

УДК 621.867.52

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0609>**¹Олександр Панфілов,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2917-0328>, e-mail: panfilov6418@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 ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОГО ДОУЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗІНЕРЦІЙНОГО ПРИВАНТАЖУВАЧА

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 IMPULSE-VIBRATION COMPACTION OF CONCRETE MIXTURES USING AN INERTIAL-FREE LOADER

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. Вібраційні установки широко застосовуються в будівельній індустрії для ущільнення бетонних сумішей, при цьому якість ущільнення безпосередньо визначає щільність, однорідність структури та довговічність готових виробів. Традиційні гармонічні режими віброущільнення не завжди забезпечують достатню інтенсивність впливу, особливо для жорстких, малорухомих і легких бетонів, а також при формуванні виробів значної товщини. Перспективним напрямом підвищення ефективності процесу є

застосування імпульсних і комбінованих вібраційно-імпульсних режимів, які сприяють формуванню хвильових процесів у бетонному середовищі та інтенсифікації внутрішніх переміщень частинок суміші. Однак реалізація таких режимів у традиційних конструкціях супроводжується істотним зростанням інерційних навантажень, що призводить до підвищених динамічних напружень, збільшення енерговитрат і зниження ресурсу обладнання. Застосування безінерційних привантажувачів з автономними віброзбуджувачами дозволяє формувати локалізовані імпульсні навантаження без значного збільшення коливної маси системи, однак потребує теоретичного обґрунтування їх параметрів з урахуванням нелінійних і хвильових ефектів. У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення динамічної моделі та визначення раціональних параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для підвищення ефективності доущільнення бетонних сумішей.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Проблема ефективного ущільнення бетонних сумішей є однією з ключових у технології виробництва бетонних і залізобетонних виробів, оскільки саме характер прикладених динамічних навантажень визначає інтенсивність перебудови внутрішньої структури суміші, її ущільнюваність, рівномірність розподілу компонентів та кінцеві фізико-механічні властивості матеріалу. У зв'язку з цим значна кількість досліджень присвячена аналізу взаємодії робочих органів вібраційних машин з бетонною сумішшю, розробленню нових конструктивних схем віброплощадок та оптимізації параметрів коливального процесу [1–3, 6, 8].

У роботах [1, 3, 8] детально досліджено фізичні механізми вібраційного ущільнення бетонних сумішей з урахуванням динамічного тиску, інерційних і хвильових ефектів. Показано, що під дією вертикальних і комбінованих коливань у бетонному середовищі формуються зони підвищеного напружено-деформованого стану, які сприяють активному переміщенню частинок заповнювача, руйнуванню структурних містків та інтенсифікації процесів перекомпонування зернового каркаса. Встановлено, що максимальна ефективність ущільнення досягається за умов формування несталих режимів коливань із наявністю вищих гармонік та імпульсних складових, які забезпечують короткочасні пікові прискорення значної величини.

Дослідження динаміки вібраційних систем та їх взаємодії з бетонною сумішшю, виконані у працях [2, 3, 5], показали, що традиційні гармонічні режими вібраційного збудження не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал ущільнення, особливо при роботі з жорсткими та малорухомими сумішами. Автори відзначають, що істотне підвищення ефективності можливе за рахунок застосування імпульсних та імпульсно-резонансних режимів, які створюють складне спектральне наповнення коливального процесу та забезпечують формування хвильових фронтів тиску у товщі бетонного шару. При цьому встановлено, що динамічний тиск на суміш значною мірою залежить не лише від амплітуди коливань, а й від тривалості імпульсів, їх частоти та фазового зсуву між окремими складовими збудження.

