

В.М. Сліденко, доктор техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-9313-331X
С.П. Шевчук, доктор техн. наук, професор, ORCID 0000-0002-7517-0501
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНА АДАПТИВНА ГІДРОІМПУЛЬСНА СИСТЕМА

Наведено результати досліджень функціонування електрогідравлічної адаптивної гідроімпульсної системи з визначенням оптимального діапазону енергії зарядки гідропневмоакумулятора. На основі ряду Тейлора синтезовано диференціально-різницеви перетворення та сформовано і реалізовано на ЕОМ ітераційний цикл для розрахунку руху бойка гідромолота, який характеризується залежностями, що відображають динамічні процеси у відповідності до циклограми функціонування гідромолота. Встановлений діапазон регулювання енергії зарядки в залежності від ходу спряжених бойка і клапана в межах 1,7...3,05 кДж; та об'єму камери пневмоакумулятора 2,6...3,05 кДж. Максимальні значення діапазонів регулювання, відповідно: 1,35 кДж та 0,45 кДж. Для визначення параметрів керування процесом адаптації експериментально, в межах промислових випробувань варіанту гідроімпульсної системи впливу на колектор нафтової свердловини, встановлено, що стабілізація коливань від імпульсної дії, в залежності від умов робочого середовища, досягається за час 10-15 с. Розроблена електрогідравлічна адаптивна гідроімпульсна система рекомендується до впровадження у виробництво.

Ключові слова: адаптація, електрогідравлічна система, ряд Тейлора, пневмоакумулятор, гідроімпульсна система, діапазон регулювання.

Вступ. Підвищення продуктивності електромеханічних комплексів, збільшення надійності й довговічності їхніх вузлів, зниження енерговитрат, необхідних для руйнування породи, досягається в основному за рахунок збільшення потужності машин та підвищення ефективності їх виконавчих органів. Значним фактором підвищення потужності є застосування комплексів з електрогідравлічним приводом та імпульсним виконавчим органом, які застосовуються в різноманітних галузях промисловості України: гірничій, будівельній, нафтогазовій та інших. Одним із напрямків розробки нових та вдосконалення існуючих імпульсних виконавчих органів для руйнування гірських порід, вугілля та мерзлих ґрунтів є технології із застосуванням комплексів з електрогідроприводом та виконавчих органів імпульсної дії на робоче середовище. Ефективність таких комплексів досягається поєднанням конструктивних, енергетичних і технологічних параметрів адаптивного електрогідроприводу та імпульсних виконавчих органів з забезпеченням їх функціонування як єдиної гідроімпульсної системи (ГІС) [1-3].

Аналіз результатів промислового застосування показує, що ГІС досить ефективно забезпечують руйнування гірських порід та знеміцнення колекторів нафтових свердловин різної міцності. Важливим фактором, що впливає на ефективність використання ГІС, є ефективність формування ударного імпульсу та передачі енергії одиничного удару в гірський масив. Проблема розподілу енергії в циклі роботи ГІС пов'язана з умовами та засобами керування процесом руйнування гірських порід та адаптації до умов робочого середовища.

Основним виконавчим елементом ГІС є машина ударної дії – гідромолот. Аналіз сучасних систем енергозбереження та адаптації машин ударної дії до умов робочого середовища виявляє, що більшість фірм-виробників ГІС прагнуть вирішити проблему адаптації елементів ГІС з метою енергозбереження та підвищення коефіцієнта корисної дії гідромолотів. Основні фірми, які застосовують засоби та системи адаптації: “Krupp” (Німеччина), “Atlas Copco” (Швеція), “Komatsu” (Японія), “Caterpillar” (США) та інші, розробили системи, які в сукупності спроможні адаптувати гідромолот до робочого середовища.

