

Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»
НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ
ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування

«На правах рукопису»
УДК 621.91

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
Олександр Охріменко
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

“ ” _____ 2023р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: Дослідження впливу режимів різання на шорсткість поверхні при
обробленні кінцевими фрезами

Виконав:
студент 2 курсу, групи МТ-21мп

Коровкін Володимир Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

к.т.н., доц. Кореньков В.М.

Науковий керівник

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

к.т.н., доц.каф. КМ Красновид Д.О.

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2023

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально – науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра технології машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр Охріменко

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

_____ Коровкін Володимир Андрійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження впливу режимів різання на шорсткість поверхні при обробленні кінцевими фрезами

науковий керівник: к.т.н., доц. Кореньков В.М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «01» листопада 2023р. № 5127-с

2. Термін подання студентом дисертації « ____ » _____ 20__ р.

3. Об'єкт дослідження: Шорсткість поверхні, та вплив на неї вхідних факторів, а саме режимів різання.

4. Вихідні дані: матеріал оброблюваних деталей сталь Сталь 40Х; різальний інструмент – фрези 5..10мм; діапазон подач 0,02 та 0,1 мм/зуб; діапазон швидкості обертання шпинделя між 1000 та 9000 об/хв; використання МОР

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести експеримент; на основі отриманих результатів розробити математичну модель, яка враховує вплив режимів різання на шорсткість поверхні під час фрезерування вертикальних поверхонь зі сталі 40X.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 15..20 слайдів MS Power Point

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел	Вересень 2023	
2	Постановка задачі, вибір та ознайомлення з програмними продуктами для розрахунку математичних моделей	Жовтень 2023	
3	Планування експерименту	Жовтень 2023	
4	Проведення експерименту	Листопад 2023	
5	Обробка результатів та розрахунок математичних моделей	Листопад 2023	
6	Розробка стартап проєкту	Грудень 2023	
7	Оформлення дисертації та ілюстративного матеріалу	Грудень 2023	

Студент

Коровкін Володимир

Науковий керівник

Володимир Кореньков

ЗМІСТ

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	8
1.1. Прогнозування шорсткості поверхні на верстатах з ЧПК.....	8
1.2. Розробка прогностичних моделей.....	9
1.3. Огляд методів прогнозування.....	10
2. РЕГРЕСІЙНІ МОДЕЛІ	29
2.1. Загальні відомості	29
2.2. Метод найменших квадратів	30
3. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	38
3.1. Формулювання задачі.....	38
3.2. Дослідна частина.....	38
3.2.1. Визначення параметрів.....	41
3.2.2. Проведення дослідів.....	43
3.3. Обробка отриманих результатів.....	46
3.4. Аналіз адекватності моделі.....	47
3.5. Аналіз інформативності моделі.....	48
3.6. Висновок	53
4. СТАРТАП	55
4.1. Опис ідеї проекту	55
4.2. Аналіз переваг стартапу порівняно із пропозиціями конкурентів	56
4.3. Технічний аудит ідеї проекту	60
4.4. Аналіз ринкових можливостей.....	61
4.5. Розроблення ринкової стратегії проекту	67
4.6. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	71

4.7. Висновки	72
5. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	73

АННОТАЦІЯ

В даному дослідженні було розроблено математичну модель, яка враховує вплив режимів різання на шорсткість поверхні під час фрезерування вертикальних поверхонь зі сталі 40X.

Спочатку було проведено експеримент з урахуванням усіх факторів впливу, на основі якого розроблено математичну модель, що описує залежність шорсткості поверхні від параметрів різання, таких як глибина різання, швидкість подачі, швидкість різання, і звичайно, наявність МОР.

Наступним кроком було оцінено адекватність моделі за допомогою програмного забезпечення PRIAM. Також, за допомогою цієї ж програми, було визначено вплив різних факторів на відгук.

Ключові слова: шорсткість поверхні, режими різання, статистичні методи, повний факторний експеримент, емпірична залежність, математична модель.

ABSTRACT

In this study, a mathematical model was developed to account for the influence of various factors on surface roughness during milling of vertical planes with 40X steel.

Initially, an experiment was conducted considering all influencing factors, based on which a mathematical model describing the dependence of surface roughness on cutting parameters such as cutting depth, feed rate, cutting speed, and the presence of coolant was developed. The adequacy of the model was then evaluated using the PRIAM software.

Additionally, the PRIAM software was utilized to determine the impact of different factors on the response.

Keywords: surface roughness, cutting parameters, statistical methods, full factorial experiment, empirical dependence, mathematical model.

РЕФЕРАТ

Обсяг виконаної роботи: Магістерська дисертація складається з 4 розділів. Робота містить 78 аркушів, 27 таблиць, 20 рисунків, 23 посилання на літературні джерела, а також 21 формулу..

Актуальність теми: Застосування методів прогнозування має важливе значення для індустрії металообробки. Для кожної галузі є проблемою домогтися завчасно визначених параметрів продуктивності з першої спроби. Прогнозуюча модель дуже важлива у виробничій галузі, щоб ефективно реагувати на високу конкуренцію і постійно зростаючий попит на якісний продукт з мінімальною вартістю на ринку.

Мета та завдання: Мета цієї роботи полягає в розробці математичної моделі, яка б враховувала вплив різноманітних факторів на шорсткість поверхні під час фрезерування поверхонь.

Об'єкт дослідження: Шорсткість поверхні, та вплив на неї режимів різання.

Предмети дослідження: процес фрезерування на верстатах з ЧПК поверхонь кінцевими фрезами.

Практичне значення отриманих результатів:

Модель, що було отримано в ході проведення експерименту та аналізу отриманих результатів, можна використовувати для прогнозування шорсткості поверхні, з можливим проведенням додаткових подальших експериментів та покращень.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1. Прогнозування шорсткості поверхні на верстатах з ЧПК

У сучасних швидкозмінних умовах виробничих галузей, застосування методів прогнозування має важливе значення для індустрії металообробки. Для кожної галузі є проблемою домогтися завчасно визначених параметрів продуктивності з першої спроби. Прогнозуюча модель дуже важлива у виробничій галузі, щоб ефективно реагувати на високу конкуренцію і постійно зростаючий попит на якісний продукт з мінімальною вартістю на ринку.

