнівну дію, в середньому у 3–4 рази, а у найкращому майже у 20 разів. Окрім того, було виявлено, що точність пошуку вихідних параметрів методів суттєво не впливає на ефективність його застосування (див. рис. 4), що дозволяє зменшити час пошуку.

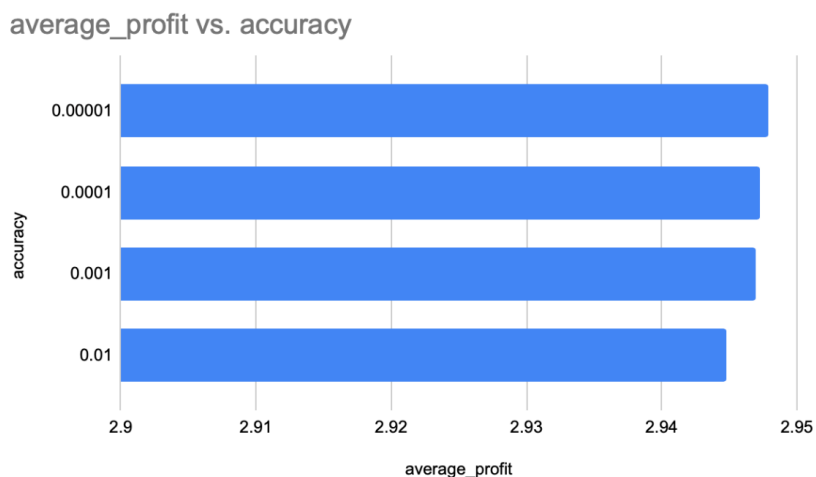


Рисунок 4 - Діаграма залежності ефективності методу від заданої точності

Далі були виконані емпіричні заміри швидкодії оригінального методу та його модифікацій з використанням аналітично-графічного методу пошуку оптимальних параметрів та деяких чисельних методів (див. рис. 5).

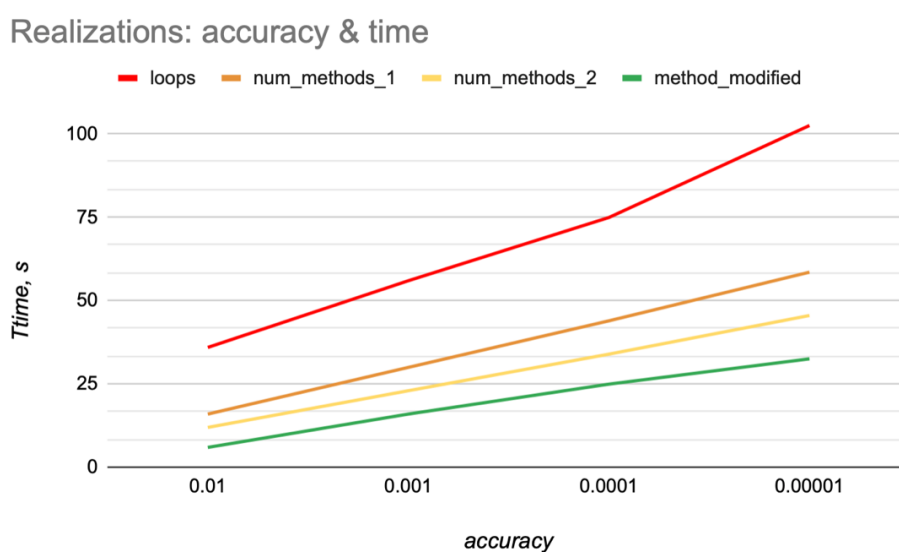


Рисунок 5 - Графік залежності часу побудови цифрового двійника реалізацій в залежності від заданої точності

Аналітично-графічний метод був реалізований за допомогою бібліотеки matplotlib, а чисельні методи – sympy.

Як бачимо, запропонований аналітично-графічний метод є найбільш швидким, адже дозволяє зменшити час виклику в середньому втричі, а також зменшити навантаження на процесор та обробляти випадки, коли знаходження оптимальних параметрів цифрового двійника є доволі складною аналітичною задачею.

**Висновки.** Під час даного дослідження було розроблено алгоритмічний метод зі створення оптимального цифрового двійника, що відображає процес придушення небезпечних вимушених коливань висотних гнучких споруд на основі використання кульових гасників. При умові малих вимушених коливань отримано рівняння АЧХ лінійної віброзахисної системи. Було описано та проаналізовано вхідні та вихідні параметри методу, способи їх отримання.

На основі числового аналізу встановлено, що форма кривої АЧХ суттєво залежить від спеціального налаштування регулюючих параметрів кульового гасника. При його оптимальних параметрах крива АЧХ віброзахисної системи набуває симетричного вигляду з двома рівними за амплітудою максимумами на відповідних частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , що вказує на рівний розподіл вхідної енергії зовнішнього збурення між робочим тілом гасника і несучим тілом. Порівняльний числовий аналіз показав високу ефективність функціонування такої віброзахисної системи з оптимально налаштованими параметрами кульового гасника.

