

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОРОЗРЯДКИ ВІБРОУДАРНОГО КОВША ГІДРАВЛІЧНОГО ЕКСКАВАТОРА

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розглянуто нелінійну модель політропічного процесу енергорозрядки пневмоакумулятора віброударного ковша гідралічного екскаватора, пов'язаного з розгоном бойка ударного пристрою.

Для аналізу використовується нелінійне диференціальне рівняння другого порядку та два методи інтегрування: метод пониження порядку диференціального рівняння з переходом до фазових координат і метод застосування ряду Тейлора (в формі ряду Маклорена).

Дослідження показали, що коефіцієнти ряду Маклорена мають різну міру впливу на результат розрахунків. Виявлено, що впливовими в розрахунку процесу розрядки пневмоакумулятора є тільки коефіцієнти з парними номерами. Причому, зі збільшенням номера коефіцієнта його вплив на результати розрахунків зменшується. Застосування розробленої методики та розрахункової моделі в системі Mathcad дозволило дослідити процес розгону бойка, визначити раціональні енергетичні параметри ударного пристрою — гідромолота віброударного ковша гідралічного екскаватора. Це важливо для забезпечення максимального впливу гідромолота на руйнування міцного ґрунту або гірської породи. Рекомендується впровадження запропонованої методології для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь з використанням фазових координат та ряду Тейлора.

Розроблена методика може бути корисною для досягнення максимальної передачі енергії удару в робоче середовище, що є критичним для підвищення продуктивності та надійності гідралічного обладнання. Отримані результати мають важливе значення для покращення технологічних рішень у галузі гідралічного обладнання та їхнього подальшого впровадження у промислове виробництво.

Дослідження відкриває можливість для адаптивного функціонування гідромолотів з урахуванням параметрів технологічного середовища та обґрунтування раціональних параметрів ударного пристрою віброударного ковша гідралічного екскаватора. Ці результати є вагомим внеском у розвиток сучасних гідралічних систем та їхнього застосування в промисловості.

Ключові слова: математична модель, ряд Маклорена, фазові координати, пневмоакумулятор, енергорозрядка, бойок, віброударний ківш, передударна швидкість, енергія удару.

Вступ

Підвищення продуктивності гідралічних екскаваторів на сьогодні є актуальною задачею. Одним з перспективних напрямів підвищення продуктивності руйнування міцних ґрунтів або гірських порід є застосування, віброковшів як активних зубців ударних машин, наприклад, гідромолотів. Важливою складовою процесу функціонування гідромолота є процес енергорозрядки пневмоакумулятора, пов'язаний з розгоном бойка, від якого залежить енергія удару та ефективність руйнування робочого середовища. Ідентифікація складної динаміки цього процесу та розробка точніших нелінійних математичних моделей є важливими для оптимізації параметрів та підвищення продуктивності гідралічних екскаваторів [1], [2].

У статті [3] автори досліджують вібраційні характеристики гідралічного вібромолота та створюють пов'язану динамічну модель для аналізу впливу різних конструктивних параметрів на його продуктивність. Дослідники провели випробування вібромолота та встановили, що під час випро-

бування вібротолот надійно працював за коливань вхідного потоку робочої рідини в межах від 50 до 280 л/хв. Дослідження дає цінну інформацію про вібраційну поведінку гідравлічних вібротолотів, на основі якої запропоновано динамічну модель для подальшого аналізу.

Проте, важливо зазначити, що дослідження має обмеження, такі як використання обмеженого тестового поля та необхідність подальшої перевірки моделі в різних робочих умовах.

У роботі [4] запропоновано нелінійні аналітичні залежності для визначення спрощених ефективних вагових функцій динамічної системи, які використовуються у моделюванні гідравлічного опору, що виникає під час гідроударів. У статті пояснюється, що ефективна вагова функція не потребує великої збіжності з класичною функцією. До того ж, для задовільних результатів це має бути сума принаймні двох або трьох експоненціальних виразів. Представлені аналітичні рішення дозволяють швидко визначати спрощені форми ефективних вагових функцій, які можна використовувати в комерційних і нестандартних комп'ютерних програмах для моделювання, але мають обмеження за стійкістю розв'язків та необхідністю введення багатьох констант, які описують окремі рішення.