Прогнозуючі моделі в металообробних галузях вважаються ключовим інструментом для постійного поліпшення якості продукції, а також мінімізації її собівартості. Оптимізація може бути здійснена за допомогою прогновної моделі. Визначення оптимального вихідного параметра для заданого параметра ефективності за допомогою рентабельної математичної моделі є дуже складним завданням. Проте, з роками методи прогнозування зазнали різного розвитку та розширення.

Металообробка є найважливішим і широко поширеним процесом виробництва. Останнім часом операції по металообробці виконуються за допомогою верстатів з числовим програмним керуванням (надалі ЧПК).

Дослідження металообробки направлено на матеріал ріжучого інструменту, заготовку, оброблювальну поверхню, вхідні параметри і вихідні параметри. Існує необхідність в мінімізації загальних витрат на розробку виробу через високу конкуренцію на ринку зараз. Значне покращення якості виробу можна досягнути за допомогою прогнозуючої моделі при тих самих витратах. Існує ряд вхідних параметрів, що використовуються в ЧПК, в яких швидкість обертання шпинделя, швидкість подачі та глибина різання мають особливе значення.

В індустрії металообробки також існує багато показників ефективності, таких як швидкість видалення матеріалу, час обробки, зношення інструменту,

шорсткість поверхні, потужність тощо. Шорсткість поверхні є найважливішим показником, оскільки вона впливає одразу на багато факторів, таких як точність, тертя, втомлюваність, послідовну обробку, корозійну стійкість, зовнішній вигляд і звичайно – вартість. Існує велика кількість нетрадиційних методів для розробки прогнозуючої моделі. І далі, буде огляд деяких робіт, виконаних в даній області.

1.2. Розробка прогностичних моделей

При розробці регресійної моделі для передбачення значення шорсткості поверхні слід дотримуватися параметрів, які повинні бути уважно відстежені. До таких параметрів відносяться:

Матеріали заготовки – існує величезна кількість матеріалів, що використовуються при розробці прогностичних моделей. Серед них сталь AISI, сплав Ti-6Al-4V (клас 5), сталь AISI 1045, м'яка сталь, Al 7075-T6, композит GFRP/Ероху, сталь AISI 4340, Al 6061, скловолокно, AA 6351, сталь St 50.2, сталь 190 BHN, 95MnPb28K тощо.

Матеріали інструменту – для розробки прогностичної моделі використовують різні матеріали ріжучих інструментів, такі як карбід, TaeguTecRCMT10T300, MTT3500, вольфрамовий карбід, інструмент з швидкоріжучої сталі (H.S.S.), SNMG 120408, фрезерний інструмент ISCAR, алмазний ріжучий інструмент PCD, карбідний інструмент SNTR, алмазний шліфувальний інструмент CBN, AVMT 0903 PER-EMCTT 8020, цементований карбідний інструмент, SECO-DCMY11Y304F7, TPUN160308P10 тощо.

Вхідні дані – існує декілька вхідних даних, що використовуються для розробки прогностичної моделі, щоб отримати параметри продуктивності операції обробки, такі як матеріал ріжучого інструменту, кут ріжучої кромки інструменту, швидкість подачі, швидкість різання, вібрація, типи утворення стружки, матеріал заготовки та його властивості.

Параметри продуктивності – існує багато параметрів продуктивності в

прогностичній моделі: швидкість видалення матеріалу; час обробки; загальна вартість; знос інструменту; вібрація; шорсткість поверхні.

1.3. Огляд методів прогнозування

Існують різні методи прогнозування, які були застосовані різними дослідниками, наведені нижче:

- Штучні нейронні мережі (ШНМ);
- Генетичні алгоритми (ГА);
- Нечітка логіка;
- Метод Тагучі;
- Метод поверхневого відгуку;
- Адаптивна нейро-нечітка система (*ANFIS*);
- *SMO-SVM*;
- Дерево рішень;
- Регресійна модель.

Розглянуті далі дослідження підкреслюють важливість використання штучного інтелекту і прогностичних моделей в області металорізання покращення точності прогнозування шорсткості і оптимізації процесів обробки. Вони також підтверджують високу ефективність таких методів порівняно з традиційними методами моделювання та оптимізації.

Girish Kant та *Kuldip Singh Sangwan* (2015) [1] запропонували альтернативний метод прогнозування оптимального значення параметрів обробки, який у свою чергу, призводить до покращення шорсткості поверхні. Вони розробили прогностичну та оптимізаційну модель, об'єднав два підходи штучного інтелекту: штучній нейронні мережі (ШНМ) та генетичний алгоритм (ГА). Вони також виявили, що прогнозований результат був дуже близький до експериментальних значень (до 4,11% середньої абсолютної похибки), що є доказом того, що створена модель має високу точність у прогнозуванні значень

шорсткості поверхні.

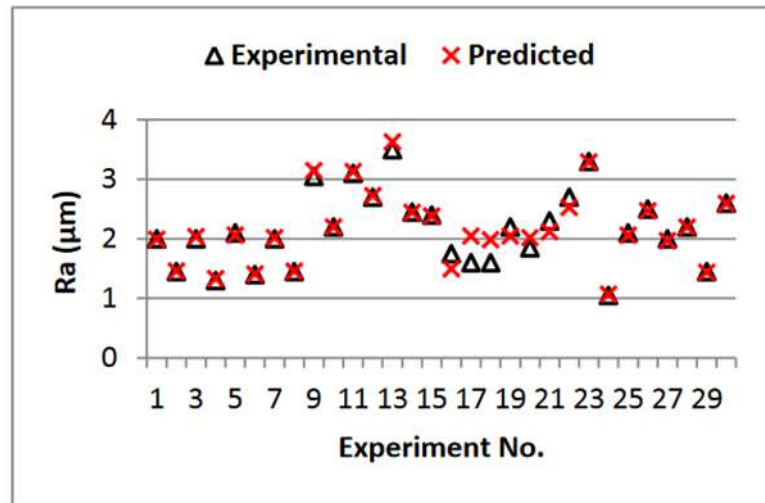


Рисунок 1.1 - Порівняння отриманих/прогнозованих результатів

Вони також порівняли свої результати з результатами отриманими з використанням регресивних моделей та моделей нечіткої логіки. Вони дійшли висновку, що моделі ШНМ перевершують моделі регресії та нечіткої логіки. Вони також провели перевірку гіпотези, результат якої підтвердив, що використання ШНМ в якості моделі прогнозування має статично задовільну відповідність з точки зору моделювання. В дослідженні вони використовували ШНМ як модель прогнозування а генетичний алгоритм як модель оптимізації в процесі обробки, що дає точність 95,89% і мінімальне значення шорсткості 0,099 мікрометра.