Окрім цього, були виконані дослідження швидкодії методу за допомогою програмної реалізації цифрового двійника на мові Python. В результаті оцінки швидкості методу була запропонована модифікація методу, що дозволила скоротити час пошуку оптимальних параметрів цифрового двійника. Порівняльний аналіз показав високу ефективність функціонування запропонованої віброзахисної системи з оптимально налаштованими параметрами цифрового двійника.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оцінку точності знаходження оптимальних параметрів цифрового двійника та оцінку швидкості його роботи. Окрім того, будуть проаналізовані інші варіанти побудови амплітудно-частотної характеристики, зокрема у нелінійній постановці, та відповідно умови й можливість їх застосування для створення цифрового двійника віброзахисного процесу.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin / [Dmytro Adamenko, Steffen Kunnen, Robin Pluhnau, André Loibl, Arun Nagarajah] // Procedia CIRP.–2020.–№91.–P.27–32
2. A probabilistic graphical model foundation for enabling predictive digital twins at scale / [Kapteyn Michael, Pretorius Jacob, Willcox Karen] // Nature Computational Science .–2021.–№1.–P.337–347
3. Легеца В.П. Теория виброзащиты систем с применением изохронных катковых гасителей: модели, методы, динамический анализ, технические решения. Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland. 2013. – 108 с.
4. Dynamics of vibroprotective systems with roller dampers of low-frequency vibrations / [V. P. Legeza] // Strength of Materials 36. – 2006. – P.185–194
5. Non-linear Model of a Ball Vibration Absorber / [Náprstek Jiří, Fischer Cyril, Pirner, Mark, Fischer Ondřej] // Computational Methods in Earthquake Engineering. –2013.–P.381–396
6. В.П.Легеца, О.В.Атаманюк. Амплітудно-частотна характеристика віброзахисної системи та метод визначення оптимальних параметрів її кульового гасника //Доповідь на 14 науковій конференції ПМК-2021,КПІ, «Політехніка»,2021,С.4-8.
7. Den Hartog, J. P. Mechanical Vibrations. Courier Corporation, 2013. – 464 p.
8. W.Weaver Jr., S.P.Timoshenko, D.H.Young. Vibration Problems in Engineering, 5th Edition, Wiley, 1991. - 624 p
9. Theoretical study and experimental verification of vibration control of offshore wind turbines by a ball vibration absorber (BVA) / [ Z.-L.Zhang, J.-Bing Chen, Jie Li.] // Structure and Infrastructure Engineering, V.10, #8, 2014, P.P. 1087-1100

**REFERENCES**

1. Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin / [Dmytro Adamenko, Steffen Kunnen, Robin Pluhnau, André Loibl, Arun Nagarajah] // Procedia CIRP.–2020.–№91.–P.27–32
2. A probabilistic graphical model foundation for enabling predictive digital twins at scale / [Kapteyn Michael, Pretorius Jacob, Willcox Karen] // Nature Computational Science .–2021.–№1.–P.337–347
3. V. P. Legeza, Theory of vibration protection of systems using isochronous roller dampers: models, methods, dynamic analysis, technical solutions. Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland. 2013. – 108 с.
4. Dynamics of vibroprotective systems with roller dampers of low-frequency vibrations / [V. P. Legeza] // Strength of Materials 36. – 2006. – P.185–194

5. Non-linear Model of a Ball Vibration Absorber / [Náprstek Jiří, Fischer Cyril, Pirner, Mark, Fischer Ondřej] // Computational Methods in Earthquake Engineering. –2013.–P.381–396
6. V. P. Legeza, O. V. Atamaniuk, Amplitude-frequency characteristics of the anti-vibration system and the method of determining the optimal parameters of its ball extinguisher // Report at the 14th scientific conference AMC-2021,KPI, 2021, P. 4 - 8.
7. Den Hartog, J. P. Mechanical Vibrations. Courier Corporation, 2013.– 464 p.
8. W.Weaver Jr., S.P.Timoshenko, D.H.Young. Vibration Problems in Engineering, 5th Edition, Wiley, 1991. - 624 p
9. Theoretical study and experimental verification of vibration control of offshore wind turbines by a ball vibration absorber (BVA) / [ Z.-L.Zhang, J.-Bing Chen, Jie Li.] // Structure and Infrastructure Engineering, V.10, #8, 2014, P.P. 1087-1100

Received 12.05.2023.

Accepted 15.05.2023.

### ***Method of creation a digital twin of a vibration protection process***

*Various approaches to building digital twins are considered. The data-based approach has a big disadvantage due to need of the huge amount of information. The system-based approach can not be used in some cases due to the lack of a mathematically justified method. One of such cases is a ball vibration absorber but they can be really useful for the vibration protection of high-rise flexible objects.*

*The purpose of the research is to develop an algorithmic method of creating digital twins of the vibration protection process, which will provide the possibility of determining the optimal control parameters of the ball vibration absorber.*

*The paper examines small steady oscillations of the dynamic system "supporting body - ball vibration absorber". Under the condition of small forced oscillations, the equation of the amplitude-frequency characteristic of the linear anti-vibration system was obtained. In view of the use in construction, the input and output parameters of the method of building a digital twin of a flexible structure were described and analyzed, as well as the methods of obtaining them. As a result of the evaluation of the speed of the method, a modification of the search way for the optimal parameters of the digital twin was proposed.*

*The comparative analysis showed the high efficiency of the proposed anti-vibration system with optimally adjusted parameters of the digital twin. The proposed method allows to reduce the maximum value of the amplitude by approximately four times. Modifications of the method made it possible to speed it up by an average of three times, reduce the load on the processor and handle cases when finding the optimal parameters of a dig-*

*ital twin is a rather difficult analytical problem.*

*The input and output parameters of the method and ways of obtaining them were described and analyzed. A comparative numerical analysis showed the high efficiency of the functioning of such a vibration protection system with optimally adjusted parameters of the ball vibration absorber.*

**Атаманюк Олексій Віталійович** – магістрант 2 курсу кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

**Oleksii Atamaniuk** – 2nd year master's student of Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

**Легеца Віктор Петрович** – докт. техн. наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

**Viktor Legeza** – Doc. Sc., Professor, Professor of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.