

[0000-0001-9806-3453] **В. В. Хлівний,**

e-mail: vitalik.xlywnij@gmail.com

[0000-0002-1571-401X] **К. В. Базіло, д-р техн. наук, професор**Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## ВПЛИВ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ РІЗНОМАНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ТОЧНІСТЬ ДОТРИМАННЯ ШИРИНИ РІЗУ

У статті розглянуто питання побудови регресійних моделей для визначення впливу робочих параметрів гідроабразивного різання різноманітних матеріалів на точність дотримання ширини різку. Вхідні параметри включають кількість подачі абразиву, величину тиску ріжучої рідини (води) та в'язкість оброблюваного матеріалу, а вихідний параметр – ширина різку. За допомогою програмного забезпечення *Neuro Solutions* був проведений попередній аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійних моделей. За результатами аналізу була вибрана нейромережа *MLPR-2-B-L* з методом навчання *Levenberg-Marquardt*. Застосування цієї моделі дозволило отримати вагові коефіцієнти, які були використані для передбачення вихідного значення ширини різку на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал та на виході ріжучого струменя з оброблюваного матеріалу на основі вхідних параметрів. Проведена оцінка похибок, адекватності та інформативності регресійних моделей. Застосування гістограм залишків дозволило проаналізувати отримані результати. Крім того, була розроблена програма в середовищі *MathCAD*, яка дозволяє аналізувати отримані результати і здійснювати передбачення ширини різку за створеною регресійною моделлю як на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал, так і на виході з матеріалу.

Отримані результати визначають важливість вхідних параметрів гідроабразивного різання і демонструють можливість їх використання для передбачення ширини різку. Ця робота має практичне значення для промислових підприємств, що застосовують гідроабразивне різання, оскільки точні передбачення ширини різку дозволяють оптимізувати процес різання, чим забезпечують високу якість та ефективність і точність роботи.

**Ключові слова:** гідроабразивне різання, ширина різку, регресійна модель, зношування абразивного сопла, керованість процесу, точність обробки.

**Вступ.** Гідроабразивне різання є однією з сучасних технологій, використовуваних в промисловості для розрізання різноманітних листових матеріалів з високою точністю та ефективністю. Цей процес використовує комбінацію струменя води й абразивних часточок, які під високим тиском направляються на оброблювану поверхню, спричиняючи розтинання матеріалу та утворення різку. Гідроабразивне різання знайшло широке застосування у виробництві, включаючи важке машинобудування, автомобільну промисловість, аерокосмічну техніку й інші галузі, де вимагається висока якість різання і зниження впливу на структуру матеріалу. Встановлення залежності між вхід-

ними та вихідними параметрами процесу гідроабразивного різання має велике значення для розуміння й оптимізації цього процесу [1, 2].

Обробка матеріалів за допомогою гідроабразивних технологій має деякі переваги. Гідроабразивне різання є доволі універсальною технологією обробки, яку можна використовувати для широкого спектра матеріалів, включаючи метали, скло, кераміку, камінь, пластик тощо. Це дозволяє використовувати одну технологію для різання різних матеріалів, що спрощує виробничий процес. Гідроабразивне різання забезпечує високу точність і деталізацію різку, що дозволяє виконувати складні геометричні форми й отримувати ви-

сокоякісні краї різку з мінімальними відхиленнями. Порівнюючи з іншими методами різання, зауважимо, що гідроабразивне різання майже не впливає на структуру матеріалу через мінімальне виділення тепла, що дозволяє зберігати механічні властивості матеріалу, уникнути спотворень та змін властивостей. Під час гідроабразивного різання немає прямого контакту між ріжучим інструментом і матеріалом, що дозволяє уникнути пошкодження поверхні, зміцнення або формування зони впливу [3, 4].

Проте на сучасному етапі розвитку такої технології притаманні й деякі недоліки, як у технологічному плані, так і в забезпеченні. Так, недоліком гідроабразивних комплексів ГАР-2500 українського виробництва приватного підприємства «Родень» є недостатня керуваність процесу різання, що призводить до збільшення ширини різку та відповідно зменшення точності оброблення листових матеріалів через зношування абразивного сопла. Це може статися через тривалий час виконання керуючої програми, під час якого абразивне сопло зазнає зношування, що впливає на точність обробки матеріалу ближче до завершення програми. Абразивні частинки, що проходять через сопло під високим тиском, згодом викликають механічне зношування його внутрішніх поверхонь, що може призвести до збільшення діаметра отвору сопла та зміни геометрії ріжучого струменя [5].

Тому одним із недоліків технології гідроабразивного різання є зношування абразивного сопла, що може призводити до збільшення ширини різку і відповідно зменшення точності оброблення.

Для вирішення цієї проблеми розробниками обладнання введено параметр корекції, який є числовим параметром і задається тільки на початку різання в керуючій програмі. Цей параметр зміщує ріжучий струмінь в сторону від деталі, котра вирізається, на відстань, рівну половині ширини різку. Такий підхід допомагає компенсувати збільшення ширини різку, що, в свою чергу, забезпечує підтримання точності обробки матеріалу [6].

Проте слід зазначити, що цей метод не є достатньо досконалим у випадку тривалого виконання керуючої програми, коли абразивне сопло зношується і ширина різку збільшу-

ється. Це може призводити до зменшення точності обробки матеріалу ближче до завершення програми. Для вирішення цієї проблеми можуть бути необхідні додаткові покращення, такі як моніторинг зношування абразивного сопла та контролювання збільшення ширини різку під час процесу виконання керуючої програми й автоматичне внесення корекцій у процес різання залежно від ширини різку [7, 8].

Зношування абразивного сопла має безпосередній вплив на точність та якість різку. Збільшення ширини різку може призводити до втрати точності розмірів, особливо при виконанні дрібних або деталізованих різів. Крім того, збільшення ширини різку може мати вплив на ефективність використання матеріалу, збільшуючи його витрати.

