

УДК 621.867.52

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0610>**¹Максим Пирлик,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1343-9516>, e-mail: maxpirlik@gmail.com**¹Микола Нестеренко**

кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4073-1233>, e-mail : nesterenkonikola@gmail.com¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна**АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗІНЕРЦІЙНОГО ПРИВАНТАЖУВАЧА ДЛЯ ДОУЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ**

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто динамічні особливості роботи вібраційної установки з безінерційним імпульсним привантажувачем та автономним віброзбуджувачем, призначеної для доущільнення бетонних сумішей. Запропоновано узагальнену математичну модель коливального процесу, яка враховує гармонічно-імпульсний характер збудження, нелінійні пружно-дисипативні властивості бетонної суміші та хвильові процеси поширення напружень у шарі матеріалу. На основі еквівалентної лінеаризації отримано амплітудно-залежні характеристики системи та проаналізовано умови реалізації квазірезонансного імпульсно-вібраційного режиму. Обґрунтовано вплив фазової синхронізації імпульсних навантажень, параметрів привантажувача та частот збудження на формування вищих гармонік і пікових динамічних напружень, ефективних для доущільнення верхніх шарів бетонної суміші. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації вібраційного обладнання для формування бетонних і залізобетонних виробів з підвищеними вимогами до якості та енергоефективності технологічного процесу.

Ключові слова: вібраційна установка, імпульсний привантажувач, доущільнення бетонних сумішей, нелінійні коливання, імпульсно-вібраційний режим, хвильові процеси, енергоефективність.

ANALYTICAL SUBSTITUTION OF THE PARAMETERS OF AN INERTIAL-FREE LOADER FOR COMPACTING CONCRETE MIXTURES

ABSTRACT. The article examines the dynamic features of a vibration installation with a non-inertial impulse surcharge and an autonomous vibration exciter intended for the additional compaction of concrete mixtures. A generalized mathematical model of the oscillatory process is proposed, which takes into account the harmonic–impulse nature of excitation, the nonlinear elastic–dissipative properties of the concrete mixture, and wave processes of stress propagation within the material layer. Based on the method of equivalent linearization, amplitude-dependent characteristics of the system are obtained and the conditions for the implementation of a quasi-resonant impulse–vibration regime are analyzed. The influence of phase synchronization of impulse loads, surcharge parameters, and excitation frequencies on the formation of higher harmonics and peak dynamic stresses effective for the additional compaction of the upper layers of the concrete mixture is substantiated. The obtained results can be used in the design and modernization of vibration equipment for manufacturing concrete and reinforced concrete products with increased requirements for quality and energy efficiency of the technological process.

Keywords: vibration installation, impulse surcharge, additional compaction of concrete mixtures, nonlinear oscillations, impulse–vibration regime, wave processes, energy efficiency.

1. Постановка проблеми. У виробництві залізобетонних кілець для каналізаційних, водопровідних мереж та шахт прокладання інженерних комунікацій особливої актуальності набуває забезпечення рівномірного та ефективного доущільнення бетонної суміші після основного етапу формування. Традиційні вібраційні установки з інерційним збудженням не завжди забезпечують необхідну інтенсивність ущільнення в зонах підвищеної товщини стінок і складної геометрії виробів, що призводить до локальної неоднорідності структури бетону. Застосування безінерційних привантажувачів з автономними віброзбуджувачами

відкриває можливості цілеспрямованого керування силовим і кінематичним впливом на бетонну суміш у процесі доущільнення. Водночас відсутність обґрунтованих параметрів режимів роботи таких систем ускладнює їх практичне впровадження в технології виготовлення кільцевих залізобетонних виробів. Особливо складним є узгодження частотно-амплітудних характеристик привантажувача з реологічними властивостями бетонної суміші на пізніх стадіях ущільнення. У зв'язку з цим виникає необхідність наукового обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для забезпечення підвищеної якості та однорідності структури залізобетонних кілець.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Проблематика керованого ущільнення та доущільнення бетонних сумішей у вібраційних установках традиційно розглядається через призму взаємодії робочого органу (вібраційної плити, форми або платформи) з оброблюваним середовищем, що має пружно-в'язко-дисипативні властивості, які істотно змінюються в процесі ущільнення. Узагальнений інженерний підхід до опису вібраційних систем та їх параметричного синтезу (частота, амплітуда, фаза, режими збудження) подано в роботі, де систематизовано методи розрахунку динаміки, резонансних режимів та енергетичних критеріїв для вібромашин різного призначення [4]. У контексті бетонних сумішей ці положення є методологічною базою для вибору режимів збудження, але потребують деталізації щодо нелінійності та нестационарності параметрів середовища на стадії доущільнення, коли суміш переходить від структурно-рухомого стану до більш жорсткого.