Процес розгону бойка в гідротолотах вібраційних ковшів екскаваторів є складним явищем, що характеризується нелінійною динамікою. Більшість наявних математичних моделей базуються на лінійних припущеннях, що призводить до неточних прогнозів і неоптимальної продуктивності. Тому потрібна точніша математична модель, яка враховуватиме нелінійну динаміку цього процесу.

Створення комплексної нелінійної математичної моделі, яка з достатньою для практики точністю відображає процес розгону бойка, та ідентифікація системних нелінійних параметрів імпульсної системи дозволять розробити та впровадити розширені стратегії керування і адаптацію імпульсної системи до умов робочого середовища, що підвищить ефективність віброударних робочих органів екскаваторів.

Метою дослідження є розробка математичної моделі, у вигляді нелінійного диференціального рівняння процесу енергорозрядки пневмоакумулятора віброударного ковша, пов'язаного з динамікою ударного елемента — бойка, який періодично контактено або через рідину спрягається з клапаном в гідротолоті, що вмонтований в ряд зубців ковша, а також розв'язання диференціального рівняння із застосуванням фазових координат та ряду Маклорена, що дозволить визначити раціональні параметри процесу розгону бойка для удару.

Для досягнення поставленої мети поставлені такі *завдання*:

– запропонувати нелінійну математичну модель процесу енергорозрядки пневмоакумулятора з генерацією розгону бойка на удар;

– провести дослідження моделі з пониженням порядку диференціального рівняння руху бойка, під дією клапана пневмоакумулятора та з використанням фазового простору, що дозволить проаналізувати поведінку динамічної системи в процесі розгону бойка та визначити залежність його швидкості від переміщення;

– проінтегрувати нелінійне диференціальне рівняння із застосуванням ряду Маклорена, визначити функціональні розв'язки та побудувати залежності переміщення бойка від часу в процесі його розгону, а також оцінити точність розв'язку.

Матеріал і результати дослідження

На рис. 1 показано конструктивну схему з позначенням основних елементів віброударного ковша екскаватора, обладнаного ударним елементом — гідротолотом.

Під час роботи маніпулятор здійснює подачу віброударного ковша 1 з гідротолотом, що має корпус 2 на вибій. Це приводить до переміщення зубця-інструмента 3 до контакту з бойком 4 і далі до спряження бойка 4 з клапаном 5 пневмоакумулятора. З подачею робочої рідини у камеру зведення 9, за співвідношення діаметрів $d_1 > d_2$ тиск, діючи на площу зведення $S_{зв} = \pi(d_1^2 - d_2^2)/4$, здійснює зведення спряжених бойка 4 і клапана 5. При цьому камера пневмоакумулятора 6 зменшується від початкового значення V_0 до кінцевого значення V_i , а тиск газу в камері пневмоакумулятора збільшується з початкового значення p_0 до кінцевого значення p_i . Припускаючи що відбувається політропний процес стиснення газу з показником політропи n , енергія зарядки пневмоакумулятора характеризуватиметься залежністю [6]

$$L = \frac{p_0 V_0}{n-1} \left(e^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right),$$