Для зменшення негативного впливу зношування абразивного сопла необхідно вживати заходів з контролю за збільшенням ширини різку, наприклад, регулярну перевірку стану сопла і його заміну при необхідності та регулярне вимірювання ширини різку [9].

Визначення параметрів, які можуть впливати на зміну ширини різку, є важливим аспектом для компенсування зношування абразивного сопла та його впливу на ширину різку і точність обробки [10].

Попередні дослідження показують, що вхідні параметри гідроабразивного різання мають значний вплив на якість, продуктивність і точність процесу різання. Однак існує потреба у розробці моделей визначення впливу робочих параметрів гідроабразивного різання різноманітних матеріалів на точність дотримання ширини різку [11].

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення точності дотримання ширини різку при гідроабразивному обробленні різноманітних матеріалів шляхом побудови регресійних моделей впливу робочих режимів різання на вихідний параметр такого оброблення на вході різального струменя в оброблюваний матеріал та на виході.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішувалися такі завдання:

- аналіз експериментальних даних і встановлення залежності між вхідними та вихідними параметрами процесу гідроабразивного різання;

- побудова регресійних моделей, які найкращим чином описують залежність між їх вхідними та вихідним параметрами;

- перевірка адекватності та точності побудованих моделей шляхом порівняння її результатів з експериментальними даними;

- надання рекомендацій щодо впливу вхідних параметрів на ширину різку та надання рекомендації для оптимізації процесу гідроабразивного різання.

**Виклад основного матеріалу**

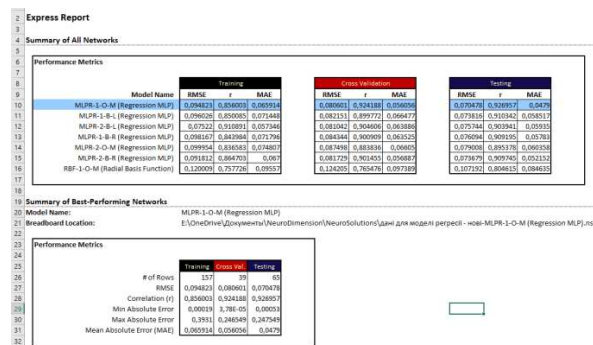
**Побудова регресійних моделей**

$$Y_1 = f(X_1, X_2, X_3) \text{ та } Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$$

Різниця в ширині різку між входом і виходом з матеріалу є однією з ключових характеристик гідроабразивного різання і важливою величиною, яка впливає на якість і точність різку, а також на продуктивність і витрати матеріалу, тому в цьому дослідженні створено саме дві регресійні моделі для передбачення ширини різку на вході та виході з матеріалу ріжучого струменя.

За попередньо вимірними з дослідних зразків вхідними даними, які бралися з різних матеріалів, що мають різну в'язкість і з різними параметрами різання, а саме зі зміною робочого тиску ріжучої рідини та зміною кількості подачі абразиву, в програмі Neuro Solutions здійснено попередній аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  (що дозволить передбачати ширину різку на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал), який зображено на рисунку 1, де  $Y_1$  – вихідний параметр, ширина різку, мм;  $X_1$  – вхідний параметр, кількість подачі абразиву, гр./хв;  $X_2$  – робочий тиск ріжучої рідини, атм.;  $X_3$  – в'язкість матеріалу дослідних зразків, Дж/см<sup>2</sup>. Аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  (що дозволить передбачати ширину різку на виході ріжучого струменя з оброблюваного матеріалу) відбувався аналогічно до регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ .

При такому аналізі вихідні дані розбиваються на три вибірки: навчальну – 60 %, тестову – 25 % і крос-валідаційну (CV) – 15 %. При цьому можливе використання різноманітних методів навчання.

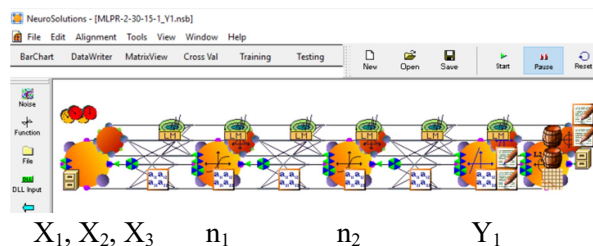


**Рисунок 1. Результати попереднього аналізу щодо визначення архітектури нейромережі**

Як показує попередній аналіз для регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ , найкращі результати на тестовій та CV вибірках отримано для наступних архітектур MLPR – 1-0-M із кількістю нейронів прихованого шару  $n = 10$ .

Далі виконано детальний аналіз запропонованих архітектур і за результатами визначено остаточну архітектуру нейромережі. Такий детальний аналіз за похибкою MAE (mean absolute error performance function) та коефіцієнтом детермінації показує найкращі результати для архітектури нейромережі з двома прихованими шарами MLPR-2-B-L та методом навчання Levenberg-Marquardt.

В цьому дослідженні кількість нейронів першого та другого прихованого шару варіювалася від 10 до 40 і найкращі результати за похибкою MAE навчальної та CV вибірок має наступна архітектура MLPR-2-30-15-1(LM), яка зображена на рисунку 2.



**Рисунок 2. Нейронна мережа MLPR-2-30-15-1(LM):**

$X_1, X_2, X_3$  – вхідні параметри нейромережі;  
 прихований шар 1 із кількістю нейронів у шарі  $n_1$ ;  
 прихований шар 2 із кількістю нейронів у шарі  $n_2$ ;  
 $Y_1$  – вихідний шар нейромережі

Для регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  найкращі результати на тестовій та CV вибірках отримано для наступних архітектур MLPR – 2-B-L із кількістю нейронів прихованих шарів  $n_1=10$ ,  $n=8$ .

