



УДК 621.9.0255

**METHOD OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF CUTTING HIGHLY
ABRASIVE MATERIALS WITH ABRASIVE REINFORCED CIRCLES
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РІЗАННЯ
ВИСОКОАБРАЗИВНИХ МАТЕРІАЛІВ АБРАЗИВНИМИ АРМОВАНИМИ КРУГАМИ**

Rochka K.I. / Почка К.І.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-0355-002X

Abrashkevych Yu.D. / Абрашкевич Ю.Д.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-8396-7812

Prystailo M.O. / Пристайло М.О.*s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0003-3151-4680

Polishchuk A.G. / Поліщук А.Г.

ORCID: 0000-0003-4808-9932

*Kyiv National University of Construction and Architecture,**Kyiv, Povitroflotsky Avenue, 31, 03037**Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,**Київ, пр. Повітрофлотський, 31, 03037*

Анотація. В роботі розглядається оцінка взаємодії високоабразивних матеріалів з абразивним армованим кругом, яка здійснювалась за основою однофакторного експерименту завдяки застосуванню високотехнологічного вимірювально-реєструючого обладнання, що дозволило швидко з першочергових даних отримувати точні результати. Обробка осцилограм полягала у визначенні середньомаксимальної ординати сили різання P та знаходження її середнього значення. Завдяки застосуванню запроєктованим та розробленим високоточній системі керування подачі робочого органу та високотехнологічному вимірювально-реєструючому обладнанню, яке дозволяє швидко і без повторювань з першочергових даних отримувати достатньо точні оцінки взаємодії високоабразивних матеріалів з абразивним армованим кругом та дало можливість обробляти їх за допомогою сучасного програмного забезпечення, що позбавило від трудомісткого процесу обробки даних. Це, в свою чергу, дало можливість мінімізувати число вимірів сили різання при заданій точності і надійності результатів дослідів з вірогідністю отриманих даних від 0,90 до 0,95.

Ключові слова: експериментальні дослідження, високоабразивні матеріали, абразивний армований круг, вимірювально-реєструюче обладнання, ймовірність виконання нерівності.

Вступ. При проведенні експериментальних досліджень досить часто використовується фізичне моделювання, що дозволяє перевірити відповідність складеної математичної моделі чи дослідити складні явища при неможливості побудови математичної моделі.

Оцінка взаємодії високоабразивних матеріалів з абразивним армованим кругом здійснювалась за основою однофакторного експерименту завдяки застосуванню високотехнологічного вимірювально-реєструючого обладнання, що дозволило швидко з першочергових даних отримувати точні результати.

Основний текст. Обробка осцилограм полягала у визначенні середньомаксимальної ординати сили різання P та знаходження її середнього значення.



Необхідне число повторень дослідів для визначення однофакторної залежності визначалося з рівняння [1]:

$$P^* \left\{ \left| \Delta_x \right| \leq \frac{z}{\sqrt{n}} W_x \right\} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1)$$

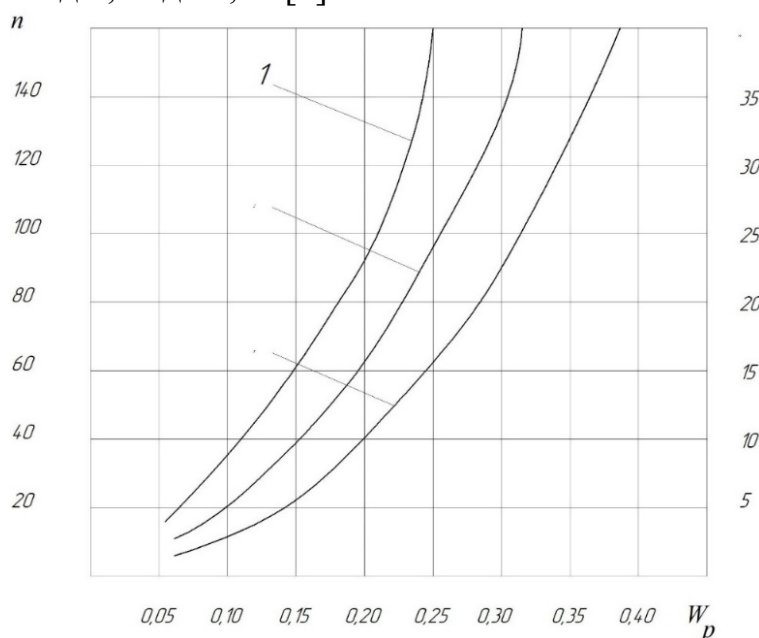
де P^* – ймовірність виконання нерівності у фігурних дужках; Δ_x – відношення відхилення емпіричного середнього значення випадкової величини x від його істинного середнього значення; n – число вимірів величини x ; W_x – коефіцієнт варіації величини x ; z – верхня межа інтегралу ймовірності, що характеризує ймовірність влучення середнього значення в заданий довірчий інтервал.

З виразу (1) визначаємо необхідне число вимірів сили різання при кожному сполученні умов дослідів

$$n \geq \frac{z^2 W_x^2}{\Delta_x^2} \quad (2)$$

де величина z визначається по таблицях інтеграла ймовірності відповідно до заданої ймовірності P^* .

