



Машина і обладнання технологічних процесів будівельної індустрії

УДК 666.97.003.16

І. І. Назаренко, д. т. н., професор

Київський національний університет будівництва і архітектури

М. П. Нестеренко, к. т. н., доцент

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО РЕЖИМУ ВІБРОПЛОЩАДКИ НА ЗАВЕРШАЛЬНІЙ СТАДІЇ ФОРМУВАННЯ БЕТОННОГО ЛОТКА

АННОТАЦІЯ. Виконані аналітичні дослідження робочого режиму віброплощадки на завершальній стадії формування бетонного лотка.

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

АННОТАЦИЯ. Проведены аналитические исследования рабочего режима виброплощадки на стадии формирования бетонного лотка.

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

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

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

Постановка проблеми. У сучасних умовах будівництва широко використовуються просторові бетонні і залізобетонні вироби складної форми, прикладом котрих можуть бути бетонні лотки. Вони знайшли застосування як при спорудженні теплотрас, так і при будівництві трубопроводів різноманітного призначення. Канали, які виконані з бетонних лотків, можуть прокладатися як у звичайних ґрунтах, так і в ґрунтах з особливими характеристиками, наприклад в ґрунтах просадного типу, в умовах наявності ґрунтових вод, у районах з високою сейсмічною активністю. Крім того, бетонні лотки загального призначення також використовуються для установки в пішохідних зонах, на автостоянках, під'їзних шляхах, у спортивних спорудах тощо. Такі вироби формують на інерційних віброплощадках з вертикально направленими коливаннями, які забезпечують ефективно формування бетонних і залізобетонних виробів із жорстких бетонних сумішей, але дуже енергоємні і складні за конструкцією, особливо зі збільшенням їхньої вантажопідйомності [1].

Аналіз останніх досліджень. 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 за конструкцією, 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 напряму вібраційної дії при формуванні просторових бетонних і залізобетонних виробів складної форми

Метою роботи є дослідження динамічної системи «віброплощадка – бетонне середовище», на яку діє збудження у вигляді горизонтально направленої вимушуючої сили, при формуванні бетонного лотка.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для визначення закону руху і основних параметрів віброплощадки для формування бетонного лотка досліджуємо динамічну систему «віброплощадка – бетонне середовище» (рис. 1), на яку діє збудження у вигляді горизонтально направленої вимушуючої сили, прикладеної нижче від центра мас коливальної системи.