Так система адаптації *AutoControl* гідромолотів фірми “Krupp” – автоматична система керування частотою й енергією удару залежно від конкретних умов роботи. Система *AutoControl* при кожному ударі “оцінює” твердість породи й перемикає спеціальний гідравлічний клапан між режимами максимальної енергії удару при повному ході поршня (при руйнуванні твердої породи) і максимальної частоти удару при короткому ході (при руйнуванні крихкої породи) [1; 2]. Недоліком зазначеної системи є дискретність регулювання між режимами максимальної енергії удару і, відповідно, не врахування поточних випадкових значень міцності гірських порід, а також відокремленість системи від гідроприводу базової машини в цілому.

Мета та завдання. Метою роботи є вдосконалення структури гідравлічної імпульсної системи (ГІС) з електрогідприводом та оцінка ефективності застосування модулів адаптації до умов робочого середовища при руйнуванні гірського масиву та знеміцнення нафтового колектору.

Для досягнення мети слід встановити принципову можливість адаптивного керування енергією удару в залежності від умов робочого середовища, визначити структуру механізму адаптації та раціональні діапазони розподілу тисків зарядки пневмоакумулятора.

Матеріал і результати досліджень.

В КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблена електрогідравлічна система приводу гідромолота з модулями адаптації до умов робочого середовища (руйнування гірських порід (рис.1) та ГІС для знеміцнення колектору гірського масиву при проведенні капітального ремонту нафтових свердловин) [4; 5].

Величина вкорінення інструменту u_1 залежить від міцності гірської породи. При зменшенні

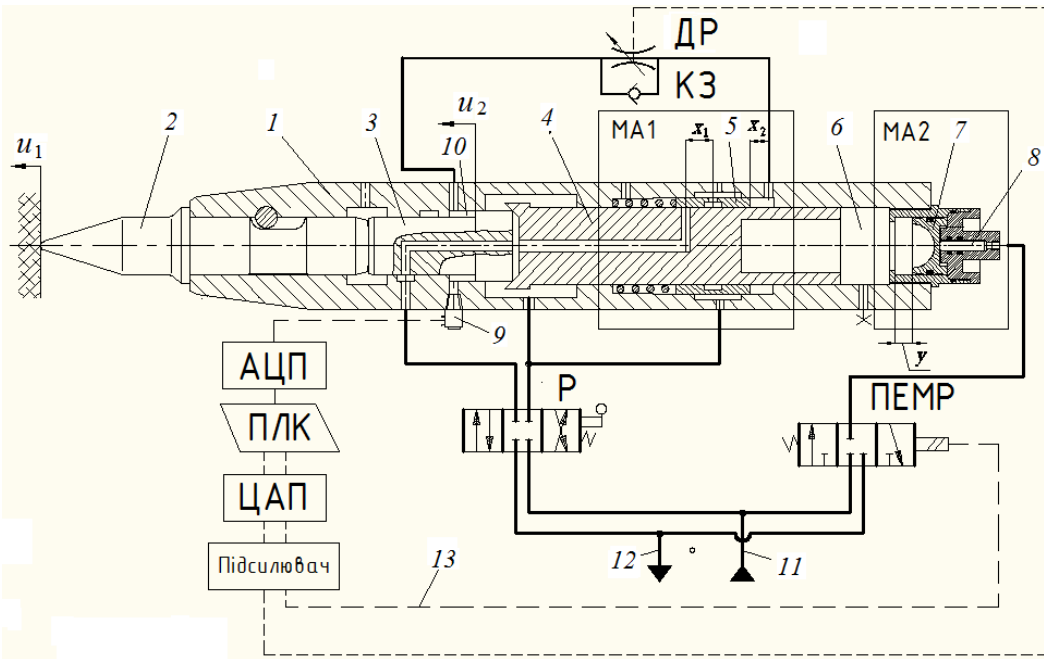


Рис. 1. Електрогідравлічна адаптивна гідроімпульсна система: 1 - корпус, 2- інструмент, 3- бойок, 4- клапан, 5 - втулка, 6- камера акумулятора, 7- поршень блоку адаптації, 8 - шток, 9 - датчик тиску, 10 - камера демфера, 11 – лінія нагнітання, 12 – лінія зливу, 13 – електролінії; ДР – дросель регульований, КЗ – клапан запобіжний, Р – розподілювач, ПЕМР – пілотний електромагнітний розподілювач, АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, ПЛК – програмований логічний контролер, ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач, МА1, МА2 – модулі адаптації