Кількість нейронів першого та другого прихованого шару варіювалася, як і в попередньому випадку, при цьому найкращі результати для побудови регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  за похибкою MAE навчальної та CV вибірок має наступна архітектура MLPR-2-25-15-1(LM), яка має зовнішній вигляд, аналогічний до архітектури нейромережі для регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ , (нейромережі відрізняються кількістю нейронів у прихованих шарах).

В результаті навчання нейромереж отримано вагові коефіцієнти (також відомі як параметри моделі), які є числовими значеннями, що визначають вплив кожної вхідної змінної на вихід моделі. Вони є результатом процесу навчання нейронної мережі з використанням даних навчання.

Отримані вагові коефіцієнти відображають «знання», які нейронна мережа набула під час навчання на вхідних даних та надалі будуть використовуватися для отримання передбачення вихідного значення  $Y_1$  за результатами  $X_1, X_2, X_3$ . Чим більша точність моделі, тим більш значущими й точними є вагові коефіцієнти [12].

Результати роботи отриманих нейромереж для навчальної, тестової, CV вибірок і декількох передбачуваних значень для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  показано на рисунку 3, для  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  – на рисунку 4.

Отримані числові результати регресійного аналізу  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  показано в таблиці 1, де стовпчик 1 – це номінальне значення параметра  $Y_1$ , стовпчик 2 – отримане значення  $Y_1$  за допомогою НМ MLPR-2-30-15-1(LM), стовпчик 3 – відносна похибка  $\delta_i$ , %, розрахована в кожній точці вихідних даних.

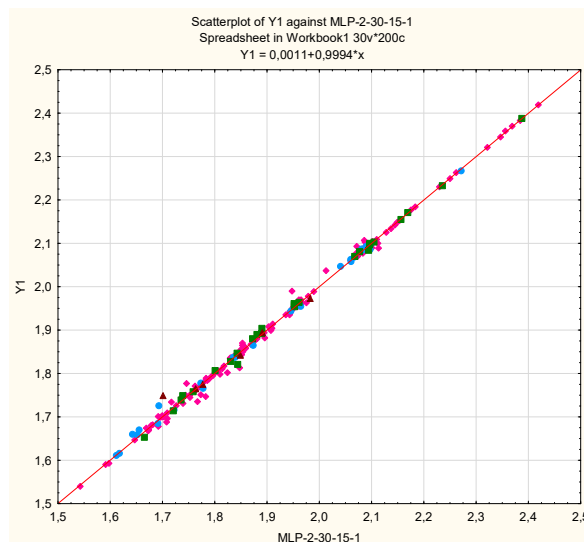


Рисунок 3. Діаграма розсіювання  
( $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ )

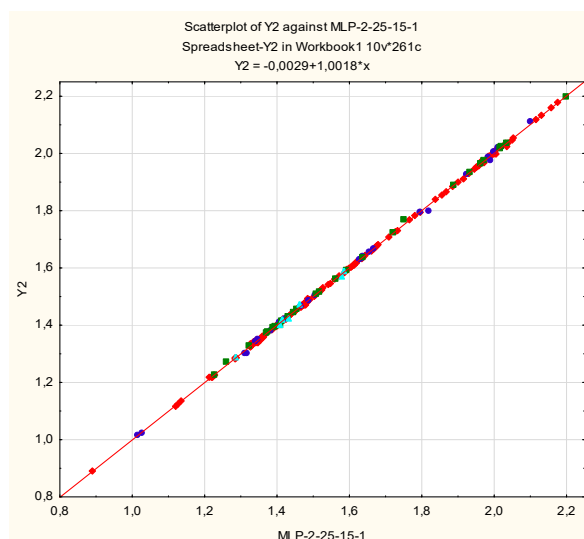


Рисунок 4. Діаграма розсіювання  
( $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ )

Отримані числові результати регресійного аналізу  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  показано в таблиці 2, де стовпчик 1 – це номінальне значення параметра  $Y_2$ , стовпчик 2 – отримане значення  $Y_2$  за допомогою НМ MLPR-2-25-15-1(LM), стовпчик 3 – відносна похибка  $\delta_i$ , %, розрахована в кожній точці вихідних даних.

Таблиця 1. Результати регресійного аналізу  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

№	$Y_1$	$Y_1$ регр.	Відносна похибка $\delta_i$ , %
1	1.99	1.9477	2.1239
2	1.96	1.9546	0.2708
3	1.7010	1.6916	0.5513
4	1.9138	1.9109	0.1503
5	1.6694	1.6726	-0.1924
6	1.7460	1.7373	0.4977
7	2.0766	2.0833	-0.3259
8	1.7617	1.7643	-0.1492
9	1.7503	1.7519	-0.0904
10	1.7688	1.7697	-0.0487
11	1.8432	1.8486	-0.2894
12	1.9783	1.9789	-0.0312
13	2.0914	2.0896	0.08729
14	1.9625	1.9752	-0.6465
15	1.8778	1.8756	0.1170
16	2.0367	2.0127	1.1782
17	1.6802	1.6783	0.1140
18	1.8598	1.8584	0.0786
19	2.0899	2.1007	-0.5140
20	2.3453	2.3467	-0.0608
...	...	...	...
180	2.3877	2.3872	0.0195
181	1.8210	1.8437	-1.2473
182	2.0997	2.0966	0.1497
183	1.6532	1.6652	-0.7300
184	2.2334	2.2354	-0.0895
185	2.0967	2.0963	0.0209
186	1.9610	1.9515	0.4822
187	1.8796	1.8721	0.3971
188	2.1027	2.1047	-0.0922
189	1.7137	1.7204	-0.3878
190	1.8282	1.8303	-0.1093
191	1.8066	1.8004	0.3410
192	2.1705	2.1690	0.0672
193	2.0979	2.0959	0.0972
194	1.9539	1.9524	0.0742
195	1.8942	1.8909	0.1765
196	1.7746	1.7771	-0.1411
197	1.7490	1.7010	2.7421
198	1.7645	1.7634	0.0644
199	1.8419	1.8490	-0.3857
200	1.9725	1.9825	-0.5074

