

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО РЕЖИМУ ВІБРОПЛОЩАДКИ З ВИМУШЕНИМИ КРУТИЛЬНИМИ КОЛИВАННЯМИ ПРИ ФОРМУВАННІ РЕБРИСТИХ ПЛИТ ПОКРИТТІВ І ПЛИТ ПЕРЕКРИТТІВ**

*Проведені аналітичні дослідження робочого режиму віброплощадки з вимушеними крутильними коливаннями при формуванні ребристих плит покриттів і плит перекриттів.*

***Ключові слова:** бетонна суміш, віброплощадка, віброзбуджувач, дебаланс, просторові коливання, пружна опора.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями.** У сучасних умовах будівництва залізобетонні вироби широко використовуються. Значно поширюється використання просторових бетонних та залізобетонних виробів складної форми, прикладом котрих можуть бути бетонні ребристі плити покриттів і плити перекриттів, які є сучасними будівельними конструкціями. Вони стійкі до великих навантажень та забезпечують хорошу звукоізоляцію суміжних приміщень. Ребристі плити перекриттів виготовляють із ребрами в одному або двох напрямках зі суцільною плитою у верхній частині. Вони добре працюють на вигин. Ребристі плити призначені як для створення несучих конструкцій будівель, так і для перекриттів багатоповерхових громадських, виробничих чи допоміжних будівель промислових підприємств, споруд різного призначення тощо.

Такі вироби формують із важкого або легкого конструкційного бетону щільної структури на інерційних віброплощадках з вертикально направленими коливаннями, які забезпечують ефективне формування бетонних і залізобетонних виробів із жорстких цементобетонних сумішей, але дуже енергоємні і складні за конструкцією, особливо із збільшенням їхньої вантажопідйомності [1].

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Доведено [2], що досить ефективними при формуванні бетонних виробів є віброплощадки з використанням одно-, дво- та полічастотної багатокомпонентної вібрації.

Інерційні віброплощадки з низькочастотними горизонтально направленими коливаннями [3 – 4] прості по конструкції, менш енергоємні, проте забезпечують формування плоских виробів лише з пластичних бетонних сумішей. Ці віброплощадки можуть бути застосовані для формування бетонних і залізобетонних виробів з просторовою формою конструкції. Проте залишається відкритим питання про використання різноспрямованої вібраційної дії на ущільнюване середовище. Не розв'язане питання [5 – 6] обґрунтування режимів і напрямку вібраційної дії при формуванні просторових бетонних і залізобетонних виробів складної форми

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження динамічної системи «віброплощадка – бетонне середовище» на яку діють викликані моментами вимушуючих сил крутильні коливання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для визначення характеру руху рухомої рами віброплощадки і закріпленої на ній форми з бетонною сумішшю

розглянемо розрахункову схему, представлену на рисунку 1. При зсуві на вібробуджувачеві 4 дебалансів 6 відносно дебалансів 7 вібробуджувача коливань 5 на кут  $\alpha = 180^\circ$  здійснюються крутильні коливання рухомої рами і форми з бетонною сумішшю лише відносно вертикальної осі  $Z$  і поздовжньої осі  $X$ , що проходять через центр мас коливальної системи.