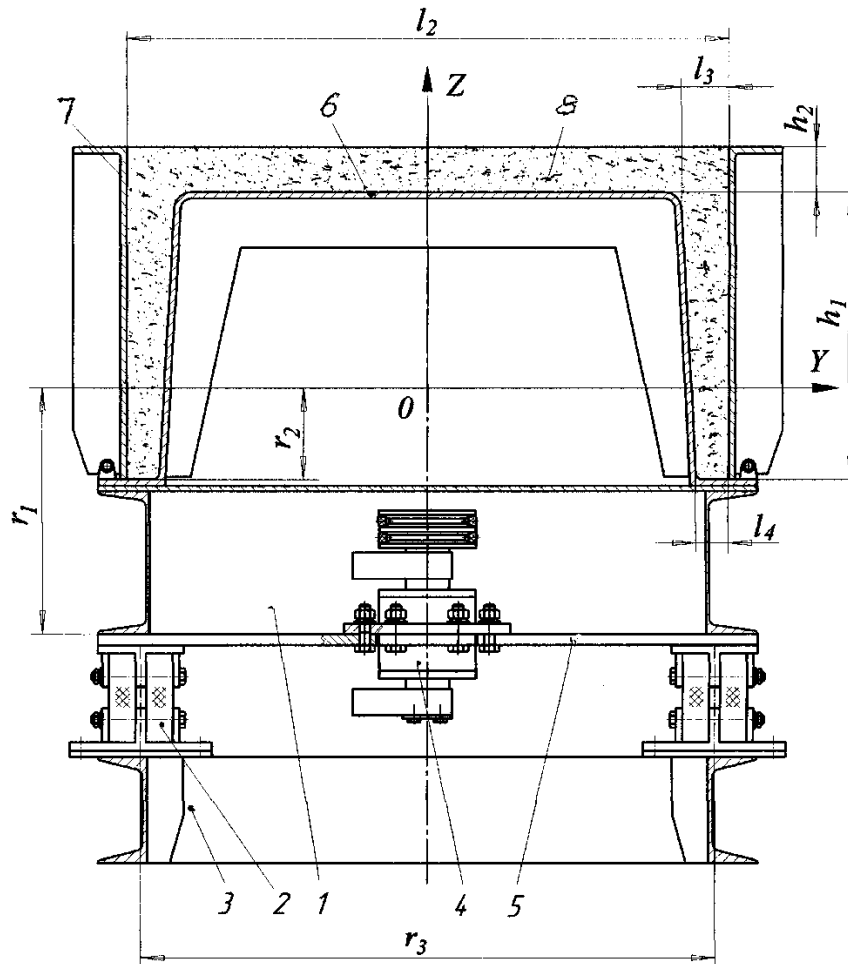


Рисунок 1. Розрахункова схема віброплощадки на стадії формування бічних стінок бетонного лотка у формі: 1 – рухома рама віброплощадки, 2 – пружна опора, 3 – опорна рама, 4 – віброзбуджувач, 5 – опорна плита, 6 – осердя форми, 7 – поздовжній борт, 8 – бетонна суміш.

На початку формування виробів уздовж поздовжніх бортів 7 форми бетоноукладачем укладають валком бетонну суміш 8, яка частково заповнює простір між поздовжніми бортами 7 і осердям 6. Вмикають привідний електродвигун, який за допомогою клинопасової передачі обертає дебалансний вал віброзбуджувача коливань 4 з кутовою швидкістю ω . При цьому вимушуюча сила Q викликає коливання рухомої рами 1 разом з формою в горизонтальному напрямі та одночасно крутильні коливання відносно центра мас O коливальної системи. На бетонну суміш діє різноспрямована вібрація у вигляді одночасно прикладених кругових і крутильних коливань, завдяки якій у віброваній суміші поряд із нормальними виникають зсувні деформації.

При такій вібраційній дії тривалістю 10 – 15 с суміш переходить у тиксотропний стан і повністю заповнює простір між поздовжніми бортами 7 і осердям 6, утворюючи бічні борти лотка. Після закінчення попереднього ущільнення вмикають віброзбуджувач



коливань, укладають бетонну суміш рівномірно по всій поверхні формованого виробу і остаточно її ущільнюють.

Коливання динамічної системи відносно координатних осей X та Y , які проходять відповідно у поздовжньому та поперечному напрямках через центр мас O динамічної системи, можна описати такою системою рівнянь:

$$(m + m_{\tau} + m_{d\tau}) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (b_1 + b_{\tau} + b_{d\tau}) \frac{d x_1}{dt} + c_1 x_1 = Q \cos \omega t; \quad (1)$$

$$(m + m_{i\delta 2} + m_{d\tau} + m_{i\delta 21}) \frac{d^2 y_1}{dt^2} + (b_2 + b_{d\tau}) \frac{d y_1}{dt} + c_2 y_1 = Q \sin \omega t; \quad (2)$$

$$(J_x + J_1 + J_{dx}) \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + n_1 \frac{d \varphi_1}{dt} + \varsigma_1 \varphi_1 = M_1 \sin \omega t; \quad (3)$$

$$(J_y + J_2 + J_{dy}) \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + (n_2 + n_{y\tau}) \frac{d \varphi_2}{dt} + \varsigma_2 \varphi_2 = M_1 \cos \omega t, \quad (4)$$

де m – маса рухомої рами віброплощадки разом з формою;

x_1, y_1 – переміщення рухомої рами відповідно по координатних осях X та Y ;

c_1, c_2 та c_3 – коефіцієнти жорсткості пружних опор відповідно по координатних осях X, Y і Z ;

b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти непружного опору пружних опор відповідно по координатних осях X, Y і Z ;

b_{τ} – коефіцієнт непружного опору суміші при зсувних деформаціях, що створюються поздовжніми стінками форми, визначається на підставі роботи [7],

$$b_{\tau} = 2h_1 L \eta_s \frac{2k_2 \sin(k_2 l_1) + \alpha_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1)}{[e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1)}; \quad (5)$$