На рисунку 1 наведено графіки залежності $n(W_p)$ при різних значеннях Δ_x та P^* . Наприклад, при відносному відхиленні $\Delta_x=0,1$ та ймовірності $P^*=0,95$ необхідне число вимірювань сили різання для значень коефіцієнта варіації в межах 0,2 - 0,3 повинно бути 15-35. Повторність дослідів знаходилась в інтервалі від 3 до 5 (при числі вимірів у кожному досліді від 200 до 500), що при коефіцієнті варіації дослідних величин від 0,2 до 0,3 відповідає вірогідності отриманих даних від 0,90 до 0,95 [1].



Задана точність $\Delta_x = 0,05$ або $\Delta_x = 0,1$

**Рисунок 1 – Графік для визначення необхідного числа вимірів сили різання при заданій точності і надійності результатів досліду:
1 – $P^*=0,99$; 2 – $P^*=0,95$ 3 – $P^*=0,9$**

Джерело: [1]



Динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА [2] доопрацьовано для дослідження фізичної моделі процесу різання високоабразивних матеріалів абразивним армованим кругом (рисунок 2).



Рисунок 2 – Динамометричний візок

Авторська розробка

На бокових поверхнях тензобалки 1 наклеєні тензодатчики Д1-Д4, що реєструють дотичну силу P , яка діє на абразивний армований круг. На горизонтальній тензобалці 2 – тензодатчики Д5-Д8, що реєструють нормальну силу N , яка діє під час різання вогнетривкої цегли на абразивний армований круг (рисунок 3).

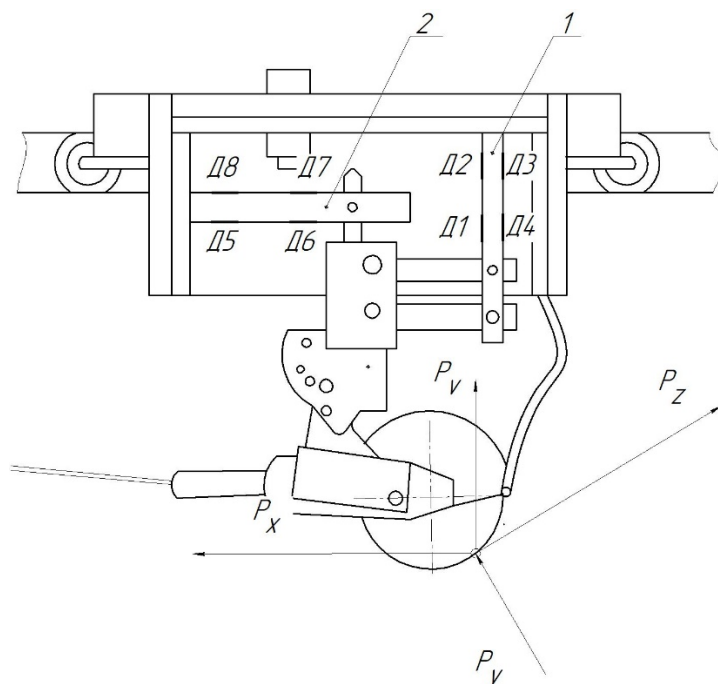


Рисунок 3 – Схема розташування тензодатчиків на динамометричному візку

Джерело: [2]



Групи тензодатчиків включено в електричні мостові схеми, що показані на рисунку 4. Сила різання через конструкцію абразивного армованого круга передається тензодатчикам деформації яких трансформуються в зміну опору вимірювальних елементів, так у всіх мостових схемах з'являється розбаланс.

В основу методів вимірювання датчиками опору покладений тензометричний ефект – зміна електричного (тобто омичного) опору металевого дроту датчика при його пружній деформації [3].

Датчики наклеєні на поверхню тензометричної балки, що деформується, полімерним клеєм по спеціальній технології. При проходженні через датчики електричного струму в результаті деформації тензометричної балки змінюється опір датчиків. В результаті зміниться напруга в електричному ланцюзі. Оскільки деформація пропорційна силам, які її викликають, то їм буде пропорційна зміна напруги струму в електричному колі.

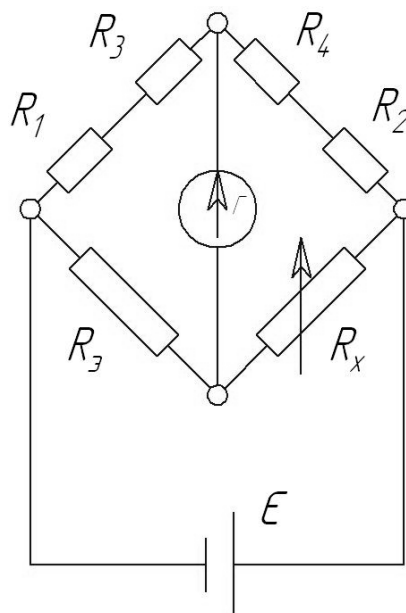


Рисунок 4 – Схема з'єднання тензометричних датчиків у вимірювальні мости

Джерело: [3]

Датчики з'єднуються в мостову схему. В даному випадку на кожен тензометричну балочку (рисунок 3) наклеєно по чотири датчики, які одночасно виконують функції робочих та компенсаційних датчиків. Таке підключення датчиків дозволяє реєструвати тільки різницю напруги на базовій ділянці балочки l_i , замкненій між датчиками.