У роботах [4, 6] наведено огляд сучасних конструктивних схем віброплощадок з вертикальними коливаннями та проаналізовано можливості керування параметрами ущільнення шляхом зміни частоти, амплітуди та характеру коливального збудження. Показано, що застосування комбінованих схем із декількома джерелами коливань дозволяє розширити амплітудно-частотний діапазон та формувати складні режими руху робочого органу, однак супроводжується ускладненням конструкції, зростанням інерційних навантажень та підвищенням енергоємності процесу. При цьому проблема локального доущільнення верхніх шарів бетонної суміші залишається недостатньо вирішеною, що обмежує ефективність формування виробів значної товщини.

Важливий внесок у розвиток теорії імпульсно-вібраційного ущільнення зроблено у працях [5, 9], де розглянуто конструктивні рішення імпульсних вібраційних установок та експериментально досліджено їх вплив на процес формування бетонних виробів. Встановлено, що імпульсні режими збудження дозволяють істотно знизити тривалість

ущільнення, підвищити однорідність структури та зменшити енерговитрати порівняно з класичними гармонічними режимами. Разом із тим автори відзначають, що ефективність таких систем значною мірою залежить від правильного вибору масо-інерційних, жорсткісних і часових параметрів імпульсного впливу, що потребує подальшого теоретичного обґрунтування.

У працях [7] розглянуто підходи до математичного моделювання середовища, яке обробляється вібраційними пристроями, з урахуванням нелінійних реологічних характеристик, в'язкопружних властивостей та дисипативних втрат енергії. Показано, що бетонну суміш доцільно розглядати як багатофазне середовище зі змінними параметрами жорсткості та демпфування, які залежать від ступеня ущільнення та режиму навантаження. Це суттєво ускладнює побудову аналітичних моделей та потребує застосування узагальнених методів динамічного аналізу, зокрема спектрального підходу та лінеаризації нелінійних залежностей.

Аналіз наведених публікацій свідчить, що значний науковий інтерес зосереджений на дослідженні імпульсних та комбінованих режимів ущільнення, а також на розробленні відповідних конструктивних схем вібраційного обладнання. Водночас більшість існуючих робіт орієнтована на системи з підвищеними інерційними масами та жорстко зв'язаними віброзбуджувачами, що обмежує можливості керування локальними процесами ущільнення і призводить до значних динамічних навантажень на елементи конструкції. Недостатньо дослідженим залишається напрям застосування безінерційних привантажувачів з автономними віброзбуджувачами, які дозволяють формувати локалізовані імпульсні навантаження без істотного збільшення коливної маси системи.

3. Мета і завдання дослідження. Метою статті є обґрунтування та оптимізація параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для доущільнення бетонних сумішей на основі динамічного та хвильового аналізу взаємодії елементів системи «вібраційна установка – привантажувач – бетонна суміш» з метою підвищення ефективності ущільнення, енергоефективності процесу та стабільності роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети у роботі розглянуто фізичну та розрахункову моделі вібраційної установки з імпульсним привантажувачем, проаналізовано особливості формування хвильово-імпульсних режимів ущільнення та їх вплив на динамічні характеристики системи.

Завданнями дослідження є розроблення узагальненої математичної моделі коливального процесу системи «вібраційна установка – бетонна суміш – безінерційний привантажувач» з урахуванням нелінійних пружно-дисипативних властивостей середовища та імпульсного характеру збудження, формування методики визначення приведених масо-інерційних і жорсткісних параметрів, аналіз впливу частоти, амплітуди та тривалості імпульсів на спектр коливань і хвильові процеси в бетонній суміші, а також обґрунтування раціональних параметрів автономного віброзбуджувача та привантажувача з метою забезпечення інтенсивного й рівномірного доущільнення бетонних сумішей.

4. Фізична та розрахункова модель вібраційної установки з імпульсним привантажувачем

Запропонована вібраційна установка з імпульсним привантажувачем призначена для реалізації комбінованого вібраційно-імпульсного режиму ущільнення бетонних сумішей, що забезпечує інтенсифікацію процесу формування та підвищення однорідності структури матеріалу. Конструктивна схема установки наведена на рисунку 1 і включає нерухому раму 1, пружні опори 2, рухому раму 3, форму з бетонною сумішшю 4, безінерційний привантажувач 5, імпульсний механізм 6 та автономний віброзбуджувач 7. Для математичного опису коливального процесу систему доцільно подати у вигляді багатомасової моделі з узагальненими координатами, які характеризують вертикальні переміщення рухомої рами та привантажувача.