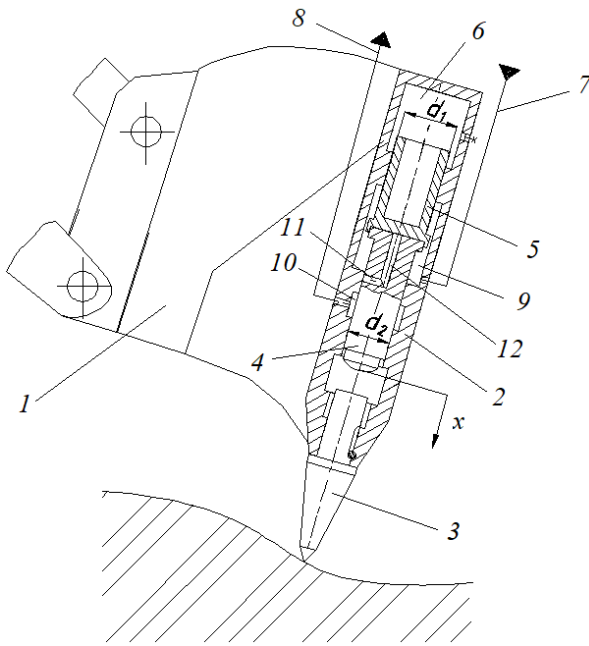


Рис. 1. Конструктивна схема віброударного ковша: 1 — ківш, приєднаний до маніпулятора; 2 — корпус гідромолота; 3 — інструмент-зубець і 4 — бойок; 5 — клапан пневмоакумулятора; 6 — камера пневмоакумулятора, заповнена інертним газом з початковим тиском p_0 ; 7, 8 — відповідно лінії нагнітання та зливу робочої рідини; 9 — камера зведення; 10 — камера зливу; 11, 12 — відповідно радіальний та осьовий канали

де e — ступінь стиснення газу, $e = p_t/p_0$.

Перемикання режиму зарядки в режим розрядки пневмоакумулятора здійснюється коли радіальний отвір 11 входить в зону камери зведення 9. При цьому рідина під тиском зведення через канали 11 та 12 потрапляє під торці спряжених бойка і клапана та розмикає це спряження. Далі під дією накопиченої пневмоакумулятром енергії, йде розгін бойка 4 в системі «клапан—рідина—бойок». З входженням радіального отвору 11 в зону камери зливу 10, тиск у камері зведення 9 падає, клапан 5 в кінцевій фазі розгону спрягається з бойком 4, який торцевою частиною наносить удар по торцю інструмента 3, передаючи через нього енергію для руйнування гірської породи. Далі цикл повторюється.

Для опису руху бойка застосовано метод кінестатики, за яким д'Аламберова сила інерції визначається співвідношенням $-m \cdot x''$, де m — зведена маса бойка (з урахуванням маси клапана), x'' — прискорення бойка під дією сили розгону, яка діє на торцеву частину клапана і далі через рідину на бойок, запишеться $F(x) = S \cdot p(x)$, де S — площа торцевої частини клапана 5, $S = \pi d_1^2/4$.

Процес розрядки пневмоакумулятора пов'язаний з політропічним розширенням газу, тому тиск в пневмокамері визначається співвідношенням

$$p(x) = p_t \left(\frac{V_t}{V_t + Sx} \right)^n, \quad (1)$$

де x — переміщення бойка в фазі розгону. Зважаючи на принцип д'Аламбера, рівняння кінестатики запишеться так: $-m \cdot x'' + S \cdot p(x) = 0$. З урахуванням (1), отримаємо

$$m \cdot x'' = S \cdot p_t \cdot \left(\frac{V_t}{V_t + Sx} \right)^n. \quad (2)$$

Для спрощення обчислення в (2) замінимо групу констант константою N

$$N = \frac{S \cdot p_t \cdot V_t^n}{m}, \quad (3)$$

і відповідно диференціальне рівняння руху (2) запишеться

$$x'' = \frac{N}{(V_t + S \cdot x)^n}. \quad (4)$$

Диференціальне рівняння (4) нелінійне і точного розв'язку не має. Проте, це рівняння допускає пониження порядку [6]. Тоді, увівши заміну

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dx'}{dt} \cdot \frac{dx}{dx} = x' \cdot \frac{dx'}{dx},$$

отримаємо з (4) рівняння першого порядку з розділними змінними відносно фазових координат $x' = v$ та x

$$v dv = \frac{N}{(V_t + S \cdot x)^n} dx. \quad (5)$$

Проведемо інтегрування (5)

$$\int v dv = N \int \frac{(V_t + S \cdot x)^{-n} \cdot d(V_t + Sx)}{S}$$

і отримаємо

$$\frac{v^2}{2} = N \frac{(V_t + Sx)^{-n+1}}{S(-n+1)} + C_1;$$

$$\frac{v^2}{2} = -\frac{N}{S(n-1)} \cdot \frac{1}{(V_t + S \cdot x)^{n-1}} + C_1. \quad (6)$$