Станові балансу тензометричних схем (рисунок 4) вимірювання дотичної та нормальної складової сил, що діють на абразивний армований круг та відповідають рівності

$$(R_1 + R_3)R_x = (R_2 + R_4)R_5; \quad (3)$$

$$(R_5 + R_7)R_x = (R_6 + R_8)R_9; \quad (4)$$

де $R_{1...8}$ – опір тензодатчиків (плечі моста опору); R_5 – еталонний опір; R_x – вимірювальний опір.



В комплект вимірювальної апаратури (рисунок 5) входить: блок живлення 1; кабель живлення 2; модуль АЦП (аналого-цифровий перетворювач); шестиканальний підсилювач та мікроконтролерний блок керування 3; кабель передачі сигналу (інтерфейс SCI – Serial Communication Interface) 4; та персональний комп'ютер (надалі ПК) 5.

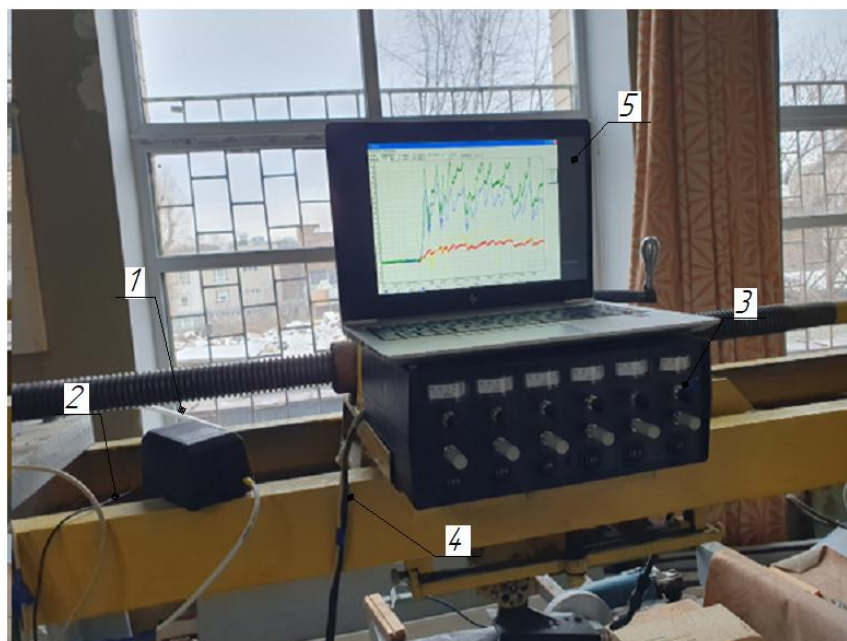


Рисунок 5 – Комплект вимірювальної апаратури

Авторська розробка

Сигнал розбалансу моста з включенням тензодатчиків підсилюється за допомогою інструментальних операційних підсилювачів (рисунок 6), увімкнених за схемою диференціального підсилювача (рисунок 7) з погашенням синфазних перешкод.

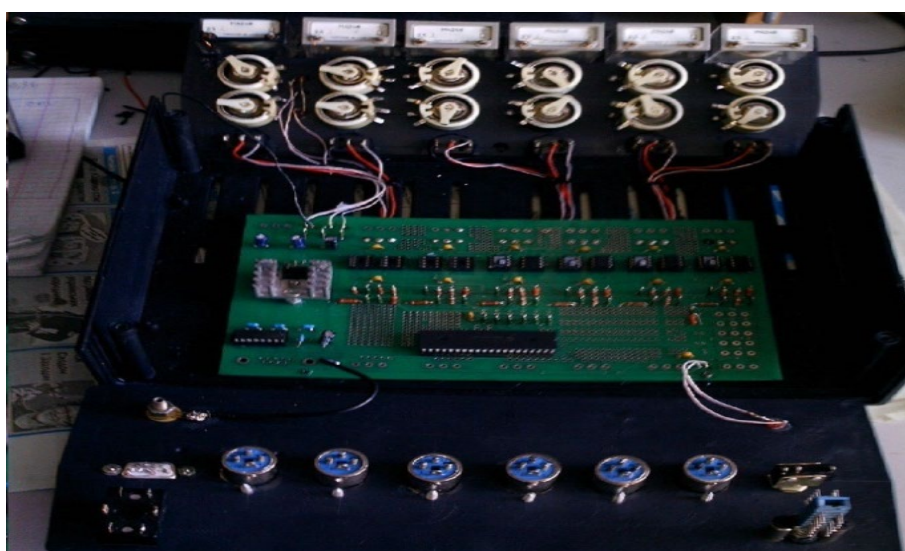


Рисунок 6 – АЦП з блоком підсилювачів

Джерело: [3]