Таблиця 2. Результати регресійного аналізу  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

№	$Y_2$	$Y_2$ регр.	Відносна похибка $\delta_i$ , %
1	1.68	1.6796	0.0181
2	1.56	1.5585	0.0932
3	1.3476	1.3513	-0.2758
4	1.5250	1.5234	0.1012
5	1.1172	1.1188	-0.1443
6	1.3978	1.3996	-0.1230
7	1.9522	1.9513	0.0466
8	1.4074	1.4060	0.0974
9	1.4012	1.4052	-0.2889
10	1.4256	1.4245	0.0779
11	1.4715	1.4724	-0.0585
12	1.6323	1.6334	-0.0674
13	1.9989	2.0048	-0.2932
14	1.6099	1.6120	-0.1331
15	1.2201	1.2223	-0.1787
16	1.6190	1.6189	0.0090
17	1.1362	1.1347	0.1342
18	1.5303	1.5271	0.2111
19	1.9941	1.9882	0.2957
20	1.8564	1.8559	0.0262
...	...	...	...
180	1.8890	1.8882	0.0381
181	1.4547	1.4529	0.1198
182	2.0250	2.0177	0.3604
183	1.3275	1.3226	0.3723
184	1.7703	1.7511	1.0857
185	2.0156	2.0159	-0.0148
186	1.5920	1.5906	0.0882
187	1.2274	1.2280	-0.0517
188	2.0344	2.0339	0.0222
189	1.3734	1.3714	0.1492
190	1.3961	1.3946	0.1032
191	1.4438	1.4448	-0.0728
192	1.7219	1.7194	0.1464
193	2.0193	2.0172	0.1034
194	1.5881	1.5864	0.1027
195	1.2875	1.2883	-0.0624
196	1.4173	1.4151	0.1595
197	1.4001	1.4101	-0.7097
198	1.4207	1.4330	-0.8677
199	1.4705	1.4618	0.5905
200	1.5696	1.5802	-0.6749

**Оцінка похибок, адекватності й інформативності отриманої регресійної моделі**

Оцінку похибок отриманих регресійних моделей виконано за допомогою загальновідомих формул: середньоквадратична помилка MSE (mean squared error performance function), сума квадратів відхилень SSE (sum squared error performance function), середня абсолютна похибка MAE (mean absolute error performance

function), сума відносних відхилень SRE (sum relative error performance function), середня відносна похибка MARE (mean absolute relative error performance function) або MAPE (mean absolute percentage error performance function) [13].

Результати розрахованих значень похибок вказані в таблиці 3 (для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ ) та таблиці 4 (для  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ ).

Таблиця 3. Зведена таблиця розрахованих значень похибок для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

Похибка	Навчальна $N=140$	Тестова $N=26$	CV $N=28$	Передбачення $N=6$
MSE	9.57142e-5	8.92307e-5	5.35714e-5	0.0004
SSE	0.0134	0.00232	0.0015	0.0024
MAE	0.00572	0.00638	0.00539	0.0118
SRE	0.428	0.092	0.0805	0.0397
MAPE, %	0.305	0.354	0.287	0.663

Таблиця 4. Зведена таблиця розрахованих значень похибок для  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

Похибка	Навчальна $N=139$	Тестова $N=26$	CV $N=28$	Передбачення $N=7$
MSE	8.58992e-6	5.03846e-5	2.21428e-5	6.58571e-5
SSE	0.00119	0.00131	0.00062	0.000461
MAE	0.00189	0.00439	0.00276	0.00651
SRE	0.17	0.0708	0.0496	0.0312
MAPE, %	0.122	0.272	0.177	0.446

Перевірку адекватності й інформативності метамоделей здійснено за допомогою загальновідомого критерію Фішера і шляхом розрахунку множинного коефіцієнта кореляції  $R^2$  та перевірки його статистичної значущості [14].

Результати розрахунку щодо оцінки адекватності й інформативності створеної регресійної НМ MLPR-2-30-15-1(LM) зображені в таблиці 5, для регресійної НМ MLPR-2-25-15-1(LM) – в таблиці 6.

Таблиця 5. Результати розрахунку щодо оцінки адекватності й інформативності створеної регресійної НМ MLPR-2-30-15-1(LM)

Компонент дисперсії $N=200$	Сума квадратів	Середній квадрат	Дисперсія	Стандартна похибка оцінки
регресії	$SS_D=6.607$	$MS_D=2.202$	$\sigma^2_D=0.0332$	$s_D=0.1822$
залишків	$SS_R=0.01973$	$MS_R=1.00663e-4$	$\sigma^2_R=1.0066e-4$	$s_R=0.01003$
загальної	$SS_T=6.62673$	$MS_T=0.0333$	$\sigma^2_T=0.0333$	$s_T=0.18248$

Таблиця 6. Результати розрахунку щодо оцінки адекватності й інформативності створеної регресійної НМ MLPR-2-25-15-1(LM)

Компонент дисперсії $N=200$	Сума квадратів	Середній квадрат	Дисперсія	Стандартна похибка оцінки
регресії	$SS_D=14.569$	$MS_D=4.856$	$\sigma^2_D=0.073211$	$s_D=0.27057$
залишків	$SS_R=0.00359$	$MS_R=1.831*10^{-5}$	$\sigma^2_R=1.831*10^{-5}$	$s_R=0.004279$
загальної	$SS_T=14.57259$	$MS_T=0.073229$	$\sigma^2_T=0.073229$	$s_T=0.2706$

Отримана регресійна модель  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  має середню похибку апроксимації  $MAPE = 0.32\%$ , експериментальне значення показника Фішера  $F^{експ}_{3;196} = 21874$ , а критичне значення цього критерію з рівнем значущості  $\alpha = 5\%$  та числом ступенів свободи  $v_R = 196$ ,  $v_D = 3$  становить  $F^{крит}_{\alpha;v_D;v_R} = F^{крит}_{0,05;3;196} = 2,65$ .