Рухома рама 3 разом із формою 4 та бетонною сумішшю здійснює коливальний рух

відносно нерухомої рами 1 на пружних опорах 2, які формують необхідні пружно-дисипативні характеристики системи та забезпечують її віброізоляцію. Безінерційний привантажувач 5 розміщується над поверхнею бетонної суміші та взаємодіє з нею через контактну поверхню, формуючи додаткове локальне динамічне навантаження. Імпульсний механізм 6 генерує періодичні силові імпульси, які передаються на привантажувач, забезпечуючи короткочасні навантаження високої інтенсивності.

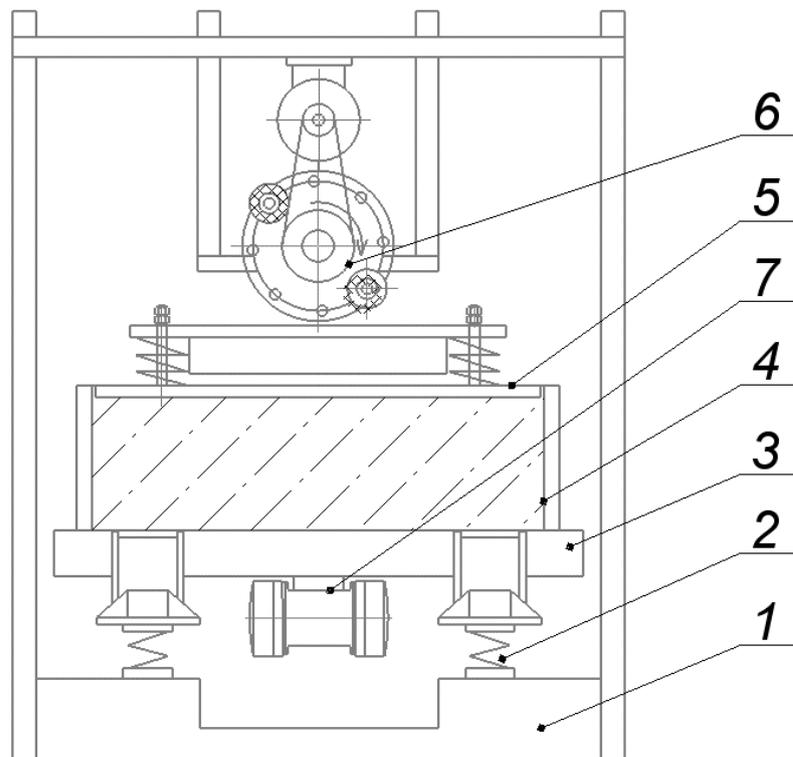


Рис. 1. Схема вібраційної установки з імпульсним привантажувачем для ущільнення бетону: 1 – рама, 2 – опори, 3 – рухома рама, 4 – форма з бетоном, 5 – привантажувач, 6 – імпульсний механізм, 7 – віброзбуджувач

Fig. 1. Scheme of a vibration installation with an impulse loader for compacting concrete: 1 – frame, 2 – supports, 3 – movable frame, 4 – form with concrete, 5 – loader, 6 – impulse mechanism, 7 – vibrator

Принцип дії установки полягає у поєднанні гармонічних коливань рухомої рами з імпульсними впливами автономного віброзбуджувача, що створює складний коливальний процес із багатоспектральним наповненням. У результаті в бетонній суміші формуються хвильові процеси стиску та розвантаження, які поширюються по висоті шару, інтенсифікуючи внутрішні переміщення частинок заповнювача, зменшуючи міжзернове тертя та сприяючи більш щільному пакуванню структурних елементів.