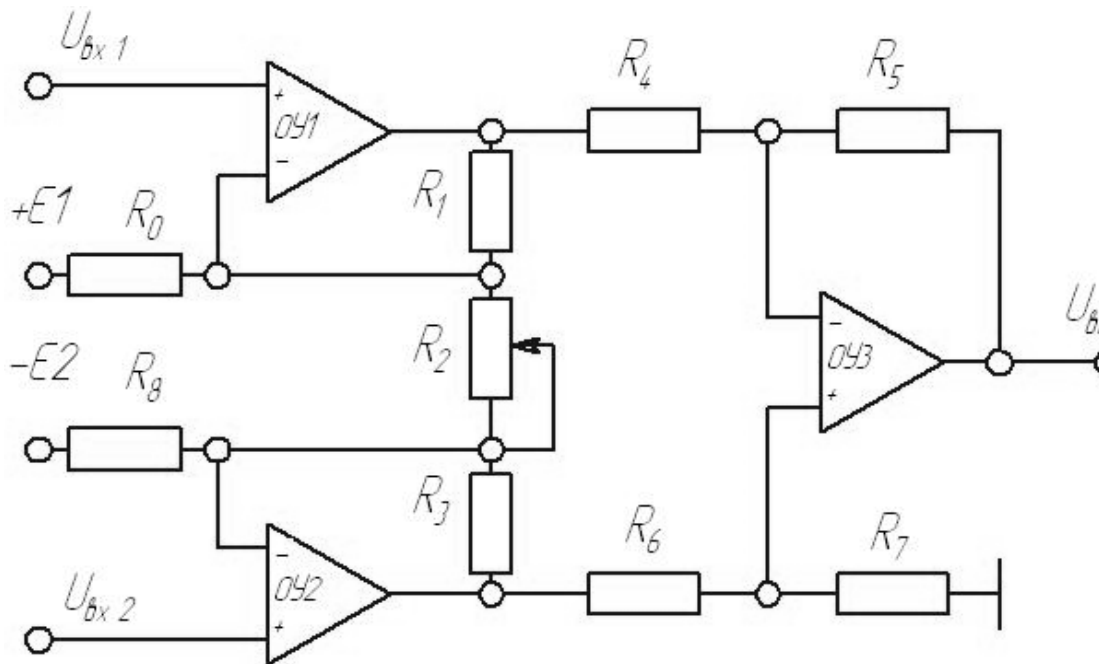


Рисунок 7 – Схема диференціального підсилювача

Джерело: [3]

Завдяки цьому вдається підсилити дуже малий рівень електричних коливань з уникненням зростання паразитних шумів та прямою передаточною характеристикою. Також, завдяки включенню за такою схемою, вдається уникнути дрейфу нуля, який притаманний звичайним схемам операційних підсилювачів.

За умови $R_4 R_7 = R_5 R_6$ передаточну функцію можна представити у вигляді:

$$U_{вих} = \frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3}{R_2} \right) (U_{вх2} - U_{вх1}). \tag{5}$$

Відмінною особливістю розглянутої схеми є повна незалежність регулювання коефіцієнта підсилення від виконання умови.

В якості операційних підсилювачів використані сучасні інструментальні підсилювачі виробництва Analog Devices.

Підсилений сигнал подається на модуль АЦП для подальшої обробки. Прилад працює в двох режимах з коефіцієнтом підсилення сигналу 1 та 2.

В якості АЦП використаний 10-ти розрядний модуль, який входить до складу мікроконтролера сімейства PIC (Peripheral Interface Controller) (рисунок 8).

Час перетворення АЦП для запропонованого контролера визначається за формулою:

$$T_{AD} = N \cdot T'_{AD} + (11 - n)(2T_{OSC}), \tag{6}$$

де T'_{AD} – час аналого-цифрового перетворення на один біт (рекомендовано $1,6 \cdot 10^{-6}$); n – кількість розрядів АЦП; T_{OSC} – тривалість одного такту синхронізуючих імпульсів.

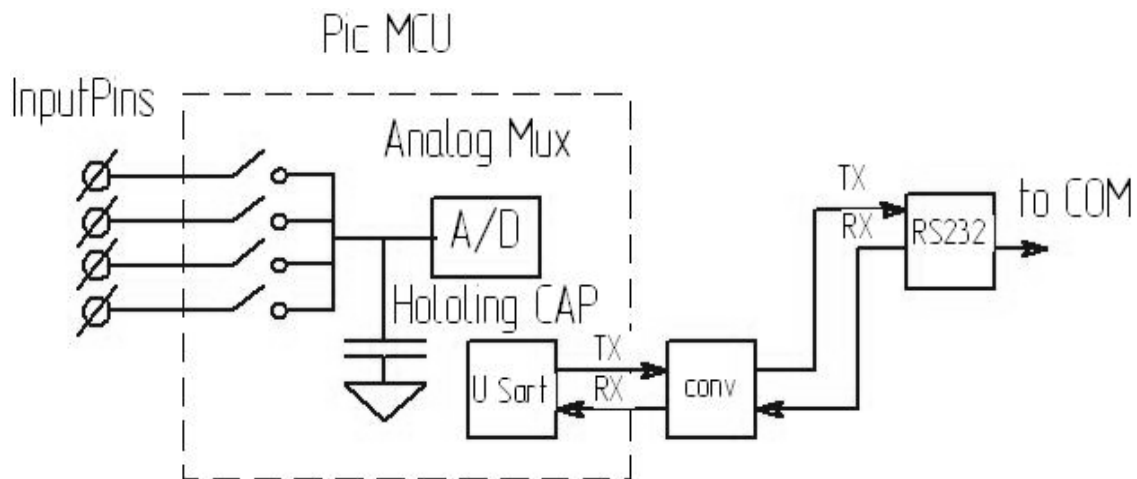


Рисунок 8 – Загальна схема пристрою для АЦП

Джерело: [3]

В середньому при частоті тактового генератора 20 МГц час перетворення по одному каналу складає $17,6 \cdot 10^{-6}$.