міцності, величина u_1 збільшується і відповідно збільшуються робочий хід x_1 бойка та 3 його швидкість в камері демфера 10 з наступною дією частини імпульсу на корпус 1 (рис1).

Це призводить до надмірних енергетичних втрат і динамічного навантаження на корпус і, відповідно, привод.

При збільшенні передударної швидкості в камері демфірування підвищується тиск, який реєструється датчиком тиску. Інформація передається на ПЛК, обробляється, генерується керуючий сигнал і передається на регульований дросель ДР (МА1) та пілотний електромагнітний клапан ПЕМК (МА2). Регульований дросель дозовано пропускає рідину під торець підпружиненого клапана, регулюючи величину ходу зведення спряжених бойка і клапана, впливаючи на величину зарядки пневмоакумулятора 6. В свою чергу ПЕМК перемикає потік з-під торця штока 8 модулю адаптації МА2 на злив. В результаті, поршень під дією газу в акумуляторі переміщується, що призводить до збільшення об'єму камери акумулятора і, відповідно, до зменшення ступеню стиснення в ньому газу, а отже і енергії зарядки акумулятора. Встановлена залежність енергії зарядки пневмоакумулятора від переміщення спряжених бойка і клапана [1], яка залежить від положення втулки 5 і відповідно $x = x_1 + x_2$, а також від положення поршня 7, відповідно у:

$$L(x, y) = \frac{p_{a0} V_{a0}}{n-1} \left(e(x, y)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right), \quad (1)$$

де p_{a0}, V_{a0} - відповідно початкові тиск зарядки та об'єм акумулятора, n - показник політропи, $e(x, y)$ - ступінь стиснення газу в акумуляторі,

$$e(x, y) = p_a(x, y) / p_{a0}, \quad (2)$$

$$p_a(x, y) = p_{a0} \cdot \left(\frac{V_{a0} + S_n \cdot y}{V_{a0} - S_{um} \cdot x + S_n \cdot y} \right)^n, \quad (3)$$

$p_a(x, y)$ – поточне значення тиску в акумуляторі, S_{um}, S_n – площі торців відповідно клапана 4 та поршня 7.

На основі ряду Тейлора синтезовано диференціально-різницеви перетворення та сформовано і реалізовано на ЕОМ (С++) ітераційний цикл для розрахунку руху бойка гідромолота, який характеризується залежностями:

$$x_{i+1} = x_i + dx_{i+1}; \quad (4)$$

$$dx_{i+1} = v_i dt + (4a_i - a_{i-1}) dt^2 / 6; \quad (5)$$

$$t_{i+1} = t_i + dt, \quad (6)$$

де x, dx, v, a, dt – відповідно переміщення, крок переміщення, швидкість та прискорення бойка за час t з кроком dt . З урахуванням залежностей (1 – 6) сформовано обчислювальний ітераційний процес, в якому послідовно реалізуються рекурентні залежності за початковими умовами відповідно для швидкості, прискорення та часу: $v_0 = 0; a_{-1} = 0; t_0 = 0$. На кожній ітерації формуються нові початкові значення за кінцевими значеннями попередньої. В процесі обчислень на ЕОМ передбачено в автоматизованому режимі виведення діагностичних повідомлень в діалоговому режимі.