На відміну від традиційних схем, у яких імпульсне навантаження реалізується шляхом збудження всієї масивної системи, застосування безінерційного привантажувача дозволяє сформувати локалізований імпульсний вплив без істотного збільшення коливної маси. Це забезпечує досягнення високих пікових прискорень у зоні контакту з бетонною сумішшю за відносно малих енерговитрат і знижених динамічних навантажень на несучі елементи конструкції.

З точки зору динаміки, систему «рухома рама – форма – бетонна суміш – привантажувач» доцільно розглядати як багатомасову коливальну систему з нелінійними пружно-дисипативними зв'язками та комбінованим гармонічно-імпульсним збудженням. Бетонна суміш при цьому моделюється як реологічно складне середовище зі змінними параметрами жорсткості та демпфування, що залежать від ступеня ущільнення, вологості, гранулометричного складу та режиму навантаження.

Імпульсний вплив, який створюється механізмом 6, призводить до формування короткочасних хвиль напружень у бетонному середовищі, що поширюються від поверхні контакту вглиб шару. Внаслідок відбиття хвиль від дна форми та меж розділу середовищ виникає інтерференція прямої та відбитої хвиль, що сприяє утворенню локальних зон підвищеного динамічного тиску. Саме ці зони відіграють визначальну роль у процесі доущільнення, особливо у верхніх і приповерхневих шарах бетонної суміші, де ефективність класичного гармонічного віброущільнення є обмеженою.

Як основну узагальнену координату приймемо вертикальне переміщення рухомої рами з формою та бетонною сумішшю $z(t)$, а також відносне переміщення привантажувача $y(t)$ відносно поверхні бетонної суміші. Рухома частина системи характеризується приведеною масою:

$$m_{\Sigma} = m_3 + m_4 + m_b \quad (1)$$

де m_3 – маса рухомої рами, m_4 – маса форми, m_b – приведена маса бетонної суміші, що залучається до коливального процесу.

Пружні опори 2 характеризуються еквівалентною жорсткістю c та коефіцієнтом демпфування b , що визначають пружно-дисипативні властивості системи. Вібробуджувач 7 створює гармонічну збуджуючу силу $F_v(t) = F_0 \sin(\omega t)$.

Імпульсний механізм 6 формує періодичну послідовність короткочасних імпульсів, що передаються через безінерційний привантажувач 5 у бетонну суміш. Цей вплив можна подати у вигляді імпульсної сили:

$$F_i(t) = \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k), \quad (2)$$

де P_k – імпульс сили, $\delta(t)$ – дельта-функція Дірака, t_k – моменти прикладання імпульсів.

З урахуванням зазначених сил рівняння руху системи в узагальнених координатах набуває вигляду:

$$m_{\Sigma} \ddot{z}(t) + b \dot{z}(t) + cz(t) = F_v(t) + F_i(t) + R(z, \dot{z}), \quad (3)$$

де $R(z, \dot{z})$ – нелінійна реакція бетонної суміші, яка враховує змінну жорсткість і дисипативні властивості ущільнюваного середовища.

Для опису механічної поведінки бетонної суміші використовується узагальнена нелінійна модель пружно-в'язкого середовища, в якій реакція представлена у вигляді:

$$R(z) = k_1 z + k_3 z^3, \quad (4)$$

де k_1 – лінійна складова жорсткості, k_3 – коефіцієнт нелінійної жорсткості, що відображає ущільнювальні властивості бетонної суміші.

Застосовуючи метод еквівалентної лінеаризації, нелінійну характеристику замінюємо еквівалентною лінійною жорсткістю

$$k_{eq}(A) = k_1 + \frac{4}{3} k_3 A^2 \quad (5)$$

де A – амплітуда коливань рухомої рами.