Важливий напрям досліджень пов'язаний із моделюванням оброблюваного середовища як динамічної підсистеми. У роботі, присвяченій підходам до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм, акцент зроблено на виборі еквівалентних параметрів (маса, жорсткість, демпфування), формах подання дисипативних втрат та узгодженні моделі з експериментальними спостереженнями [2]. Це дозволяє переходити від суто кінематичного призначення режимів до параметрично обґрунтованого впливу, однак для задачі доущільнення виробів типу залізобетонних кілець додатково важливо враховувати просторову нерівномірність ущільнення по товщині стінки та висоті виробу, а також можливі хвильові ефекти передачі напружень у шарі суміші.

Окремий клас праць присвячений безпосередньо взаємодії віброуючої плити з цементобетонною сумішшю та встановленню закономірностей зміни контактних сил, ефективних параметрів жорсткості й дисипації та умов, за яких забезпечується інтенсивна перебудова структури суміші [3], [5]. Такі результати важливі для задач синтезу режимів роботи, оскільки демонструють, що «суміш» не може розглядатися як лінійне середовище з постійними параметрами: ефективні характеристики залежать від амплітуди, частоти, ступеня ущільнення та умов контакту. Проте наведені підходи здебільшого орієнтовані на класичні схеми збудження та не завжди враховують специфіку гармонічно-імпульсних впливів і наявність окремого силового контуру привантаження, що є визначальним для безінерційних привантажувачів.

Розвиток тематики привантажувачів для ущільнення бетонів відображено у сучасній публікації, де розглянуто конструктивні рішення та принципи роботи навантажувачів і підкреслено їх роль у підвищенні якості ущільнення за рахунок керованого силового впливу [1]. Доповненням до цього є експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки, у яких показано практичну доцільність поєднання різних типів збудження та наведено результати, важливі для верифікації розрахункових моделей [6]. Разом із тим, навіть за наявності експериментальної бази, питання цілеспрямованого підбору режимів (частотно-амплітудних, фазових та імпульсних параметрів) саме для доущільнення виробів кільцевого типу залишається недостатньо формалізованим: потрібні критерії, що зв'язують режим привантажувача з якісними показниками ущільнення та однорідністю структури.

З погляду практичної експлуатації обладнання корисними є оглядові роботи щодо схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та можливостей керування

параметрами ущільнення, які окреслюють інженерні резерви регулювання режимів і підходи до адаптації обладнання під різні вироби [7]. Узагальнюючи аналіз джерел, можна сформулювати ключову науково-прикладну прогалину: існують напрацювання з теорії вібраційних систем [4], моделювання середовища [2], вивчення взаємодії плити з сумішшю [3], [5], а також конструктивно-експериментальні результати щодо привантажувачів і комбінованих установок [1], [6], [7], однак бракує єдиного узгодженого підходу до обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем саме в режимі доущільнення залізобетонних кілець з урахуванням нелінійних властивостей суміші та зміни її динамічних характеристик у часі.

3. Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для підвищення ефективності доущільнення бетонних сумішей при виготовленні залізобетонних кілець інженерних мереж. Для досягнення поставленої мети передбачено розроблення узагальненої математичної моделі системи «привантажувач – форма – бетонна суміш» з урахуванням нелінійних пружно-дисипативних властивостей середовища та визначення раціональних частотно-амплітудних режимів роботи привантажувача. Завданням дослідження також є встановлення критеріїв вибору режимів доущільнення, що забезпечують підвищення однорідності структури та фізико-механічних характеристик залізобетонних кілець.

4. Обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача. На рисунку 1 наведено загальний вигляд вібраційної машини для ущільнення та доущільнення бетонних сумішей, призначеної для виготовлення кільцевих залізобетонних виробів, що застосовуються у каналізаційних, водопровідних мережах та шахтах для прокладання інженерних комунікацій. Конструкція машини реалізує принцип розділення контурів збудження та силового привантаження, що забезпечує керовану зміну режимів динамічного впливу на бетонну суміш без ускладнення загальної компоновки установки.