При цьому точність перетворення залежить від кроку квантування, який слід розрахувати за формулою:

$$\Delta_u = \frac{U_{REF}}{2^n}, \quad (7)$$

де U_{REF} – опорна напруга (5В);

$$\Delta_u = \frac{5}{2^{10}} = \frac{5}{1024} = 4.9mB$$

Інтерфейс RS232 має нетипові рівні напруг, тому для узгодження з рівнями інтерфейсу мікроконтролера необхідно використовувати перетворювач CONV (рисунок 8).

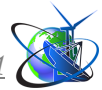
Цифровий сигнал подається на ПК для подальшої обробки за допомогою спеціально написаної програми, під назвою “Tenzo Cut” [4].

В результаті відбувається реєстрація сигналу в реальному часі та виведення його на екран у вигляді графіка (рисунок 9).

Програма дозволяє:

- одночасно реєструвати дані з двох груп датчиків (рисунок 9);
- приводити дані до загальної ординати зображення (рисунок 10);
- проводити тарування, тобто перехід від ординати зображення до сили, що діють на абразивний армований круг (рисунок 11).
- обробляти дані (знаходити середнє значення та середньоквадратичне відхилення на заданому проміжку) (рисунок 12);
- зберігати дані в файлі на будь-якому етапі реєстрації та обробки;
- зберігати дані у вигляді таблиці чисел для подальшої обробки іншими програмами аналізу табличних даних (наприклад, Origin або Microsoft Excel).

Розроблене високотехнологічне вимірювально – реєструюче обладнання дозволяє швидко і без повторювань з першочергових даних отримувати точні оцінки взаємодії високоабразивної цегли з абразивним армованим кругом та дає



можливість обробляти їх за допомогою сучасного програмного забезпечення, що позбавить від трудомісткого процесу обробки даних.

Швидкість подачі абразивного армованого круга в зону різання встановлювалась за допомогою підключення привідного електродвигуна через частотний перетворювач «Freson» FR150A, схема підключення якого зображена на рисунку 13 [5].

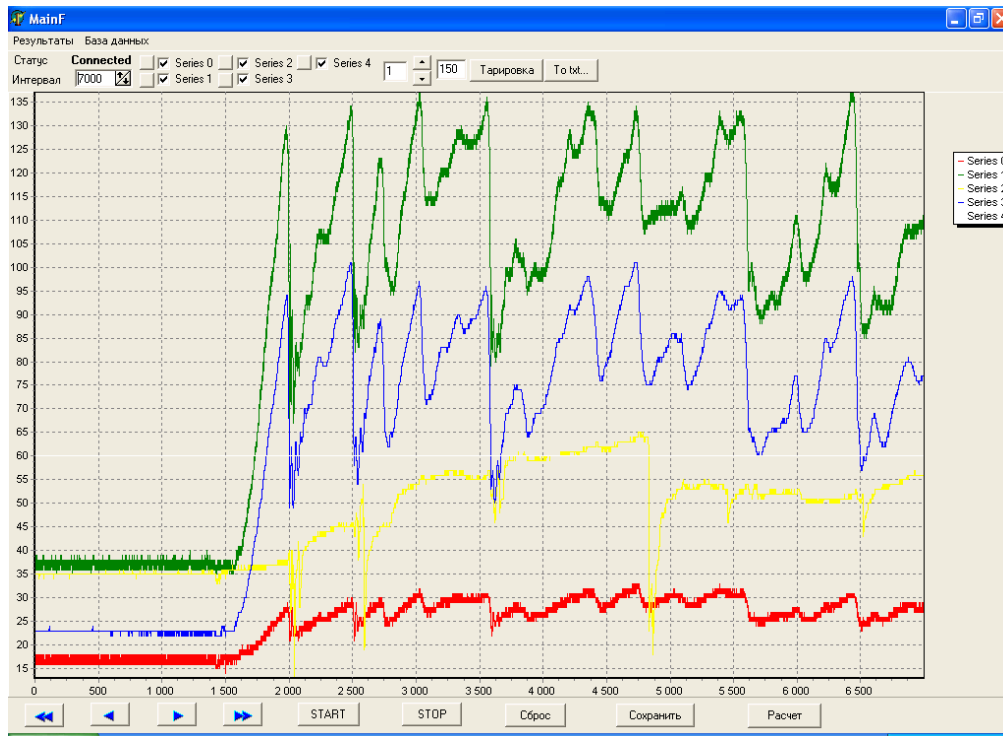


Рисунок 9 – Вигляд відтвореного сигналу на екрані

Джерело: [3]

