

Н.А. ВАСИЛЬЧЕНКО, М.І. ШАПОВАЛОВА, В.О. ФЕДОРОВ, В.В. ОВЧАРЕНКО

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ ПРИКЛАДНОЇ ЗАДАЧІ МЕХАНІКИ НА ОСНОВІ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ

У роботі розглядається питання важливості вибору матеріалів для виробництва інструментів у фрезерній справі та визначення їхньої придатності шляхом детального аналізу міцності та поведінки під час обробки матеріалів. Для покращення довговічності та оптимізації виробництва, пропонується використовувати математичні моделі та чисельні методи, зокрема метод найменших квадратів та метод вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАУ) за допомогою методу Гауса з вибором головного елементу. Ці методи застосовуються для апроксимації експериментальних даних та аналізу характеристик матеріалу, забезпечуючи точність в оцінці його властивостей. Досліджено ситуації встановлення функції, коли лише деякі значення відомі, а також спрощення обчислень відомих функцій. Робота включає програмне забезпечення для чисельного розрахунку та візуалізації різних типів задач, які успішно вирішуються за допомогою розглянутих методів. Програмний алгоритм для апроксимації даних передбачає збереження інформації у текстовому файлі, введення користувачем кількості змінних та обрання кількості та типу базисних функцій. Після введення користувачем параметрів програма формує систему рівнянь на основі обраних функцій, визначає коефіцієнти апроксимації та будує графік для об'єктивної оцінки результатів. Завдяки зручному інтерфейсу користувач може легко взаємодіяти з програмою, шляхом введення значень. Аналіз результатів здійснюється за допомогою графічного відображення, що спрощує робочий процес та полегшує сприйняття отриманих даних. Апроксимація функцій за допомогою чисельних методів може бути ефективно використана в різних сферах для вирішення прикладних задач механіки.

Ключові слова: метод найменших квадратів, апроксимація, середньоквадратичне відхилення, чисельні методи, C++, C#.

The present work delves into the significance of material selection in the manufacturing of tools for milling operations and determines their suitability through a detailed analysis of strength and behavior during material processing. To enhance longevity and optimize production, the utilization of mathematical models and numerical methods, notably the least squares method and the solution of systems of linear algebraic equations (SLAE) employing the Gaussian elimination method with pivot selection, is proposed. These methods are applied for the approximation of experimental data and the analysis of material characteristics, ensuring precision in the evaluation of its properties. Situations where only partial data is known are investigated, along with simplifications in the computation of known functions. The study encompasses software for numerical computation and visualization of various problem types, effectively addressed through the aforementioned methods. The software algorithm for data approximation involves storing information in a text file, user input of variables, and selection of the quantity and type of basis functions. After the user inputs of parameters, the program formulates a system of equations based on selected functions, determines approximation coefficients, and generates a graph for an objective assessment of results. With a user-friendly interface, users can easily interact with the program, input values, and analyze results through graphical representation, streamlining the workflow and facilitating the comprehension of obtained data. The approximation of functions using numerical methods proves to be efficiently applicable in diverse fields for addressing applied mechanics problems.

Keywords: Least squares method, approximation, mean squared deviation, numerical methods, C++, C#.

Вступ. У сучасній області обробки матеріалів, зокрема у фрезерній справі, велике значення приділяється дослідженню міцності інструментів, використовуваних під час обробки. Ці інструменти, такі як мечики, фрези, свердла та інші, виготовляються з різних матеріалів, і важливо, щоб вони відповідали конкретним вимогам, які ставляться перед ними в процесі обробки матеріалів.

З метою покращення довговічності інструментів і оптимізації роботи підприємства, необхідно ретельно вибрати матеріал для виготовлення інструментів і провести дослідження їх придатності для використання у фрезеруванні. Важливою стороною визначення характеристик матеріалу є аналіз його поведінки під час навантажень, що дозволяє отримати важливі дані про залежність різних параметрів інструменту.

Для аналізу цих даних та їх подальшого використання в аналітичних цілях часто використовують математичні моделі. Важливим етапом є апроксимація експериментальних даних, що може включати в себе інтерполяцію в межах експериментальної області та екстраполяцію за її межами. Для цього використовуються різні підходи, такі як методи інтерполяції та методи адаптації кривих, зокрема метод найменших квадратів (МНК). Ці методи дозволяють адаптувати математичні моделі так, щоб вони найточніше відображали властивості

інструменту на основі доступних експериментальних даних.