З урахуванням початкових умов $x(0) = 0$; $x'(0) = 0$ визначимо постійну C_1 .

$$-\frac{N}{S \cdot (n-1)} \cdot \frac{1}{V_t^{n-1}} + C_1 = 0,$$

звідки

$$C_1 = \frac{N}{S \cdot (n-1)} \cdot \frac{1}{V_t^{n-1}}.$$

Тоді з рівняння (6) отримаємо

$$v = \sqrt{2 \left[-\frac{N}{S \cdot (n-1)} \cdot \frac{1}{(V_t + S \cdot x)^{n-1}} + \frac{N}{S \cdot (n-1)} \cdot \frac{1}{V_t^{n-1}} \right]}$$

або

$$v = \sqrt{2 \left\{ \frac{N}{S(n-1)} \left[-\frac{1}{(V_t + S \cdot x)^{n-1}} + \frac{1}{V_t^{n-1}} \right] \right\}},$$

з урахуванням (3) отримаємо

$$v = \sqrt{2 \left\{ \frac{p_t V_t^n}{m(n-1)} \left[-\frac{1}{(V_t + Sx)^{n-1}} + \frac{1}{V_t^{n-1}} \right] \right\}}. \quad (7)$$

Для числового аналізу розглянемо типорозмір гідромолота з енергією зарядки пневмоакумулятора $L = 160$ Дж, з можливістю його застосування для ковша $0,5 \text{ м}^3$, наприклад, для екскаватора АТЕК-881 (Україна) [7], [8]: $p_t = 1,654 \cdot 10^6$ Па, $V_t = 3,217 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, $m = 2,445$ кг, $S = 0,003 \text{ м}^3$, переміщення бойка при енергорозрядці пневмоакумулятора становить $x = 0,0001 \dots 0,04$ м. Залежність швидкості від переміщення, з урахуванням (7), виражається функцією

$$v(x) = \sqrt{2 \left\{ \frac{p_t \cdot V_t^n}{m(n-1)} \left[-\frac{1}{(V_t + S \cdot x)^{n-1}} + \frac{1}{V_t^{n-1}} \right] \right\}}. \quad (8)$$

За повної енергорозрядки пневмоакумулятора, що відповідає максимальному переміщенню бойка на удар, $x = 0,04$ м, максимальна передударна швидкість бойка за формулою (8) буде $v(0,04) = 11,413$ м/с.

З іншого боку, за повної енергорозрядки пневмоакумулятора (без урахування енерговитрат на тертя при розгоні бойка) передударна швидкість запишеться так:

$$v_u = (2 \cdot L/m)^{0,5} = 11,414 \text{ м/с},$$

що через таку порівняльну валідність підтверджує коректність формули (8).

Енергозарядка пневмоакумулятора пов'язана з переходом потенціальної енергії зарядки в кінетичну енергію руху бойка та характеризується залежністю

$$E(x) = L - \frac{m \cdot v(x)^2}{2}. \quad (9)$$

На рис. 2 показані залежності енергії $E(x)$, у разі розрядки пневмоакумулятора та швидкості ро-

згону бойка $v(x)$ від величини ходу $x = (0, \dots, 0,04)$ м.

