

## ЕНЕРГОЩАДНА АДАПТАЦІЯ ВІБРОУДАРНОГО КОВША МАНІПУЛЯТОРА ДО ЗМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА

Робота присвячена дослідженню віброударного ковша маніпулятора - екскаватора чи прохідницького щита, з енергоощадною адаптацією до характеристик робочого середовища для застосування в будівельній та гірничодобувній промисловості. В статті запропоновано алгоритм оптимального керування елементом віброударного ковша - віброударним пристроєм з використанням обмежень по силі опору різанню та енергії удару. Визначено діапазон функціонування віброударного пристрою з встановленням оптимальної області ввімкнення пристрою, в залежності від змінних характеристик робочого середовища, з використанням інтегральної характеристики - сили опору різанню ґрунта, яка, в свою чергу, залежить від кута повороту ковша маніпулятора та характеристики щільності ґрунта за числом ударів ударника ДорНДІ. Встановлені критичний рівень сили статичного різання ґрунтів екскаватором IV розмірної групи українського виробництва та критерій переходу процесу різання з статичного в динамічний режим в залежності від змінних характеристик робочого середовища. Наведені енергетичні характеристики адаптивного віброударного ковша маніпулятора. Рекомендовано впровадження віброударного ковша в промислове виробництво України.

**Ключові слова:** адаптація, маніпулятор, оптимізація, сила різання, віброударний ковш, пневмоаккумулятор, енергія удару.

**Вступ.** Гірничодобувна промисловість та будівництво є основними сферами застосування маніпуляторів з ковшовими робочими органами. В більшості - це гідравлічні екскаватори та прохідницькі щити. Під час руйнування ґрунтів важливі адекватне реагування системи керування на змінні характеристики робочого середовища та адаптація для них енергетичних параметрів маніпулятора. Застосування ковшів та віброударних пристроїв з автоматизацією функціонування дозволяє знизити енергозатрати на руйнування гірських порід та міцних ґрунтів з адаптацією до їх характеристик [1].

**Мета та завдання.** Визначення оптимального діапазону адаптивного ввімкнення віброударного режиму функціонування маніпулятора шляхом встановлення характеристик робочої зони з урахуванням сили опору різанню та енергії одиночного удару в залежності від траєкторії руху ковша та категорії щільності ґрунта за числом ударника ДорНДІ.

**Матеріал і результати дослідження.** Комбінуванням взаємодії статичного та динамічного режимів руйнування гірських порід та міцних ґрунтів можливе досягнення оптимального регулювання енергетичних параметрів робочих органів машин з адаптацією до умов робочого середовища. При цьому алгоритм керування елементом віброударного ковша - віброударним пристроєм, наприклад, за допомогою електрогідроприводу з блоком керування та адаптації (рис. 1) повинен забезпечити оптимальний діапазон регулювання енергії удару:

$$L_{opt}(t) = \arg \max_{u \in Q} \tilde{Q}[L/I(t)], \quad (1)$$

де  $Q$  - задана область допустимих сигналів керування енергією ударів за співвідношенням величини вкорінення  $u$  інструмента віброударного пристрою в ґрунт в залежності від опору вибою;  $I(t)$  - наявна на поточний момент часу апостеріорна інформація про характер зміни тиску в пневмоаккумуляторі (за допомогою датчика тиску) в процесі руйнування ґрунту в проміжку часу  $(t_0, t)$ ;  $\tilde{Q}[L/I(t)]$  - прогноз (оцінка) в момент  $t$  значення параметрів, з виробленням блоком керування та адаптації сигналів керуванням пуском і зупинкою віброударного пристрою.