1. Аналіз існуючих шляхів рішення проблеми.

В контексті сучасних вимог та технологічних потреб, проводяться широкі наукові дослідження у сфері матеріалознавства, з метою розвитку та удосконалення інструментів і технологій для механічної обробки матеріалів. Оптимізація інструментів та технологій обробки для поліпшення ефективності, якості та тривалості функціонування інструментів у важких умовах різання – є актуальною задачею, що фокусує увагу багатьох науковців. У роботі [1] вивчається моделювання та оптимізація фрезерного різця на CNC-станках, використовуючи карбідні вставні різці. Вплив тепла та тертя на властивості матеріалів під час різання, а також розгляд використання критичних сировинних матеріалів, присвячені роботи [2-3]. Авторами у [4] досліджується пошкодження карбідних інструментів, зосереджуючись на мікроскопічних механізмах пошкоджень та їхньому впливі на процес різання. Стаття [5] пропонує аналітичну модель для передбачення сил різання при глибокому свердлінні твердих та крихких матеріалів. Аналіз впливу параметрів різання на фрезерування сплаву, використовуючи штучні нейронні мережі та методологію відгуку поверхні проведені у роботі [6]. Технологія ортогонального токарно-фрезерного

оброблення для точного оброблення складних матеріалів розглядається науковцями у [7]. Робота [8], спрямована на використання методу відгуку поверхні для оптимізації стану поверхні при свердлінні.

Актуальність теми визначається потребою у високоякісній обробці матеріалів в промислових галузях, таких як авіація, космос, та інші, де важливо досягти високої продуктивності та якості обробки, а також зменшити використання критичних сировинних матеріалів та зберегти їхню стійкість. Отже, дослідження в цій сфері заслуговують уваги. Використання комп'ютерних технологій для візуалізації процесу аналізу та застосування чисельних методів і математичного моделювання - визнається перспективною альтернативою витратних експериментів.

2. Постановка задачі. Мета роботи полягає у створенні додатку, який приймає таблично задані значення залежності зменшення діаметру фрези від часу та залежність розтягування металу від прикладеної сили, та здатний перетворювати їх у графіки відповідних функцій. Вирішення прикладної задачі реалізувати з використанням чисельних методів (МНК, метод Гауса з вибором головного елемента).

3. Чисельні методи рішення прикладних задач. Апроксимація методом найменших квадратів. Апроксимація МНК встановлюється на основі наступних припущень: нехай є n значень x та відповідних їм y . Основна мета апроксимації полягає в пошуку функції F , такої, що $F(x) \approx y$ [11]. Умову апроксимації, в якій $\varphi(x)$ приблизно дорівнює $y(x)$, розглядається як вимога мінімізації квадратичної різниці між функціями $\varphi(x)$ та $y(x)$, що призводить до застосування методу найменших квадратів (1). Обирається конкретний варіант апроксимації (2), де $N < n$. Умова мінімізації різниці (1) трансформується у систему лінійних рівнянь, представлену за схемою (3). Розв'язуючи цю систему і отримуючи значення коефіцієнтів a_k , вставляємо їх у функцію $\varphi(x)$. Таким чином, завдяки вирішенню системи, досягається поставлена задача апроксимації. Для оцінки похибки методу можна використовувати середньоквадратичне відхилення (4).

$$S = \sum_{i=1}^N (y(x_i) - \varphi(x_i))^2 = \min \quad (1)$$

$$\varphi(x) = \sum_{k=1}^n a_k \varphi_k(x) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^N a_k \sum_{i=1}^n \varphi_k(x_i) \varphi_m(x_i) = \sum_{i=1}^n y_i \varphi_m(x_i), (m = \overline{1, N}) \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{S}{n}} \quad (4)$$

Вирішення СЛАУ методом Гауса з вибором головного елемента. Розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАУ) за допомогою методу Гауса із вибором головного елемента є важливим

етапом у вирішенні прикладних задач, спрямованих на встановлення взаємозв'язків між даними [9]. Система рівнянь надає параметри, які використовуються для аналітичної побудови даної залежності.