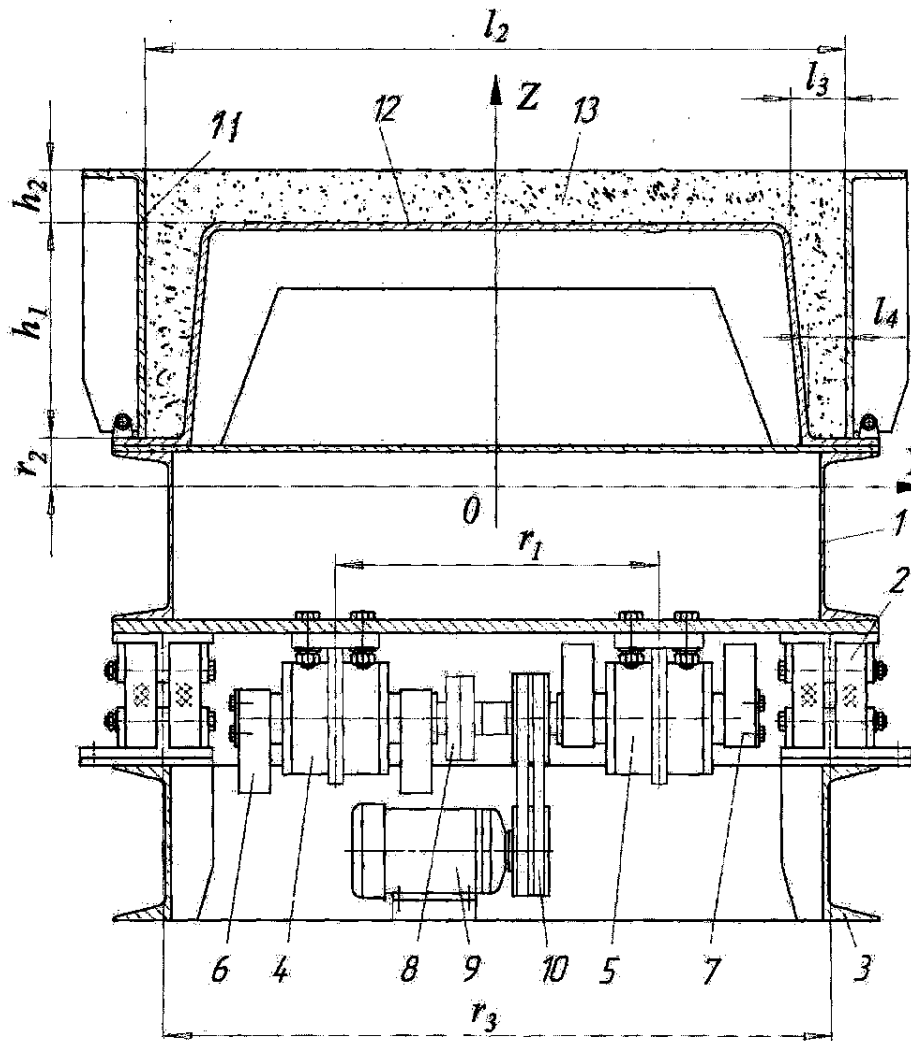


Рисунок 1 – Розрахункова схема вібраційної площадки для ущільнення ребристих плит перекриттів і ребристих плит покриттів:

1 – рухома рама; 2 – пружні амортизатори; 3 – опорна рама;  
4, 5 – вібробуджувачі коливань; 6, 7 – дебаланси; 8 – муфта; 9 – електродвигун;  
10 – клинопасова передача; 11 – поздовжній борт; 12 – осердя; 13 – бетонна суміш

При куті зсуву дебалансів рівному  $\alpha = 180^\circ$  крутильні коливання рухомої рами і форми з бетонною сумішшю відносно вертикальної осі  $Z$  і поздовжньої осі  $X$ , що проходять через центр мас, можна описати такою системою рівнянь:

$$(J_1 + J_{bz}) \frac{d^2 \phi_z}{dt^2} + (n_1 + n_z) \frac{d \phi_z}{dt} + \zeta_1 \phi_z = M_1 \sin \omega t ; \quad (1)$$

$$(J_2 + J_{bx}) \frac{d^2 \phi_x}{dt^2} + n_2 \frac{d \phi_x}{dt} + \zeta_2 \phi_x = M_1 \cos \omega t , \quad (2)$$

де  $\phi_z$ ,  $\phi_x$  – кутові зсуви рухомої рами і форми з бетонною сумішшю відносно координатних осей відповідно вертикальної  $Z$  і поздовжньої  $X$ ;

$J_1, J_2$  – моменти інерції маси рухомої рами і форми відносно відповідно вертикальної  $Z$  і поздовжньої  $X$  координатних осей;

$\zeta_1, \zeta_2$  – коефіцієнти крутильної жорсткості пружних опор відносно координатних осей відповідно  $Z$  та  $X$ ;

$n_1, n_2$  – коефіцієнти непружного опору пружних опор при скручуванні відносно координатних осей відповідно  $Z$  та  $X$ ;

$\omega$  – кутова частота вимушених коливань;

$M_1$  – амплітуда моменту вимушуючих сил

$$M_1 = Q_1 r_1; \quad (3)$$

$Q_1$  – амплітуда вимушуючих сил одного віброзбуджувача коливань;

$r_1$  – відстань між центрами вимушуючих сил віброзбуджувачів коливань;

$J_{bz}$  – момент інерції приведеної маси формованого виробу відносно вертикальної осі  $Z$ ;

$J_{bx}$  – момент інерції приведеної маси формованого виробу відносно поздовжньої осі  $X$ ;

$n_z$  – коефіцієнт непружного опору бетонній суміші при кутовому зсуві відносно вертикальної осі  $Z$ ;

$n_x$  – коефіцієнт непружного опору бетонній суміші при кутовому зсуві відносно поздовжньої осі  $X$ .