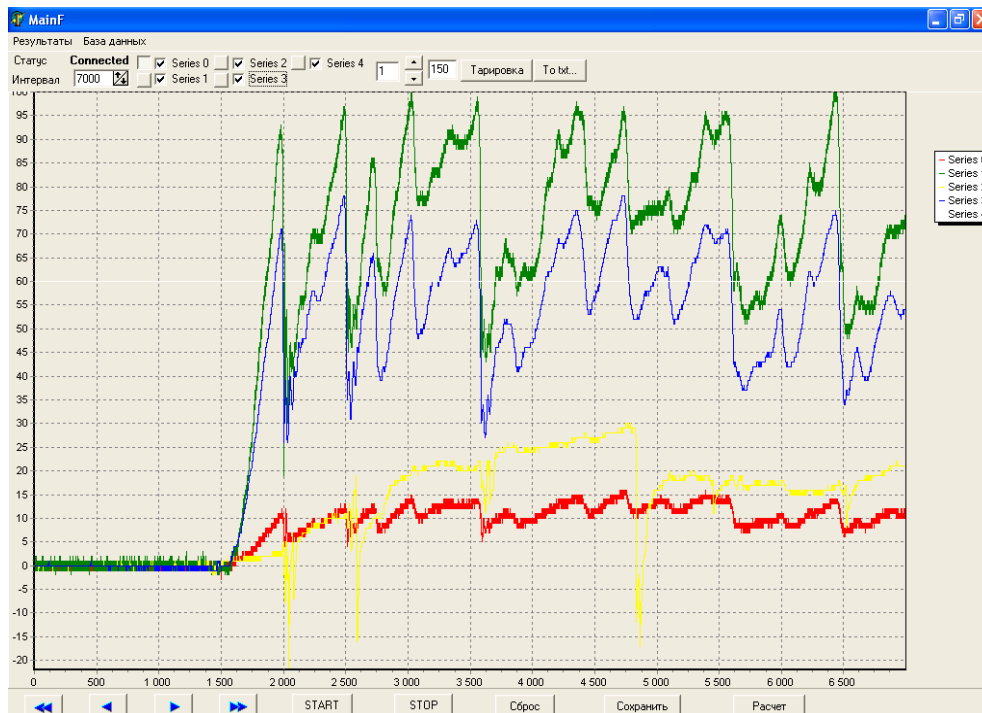


Рисунок 10 – Приведення даних до загальної ординати зображення

Джерело: [3]

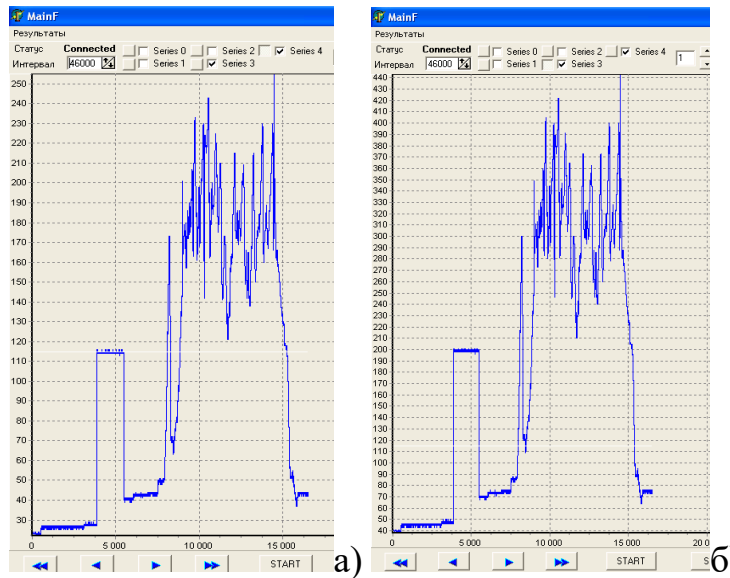


Рисунок 11 – Тарування а) до тарування, б) після тарування
 Джерело: [3]

Розрахункові параметри		
	Середнє	Ср квадрат
Series 0	298,76718139	105,77115631
Series 1	148,48109436	56,751689910
Series 2	-77,272346496	128,64126586
Series 3	315,77423095	82,235198974

8000 14400 Розрах

Рисунок 12 – Вікно «Розрахункові параметри» з результатами обчислень
 Джерело: [3]

Швидкість подачі робочого органу в зону різання V_n , визначається залежністю:

$$V_n = \frac{n_d P_z}{60 \cdot u_{к.п.}}, \tag{8}$$

де $u_{к.п.}$ – передаточне відношення клинопасової передачі; n_d – частота обертання валу двигуна; P_z – крок гвинта гвинтової передачі.

Регулювання швидкості подачі виконувалось за допомогою зміни частоти струму двигуна f від якої залежить синхронна частота (частота обертання магнітного поля):

$$n_d = \frac{60 f}{p}, \tag{9}$$



а частота обертання валу електродвигуна визначається наступним чином:

$$n_g = n_o \cdot k_k, \tag{10}$$

де k_k – ковзання електро двигуна [6].

Технічна характеристика електродвигуна представлена в таблиці 1.