Тоді узагальнене рівняння руху набуває вигляду

$$m_{\Sigma} \ddot{z}(t) + b \dot{z}(t) + (c + k_{eq})z(t) = F_0 \sin(\omega t) + \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k) \quad (6)$$

Для аналізу хвильових процесів у бетонній суміші доцільно використати одномірну хвильову модель поширення імпульсних напружень уздовж координати x , перпендикулярної до поверхні ущільнення:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c_w^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \eta \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (7)$$

де $u(x, t)$ – переміщення частинок бетонної суміші, c_w – швидкість поширення хвиль у

середовищі, η – коефіцієнт внутрішнього демпфування.

Імпульсний вплив привантажувача задає граничні умови у вигляді короткочасного тиску на поверхні бетонної суміші

$$\sigma(0, t) = \frac{F_i(t)}{S} \quad (8)$$

де S – площа контакту привантажувача з поверхнею бетону.

Накладання гармонічного збудження від вібробуджувача 7 та імпульсного впливу механізму 6 призводить до формування складного коливального процесу, що містить основну гармоніку з частотою ω , а також спектр вищих гармонік, кратних частоті імпульсів. Це зумовлює появу короткочасних піків прискорень, які істотно перевищують значення, характерні для класичних гармонічних режимів, і сприяє інтенсифікації процесів доущільнення.

Узагальнене рівняння руху системи можна записати як вертикальні коливання рухомої частини вібраційної установки, що включає рухому раму, форму та приведену масу бетонної суміші. Динамічний стан системи описується узагальненою координатою $z(t)$. Бетонну суміш моделюємо як пружно-в'язке середовище з жорсткісною нелінійністю третього порядку, що є типовим припущенням для задач вібраційного ущільнення.

Рівняння руху має вигляд:

$$m_\Sigma \ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + cz(t) + k_1 z(t) + k_3 z^3(t) = F_0 \sin(\omega t) + \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k) \quad (9)$$

де m_Σ – приведена маса коливальної системи; b – коефіцієнт в'язкого демпфування; c – жорсткість пружних опор; k_1, k_3 – лінійна та нелінійна складові жорсткості бетонної суміші; F_0, ω – амплітуда та кругова частота гармонічного збудження; P_k – імпульси сили, прикладені в моменти часу t_k .

Об'єднуючи лінійні складові жорсткості, отримаємо:

$$m_\Sigma \ddot{z} + b\dot{z} + c_\Sigma z + k_3 z^3 = F_0 \sin(\omega t) + \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k), \quad c_\Sigma = c + k_1 \quad (10)$$

У режимі усталених квазігармонічних коливань $z(t) \approx A \sin(\omega t)$ кубічна нелінійність замінюється еквівалентною лінійною жорсткістю за методом першої гармоніки:

$$k_3 z^3 \Rightarrow \frac{4}{3} k_3 A^2 z \quad (11)$$

Тоді ефективна жорсткість системи дорівнює

$$c_{\text{eff}}(A) = c_\Sigma + \frac{4}{3} k_3 A^2 \quad (12)$$

а амплітудно-залежна власна кругова частота:

$$\omega_0(A) = \sqrt{\frac{c_{\text{eff}}(A)}{m_\Sigma}} = \sqrt{\frac{c_\Sigma + \frac{4}{3} k_3 A^2}{m_\Sigma}} \quad (13)$$

Таким чином, система є слабко нелінійною з жорсткісною нелінійністю, що зумовлює зміщення резонансної частоти зі зростанням амплітуди.

Для ефективного підсилення гармонічних коливань частота збудження повинна задовольняти умову $|\omega - \omega_0(A)| \leq \Delta\omega$ де ширина резонансної області визначається рівнем демпфування:

$$\Delta\omega \approx \frac{b}{2m_\Sigma} \quad (14)$$

Імпульсний механізм забезпечує додатковий приплив енергії у систему. Приріст механічної енергії від одного імпульсу дорівнює

$$\Delta E_k = P_k \dot{z}(t_k) \quad (15)$$

Максимальний енергетичний ефект реалізується за умови прикладання імпульсів у моменти максимального значення швидкості:

$$\dot{z}(t_k) = \dot{z}_{max} \quad (16)$$

що відповідає фазовій умові $\omega t_k = 2\pi + 2\pi n$, $n \in \mathbb{Z}$

Безінерційний привантажувач маси m_p розглядається як локальне джерело імпульсного навантаження та не входить до складу приведеної маси m_Σ .