Сила опору різанню ґрунта, як узагальненої (інтегральної) характеристики робочого середовища, при кутовому переміщенню ковша (рисунок 1) визначається залежністю [2]:

$$Rt(C, \varphi) = 10 \cdot C \cdot (1 + 2,6 \cdot L) \cdot \left(1 - 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha\right) \cdot Z \cdot \left\{r_k \cdot \left[\cos(\varphi_0 - \varphi) - \varphi_0\right]\right\}^{1,35}, \text{ кН} \quad (2)$$

де  $r_k = 1,25$  м - радіус ковша ємністю  $0,65$  м<sup>3</sup>;  $\varphi_0 = 75^\circ$  ( $1,309$  рад.) - половина кута, який характеризує параметри вибою при повному заповненні ковша породою за один поворот,  $C$  - характеристика щільності

грунта за числом ударів ударника ДорНДІ,  $L=1,2$  м - ширина ковша,  $\alpha=50^\circ$  - кут різання,  $Z=0.65$  - коефіцієнт який залежить від довжини горизонтального профілю та інших технологічних параметрів [2],  $\varphi, \varphi_0$  - геометричні параметри (рис. 1).

За рівнянням (2) визначена характеристика сили опору різанню  $R_t$ , в залежності від кута повороту ковша та числа ударів ударника ДорНДІ (рисунок 2).

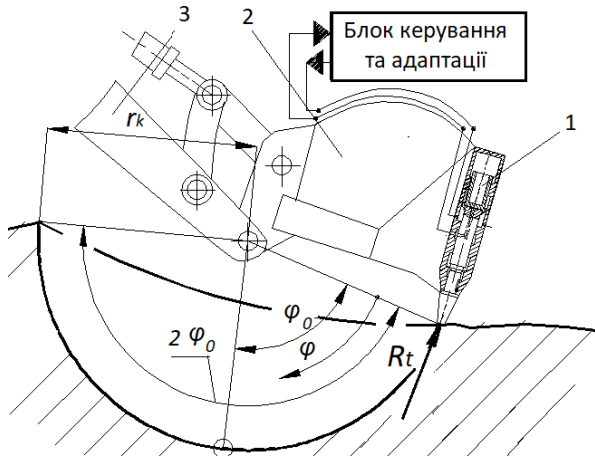


Рисунок 1 –Схема установки віброударного ковша: 1 – віброударний пристрій; 2- ковш; 3 – елемент маніпулятора

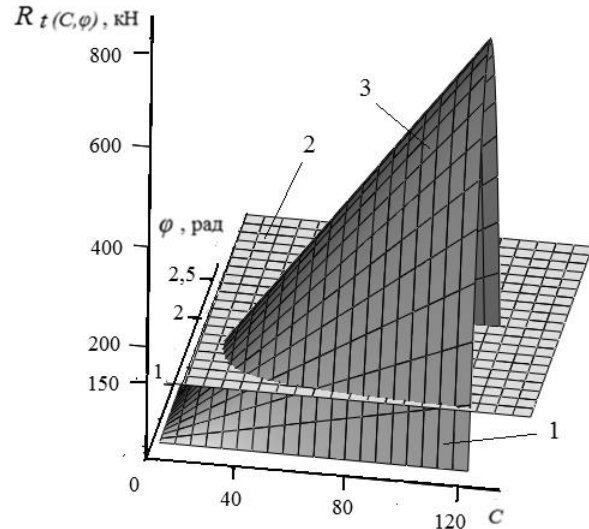


Рисунок 2 –Графік залежності сили опору різанню з обмеженням зон функціонування: 1- зона статичного процесу різання; 2- розділення зон різання генераторними спроможностями маніпулятора; 3- зона запуску динамічного процесу ввімкненням віброударного пристрою ковша

Генераторні спроможності маніпулятора характеризуються можливостями гідрокінематики з реалізацією максимальної сили різання. Наприклад, для екскаватора АТЕК-881 (Україна) обмеження сили різання відображено в технічній документації на екскаватор величиною 150кН [3].

На рис. 3 наведені окремі характеристики сил опору різанню в залежності від кута різання для різних значень числа ударів ударника ДорНДІ статичного різання та обмеження сили різання за генераторними спроможностями маніпулятора.

