

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО РЕЖИМУ ВІБРОФОРМИ**

*Виконано експериментальні дослідження робочого режиму віброформи*

*Ключові слова: бетонна суміш, віброформа, вібробудувач, дебаланс, просторові коливання, пружна опора.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** Будівельна галузь у сучасних умовах будівництва широко використовує залізобетонні вироби, серед яких особливим попитом користуються крупногабаритні вироби: ферми, ригелі, прольотні балки тощо. Такі вироби часто формують у вібраційних формах оснащених дебалансним вібробудувачем із вертикальним або нахиленим до вертикалі дебалансним валом [7, 8], який забезпечує просторові коливання бетонної суміші. Удосконалення віброформувального обладнання дозволять знизити металоємність та енерговитрати на виробництво тих чи інших залізобетонних виробів і тим самим підвищити їхню конкурентоспроможність.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** У математичних моделях вібраційних машин, у яких розглядаються просторові коливання робочого органу, бетонна суміш урахується у вигляді твердого тіла як приєднана маса до коливальної системи [6, 7]. У "плоских" математичних моделях розглядається вплив бетонної суміші на поглинання енергії з урахуванням її реологічних властивостей [1, 3, 5]. Питання врахування впливу реологічних властивостей бетонних сумішей на процес формування виробу в моделях просторових коливальних систем не розв'язане і тому є актуальним.

Опираючись на праці [9] нами прийнята просторова динамічна модель руху робочого органу з урахуванням опору ущільнюваного середовища, на основі якої складена математична модель вібраційної форми [7, 9] з урахуванням коефіцієнтів затухання в горизонтальній та вертикальній площинах. Дану систему диференціальних рівнянь нами розв'язано в системі комп'ютерної математики MAPLE. Достовірність отриманих результатів математичного моделювання може бути доведена проведенням експериментальних досліджень фізичної моделі.

**Постановка завдання.** Метою роботи є перевірка вибраної динамічної моделі на адекватність реальному об'єкту, при необхідності її уточнення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Враховуючи поставлену мету проведення досліджень нами вибрані лабораторні експерименти, оскільки вони найменш трудомісткі і, унаслідок високої відтворюваності умов постановки дослідів, дозволяють отримати достатньо точні результати.

Проведення намічених досліджень виконувалося на лабораторному стенді з розмірами в плані 2,5×0,9 м. Конструкція стенда (рисунок 1) відтворює прийнятну конструктивну схему промислових віброформ та дозволяє моделювати коливання, які створюють віброформи з різним розташуванням вібробудувача. Віброформа складається з зварної форми, що опирається на пружні гумовометалеві опори встановлені на масивному фундаменті.

Зміна кута нахилу вібробуджувача забезпечується перехідниками, що встановлювалися між підвібраторною плитою та самим вібробуджувачем. Змінюючи положення вібробуджувача по висоті, кути нахилу його валу моделюємо заданий характер руху форми вібростенда.



Рисунок 1 – Фізична модель віброформи з похилим вібробуджувачем

В якості параметрів коливань вібростенда прийняті амплітудні значення прискорень вертикальних і горизонтальних складових його вібропереміщень.

Результати експерименту отримувалися при різних положеннях вібробуджувача по величині заглиблення і куту нахилу його де балансного вала за умови, що площина дії вимушуючої сили проходила поблизу ц.м. коливальної системи. Тому для кожного положення вібробуджувача заздалегіть підраховується геометричне положення ц. м. коливальної системи.