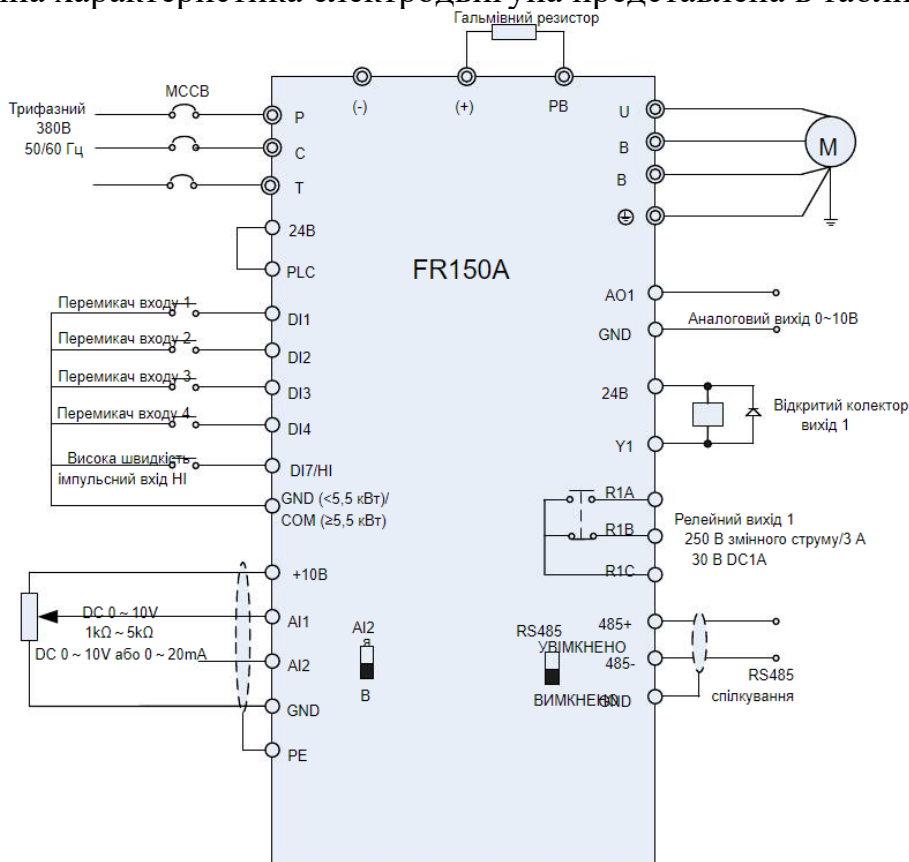


Рисунок 13 – Схема підключення трифазного інвертора 380 В
 Джерело: [5]

Таблиця 1 – Технічна характеристика електродвигуна

Типо-розмір двигуна	Потужність, кВт	Ковзання %	Кількість пар полюсів	ККД, %	cos φ	М _{макс} /М _{ном} Нм	М _{пуск} /М _{ном} Нм	М _{мін} /М _{ном} Нм	І _{пуск} /І _{ном} А
4A100L6Y3	2,2	5,1	3	81	0,73	2.2	2	1,6	5,5

Джерело: [6]

Таким чином, задавши відповідну частоту струму за допомогою перетворювача частоти «Freson» FR150A ми досягаємо необхідної швидкості подачі робочого органу в робочу зону.



Кількість обертів абразивного армованого круга встановлювалась за допомогою регулятора приводної машини, в якості якої використовувалась ручна кутошліфувальна машина (рисунок 14) [7]. Вимірювання кількості обертів виконувалось за допомогою цифрового фототахометра (рисунок 15) [8]



Рисунок 14 – Регулятор обертів на кутошліфувальній машині
Джерело: [7]



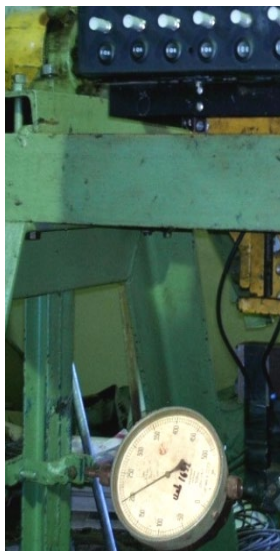
Рисунок 15 – Фототахометр

Джерело: [8]

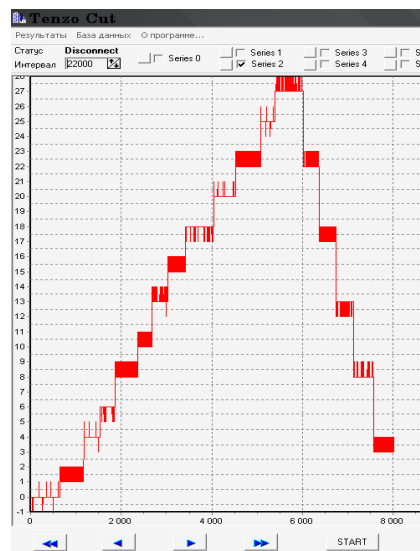
Тарування тензометричних балок перед проведенням дослідів (рисунок 16) проводилось механічним навантаженням в напрямку кожної із складових повної сили різання за допомогою динамометра.

Динамометр одним фіксатором закріплювався до механізму тарування, а іншим – до тензобалки. За допомогою механізму пересування проводилось навантаження та фіксація сигналу реєструючою апаратурою [3].

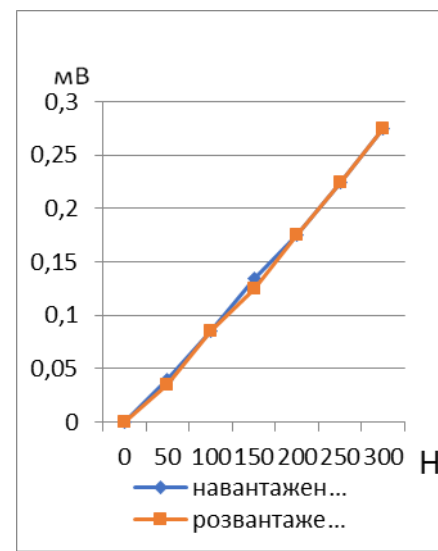
На рисунку 16, в зображений графік тарування тензобалок, де показано залежності величини сигналу від величини зусилля при навантаженні та розвантаженні.



а)



б)



в)

Рисунок 16 – Тарування тензометричних балок: а) покази динамометра на стенді; б) осцилограма; в) графік тарування.