Основною метою на цьому етапі є точне та раціональне розв'язання отриманої системи. У роботі використовується метод Гауса з вибором головного елемента у стовпці [9-10]. Розглядається конкретна система рівнянь (5). Оскільки важлива точність отриманих результатів, систему (5) рекомендується розв'язувати методом Гауса із вибором головного елемента у стовпці.

$$\begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & x_1 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & x_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & a_{n-1\ n-1} & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & x_n & b_n \end{array} \times \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{array} = \begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_n \end{array} \quad (5)$$

$a_{11} \dots a_{nn}$ – коефіцієнти, отримані в ході розрахунків;

$x_1 \dots x_n$ – вектор шуканої величини;

$b_1 \dots b_n$ – вектор відповідей системи.

Суть методу полягає у наступних етапах. Спочатку, систему (5) представляємо у вигляді розширеної матриці (6). Обираємо головний елемент (найбільший за модулем) у першому стовпці, а при необхідності переставляємо місцями першу строку та строку із обраним головним елементом. Нехай головний елемент – a_{21} , тоді (6) перетворюється у (7).

$$\begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & b_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & a_{n-1\ n-1} & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & b_n \end{array} \quad (6)$$

$$\begin{array}{cccccc} a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & b_2 \\ a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & a_{n-1\ n-1} & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & b_n \end{array} \quad (7)$$

Поділом першої строки на головний елемент і виключенням усіх елементів першого стовпця отримуємо матрицю (8).

Далі аналогічні операції проводяться для кожного наступного стовпця ітеративно, враховуючи вже оброблені строки. Це дозволяє отримати трикутну матрицю (9). Завершальним етапом є зворотній хід методу, починаючи з крайньої строки крайнього стовпця, і здійснюючи аналогічні алгебраїчні перетворення. Результатом є кінцева матриця (10).

$$\begin{array}{cccccc} 1 & a_{22}/a_{21} & \dots & a_{2n}/a_{21} & b_2/a_{21} \\ 0 & a_{12} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ 0 & \vdots & \dots & a_{3n} & b_3 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{n2} & \dots & a_{nn} & b_n \end{array} \quad (8)$$

$$\begin{array}{ccccc}
 1 & a_{22}/a_{21} & \dots & a_{2n}/a_{21} & b_2/a_{21} \\
 0 & 1 & \vdots & a_{1n} & b_1/a_{ij} \\
 0 & 0 & 1 & a_{3n} & b_3/a_{ij} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & 1 & b_n/a_{ij}
 \end{array} \quad (9)$$

$$\begin{array}{ccccc}
 1 & 0 & \dots & 0 & c_1 \\
 0 & 1 & \vdots & 0 & c_2 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & c_3 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & 1 & c_n
 \end{array} \quad (10)$$

$$\begin{array}{l}
 c_1 \quad x_1 \\
 c_2 \quad x_2 \\
 \text{де } c_3 \approx x_3 \\
 \vdots \quad \vdots \\
 c_n \quad x_n
 \end{array}$$

Хоча метод Гауса із вибором головного елемента є ефективним у багатьох випадках, варто відзначити його два суттєві недоліки. По-перше, якщо елемент головної діагоналі нульовий, систему неможливо вирішити за допомогою цього методу. По-друге, при малих значеннях дільника, може виникнути значна похибка при його округленні. Враховуючи ці аспекти, метод Гауса із вибором головного елемента вирішує обидва зазначених недоліки одночасно.

4. Застосування чисельних методів у вирішенні прикладних задач фрезерування. Використання чисельних методів у вирішенні завдань фрезерування представляє собою актуальний підхід. Обидва розглянуті вище методи виявляються досить зручними для програмування і можуть бути ефективно поєднані між собою. Зокрема, оскільки останнім етапом методу найменших квадратів (МНК) є розв'язання системи рівнянь, таке завдання можна ефективно виконати за допомогою методу Гауса із вибором головного елемента.

Розглянемо принцип роботи комплексу програми, реалізований на мовах програмування C++ для виконання методу і C# для графічного відображення отриманих результатів. Для вирішення поставлених завдань буде розглянуто кілька прикладів. У процесі фрезерування металевих виробів застосовують різноманітні інструменти, серед яких особлива роль надається фрезам. Під час обробки виробу станком, фреза поступово втрачає свій ресурс, що проявляється у зменшенні її діаметру. Беручи до уваги останнє, особливо важливо, щоб шпиндель (вал, який має можливість обертатися в обох напрямках), враховував цей факт та підходив ближче до виробу з плином часу. В якості прикладу розглядається фреза, виготовлену зі сталі R18. Залежність зменшення діаметру фрези від часу представлено у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність зменшення діаметру від часу [12].