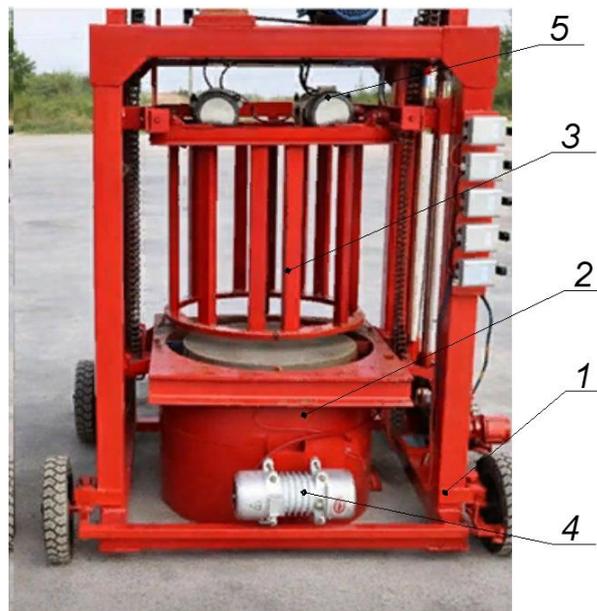


Рис. 1. Вібраційна машина для ущільнення: 1 – рама установки; 2 – форма; 3 – привантажувач; 4 – віброзбуджувач форми; 5 – віброзбуджувачі привантажувача
 Fig. 1. Vibrating compaction machine: 1 – installation frame; 2 – mold; 3 – loader; 4 – mold vibrator; 5 – loader vibrators

Несучою основою установки є рама (1), яка сприймає статичні та динамічні навантаження та забезпечує просторову жорсткість конструкції. Форма (2) для виготовлення залізобетонного кільця встановлюється безпосередньо на жорстку бетонну основу виробничої підлоги, що виключає використання віброізолюючих опор і зумовлює передачу значної частини динамічних зусиль у систему «форма – бетонна суміш – основа». Така схема

характерна для промислових технологій формування кільцевих виробів і потребує цілеспрямованого вибору параметрів вібраційного впливу.

Для створення коливального руху форми застосовується віброзбуджувач форми (4), який забезпечує первинне ущільнення бетонної суміші за рахунок гармонічних коливань. Основний процес доущільнення реалізується за допомогою безінерційного привантажувача (3), який контактує з верхньою поверхнею бетонної суміші та створює додаткове нормальне навантаження. Привантажувач оснащено автономними віброзбуджувачами (5), що формують незалежний коливальний процес і не мають жорсткого кінематичного зв'язку з віброзбуджувачем форми.

Ключовою особливістю розглянутої конструкції є можливість незалежного керування параметрами коливань привантажувача та форми, що дозволяє реалізовувати комбінований гармонічно-імпульсний вплив на бетонну суміш. За відсутності віброізоляції така схема сприяє більш інтенсивній передачі напружень у бетонне середовище, особливо на завершальній стадії ущільнення, коли ефективні пружно-дисипативні характеристики суміші істотно зростають. Це створює передумови для підвищення щільності та однорідності структури залізобетонних кілець без суттєвого збільшення енергетичних витрат.

Розглянемо систему, що складається з: привантажувача масою m_p , форми масою m_f , та шару бетонної суміші висотою h і площею контакту S . Узагальнені переміщення: $z_p(t)$ вертикальне переміщення робочого органу привантажувача; переміщення форми. Оскільки форма спирається на жорстку основу, зв'язок «форма–підлога» описуємо великою жорсткістю k_0 та демпфуванням c_0 (або граничним випадком $z_f(t) \approx 0$).

Бетонну суміш у “зосередженій” постановці подаємо як нелінійну пружно-дисипативну ланку між привантажувачем і формою з силою взаємодії $F_c(\Delta z, \Delta \dot{z})$, де $\Delta z = z_p - z_f$, $\Delta \dot{z} = \dot{z}_p - \dot{z}_f$

Нелінійний характер середовища враховуємо у вигляді поліноміальної жорсткості та в'язкого опору (поширена форма для еквівалентного опису ущільнюваних сумішей) [2], [3], [5]:

$$F_c(\Delta z, \Delta \dot{z}) = k_1 \Delta z + k_3 (\Delta z)^3 + c_1 \Delta \dot{z} + c_3 (\Delta \dot{z})^3 \quad (1)$$

Збудження від віброзбуджувача форми задаємо як гармонічну силу: $F_f(t) = F_{f0} \sin(\omega_f t)$

Автономні віброзбуджувачі привантажувача формують гармонічний (можливо фазозсунутий) вплив: $F_p(t) = F_{p0} \sin(\omega_p t + \varphi)$.

