УДК 666.97.033.16

О.Г. Маслов[1], М.П. Нестеренко[2], Д.С. Педь[2]

[1]*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*
[2]*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

# ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ

*Викладено поетапний розгляд руху запропонованої вібраційної установки відносно координатних осей, що проходять через сумісний центр ваги форми і формованого бетонного виробу з урахуванням властивостей бетонної суміші.*

***Ключові слова:*** *вібраційна установка,бетонна суміш, пружна опора*.

## Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями.** Досить широкого поширення при формуванні залізобетонних виробів набуло розроблене у ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка вібраційне обладнання з просторовими коливаннями робочого органа [1, 2], удосконалення якого може проводитися на підставі аналітичних досліджень із врахуванням фізико-механічних характеристик ущільнюванного середовища і визначенням на їхній основі раціональних параметрів вібраційної площадки та режимів вібраційної дії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми.** У розрахунках вібраційного обладнання для формування залізобетонних виробів використовуються різні підходи до складення математичних моделей, про що свідчать публікації різних років. Відомі математичні моделі можна умовно розподілити на дві групи: плоскі динамічні моделі руху робочого органу, що розглядають рух у вертикальній або горизонтальній площині [3 – 10], та просторові – які розглядають рух робочого органу в просторі [11 – 15].

**Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття.** У математичних моделях вібраційних машин, в яких розглядаються просторові коливання робочого органу, бетонна суміш ураховується у вигляді твердого тіла як приєднана маса до коливальної системи [7 – 9]. У «плоских» математичних моделях розглядається вплив бетонної суміші на поглинання енергії з урахуванням її реологічних властивостей [3 – 4, 10]. Питання врахування впливу реологічних властивостей бетонних сумішей на процес формування виробу в моделях просторових коливальних систем нерозв'язане і тому є актуальним.

**Метою роботи** є поетапний розгляд руху запропонованої вібраційної установки відносно координатних осей $X_1$, $Y_1$ і $Z_1$, що проходять через сумісний центр ваги форми і формованого бетонного виробу з урахуванням властивостей бетонної суміші.

## Виклад основного матеріалу досліджень

На характер коливань вібраційної установки в цілому і форми з ущільнюваним виробом зокрема, а також на ефективність ущільнення формованих бетонних виробів значно впливають фізико-механічні характеристики середовища, що ущільнюється. Саме правильне врахування сил опору бетонних сумішей дозволяє з достатнім ступенем точності встановити закономірність вібраційного процесу ущільнення бетонної суміші, визначити раціональні параметри вібраційної установки, виконаної у вигляді шарнірних з'єднаних між собою вібраційного блока і форми з бетонною сумішшю, обґрунтувати раціональні технологічні параметри вібраційної дії на бетонну суміш, з якої формується виріб. Ці сили опору виникають при взаємодії днища і стінок форми при горизонтально-направленних коливаннях і при можливих вертикальних коливаннях днища форми [10].

На рисунках 1 і 2 представлена розрахункова схема взаємодії вібраційної установки з цементною сумішшю, що ущільнюється.

Віброблок і форма з бетонною сумішшю під дією гармонійної сили $Q\sin\omega t$ здійснює періодичні коливання з частотою $\omega$. Рух віброблока і форми з

бетонною сумішшю в горизонтальній площині у напрямі координатної осі $X_1$ опишемо наступним нелінійним рівнянням:

$$(m_1 + m_2 + m_{pr1})\frac{d^2x_1}{dt^2} + b_3\frac{dx_1}{dt} + \\ + c_3x_1 + f(t) = Q\sin\omega t, \quad (1)$$

де $L_2$ – приведена маса бетонної суміші, що взаємодіє з вертикальними стінками форми при горизонтально-направлених коливаннях;

$f(t)$ – нелінійна функція, яка описує силу кулонового тертя, що виникає внаслідок взаємодії днища форми з бетонною сумішшю,

$$f(t) = \pm F_{tr}; \quad (2)$$

$F_{tr}$ – сила кулонового тертя,

$$F_{tr} = m_b g f_{tr} = \rho S_1 H g f_{tr}. \quad (3)$$

$m_b$ – маса шару бетонної суміші, що приходиться на днище форми;

$f_{tr}$ – коефіцієнт тертя бетонної суміші по днищу форми;

$\rho$ – щільність бетонної суміші;

$S_1$ – площа днища форми;

$H$ – товщина шару бетонної суміші, що ущільнюється;

$g$ – прискорення вільного падіння.