$X_{\text{год}}$	$Y_{\text{мм}}$
0	16
10	15,999
20	15,998

30	15,997
----	--------

Таблиця 2 – Залежність розтягування сталі 45 від прикладеної сили [12].

F , кН	Δl , мм
16,20	0,15
16,875	0,8
18,90	2,4
21,825	4
25,20	6,4
26,55	8,8
27,45	10,4
26,10	12,8

Представлена таблично задана залежність (Табл. 1), обробляється за допомогою методу найменших квадратів (МНК) із використанням створеного програмного забезпечення.

Алгоритм роботи програми сформульовано наступним чином:

- Інформація про матеріал зберігається у текстовому файлі для подальшого аналізу.
- Після запуску програми користувач вводить кількість змінних, що використовуються для апроксимації.
- Обирається кількість базисних функцій, які будуть використовуватися для апроксимації даних (у розглянутому випадку обрано лінійну функцію).
- Коефіцієнти отриманої система переносяться у графічний інтерфейс користувача, під відповідні умовні позначення.
- Коефіцієнти обраної апроксимуючої функції представляють собою отримані дані.
- Для об'єктивності рішення будується крива та відображені дані у програмі. Цей процес передбачає введення всіх необхідних значень та вибір опції «побудувати графік» у меню (Рис. 1).

Результат показує, що апроксимація ефективно виконана, оскільки функція точно описує табличні дані. Середньоквадратичне відхилення, яке у цьому прикладі дорівнює 0, свідчить про високу точність апроксимації.

Досліджуючи механічні властивості матеріалу, експериментально отримано діаграму розтягування (Рис. 2). Проведено аналіз та апроксимацію отриманої залежності. Під час навантаження фізичного тіла, наприклад, алюмінієвого стрижня, визначається напруження. У фрезерній справі важливо враховувати фізичні властивості інструменту. Досліджуючи новий матеріал для фрез, проводиться аналіз його діаграми розтягування, апроксимуючи нелінійну частину.

У виробництві фрез для алюмінію використовують сплави швидкоріжучої сталі (Табл. 2), які апроксимуються для покращення матеріалу інструменту. Створюючи новий матеріал, важливо проаналізувати його поведінку під навантаженням, використовуючи діаграму розтягування для апроксимації та покращення

характеристик.

Результатом розробленої програми є аналіз діаграм розтягування з урахуванням механічних властивостей матеріалу, спрямований на оптимізацію виробництва та покращення фрез для обробки алюмінію.

Таким чином, виявлено, що завдання апроксимації успішно виконане, і отримана функція

ефективно описує табличні дані (Табл. 2). Середньоквадратичне відхилення для цього конкретного випадку, становить приблизно 0,71. За отриманими результатами можна зробити висновки стосовно придатності матеріалу, що був підданий випробуванню, як сировини для створення фрези зазначених характеристик.