Моделюванням визначені основні параметри процесу зведення та розгону бойка в залежності від величини робочого ходу бойка. Встановлені раціональні параметри ГПС з гідромолота типу ГПМ виробництв заводів “Атек” та “Борекс” (Україна). Для ГПС з гідромолотом ГПМ 300А вхідні параметри: $V_{a0} = 0,0169 \text{ м}^3; S_n = 0,0227 \text{ м}^2; S_{um} = 0,0272 \text{ м}^2; p_{a0} = 1,0 \text{ Мпа}; n = 1,3$. Моделювання процесу зарядки пневмоакумулятора за встановленими залежностями для значень $0 \leq x \leq 0,1 \text{ м}; 0 \leq y \leq 0,082 \text{ м}$ визначені характеристики (рис. 2) та визначені діапазони регулювання енергії удару модулями адаптації М1 та М2 відповідно $1,7 \leq \Delta L_1 \leq 3,05 \text{ кДж}; 2,6 \leq \Delta L_2 \leq 3,05 \text{ кДж}$. Максимальні значення $\Delta L_{1\text{max}} = 1,35 \text{ кДж}; \Delta L_{2\text{max}} = 0,45 \text{ кДж}$.

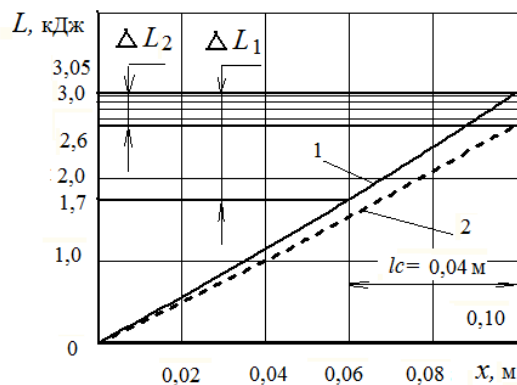


Рис.2. Характеристики зарядки пневмоакумулятора: 1 – без врахування впливу МА2 ($y=0$); з урахуванням впливу МА 2 ($y_{\text{max}} = 0,082 \text{ м}$) та діапазони регулювання $\Delta L_1, \Delta L_2$

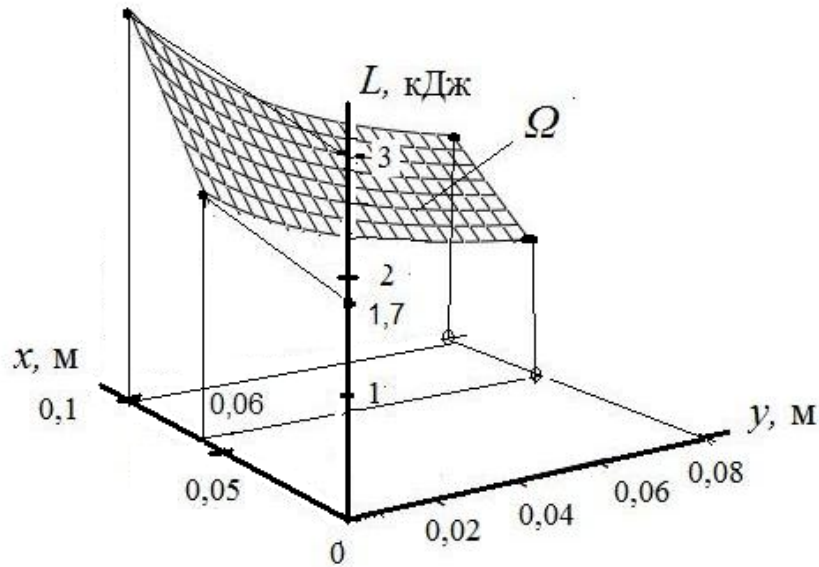


Рис.3. Формування поверхні Ω можливих оптимальних значень енергії удару ГІС для гідромолота ГПМ-300А

Настроювання адаптивної електрогідравлічної системи передбачає попереднє дослідження відгуку робочого середовища на одиночний імпульс з метою ідентифікації його параметрів, аналізу амплітудно-частотних характеристик та програмування параметрів генерації імпульсно-хвильових процесів ГІС.