Kuldip Singh Sangwan та *Sachin Saxena* (2015) [2] запропонували ідею об'єднання двох методів використання штучного інтелекту для більшої ефективності та результативності. В даній статі розглядається підхід визначення оптимальних параметрів для обробки, що призводить до мінімізації шорсткості поверхні шляхом інтеграції ШНМ та ГА. Вони перевірили можливість використання ШНМ та ГА як для прогнозування, так і для оптимізації з використанням реального набору даних, отриманого з реального експерименту по обробці. Вони взяли сплав Ti-6Al-4V для операції токарної

обробки, а також розробили нейронну мережу прямого розповсюдження. Для навчання і тестування нейронної мережі використовувався пакет MATLAB. Вони виявили, що очікувані і прогностичні результати були практично однаковими. В цій статті показано, що інтегрований підхід ШНМ-ГА здатен прогнозувати оптимальні результати. Середня абсолютна похибка в цьому експерименті була 1,79%.

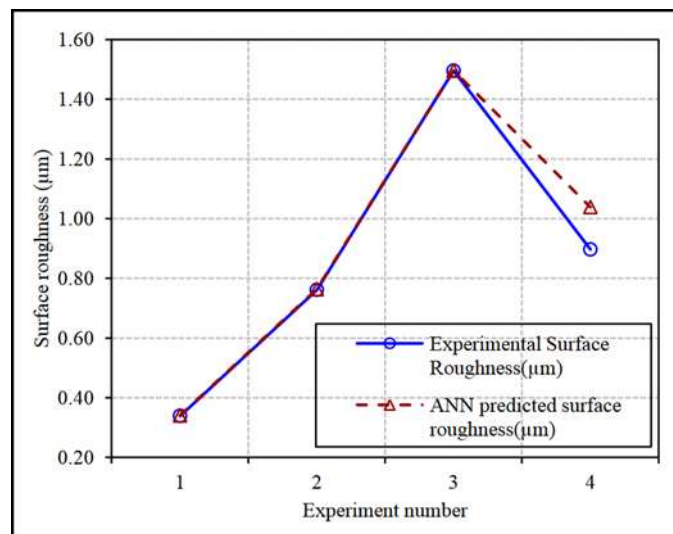


Рисунок 1.2. - Порівняння отриманих/прогнозованих результатів

Girish Kant та *Kuldip Singh Sangwan* (2015) [3] використали ШНМ в якості прогностичної моделі для оптимізації вимог до потужностей, необхідних для механічної обробки. Прогнозування потреб в енергії стало дуже важливою задачею для планування процесів у виробництві у наші дні. В цій статті було використано два методи з використанням штучного інтелекту: ШНМ та SVR (опорно-векторна регресійна модель), які використовувались для прогнозування енергоспоживання при обробці. Спочатку був проведений реальний експеримент з механічної обробки, щоб перевірити можливості цих моделей.

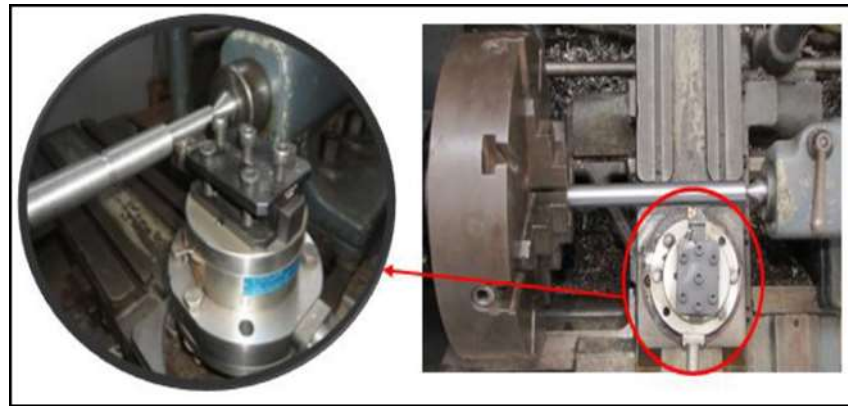


Рисунок 1.3. - Експериментальна установка для цього дослідження

Вони розробили план з трьох факторів і чотирьох рівнів з використанням методу Тагучі, щоб визначити вплив всіх параметрів з мінімальною кількістю експериментів. Потужність, передбачену обома методами, було порівняно, і виявилося, що ШНМ дає кращий результат, ніж SVR. Вони отримали середню похибку 1.749 для ШНМ, тоді як середня похибка SVR склала 1,86.

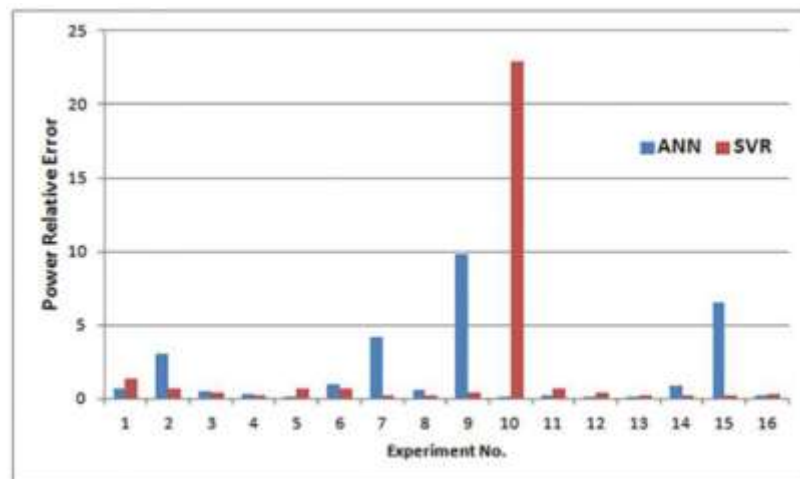


Рисунок 1.4. - Відносна похибка потужності (%) для ANN та SVR

Rajesh і *Manu* (2014) [4] працювали над прогнозуванням шорсткості поверхні вільної форми з використанням штучної нейронної мережі. Поверхні вільної форми створювались з використанням станка з ЧПК. Такі поверхні мають широке застосування в авіаційній галузі, тому витримка заданої шорсткості поверхні є надзвичайно важливою задачею для цієї індустрії. В

досліді використовувався фрезерний станок з ЧПК для створення поверхонь вільної форми. Для мінімізації похибки в прогнозуванні шорсткості поверхні використовували нейронну мережу зі зворотнім розповсюдженням. Була досягнута точність 96,37% за допомогою використання цієї прогностичної моделі на основі штучної нейронної мережі.