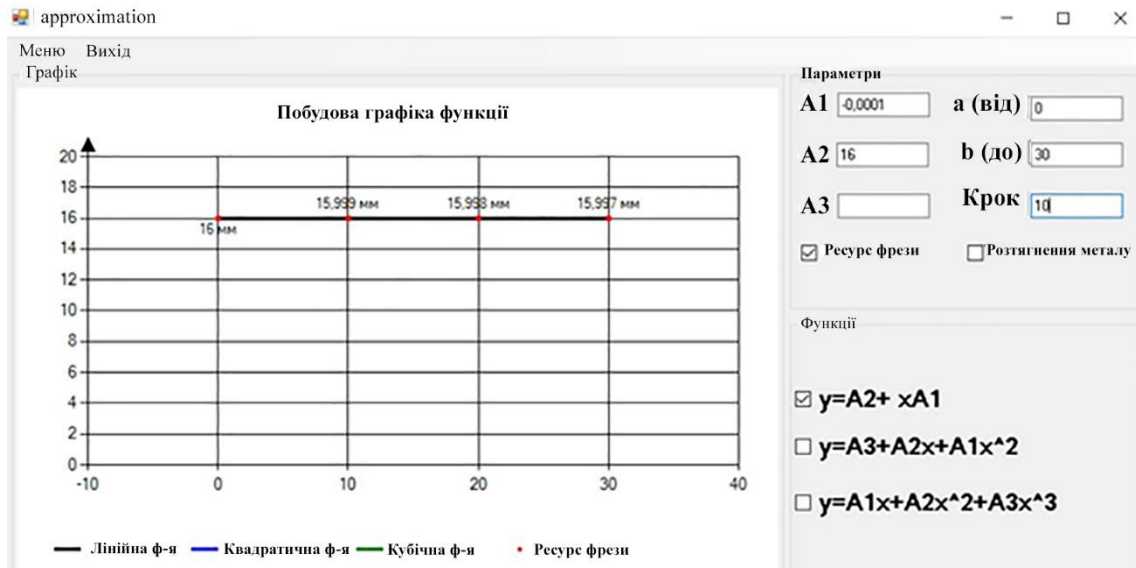


Рис. 1 – Результат роботи програми. Ресурс фрези.



Рис. 2 – Результат роботи програми. Розтягнення металу.

Висновки. У роботі розглядається проблема встановлення функції у випадках, коли вона невідома, а лише деякі її значення відомі з експериментальних вимірювань чи розрахунків. Також розглядається ситуація спрощення обчислень відомої функції, яка може мати складний вид. Теорія апроксимації функцій надає відповіді на ці питання, шляхом знаходження функції $\varphi(x)$, яка наближена до вихідної $f(x)$ і при цьому зручна для розрахунків.

Робота демонструє вирішення прикладних задач за допомогою чисельних методів, представляючи програмне забезпечення для розрахунку та візуалізації двох типів задач. По таблично заданим функціям обчислюється ресурс фрези та розтягнення матеріалу. Отримані результати відзначаються невеликою похибкою, що свідчить про придатність розглянутих методів та розроблених програм для застосування на практиці. Такий підхід використання чисельних

методів у розв'язанні задач апроксимації може бути успішно застосованим у різних сферах.

Список літератури

1. Phokobye S. N., Daniyan I. A., Tlhabadira I., Masu L., VanStaden L.R. *Model design and optimization of carbide milling cutter for milling operation of m200 tool steel*. Procedia CIRP, 2019. Vol. 84, No. 3, pp. 954-959. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.300>
2. Soori M., Asmael M. *Mechanical behavior of materials in metal cutting operations, a review*. Journal of New Technology and Materials, 2020, Vol. 10, No. 2, pp.79-82. [ffhal-03024765f](https://doi.org/10.1016/j.jntm.2020.03.001)
3. Rizzo A., Goel S., Grilli M. L., Iglesias R., Jaworska L., Lapkovskis V., Novak P., Postolnyi B. O., Valerini D. *The critical raw materials in cutting tools for machining applications: a review*. Materials, 2020, 13(6), 1377; <https://doi.org/10.3390/ma13061377>
4. Cheng Y., Nie W., Li C., Jia W., Qin C. *Study on material damage of carbide tool during heavy-duty cutting, integrated ferroelectrics*, Integrated Ferroelectrics, 2020, Vol. 206, No. 1, pp. 132-150. <https://doi.org/10.1080/10584587.2020.1728634>
5. Yu R., Li S., Zou Z., Liang L. *Mathematical modeling and experimental study of cutting force for cutting hard and brittle materials in fixed abrasive trepanning drill*. Micromachines, 2023, Vol. 14, No. 6, pp. 1270. <https://doi.org/10.3390/mi14061270>
6. Kilickap E., Yardimeden A., Çelik Y. H. *Mathematical modelling and optimization of cutting force, tool wear and surface roughness by using artificial neural network and response surface methodology in milling of Ti-6242S*. Appl. Sci, 2017, Vol. 7, No. 10, pp.1064. <https://doi.org/10.3390/app7101064>
7. Sun T., Qin L., Fu Y., Liu C., Shi R. *Mathematical modeling of cutting layer geometry and cutting force in orthogonal turn-milling*. Journal of Materials Processing Technology, 2021, Vol. 290, pp. 116992. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116992>
8. Zhujani F., Qehaja N., Abdullahu F., Bruci M. *Mathematical modelling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters in drilling process*. DAAAM International Vienna, 2016, pp.0195-0202. <https://doi.org/10.2507/27th.daaam.proceedings.029>
9. Фельдман Л. П. *Чисельні методи в інформатиці: Підручник / Л. П. Фельдман, А. І. Петренко, О. А. Дмитрієва. – К. : Видавнича група BVH, 2006. – 480 с. ISBN 966-552-155-1*
10. Зражевський Г. М. *Чисельні методи в задачах механіки: метод. посіб. Ч. 1: Теоретична та прикладна механіка / уклад. – Київ : Київський нац. ун-т ім. Т. Шевченка, 2015. – 99 с.*
11. Мусіяка В. Г. *Основи чисельних методів механіки : підручник*. Київ : Вища школа, 2004. 240 с.
12. Каталог KYOCERA Cutting Tools. <https://asia.kyocera.com/products/cuttingtools/catalogs/>