Моменти інерції приведеної маси формованого виробу відносно поздовжньої осі  $X$  і вертикальної осі  $Z$  складатимуться з моментів інерції мас формованої плити і формованих бічних ребер відносно цих координатних осей.

Момент інерції приведеної маси формованого виробу відносно вертикальної осі  $Z$  може бути визначений з наступної залежності:

$$J_{bz} = J_{zpl} + J_{zr}, \quad (4)$$

де  $J_{zpl}$  – момент інерції маси формованої плити з розмірами  $L \times l_2 \times h_2$ , відносно вертикальної осі  $Z$ ,

$$J_{zpl} = \frac{1}{12} m_{\tau} (L^2 + l_2^2); \quad (5)$$

$m_{\tau pl}$  – приведена маса формованої плити [7, 8],

$$m_{\tau pl} = \frac{\eta_s L l_2 h_2}{a_1}; \quad (6)$$

$J_{zr}$  – момент інерції маси формованих бічних ребер відносно вертикальної осі  $Z$ ,

$$J_{zr} = m_{\tau r} \left( \frac{l_1^2}{6} + \frac{L_2^2}{2} \right); \quad (7)$$

$m_{\tau r}$  – приведена маса одного формованого бічного ребра [7, 8],

$$m_{\tau r} = h_1 L \eta_s \frac{k_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1) + 2\alpha_2 \sin(k_2 l_1)}{\omega \cdot \{ [e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1) \}}; \quad (8)$$

$l_1$  – середня товщина стінки плити

$$l_1 = 0,5(l_3 + l_4);$$

$k_2, \alpha_2$  – хвильове число і коефіцієнт загасання збудження в бетонній суміші, визначаються з виразів [7, 8].

Момент інерції приведеної маси формованого виробу відносно поздовжньої осі  $X$  визначиться з такої залежності

$$J_{bx} = J_{xpl} + J_{xr}, \quad (9)$$

де  $J_{xpl}$  – момент інерції маси формованої плити з розмірами  $L \times l_2 \times h_2$  відносно поздовжньої осі  $X$ ,

$$J_{xpl} = m_{np1} \left[ \frac{1}{12} l_2^2 + (r_2 + h_1 + 0,5h_2)^2 \right]; \quad (10)$$

$m_{np1}$  – приведена маса формованої плити при вібраційній дії у вертикальному напрямку [7],

$$m_{np1} = l_2 L \left[ \frac{\rho}{k} \operatorname{tg}(k_1 h_2 - \lambda_1) \sqrt{1 - \frac{0,25\xi^2}{E^2 \omega^2} + \frac{0,5\xi}{\omega^2}} \right]; \quad (11)$$

$J_{xr}$  – момент інерції маси формованих ребер відносно поздовжньої осі  $X$

$$J_x = 2m_{np1} \left[ \frac{l_1^2}{12} + \frac{(l_2 - l_1)^2}{4} + \frac{h_1^2}{12} + (0,5h_1 + r_2)^2 \right]; \quad (12)$$

$m_{np1}$  – приведена маса бетонної суміші при вібраційній дії у вертикальному напрямку [8],

$$m_{np1} = l_1 L \left[ \frac{\rho}{k} \operatorname{tg}(k_1 h_1 - \lambda_1) \sqrt{1 - \frac{0,25\xi^2}{E^2 \omega^2} + \frac{0,5\xi}{\omega^2}} \right]. \quad (13)$$

Коефіцієнт непружного опору бетонній суміші при кутовому зсуві відносно вертикальної осі  $Z$  може бути визначений з такої залежності

$$n_z = n_{zpl} + n_{zr}, \quad (14)$$

де  $n_{zpl}$  – коефіцієнт непружного опору формованої з бетонної суміші плити відносно вертикальної осі  $Z$ ,

$$n_{zpl} = b_{\tau pl} \frac{L^2 + l_2^2}{4}; \quad (15)$$

$b_{\tau pl}$  – коефіцієнт непружного опору суміші при зсувних деформаціях, що створюються днищем форми при контакті з бетонною плитою [8],

$$b_{\tau pl} = a_1 \eta_s L l_2 h_2; \quad (16)$$

$n_{zr}$  – коефіцієнт непружного опору формованих з бетонної суміші ребер плити відносно вертикальної осі  $Z$ ,

$$n_{zr} = b_{\tau r} \frac{l_2^2}{4}; \quad (17)$$

$b_{\tau r}$  – коефіцієнт непружного опору суміші при зсувних деформаціях, створених поздовжніми стінками форми при контакті з бетонними ребрами [7],

$$b_{\tau r} = 2h_1 L \eta_s \frac{2k_2 \sin(k_2 l_1) + \alpha_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)}. \quad (18)$$