B.Anuja і Kirubakaran (2014) [5] розробили прогностичну модель на основі ШНМ для симуляції твердотільної токарної обробки сталі AISI H13 з мінімальним використанням ЗОР для перебачення шорсткості обробленої поверхні з урахуванням параметрів різання. Вони навчали мережі, використовуючи різні набори тренувальних даних протягом фіксованої кількості циклів, і тестували їх, використовуючи набір вхідних або вихідних даних, призначених для цієї мети. Вони проаналізували можливість ШНМ моделі прогнозувати шорсткість поверхні та визначили середньоквадратичну похибку для обраної архітектури. Вони використовували мінімальну кількість мастильно-охолоджувальної рідини, щоб забезпечити екологічно чисте середовище в цеху та мінімізувати ризики, пов'язані зі шкідливими аерозолями та використанням великої кількості мастильно-охолоджувальної рідини. Їх дослідження було сфокусовано на розробці моделі прогнозування шорсткості обробленої поверхні з використанням мінімальної кількості мастильно-охолоджувальної рідини. Вони досягли середньої точності до 95,96% навіть при меншому розмірі набору тренувальних даних, що свідчить про те, що зі збільшенням розміру набору тренувальних даних середня точність моделі прогнозування зростає.

Sarosh Hashmi (2014) [6] підкреслив важливість шорсткості поверхні, яка відіграє неймовірно важливу роль у якості оброблюваної поверхні. Він запропонував ідею розробити математичну модель, яка може передбачити точне і правильне значення шорсткості поверхні, а також пов'язані з нею умови обробки, що забезпечують мінімальне значення шорсткості поверхні. Він використовував реальні експериментальні дані з процесу кінцевого

фрезерування для розробки прогнозної моделі шляхом застосування двох методів машинного навчання. Один з них - дерево рішень, а інший - машина послідовної мінімальної оптимізації на основі опорних векторів. Для навчання прогнозної моделі та її тестування використовувався один і той самий набір даних. У цій статті результати, отримані за допомогою цих моделей, порівнюються з результатами попередніх досліджень. Було виявлено, що дерево рішень дає мінімальне значення шорсткості поверхні до 0,182 мкм. Використовуючи модель *SMO-SVM* та дерево рішень, було отримано кращий результат, ніж регресійна модель та загальнозживана модель ШНМ. Таким чином, є можливість дослідити різні методи для прогнозування.

Thakur Paramjit Mahesh (2014) [7] описав застосування методу Тагучі, інтегрованого з нечіткою логікою, для мінімізації шорсткості поверхні одночасно з максимізацією швидкості знімання матеріалу. Такі параметри, як швидкість, подача, глибина різання та радіус різальної поверхні були взяті до уваги як вхідні параметри для кінцевої фрезерної обробки на ЧПК для обробки аерокосмічного алюмінієвого сплаву Al 7075 T6. За методом Тягучі було обрано ортогональний масив L27 з 4 факторами та 3 рівнями і розраховано співвідношення С/Ш(сигнал/шум). У цій роботі співвідношення С/Ш для шорсткості та швидкості знімання матеріалу були використані як вхідні дані для системи нечіткої логіки, а вихідні дані були отримані у вигляді індексу продуктивності багатофакторної обробки (MRPI). Глибина різання і радіус ріжучої поверхні були визначені як найбільш значущі параметри, які вносять близько 31% варіації за допомогою ANOVA. Для підтвердження цього підходу був проведений експеримент:

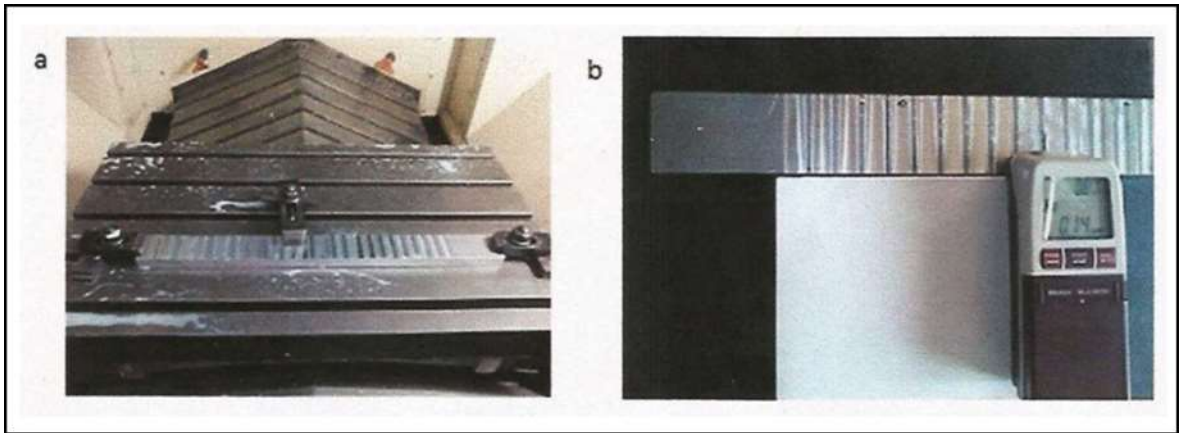


Рисунок 1.5. - а) експериментальна установка, б) вимірюючий інструмент

Цей експеримент показав, що існує значне покращення MRPI оптимальних параметрів процесу порівняно з MRPI початкових параметрів процесу. У цій статті представлено інтегрований нечіткий метод Тагучі для оптимізації параметрів процесу при кінцевому фрезеруванні з ЧПК для алюмінієвого сплаву Al 7075T6 з різними експлуатаційними характеристиками.

Робота, представлена *Hari Vasudevan і Deshpande (2014) [8]*, присвячена оптимізації параметрів обробки для токарного ЧПК для обробки склопластику (GFRP) або епоксидних композитів. Вони використовували гібридну методику оптимізації, тобто нечітку логіку в поєднанні з методологією Тагучі для оптимізації параметрів процесу.