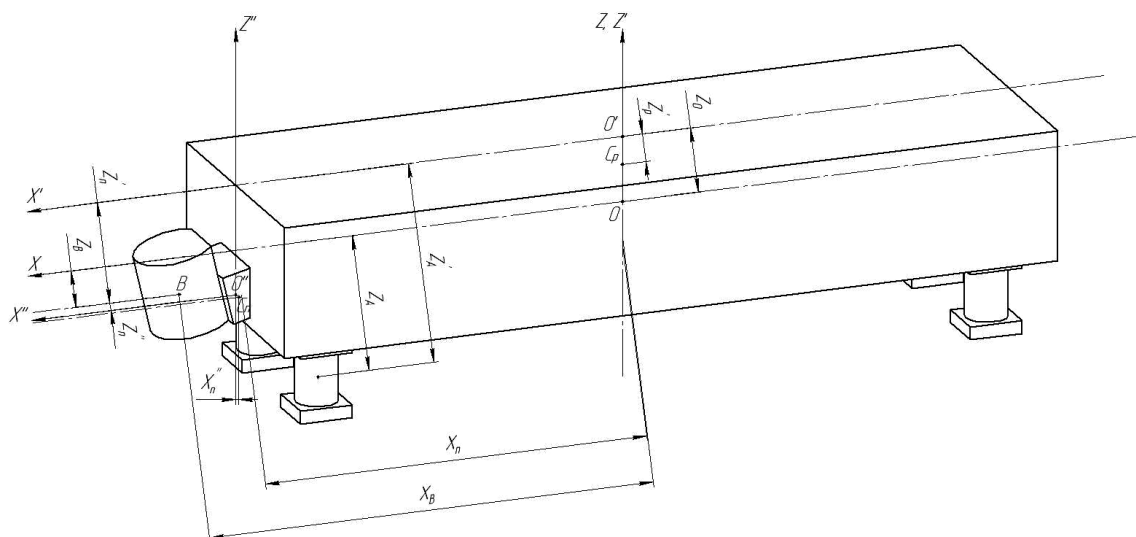


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення динамічних та конструктивних параметрів вібростенда

Для цього введено дві системи прямокутних координат допоміжна –  $O'x'y'z'$ , початок якої суміщено з геометричним центром поверхні рухомої рами, осі  $O'x'$  і  $O'y'$  розміщені в подовжній і поперечній площинах симетрії рами, а вісь  $O'z'$  направлена

вертикально, і основна Охуз, початок якої, як і в динамічній моделі, співпадає з ц. м. тіла. Осі обох систем координат паралельні. На поверхні рухомої рами з кроком 250 мм у напрямі осей Ох і Оу вибрані точки, в яких вимірювалися віброприскорення форми. Для зручності роботи через ці точки проведені подовжні і поперечні лінії. Амплітуди горизонтальних, поперечних і вертикальних віброприскорень крапок позначені індексом, що складається відповідно з позначення подовжньої і поперечної ліній на перетині якої вони знаходяться, наприклад, віброприскорення в точці D матимуть позначення jxz'3, juz'3, jzz'3. Такі позначення зручні при аналізі величин прискорень, оскільки легко дозволяють відшукати потрібну точку, а також порівнювати отримані значення в симетричних точках віброформи.

Вимірювання виконувалися за допомогою щупів, укручених в корпуси віброперетворювачів ДН-3, ДН-4 і ДН-5. При цьому вістря щупа встановлювалося перпендикулярно до віброуючої поверхні, а для виключення впливу дотичних складових віброприскорень на поверхню форми у вимірюваних точках наклеєні скляні пластинки.

Проводилися експериментальні дослідження, що дозволяють встановити характер розподілу складових амплітуд віброприскорень по поверхні форми залежно від значення вимушуючої сили віброзбуджувача, кута нахилу їх валів і величин заглиблення віброзбудників відносно центру мас коливальної системи.

Оскільки рама віброформи досить жорстка, то віброзбуджувач, що використовувався працював в стійкому режимі. Так форма вібростенда здійснювала стійкі коливання в поперечному і вертикальному напрямках, а також поворотні навколо її подовжньої осі.

Отримання заданих режимів коливань залежить від ряду початкових параметрів і тим самим представляє багатофакторне завдання, тому при дослідженні застосований метод математичного планування експериментів, що дозволило не тільки скоротити обсяг експериментальних дослідів, але і отримати достатньо надійну і точну математичну інтерпретацію моделі. Для проведення досліджень вибраний п'ятифакторний тривірневий план другого порядку, який дозволяє отримати математичну модель у вигляді повного квадратичного рівняння. Використаному плану властиві такі критерії оптимальності як мінімізація числа дослідів, простота обчислення коефіцієнтів, незалежність оцінок коефіцієнтів моделі. Рівняння регресії для вибраного плану забезпечує однакову точність прогнозування вихідного параметра в області описуваної радіусом, рівним І. Дослідження поверхні відгуку виконуємо за допомогою поліноміальної моделі, яка має вигляд

$$\hat{Y}_i = b_0 + \sum_1^K b_i \cdot x_i + \sum_1^K b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_1^K b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (1)$$