Розв'язок системи рівнянь (1) і (2) для стаціонарних вимушених коливань динамічної системи можна представити в такому вигляді:

$$\phi_z(t) = \Phi_z \cos(\omega t + \theta_z); \quad (19)$$

$$\phi_x(t) = \Phi_x \sin(\omega t - \theta_x), \quad (20)$$

де  $\Phi_z$  – амплітуда крутильних гармонійних коливань відносно координатної осі  $Z$ ,

$$\Phi_z = \frac{M_1}{\sqrt{[\zeta_1 - (J_1 + J_{bz})\omega^2]^2 + (n_1 + n_z)^2 \omega^2}}; \quad (21)$$

$\theta_z$  – кут зсуву фаз між амплітудою моменту вимушуючої сили і амплітудою крутильних гармонійних коливань відносно координатної осі  $Z$ ,

$$\theta_z = \arctg \frac{(n_1 + n_z)\omega}{\zeta_1 - (J_1 + J_{bz})\omega^2}; \quad (22)$$

$\Phi_x$  – амплітуда крутильних гармонійних коливань відносно координатної осі  $X$ ,

$$\Phi_x = \frac{M_1}{\sqrt{[\zeta_2 - (J_2 + J_{bx})\omega^2]^2 + n_2^2 \omega^2}}; \quad (23)$$

$\theta_x$  – кут зсуву фаз між амплітудою моменту вимушуючої сили і амплітудою крутильних гармонійних коливань відносно координатної осі  $X$ ,

$$\theta_x = \arctg \frac{n_2 \omega}{\zeta_2 - (J_2 + J_{bx})\omega^2}. \quad (24)$$

Отримані вирази (19) і (20) дозволяють визначити переміщення взаємодіючої з ущільненою сумішшю кожної точки форми відповідно у напрямку координатних осей  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ , які викликаються під дією моментів вимушуючих сил крутильними коливаннями рами віброплощадки.

Закон руху форми у напрямку координатної осі  $X$  матиме такий вигляд

$$u_x(t) = y\phi_z(t) = \Phi_z y \cos(\omega t + \theta_z)$$

при  $-(0,5l_2 + l_1) \leq y \leq 0,5l_2 + l_1$  (25)

При  $y = 0,5l_2 + l_1$  і при  $y = -(0,5l_2 + l_1)$  вираз (25) описує закон руху взаємодіючих із формованими бетонними ребрами поздовжніх бортів форми, тобто

$$u_{xbr}(t) = y\phi_z(t) = \Phi_z(0,5l_2 + l_1) \cos(\omega t + \theta_z) \quad (26)$$

При  $-0,5l_2 \leq y \leq 0,5l_2$  вираз (25) описує закон руху взаємодіючого з формованою бетонною плитою осердя форми у напрямку осі  $X$ .

Закон руху форми у напрямку координатної осі  $Y$  матиме такий вигляд

$$u_y(t) = z\phi_x(t) + x\phi_z(t) = z\Phi_x \sin(\omega t - \theta_x) + x\Phi_z \cos(\omega t + \theta_z)$$

при  $r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 + r_2$  і  $-0,5L \leq x \leq 0,5L$ ; (27)

При  $r_2 \leq z \leq h_1 + r_2$  і  $-0,5L \leq x \leq 0,5L$  вираз (26) описує закон руху взаємодіючих із формованими бетонними ребрами поздовжніх бортів форми в поперечному напрямку, тобто у напрямку координатної осі  $Y$ .

При  $z = h_1 + r_2$  і  $-0,5L \leq x \leq 0,5L$  вираз (25) описує закон руху взаємодіючої з формованою бетонною плитою бортів і осердя форми у напрямку координатної осі  $Y$

$$u_{ypl}(t) = \Phi_x(h_1 + r_2) \sin(\omega t - \theta_x) + x\Phi_z \cos(\omega t + \theta_z). \quad (28)$$

Закон руху форми у напрямку координатної осі  $Z$  матиме наступний вигляд

$$u_z(t) = y\phi_x(t) = y\Phi_x \sin(\omega t - \theta_x)$$

при  $-(0,5l_2 + l_1) \leq y \leq 0,5l_2 + l_1$ . (29)

При  $y = -0,5(l_2 + l_1)$  і  $y = 0,5(l_2 + l_1)$  вираз (29) описує закон коливання формованих бетонних ребер плити у вертикальному напрямку, тобто

$$u_{zbr}(t) = y\phi_x(t) = -0,5\Phi_x(l_2 + l_1) \sin(\omega t - \theta_x) \quad (30)$$

При  $-0,5l_2 \leq y \leq 0,5l_2$  вираз (30) описує закон коливань взаємодіючого з формованою бетонною плитою у вертикальному напрямку осердя форми.