Для експерименту було обрано три рівні з чотирьох параметрів процесу, а саме: радіус носової частини інструменту, швидкість різання, швидкість подачі та глибина різання. Були обрані такі вихідні показники, як шорсткість поверхні, тангенціальна сила різання і швидкість знімання матеріалу (MRR).

Планування експерименту проводилося з використанням ортогонального масиву L27 за методикою Тагучі. Для обробки було обрано ріжучий інструмент з полікристалічного сплаву. Було отримано коефіцієнт кореляції для трьох показників продуктивності та перетворено в єдиний індекс багатофункціональної характеристики (MPCI) за допомогою системи нечіткого висновку типу Мамдані. MPCI оптимізовано за допомогою методу Тагучі.

Радіус інструменту 0,8 мм, швидкість різання 120 м/хв, подача 0,05 мм/об і глибина різання 1,6 мм дали оптимальне значення для цієї обробки. У цьому дослідженні було розроблено нечітке правило на основі 3 вхідних змінних з використанням 1 вихідної змінної.

N.Baskar (2012) [9] запропонував інноваційний підхід, здійснивши інтеграцію нечіткої логіки (FL) з методологією поверхні відгуку (RSM). Ця інтеграція введена для зменшення вартості та витрат часу на дослідження оптимального процесу різання. Також було проведено детальний аналіз сили тяги для характеристики процесу різання. Вони зазначили, що швидкість обертання шпинделя і швидкість подачі є важливими факторами, які відіграють ключову роль в обробці поверхні заготовки. Вони дослідили оптимальний вплив комбінації низьких, середніх і верхніх рівнів швидкості обертання шпинделя з низькими і верхніми рівнями швидкості подачі на обробку поверхні і силу різання за допомогою експериментальної установки. На основі зібраних експериментальних даних було розроблено FL-модель для шорсткості поверхні та сили різання. FL-модель розробила дві комбінації даних без експерименту за допомогою MATLAB. Отриманий результат відображає, що прогнозовані значення FL знаходяться в межах діапазону експериментальних значень, тому значення FL були обрані для подальшого дослідження за допомогою RSM і вони генерують результат FL-RSM моделі. Результати, отримані за допомогою FL-RSM моделі, також знаходяться в межах діапазону експериментальних значень і дають більш ефективні результати, ніж модель FL. Ця стаття довела, що поєднання методів III, таких як нечітка логіка, з іншими методами дає більш точний та ефективний результат, ніж окремий метод III.

Leo Dev Wins (2012) [10] запропонував прогнозну модель з мінімальним застосуванням рідини при фрезерній обробці за допомогою штучної нейронної мережі. Модель була розроблена для прогнозування шорсткості поверхні з точки зору параметрів рідини, таких як частота імпульсів, швидкість подачі рідини і тиск на інжекторі рідини. Вони дослідили, що така модель матиме

велике значення в автоматизованому контролі параметрів рідини для підтримання шорсткості поверхні в межах заданого допуску в автоматизованому виробництві. Декілька архітектур нейронної мережі були навчені протягом певної кількості циклів і протестовані на наборах вхідних і вихідних даних. Для кожної архітектури було розраховано середньоквадратичну похибку і виявлено, що архітектура 3-6-6-1 дає мінімальне значення RMSE до 0,01. Вони також виявили, що прогнозовані результати були дуже близькі до експериментальних. Це абсолютно нова технологія мінімізації витрати рідини шляхом використання високошвидкісного пульсуючого струменя мастильно-охолоджувальної рідини для збереження шорсткості поверхні. Архітектура 3-6-6-1 дала 0,011% стандартної похибки і 0,93% середньої похибки.

Hossain і DR. Nafis Ahmad (2012) [11] запропонували модель ANFIS для прогнозування шорсткості алюмінієвих поверхонь для тривимірного фрезерування.

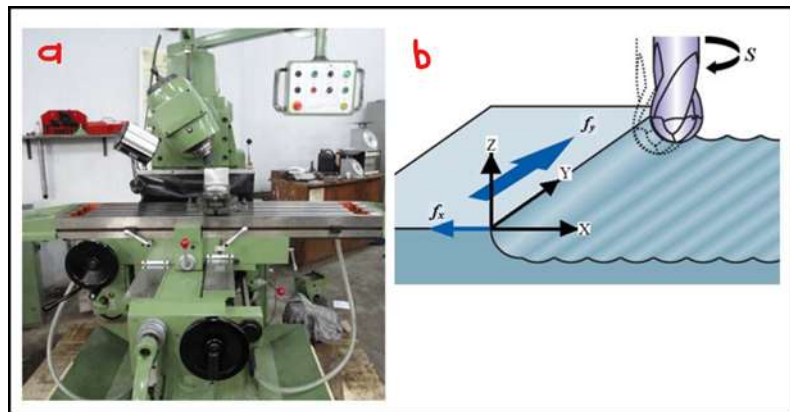


Рисунок 1.6. - а) експериментальна установка, б) операція фрезерування в ході експерименту

Було взято 84 експериментальних набори даних і випадковим чином розбито на дві частини: одна з них складалася з 68 навчальних наборів, а інша - з 16 тестових наборів. Вони використовували навчальний набір даних для навчання різних моделей ANFIS та ШНМ для прогнозування шорсткості поверхні.