Отже, умова  $F^{експ}_{v_D;v_R} > F^{крит}_{\alpha;v_D;v_R}$ , де  $F^{експ}_{v_D;v_R} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується, регресійна модель

адекватна і прогноз результатів по моделі не суперечить дійсності.

Регресійна модель інформативна, оскільки  $R^2 > 0,95$  (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0.997$ ), та значимо достовірна за  $F$ -критерієм при рівні значущості  $5\%$ , оскільки умова  $F^{експ}_{v_D;v_R} > F^{крит}_{\alpha;v_D;v_R}$ , де  $F^{експ}_{v_D;v_R} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується для експериментального значення  $F^{експ}_{3;196} = 21601$ .

Отримана регресійна модель  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  має середню похибку апроксимації  $MAPE = 0.161\%$ , експериментальне значення показника Фішера  $F^{експ}_{3;196} = 265210$ , а критичне значення цього критерію з рівнем значущості  $\alpha = 5\%$  та числом ступенів свободи  $v_R = 196$ ,  $v_D = 3$  становить  $F^{крит}_{\alpha;v_D;v_R} = F^{крит}_{0,05;3;196} = 2,65$ .

Отже, умова  $F^{експ}_{v_D;v_R} > F^{крит}_{\alpha;v_D;v_R}$ , де  $F^{експ}_{v_D;v_R} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується, регресійна модель

адекватна і прогноз результатів по моделі не суперечить дійсності.

Регресійна модель інформативна, оскільки  $R^2 > 0,95$  (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0.99975$ ), та значимо достовірна за  $F$ -критерієм при рівні значущості  $5\%$ , оскільки умова  $F^{експ}_{v_D;v_R} > F^{крит}_{\alpha;v_D;v_R}$ , де  $F^{експ}_{v_D;v_R} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується для експериментального значення  $F^{експ}_{3;196} = 259935$ .

#### Аналіз отриманих результатів за гістограмою залишків

Залишки моделі – це різниця між фактичними значеннями залежної змінної та передбачуваними значеннями, які отримані з

регресійної моделі. Гістограма розподілу показує частоту, з якою значення залишків потрапляють у кожний інтервал значень.

Якщо гістограма розподілу залишків має нормальний розподіл, це свідчить про те, що регресійна модель досить точно передбачає значення залежної змінної, і немає систематичних помилок у передбаченнях.

Отже, аналіз залишків регресійної моделі за допомогою гістограми розподілу є важливим інструментом для перевірки точності регресійної моделі і виявлення можливих помилок у моделі.

Здійснено аналіз залишків за допомогою гістограм розподілу, які зображені на рисунках 5 та 6.

Візуальний аналіз гістограм залишків (рисунки 5, 6) показує, що вони розподілені за нормальним законом. Це, в свою чергу, означає, що моделі досить точно передбачають значення залежної змінної, і немає систематичних помилок у передбаченнях.

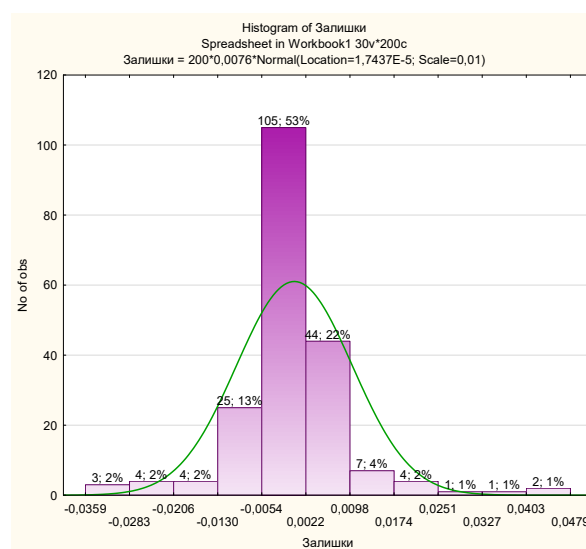


Рисунок 5. Гістограма залишків регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$

В середовищі MathCAD розроблено модель, яка дозволяє аналізувати отримані результати та здійснювати передбачення за створеною регресійною моделлю  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  на основі НМ MLPR-2-30-15-1(LM) та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  на основі НМ MLPR-2-25-15-1(LM).

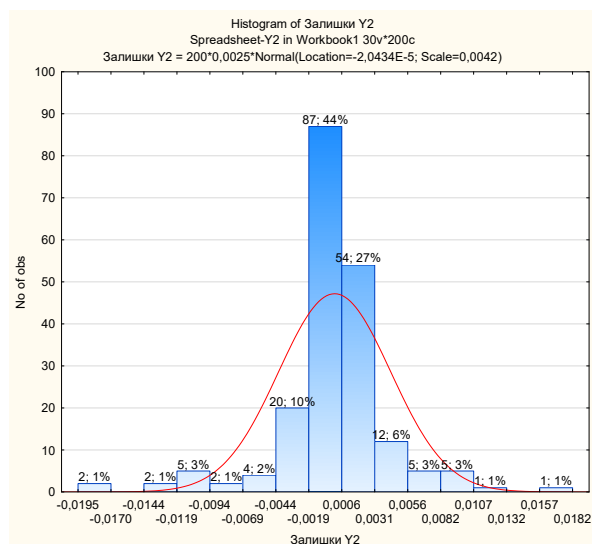


Рисунок 6. Гістограма залишків регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$