З характеристик (рис. 2, 3) випливає, що екскаватор АТЕК-881 спроможний ефективно працювати в грунтах I – IV категорій не мерзлих ґрунтів [1].

Для ефективного руйнування не мерзлих ґрунтів вище IV категорії та мерзлих ґрунтів з переміщенням зубця ковша в ґрунті на величину  $u$  необхідна енергія зарядки пневмоакумулятора  $L(C, \varphi) = u \cdot R_t(C, \varphi) / k_e$ , де  $k_e$  – коефіцієнт, який враховує втрати енергії в процесі розгону бойка віброударного пристрою на удар.

Для значення  $C=40$  та переміщення  $u=0.001$  м і  $k_e=0,9$  визначена необхідна характеристика енергії зарядки пневмоакумулятора  $L(\varphi)$ , що відповідає процесу ефективного руйнування ґрунту вище IV категорії за числом ударів ударника ДорНДІ (рис.4).

За умови стиснення газу в камері пневмоакумулятора, наприклад, переміщенням поршня пневмоакумулятора з площею торцевої частини  $S_n$ , що зменшує камеру пневмоакумулятора за рахунок переміщення поршня на величину  $x$  та при показнику політропи  $n$ , початковому об'ємі камери пневмоакумулятора  $V_0$ , тиску початкової зарядки пневмоакумулятора  $p_0$ , ступінь стиснення газу  $e(x)$  та енергія зарядки пневмоакумулятора  $L(x)$  визначаються залежностями [4]:

$$e(x) = p(x) / p_0 = \left( \frac{V_0}{V_0 - S_n \cdot x} \right)^n; \tag{3}$$

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

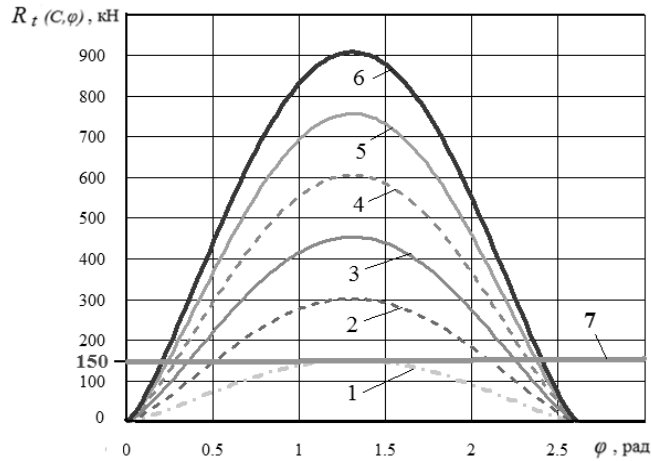


Рисунок 3 – Окремі характеристики залежностей сил опору різанню від кутового переміщення ковша та, для позицій 1...6 від числа ударів ударника ДорНДІ відповідно 20, 40, 60, 80, 100, 120;

7 – обмеження за генераторними спроможностями маніпулятора сили різання в 150 кН

Важливим є забезпечення низького ступеню стиснення газу в пневмоакумуляторі в межах до  $e(x) \leq 2,0$ , що зменшує вплив теплового режиму функціонування на показник політропи  $n$ .

У відповідності до вимог реалізації необхідної енергії зарядки пневмоакумулятора (рис.3) за залежностями (3) встановлені раціональні параметри віброударного пристрою:  $p_0=1,8$  МПа;  $n=1,3$ ;  $V_0=6,77 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>;  $S_n=3,96 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>;  $0 \leq x \leq 0,06$  м та побудовані графіки залежностей (рис. 5) у відповідності до рівнянь (3).