де  $i, j = 1, 2, \dots, K$  – порядкові номери чинників ( $i \neq j$ );

$\hat{Y}_i$  – величина, що оптимізується;

$x_i, y_i$  – початкові (варійовані) чинники в кодованій формі;

$K$  – кількість чинників;

$b_0, b_i, b_j, b_{ii}, b_{ij}$  – статистичні оцінки дійсних коефіцієнтів моделі обчислювані для прийнятого плану за формулами:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,0817[O\bar{y}] - 0,0179 \sum_1^K [i\bar{y}], \\ b_i &= 0,0555 \cdot [i\bar{y}], \\ b_j &= 0,0625 \cdot [ij\bar{y}], \end{aligned} \quad (2)$$

$$b_0 = -0,0179[O\bar{y}] - 0,5[i\bar{y}] - 0,0936 \sum_1^K [ii\bar{y}],$$

$$\begin{aligned}
[Q\bar{y}] &= \sum_1^N \bar{Y}_u, \\
[i\bar{y}] &= \sum_1^N x_i^2 \cdot \bar{Y}_u, \\
[i\bar{y}] &= \sum_1^N x_{iu} \cdot \bar{Y}_u, \\
[ij\bar{y}] &= \sum_1^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \bar{Y}_u,
\end{aligned}$$

$N$  – число дослідів у плані (включаючи нульові точки);

$\bar{Y}_u$  – середньоарифметичне значення оптимізованої величини в  $u$ -тому досліді;  
 $x_{iu}, x_{ju}$  – значення  $i, j$ -тих чинників в  $u$ -том досліді.

Перехід залежності від чинників у кодованій формі (1) до залежності від натуральних значень чинників здійснюється за допомогою співвідношення

$$x_i = \frac{X_i - 0,5(X_{imax} + X_{imin})}{0,5(X_{imax} + X_{imin})}, \quad (3)$$

де  $x_i$  – початковий  $i$ -тий варійований чинник в натуральній формі;

$X_{imax} + X_{imin}$  – відповідно мінімальне і максимальне значення  $x_i$ -того фактора.

Для отримання точної і достовірної інформації необхідно удаватися до багатократної повторюваності експериментів. У даному випадку, оскільки кожен з коефіцієнтів визначається за наслідками всієї серії дослідів, повторність експерименту прийнята рівною двом.

Статистичний аналіз отриманих залежностей по прийнятому плану проводиться як вказано нижче.

Дисперсію адекватності обчислюємо за формулою

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^N (\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2}{N - m - (n_0 - 1)}, \quad (4)$$

де  $m$  – число значущих коефіцієнтів;

$\hat{Y}_u$  – значення досліджуваної величини  $u$ -тому досліді, обчислене по уточненому рівнянню, отриманому після відкидання незначущих членів.

Обробка експерименту виконувалася по методиці комплексного аналізу впливу всіх варійованих чинників на оптимізовану характеристику за допомогою графічного аналізу.

Таким чином, відповідно до вищевикладеного, намічено виявити вплив на розподіл амплітудних значень, що становлять, прискорень по поверхні рухомої рами вібростенда таких чинників, як: заглиблення віброзбудників відносно ц.м. коливальної системи, кут нахилу їх валів, величин тих, що вимушують в результаті аналізу заздалегідь проведених пошукових експериментів визначені раціональні діапазони зміни варійованих чинників. Межі варіювання в натуральних значеннях і відповідні їм кодові позначення приведені в таблиці 1, а в додатку ПД приведені результати експерименту, проведеного по наміченому плану.