Q – амплітуда вимушеної сили;

ω – кутова частота вимушених коливань;

φ_1, φ_2 – кутові зсуви рухомої системи віброплощадки відносно координатних осей відповідно X та Y ;

ς_1, ς_2 – коефіцієнти крутильних жорсткостей пружних опор відносно координатних осей X та Y :

$$\varsigma_1 = \frac{\tilde{n}_3 r_3^2}{4}; \quad (6)$$

$$\varsigma_2 = \frac{\tilde{n}_3 r_4^2}{4}; \quad (7)$$

r_3, r_4 – відстань між пружними опорами по координатних осях відповідно Y та X ;

n_1, n_2 – коефіцієнти непружного опору пружних опор при скручуванні відносно координатних осей відповідно X та Y :

$$n_1 = \frac{b_3 r_3^2}{4}; \quad (8)$$

$$n_2 = \frac{b_3 r_4^2}{4}; \quad (9)$$

$n_{y\tau}$ – коефіцієнт непружного опору бетонній суміші при кутовому зсуві φ_2 відносно осі Y ,

$$n_{y\tau} = b_\tau \frac{L^2}{4}; \quad (10)$$

t – час;

M_1 – амплітуда моменту вимушуючої сили,

$$M_1 = Q r_1; \quad (11)$$

m_τ – приведена маса бетонної суміші, з якої формуються бічні борти лотка, визначається залежністю виведеною раніше [7, 8],

$$m_\tau = 2 h_1 L \eta_s \frac{k_2 (e^{2\alpha_2 l_1} - 1) \cos^2(k_2 l_1) + 2 \alpha_2 \sin(k_2 l_1)}{\omega \cdot \{ [e^{\alpha_2 l_1} \cos(k_2 l_1) + 1]^2 + \sin^2(k_2 l_1) \}}; \quad (12)$$

l_1 – середня товщина стінки лотка,

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

$m_{d\tau}$ – приведена маса бетонної суміші, з якої формується дно бетонного лотка, при її взаємодії з горизонтальною поверхнею осердя (днищем форми), визначена в роботах [7, 8],

$$m_{d\tau} = \frac{\eta_s L l_2 h_2}{a_1}; \quad (13)$$

h_2 – товщина ущільнюваного шару, рівна товщині дна бетонного лотка;

$b_{d\tau}$ – коефіцієнт непружного опору бетонної суміші при її взаємодії з горизонтальною поверхнею осердя [7, 8],

$$b_{d\tau} = \alpha_1 \eta_s L l_2 h_2; \quad (14)$$

$m_{i\delta 21}$ – приведена маса бетонної суміші дна лотка заввишки h_2 , яка взаємодіє з вертикальними стінками форми,

$$m_{i\delta 21} = h_2 L \left(0,5\xi + E k_1 \frac{e^{\delta_1 l_2} - \cos k_1 l_2}{\sin k_1 l_2} \right) \frac{1}{\omega^2}; \quad (15)$$

J_{dx} , J_{dy} – моменти інерції маси бетонної суміші, з якої формується дно бетонного лотка, відносно координатних осей відповідно X та Y :

$$J_{dx} = m_{i\delta 11} \left[\frac{l_2^2}{12} + (h_1 - r_2 + 0,5 h_2)^2 \right]; \quad (16)$$

$$J_{dy} = m_{i\delta 11} \left[\frac{L^2}{12} + (h_1 - r_2 + 0,5 h_2)^2 \right]; \quad (17)$$

$m_{i\delta 11}$ – приведена маса суміші, з якої формується дно бетонного лотка, заввишки h_2 ,

$$m_{i\delta 11} = l_2 L \left[\frac{\rho}{k} \operatorname{tg}(k_1 h_2 - \lambda_1) \sqrt{1 - \frac{0,25 \xi^2}{E^2 \omega^2} + \frac{0,5 \xi}{\omega^2}} \right]; \quad (18)$$