Для визначення залежності $x = f(t)$ застосовуємо розв'язок у вигляді ряду Маклорена, якщо $x \in C^{(m)}$ ($[0, T]$) і функція $x = f(t)$ m раз диференційована на відрізку $[0, T]$, де $C^{(m)}$ — степеневий ряд [6]. Тоді розв'язок (4) буде

$$x(t) = x(0) + x'(0) \cdot t + \frac{x''(0)}{2!} \cdot t^2 + \frac{x'''(0)}{3!} \cdot t^3 + \dots + \frac{x^{(m)}(0)}{m!} \cdot t^m + \dots \quad (10)$$

Знайдемо коефіцієнти ряду Маклорена з $v(x)$, м/с урахуванням початкових умов

$$x(0) = 0; \quad x'(0) = 0; \\ x''(0) = \frac{N}{(Vt + S \cdot x(0))^n} = \frac{N}{Vt^n}; \quad (11)$$

$$x'''(t) = \left(\frac{N}{(Vt + S \cdot x(0))^n} \right)' = \\ = NnS(Vt + S \cdot x(0))^{-n-1} \cdot x';$$

З урахуванням початкових умов ($x'(0) = 0$); $x'''(0) = 0$;

$$x^{IV}(t) = [x'''(t)]' = [NnS(V_0 + Sx)^{-n-1} \cdot x']';$$

$$x^{IV}(0) = NnSV_0^{-n-1} \left(\frac{N}{V_0^n} \right); \quad (12)$$

$$x^V(t) = [x^{IV}(t)]' = A(-n-1)(-n-2)(V_0 + S \cdot x)^{-n-3} \cdot (S)^2(x')^3 + (-n-1)(V_0 + Sx)^{-n-2} \cdot 2Sx'x'' + \\ + (-n-1)(V_0 + Sx)^{-n-2} \cdot Sx'x'' + (V_0 + Sx)^{-n-1} \cdot x''''.$$

Тоді $x^V(t) = (x^{IV})'$; $x^V(0) = 0$; $x^{VI}(t) = [x^V(t)]'$; (13)

$$x^{VI}(0) = NnS \left[3(n+1) \cdot SV_0^{-n-2} \left(\frac{N}{V_0^n} \right)^2 + V_0^{-2(n+1)} \cdot NnS \left(\frac{N}{V_0^n} \right) \right]. \quad (14)$$

Залежність $x = f(t)$ буде в формі ряду (10) з урахуванням нетривіальних значень похідних (11), (12), (14) за виконання початкових умов

$$x(t) = \left(\frac{N}{V_0^n} \right) \frac{t^2}{2!} + NnSV_0^{-n-1} \left(\frac{N}{V_0^n} \right) \frac{t^4}{4!} + NnS \left[3(n+1)SV_0^{-n-2} \left(\frac{N}{V_0^n} \right)^2 + V_0^{-2(n+1)} NnS \left(\frac{N}{V_0^n} \right) \right] \frac{t^6}{6!}. \quad (15)$$

Для зручності обчислень проведемо заміни

$$b_2 = \frac{N}{V_0^n}; \quad b_4 = NnSV_0^{-n-1} \left(\frac{N}{V_0^n} \right); \quad b_6 = NnS \left[3(n+1)SV_0^{-n-2} \left(\frac{N}{V_0^n} \right)^2 + V_0^{-2(n+1)} NnS \left(\frac{N}{V_0^n} \right) \right].$$

Тоді (15) набуде вигляду $x(t) = b_2 \frac{t^2}{2!} + b_4 \frac{t^4}{4!} + b_6 \frac{t^6}{6!}$. (16)

Для дослідження впливу кількості членів ряду на точність розв'язку окремо розглянемо складові (16)

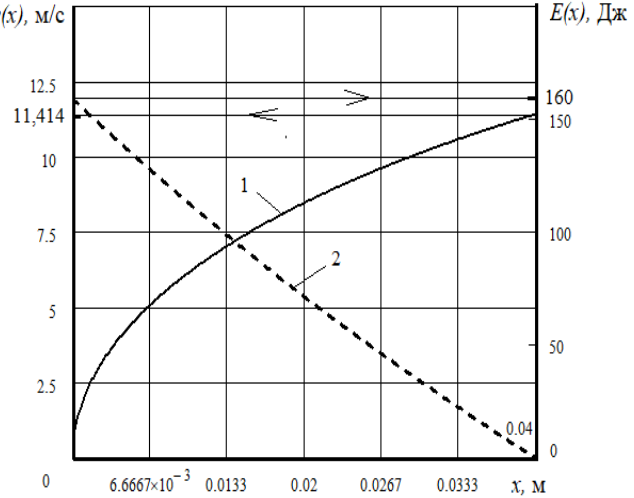


Рис. 2. Залежності: 1 — швидкості бойка; 2 — енергії під час розрядки пневмоакумулятора від величини ходу бойка