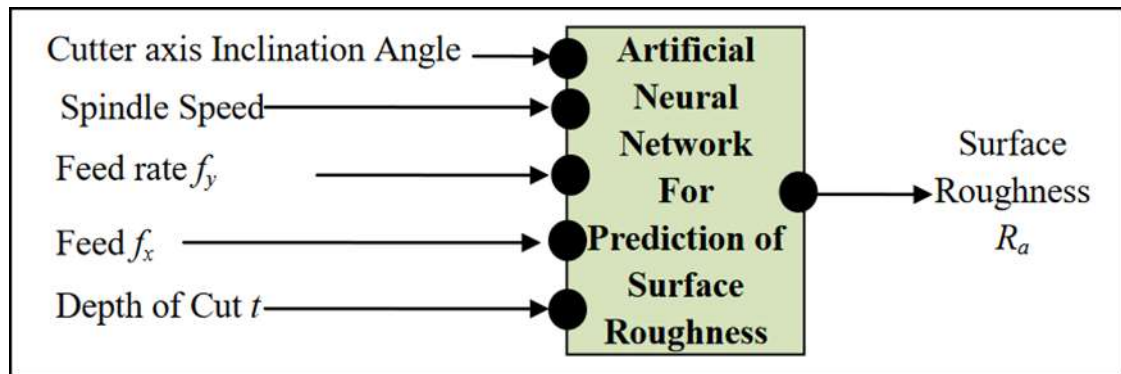


Рисунок 1.7 - Схематична діаграма ШНМ для прогнозування шорсткості

Тестовий набір даних використовувався для перевірки прогнозуючої моделі. Модель було обрано за мінімальним значенням RMSE та MAPE. Було виявлено, що ANFIS дає кращий результат на навчальному наборі даних, ніж ШНМ і RSM, але дає гірший результат на тестовому наборі даних через менший розмір набору даних, оскільки навчальний набір даних містить 68 наборів, тоді як тестовий набір даних містить лише 16 наборів. Похибки ШНМ дуже близькі до ANFIS, оскільки ШНМ має похибку 0,003014%, тоді як ANFIS - 0,0314%, але ШНМ надає різні результати кожного разу, коли виконується код у MATLAB. ANFIS дав точніший результат, ніж ШНМ або будь-яка інша методика для великого набору даних.

Mohd. Adnan та Mohd. Zain (2012) [12] використовували міркування на основі правил і нечітку логіку для розробки моделі для прогнозування значень шорсткості поверхні, отриманих в процесі фрезерування. Вони розглядали швидкість різання, радіальний передній кут, швидкість подачі як параметри процесу, і кожен параметр мав п'ять значущих значень. Для розробки моделі на основі нечітких правил було використано інструментарій нечіткої логіки в MATLAB. Для розробки моделі було створено дев'ять значущих значень і двадцять чотири правила "якщо". Похибка, отримана за допомогою нечіткої логіки з абсолютною похибкою, прагне до нуля, оскільки наближається до 0.0008 оціночного значення похибки. Вони отримали мінімальне значення

шорсткості поверхні при високій швидкості різання, дуже низькій швидкості подачі і при високому радіальному передньому куті. Вони зробили успішну спробу спрогнозувати шорсткість поверхні титанового сплаву (ti-6Al-4v) за допомогою моделі на основі нечітких правил і досягли мінімальної шорсткості поверхні.

Ahmed A.D Sarhan та Sayuti (2012) [13] розробили прогнозну модель на основі нечіткої логіки для прогнозування шорсткості обробленої поверхні при фрезеруванні скла.

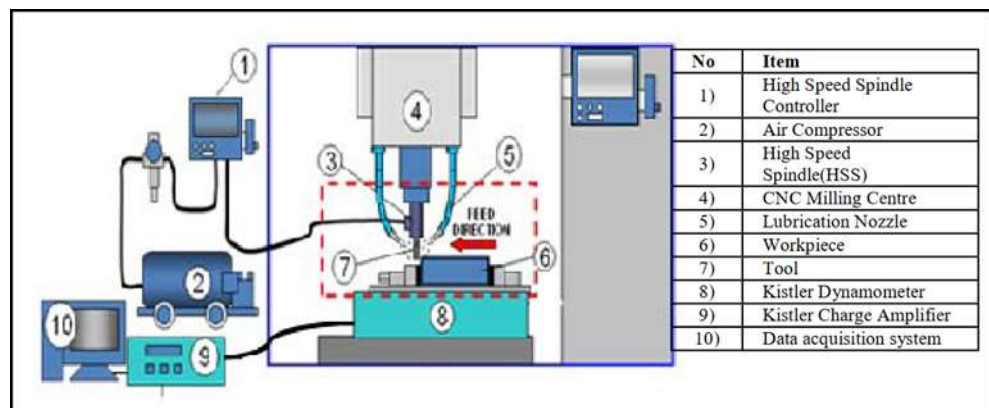


Рисунок 1.8 - Експериментальна установка

Для фрезерування вони використовували шліфувальний інструмент з електрокорунду. Було взято чотири вхідні параметри обробки: частота обертання шпинделя, тиск змащення, глибина різання та швидкість подачі. План експерименту був створений за допомогою методу експериментальних масивів L13. У цьому експерименті було обрано чотири параметри та чотири рівні. Після збору даних з реальних експериментів було виділено чотири функції належності, які були пов'язані з кожним вхідним параметром моделі. Результати, отримані за допомогою нечіткої логічної моделі, були порівняні з експериментальними результатами. Точність порівняння експериментального результату з нечіткою моделлю складала 93,103%. Ця дослідницька робота сприяла підвищенню якості обробленої поверхні скловолокна, де потрібна висока точність.

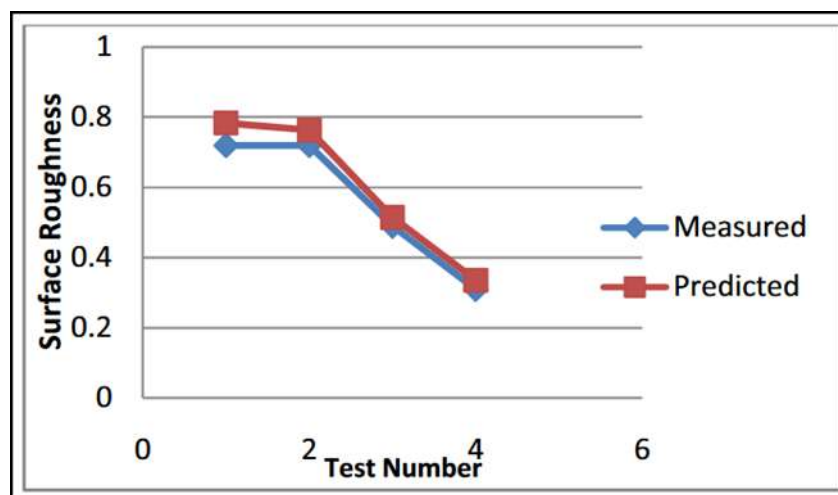


Рисунок 1.9 - Порівняння отриманих/прогнозованих результатів

S Harikrishna and BapiRaju (2011) [14] запропонували модель прогнозування шорсткості поверхні за допомогою ШНМ та ANFIS. Для обробки вони використовували алюмінієвий сплав AA6351, який оброблявся на токарному верстаті з числовим програмним управлінням (CL20TL5). В якості параметрів різання використовували швидкість, подачу і глибину різання при постійному радіусі носової частини. Для вимірювання шорсткості обробленої поверхні використовувався прилад STYLUS з алмазним наконечником. У цій роботі було проведено дослідження впливу кожного параметра різання на шорсткість обробленої поверхні. Вхідні параметри були обрані в рівнях, такі як швидкість на трьох рівнях, подача і глибина різання на чотирьох рівнях. Було побудовано дві моделі, а саме: модель штучних нейронних мереж та модель адаптивного нейро-нечіткого інтерфейсу. Результати показують, що модель прогнозування ANFIS має кращі можливості прогнозування, ніж модель прогнозування на основі штучних нейронних мереж, крім того, ANFIS навчає дані з більшою швидкістю, ніж ШНМ.