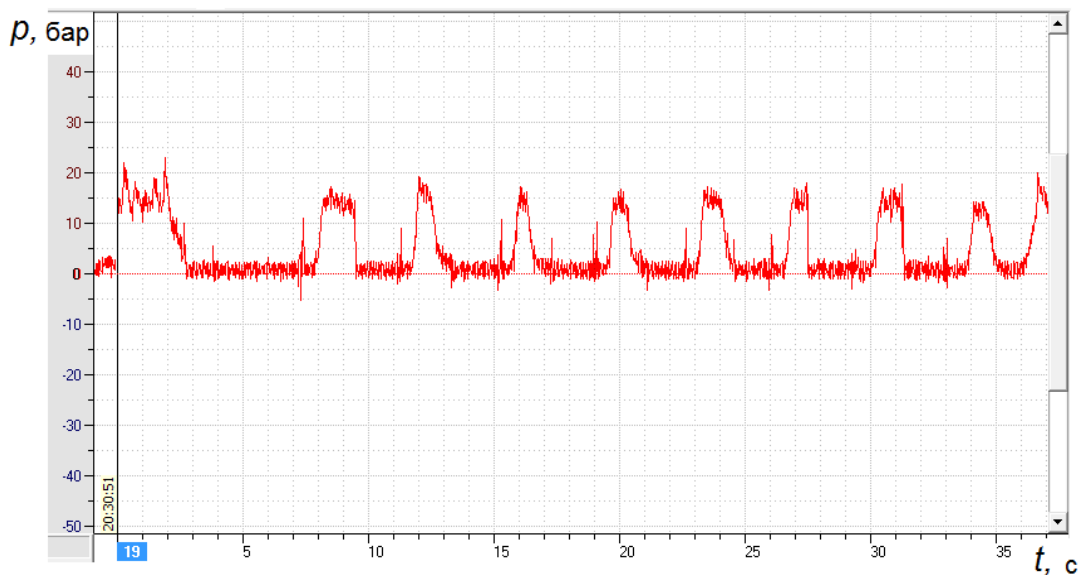


Рис. 4. Осцилограма процесу реакції робочого середовища - пластової системи на імпульсне навантаження

Отже, вплив модуля адаптації М1 з регулюванням ходу зведення ефективніший за вплив регулюванням об'єму камери пневмоакумулятора майже в 3 рази. Комбінуванням взаємодії модулів М2 та М1 можливо досягнення оптимального регулювання. При цьому алгоритм керування ГІС за допомогою електрогідропривода з ПЛК повинен забезпечити максимальний діапазон регулювання енергії удару:

$$L_{onm}(t) = \arg \max_{u \in Q} \tilde{Q}[L/I(t)], \quad (7)$$

де Q - задана область допустимих сигналів датчиків системи керування енергією ударів за співвідношенням величини вкорінення u_1 інструменту в гірський масив та значенням енергії удару; $I(t)$ - наявна в поточний момент часу апостеріорна інформація про характер зміни тиску в камері демпфера (за допомогою датчика тиску) в процесі руйнування гірського масиву в проміжку часу (t_0, t) ; $\tilde{Q}[L/I(t)]$ - прогноз (оцінка) в момент t значення параметрів, з виробленням сигналів ПЛК для керування модулями МА1 та МА2 (рис.1). Поверхня Ω можливих оптимальних значень енергії зарядки, яка відповідає необхідній енергії удару за умови адаптації до міцності робочого середовища, з урахуванням залежностей (1-6) та критерію (7) наведена на рис.3.

Експериментальними дослідженнями, в межах промислових випробувань варіанту ГІС для підвищення дебіту нафтової свердловини з генерацією пробного одиночного імпульсу та з наступним затуханням відбитої хвилі від вибою свердловини, встановлено, що стабілізація коливань від імпульсної дії, в залежності від технологічних умов робочого середовища досягаються за час в межах 10-15 с (рис. 4) [6].