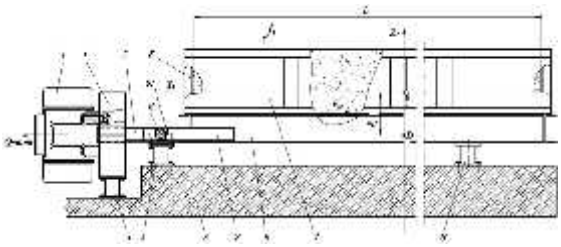

Рис. 1. Розрахункова схема динамічної системи «Вібраційна установка – ущільнюване середовище»

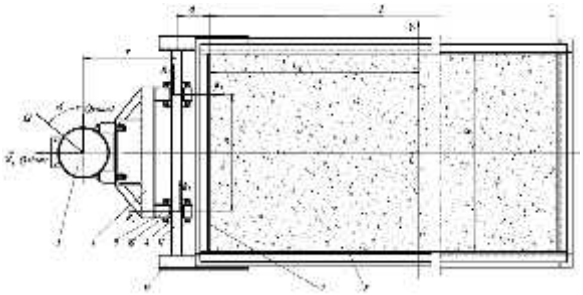

Рис. 2. Розрахункова схема динамічної системи «Вібраційна установка – ущільнюване середовище»: вигляд А на рис. 1

Функцію $f(t)$ опишемо наступним виразом:

$$f(t) = \begin{cases} -F_{tr} & \text{ï ðè} \quad -\pi \le \omega t \le 0, \\ F_{tr} & \text{ï ðè} \quad 0 \le \omega t \le \pi. \end{cases} \quad (4)$$

Нелінійну функцію $f(t)$ розкладемо по тригонометричних функціях з періодом $2\pi$ у ряд Фур'є:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}(a_k\cos k\omega t + b_k\sin k\omega t), \quad (5)$$

де $a_0$, $a_k$, $b_k$ – коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є [6, 7].

Визначаючи відомими методами [6] коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є $a_0$, $a_k$, $b_k$, представимо нелінійну функцію $f(t)$ у наступному вигляді:

$$f(t) = \frac{4F_{tr}}{\pi}\left\{\sin\omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \right. \\ \left. \ldots + \frac{\sin[(2n\omega + 1)t]}{2n+1}\right\}. \quad (6)$$

Відомо [6], що при горизонтально-направлених коливаннях на бічні стінки форми з боку бетонної суміші діятиме інерційна сила, що викликається прискоренням і приведеною масою бетонної суміші $m_{pr1}$ [13]:

$$m_{pr1} = \frac{\rho S_2(1-\cos kl)}{2k\sin kl}, \quad (7)$$

де $S_2$ – площа однієї з торцевих стінок форми, $S_2 = B \cdot H$; $l$ – приведена відстань між вертикальними торцевими стінками форми. Якщо відстань між вертикальними стінками не перевищує довжини вимушуючої хвилі деформацій $L_{â}$, то значення $l$ дорівнює фактичній відстані між вертикальними стінками, тобто $l = L$, якщо перевищує, то $l$ дорівнює довжині хвилі збудження, тобто $l = L_{â}$; $k$ – хвильове число; $E$ – динамічний модуль пружної деформації бетонної суміші, що ущільнюється.

Довжина хвилі збудження, що поширюється в бетонному середовищі,

$$L_{â} = \frac{2\pi}{\omega}\sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (8)$$

Підставляючи (6) у вираз (1), отримаємо рівняння руху динамічної системи у напрямі координатної осі $X_1$:

$$(m_1+m_2+m_{pr1})\frac{d^2x_1}{dt^2}+b_3\frac{dx_1}{dt}+$$
$$+c_3x_1=\left(Q-\frac{4F_{tr}}{\pi}\right)\sin\omega t-\quad . \quad (9)$$
$$-\frac{4F_{tr}}{\pi}\left\{\frac{\sin 3\omega t}{3}+\frac{\sin 5\omega t}{5}+.\right.$$
$$\left..+\frac{\sin[(2n\omega+1)t]}{2n+1}\right\}$$

Обмежуючись трьома членами розкладання ряду (6), знайдемо розв'язок рівняння (2) для стаціонарних коливань у наступному вигляді:

$$x_1(t)=A_{11}\sin(\omega t-\phi_{11})-$$
$$-A_{13}\sin(3\omega t-\phi_{13})-A_{15}\sin(5\omega t-\phi_{15}), \quad (10)$$