А.М ZAIN (2010) [15] зосередив увагу на застосуванні ШНМ як потенційного методу моделювання і дуже ефективного методу для розробки прогностичної моделі для прогнозування шорсткості поверхні при механічній

обробці. Було взято 24 вибірки даних, пов'язаних з операцією фрезерування, з яких вісім вибірок даних дворівневих КЕ, чотири вибірки даних центру і дванадцять вибірок осьових даних. Для моделювання використовувався інструментарій ШНМ MATLAB. В якості алгоритму використовувався метод прямого або зворотного поширення з `traingdx`, `learngdx`, `MSX`, `logsig` в якості функції тренування, навчання, продуктивності та передавальної функції відповідно. Було розроблено вісім мереж з різною кількістю вузлів у прихованому рівні, з трьома вузлами у вхідному рівні та одним вузлом у вихідному рівні, які мають структуру 3-1-1, 3-3-1, 3-2-1, 3-7-1, 3-6-1, 3-6-6-1, 3-7-7-1. Вони виявили, що якість та ефективність прогнозування залежить від кількості рівнів та вузлів у прихованому рівні структури ШНМ-мережі. Точність прогнозу не залежала від розміру набору даних, як великого, так і малого. Як великі, так і малі набори даних давали хороші прогнози за рахунок вибору оптимальної мережі. Вони виявили, що структура мережі 3-1-1 дає найкращу модель прогнозування на основі ШНМ для прогнозування значення шорсткості поверхні. Ця стаття зосереджена на основній ідеї, яка стосується розуміння мережевої структури ШНМ. Вона дає уявлення про те, що ми повинні зосередитися на визначенні кількості рівнів і вузлів у прихованих рівнях за допомогою методу проб і помилок, тому що це дуже важливо для дослідника для отримання гарного прогнозу. В роботі доведено, що зміна кількості рівнів та вузлів у прихованому рівні в рамках одного і того ж алгоритму навчання ШНМ та однієї і тієї ж навчальної вибірки призводить до отримання різних вихідних результатів кожного разу.

DurmusKrayel (2009) [16] запропонував новий підхід до прогнозування та контролю шорсткості поверхні на токарному верстаті з ЧПК за допомогою штучної нейронної мережі. Для навчання та тестування нейронної мережі було отримано великий набір даних за допомогою експерименту. Розглядалися три параметри: глибина різання, швидкість різання та швидкість подачі. Кілька параметрів, таких як радіус носової частини інструменту, виліт інструменту,

кут підйому, довжина заготовки, діаметр заготовки і матеріал заготовки були прийняті як постійні. Вони розробили багаторівневу нейронну мережу з прямим поширенням і навчили її за допомогою алгоритму масштабованого спряженого градієнта (SGA). Було використано один прихований рівень з десятима нейронами. Для адаптивного механізму управління використовували методику зворотного поширення ШНМ, задаючи необхідне значення шорсткості поверхні по мірі того, як отримували значення вхідних параметрів обробки для отримання бажаної шорсткості. Коли розроблена модель ШНМ інтегрована з програмним забезпеченням верстата з ЧПК разом з системою управління, шорсткість поверхні може бути закодована в програму для управління шорсткістю.

Tugrul Ozel та J. Paulo Davim (2009) [17] представили дослідження про вплив конструкції вставок інструментів на шорсткість обробленої поверхні.

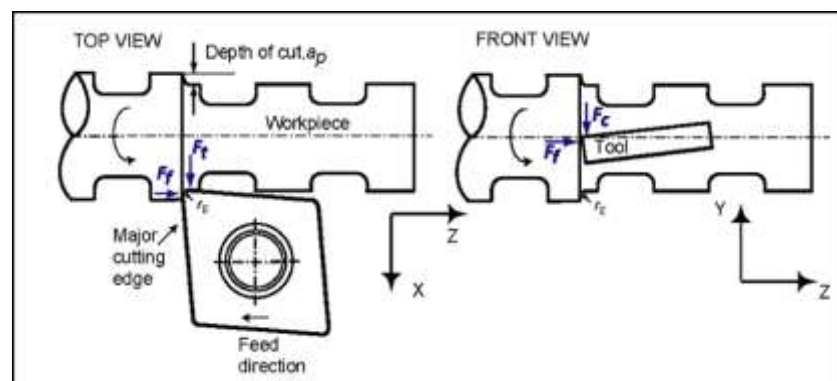


Рисунок 1.10 - Принципова схема поздовжнього переривчастого точіння

Вони взяли сталь AISI 1045 і досліджували обробку їх поверхні за допомогою інструменту в який встановлюються змінні вставки. Було виявлено, що за допомогою пластинчастого інструменту підвищується гладкість поверхні. Для прогнозування шорсткості поверхні була використана ШНМ-модель. Було проведено прогнозування шорсткості поверхні на основі нейронної мережі та порівняно з експериментальним набором даних без навчання. Результати показали, що нейромережевні моделі придатні для прогнозування шорсткості

поверхні для широкого діапазону умов різання і можуть бути використані в інтелектуальному плануванні процесу токарної обробки інструментом з відрізним різцем. У цій статті підкреслюється використання різних типів пластин для підвищення гладкості поверхні верстата, а також обговорюється важливість ШНМ як прогнозуючої моделі. Прогнозована середньоквадратична похибка 0,745, отримана для пластини зі змивачем, і середньоквадратична похибка близько 0,475, отримана для звичайної пластини.