**Таблиця 1 – Границі варіювання факторів**

Фактори і їх розмірність	Позначення		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	літерне	кодове	-1	0	+1	
Заглиблене вібробуджувача відносно ц. м., m	Zβ	X1	0	0,100	0,200	0,100
Кут нахилу валів, град.	β	X2	0	10	20	10
Сумарна виму-шуюча сила, створювана вібробуджувачем, Н	2F	X3	6200	7800	9400	1600
Координати точок віброформи, м:						
по осі Ox	XD	X4	0	0,400	0,800	0,400
по осі Oy	YD	X5	0	0,200	0,400	0,200

У результаті реалізації прийнятого плану для визначення динамічних можливостей вібростенда й аналізу експериментальних даних отримані наступні рівняння регресії для складових прискорень довільної точки D(x,y,z.) рухомої рами:

(φ=0)

$$\begin{aligned} \hat{j}_{xc} &= 18,39 - 2,26x_1 + 5,0x_2 + 4,01x_3 + 1,74x_5 - 0,56x_1^2 + 1,26x_2^2 - 0,59x_3^2 + \\ &+ 0,65x_1x_3 - 0,66x_1x_5 + 0,70x_2x_3 - 0,34x_2x_5 + 0,54x_2x_5 \\ \hat{j}_{yc} &= 10,91 + 2,01x_1 + 11,19x_4 + 1,96x_3x_4, \\ \hat{j}_{zc} &= 2,98 + 1,03x_1 + 2,25x_2 + 0,67x_3 + 3,32x_4 + 0,35x_1^2 + 0,09x_2^2 + \\ &+ 0,17x_3^2 + 0,20x_4^2 + 0,21x_1x_3 + 1,01x_1x_4 + 0,46x_2x_3 + 2,24x_2x_4 + 0,65x_3x_4 \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\hat{j}_{xc}$ ,  $\hat{j}_{yc}$ ,  $\hat{j}_{zc}$  – оптимізовані величини відповідно поздовжніх, поперечних і вертикальних складових прискорень довільної точки D(x,y,z) на поверхні рухливої рами.

У результаті проведення попередніх пошукових експериментів виявлено, що поздовжні складових прискорень більш ніж в 10 разів менше поперечних. Тому їхні виміри не виконувалися, а при складанні рівнянь регресії прийняте  $\hat{j}_{xc} = 0$ . У представлених рівняннях всі коефіцієнти перевірені на значимість за вищенаведеною методикою з використанням критерію Ст. 'юдента при 95% довірчій імовірності. Перевірка рівнянь регресії на адекватність за критерієм Фишера показала, що отримані математичні моделі підходять для опису вихідних залежностей у досліджених межах зміни факторів.

Використовуючи співвідношення (3) можна здійснити перехід від рівнянь регресії в кодованій формі (5) і (6) до рівнянь у натуральні змінні. Нижче наведені кодовані значення факторів у натуральних змінних

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{z_b - 1}{0,1}; \\
 x_2 &= \frac{\beta - 10}{10}; \\
 x_3 &= \frac{F - 3900}{800}; \\
 x_4 &= \frac{x_c - 0,4}{0,4}; \\
 x_5 &= \frac{y_c - 0,2}{0,2}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Для порівняння наведені графічні залежності між експериментальними та теоретичними дослідженнями (рисунок 3).