Проведена промислова апробація елементів адаптивної електрогідравлічної системи за умов сервісних компаній "Азгард" (Україна), "УкрКарпатОйл ЛТД" (Україна, США), "Plato" (Індонезія, технологія "Pulse Jet") та "Ренфорс", (Росія) на протязі 2001 – 2013 років підтверджує ефективність системи для свердловин глибиною до 3500 м з проникливістю колекторів не менше 10 мД, густиною флюїдів 600...900 кг/м³, в'язкістю 1...5 мПа. В результаті обробки добувних малодебітних нафтових свердловин, дією ГІС безпосередньо з поверхні, на протязі восьми годин досягалось підвищення продуктивності видобутку на 20...30% [7].

Висновки та рекомендації для подальших досліджень.

Розроблена електрогідравлічна система з модулями адаптації до умов робочого середовища для руйнування гірських порід та ГІС для знеміцнення колектору гірського масиву при проведенні капітального ремонту нафтових свердловин та встановлені їх імпульсні та енергетичні характеристики.

Для адаптивної ГІС з гідромолотом синтезована диференціально-різницева модель функціонування двох модулів адаптації з електрогідроприводом та виявлена необхідність в комплексному керуванні адаптацією за допомогою ПЛК з урахуванням швидкоплинних процесів при роботі основного елемента ГІС – гідромолота.

Моделюванням встановлений діапазон регулювання енергією зарядки від ходу спряжених бойка і клапана в межах 1,7...3,05 кДж; та об'єму камери пневмоакумулятора 2,6...3,05 кДж. Максимальні значення діапазонів регулювання, відповідно: 1,35 кДж та 0,45 кДж.

В межах промислової апробації варіанту електрогідравлічної гідроімпульсної системи для безпосередньої дії з поверхні на пластову систему нафтової свердловини проведено дослідження та встановлений час стабілізації коливань в межах 10-15 с, що важливо для визначення параметрів керування процесом адаптації. В результаті обробки добувних малодебітних нафтових свердловин, дією ГІС безпосередньо з поверхні, на протязі восьми годин досягалось підвищення продуктивності видобутку на 20...30% .

Список використаної літератури

1. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом: монографія/ В.М. Сліденко, С.П. Шевчук. - К.: НТУУ "КПІ", 2010. - 192 с.
2. Сліденко В.М., Шевчук С.П., Замараєва О.В. Лістовщик Л.К. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин: монографія. -К.: НТУУ "КПІ", 2013. -180 с.
3. Сліденко В.М. Математичне моделювання ударно-хвильових процесів гідроімпульсних систем гірничих машин: монографія / В.М. Сліденко, О. М. Сліденко – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2017. – 220 с.
4. Шевчук С.П., Сліденко В.М., Лістовщик Л.К. Пристрій для розробки міцного ґрунта або гірських порід. Деклараційний патент на корисну модель. № 13788 . Бюл. № 4, 17.04. 2006 р.
5. Патент 87080 Україна, МПК (2014.01), Е21В 28/00, В06В 1/20. Гідроударний пристрій/ Сліденко В.М., Шевчук С. П., Горна І. А., Калюш М. П.; заявник і власник патенту Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». - № u 201203640; заявл. 26.03.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18.
6. Сліденко В.М., Лістовщик Л.К., Бут В.О. Адаптивна мехатронна система імпульсно-хвильової дії на гірський масив //Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (м. Кременчук 12–13 квітня 2018 р.) Кременчук, КрНУ, 2018. С. 27-28.