де $A_{11}$, $A_{13}$, $A_{15}$ – амплітуди коливань віброблока і форми з бетонною сумішшю у напрямі координатної осі $X_1$ на відповідній гармоніці

$$A_{11}=\frac{Q-\frac{4F_{tr}}{\pi}}{\left(m_1+m_2+m_{pr1}\right)\sqrt{\left(p_{011}^2-\omega^2\right)^2+4\delta_{11}^2\omega^2}}; \quad (11)$$

$$A_{13}=\frac{\frac{4F_{tr}}{\pi}}{\left(m_1+m_2+m_{pr1}\right)\sqrt{\left(p_{011}^2-9\omega^2\right)^2+36\delta_{11}^2\omega^2}}; \quad (12)$$

$$A_{15}=\frac{\frac{4F_{tr}}{\pi}}{\left(m_1+m_2+m_{pr1}\right)\times}, \quad (13)$$
$$\times\sqrt{\left(p_{011}^2-25\omega^2\right)^2+100\delta_{11}^2\omega^2}$$

де $\varphi_{11}$, $\varphi_{13}$, $\varphi_{15}$ – кути зсуву фаз відповідних амплітуд коливань віброблока і форми з бетонною сумішшю у напрямі координатної осі $X_1$ відносно амплітуди вимушуючої сили $Q$;

$p_{011}$ – частота власних коливань динамічної системи у напрямі координатної осі $X$;

$\delta_{11}$ – коефіцієнт демпфірування динамічної системи у напрямі координатної осі $X$;

$$p_{011}=\sqrt{\frac{c_3}{m_1+m_2+m_{pr1}}}; \quad (14)$$
$$\delta_{11}=\frac{b_3}{2\left(m_1+m_2+m_{pr1}\right)}$$

$$\phi_{11}=\operatorname{arctg}\frac{2\delta_1\omega}{p_{011}^2-\omega^2}; \quad (15)$$

$$\phi_{13}=\operatorname{arctg}\frac{6\delta_1\omega}{p_{011}^2-9\omega^2}; \quad (16)$$

$$\phi_{15}=\operatorname{arctg}\frac{10\delta_1\omega}{p_{011}^2-25\omega^2}. \quad (17)$$

Кутові коливання форми разом із бетонним виробом, що ущільнюється, відносно координатної осі $Y_1$ опишемо наступним рівнянням:

$$(J_y+J_{pr1})\frac{d^2\psi_{y1}}{dt^2}+n_2\frac{d\psi_{y1}}{dt}+$$
$$+k_2\psi_{y1}=Q\frac{m_2}{m_1+m_2}z_{c1}\sin\omega t, \quad (18)$$

де $J_{pr1}$ – приведений момент інерції бетонного шару, що ущільнюється, відносно координатної осі $Y_1$:

$$J_{pr1}=\frac{m_{pr2}(L^2+H^2)}{12}+m_{pr2}\left(L-L_2\right)^2; \quad (19)$$

$L_2$ – відстань від передньої стінки форми до координати центру ваги форми разом з ущільнюваним бетонним виробом;

$m_{pr2}$ – приведена маса бетонної суміші при вертикальних коливаннях;

$z_{c1}$ – відстань по вертикалі від центру ваги коливальної системи до лінії напряму дії горизонтальної вимушуючої сили $Q\sin\omega t$.

Приведена маса бетонної суміші $m_{pr2}$ при вертикальних коливаннях [13]:

$$m_{\text{ï ð}2}=\frac{\rho S_1}{k}\operatorname{tg}kH. \quad (20)$$

Розв'язок диференціального рівняння (18), що описує кутові коливання форми разом з ущільнюваним бетонним виробом,

$$\psi_{y1}(t)=\Psi_{y1}\sin(\omega t-\xi_{11}); \quad (21)$$

де $\Psi_{y1}$ – амплітуда кутових коливань віброблока і форми з бетонною сумішшю відносно координатної осі $Y_1$;

$Z_1$ – кут зсуву фази між амплітудою кутових коливань і амплітудою вимушуючої сили;

$$\Psi_{y1}=\frac{Q\frac{m_2}{m_1+m_2}z_{c1}}{(J_y+J_{pr1})\sqrt{\left(p_{031}^2-\omega^2\right)^2+4\delta_{31}^2\omega^2}}; \quad (22)$$

$p_{031}$ – частота власних кутових коливань динамічної системи відносно координатної осі $Y_1$;

$$p_{031}=\sqrt{\frac{k_2}{J_y+J_{pr1}}}; \quad (23)$$

$\delta_{31}$ – коефіцієнти демпфірування динамічної системи при кутових коливаннях відносно

