

О. В. Березюк, к. т. н., доц.

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВІБРАЦІЙНОГО ПРИВОДУ ДОУЩІЛЬНЕННЯ ТПВ У СМІТТЄВОЗІ

На основі аналізу проведених числових досліджень повної вдосконаленої математичної моделі вібраційного доущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі з використанням генератора імпульсів тиску релейної диференціальної дії та врахуванням густини й відносної вологості зневоднених і попередньо ущільнених відходів запропоновано спрощену вдосконалену математичну модель. Під час порівняння результатів, отриманих із використанням повної та спрощеної вдосконаленої математичних моделей вібраційного доущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі, зокрема ступеня їхнього ущільнення, похибка склала 4,35%, що є прийнятним для виконання попередніх проєктних розрахунків основних параметрів приводу. Для аналітичного дослідження спрощеної математичної моделі робочий цикл удосконаленого вібраційного приводу доущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі представлений шістьма основними фазами, кожен з яких описано відповідною системою диференціальних рівнянь із початковими та граничними умовами. Для аналітичного дослідження спрощеної вдосконаленої математичної моделі вібраційного приводу доущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі використано такі методи: розв'язання системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь за допомогою перетворень за Лапласом, лінеаризації нелінійностей, розкладання виразу на простіші дроби, розв'язання неповного кубічного рівняння за формулами Кардано, комп'ютерне моделювання. Аналітичне дослідження спрощеної вдосконаленої математичної моделі вібраційного приводу доущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі дозволило отримати аналітичні взаємозалежності його основних параметрів і залежності частоти та амплітуди від основних параметрів зазначеного приводу з похибкою не більше, ніж 5,34%, що можуть бути використані для виконання попередніх проєктних розрахунків його параметрів як одного зі складників для розв'язання проблеми створення науково-технічних основ проєктування вискоелективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів.

Ключові слова: сміттєвоз, ущільнення, тверді побутові відходи, математична модель.

Вступ

Щороку в Україні утворюється близько 53 млн м³ твердих побутових відходів (ТПВ), що загрожують охороні здоров'я та безпеці навколишнього середовища [1]. За попередніми розрахунками на їхнє перевезення сміттєвозами до місця утилізації за мінімальної відстані 30 км, що відповідає розмірам санітарної зони, витрачають більше 45 тис. тонн пального на рік. Зношеність автопарку сміттєвозів комунальних підприємств України досягає 70 % [2].

Постановка проблеми

Відповідно до постанови Кабміну України № 265 [3] одним із пріоритетних напрямів поведінки з ТПВ в Україні є забезпечення застосування сучасних вискоелективних сміттєвозів, тому аналітичне дослідження вдосконаленої математичної моделі вібраційного приводу доущільнення ТПВ у сміттєвозі для отримання взаємозалежностей основних його параметрів є актуальною науково-технічною задачею як однієї із складників для розв'язання проблеми створення науково-технічних основ проєктування вискоелективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [4] аналітично досліджено спрощену математичну модель приводу перевертання

Наукові праці ВНТУ, 2020, № 1

контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз. Робота [5] присвячена аналітичному дослідженню матмоделі групового гідроприводу з послідовним з'єднанням гідромотрів навісного підмітального обладнання сміттєвоза. У статті [6] аналітично досліджено матмодель вібраційного приводу пресування ТПВ, яка не враховує їхньої відносної вологості та особливостей конструкції генератора імпульсів тиску релейної диференціальної дії (ГІТРДД), захищеної патентами України, останній із яких 92720 U [7]. У роботі [8] аналітично досліджено матмодель роботи клапана-пульсатора для гідравлічних приводів вібраційних гірничих машин. У роботі [9] запропоновано вдосконалену матмодель вібраційного приводу доущільнення ТПВ у сміттєвозі та проведено її числове дослідження.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є аналітичне дослідження вдосконаленої математичної моделі вібраційного приводу доущільнення ТПВ у сміттєвозі для отримання взаємозалежностей його основних параметрів і залежностей частоти та амплітуди від основних параметрів зазначеного приводу.

Методи і матеріали

Для аналітичного дослідження спрощеної вдосконаленої математичної моделі вібраційного приводу доущільнення ТПВ використано такі методи: розв'язання системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь за допомогою перетворень за Лапасом, лінеаризації нелінійностей, розкладання виразу на простіші дроби, розв'язання неповного кубічного рівняння за формулами Кардано, комп'ютерне моделювання.

Результати аналітичного дослідження

Аналіз проведених досліджень повної вдосконаленої математичної моделі вібраційного доущільнення ТПВ [9] показав, що $p_1 \approx p_2 \approx p_{12}$, а вплив тиску в зливних магістралях, сил в'язкого тертя, постійного складника сил сухого тертя та ваги запірнього елемента ГІТРДД на роботу вібраційного приводу є несуттєвим, тому спрощена вдосконалена модель вібраційного приводу доущільнення ТПВ із використанням ГІТРДД має вигляд:

$$\begin{cases} Q_H = \dot{x}S_{ц1} + \sigma p_{12} + KW_{12}\dot{p}_{12} + \dot{y}\pi[d_3^2 - \mathbf{1}(h_{нж} - y)d_1^2]/4 + \mathbf{1}(y - h_n)\mu\pi d_3(y - h_n)\sqrt{2p_{12}/\rho_{pp}} + \\ + \mathbf{1}(y)\mu\pi d_d^2\sqrt{2p_{12}/\rho_{pp}}/4 + \mathbf{1}(y - h_e)\mu\pi d_e^2\sqrt{2p_{12}/\rho_{pp}}/4; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p_{12}S_{ц1} = m_p\ddot{x} + (c_1 e^{6,094 Q_H t / (x_{\max} S_{ц1})} + c_0)S_{п1}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} p_{12}\pi\{\mathbf{1}(y)(d_3^2 - d_2^2) + [d_2^2 - \mathbf{1}(h_{нж} - y)d_1^2]\}/4 = m_k\ddot{y} + c(y + y_0); \end{cases} \quad (3)$$

де $c_0 = (1,356 - 1,162 \cdot 10^{13} e^{-0,07908 \rho_1} - 1,267 \cdot 10^{-31} e^{1,658 w_1}) \cdot 10^6$; $c_1 = (0,04669 - 5,198 \cdot 10^{11} e^{-0,07908 \rho_1}) \cdot 10^6$; ρ_1 – густина попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ, кг/м³; w_1 – відносна вологість попередньо ущільнених і зневоднених ТПВ, % [10]; $W_{12} = W_1 + W_2$.

Порівняння результатів, отриманих із використанням повної та спрощеної вдосконаленої матмоделей вібраційного доущільнення ТПВ із використанням ГІТРДД, показано на рис. 1.

Під час порівняння результатів, зокрема ступеня ущільнення ТПВ, отриманих із використанням повної та спрощеної вдосконаленої математичних моделей вібраційного гідроприводу доущільнення ТПВ із використанням ГІТРДД, похибка склала 4,35%, що є прийнятним для виконання попередніх проектних розрахунків.