В цій розробленій моделі передбачено нормалізацію вхідних даних – процес приведення значень вхідних змінних до специфічного діапазону або розподілу, щоб забезпечити оптимальну роботу моделі і покращити її збіжність. Використаний метод нормалізації

$$Y_{регp.} = \sum_{m=1}^{number2} \left( \alpha_{outm} \cdot th \left( \left( \left( \sum_{k=1}^{number1} \left( \left( w_2^{(k)} \right)_m \cdot \left( th \left( \sum_{j=1}^{number\ input} \left[ \left( w_1^{(j)} \right)_k \cdot \left( X^{(j)} \right) \right] + b_{1k} \right) \right) \right) \right) \right) + b_{2m} \right) + b_{out} , \quad (1)$$

де  $\alpha_{out}$  – вагові коефіцієнти вихідного шару нейромережі вхідних параметрів;  $th$  – активувальна функція;  $w_2$  – вагові коефіцієнти 2-го прихованого шару нейромережі;  $w_1$  – вагові коефіцієнти 1-го прихованого шару нейромережі;  $X$  – нормалізація вхідних даних, за якими відбувається передбачення ширини різу;  $b_1$  – вагові коефіцієнти зміщення 1-го прихованого шару нейромережі;  $b_2$  – вагові коефіцієнти зміщення 2-го прихованого шару нейромережі;  $b_{out}$  – вагові коефіцієнти зміщення вихідного шару нейромережі.

**Результати досліджень.** За результатами роботи було визначено вхідні параметри гідроабразивного різання, які включають кількість подачі абразиву, величину тиску ріжучої рідини (води) та в'язкість оброблюваного матеріалу. Ці параметри використовуються для передбачення вихідного параметра – ширини різу. Виконано попередній аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійних моделей за допомогою спеціальної

відомий як тангенціальна нормалізація (tanh normalization). Цей метод застосовує гіперболічний тангенс (tanh) для нормалізації даних. Тангенціальна нормалізація часто використовується в нейромережних моделях, оскільки гіперболічний тангенс є нелінійною активувальною функцією, яка може приймати значення від -1 до 1. Це дозволяє зберегти інформацію про відносні розміри та взаємодії між змінними.

Відповідно виконана денормалізація вихідних даних (відновлення оригінальних значень після застосування нормалізації). Це важливий крок після отримання моделлю прогнозованих значень, які знаходяться в нормалізованому форматі і потребують повернення до їх вихідної шкали) [15, 16].

Розроблені моделі реалізують рівняння регресійної моделі (1) для передбачення ширини різу на вході та виході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал щодо таких вхідних параметрів, як величина тиску ріжучої рідини, кількість подачі абразиву, в'язкість матеріалу.

програми Neuro Solutions і на основі результатів попереднього аналізу було вибрано нейромережу MLPR-2-B-L з методом навчання Levenberg-Marquardt для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ , отримано вагові коефіцієнти цих нейромереж, що були використані для отримання передбачення вихідного значення  $Y_1$  (ширина різу на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал) та  $Y_2$  (ширина різу на виході ріжучого струменя з оброблюваного матеріалу) за результатами  $X_1, X_2, X_3$ . Також було проведено оцінку похибок, адекватності й інформативності отриманих регресійних моделей і проведено аналіз отриманих результатів за гістограмами залишків. На основі цих досліджень була розроблена програма в середовищі MathCAD, яка дозволяє аналізувати отримані результати та здійснювати передбачення за створеними регресійними моделями  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ .

Результати роботи отриманих з Neuro Solutions нейромереж зображені у вигляді діаграми розсіювання (рисунок 3, 4). Результат проведення оцінок похибок зображений у вигляді таблиць (таблиці 3, 4), аналіз інформативності та адекватності регресійних моделей зображений у вигляді таблиць (таблиці 5, 6), аналіз отриманих залишків моделі зображений у вигляді гістограми (рисунок 5, 6). Також продемонстровані рівняння регресійних моделей, які реалізує створена програма у середовищі MathCAD для здійснення передбачення.

**Обговорення результатів.** Отже, із залученням спеціального програмного забезпечення Neuro Solutions та MathCAD створено регресійні моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ , які дозволяють з високою точністю (розбіжність між результатами, отриманими за допомогою регресійної моделі, й експериментально отриманими даними становить 0,305 – 0,663 % для  $Y_1$  і 0,122 % – 0,446 % для  $Y_2$ ) визначати ширину різку щодо різних вхідних параметрів різання (кількість подачі абразиву, робочий тиск ріжучої рідини, в'язкість оброблюваного матеріалу).

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження були визначені вхідні параметри гідроабразивного різання (кількість подачі абразиву, величина тиску робочого середовища – води та в'язкість оброблюваного матеріалу), що використовуються для встановлення вихідного параметра – точності дотримання ширини різку.

Попередній аналіз різних архітектур нейромереж, здійснений за допомогою програми Neuro Solutions, показав, що найбільш оптимальними є неймережа MLPR-2-B-L з методом навчання Levenberg-Marquardt. За допомогою цієї моделі були отримані вагові коефіцієнти, які використовуються для передбачення значення ширини різку ( $Y_1$ ), ( $Y_2$ ) на основі вхідних параметрів ( $X_1, X_2, X_3$ ).

Було проведено оцінку похибок, адекватності й інформативності регресійних моделей, а також здійснено аналіз отриманих результатів за гістограмами залишків, що дозволяє зробити висновки про точність розроблених моделей.