координатної осі $Y_1$;

$$\delta_{31} = \frac{n_2}{2(J_y + J_{pr1})}; \quad (24)$$

$$\xi_{11} = \text{arctg}\frac{2\delta_{31}\omega}{p_{031}^2 - \omega^2}. \quad (25)$$

Переміщення форми з бетонною сумішшю по горизонталі у напрямі координатної осі $Y_1$:

$$\begin{aligned}(m_2 + m_{pr3})\frac{d^2y_1}{dt^2} + b_2\frac{dy_1}{dt} + c_2y_1 = \\ 2Q\frac{r}{a}\mu\cos\omega t - \frac{4F_{tr}}{\pi}\times \\ \times\left\{\frac{\sin\omega t}{1} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \right. \\ \left. ... + \frac{\sin[(2n\omega+1)t]}{2n+1}\right\}\end{aligned}, \quad (26)$$

де $m_{pr3}$ – приведена маса бетонної суміші, що взаємодіє з вертикальними подовжніми стінками при горизонтально-направлених коливаннях у напрямі координатної осі $Y_1$:

$$m_{pr3} = \frac{\rho S_3(1-\cos kB_1)}{2k\sin kB_1}, \quad (27)$$

де $S_3$ – площа однієї з бічних стінок форми, що контактують з ущільнюваним середовищем $S_3 = L\cdot h$;

$B_1$ – приведена відстань між вертикальними бічними стінками форми.

Якщо відстань між вертикальними стінками перевищує довжину збудження, то у формулу (27) підставляється значення $B_1$, яке дорівнює довжині хвилі збудження, тобто $B_1 = L_{â}$, а якщо не перевищує, то $B_1 = B$.

Обмежуючись трьома членами розкладання ряду (6), використовуваного в рівнянні (26), знайдемо розв'язок рівняння (26) для стаціонарних коливань у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}y_1(t) = A_{20}\cos(\omega t + \phi_{21}) - \\ -A_{21}\sin(\omega t - \phi_{21)} - A_{23}\sin(3\omega t - \phi_{23)} - \\ -A_{25}\sin(5\omega t - \phi_{25})\end{aligned}, \quad (28)$$

де $A_{20}$, $A_{21}$, $A_{23}$, $A_{25}$ – амплітуди коливань форми з бетонною сумішшю у напрямі координатної осі $Y_1$ на відповідній гармоніці;

$\phi_{21}$, $\phi_{23}$, $\phi_{25}$ – кути зсуву фаз відповідних амплітуд коливань форми з бетонною сумішшю у напрямі координатної осі $Y_1$ відносно амплітуд вимушуючих сил для кожної гармоніки;

$$A_{20} = \frac{2Q\frac{r}{a}\mu}{(m_2 + m_{pr3})\sqrt{\left(p_{021}^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta_{21}^2\omega^2}}; \quad (29)$$

$p_{021}$ – частота власних коливань динамічної системи у напрямі координатної осі $Y_1$;

$\delta_{21}$ – коефіцієнт демпфірування динамічної системи у напрямі координатної осі $Y_1$;

$$\begin{aligned}p_{021} = \sqrt{\frac{c_2}{m_2 + m_{pr3}}}; \\ \delta_{21} = \frac{b_2}{2(m_2 + m_{pr3})};\end{aligned} \quad (30)$$

$$\phi_{21} = \text{arctg}\frac{2\delta_{21}\omega}{p_{021}^2 - \omega^2}. \quad (31)$$

$$A_{11} = \frac{\frac{4F_{tr}}{\pi}}{\left(m_2 + m_{pr3}\right)\sqrt{\left(p_{021}^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta_{21}^2\omega^2}}; \quad (32)$$

$$A_{13} = \frac{\frac{4F_{tr}}{\pi}}{\left(m_2 + m_{pr3}\right)\sqrt{\left(p_{021}^2 - 9\omega^2\right)^2 + 36\delta_{21}^2\omega^2}}; \quad (33)$$

$$A_{15} = \frac{\frac{4F_{tr}}{\pi}}{\left(m_2 + m_{pr3}\right)\sqrt{\left(p_{021}^2 - 25\omega^2\right)^2 + 100\delta_{21}^2\omega^2}}; \quad (34)$$

$$\phi_{23} = \text{arctg}\frac{6\delta_1\omega}{p_{021}^2 - 9\omega^2}; \quad (35)$$

$$\phi_{25} = \text{arctg}\frac{10\delta_2\omega}{p_{02}^2 - 25\omega^2}. \quad (36)$$