Аналіз графіка, зображеного на рис. 1в, дає підставу вважати, що час закриття запірнього елемента ГІТРДД приблизно дорівнює часу його відкриття, тому робочий цикл

удосконаленого вібраційного приводу доущільнення ТПВ складається із шести основних фаз:

1. Фаза підвищення тиску робочої рідини (РР) в напірній магістралі гідроциліндра, а також з'єднаних із нею порожнинах до тиску $p_{12} = (c_1 + c_0) S_{П1} / S_{Ц1}$, за якого починається переміщення плити пресування, може бути описана рівнянням

$$Q_H = \sigma p_{12} + KW_{12} \dot{p}_{12} \quad (4)$$

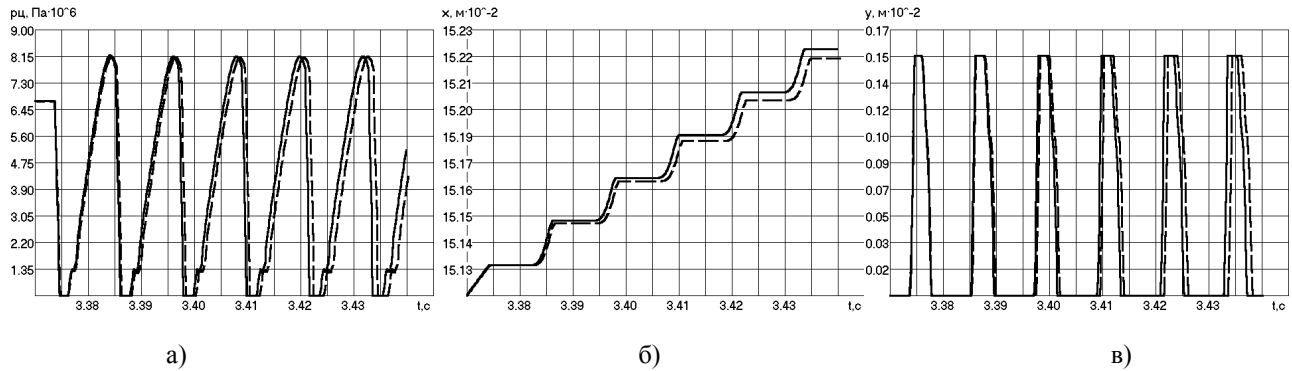


Рис. 1. Порівняння результатів, отриманих із використанням повної (—) та спрощеної (---) вдосконаленої математичної моделі вібраційного доущільнення ТПВ: а) зміна тиску в напірній порожнині гідроциліндра плити пресування; б) переміщення плити пресування; в) переміщення запірної елементи ГТТРДД

Розв'язуючи рівняння (4) за початкової умови $p_{12}(0) = p_{зл}$, отримаємо

$$p_{12} = (1 - e^{-\sigma t / KW_{12}}) Q_H / \sigma + p_{зл} \quad (5)$$

де $p_{зл}$ – зливний тиск, Па.

Із рівняння (5) знайдемо тривалість першої фази

$$t_1 = \frac{KW_{12}}{\sigma} \ln \frac{Q_H}{Q_H - (p_{12} - p_{зл})\sigma} = \frac{KW_{12}}{\sigma} \ln \frac{Q_H}{Q_H - [(c_1 + c_0) S_{П1} / S_{Ц1} - p_{зл}] \sigma} \quad (6)$$

2. Фаза підвищення тиску в напірній магістралі гідроциліндра, а також з'єднаних з нею порожнинах до тиску відкриття ГТТРДД $p_{12} = p_{к1}$ та переміщення плити пресування може бути описана системою рівнянь:

$$\begin{cases} Q_H = v S_{Ц1} + \sigma p_{12} + KW_{12} \dot{p}_{12}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} p_{12} S_{Ц1} = m_p \dot{v} + (c_1 e^{6,094 Q_H t / (x_{\max} S_{Ц1})} + c_0) S_{П1}, \end{cases} \quad (8)$$

де $v = \dot{x}$ – швидкість плити пресування ТПВ, м/с.

Після перетворення за Лапласом [11] отримаємо:

$$\begin{cases} Q_H / s = V(s) S_{Ц1} + P(s) \sigma + P(s) s KW_{12}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P(s) S_{Ц1} = V(s) s m_p + c_1 S_{П1} / [s - 6,094 Q_H / (x_{\max} S_{Ц1})] + c_0 S_{П1} / s. \end{cases} \quad (10)$$

Підставляючи рівняння (10) у рівняння (9), отримаємо

$$V(s) = \frac{-b_{22} s^2 + b_{12} s - b_{02}}{s(a_{32} s^3 + a_{22} s^2 + a_{12} s - a_{02})} \approx \frac{-b_{22} s^2 + b_{12} s - b_{02}}{s(a_{22} s^2 + a_{12} s - a_{02})}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{де } a_{32} &= KW_{12} m_p x_{\max} S_{Ц1}; & a_{22} &= m_p (\sigma x_{\max} S_{Ц1} - 6,094 Q_H KW_{12}); & a_{12} &= x_{\max} S_{Ц1}^3 - 6,094 Q_H \sigma m_p; \\ a_{02} &= 6,094 Q_H S_{Ц1}^2; & b_{22} &= KW_{12} S_{П1} x_{\max} S_{Ц1} (c_1 + c_0); & b_{02} &= 6,094 Q_H (Q_H S_{Ц1} - \sigma c_0 S_{П1}) \end{aligned}$$

$$b_{12} = Q_H x_{\max} S_{\Pi 1}^2 - \sigma S_{\Pi 1} x_{\max} S_{\Pi 1} (c_1 + c_0) + 6,094 Q_H K W_{12} c_0 S_{\Pi 1}; \quad (12)$$

Методом розкладання виразу (11) на простіші дробі отримаємо

$$V(s) = A_{v2} \frac{1}{s} + \frac{B_{v2}}{a_{22}} \frac{s + a_{12} / (2a_{22})}{[s + a_{12} / (2a_{22})]^2 - (4a_{02} a_{22} + a_{12}^2) / (4a_{22}^2)} + \frac{2C_{v2} - B_{v2} a_{12} / a_{22}}{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}} \frac{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2} / (2a_{22})}{[s + a_{12} / (2a_{22})]^2 - (4a_{02} a_{22} + a_{12}^2) / (4a_{22}^2)}, \quad (13)$$

$$\text{де } A_{v1} = b_{02} / a_{02}; B_{v1} = -b_{22} - a_{22} b_{02} / a_{02}; C_{v1} = b_{12} - a_{12} b_{02} / a_{02}; \quad (14)$$

Знаходимо оригінал зображення (13)

$$v(t) = A_{v2} + \frac{B_{v2}}{a_{22}} e^{-\frac{a_{12}}{2a_{22}} t} ch\left(\frac{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}}{2a_{22}} t\right) + \frac{2C_{v2} - B_{v2} a_{12} / a_{22}}{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}} e^{-\frac{a_{12}}{2a_{22}} t} sh\left(\frac{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}}{2a_{22}} t\right). \quad (15)$$