На основі проведених досліджень була розроблена програма в середовищі MathCAD, яка дозволяє аналізувати отримані результати та здійснювати передбачення ширини різку за

допомогою розробленої регресійної моделі. Ця програма може бути використана для практичного застосування в галузі гідроабразивного різання листових матеріалів, забезпечуючи більш точні й ефективні результати.

*Наукова новизна:* в результаті проведеного дослідження вперше встановлено залежність вхідних параметрів гідроабразивного різання, таких як: кількість подачі абразиву, величина тиску робочої рідини (води) і в'язкість оброблюваного матеріалу, та їх впливу на точність дотримання ширини різку. Проведені дослідження підтверджують важливість цих параметрів у процесі різання матеріалів і надають підґрунтя для подальшого розвитку оптимальних стратегій контролю цих факторів. Також вперше було використано метод навчання Levenberg-Marquardt для побудови регресійної моделі з використанням нейромереж, що дозволяє дотримуватися заданої ширини різку на основі вхідних параметрів з високою точністю. Розроблена програма в середовищі MathCAD надає зручний інструмент для аналізу отриманих результатів та обрання найбільш раціонального режиму гідроабразивного різання, що сприяє ефективній оптимізації процесу оброблення.

*Практична значущість* цієї роботи полягає в тому, що розроблена регресійна модель може бути використана в промисловості для оптимізації процесу гідроабразивного різання. Знання вхідних параметрів, які впливають на точність дотримання ширини різку, дозволяють налаштувати обладнання і регулювати параметри різання для досягнення необхідної якості оброблення.

Застосування розробленої регресійної моделі дозволяє визначати необхідну ширину різку із заданою точністю на основі вхідних даних без потреби у проведенні додаткових експериментів. Це значно зекономить час та ресурси, які раніше були витрачені на тестування різних комбінацій параметрів.

Крім того, розроблені методи аналізу та моделювання можуть бути використані для вдосконалення систем автоматичного керування гідроабразивними комплексами, що дозволить забезпечити більш точне і стабільне керування процесом різання, підвищити якість оброблення матеріалів та знизити відхилення від заданих параметрів.

Отже, практична значущість роботи полягає в покращенні ефективності та якості гідроабразивного різання, а також у зниженні

витрат часу та ресурсів на експериментальні дослідження та налаштування обладнання.

У подальших дослідженнях планується провести дослідження на різних типах матеріалів та за різних умов різання. Для підтвердження результатів моделювання будуть проведені експериментальні випробування в реальних умовах дії гідроабразивних систем. Це дозволить порівняти отримані результати з практичними даними та оцінити ефективність розробленої моделі.

### Список використаних джерел

- [1] R. Vijayakumar, N. Srirangarajulu, M. Santhanakumar, N. E. Edwin Paul, and M. Rajesh, "Investigation of abrasive aqua jet hole making (AAJHM) parameters using desirability analysis on Inconel-625 space alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 311-328, 2023. ISSN 1526-6125. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.03.008.
- [2] R. K. Thakur, and K. K. Singh, "Evaluation of hole quality to explore the influence of graphene nanoplatelets embedded in epoxy/carbon composite during abrasive water jet drilling", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 85, pp. 569-583, 2023. ISSN 1526-6125. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.054.
- [3] J. Chen, Y. Yuan, H. Gao, T. Zhou, and Z. Wu, "Predictive modeling approach for the jet lag in multi-pass cutting of thick materials using abrasive waterjet", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 83, pp. 143-156, 2022. ISSN 1526-6125. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.08.059.
- [4] Zh. Liao, D. Xu, D. Axinte, J. Diboine, and A. Wretland, "Surface formation mechanism in waterjet guided laser cutting of a Ni-based superalloy", *CIRP Annals*, vol. 70, iss. 1, pp. 155-158, 2021. ISSN 0007-8506. doi: 10.1016/j.cirp.2021.03.007.
- [5] X. Liu, Z. Liang, G. Wen et al., "Waterjet machining and research developments: a review". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 1257-1335, 2019. doi: 10.1007/s00170-018-3094-3.
- [6] "Про технологію гідроабразивного різання матеріалів" [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.roden.ua/waterjet-cutting-technology.html#>. Дата звернення: Квіт. 1, 2023.
- [7] J. J. R. Jegaraj, and N. R. Babu, "A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 12-13, pp. 1443-1450, 2005. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.020.
- [8] M. Monno, and C. Ravasio, "The effect of cutting head vibrations on the surfaces generated by waterjet cutting", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 3, pp. 355-363, 2005. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.07.010.
- [9] D. A. Axinte, D. S. Srinivasu, M. C. Kong, and P. W. Butler-Smith, "Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, iss. 10, pp. 797-803, 2009. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.04.003.
- [10] M. K. Kulekci, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, iss. 12, pp. 1297-1306, 2002. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00069-X.
- [11] J. Billingham, C. B. Miron, D. A. Axinte, and M. C. Kong, "Mathematical modelling of abrasive waterjet footprints for arbitrarily moving jets: Part II – Overlapped single and multiple straight paths", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 68, pp. 30-39, 2013. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.01.003.
- [12] С. О. Субботін, *Нейронні мережі: теорія та практика*. Житомир, Україна: Вид. О. О. Євенок, 2020.
- [13] А. О. Олійник, С. О. Субботін, та О. О. Олійник, *Інтелектуальний аналіз даних*. Запоріжжя, Україна: ЗНТУ, 2012. ISBN 978-617-529-052-1.
- [14] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 74, с. 60-72, 2018. doi: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.