Кутові коливання форми відносно координатної осі $Z_1$ при дії моменту можуть $2Q\frac{r}{a}\mu(d + L_2)\cos\omega t$ бути описані наступним виразом:

$$\begin{aligned}(J_z + J_{pr3})\frac{d^2\psi_{z1}}{dt^2} + n3\frac{d\psi_{z1}}{dt} + \\ +k3\psi_{z1} = Qr\frac{2}{a}\mu\left(d + L_1\right)\cos\omega t - \\ -\frac{2F_{tr}L}{\pi}\left\{\frac{\sin\omega t}{1} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \right. \\ \left. ... + \frac{\sin[(2n\omega+1)t]}{2n+1}\right\}\end{aligned}, \quad (37)$$

де $J_{pr3}$ – приведений момент інерції ущільнюваного шару бетонної суміші:

$$J_{pr3} = \frac{m_{pr3}L^2}{12}. \quad (38)$$

Розв'язок диференціального рівняння (37) для стаціонарних коливань може бути представлений у наступному вигляді:

$$\psi_{z1}(t) = \Psi_{z10}\cos(\omega t + \xi_{21}) - \Psi_{z11}\sin(\omega t - \xi_{21}) - \\ -\Psi_{z13}\sin(3\omega t - \xi_{23}) - \Psi_{z15}\sin(5\omega t - \xi_{25}), \quad (39)$$

де $\Psi_{z10}$, $\Psi_{z11}$, $\Psi_{z13}$, $\Psi_{z15}$ – амплітуди кутових коливань форми з бетонною сумішшю відносно координатної осі $Z_1$ на відповідній гармоніці;

$\xi_{21}$, $\xi_{23}$, $\xi_{25}$ – кути зсуву фаз відповідних амплітуд кутових коливань форми з бетонною сумішшю відносно координатної осі $Z_1$ і амплітудами вимушуючих сил;

$$\Psi_{z10} = \frac{2Q\frac{r}{a}\mu(d + L_1)}{(J_z + J_{pr3})\sqrt{\left(p_{041}^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta_{41}^2\omega^2}}; \quad (40)$$

$$\Psi_{z11} = \frac{\frac{2F_{tr}L}{\pi}}{(J_z + J_{pr3})\sqrt{\left(p_{041}^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta_{41}^2\omega^2}}; \quad (41)$$

$$\Psi_{z13} = \frac{\frac{2F_{tr}L}{\pi}}{(J_z + J_{pr3})\sqrt{\left(p_{041}^2 - 9\omega^2\right)^2 + 36\delta_{41}^2\omega^2}}; \quad (42)$$

$$\Psi_{z15} = \frac{\frac{2F_{tr}L}{\pi}}{(J_z + J_{pr3})\sqrt{\left(p_{041}^2 - 25\omega^2\right)^2 + 100\delta_{41}^2\omega^2}}; \quad (43)$$

$$p_{041} = \sqrt{\frac{k_3}{J_z + J_{pr3}}}; \quad \delta_{41} = \frac{n_3}{2(J_z + J_{pr3})}; \quad (44)$$

$$\xi_{21} = \operatorname{arctg}\frac{2\delta_{41}\omega}{p_{041}^2 - \omega^2}; \quad (45)$$

$$\xi_{23} = \operatorname{arctg}\frac{6\delta_{41}\omega}{p_{041}^2 - 9\omega^2}; \quad (46)$$

$$\xi_{25} = \operatorname{arctg}\frac{10\delta_{41}\omega}{p_{041}^2 - 25\omega^2}. \quad (47)$$

Кутові коливання форми відносно координатної осі $Z_1$ при дії моменту $Qr\cos\omega t$ можуть бути описані наступним виразом:

$$(J_z + J_{pr4})\frac{d^2\psi_{z2}}{dt^2} + n_3\frac{d\psi_{z2}}{dt} + \\ + k_3\psi_{z2} = Qr\cos\omega t - \\ -\frac{2F_{tr}B}{\pi}\left\{\frac{\sin\omega t}{1} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \right. \\ \left. ... + \frac{\sin[(2n\omega + 1)t]}{2n + 1}\right\}, \quad (48)$$

де $J_{pr4}$ – приведений момент інерції ущільнюваного шару бетонної суміші:

$$J_{pr4} = \frac{m_{pr3}B^2}{12}. \quad (49)$$

Розв'язок диференціального рівняння (2.95) для стаціонарних коливань може бути представлений у наступному вигляді:

$$\psi_{z2}(t) = \Psi_{z20}\cos(\omega t + \xi_{31}) - \\ -\Psi_{z21}\sin(\omega t - \xi_{31}) - \Psi_{z23}\sin(3\omega t - \xi_{33}) - , \quad (50) \\ -\Psi_{z25}\sin(5\omega t - \xi_{35})$$