Якщо реалізується імпульсна складова привантаження (удар/короткий імпульс сили), її зручно описувати сумою коротких імпульсів:

$$F_{\text{imp}}(t) = \sum_{k=1}^N P_k g(t - t_k), \quad (2)$$

де P_k – імпульс (інтеграл сили за часом), g – нормована форма імпульсу (прямокутна, напівсинус, експонента тощо). Такий запис природно пояснює появу вищих гармонік у спектрі коливань і напружень, що є принципово важливим для інтенсивного доущільнення [4], [6].

Тоді рівняння руху мають вигляд:

$$m_p \ddot{z}_p + F_c(\Delta z, \Delta \dot{z}) = F_p(t) + F_{\text{imp}}(t), \quad (3)$$

$$m_f \ddot{z}_f + c_0 \dot{z}_f + k_0 z_f - F_c(\Delta z, \Delta \dot{z}) = F_f(t). \quad (4)$$

Жорстка основа задається гранично великими k_0 , що в практичному наближенні дає: $z_f(t) \approx 0$, $\dot{z}_f(t) \approx 0$.

Тоді модель спрощується до одного рівняння для привантажувача відносно «нерухомої основи»:

$$m_p \ddot{z}_p + k_1 z_p + k_3 z_p^3 + c_1 \dot{z}_p + c_3 \dot{z}_p^3 = F_p(t) + F_{\text{imp}}(t). \quad (5)$$

Для інженерного синтезу режимів зручно перейти до еквівалентних амплітудно-залежних коефіцієнтів жорсткості та демпфування:

$$k_{\text{eff}}(A) = k_1 + \frac{4}{3}k_3A^2, \quad (6)$$

$$c_{\text{eff}}(A) = c_1 + \frac{4}{3}c_3(A\omega)^2, \quad (7)$$

де A – усталена амплітуда коливань робочого органа, ω – робоча кругова частота. Тоді наближено отримуємо лінійне рівняння:

$$m_p \ddot{z}_p + c_{\text{eff}}(A) \dot{z}_p + k_{\text{eff}}(A) z_p \approx F_p(t) + F_{\text{imp}}(t). \quad (8)$$

Відповідна амплітудна характеристика (для гармонічного режиму без імпульсів) записується стандартно [4]:

$$A(\omega) = \frac{F_{p0}}{\sqrt{(k_{\text{eff}}(A) - m_p \omega^2)^2 + (c_{\text{eff}}(A) \omega)^2}}. \quad (9)$$

Цей зв'язок використовується для підбору режиму, за якого при зростанні жорсткості суміші на завершальній стадії ущільнення зберігається потрібний рівень динамічних прискорень [3], [5], [6].

Щоб врахувати нерівномірність ущільнення по висоті шару та поширення напружень, бетонну суміш можна описати як одновимірне в'язкопружне середовище зі зведеною швидкістю хвилі c_w і коефіцієнтом затухання ζ [2]:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2\zeta \omega_w \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = c_w^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq h, \quad (10)$$

де $u(x, t)$ – переміщення частинок суміші вздовж висоти xxx .

Граничні умови для нашого випадку “жорстка підлога”:

на нижній межі контакт з основою: $u(h,t) = 0$

на верхній межі (дія привантажувача): напруження визначається прикладеною силою:

$$\sigma(0, t) = E \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{F_p(t) + F_{\text{imp}}(t)}{s}, \quad (11)$$

Така постановка дозволяє оцінювати максимальні напруження σ_{max} , їх спектр, вищі гармоніки від імпульсів, а також умови узгодження частоти з товщиною шару [2], [4].