J_x, J_y – моменти інерції маси бетонної суміші, з якої формується бічна стінка лотка, відносно координатних осей відповідно X та Y :

$$J_x = 2m_{i\delta 1} \left[\frac{l_1^2}{12} + \frac{(l_2 - l_1)^2}{4} + \frac{h_1^2}{12} + (0,5h_1 - r_2)^2 \right]; \quad (19)$$

$$J_y = m_{i\delta 1} \left[\frac{L^2}{12} + \frac{h_1^2}{12} + (0,5h_1 - r_2)^2 \right] + \frac{m_\tau L^2}{12}; \quad (20)$$

$m_{i\delta 1}$ – приведена маса бетонної суміші при вібраційній дії у вертикальному напрямку, визначається на підставі залежності, виведеної у роботі [7],

$$m_{i\delta 1} = l_1 L \left[\frac{\rho}{k} \operatorname{tg}(k_1 h_1 - \lambda_1) \sqrt{1 - \frac{0,25\xi^2}{E^2 \omega^2} + \frac{0,5\xi}{\omega^2}} \right]; \quad (21)$$

Розв'язок системи рівнянь (1) – (2) для стаціонарних вимушених коливань динамічної системи представимо в такому вигляді:

$$x_{n1}(t) = A_{n1} \cos(\omega t + \theta_{n1}); \quad (22)$$

$$y_{n1}(t) = A_{n2} \sin(\omega t - \theta_{n2}); \quad (23)$$

$$\varphi_{n1}(t) = \Phi_{n1} \cos(\omega t + \theta_{n3}); \quad (24)$$

$$\varphi_{n2}(t) = \Phi_{n2} \sin(\omega t - \theta_{n4}), \quad (25)$$

де A_{n1}, A_{n2} – амплітуди гармонійних коливань рухомої рами у напрямку координатних осей відповідно X та Y :

$$A_{n1} = \frac{Q}{\sqrt{[c_1 - (m + m_\tau + m_{d\tau})\omega^2]^2 + (b_1 + b_\tau + b_{d\tau})^2 \omega^2}}; \quad (26)$$

$$A_{n2} = \frac{Q}{\sqrt{[c_2 - (m + m_{i\delta 2} + m_{d\tau})\omega^2]^2 + (b_2 + b_{d\tau})^2 \omega^2}}; \quad (27)$$

θ_{n1}, θ_{n2} – кути зсуву фаз між амплітудою вимушуючої сили й амплітудою вимушених коливань рухомої рами у напрямку координатних осей відповідно X, Y при повному завантаженні форми:

$$\theta_{n1} = \operatorname{arctg} \frac{(b_1 + b_\tau + b_{d\tau})\omega}{c_1 - (m + m_\tau + m_{d\tau})\omega^2}; \quad (28)$$

$$\theta_{n2} = \operatorname{arctg} \frac{(b_2 + b_{d\tau})\omega}{c_1 - (m + m_{i\delta 2} + m_{d\tau})\omega^2}; \quad (29)$$

θ_{n3}, θ_{n4} – кути зсуву фаз між амплітудою моменту вимушуючої сили й амплітудою крутильних гармонійних коливань відносно координатних осей відповідно X, Y :

$$\theta_{n3} = \operatorname{arctg} \frac{n_1 \omega}{\zeta_1 - (J_1 + J_x + J_{dx})\omega^2}; \quad (30)$$

$$\theta_{n4} = \operatorname{arctg} \frac{(n_2 + n_{y\tau})\omega}{\zeta_2 - (J_2 + J_y + J_{dy})\omega^2}; \quad (31)$$

Φ_{n1} , Φ_{n2} , – амплітуди крутильних гармонійних коливань відносно координатних осей відповідно X , Y :

$$\Phi_{n1} = \frac{\dot{I}_1}{\sqrt{[\zeta_1 - (J_1 + J_x + J_{dx})\omega^2]^2 + n_1^2 \omega^2}}; \quad (32)$$

$$\Phi_{n2} = \frac{\dot{I}_1}{\sqrt{[\zeta_2 - (J_2 + J_y + J_{dy})\omega^2]^2 + (n_2 + n_{y\tau})^2 \omega^2}}. \quad (33)$$