де $\Psi_{z20}$, $\Psi_{z21}$, $\Psi_{z23}$, $\Psi_{z25}$ – амплітуди кутових коливань форми з бетонною сумішшю відносно координатної осі $Z_1$ на відповідній гармоніці;

$\xi_{31}$, $\xi_{33}$, $\xi_{35}$ – кути зсуву фаз відповідних амплітуд кутових коливань форми з бетонною сумішшю відносно координатної осі $Z_1$ і амплітудами вимушуючих сил;

$$\Psi_{z20} = \frac{Qr}{(J_z + J_{pr4})\sqrt{\left(p_{051}^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta_{051}^2\omega^2}}; \quad (51)$$

$$\Psi_{z21} = \frac{\frac{2F_{tr}B}{\pi}}{(J_z + J_{pr4})\sqrt{\left(p_{051}^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta_{51}^2\omega^2}}; \quad (52)$$

$$\Psi_{z23} = \frac{\frac{2F_{tr}B}{\pi}}{(J_z + J_{pr4})\sqrt{\left(p_{051}^2 - 9\omega^2\right)^2 + 36\delta_{51}^2\omega^2}}; \quad (53)$$

$$\Psi_{z25} = \frac{\frac{2F_{tr}B}{\pi}}{(J_z + J_{pr4})\sqrt{\left(p_{051}^2 - 25\omega^2\right)^2 + 100\delta_{51}^2\omega^2}}; \quad (54)$$

$$p_{051} = \sqrt{\frac{k_3}{J_z + J_{pr4}}}; \qquad \delta_{51} = \frac{n_3}{2(J_z + J_{pr4})}; \quad (55)$$

$$\xi_{31} = \operatorname{arctg}\frac{2\delta_{51}\omega}{p_{051}^2 - \omega^2}; \quad (56)$$

$$\xi_{33} = \operatorname{arctg}\frac{6\delta_{51}\omega}{p_{051}^2 - 9\omega^2}; \quad (57)$$

$$\xi_{35} = \operatorname{arctg}\frac{10\delta_{51}\omega}{p_{051}^2 - 25\omega^2}. \quad (58)$$

Закон руху днища форми з ущільнюваним бетонним виробом в горизонтальній площині у напрямі координатної осі $X_1$ опишемо рівнянням:

$$\begin{aligned} &X_{d1}(y,t) = x_1(t) + y\psi_{z2}(t) - z_{c1}\psi_{y1}(t) = \\ &= A_{11}\sin(\omega t - \phi_{11}) - A_{13}\sin(3\omega t - \phi_{13}) - \\ &-A_{15}\sin(5\omega t - \phi_{15}) + y[\Psi_{z20}\cos(\omega t + \xi_{31}) - \\ &-\Psi_{z21}\sin(\omega t - \xi_{31}) - \Psi_{z23}\sin(3\omega t - \xi_{33}) - \\ &-\Psi_{z25}\sin(5\omega t - \xi_{35})] - z_{c1}\Psi_{y1}\sin(\omega t - \xi_{11}) \\ &\text{ï ðè} \quad -0,5B \le y \le 0,5B \end{aligned}, \quad (59)$$

де $X_{d1}(y,t)$ – переміщення днища форми з ущільнюваним бетонним виробом у напрямі координатної осі $X_1$; $y$ – поточна координата днища форми в напрямі координатної осі $Y_1$.

Закон руху днища форми з ущільнюваним бетонним виробом у горизонтальній площині в напрямі координатної осі $Y_1$ опишеться рівнянням:

$$\begin{aligned} &Y_{d1}(x,t) = y_1(t) + x\psi_{z1}(t) = A_{20}\cos(\omega t + \phi_{21}) - \\ &-A_{21}\sin(\omega t - \phi_{21)} - A_{23}\sin(3\omega t - \phi_{23)} - \\ &-A_{25}\sin(5\omega t - \phi_{25}) + x[\Psi_{z10}\cos(\omega t + \xi_{21}) - \\ &-\Psi_{z11}\sin(\omega t - \xi_{21}) - \Psi_{z13}\sin(3\omega t - \xi_{23}) - \\ &-\Psi_{z15}\sin(5\omega t - \xi_{25})] \\ &\text{ï ðè} \quad -(L - L_2) \le x \le L_2 \end{aligned}, (60)$$

де $L_2$ – відстань по горизонталі у напрямі координатної осі $X$ від переднього торця форми до центру ваги форми.