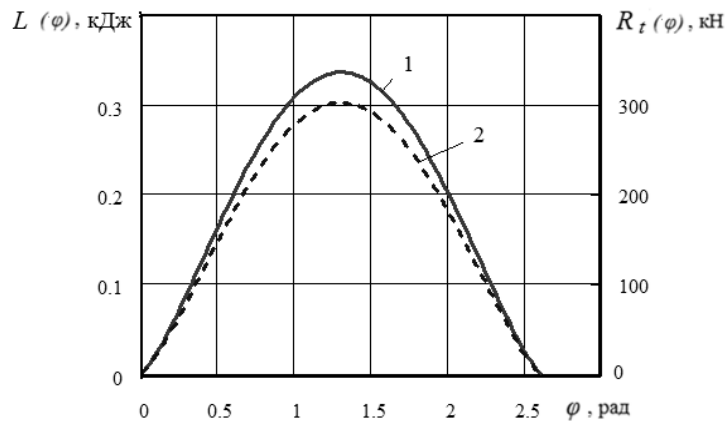


Рисунок 4 – Характеристики залежностей за умов  $S=40$ ;  $u=0,001$  м;  $k_e=0,9$  від кутового переміщення ковша: 1 – енергії зарядки пневмоакумулятора; 2 – сила опору різанню

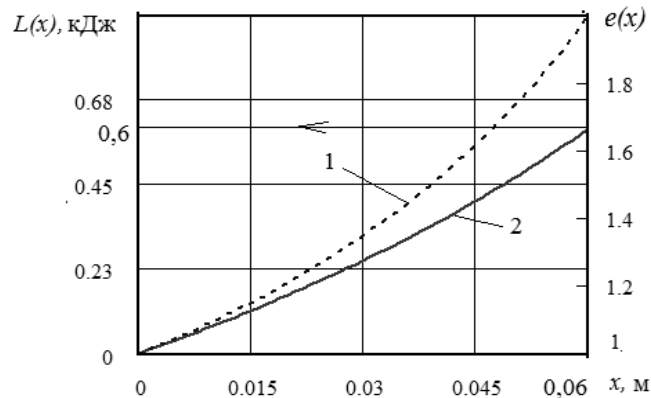


Рисунок 5 – Графіки залежностей від переміщення бойка віброударного пристрою:

1 – ступеню стиснення газу; 2 – енергії зарядки пневмоакумулятора за умов  $p_0=1,8$  МПа;  $n=1,3$ ;  $V_0=6,77 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>;  $S_n=3,96 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>;  $0 \leq x \leq 0,06$  м

Значення ходу  $x=0,06$  м поршня акумулятора та його діаметр  $d=(4 \cdot S_n/\pi)^{0,5}=0,071$  м визначають габаритні розміри віброударного пристрою, а енергія удару, з урахуванням втрат на розгін бойка складає  $E_{y\delta} = L_{max} \cdot k_e = 0,54$  кДж.

При повороті ковша маніпулятора на кут  $\varphi$  (рис.1) з заглибленням в ґрунт та поступовим заповненням ковша, термодинамічні умови для процесу зарядки - розрядки пневмоакумулятора віброударного механізму різні. При цьому реалізується політропічний процес зарядки-розрядки пневмоакумулятора, як основного елемента для розгону бойка, який наносить удари по інструменту, що руйнує ґрунт, а енергоадаптація зарядки пневмоакумулятора здійснюється зменшенням об'єму його камери, наприклад, переміщенням в ній поршня зовнішнім гідроприводом [3] з реалізацією алгоритму який відображений залежністю (1). Для реалізації такого алгоритму автоматичною системою адаптації слід врахувати змінність технологічних умов робочого середовища зміною в рівняннях (3) також і показника політропи  $n$ , який для термодинамічного процесу функціонування віброударного ковша визначається залежністю [5]:

$$n = \frac{\lg p_0 - \lg p_k}{\lg V_k - \lg V_0}, \quad (4)$$

де  $V_k, p_k$  – кінцеві значення тиску в камері пневмоакумулятора при досягненні максимального ходу його поршня.