Використовуючи залежності (22) – (33), знайдемо закони руху форми з ущільнюваною бетонною сумішшю в наступному вигляді:

– лінійні переміщення у напрямі координатної осі X

$$u_{nx}(z, t) = x_{n1}(t) - z\varphi_{n1}(t) = A_{n1}\cos(\omega t + \theta_{n1}) - \Phi_{n1}z\cos(\omega t + \theta_{n3})$$

при $-r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2$; (34)

– лінійні переміщення у напрямі координатної осі Y

$$u_{ny}(z, t) = y_{n1}(t) - z\varphi_{n2}(t) = A_{n2}\sin(\omega t - \theta_{n2}) - \Phi_{n2}z\sin(\omega t - \theta_{n4})$$

при $-r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2$; (35)

– лінійні переміщення у напрямі координатної осі Z , які описують закони руху форми при $z \leq h_1 - r_2$,

$$u_{nz1}(x, t) = 0,5(l_2 - l_1)\varphi_{n2}(t) + x\varphi_{n1}(t) =$$

$$= 0,5\Phi_{n2}(l_2 - l_1)\sin(\omega t - \theta_{n4}) + \Phi_{n1}x\cos(\omega t + \theta_{n3})$$

при $-0,5L \leq x \leq 0,5L$ і $z \leq h_1 - r_2$. (36)

– лінійні переміщення у напрямі координатної осі Z , які описують закони руху форми при $h_1 - r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2$,

$$u_{nz2}(x, y, t) = 0,5(l_2 - l_1)\varphi_{n2}(t) + x\varphi_{n1}(t) =$$

$$= 0,5\Phi_{n2}y\sin(\omega t - \theta_{n4}) + \Phi_{n1}x\cos(\omega t + \theta_{n3})$$

при $-0,5L \leq x \leq 0,5L$, $0 \leq y \leq 0,5(l_2 - l_1)$ і

$$h_1 - r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2, \quad (37)$$

де $u_{nx}(z, t)$, $u_{ny}(z, t)$ – закони руху бічної поверхні форми, яка контактує з ущільнюваною бетонною сумішшю відповідно у напрямі координатних осей X , Y ;

$u_{nz1}(x, t)$, $u_{nz2}(x, y, t)$ – закони руху бічної поверхні форми, що контактує з ущільнюваною бетонною сумішшю, відповідно у напрямі координатної осі Z .

Після перетворень виразів (34) – (37) отримаємо залежності, $u_{nz1}(x, t)$ і $u_{nz2}(x, y, t)$, які у подальшому можна використати для аналізу і моделювання на ПЕОМ:

$$u_{nx}(z, t) = A_{n1x}(z)\cos[\omega t + \theta_{n1x}(z)] \quad \text{при} \quad -r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2; \quad (38)$$

$$u_{ny}(z, t) = A_{n2y}(z)\sin[\omega t - \theta_{n2y}(z)] \quad \text{при} \quad -r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2; \quad (39)$$

$$u_{nz1}(x, t) = A_{n3z}(x)\sin[\omega t - \theta_{n3z}(x)] \quad \text{при} \quad -0,5L \leq x \leq 0,5L \quad \text{і} \\ z \leq h_1 - r_2; \quad (40)$$

$$u_{nz2}(x, y, t) = A_{n4z}(x, y)\sin[\omega t - \theta_{n4z}(x, y)] \quad \text{при} \quad -0,5L \leq x \leq 0,5L \quad \text{і} \\ -0,5l_2 \leq y \leq 0,5l_2 \quad \text{і} \quad h_1 - r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2, \quad (41)$$

де $A_{n1x}(z)$ – амплітуда гармонійних коливань рухомої рами у напрямку координатної осі X ,



$$A_{n1x}(z) = \sqrt{A_{n1}^2 + \Phi_{n1}^2 z^2 - 2 A_{n1} \Phi_{n1} z \cos(\theta_{n1} - \theta_{n3})}; \quad (42)$$