Імпульс сили, що передається бетонній суміші, визначається з рівняння балансу імпульсу:

$$P_k = \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} F_c(t) dt = m_p(v^- - v^+) \quad (17)$$

де v^- , v^+ – швидкості привантажувача безпосередньо до та після контакту.

Максимальний контактний тиск оцінюється як

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S} \approx \frac{P_k}{S \Delta t} \quad (18)$$

де S – площа контакту; Δt – тривалість імпульсної взаємодії.

Поширення імпульсного навантаження в бетонній суміші описується одномірним хвильовим рівнянням з демпфуванням:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2\zeta \omega_w \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = c_w^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (19)$$

де $u(x,t)$ – вертикальні переміщення частинок суміші; c_w – швидкість поширення хвиль у бетонному середовищі; ζ – коефіцієнт внутрішнього демпфування; ω_w – характерна частота хвильового процесу.

Гранична умова на поверхні контакту має вигляд:

$$E \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sigma(t) = \frac{F_i(t)}{S} \quad (20)$$

Для імпульсного збудження з круговою частотою ω_i довжина хвилі дорівнює

$$\lambda = \frac{2\pi c_w}{\omega_i} \quad (21)$$

Максимальна інтенсивність ущільнення реалізується за умови формування стоячих хвиль стиску в бетонному шарі товщиною h :

$$h = \frac{4}{2k+1} \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

Для оцінювання ефективності процесу імпульсно-вібраційного доущільнення доцільно використовувати безрозмірний параметр

$$П = \frac{\sigma_{max}}{\rho g h} \quad (23)$$

де ρ – густина бетонної суміші, g – прискорення вільного падіння.

Значення $П > 1$ відповідає режиму інтенсивного доущільнення, за якого динамічні напруження перевищують статичний тиск власної ваги бетонного шару.

5. Висновки

У роботі розроблено та теоретично обґрунтовано динамічну модель вібраційної установки з безінерційним імпульсним привантажувачем, яка враховує гармонічно-імпульсний характер збудження, нелінійні пружно-дисипативні властивості бетонної суміші та хвильові процеси поширення напружень у шарі матеріалу. Показано, що застосування еквівалентної лінеаризації дозволяє коректно описати амплітудну залежність власної частоти системи та умови реалізації квазірезонансного режиму роботи. Встановлено, що фазово

узгоджене прикладання імпульсних навантажень у моменти максимальних швидкостей коливального руху забезпечує істотне зростання миттєвих прискорень і динамічного тиску на бетонну суміш без значного збільшення інерційних навантажень на конструкцію. Обґрунтовано умови хвильового підсилення процесу доущільнення, за яких формування стоячих хвиль стиску в бетонному шарі сприяє підвищенню рівномірності та інтенсивності ущільнення по його висоті. Отримані результати створюють наукову основу для раціонального вибору параметрів безінерційного привантажувача та автономного вібробуджувача і можуть бути використані при проектуванні та модернізації вібраційного обладнання для формування бетонних виробів.