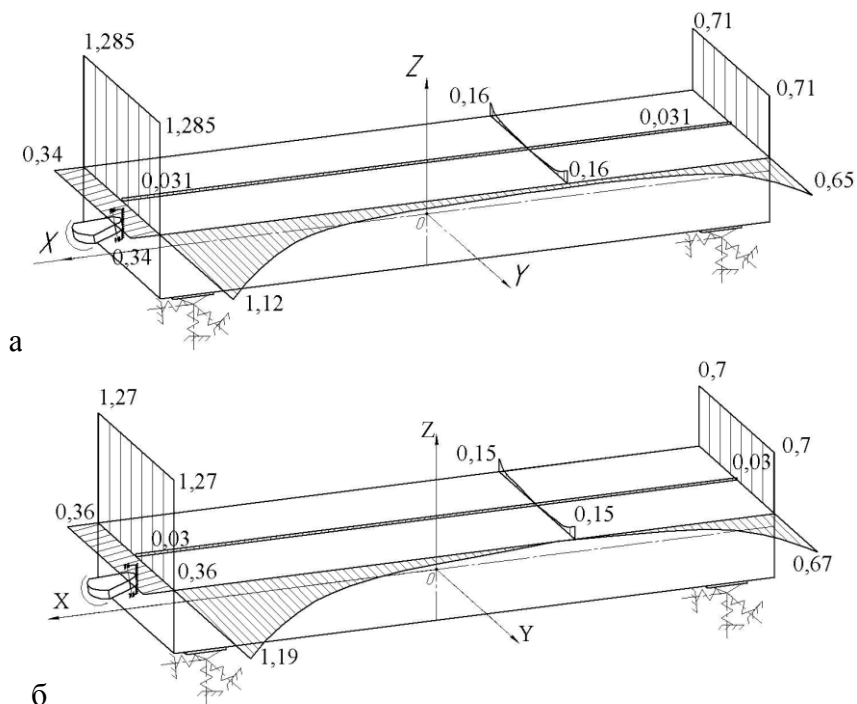


Рисунок 3 – Амплитуди віброприскорень точок форми вібростенда:  
а – експериментальні; б – теоретичні.

### Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження дозволяють установити характер розподілу амплітуд складових віброприскорень по поверхні рухомої рами залежно від вимушуючої сили, вібробудувача, кута нахилу його валу і величин заглиблення вібробудувача відносно ц. м. коливальної системи по п'ятифакторному тривірневому плані другого порядку.

2. Отримані рівняння регресії внаслідок реалізації прийнятого плану експерименту дозволяють визначити складові прискорень довільної точки на поверхні рухомої рами.

3. Реалізовані рухи рухомої рами вібростенда відповідають прийнятому характеру руху рухомої рами при динамічному моделюванні. Заглиблення вібробудувача відносно ц. м. коливальної системи веде до збільшення поворотних коливань рухомої рами навколо її поперечної осі.

4. При зіставленні результатів фізичного й динамічного моделювань виявлено, що відхилення значень віброприскорень, отриманих при динамічному моделюванні, перевищують експериментальні не більше ніж на 10%. Таким чином, має місце гарний збіг теоретичні й експериментальні даних, а наявні відхилення в розрахунках перебувають у межах точності експерименту.

#### *Література:*

1. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981 – 464 с. ил.
2. Гольдштейн, Б.Г., Петрунькин, Л.П. Глубинные вибраторы для уплотнения бетона. – М.: Машиностроение, 1966 – 169 с.: ил.
3. Гусев, Б.В., Зазимко, В.Г. Вибрационная технология бетона. – К.: Будівельник, 1991 – 160 с.: ил.
4. Десов, А.Е. Вибрированный бетон. – М.: Госстройиздат, 1956 – 230 с. Ж ил.
5. Сивко, В. И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси. К.: Высш. шк., 1987. – 168 с.
6. Овчинников, П. Ф. Виброреология. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.
7. Орисенко, О.В., Нестеренко, М.П. Дослідження просторового руху робочого органа вібраційної машини для формування тубчастих залізобетонних виробів // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2000. – Вип. 6, частина 1. – С.172-175.
8. Олехнович, К.А., Виноградов, Ю.И. Исследования характера многокомпонентных колебаний малощумных виброплощадок. Полтава. Инж. – строит. инт, Полтава, 1980, – 13 с.
9. Нестеренко, М. П. та ін. Математичне моделювання вібраційних машин для формування залізобетонних виробів з урахуванням впливу бетонної суміші на робочий орган / М. П. Нестеренко, Д. С. Педь // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. Редкол.: О. Г. Онищенко (гол. ред.) та ін. – Вип. 23, т. 2. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – С. 51 – 55.

*Надійшло до редакції 27.10.2011*

*© М.П. Нестеренко, Д.С. Педь*

**Н. П. Нестеренко, к.т.н., доц., Д. С. Педь, ст. преподаватель**

***Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка***

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ВИБРОФОРМЫ**

*Проведены аналитические исследования рабочего режима виброформы.*

***Ключевые слова:*** бетонная смесь, виброплощадка, вибровозбудитель, дебаланс, пространственные колебания, упругая опора.

**M. P. Nesterenko, Ph. D., D.S. Ped, senior teacher**

*Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk*

**RESEARCH OPERATING CONDITION WORK OF VIBRATIONFORM**

*Analytical researches operating condition work vibratioform.*

**Keywords:** *concrete mixture, vibration platform, vibration exciter, unbalance, spatial vibrations, resilient support.*