Виключаючи незначні коефіцієнти виразу (15) та враховуючи прийняті позначення згідно з (12, 14), за початкової умови $v(0) = 0$ швидкість плити пресування під час другої фази знаходять за формулою

$$v_2(t) \approx [1 - e^{-S_{\delta 1}^2 t / (m_D \sigma)}] K W_{12} S_{I 1} (c_1 + c_0) / (m_D \sigma). \quad (16)$$

Проінтегрувавши вираз (16), за початкової умови $x(0) = 0$ знаходимо переміщення плити пресування під час другої фази

$$x_2(t) \approx K W_{12} S_{I 1} (c_1 + c_0) \{t / (m_D \sigma) + [e^{-S_{\delta 1}^2 t / (m_D \sigma)} - 1] / S_{\delta 1}^2\}. \quad (17)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (9 – 10) відносно $P(s)$, отримаємо

$$P(s) = \frac{E_{p2} - A_{p2} S_{\Pi 1}}{K W_{12}} \frac{1}{s + \sigma / (K W_{12})} - \frac{B_{p2} S_{\Pi 1}}{a_{22}} \frac{s + a_{12} / (2a_{22})}{[s + a_{12} / (2a_{22})]^2 - (4a_{02} a_{22} + a_{12}^2) / (4a_{22}^2)} + \frac{(2C_{p2} - B_{p2} a_{12} / a_{22}) S_{\Pi 1}}{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}} \frac{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2} / (2a_{22})}{[s + a_{12} / (2a_{22})]^2 - (4a_{02} a_{22} + a_{12}^2) / (4a_{22}^2)} + D_{p2} \frac{1}{s}, \quad (18)$$

$$\text{де } A_{p2} = \frac{K W_{12} (B_{v2} \sigma - K W_{12} C_{v2})}{a_{12} K W_{12} \sigma - a_{22} \sigma^2 + a_{02} K^2 W_{12}^2}; B_{p2} = -\frac{a_{22} (B_{v2} \sigma - K W_{12} C_{v2})}{a_{12} K W_{12} \sigma - a_{22} \sigma^2 + a_{02} K^2 W_{12}^2}; C_{p2} = \frac{C_{v2}}{\sigma} + \frac{a_{02} A_{p2}}{\sigma};$$

$$D_{p2} = (Q_H - A_{v2} S_{\Pi 1}) / \sigma; E_{p2} = -K W_{12} (Q_H - A_{v2} S_{\Pi 1}) / \sigma. \quad (19)$$

Далі знаходимо оригінал зображення (18)

$$p_{12}(t) = -\frac{B_{p2} S_{\Pi 1}}{a_{22}} e^{-\frac{a_{12}}{2a_{22}} t} ch\left(\frac{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}}{2a_{22}} t\right) - \frac{(2C_{p2} - B_{p2} a_{12} / a_{22}) S_{\Pi 1}}{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}} e^{-\frac{a_{12}}{2a_{22}} t} sh\left(\frac{\sqrt{4a_{02} a_{22} + a_{12}^2}}{2a_{22}} t\right) + \quad (20)$$

$$+ D_{p2} + (E_{p2} - A_{p2} S_{\Pi 1}) e^{-\sigma t / (K W_{12})} / (K W_{12}).$$

Нехтуючи незначними коефіцієнтами виразу (20) та враховуючи прийняті позначення згідно з (12, 14, 19), за початкової умови $p_{12}(0) = (c_1 + c_0) S_{\Pi 1} / S_{\Pi 1}$ тиск у напірній магістралі гідроциліндра під час другої фази знаходимо за формулою

$$p_{12}(t) \approx \frac{(c_1 + c_0) S_{I 1}}{S_{\delta 1}} + \frac{S_{I 1} [(c_1 + c_0) \sigma x_{\max} S_{\delta 1} + 6,094 Q_i K W_{12} c_0]}{S_{\delta 1} (6,094 Q_i K W_{12} + \sigma x_{\max} S_{\delta 1})} \left(1 - e^{-\frac{\sigma}{K W_{12}} t}\right). \quad (21)$$

Звідки після підстановки $p_{12} = p_{кр1} = 4\sigma y_0 / [\pi(d_2^2 - d_1^2)]$ отримаємо вираз для знаходження

тривалості другої фази

$$t_2 = \frac{KW_{12}}{\sigma} \ln \left\{ 1 - \frac{[4cy_0 S_{II1} - \pi(d_2^2 - d_1^2)(c_1 + c_0) S_{II1}] (6,094 Q_H KW_{12} + \sigma x_{\max} S_{II1})}{\pi(d_2^2 - d_1^2) S_{II1} [(c_1 + c_0) \sigma x_{\max} S_{II1} + 6,094 Q_H KW_{12} c_0]} \right\}^{-1} \quad (22)$$

3. Фаза відкриття запірнього елемента ГПРДД до величини верхнього перекриття $y = h_6$ та переміщення плити пресування може бути описана системою рівнянь:

$$\begin{cases} Q_H = v S_{II1} + \sigma p_{12} + \dot{y} \pi (d_3^2 - d_1^2) / 4 + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 p_{12} / \rho_{pp}} / 4 + KW_{12} \dot{p}_{12}; \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} p_{12} S_{II1} = m_p \dot{v} + (c_1 e^{6,094 Q_H t / (x_{\max} S_{II1})} + c_0) S_{II1}; \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} p_{12} \pi (d_3^2 - d_1^2) / 4 = m_k \dot{y} + c(y + y_0). \end{cases} \quad (25)$$

Лінеаризацію витрат через дросель запишемо так

$$\sqrt{p_{12}} \approx p_{12} / \sqrt{\bar{p}_{12}}, \quad (26)$$

де $\bar{p}_{12} = (p_{\bar{e}e1} + \delta_{\bar{c}e}) / 2$ – середнє значення тиску РР в напірній магістралі гідроциліндра.