$$x_2(t) = b_2 \frac{t^2}{2!}; \quad x_4(t) = b_4 \frac{t^4}{4!}; \quad x_6(t) = b_6 \frac{t^6}{6!}. \quad (17)$$

$$\text{В підсумку можна записати} \quad x(t) = x_2(t) + x_4(t) + x_6(t). \quad (18)$$

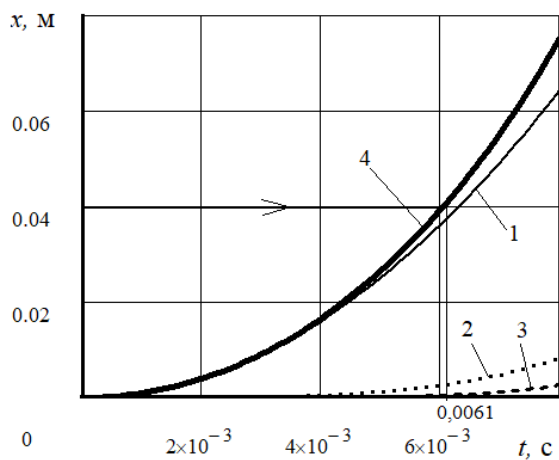


Рис. 3. Графіки залежності складових та повного переміщення від часу: 1 — складове переміщення $x_2(t)$; 2 — складове переміщення $x_4(t)$; 3 — складове переміщення $x_6(t)$; 4 — сумарне переміщення $x(t)$

моокумулятора становило $x = 0 \dots 0,1$ м. Отримане значення часу розгону бойка до передударної швидкості 7,04 м/с становило 0,027 с, що відповідає експериментальним даним за часом та відносною похибкою 3,57 %.

На рис. 3 показані графіки залежності складових та повного переміщення бойка від часу в процесі його розгону.

Як видно з наведених результатів, вплив членів ряду зі збільшенням номера коефіцієнта ряду суттєво падає. Час повної енергорозрядки пневмоаккумулятора зі значенням ходу бойка на удар 0,04 м становить $6,1 \cdot 10^{-3}$ с.

Для встановлення точності запропонованого методу розглянуто його реалізацію для гідромолота ГПМ-300 виробництва ВО «Атек» (Україна), для якого раніше проведено експериментальні вимірювання динамічних параметрів [9]. Вхідні дані для розрахунків за формулами (10)—(18): енергія зарядки $L = 3,22$ кДж; маса бойка $m = 134$ кг; площа поршня пневмоаккумулятора $S = 0,027$ м²; тиск $p_i = 1,38 \cdot 10^6$ Па; об'єм пневмокамери $V_i = 0,114$ м³, переміщення бойка під час енергорозрядки пнев-

Висновки

1. Розроблена нелінійна модель розгону бойка ударного пристрою віброударного ковша екскаватора у вигляді нелінійного диференціального рівняння другого порядку та запропоновано два методи інтегрування цього рівняння: метод пониження порядку диференціального рівняння переходом до фазових координат та метод застосування ряду Маклорена.

2. Визначені коефіцієнти ряду Маклорена, причому коефіцієнти з непарними номерами виявились тривіальними, а коефіцієнти з парними номерами мають впливові значення, причому зі збільшенням номера коефіцієнта вплив на результат розрахунків зменшується.

3. Розроблена методика та розрахункова модель в системі Mathcad дозволяють дослідити процес розгону бойка та визначити раціональні параметри ударного пристрою віброударного ковша гідравлічного екскаватора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] H. Andersson, K. Simonsson, D. Hilding, Schill, and D. Leidermark, "Validation of a co-simulation approach for hydraulic percussion in it applied to a hydraulic hammer," *Advances in Engineering Software*, no. 131, pp. 102-115, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.12.001>.