Закон руху днища форми у вертикальному напрямі вздовж координатної осі $Z$ опишемо рівнянням:

$$\begin{aligned} &Z_{d1}(x,t) = x\psi_{y1}(t) = x\Psi_{y1}\sin(\omega t - \xi_{11}) \\ &\text{ï ðè} \quad -(L - L_2) \le x \le L_2 \end{aligned}. \quad (61)$$

Після нескладних перетворень виразу (59) представимо закон руху днища форми з ущільнюваним бетонним виробом у горизонтальній площині у напрямі координатної осі $X_1$ в наступному вигляді, зручним для аналізу:

$$\begin{aligned} &X_{d1}(y,t) = M_{11}\sin(\omega t - \theta_{11}) - \\ &-A_{13}\sin(3\omega t - \phi_{13}) - A_{15}\sin(5\omega t - \phi_{15}) + \\ &+y[N_{11}\cos(\omega t + \theta_{12}) - \Psi_{z23}\sin(3\omega t - \xi_{33}) - \\ &-\Psi_{z25}\sin(5\omega t - \xi_{35})] \quad \text{ï ðè} \quad -0,5B \le y \le 0,5B \end{aligned}, (62)$$

де

$$M_{11} = \sqrt{A_{11}^2 - 2A_{11}z_{c1}\Psi_{y1}\cos(\phi_{11} - \xi_{11}) + z_{c1}^2\Psi_{y1}^2}; (63)$$

$$N_{11} = \sqrt{\Psi_{z20}^2 + \Psi_{z21}^2 + 2\Psi_{z20}\Psi_{z21}\cos 2\xi_{31}}; (64)$$

$$\theta_{11} = \operatorname{arctg}\frac{A_{11}\sin\phi_{11} - z_{c1}\Psi_{y1}\sin\xi_{11}}{A_{11}\cos\phi_{11} - z_{c1}\Psi_{y1}\cos\xi_{11}}; \quad (65)$$

$$\theta_{12} = \operatorname{arctg}\frac{\Psi_{z20}\sin\xi_{31} + \Psi_{z21}\cos\xi_{31}}{\Psi_{z20}\cos\xi_{31} + \Psi_{z21}\sin\xi_{31}}. \quad (66)$$

Після перетворень виразу (60) представимо закон руху днища форми з ущільнюваним бетонним виробом у напрямі координатної осі $Y_1$ в наступному зручному для аналізу вигляді:

$$\begin{aligned} &Y_{d1}(x,t) = M_{21}\cos(\omega t + \theta_{21}) - \\ &-A_{23}\sin(3\omega t - \phi_{23)} - A_{25}\sin(5\omega t - \phi_{25}) + \\ &+x[N_{21}\cos(\omega t + \theta_{22}) - \Psi_{z13}\sin(3\omega t - \xi_{23}) - \\ &-\Psi_{z15}\sin(5\omega t - \xi_{25})] \\ &\text{ï ðè} \quad -(L - L_2) \le x \le L_2 \end{aligned}, (67)$$

де

$$M_{21} = \sqrt{A_{20}^2 + A_{21}^2 + 2A_{20}A_{21}\cos 2\phi_{21}}; (68)$$

$$N_{11} = \sqrt{\Psi_{z10}^2 + \Psi_{z11}^2 + 2\Psi_{z10}\Psi_{z11}\cos 2\xi_{21}}; (69)$$

$$\theta_{21} = \operatorname{arctg}\frac{A_{20}\sin\phi_{21} + A_{21}\cos\phi_{21}}{A_{20}\cos\phi_{21} + A_{21}\sin\phi_{21}}; \quad (70)$$

$$\theta_{22} = \operatorname{arctg}\frac{\Psi_{z10}\sin\xi_{21} + \Psi_{z11}\cos\xi_{21}}{\Psi_{z10}\cos\xi_{21} + \Psi_{z11}\sin\xi_{21}}. \quad (71)$$

Аналіз отриманих виразів показує, що форма з бетонною сумішшю здійснює в процесі роботи складні просторові коливання з перевагою горизонтально-направлених коливань, що забезпечують ефективне формування плоских і довгомірних бетонних виробів.

На підставі проведених теоретичних досліджень пропонованої вібраційної установки в робочому режимі були уточнені її основні параметри і визначені раціональні режими вібраційної дії на ущільнюване бетонне середовище.

Таким чином, отримані теоретичні вирази (59 – 71) дозволяють встановити закономірність руху форми з бетонною сумішшю і визначити основні параметри пропонованого вібраційного пристрою залежно від фізико-механічних характеристик оброблюваного шару, обгрунтувати раціональні режими вібраційної дії на ущільнюване середовище.