5. Висновки У роботі виконано обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для процесу доущільнення бетонних сумішей при виготовленні залізобетонних кілець, що формуються безпосередньо на жорсткій бетонній основі. Запропоновано узагальнену математичну модель системи «привантажувач – бетонна суміш – форма – основа», яка враховує нелінійні пружно-дисипативні властивості бетонного середовища, відсутність віброізоляції та можливість незалежного керування режимами коливань форми і привантажувача. Показано, що застосування автономного гармонічно-імпульсного збудження привантажувача забезпечує формування амплітудно-залежних динамічних режимів, за яких зростає інтенсивність передачі напружень у шар бетонної суміші та активізується її структурна перебудова на завершальній стадії ущільнення.

На основі еквівалентної лінеаризації отримано залежності ефективних жорсткісних і демпфувальних характеристик бетонної суміші від амплітуди коливань, що дозволяє раціонально підбирати частотно-амплітудні параметри роботи безінерційного привантажувача з урахуванням зміни властивостей середовища в процесі ущільнення. З використанням хвильової моделі показано, що за відсутності віброізоляції особливого значення набуває узгодження частоти збудження з геометричними параметрами шару суміші, оскільки це забезпечує більш рівномірний розподіл напружень по висоті та товщині залізобетонних кілець.

Список використаних джерел:

1. Nesterenko M. Loaders for Concrete Compaction / M. Nesterenko, O. Panfilov, M. Pyrlyk // Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering. – 2023. – Vol. 2, Iss. 61. – P. 80-85. – DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Сердюк Л.І., Давиденко Ю.О., Костенко П.М. Деякі підходи до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм // Ресурсоекономні матер., констр., будівлі та споруди. – Рівне : НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 69–72.
3. Маслов, О., Саленко, Ю., & Маслова, Н. (2011). Дослідження взаємодії віброуючої плити з цементобетонною сумішшю. Вісник КНУ імені Михайла Остроградського, (2/201 (67), ч. 1), 93–98.
4. Назаренко, І. І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-е вид.). Київ. 440 с.
5. Maslov A.G., Salenko J.S., Maslova N.A. Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture // Вісник КНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 2 (67). – С. 93–98.
6. Ведмідь В.В. Експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки / В.В. Ведмідь, Т.М. Нестеренко, М.М. Нестеренко, М.О. Пирлик // Системні технології. – 2025. – Т. 5, № 160. – С. 178–188. – URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19> .
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/2237>
7. Дьяченко О., Пригоцький В., Маліцький І. Огляд схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та аналіз можливостей керування параметрами ущільнення // Енергоощадні машини і технології : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 17–19 трав. 2022 р.). – Київ : КНУБА, 2022. – С. 28–31.

References:

1. Nesterenko, M., Panfilov, O., & Pyrlyk, M. (2023). Loaders for concrete compaction. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 2(61), 80–85. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Serdiuk, L. I., Davydenko, Yu. O., & Kostenko, P. M. (2005). Some approaches to modeling a medium processed by a vibration device [Deiaki pidkhody do modeliuvannia seredovyshcha, shcho obrobliaetsia vibratsiinyim prystroiem]. Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings and Constructions – Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy, 12, 69–72. Rivne: NUWM.
3. Maslov, O., Salenko, Yu., & Maslova, N. (2011). Investigation of interaction between a vibrating plate and cement concrete mixture [Doslidzhennia vzaemodii vibruuiuchoi plyty z tsementobetonnoiu sumishshiu]. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University – Visnyk KNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2(67), Pt. 1, 93–98.
4. Nazarenko, I. I. (2010). Applied problems of vibration systems theory [Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system] (2nd ed.). Kyiv, Ukraine.
5. Maslov, A. G., Salenko, J. S., & Maslova, N. A. (2011). Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, 2(67), 93–98.
6. Vedmid, V. V., Nesterenko, T. M., Nesterenko, M. M., & Pyrlyk, M. O. (2025). Experimental studies of a combined impulse–vibration installation [Eksperymentalni doslidzhennia kombinovanoi impulsno-vibratsiinoi ustanovky]. System Technologies, 5(160), 178–188. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19>
7. Diachenko, O., Pryhotskyi, V., & Malitskyi, I. (2022). Review of vibration platform schemes with vertical oscillations and analysis of compaction control possibilities [Ohliad skhem vibromaidanchykyv z vertykalnymy kolyvanniamy ta analiz mozhlyvostei keruvannia parametramy ushchilnennia]. In Energy-Saving Machines and Technologies: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (pp. 28–31). Kyiv: KNUCA.