7. Кононенко П.И., Слиденко В.М., Скачедуб А.А., Квитчук К.К. Результаты промышленных испытаний технологии инфрочастотно- волнового (ИЧВ) воздействия на пласт// Самара: Интервал. -2008.-№6. –С.56-57

V. Slidenko, Doctor of Techn Sciences. Associate Professor, **ORCID** 0000-0001-9313-331X
S. Shevchuk, Doctor of Techn Sciences, Professor, **ORCID** 0000-0002-7517-0501
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ELECTROHYDRAULIC ADAPTIVE HYDROPULSE SYSTEM

The results of researches of functioning of electrohydraulic adaptive hydropulse system with definition of optimum range of energy of charging of the hydropneumatic accumulator are resulted. Based on the Taylor series, differential-difference transformations were synthesized and an iterative cycle was calculated and implemented on a computer to calculate the motion of a hydraulic hammer, which is characterized by dependences that reflect dynamic processes in accordance with the hydrohammer operation cycle. The range of regulation of energy of charging depending on the course of the conjugated boi-ka and the valve within 1,7 ... 3,05 kJ is established; and the volume of the pneumatic accumulator chamber is 2.6 ... 3.05 kJ. Maximum values of control ranges, respectively: 1.35 kJ and 0.45 kJ. To determine the control parameters of the adaptation process experimentally, within the industrial tests of the variant of the hydropulse system of impact on the oil well collector, it was found that the stabilization of oscillations from the pulse action, depending on the working environment, is achieved in 10-15 s. The developed electrohydraulic adaptive hydropulse system is recommended for introduction into production.

Keywords: adaptation, electrohydraulic system, Taylor series, iteration, pneumatic accumulator, hydropulse system, control range.

REFERENCES

1. Stabilizatsiia funktsionuvannia hirnychoi mashyny z impulsnym vykonavchym orhanom: mo-nohrafiia/ V.M. Slidenko, S.P. Shevchuk. - K.: NTUU "KPI", 2010. - 192 s.
2. Slidenko V.M., Shevchuk S.P., Zamaraieva O.V. Listovshchik L.K. Adaptivne funktsionuvannia impulsnykh vykonavchykh orhaniv hirnychykh mashyn: monohrafiia.-K.: NTUU "KPI", 2013.-180 s.
3. Slidenko V.M. Matematychni modeliuvannia udarno-khvylovykh protsesiv hidroimpulsnykh system hirnychykh mashyn: monohrafiia / V.M. Slidenko, O. M. Slidenko – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo "Politekhnik", 2017. – 220 s.
4. Shevchuk S.P., Slidenko V.M., Listovshchik L.K. Prystirii dlia rozrobky mitsnoho hrunta abo hirskykh porid. Deklaratsiinyi patent na korysnu model. № 13788 . Biul. № 4, 17.04. 2006 r.
5. Patent 87080 Ukraina, MPK (2014.01), E21V 28/00, V06V 1/20. Hidroudarnyi prystrii/ Slidenko V.M., Shevchuk S. P., Horna I. A., Kaliush M. P.; zaiavnyk i vlasnyk patentu Natsiona-lnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut». - № u 201203640; zaiavl. 26.03.2012; opubl. 25.09.2012, Biul. №18.
6. Slidenko V.M., Listovshchik L.K., But V.O. Adaptivna mekhatronna systema impulsno-khvylovoi dii na hirskyi masyv //Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy. Metody modeliuvannia ta optymizatsii. Zbirnyk naukovykh prats KhVI Mizhnarodnoi nauko-tekhnichnoi konfere-ntsii molodykh uchenykh i spetsialistiv (m. Kremenchuk 12–13 kvitnia 2018 r.) Kremenchuk, KrNU, 2018. C. 27-28.
7. Kononenko P.I., Slidenko V.M., Skachedub A.A., Kvitchuk K.K. Rezultaty promyishlennykh is-pyitaniy tehnologi infrochastotno- volnovogo (ICHV) vozdeystviya na plast// Samara: Interval. -2008.-#6. –S.56-57

Надійшла 15.11.2020
Received 15.11.2020