Після перетворення за Лапасом та лінеаризації отримаємо:

$$\begin{cases} Q_H / s = V(s) S_{II1} + P(s) \{ KW_{12} s + [\sigma + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] / 4 \} + Y(s) s \pi (d_3^2 - d_1^2) / 4; \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} P(s) S_{II1} = V(s) s m_p + c_1 S_{II1} / [s - 6,094 Q_H / (x_{\max} S_{II1})] + c_0 S_{II1} / s; \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} P(s) \pi (d_3^2 - d_1^2) / 4 = Y(s) (m_k s^2 + c) + c y_0 / s. \end{cases} \quad (29)$$

Послідовно підставляючи рівняння (28, 29) у рівняння (27), отримаємо

$$V(s) = \frac{b_{43} s^3 - b_{33} s^3 + b_{23} s^2 + b_{13} s - b_{03}}{s(-a_{53} s^5 - a_{43} s^4 + a_{33} s^3 - a_{23} s^2 - a_{13} s + a_{03})} \approx \frac{b_{43} s^3 - b_{33} s^3 + b_{23} s^2 + b_{13} s - b_{03}}{s(a_{33} s^3 - a_{13} s + a_{03})}. \quad (30)$$

Після перетворень за формулами Кардано [12] рівняння (30) набуває вигляду

$$V(s) \approx \frac{b_{43} s^3 - b_{33} s^3 + b_{23} s^2 + b_{13} s - b_{03}}{a_{33} s (s - 2\gamma_1) (s^2 + 2\gamma_1 s + \gamma_1^2 + \gamma_2^2)}, \quad (31)$$

де $A_K = \sqrt[3]{-a_{03} / (2a_{33}) + \sqrt{Q_K}}; B_K = \sqrt[3]{-a_{03} / (2a_{33}) - \sqrt{Q_K}}; Q_K = -a_{13}^3 / (27a_{33}^3) + a_{03}^2 / (4a_{33}^2);$

$a_{53} = 16KW_{12} m_k m_p x_{\max} S_{II1}; a_{43} = 4m_k m_p \{ x_{\max} S_{II1} [4\sigma + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] - 6,094 KW_{12} Q_H \};$

$a_{33} = 24,38 Q_H m_p m_k - x_{\max} S_{II1} [16S_{II1} m_k + \pi^2 (d_3^2 - d_1^2)^2 m_p + 16KW_{12} m_p c]; \gamma_1 = (A_K + B_K) / 2;$

$\gamma_2 = \sqrt{3} (A_K - B_K) / 2; a_{03} = 97,5 Q_H S_{II1}^2 c; b_{03} = 24,38 Q_H c \{ c_0 S_{II1} [4\sigma + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] - 4Q_H S_{II1} \};$

$a_{23} = 4m_p c x_{\max} S_{II1} [4\sigma + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] - 6,094 Q_H [16S_{II1} m_k + \pi^2 (d_3^2 - d_1^2)^2 m_p + 16KW_{12} m_p c];$

$a_{13} = 4c \{ 4x_{\max} S_{II1}^3 - 6,094 Q_H m_p [4\sigma + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] \}; b_{43} = 16KW_{12} S_{II1} m_k x_{\max} S_{II1} (c_1 + c_0);$

$b_{23} = 97,5 Q_H^2 m_k S_{II1} + \pi (d_3^2 - d_1^2) x_{\max} S_{II1} [\pi (d_3^2 - d_1^2) S_{II1} (c_1 + c_0) - 4S_{II1} c y_0] + 16KW_{12} S_{II1} c x_{\max} S_{II1} (c_1 +$

$+ c_0) - 24,38 Q_H c_0 S_{II1} m_k [4\sigma + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}]; b_{13} = 4S_{II1} c x_{\max} S_{II1} (c_1 + c_0) [4\sigma + \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] \times$

$\times \mu \pi d_D^2] - 16Q_H x_{\max} S_{II1}^2 c - 6,094 \pi (d_3^2 - d_1^2) Q_H [\pi (d_3^2 - d_1^2) c_0 S_{II1} - 4S_{II1} c y_0] - 97,5 KW_{12} Q_H c_0 S_{II1} c;$

$b_{33} = 4m_k \{ 4Q_H x_{\max} S_{II1}^2 - x_{\max} S_{II1} S_{II1} [4\sigma + \mu \pi d_D^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] + 24,38 KW_{12} Q_H c_0 S_{II1} \}; \quad (32)$

Методом розкладання виразу (31) на простіші дроби отримаємо

$$V(s) = A_{v3} \frac{1}{s} + B_{v3} \frac{1}{s - 2\gamma_1} + \frac{C_{v3}}{a_{33}} \frac{s + \gamma_1}{(s + \gamma_1)^2 + \gamma_2^2} + \frac{D_{v3} - C_{v3}\gamma_1}{a_{33}\gamma_2} \frac{\gamma_2}{(s + \gamma_1)^2 + \gamma_2^2}, \quad (33)$$

де $A_{v3} = \frac{b_{03}}{2\gamma_1(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)}$; $B_{v3} = \frac{2\gamma_1(b_{13} + 2b_{23}\gamma_1 - 4b_{33}\gamma_1^2)(\gamma_1^2 + \gamma_2^2) - a_{33}b_{03}(\gamma_2 - \gamma_1)}{2a_{33}\gamma_1(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)(9\gamma_1^2 + \gamma_2^2)}$;
 $C_{v3} = -b_{33} - a_{33}b_{03}/[2\gamma_1(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)] - a_{33}B_{v3}$; $D_{v3} = b_{23} - 4a_{33}\gamma_1 B_{v3} - 2b_{33}\gamma_1 - a_{33}b_{03}/(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)$. (34)

Знаходимо оригінал зображення (33)

$$v(t) = A_{v3} + B_{v3}e^{2\gamma_1 t} + (C_{v3}/a_{33})e^{-\gamma_1 t} \cos(\gamma_2 t) + [(D_{v3} - C_{v3}\gamma_1)/(a_{33}\gamma_2)]e^{-\gamma_1 t} \sin(\gamma_2 t). \quad (35)$$

У результаті нехтування незначними коефіцієнтами у виразі (35), враховуючи прийняті позначення згідно з (32, 34), швидкість руху плити пресування під час третьої фази знаходиться за формулою

$$v_3(t) \approx [3,469Q_f m_\delta m_\epsilon \tilde{n}_0 S_{I1} \pi d_A^2 / (S_{\delta 1}^2 \sqrt{\rho_{pp} \bar{P}_{12}})] [\sqrt[3]{m_\delta m_\epsilon / (S_{\delta 1}^2 \tilde{n})} + 1,64\mu] \sin[1,0913 \sqrt{S_{\delta 1}^2 \tilde{n} / (m_\delta m_\epsilon)} t]. \quad (36)$$

Проінтегрувавши вираз (36), за початкових умов $x(0) = 0$ знаходимо переміщення плити пресування під час третьої фази

$$x_3(t) \approx \frac{3,18Q_f m_\delta m_\epsilon \tilde{n}_0 S_{I1} \pi d_A^2}{S_{\delta 1}^2 \sqrt{\rho_{pp} \bar{P}_{12}}} \sqrt[3]{\frac{m_\delta m_\epsilon}{S_{\delta 1}^2 \tilde{n}}} \left(\sqrt[3]{\frac{m_\delta m_\epsilon}{S_{\delta 1}^2 \tilde{n}}} + 1,64\mu \right) \left[1 - \cos \left(1,0913 \sqrt{\frac{S_{\delta 1}^2 \tilde{n}}{m_\delta m_\epsilon}} t \right) \right]. \quad (37)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (27 – 29) відносно $P(s)$, отримаємо

$$P(s) \approx \frac{m_\delta}{a_{33} S_{\delta 1}} \frac{b_{43}s^3 - b_{33}s^3 + b_{23}s^2 + b_{13}s - b_{03}}{(s - 2\gamma_1)(s^2 + 2\gamma_1 s + \gamma_1^2 + \gamma_2^2)} + \frac{\tilde{n}_1 S_{I1}}{S_{\delta 1} [s - 6,094Q_f / (x_{\max} S_{\delta 1})]} + \frac{\tilde{n}_0 S_{I1}}{S_{\delta 1} s}, \quad (38)$$