## Висновки

1. Розроблена математична модель враховує конструктивні особливості вібраційної установки, виконаної у вигляді зчленованих у горизонтальній площині віброблока і форми, фізико-механічні характеристики бетонної суміші та задовольняє меті опису складної динамічної системи, що здійснює просторові коливання у вигляді лінійних і кутових коливань відносно координатних осей $X$, $Y$ і $Z$, що проходять через центр ваги форми.

2. Отримані теоретичні залежності дозволяють провести комп'ютерне моделювання законів руху і форм коливань поверхні форми з бетонним виробом у робочому режимі та проаналізувати характеристики динамічної системи з погляду ефективної дії на оброблюване середовище, а також уточнити раціональні параметри вібраційного обладнання.

## Список літератури


1. *Нестеренко М. П. Вібраційні площадки з просторовими коливаннями для виготовлення залізобетонних виробів широкої номенклатури / М. П. Нестеренко // Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво). –Полтава: ПолтНТУ, 2005. –Вип. 16. –С.177-181.*
2. *Нестеренко М.П. Аналіз споживчих якостей та класифікація вібраційного обладнання для формування довгомірних залізобетонних виробів / М.П. Нестеренко, Д.С. Педь // Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво). –Полтава: ПолтНТУ. Випуск 3(25) Том 1. 2009. –С. 143-149.*
3. *Ахвердов И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.*
4. *Гусев Б.В. Вибрационная технология бетона / Б.В. Гусев, В.Г. Зазимко. – К.: Будівельник, 1991. – 160 с.*
5. *Десов А.Е. Вибрированый бетон. – М.: Госстройиздат, 1956. – 230 с.*
6. *Гольдштейн Б.Г. Глубинные вибраторы для уплотнения бетона / Б.Г. Гольдштейн, Л.П. Петрунькин. – М.: Машиностроение, 1966. – 169 с.*
7. *Овчинников П. Ф. Виброреология. / П.Ф. Овчинников. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.*
8. *Назаренко І.І. Вібраційні иашини і процеси будівельної індустрії: Навчальний посібник /І.І. Назаренко. –К.: КНУБА, 2007. –230 с.*
9. *Файвусович А.С. Реологические свойства бетонных смесей при ударных и ударно-вибрационных воздействиях / А.С. Файвусович, Ю.А. Зубов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура, 1981, № 11, с. 68 – 71.*
10. *Сивко В.И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси / В. И. Сивко. – К.: Высш. шк., 1987. – 168 с.*
11. *Олехнович К.А. Иследования характера многокомпонентных колебаний малошумных виброплощадак / К.А. Олехнович, Ю.И. Виноградов. – Полтава: ПИСИ, 1980. – 13 с.*
12. *Орисенко О.В. Дослідження просторового руху робочого органа вібраційної машини для формування трубчастих залізобетонних виробів / О.В. Орисенко, М.П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2000. – Вип. 6, частина 1. – С.172 – 175.*
13. *Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве /А.Г. Маслов, В.М. Пономарь // К.:Будівельник, I985. – 128 с.*
14. *Нестеренко М.П. Аналитическое моделирование вибрационных машин для формования железобетонных изделий с учетом влияния бетонной смеси на рабочий орган / М.П. Нестеренко, Д.С. Педь, Т.А. Скляренко // Научный потенциал молодых ученых для инновационного развития строительного комплекса Нижнего Поволжья // Материалы Международной научно-практической конференции, 24 декабря 2010 г., г. Волгоград : в 2-х ч. Ч. I / Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2011. –С.220-224.*
15. *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 №1 (54), частина 1. 2009. –С.78-80.*


*Надійшла до редколегії 20.11.2012*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

О.Г. Маслов, М.П. Нестеренко, Д.С. Педь

*Изложено поэтапное рассмотрение движения предложенной вибрационной установки относительнокоординатных осей, проходящих через совместимый центр веса формы и формируемого бетонного изделия с учетом свойств бетонной смеси.*

***Ключевые слова**: вибрационная установкака, бетонная смесь, упругая опора.*

**RESEARCH OF VIBRATIONS OF THE VIBRATION SETTING REINFORCED CONCRETE WARES**

O.G. Maslov, M.P. Nesterenko, D.S. Ped

*Stage-by-stage consideration motion of the offered vibration setting is expounded in relation to co-ordinate axes, passing through the compatible center weight form and formed concrete good taking into account properties concrete mixture.*

***Keywords**: vibration установкака, concrete mix, resilient support.*