На рисунках 6 та 7 наведені графіки з урахуванням залежностей (3) відповідно  $e(x,n)$  та  $L(x,n)$ .

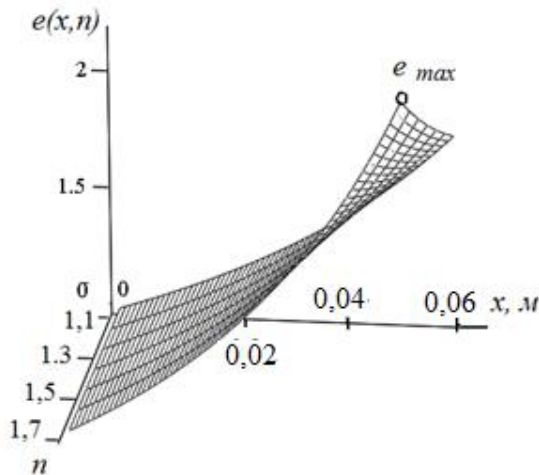


Рисунок 6 – Графік  $e(x,n)$  з урахуванням залежностей (3):  $e_{max}$  – максимальне значення ступеню стиснення газу в пневмоакумуляторі  $e_{max} = e(0,06, 1,7) = 2,46$

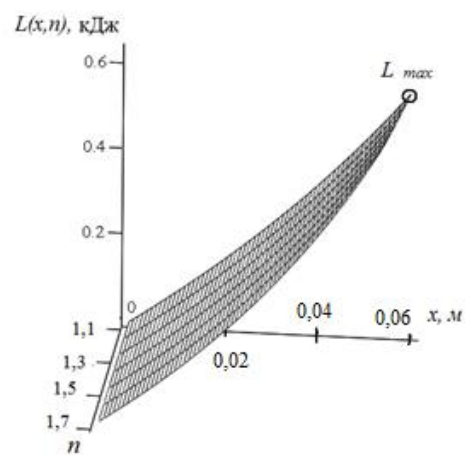


Рисунок 7 – Графік  $L(x,n)$  з урахуванням залежностей (3):  $L_{max}$  – максимальне значення енергії зарядки пневмоакумулятора  $L_{max} = L(0,06, 1,7) = 0,667$  кДж

### Висновки

1. Запропонована залежність для реалізації алгоритму адаптивного керування переходу статичного процесу різання ґрунтів в динамічний, який доцільно реалізувати за допомогою електрогідроприводу з блоком керування та адаптації з забезпеченням оптимального діапазону регулювання енергії удару віброударним пристроєм встановленого на ковші маніпулятора.

2. Встановлені зони статичного та динамічного різання за інтегральною характеристикою робочого середовища – силою опору різанню для ґрунтів за показником ударів ударника ДорНДІ в межах 0...120. Розділення зон статичного та динамічного різання визначаються генераторними можливостями гідрокінематичної системи маніпулятора і для екскаватора АТЕК-881 (Україна) силове обмеження складає 150 кН. З наведених характеристик випливає, що екскаватор АТЕК-881 спроможний ефективно працювати в ґрунтах I – IV категорій не мерзлих ґрунтів.

3. Визначені енергетичні параметри віброударного пристрою для ефективної роботи в ґрунтах вище IV категорії. Так для попереднього руйнування ґрунту з забезпеченням ефективного різання для ґрунту з щільністю 40 за числом ударів ударника ДорНДІ, ступінь стиснення складає 2, а енергія зарядки пневмоакумулятора складає 0,66 кДж, що відповідає енергії удару 0,54 кДж, з урахуванням втрат енергії при розгоні бойка.

4. Врахований вплив термодинамічних параметрів на енергію удару при функціонуванні віброударного пристрою в реальному середовищі через врахування показника політропи процесу стиснення газу в пневмоакумуляторі. Встановлено вплив показника політропи на енергію зарядки з визначенням максимальних значень ступеню стиснення газу та енергії зарядки відповідно 2,46 та 0,667 кДж.