Авторська розробка

Висновок:

Завдяки застосуванню запроєктованим та розробленим: високоточної системі керування подачі робочого органу та високотехнологічному вимірювально-реєструючому обладнанню, яке дозволяє швидко і без повторювань з першочергових даних отримувати достатньо точні при відносному відхиленні $\Delta_x=0,1$ оцінки взаємодії високоабразивних матеріалів з абразивним армованим кругом та дало можливість обробляти їх за допомогою сучасного програмного забезпечення, що позбавило від трудомісткого процесу обробки даних. Це дало можливість мінімізувати число вимірів сили різання при заданій точності і надійності результатів досліду з вірогідністю отриманих даних від 0,90 до 0,95.

Література:

1. Смірнов В.М. Основи теорії різання ґрунтів просторово орієнтованими ножами робочих органів землерийних машин: Монографія. – К.: «МП Леся», 2009. – 260 с.
2. Пелевін Л.Е., Пристайло М.О., Пристайло Т.Ю. Стенд реєстрації зусиль різання. Патент України на корисну модель № 13846. Бюл. № 4, 17.04.06
3. Пелевін Л.Є., Пристайло М.О., Пристайло Т.Ю. Удосконалення реєстрації сил різання в лабораторних умовах. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: Всеукраїнський міжвід. зб. наукових праць, – К.:КНУБА, 2005. – Вип. 65 – С. 58-62.
4. Пристайло Микола Олексійович. Обґрунтування раціональних параметрів розпушника-кайлувальника з пружно-деформованим виконавчим елементом [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Пристайло Микола Олексійович ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. - Київ, 2014. - 20, [1] с. : рис.Тгх частотника



5. Вказівки по швидкому монтажу та введення в дію перетворювача частоти на 4 кВт FRECON - FR150-4T-4.0 В - Вхідна напруга: 3-ф 380V
Детальніше: <https://saeron.com.ua/ua/p1086136558-preobrazovatel-chastoty-kvt.html>

6. Яцун М.А. Електричні машини: навч. Посібник для студ. вищ. навч. закл. – Львів : видавн. Львівський національний Університет «Львівська політехніка», 2004. – 439с.

7. Інструкція з використання. Makita GA 9020 (2.2 кВт, Ø125мм) Кутова шліфувальна машина.

8. Інструкція з використання. Тахометр цифровий лазерний безконтактний dt-2234с+.

Abstract. *Introduction. Evaluation of the interaction of highly abrasive materials with an abrasive reinforced wheel was carried out on the basis of a one-factor experiment through the use of high-tech measuring and recording equipment, which made it possible to quickly obtain accurate results from priority data.*

Main text. The processing of oscillograms consisted in determining the average maximum ordinate of the cutting force P and finding its average value.

The torque stand for registration of the power load of the author's design of KNUBA has been modified to study the physical model of the process of cutting highly abrasive materials with an abrasive reinforced wheel. On the side surfaces of the load cell 1, strain gauges D1-D4 are glued, registering the tangent force acting on the abrasive reinforced circle P. On the horizontal tenso-beam 2 – strain gauges D5-D8, which record the normal force that acts during the cutting of refractory bricks on the abrasive reinforced circle N.

The cutting force through the design of the abrasive reinforced wheel is transmitted to the strain gauges whose deformations are transformed into a change in the resistance of the measuring elements, so imbalance appears in all bridge circuits.

The basis of the methods of measurement by resistance sensors is the strain gauge effect – a change in the electrical (that is, ohmic) resistance of the metal wire of the sensor during its elastic deformation.

Sensors are connected to a bridge circuit. In this case, four sensors are glued to each strain gauge (Figure 3), which simultaneously perform the functions of working and compensation sensors. Such a connection of sensors allows you to record only the voltage difference in the base section of the beam, closed between the sensors.

The set of measuring equipment includes: power supply; power cable; ADC module (analog-to-digital converter); shistic amplifier and microcontroller control unit; signal transmission cable (SCI – Serial Communication Interface); and a personal computer (hereinafter referred to as the PC).

The program allows you to:

- simultaneously register data from two groups of sensors (Figure 9);*
- bring the data to the general ordinate of the image (Figure 10);*
- carry out taring, that is, the transition from the ordinates of the image to the forces acting on the abrasive reinforced circle (Figure 11).*

The feed rate of the abrasive reinforced wheel into the cutting zone was set by connecting the drive motor through the frequency converter "Frecon" FR150A,

The number of revolutions of the abrasive reinforced wheel was set using the regulator of the drive machine, which used a manual angle grinder. The measurement of the number of revolutions was performed using a digital phototachometer.

The packaging of strain gauge beams, before the experiments, was carried out by mechanical loading in the direction of each of the components of the total cutting force using a dynamometer.

**Conclusion:**

Thanks to the use of designed and developed: a high-precision control system for the supply of working organ and high-tech measuring and recording equipment, which allows you to quickly and without repetition from the priority data to obtain sufficiently accurate with a relative deviation $\Delta x = 0.1$ estimates of the interaction of highly abrasive materials with an abrasive reinforced wheel and made it possible to process them using modern software, which saved from the time-consuming process of data processing. This made it possible to minimize the number of measurements of the cutting force with a given accuracy and reliability of the results of the experiment with the probability of the obtained data from 0.90 to 0.95

Keywords: *experimental research, highly abrasive materials, abrasive reinforced wheel, measuring and recording equipment, probability of unevenness.*