#### **Висновки**

1. Отримані аналітичні вирази дозволяють визначити закон руху контактуючих з ущільнюваною сумішшю поверхонь форми при будь-яких значеннях координат  $y$  і  $z$ .

2. Аналіз отриманих виразів показує, що в центральній частині форми бетонна суміш більше піддається зсувним деформаціям, а по периферії – нормальним деформаціям.

3. Внаслідок прикладення крутильних коливань до рухомої рами розробленої нами віброплощадки формований бетонний виріб зі складною просторовою формою сприймає вібраційну дію у вигляді нормальних і дотичних напружень із супергармонічною частотою  $2\omega$ , яка удвічі перевищує частоту генерованих вимушених коливань  $\omega$  кожним із віброзбуджувачів окремо.

4. Режим роботи віброплощадки з супергармонійними коливаннями дозволяє зменшити кутову частоту обертання дебалансів віброзбуджувачів коливань і тим самим понизити енергоємність процесу з одночасним підвищенням ефективності формування з помірно жорстких і жорстких бетонних сумішей просторових бетонних виробів.

#### *Література*

1. Назаренко, І. І. *Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник* / І. І. Назаренко. – К.: КНУБА. – 1999. – 544 с.

2. Нестеренко, М. П. *Аналіз конструктивно-технологічних параметрів віброплощадок і віброустановок для формування залізобетонних виробів* / М. П. Нестеренко // *Техніка будівництва*. – К.: Академія будівництва. – Київський національний університет будівництва та архітектури. – 2010. – № 24. – С. 18 – 23.

3. Нестеренко, М. П. *Вібраційні площадки з просторовими коливаннями для підприємств будівельної індустрії* / М. П. Нестеренко // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПолтНТУ. – 2002. – Вип. 9. – С. 90 – 93.

4. Маслов, А. Г. *Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве* / А. Г. Маслов, В. М. Пономарь. – К.: Будівельник. – 1985. – 128 с.

5. Нестеренко, М. П. *Аналітичне моделювання вібраційної установки з урахуванням впливу бетонної суміші на динаміку віброущільнення* / М. П. Нестеренко, П. О. Молча-нов // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПолтНТУ. – 2011 – Вип. 1 (29). – С. 3 – 10.

6. Нестеренко, М. П. *Математичне моделювання вібраційних машин для формування залізобетонних виробів з урахуванням впливу бетонної суміші на робочий орган* / М. П. Нестеренко, Д. С. Педь // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КДТУ. – 2009. – № 1 (54), Ч. 1. – С. 78 – 80.

7. Нестеренко, М. П. *Дослідження характеру взаємодії вертикальних стінок форми з бетонною сумішшю при дії горизонтальної складової просторових коливань віброплощадки* / М. П. Нестеренко // *Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління*. – Кременчук: КУЕІТУ. – 2009. – № 4 (26). – С. 153 – 158.

8. Нестеренко, М. П. *Дослідження характеру взаємодії віброплощадки з бетонною сумішшю при дії вертикально направленої складової просторових коливань віброплощадки* / М. П. Нестеренко // *Збірник наукових праць (галузеве*

машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ. – 2009. – Вип. 3 (25), Т. 1. – С. 136 – 142.

Надійшла до редакції 27.10.2011  
© М.П. Нестеренко

**Н. П. Нестеренко, к.т.н., доц.**

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ВИБРОПЛОЩАДКИ С  
ВЫНУЖДЕННЫМИ КРУТИЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ПРИ ФОРМОВАНИИ  
РЕБРИСТЫХ ПЛИТ ПОКРЫТИЙ И ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ**

*Проведены аналитические исследования рабочего режима виброплощадки с вынужденными крутильными колебаниями при формировании ребристых плит покрытий и плит перекрытий.*

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

**M. P. Nesterenko, Ph. D.**

*Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk*

**RESEARCH OPERATING CONDITION VIBRATION PLATFORM WITH THE  
FORCED TURNING VIBRATIONS AT SHAPING THE RIBBED FLAGS  
COVERAGES AND FLAGS CEILINGS**

*Analytical researches operating condition work vibration platform are conducted on the stage shaping of concrete tray without the account overhead layer.*

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