Методом розкладання виразу (38) на простіші дроби отримаємо

$$P(s) = \frac{c_0 S_{II1}}{S_{II1}} \frac{1}{s} + \frac{c_1 S_{II1}}{S_{II1}} \frac{1}{s - 6,094Q_H / (x_{\max} S_{II1})} + \frac{A_{p3} m_p}{a_{33} S_{II1}} \frac{1}{s - 2\gamma_1} + \frac{B_{p3} m_p}{a_{33} S_{II1}} \frac{s + \gamma_1}{(s + \gamma_1)^2 + \gamma_2^2} + \frac{m_p (C_{p3} - B_{p3}\gamma_1)}{a_{33} S_{II1} \gamma_2} \frac{\gamma_2}{(s + \gamma_1)^2 + \gamma_2^2}, \quad (39)$$

де $A_{p3} = (-b_{03} + 2b_{13}\gamma_1 + 4b_{23}\gamma_1^2)/(9\gamma_1^2 + \gamma_2^2)$; $B_{p3} = b_{23} - A_{p3}$; $C_{p3} = [b_{03} + A_{p3}(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)]/(2\gamma_1)$. (40)

Знаходимо оригінал зображення (39)

$$p_{12}(t) = c_0 S_{II1} / S_{II1} + (c_1 S_{II1} / S_{II1}) e^{6,094Q_H t / (x_{\max} S_{II1})} + [A_{p3} m_p / (a_{33} S_{II1})] e^{2\gamma_1 t} + [B_{p3} m_p / (a_{33} S_{II1})] e^{-\gamma_1 t} \cos(\gamma_2 t) + [m_p (C_{p3} - B_{p3}\gamma_1) / (a_{33} S_{II1} \gamma_2)] e^{-\gamma_1 t} \sin(\gamma_2 t). \quad (41)$$

У результаті нехтування незначними коефіцієнтами у виразі (41) та, враховуючи прийняті позначення згідно з (32, 34), за початкових умов $p_{12}(0) = 4c y_0 / [\pi(d_2^2 - d_1^2)]$ тиск у напірній порожнині гідроциліндра плити пресування для фази три знаходиться за формулою

$$p_{12_3}(t) \approx 4c y_0 / [\pi(d_2^2 - d_1^2)] + (\tilde{n}_1 S_{I1} / S_{\delta 1}) [e^{6,094Q_f t / (x_{\max} S_{\delta 1})} - 1]. \quad (42)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (27 – 29) відносно $Y(s)$, отримаємо

$$Y(s) \approx \frac{\pi(d_3^2 - d_1^2) m_p}{4S_{II1}} \left[\frac{A_{v3}}{m_\kappa s^2 + c} + \frac{B_{v3} s}{(s - 2\gamma_1)(m_\kappa s^2 + c)} + \frac{C_{v3} s^2 + D_{v3} s}{a_{33}(m_\kappa s^2 + c)(s^2 + 2\gamma_1 s + \gamma_1^2 + \gamma_2^2)} \right] + \frac{\pi(d_3^2 - d_1^2) c_1 S_{II1}}{4S_{II1} (m_\kappa s^2 + c) [s - 6,094Q_H / (x_{\max} S_{II1})]} + \frac{\pi(d_3^2 - d_1^2) c_0 S_{II1}}{4S_{II1} s (m_\kappa s^2 + c)} - \frac{c y_0}{s(m_\kappa s^2 + c)}. \quad (43)$$

Методом розкладання виразу (43) на простіші дроби отримаємо

$$Y(s) = \left[\frac{\pi(d_3^2 - d_1^2)c_0 S_{II1}}{4S_{II1}c} - y_0 \right] \frac{1}{s} + \frac{\pi(d_3^2 - d_1^2)}{4S_{II1}} \left[\frac{m_p A_{y3}}{s - 2\gamma_1} + \frac{K_{y3}}{s - 6,094Q_H/(x_{\max} S_{II1})} \right] + \frac{s}{s^2 + c/m_\kappa} \times$$

$$\times \left\{ \frac{\pi(d_3^2 - d_1^2)[m_p(B_{y3} + D_{y3}/a_{33}) + L_{y3}]}{4S_{II1}m_\kappa} + y_0 \left[1 - \frac{\pi(d_3^2 - d_1^2)}{4S_{II1}} \right] \right\} + \frac{\pi(d_3^2 - d_1^2)}{4S_{II1}} \left[\frac{\sqrt{c/m_\kappa}}{s^2 + c/m_\kappa} \times \right. \quad (44)$$

$$\left. \times \frac{m_p(A_{v3} + C_{y3} + E_{y3}/a_{33}) + M_{y3}}{\sqrt{m_\kappa c}} + \frac{m_p F_{y3}}{a_{33}} \frac{s + \gamma_1}{(s + \gamma_1)^2 + \gamma_2^2} + \frac{m_p(G_{y3} - F_{y3}\gamma_1)}{a_{33}\gamma_2} \frac{\gamma_2}{(s + \gamma_1)^2 + \gamma_2^2} \right],$$

де $A_{y3} = 2\gamma_1 B_{v3}/(c + 4m_\kappa\gamma_1^2)$; $B_{y3} = -m_\kappa A_{v3}$; $C_{y3} = B_{v3} - 2m_\kappa\gamma_1 A_{v3}$; $G_{y3} = -E_{y3}(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)/c$;
 $F_{y3} = -D_{y3}/m_\kappa$; $D_{y3} = C_{v3}/(2\gamma_1) - E_{y3}[c - m_\kappa(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)]/(2\gamma_1 c)$; $M_{y3} = 6,094Q_H L_{y3}/(x_{\max} S_{II1})$;
 $E_{y3} = \frac{c\{2\gamma_1 m_\kappa D_{v3} + [c - m_\kappa(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)]C_{v3}\}}{[c - m_\kappa(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)]^2 + 4\gamma_1^2 m_\kappa c}$; $K_{y3} = \frac{\tilde{n}_1 S_{I1} x_{\max}^2 S_{\dot{O}1}^2}{\tilde{n} x_{\max}^2 S_{\dot{O}1}^2 + 37,14Q_f^2 m_\kappa}$; $L_{y3} = -m_\kappa K_{y3}$. (45)