[2] Li Junyi, and Chen Qijuan, "Nonlinear Dynamical Analysis of Hydraulic Turbine Governing Systems with Nonelastic Water Hammer Effect," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, Article ID 412578, 11 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/412578>.

[3] G. Lulu, W. Dongyue, and W. Shite, "Research on the performance of hydraulic vibratory hammer with coupled dynamic model," *SN Appl. Sci.* no. 4, 259, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05144-3>.

[4] K. Urbanowicz, "Analytical expressions for effective weighting functions used during simulations of water hammer," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 55, no. 3, pp. 1029-1040, Warsaw 2017. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.55.3.1029>.

[5] V. Slidenko, and L. Marchuk, "The influence of thermodynamic operating conditions on the energy parameters of the vibrating bucket device," *Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects*. Proceedings of the 15th International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Berlin, Germany, 2022, pp. 163-168.

[6] В. М. Сліденко, С. П. Шевчук, О. В. Замараєва, і Л. К. Лістовщик, *Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2013, 180 с.

[7] Послуги спецтехніки. «Екскаватор колісний Атек-881» [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://pkbud.com.ua/content/Atek>. Дата звернення: 10.11.2022.

[8] Л. Р. Марчук, В. О. Поліщук, і В. М. Сліденко, «Енергощадна адаптація віброударного ковша маніпулятора до

змінних характеристик робочого середовища.» *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 1, с. 104-108, 2023.

[9] В. А. Єрошенко, В. М. Сліденко, С. П. Шевчук, і В. П. Студенець, *Потужна дисипація енергії коливань гірничих машин гетерогенними ліофобними системами*, моногр. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2016, 180 с.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних наук ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.09.2023

Сліденко Віктор Михайлович — д-р. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів;

Марчук Любов Романівна — аспірантка кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів, e-mail: marchuk@iit.kpi.ua .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

V. M. Slidenko¹
L. R. Marchuk¹

Mathematical Model of the Energy Discharge Process of the Vibrating Bucket of the Hydraulic Excavator

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

The paper considers a nonlinear model of the polytropic process of energy discharge of the pneumatic accumulator of the vibration-impact bucket of a hydraulic excavator associated with the acceleration of the striker of the impactor. A nonlinear differential equation of the second order and two integration methods are used for the analysis: lowering the order of the differential equation with the transition to phase coordinates and using the Taylor series (in the form of the McLaurin series). Studies have shown that the coefficients of the McLaurin series have varying degrees of influence on the calculation result. Only the coefficients with even numbers were found to be influential in calculating the process of discharging a pneumatic accumulator. Moreover, as the number of the coefficient increases, its influence on the calculation results decreases. Application of the developed methodology and calculation model in the Mathcad system made it possible to study the process of striker acceleration and determine the rational energy parameters of the impact device — a hydraulic hammer of a hydraulic excavator's vibration-impact bucket. This is important to ensure the maximum impact of the hydraulic hammer on the destruction of solid soil or rock. Implementation of the proposed methodology for solving nonlinear differential equations using phase coordinates and Taylor series is recommended. The developed methodology can be helpful to for achieving maximum impact energy transfer to the working environment, which is critical for improving the performance and reliability of hydraulic equipment. The results obtained are essential for improving technological solutions in hydraulic equipment and their further implementation in industrial production. The study opens up the possibility for the adaptive operation of hydraulic hammers, considering the technological environment's parameters and substantiating the rational parameters of the impactor of the vibration-impact bucket of a hydraulic excavator. These results significantly contribute to developing modern hydraulic systems and their application in industry.

Keywords: mathematical model, McLaurin series, phase coordinates, pneumatic accumulator, energy discharge, striker, vibrating impact bucket, non-redundant speed, impact energy.

Slidenko Viktor M. — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automation of Electrotechnical and Mechatronic Complexes;

Marchuk Liubov R. — Post-Graduate Student of the Chair of Automation of Electrotechnical and Mechatronic Complexes, e-mail: marchuk@iit.kpi.ua