- [15] В. О. Гороховатський, та І. С. Творошенко, *Методи інтелектуального аналізу та оброблення даних*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2021.  
doi: 10.30837/978-966-659-298-2.
- [16] П. М. Павленко, С. Ф. Філоненко, О. М. Чередніков, та В. В. Трейтяк, *Математичне моделювання систем і процесів*. Київ, Україна: НАУ, 2017.
- ### References
- [1] R. Vijayakumar, N. Srirangarajalu, M. Santhanakumar, N. E. Edwin Paul, and M. Rajesh, "Investigation of abrasive aqua jet hole making (AAJHM) parameters using desirability analysis on Inconel-625 space alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 311-328, 2023. ISSN 1526-6125.  
doi: 10.1016/j.jmapro.2023.03.008.
- [2] R. K. Thakur, and K. K. Singh, "Evaluation of hole quality to explore the influence of graphene nanoplatelets embedded in epoxy/carbon composite during abrasive water jet drilling", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 85, pp. 569-583, 2023. ISSN 1526-6125.  
doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.054.
- [3] J. Chen, Y. Yuan, H. Gao, T. Zhou, and Z. Wu, "Predictive modeling approach for the jet lag in multi-pass cutting of thick materials using abrasive waterjet", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 83, pp. 143-156, 2022. ISSN 1526-6125.  
doi: 10.1016/j.jmapro.2022.08.059.
- [4] Zh. Liao, D. Xu, D. Axinte, J. Diboine, and A. Wretland, "Surface formation mechanism in waterjet guided laser cutting of a Ni-based superalloy", *CIRP Annals*, vol. 70, iss. 1, pp. 155-158, 2021. ISSN 0007-8506.  
doi: 10.1016/j.cirp.2021.03.007.
- [5] X. Liu, Z. Liang, G. Wen et al., "Waterjet machining and research developments: a review". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 1257-1335, 2019.  
doi: 10.1007/s00170-018-3094-3.
- [6] "On the technology of hydroabrasive cutting of materials" [Online]. Available: <https://www.roden.ua/waterjet-cutting-technology.html#>. Accessed on: April 1, 2023 [in Ukrainian].
- [7] J. J. R. Jegaraj, and N. R. Babu, "A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 12-13, pp. 1443-1450, 2005. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.020.
- [8] M. Monno, and C. Ravasio, "The effect of cutting head vibrations on the surfaces generated by waterjet cutting", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 3, pp. 355-363, 2005. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.07.010.
- [9] D. A. Axinte, D. S. Srinivasu, M. C. Kong, and P. W. Butler-Smith, "Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, iss. 10, pp. 797-803, 2009. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.04.003.
- [10] M. K. Kulekci, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, iss. 12, pp. 1297-1306, 2002. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/S0890-6955(02)00069-X.
- [11] J. Billingham, C. B. Miron, D. A. Axinte, and M. C. Kong, "Mathematical modelling of abrasive waterjet footprints for arbitrarily moving jets: Part II – Overlapped single and multiple straight paths", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 68, pp. 30-39, 2013. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.01.003.
- [12] S. O. Subbotin, *Neural networks: theory and practice*. Zhytomyr, Ukraine: O. O. Evenok (Ed.), 2020 [in Ukrainian].
- [13] A. O. Oliynyk, S. O. Subbotin, and O. O. Oliynyk, *Intelligent data analysis*. Zaporizhzhia, Ukraine: ZNTU, 2012. ISBN 978-617-529-052-1 [in Ukrainian].
- [14] V. Ya. Galchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Application of neurocomputing at the stage of building metamodels in the process of optimal surrogate synthesis of antennas", *Visnyk NTUU «KPI». Seriya: Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia*, no. 74, pp. 60-72, 2018 [in Ukrainian].  
doi: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.

- [15] V. O. Horokhovatsky, and I. S. Tvoroshenko, *Methods of intellectual analysis and data processing*. Kharkiv, Ukraine: KHNURE, 2021 [in Ukrainian]. doi: 10.30837/978-966-659-298-2.
- [16] P. M. Pavlenko, S. F. Filonenko, O. M. Cherednikov, and V. V. Treytyak, *Mathematical modeling of systems and processes*. Kyiv, Ukraine: NAU, 2017. [in Ukrainian].

**V. V. Khlivnyi,**

e-mail: vitalik.xlywnij@gmail.com

**C. V. Bazilo, Dr. Sc., Professor**

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

### INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS OF HYDROABRASIVE CUTTING OF VARIOUS MATERIALS ON THE ACCURACY OF OBSERVING THE CUTTING WIDTH

*This article considers the issue of building regression models to determine the influence of operating parameters of hydroabrasive cutting of various materials on the accuracy of observing the cutting width. Input parameters include the amount of abrasive feed, the amount of pressure of cutting fluid (water) and the viscosity of the processed material, and the output parameter is the cutting width. For more precise control of the cutting width, another initial parameter is taken into account - the cutting width at the exit from the material. This parameter of hydroabrasive cutting is important to achieve the desired accuracy and quality of cutting. A preliminary analysis of possible neural network architectures for building regression models has been performed using Neuro Solutions software. The MLPR-2-B-L neural network with the Levenberg-Marquardt learning method has been selected according to analysis results. The application of this model makes it possible to obtain weighting factors that have been used to predict the initial value of the cutting width at the input of the cutting jet to the processed material and at the exit of the cutting jet from the processed material based on the input parameters. An assessment of errors, adequacy and informativeness of regression models has been carried out. The use of histograms of residuals makes it possible to analyze the obtained results. In addition, a program in the MathCAD environment, which allows to analyze the obtained results and predict the cutting width based on the created regression model both at the input of the cutting jet into the processed material and at the exit from the material, has been developed. The obtained results determine the importance of the input parameters of hydroabrasive cutting and demonstrate the possibility of using them to predict the cutting width. This work is of practical importance for industrial enterprises that use hydroabrasive cutting, because accurate predictions of the cutting width allow to optimize the cutting process, ensuring high quality and efficiency and accuracy of work.*

**Keywords:** hydroabrasive cutting, cutting width, regression model, abrasive nozzle wear, process controllability, processing accuracy.