$\theta_{n1}(z)$ – кут зсуву фаз між амплітудою вимушуючої сили і амплітудою вимушених коливань рухомої рами у напрямку координатної осі X ,

$$\theta_{n1x}(z) = \arctg \frac{A_{n1} \sin \theta_{n1} - \Phi_{n1} z \sin \theta_{n3}}{A_{n1} \cos \theta_{n1} - \Phi_{n1} z \cos \theta_{n3}}; \quad (43)$$

$A_{n2y}(z)$ – амплітуда гармонійних коливань рухомої рами у напрямку координатної осі Y ,

$$A_{n2y}(z) = \sqrt{A_{n2}^2 + \Phi_{n2}^2 z^2 - 2 A_{n2} \Phi_{n2} z \cos(\theta_{n2} - \theta_{n4})}; \quad (44)$$

$\theta_{n2y}(z)$ – кут зсуву фаз між амплітудою вимушуючої сили і амплітудою вимушених коливань рухомої рами у напрямку координатної осі Y ,

$$\theta_{n2y}(z) = \arctg \frac{A_{n2} \sin \theta_{n2} - \Phi_{n2} z \sin \theta_{n4}}{A_{n2} \cos \theta_{n2} - \Phi_{n2} z \cos \theta_{n4}}; \quad (45)$$

$A_{n3z}(x)$ – амплітуда гармонійних коливань рухомої рами у напрямку координатної осі Z при $z \leq h_1 - r_2$,

$$A_{n3z}(x) = [0,25 \Phi_{n2}^2 (l_2 - l_1)^2 + \Phi_{n1}^2 x^2 - \Phi_{n1} \Phi_{n2} (l_2 - l_1) x \sin(\theta_{n3} + \theta_{n4})]^{0,5}; \quad (46)$$

$\theta_{n3z}(x)$ – кут зсуву фаз між амплітудою моменту вимушуючої сили та амплітудою крутильних гармонійних коливань,

$$\theta_{n3z}(x) = \arctg \frac{0,5 \Phi_{n2} (l_2 - l_1) \sin \theta_{n4} - \Phi_{n1} x \cos \theta_{n3}}{0,5 \Phi_{n2} (l_2 - l_1) \cos \theta_{n4} - \Phi_{n1} x \sin \theta_{n3}}; \quad (47)$$

$A_{n4z}(x, y)$ – амплітуда гармонійних коливань рухомої рами у напрямку координатної осі Z при $h_1 - r_2 \leq z \leq h_1 + h_2 - r_2$,

$$A_{n4z}(x, y) = \sqrt{\Phi_{n2}^2 y^2 + \Phi_{n1}^2 x^2 - \Phi_{n1} \Phi_{n2} x y \sin(\theta_{n3} + \theta_{n4})}; \quad (48)$$

$\theta_{n4z}(x, y)$ – кут зсуву фаз між амплітудою моменту вимушуючої сили й амплітудою крутильних гармонійних коливань,

$$\theta_{n4z}(x, y) = \arctg \frac{\Phi_{n2} y \sin \theta_{n4} - \Phi_{n1} x \cos \theta_{n3}}{\Phi_{n2} y \cos \theta_{n4} - \Phi_{n1} x \sin \theta_{n3}}. \quad (49)$$

Висновки.

1. Отримані вирази (38) – (44) описують закон руху встановленої на рухомій рамі віброплощадки форми, взаємодіючої з ущільнюваним середовищем і впливаючої на бетонну суміш змінною по величині амплітудно-частотною просторовою вібрацією.
2. Вирази (42), (44), (46) і (48) дозволяють визначити характер зміни амплітуд коливань елементів даної динамічної системи, які взаємодіють із ущільнюваною сумішшю у напрямку координатних осей X , Y та Z . Це дозволяє досить точно визначити величини амплітуд коливань і напружень, які виникають у бетонному середовищі при вібраційній дії, оцінити ефективність вібраційної дії на ущільнюване середовище і обґрунтувати раціональні параметри віброплощадки для формування просторових бетонних виробів.