References (transliterated)

1. Phokobye S. N., Daniyan I. A., Tlhabadira I., Masu L., VanStaden L.R. *Model design and optimization of carbide milling cutter for milling operation of m200 tool steel*. Procedia CIRP, 2019. Vol. 84, No. 3, pp. 954-959. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.300>
2. Soori M., Asmael M. *Mechanical behavior of materials in metal cutting operations, a review*. Journal of New Technology and Materials, 2020, Vol. 10, No. 2, pp.79-82. [ffhal-03024765f](https://doi.org/10.1016/j.jntm.2020.03.001)
3. Rizzo A., Goel S., Grilli M. L., Iglesias R., Jaworska L., Lapkovskis V., Novak P., Postolnyi B. O., Valerini D. *The critical raw materials in cutting tools for machining applications: a review*. Materials, 2020, 13(6), 1377; <https://doi.org/10.3390/ma13061377>
4. Cheng Y., Nie W., Li C., Jia W., Qin C. *Study on material damage of carbide tool during heavy-duty cutting, integrated ferroelectrics*, Integrated Ferroelectrics, 2020, Vol. 206, No. 1, pp. 132-150. <https://doi.org/10.1080/10584587.2020.1728634>
5. Yu R., Li S., Zou Z., Liang L. *Mathematical modeling and experimental study of cutting force for cutting hard and brittle materials in fixed abrasive trepanning drill*. Micromachines, 2023, Vol. 14, No. 6, pp. 1270. <https://doi.org/10.3390/mi14061270>
6. Kilickap E., Yardimeden A., Çelik Y. H. *Mathematical modelling and optimization of cutting force, tool wear and surface roughness by using artificial neural network and response surface methodology in milling of Ti-6242S*. Appl. Sci, 2017, Vol. 7, No. 10, pp.1064. <https://doi.org/10.3390/app7101064>
7. Sun T., Qin L., Fu Y., Liu C., Shi R. *Mathematical modeling of cutting layer geometry and cutting force in orthogonal turn-milling*. Journal of Materials Processing Technology, 2021, Vol. 290, pp. 116992. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116992>
8. Zhujani F., Qehaja N., Abdullahu F., Bruci M. *Mathematical modelling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters in drilling process*. DAAAM International Vienna, 2016, pp.0195-0202. <https://doi.org/10.2507/27th.daaam.proceedings.029>
9. Feldman L. P. *Chyselni metody v informatytsi: Pidruchnyk / L. P. Feldman, A. I. Petrenko, O. A. Dmytriieva. – K. : Vydavnycha hrupa VNV, 2006. – 480 p. ISBN 966-552-155-1*
10. Zrazhevskiy H. M. *Chyselni metody v zadachakh mekhaniky: metod. posib. Ch. 1: Teoretychna ta prykladna mekhanika / uklad. – Kyiv : Kyivskyyi nats. un-t im. T. Shevchenka, 2015. – 99 p.*
11. Musiaka V. H. *Osnovy chyselnykh metodiv mekhaniky : pidruchnyk*. Kyiv : Vyscha shkola, 2004. 240 p.
12. Katalog KYOCERA Cutting Tools. <https://asia.kyocera.com/products/cuttingtools/catalogs/>

Надійшла (received) 22.07.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Васильченко Нікіта Андрійович (Vasylchenko Nikita) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», бакалавр з прикладної математики; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: nikita.vasylchenko@infiz.khpi.edu.ua

Шаповалова Марія Ігорівна (Shapovalova Mariia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: MiShapovalova@gmail.com, mariia.shapovalova@khpi.edu.ua; ORCID: 0000-0002-4771-7485.

Федоров Віктор Олександрович (Fedorov V) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кандидат технічних наук, доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: Victor.Fedorov@khpi.edu.ua; ORCID: 0000-0002-4814-6768.

Овчаренко Віталій Володимирович (Ovcharenko Vitalii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кандидат технічних наук, доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: Vitalii.Ovcharenko@khpi.edu.ua; ORCID: 0009-0008-1464-3425.