Знаходимо оригінал зображення (44)

$$y(t) = \pi(d_3^2 - d_1^2)\tilde{n}_0 S_{I1}/(4S_{\dot{O}1}c) - y_0 + \pi(d_3^2 - d_1^2)[m_\delta A_{y3} e^{2\gamma_1 t} + K_{y3} e^{6,094Q_H t/(x_{\max} S_{\dot{O}1})}]/(4S_{\dot{O}1}) +$$

$$+ \{\pi(d_3^2 - d_1^2)[m_\delta(B_{y3} + D_{y3}/a_{33}) + L_{y3}]/(4S_{\dot{O}1}m_\kappa) + y_0[1 - \pi(d_3^2 - d_1^2)/(4S_{\dot{O}1})]\} \cos(\sqrt{c/m_\kappa} t) +$$

$$+ [\pi(d_3^2 - d_1^2)/(4S_{\dot{O}1})] \{ [m_\delta(A_{v3} + C_{y3} + E_{y3}/a_{33}) + M_{y3}] \cos(\sqrt{c/m_\kappa} t) / \sqrt{m_\kappa c} +$$

$$+ (m_\delta F_{y3}/a_{33}) e^{-\gamma_1 t} \cos(\gamma_2 t) + [m_\delta(G_{y3} - F_{y3}\gamma_1)/(a_{33}\gamma_2)] e^{-\gamma_1 t} \sin(\gamma_2 t) \}. \quad (46)$$

У результаті нехтування незначними коефіцієнтами у виразі (46) та, урахуваючи прийняті позначення згідно з (32, 34, 45), за початкових умов $y(0) = 0$ переміщення запірнього елемента ГПТРДД під час третьої фази знаходимо за формулою

$$y_3(t) \approx [1,748\pi(d_3^2 - d_1^2)Q_f^2 m_\delta^2 \sqrt{m_\kappa} (3,487S_{\dot{O}1}^{2/33} \sqrt{c} - \sqrt[3]{m_\delta m_\kappa}) / (S_{\dot{O}1}^{8/3} c^{5/6})] \sin(\sqrt{c/m_\kappa} t). \quad (47)$$

Прирівнюючи переміщення запірнього елемента ГПТРДД до h_δ , отримуємо вираз для знаходження тривалості третьої фази

$$t_3 \approx \sqrt{m_\kappa/c} \arcsin\{ S_{\dot{O}1}^{8/3} c^{5/6} h_\delta / [1,748\pi(d_3^2 - d_1^2)Q_f^2 m_\delta^2 \sqrt{m_\kappa} (3,487S_{\dot{O}1}^{2/33} \sqrt{c} - \sqrt[3]{m_\delta m_\kappa})] \}. \quad (48)$$

4. Фаза відкриття запірнього елемента ГПТРДД до величини нижнього перекриття $y = h_{\text{нюж}}$ та переміщення плити пресування.

Аналогічно до третьої фази знаходимо наближені залежності для четвертої фази:

$$v_4(t) \approx [3,469Q_f m_\delta m_\kappa \tilde{n}_0 S_{I1} \pi(d_A^2 + d_a^2) / (S_{\dot{O}1}^2 \sqrt{\rho_{pp} \bar{p}_{12}})] [\sqrt[3]{m_\delta m_\kappa / (S_{\dot{O}1}^2 \tilde{n})} + 1,64\mu] \sin[1,091\sqrt[3]{S_{\dot{O}1}^2 \tilde{n} / (m_\delta m_\kappa)} t]; \quad (49)$$

$$x_4(t) \approx \frac{3,18Q_f m_\delta m_\kappa \tilde{n}_0 S_{I1} \pi(d_A^2 + d_a^2)}{S_{\dot{O}1}^2 \sqrt{\rho_{pp} \bar{p}_{12}}} \sqrt[3]{\frac{m_\delta m_\kappa}{S_{\dot{O}1}^2 \tilde{n}}} \left(\sqrt[3]{\frac{m_\delta m_\kappa}{S_{\dot{O}1}^2 \tilde{n}}} + 1,64\mu \right) \left[1 - \cos\left(1,091\sqrt[3]{\frac{S_{\dot{O}1}^2 \tilde{n}}{m_\delta m_\kappa}} t \right) \right]; \quad (50)$$

$$t_4 \approx \sqrt{m_\kappa/c} \arcsin\{ S_{\dot{O}1}^{8/3} c^{5/6} (h_{\text{те}} - h_a) / [1,748\pi(d_3^2 - d_1^2)Q_f^2 m_\delta^2 \sqrt{m_\kappa} (3,487S_{\dot{O}1}^{2/33} \sqrt{c} - \sqrt[3]{m_\delta m_\kappa})] \}. \quad (51)$$

Переміщення запірнього елемента ГПТРДД під час четвертої фази визначаємо за залежністю (47).

5. Фаза відкриття запірнього елемента ГПТРДД до величини додатного перекриття $y = h_n$ та переміщення плити пресування.

Аналогічно до фази три та фази чотири знаходимо наближені залежності для фази п'ять:

$$y_5(t) \approx [1,748\pi d_3^2 Q_i^2 m_\delta^2 \sqrt{m_\epsilon} (3,487 S_{\dot{O}1}^{2/33} \sqrt{c} - \sqrt[3]{m_\delta m_\epsilon}) / (S_{\dot{O}1}^{8/3} c^{5/6})] \sin(\sqrt{c/m_\epsilon} t); \quad (52)$$

$$t_5 \approx \sqrt{m_\epsilon/c} \arcsin\{ S_{\dot{O}1}^{8/3} c^{5/6} (h_i - h_{ix}) / [1,748\pi d_3^2 Q_i^2 m_\delta^2 \sqrt{m_\epsilon} (3,487 S_{\dot{O}1}^{2/33} \sqrt{c} - \sqrt[3]{m_\delta m_\epsilon})] \}. \quad (53)$$

Швидкість та переміщення плити пресування під час фази п'ять визначаємо відповідно за залежностями (49) та (50). Тиск у напірній порожнині гідроциліндра плити пресування під час фази чотири та фази п'ять знаходимо за формулою (42).

6. Фаза відкриття запірної елементи ГІТРДД до величини повного перекриття $y=h_n+h_n$ та зменшення тиску до тиску закриття ГІТРДД $p_{12}=p_{к12}$ може бути описана системою рівнянь:

$$\begin{cases} Q_H = \sigma p_{12} + \dot{y} \pi d_3^2 / 4 + \mu \pi d_3 (y - h_n) \sqrt{2 p_{12} / \rho_{pp}} + \mu \pi d_{\text{д}}^2 \sqrt{2 p_{12} / \rho_{pp}} / 4 + K W_{12} \dot{p}_{12}; \\ p_{12} \pi d_3^2 / 4 = m_\kappa \ddot{y} + c(y + y_0). \end{cases} \quad (54)$$

$$\quad (55)$$

Здійснимо лінеаризацію витрат через дросель за допомогою виразу (26) та через щілину, утворену внаслідок проходження запірним елементом ГІТРДД додатного перекриття

$$\sqrt{p_{12}} \approx \sqrt{\bar{p}_{12}}. \quad (56)$$

Після перетворення за Лапласом та лінеаризації отримаємо:

$$\begin{cases} (Q_H + \mu \pi d_3 h_n \sqrt{2 \bar{p}_{12} / \rho_{pp}}) / s = P(s) \{ K W_{12} s + [\sigma + \mu \pi d_{\text{д}}^2 \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] / 4 \} + \\ + Y(s) (\pi d_3^2 / 4 + \mu \pi d_3 \sqrt{2 \bar{p}_{12} / \rho_{pp}}); \\ P(s) \pi d_3^2 / 4 = Y(s) (m_\epsilon s^2 + c) + c y_0 / s. \end{cases} \quad (57)$$

$$\quad (58)$$

Підставляючи рівняння (58) у рівняння (57), отримаємо

$$P(s) = \frac{b_{26} s^2 - b_{16} s - b_{06}}{s(a_{36} s^3 + a_{26} s^2 + a_{16} s + a_{06})} \approx \frac{b_{26} s^2 - b_{16} s - b_{06}}{s(a_{26} s^2 + a_{16} s + a_{06})}. \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \text{де } a_{26} &= 4m_\epsilon [4\sigma + \mu \pi (d_{\text{д}}^2 + d_{\text{д}}^2) \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}]; & b_{06} &= 16c [\mu \pi d_3 (y_0 - h_i) \sqrt{2 \bar{p}_{12} / \rho_{pp}} - Q_H]; \\ a_{36} &= 16K W_{12} m_\epsilon; & b_{16} &= 4\pi d_3^2 c y_0; & a_{06} &= 4\{c [4\sigma + \mu \pi (d_{\text{д}}^2 + d_{\text{д}}^2) \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})}] + \mu \pi^2 d_3^3 \sqrt{2 \bar{p}_{12} / \rho_{pp}}\}; \\ a_{16} &= 16K W_{12} c + \pi^2 d_3^4; & b_{26} &= 16m_\epsilon (Q_H + \mu \pi d_3 h_i \sqrt{2 \bar{p}_{12} / \rho_{pp}}). \end{aligned} \quad (60)$$

Методом розкладання виразу (59) на простіші дроби отримаємо

$$\begin{aligned} P(s) &= A_{p6} \frac{1}{s} + \frac{B_{p6}}{a_{26}} \frac{s + a_{16} / (2a_{26})}{[s + a_{16} / (2a_{26})]^2 - (a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}) / (4a_{26}^2)} + \\ &+ \frac{2C_{p6} - B_{p6} a_{16} / a_{26}}{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}} \frac{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}} / (2a_{26})}{[s + a_{16} / (2a_{26})]^2 - (a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}) / (4a_{26}^2)}, \end{aligned} \quad (61)$$

$$\text{де } A_{p6} = -b_{06} / a_{06}; \quad B_{p6} = b_{26} + a_{26} b_{06} / a_{06}; \quad C_{p6} = -b_{16} + a_{16} b_{06} / a_{06}. \quad (62)$$

Знаходимо оригінал зображення (61)

$$p_{12}(t) = A_{p6} + \frac{B_{p6}}{a_{26}} e^{-\frac{a_{16}-t}{2a_{26}}} \operatorname{ch} \left(\frac{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}}{2a_{26}} t \right) + \frac{2C_{p6} - B_{p6} a_{16} / a_{26}}{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}} e^{-\frac{a_{16}-t}{2a_{26}}} \operatorname{sh} \left(\frac{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}}{2a_{26}} t \right). \quad (63)$$

У результаті нехтування незначними коефіцієнтами виразу (63) та, урахувавши прийняті позначення згідно з (61, 62), за початкових умов $p_{12}(0) = 4c(y_0 + h_i) / (\pi d_3^2)$ тиск у напірній

магістралі гідроциліндра під час шостої фази знаходимо за формулою

$$p_{12_6}(t) \approx \frac{4c(y_0 + h_i)}{\pi d_3^2} - \frac{4d_3^2 h_i \bar{p}_{12}}{d_{\bar{a}}^2 + d_{\bar{a}}^2} \left\langle 1 - e^{-\frac{\pi d_3^4}{8m_{\bar{e}} \mu (d_{\bar{a}}^2 + d_{\bar{a}}^2)} \sqrt{\frac{\rho_{pp} \bar{p}_{12}}{2}} t} \left[1 - sh \left[\frac{\pi d_3^4}{8m_{\bar{e}} \mu (d_{\bar{a}}^2 + d_{\bar{a}}^2)} \sqrt{\frac{\rho_{pp} \bar{p}_{12}}{2}} t \right] \right] \right\rangle. \quad (64)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (57 – 58) відносно $Y(s)$, отримаємо

$$Y(s) = \frac{\pi d_3^2}{4} \left[\frac{A_{p6}}{s(m_{\kappa} s^2 + c)} + \frac{B_{p6} s + C_{p6}}{(a_{26} s^2 + a_{16} s + a_{06})(m_{\kappa} s^2 + c)} \right] + \frac{c y_0}{s(m_{\kappa} s^2 + c)}. \quad (65)$$

Методом розкладання виразу (67) на простіші дроби отримаємо

$$Y(s) = \left(\frac{\pi d_3^2}{4} A_{y6} + y_0 \right) \frac{1}{s} + \left[\frac{\pi d_3^2 (B_{y6} + F_{y6})}{4m_{\kappa}} - y_0 \right] \frac{s}{s^2 + c/m_{\kappa}} + \frac{\pi d_3^2}{4} \left\{ \frac{G_{y6}}{\sqrt{m_{\kappa} c}} \frac{\sqrt{c/m_{\kappa}}}{s^2 + c/m_{\kappa}} + \frac{2E_{y6} - D_{y6} a_{16}/a_{26}}{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}} \times \right. \\ \left. \times \frac{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}/(2a_{26})}{[s + a_{16}/(2a_{26})]^2 - (a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26})/(4a_{26}^2)} + \frac{D_{y6}}{a_{26}} \frac{s + a_{16}/(2a_{26})}{[s + a_{16}/(2a_{26})]^2 - (a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26})/(4a_{26}^2)} \right\}, \quad (66)$$

де $A_{y6} = A_{p6}/c$; $B_{y6} = -m_{\kappa} A_{p6}/c$; $D_{y6} = -a_{26} F_{y6}/m_{\kappa}$; $G_{y6} = (C_{p6} - c E_{y6})/a_{06}$;

$$E_{y6} = \frac{B_{p6} m_{\bar{e}} a_{06} a_{16} + C_{p6} (m_{\bar{e}} a_{06} a_{26} - c a_{26}^2 - m_{\bar{e}} a_{16}^2)}{m_{\bar{e}} (2\bar{n} a_{06} a_{26} - m_{\bar{e}} a_{06}^2 - c a_{16}^2) - c^2 a_{26}^2}; \quad F_{y6} = \left(\frac{c a_{26}}{a_{06}} - m_{\kappa} \right) \frac{E_{y6}}{a_{16}} - \frac{C_{p6} a_{26}}{a_{06} a_{16}}. \quad (67)$$