5. Отримані характеристики демонструють широкий діапазон спрацювання віброударного пристрою, що значно підвищує ефективність ковшових машин, і що підтверджує доцільність впровадження віброударного ковша в промислове виробництво України.

#### Список використаної літератури

1. Сліденко В.М. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин/ В. М. Сліденко, С. П. Шевчук, О. В. Замараєва, Л. К. Лістовщик. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 180 с.
2. Зеленин А. Н. Машины для земляных работ. Учебное пособие для вузов/ А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов. М.: «Машиностроение», 1975. 424 с.
3. Екскаватор колісний Атек-881//Послуги спецтехніки. URL: <http://pkbud.com.ua/content/Atek> (дата звернення: 10.11.2022).
4. Сліденко В.М. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом: монографія/В.М. Сліденко, С.П. Шевчук. Київ: НТУУ "КПІ", 2010. 192с.
5. Slidenko V., Marchuk L. 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.

L. Marchuk<sup>1</sup>, Ph.D. student, ORCID0000-0002-2099-4538

V. Polishchuk<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Assis. Prof., ORCID0000-0001-9116-7962

V. Slidenko<sup>1</sup>, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID0000-0003-1799-784X

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

#### ENERGY-SAVING ADAPTATION OF THE VIBRATION-IMPACT BUCKET OF THE MANIPULATOR TO THE VARIABLE CHARACTERISTICS OF THE WORKING ENVIRONMENT

*The paper study of the vibrating bucket of the manipulator as an excavator or tunnelling shield, with energy-saving adaptation to the aspects of the working environment for use in the construction and mining industry. The use of buckets and vibro-impact devices with automated operation allows a reduction of energy consumption for the destruction of rocks and hard soils with adaptation to their properties. The article proposes an algorithm for optimal control of the vibro-impact bucket element - a vibro-impact device using restrictions on the cutting resistance force and impact energy. The range of functioning of the vibro-impact device is determined. The optimal area of switching on the device is established, depending on the variable aspects of the working environment.*

*The integral characteristic, such as the cutting resistance force of the soil, were used. It finds that this characteristic depends on the angle of rotation of the manipulator's bucket and the soil density's attribute by the number of impacts of the DorNDI impactor. The influence of thermodynamic parameters on the impact energy during the functioning of the vibration impact device in a real environment is observed by considering the polytope index of the gas compression process in the pneumatic accumulator.*

*The work establishes the critical level of the force of static cutting of soils by an excavator of the IV size group for Ukrainian production and the criterion for the transition of the cutting process from static to dynamic mode depending on the variable characteristics of the working environment. The energy characteristics of the adaptive vibration-impact bucket of the manipulator are given. Introducing the vibro-impact bucket into the industrial production of Ukraine is recommended.*

**Key words:** *adaptation, manipulator, optimization, cutting force, vibrating impact device, pneumatic accumulator, impact energy.*

#### References

1. Adaptive functioning of impulse executive bodies of mining machines / V. M. Slidenko, S. P. Shevchuk, O. V. Zamaraeva, L. K. Listovshchik. K.: NTUU "KPI", 2013. 180 p.
2. Zelenin A. N. Machines for earthworks. Textbook for universities / A. N. Zelenin, V. I. Balovnev, I.P. Kerov. M.: "Engineering", 1975. 424 p.
3. Excavator Atek-881//Services of special equipment. URL: <http://pkbud.com.ua/content/Atek> (access date: 11/10/2022).
4. Slidenko V. Stabilization of the operation of a mining machine with an impulse executive body: monograph/V.M. Slidenko, S.P. Shevchuk. Kyiv: NTUU "KPI", 2010. 192p.
5. Slidenko V., Marchuk L. 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.

Надійшла 26.11.2022

Received 26.11.2022