Список використаних джерел:

1. Нестеренко, М., & Ведмідь, В. (2025). Теоретичні положення та аналіз робочого процесу ущільнення бетонних сумішей. *Техніка будівництва*, (42), 4–13. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0501> <http://tehbud.knuba.edu.ua/article/view/331978/320980>
2. 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.
3. Nesterenko M.P. Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture / M.P. Nesterenko, A.G. Maslov, Ju.S. Salenko // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7, № 3.2. – P. 260-264.
4. 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.
5. Маслов О.Г. Дослідження вібраційного органу для ущільнення бетонних сумішей з віброімпульсними коливаннями / О. Г. Маслов, Ю. С. Саленко, І. І. Жовтяк, Р. А. Вакуленко, В. Л. Дятловська // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2020. – Вип. 5-6. – С. 139-146. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2020_5-6_21
6. Назаренко І. Огляд і аналіз вібраційного обладнання для формування плоских залізобетонних виробів / І. Назаренко, О. Дедов, О. Дьяченко, А. Свідерський // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. – 2017. – Вип. 90. – С. 49–58.
7. 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.
8. Nesterenko M. M., Vedmid V. V. Дослідження впливу вертикальних вібраційних режимів на взаємодію робочого органу віброплощинки з бетонною сумішшю. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2025. No. 2. P. 182-188. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.23>
9. 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>

References:

1. Nesterenko, M., & Vedmid, V. (2025). Teoretychni polozhennia ta analiz robochoho protsesu ushchilnennia betonnykh sumishei [Theoretical principles and analysis of the working process of concrete mixtures compaction]. *Tekhnika budivnytstva – Construction Engineering*, (42), 4–13. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0501>
2. Maslov, A. G., Salenko, J. S., & Maslova, N. A. (2011). Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2(67), 93–98.
3. Nesterenko, M. P., Maslov, A. G., & Salenko, J. S. (2018). Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture. *International Journal of Engineering & Technology*,

- 7(3.2), 260–264.
4. Diachenko, O., Pryhotskyi, V., & Malitskyi, I. (2022). Ohliad skhem vibromaidanchykyv z vertykalnymy kolyvanniamy ta analiz mozhlyvostei keruvannia parametry ushchilnennia [Review of vibration platform schemes with vertical oscillations and analysis of compaction parameter control possibilities]. In *Enerhooshchadni mashyny i tekhnolohii – Energy-Saving Machines and Technologies (Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Kyiv, May 17–19, 2022, pp. 28–31)*. Kyiv: KNUBA.
 5. Maslov, O. H., Salenko, Yu. S., Zhovtiak, I. I., Vakulenko, R. A., & Diatlovska, V. L. (2020). Doslidzhennia vibratsiinoho orhanu dlia ushchilnennia betonnykh sumishei z vibroimpulsnymy kolyvanniamy [Investigation of a vibration unit for compaction of concrete mixtures with vibro-impulse oscillations]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 5–6, 139–146. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2020_5-6_21
 6. Nazarenko, I., Diedov, O., Diachenko, O., & Sviderskyi, A. (2017). Ohliad i analiz vibratsiinoho obladnannia dlia formuvannia ploskykh zalizobetonnykh vyrobiv [Review and analysis of vibration equipment for forming flat reinforced concrete products]. *Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Melioration Machines*, (90), 49–58.
 7. Serdiuk, L. I., Davydenko, Yu. O., & Kostenko, P. M. (2005). Deiaki pidkhody do modeliuvannia seredovyshcha, shcho obrobliatsia vibratsiynym prystroiem [Some approaches to modeling the medium processed by a vibration device]. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Facilities*, (12), 69–72.
 8. Nesterenko, M. M., & Vedmid, V. V. (2025). Doslidzhennia vplyvu vertykalnykh vibratsiinykh rezhymiv na vzaiemodiiu robochoho orhanu vibroploshchadky z betonnoiu sumishshiu [Investigation of the influence of vertical vibration modes on the interaction of the vibration platform working body with a concrete mixture]. *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, (2), 182–188. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.23>
 9. Vedmid, V. V., Nesterenko, T. M., Nesterenko, M. M., & Pyrlyk, M. O. (2025). Eksperymentalni doslidzhennia kombinovanoi impulsno-vibratsiinoi ustanovky [Experimental studies of a combined impulse-vibration installation]. *Systemni tekhnolohii – System Technologies*, 5(160), 178–188. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19>.