Знаходимо оригінал зображення (66)

$$y(t) = \frac{\pi d_3^2}{4} A_{y6} + y_0 + \left[\frac{\pi d_3^2 (B_{y6} + F_{y6})}{4m_{\bar{e}}} - y_0 \right] \cos \left(\sqrt{\frac{c}{m_{\bar{e}}}} t \right) + \frac{\pi d_3^2}{4} \left[\frac{G_{y6}}{\sqrt{m_{\bar{e}} c}} \sin \left(\sqrt{\frac{c}{m_{\bar{e}}}} t \right) + \right. \\ \left. + \frac{D_{y6}}{a_{26}} e^{-\frac{a_{16}}{2a_{26}} t} ch \left(\frac{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}}{2a_{26}} t \right) + \frac{2E_{y6} - D_{y6} a_{16}/a_{26}}{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}} e^{-\frac{a_{16}}{2a_{26}} t} sh \left(\frac{\sqrt{a_{16}^2 - 4a_{06} a_{26}}}{2a_{26}} t \right) \right]. \quad (68)$$

У результаті нехтування незначними коефіцієнтами у виразі (68) та, урахувавши прийняті позначення згідно з (60, 67), за початкових умов $y(0) = h_n$, переміщення запірнього елемента ГТРДД під час фази шість знаходимо за формулою

$$y_6(t) \approx h_i \{ 1 + \pi d_3^2 \sqrt{\rho_{pp} \bar{p}_{12}} / 2t / [24m_{\bar{e}} \mu (d_{\bar{a}}^2 + d_{\bar{a}}^2)] \}. \quad (69)$$

Прирівнюючи переміщення запірнього елемента ГТРДД до $h_n + h_n$, отримуємо вираз для знаходження тривалості фази шість

$$t_6 \approx 24m_{\bar{e}} \mu (d_{\bar{a}}^2 + d_{\bar{a}}^2) h_i \sqrt{2 / (\rho_{pp} \bar{p}_{12})} / (\pi d_3^4 h_i). \quad (70)$$

Перевірку коректності спрощеної моделі відносно повної моделі виконаємо шляхом порівняння частоти та амплітуди вібраційного доущільнення ТПВ.

Знаходимо частоту коливань вібраційного доущільнення ТПВ:

$$\nu = 1/[t_1 + t_2 + 2(t_3 + t_4 + t_5 + t_6)] = 1/[0,01084 + 2,414 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot (6,686 \cdot 10^{-5} + 6,685 \cdot 10^{-6} + 2,166 \cdot 10^{-5} + 2,488 \cdot 10^{-4})] = 84,98 \text{ (Гц)}. \quad (71)$$

Знаходимо амплітуду переміщення плити доущільнення ТПВ:

$$A = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1,915 \cdot 10^{-4} + 2,762 \cdot 10^{-9} + 2,914 \cdot 10^{-11} + 3,059 \cdot 10^{-10} = 1,915 \cdot 10^{-4} \text{ (м)} = 0,1915 \text{ (мм)}. \quad (72)$$

Значення частоти та амплітуди коливань, отримані за допомогою спрощеної математичної

моделі, відрізняються від відповідних результатів повної математичної моделі [9] не більше, ніж на 5,34%, що допустимо для виконання попередніх проєктних розрахунків.

Розглянута методика попередньої оцінки й вибору вихідних параметрів вібраційного приводу доущільнення ТПВ має наближений характер і рекомендована під час виконання ескізного проєктування для виявлення загальної технічної характеристики. Остаточний розрахунок реальних параметрів вібраційного приводу доущільнення ТПВ необхідно проводити, використовуючи більш повну математичну модель [9] із урахуванням особливостей конкретної конструктивної схеми.

Висновки

Запропоновано спрощену вдосконалену математичну модель вібраційного приводу доущільнення ТПВ із використанням генератора імпульсів тиску релейної диференціальної дії, що дозволила отримати аналітичні взаємозалежності його основних параметрів і залежності частоти та амплітуди від основних параметрів вказаного приводу, які можуть бути використані для виконання попередніх проєктних розрахунків його параметрів як одного із складників для розв'язання проблеми створення науково-технічних основ проєктування високоефективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Qdais Abu H. Kinetics of solid waste biodegradation in laboratory lysimeters / H. Abu Qdais, A. Alsheraideh // Jordan Journal of Civil Engineering. – 2008. – Vol. 2, № 1. – P. 45 – 52.
2. Попович В. В. Ефективність експлуатації сміттєвозів у середовищі "місто-сміттєзвалище" / В. В. Попович, О. В. Придатко, М. І. Сичевський // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Т. 27, № 10. – С. 111 – 116.
3. Кабінет Міністрів України. Постанова № 265 "Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами" [Електронний ресурс] 4 березня 2004. Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.
4. Berezyuk O. V. Approximated mathematical model of hydraulic drive of container upturning during loading of solid domestic wastes into a dustcart / O. V. Berezyuk, V. I. Savulyak // Technical Sciences. – University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland. – 2017. – № 20 (3). – P. 259 – 273.
5. Berezyuk O. V. Dynamics of hydraulic drive of hanging sweeping equipment of dust-cart with extended functional possibilities / O. V. Berezyuk, V. I. Savulyak // TECHNOMUS Journal. New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies. – Suceava, Romania. – 2015. – № 22. – P. 345 – 351.
6. Березюк О. В. Аналітичне дослідження математичної моделі вібраційного гідроприводу пресування твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2008. – № 38. – С. 96 – 102.
7. Патент України № 92720 U, МПК (2014.01) F15B 21/00. Генератор імпульсів тиску релейної диференціальної дії / Березюк О. В.; заявник та патентовласник Березюк О. В. – №u201404118 ; заявл. 16.04.2014. опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16.
8. Коц И. В. Разработка и исследование клапанов-пульсаторов для гидравлических приводов вибрационных горных машин: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.03 / Коц Иван Васильевич. – Винница, 1994. – 227 с.
9. Березюк О. В. Числове дослідження удосконаленої математичної моделі вібраційного гідроприводу ущільнення ТПВ у сміттєвозі на основі використання інформаційних технологій / О. В. Березюк // Матеріали II Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів та молодих вчених за тематикою «Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні». – Херсон : ФОП Вишемирський В. С., – 2019. – С. 290 – 293.
10. Березюк О. В. Експериментальне дослідження процесів зневоднення твердих побутових відходів шнековим пресом / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 5. – С. 18 – 24. – DOI: 10.31649/1997-9266-2018-140-5-18-24.
11. Свешников А. Г. Теория функций комплексной переменной / А. Г. Свешников, А. Н. Тихонов. – [6-е изд., стереот.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 336 с.
12. Гусак А. А. Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак, Е. А. Бричкова. – Минск : ТетраСистемс, 1999. – 640 с.

Стаття надійшла до редакції 16.02.2020 р.

Стаття пройшла рецензування 26.02.2020 р.

Березюк Олег Володимирович – к. т. н., доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки.
Вінницький національний технічний університет.