J.PauloDavim (2008) [18] розробив модель прогнозування для дослідження впливу параметрів різання на токарну обробку сталі. Була розроблена ШНМ модель для прогнозування шорсткості поверхні з вхідними параметрами, такими як швидкість подачі, швидкість різання та глибина різання. База знань була розроблена з використанням алгоритму навчання зі зворотним поширенням, а планування експерименту здійснювалося за допомогою методу ортогональних масивів L27. Для дослідження впливу параметрів різання на шорсткість поверхні згенеровано 3D-графік поверхні. Встановлено, що існує нелінійна залежність між шорсткістю та параметрами різання, що обґрунтовує застосування прогнозовної моделі на основі ШНМ. Ця стаття містить деталі експериментів, їх валідації та навчання ШНМ. Було виявлено, що швидкість різання та подача мають значний вплив на шорсткість, тоді як глибина різання мало впливає на шорсткість поверхні.

Hasan Oktem і Erzurumlu (2006) [19] працювали над оптимізацією параметрів різання при обробці поверхонь форми для деталей ортезів, що використовуються в біомедичних інструментах для біомедицини. Вони оптимізували параметри за допомогою генетичного алгоритму в поєднанні з нейронною мережею. Була розроблена, навчена і протестована нейронна мережа прямого поширення, а також протестована в MATLAB. Була розроблена імітаційна модель для компоненту ортезної деталі для визначення оптимальних параметрів різання, що приводить до мінімальної шорсткості поверхні без будь-яких обмежень, а також створено виріб із пластику шляхом

знаходження критичних ділянок, які будуть використані при вимірюванні поверхні. Вони також перевірили свої прогнозовані результати з експериментальними результатами за допомогою додаткових вимірювань і виявили дуже добру узгодженість між ними. Вони ввели допуск обробки в якості нових параметрів різання в експерименті. Вони виявили, що ШНМ разом з методом ГА дають більш задовільні результати, ніж ШНМ. Відсоток отриманої похибки склав менше 1,33%.

Franci Cus та Uros Zuper (2006) [20] запропонували підхід на основі нейронних мереж для комплексної оптимізації параметрів різання. Вони врахували всі технологічні, економічні та організаційні обмеження. Було розроблено алгоритм нейронної оптимізації для забезпечення простої, швидкої та ефективної оптимізації всіх важливих параметрів токарної обробки та отримання більш високої точності прогнозованого результату.

Запропонований підхід є більш вигідним, порівняно з окремими підходами, особливо для виробничих систем, де номенклатура продукції є динамічною та різноманітною.

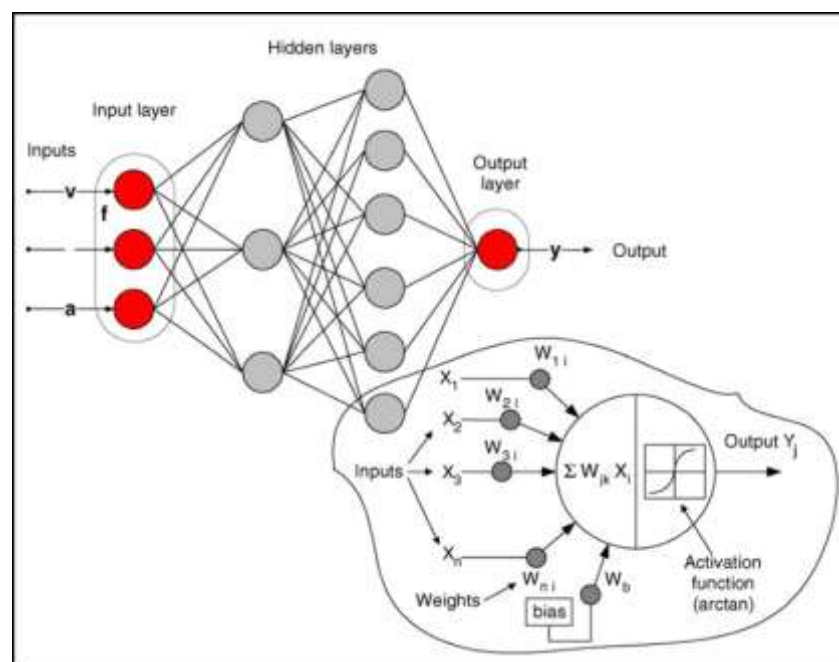


Рисунок 1.11 - Представлення двошарової нейронної мережі прямого поширення

Застосування запропонованого підходу до реальних проблем і розширення запропонованого підходу до адаптивного управління операціями обробки або регулювання параметрів різання на лінії були засновані на інформації від датчиків. Вони дали інформацію про те, що цей підхід слід використовувати там, де потрібне швидке приблизне визначення для оптимізації режиму різання верстата і коли не було достатньо часу для глибокого аналізу. Ця дослідницька робота дала інформацію про те, де використання штучної нейронної мережі є економічно вигідним для нас.

TugrulOzel і Karpat (2005) [21] працювали над прогнозуванням шорсткості поверхні і зносу бокового інструменту при токарній обробці сталі з використанням інструменту з кубічного нітриду бору (CBN). Для прогнозування шорсткості поверхні та визначення конкретних параметрів процесу вони використовували нейромережеву модель прогнозування. Деякі дані були взяті з попередніх досліджень в цій галузі, а решта даних були зібрані з реального експерименту з точіння сталі AISI H13, які були використані для навчання, тестування, а також для валідації нейронної мережі. Також була розроблена регресійна модель для прогнозування шорсткості поверхні та зносу бокових поверхонь інструменту. Також було проведено порівняльне дослідження між прогнозуючою моделлю ШНМ та регресійною технікою. Було виявлено, що модель на основі ШНМ виявилася більш здатною до прогнозування в межах діапазону, в якому вона була навчена. Це сталося тому, що ШНМ, як правило, пропонують можливість моделювати більш складні нелінійності, ніж лінійні та експоненціальні регресійні моделі. Для навчання нейронної мережі було використано байєсівську регуляризацию з алгоритмом Лавенберга-Морквардта. Вони також виявили, що нейронна мережа з одним виходом дає більш точний результат, ніж нейронна мережа з декількома виходами. При прогнозуванні шорсткості поверхні було виявлено 5,4 середньоквадратичної похибки і 2,1 середньоквадратичної похибки для зносу бокових граней інструменту.

Benardos і Vosniakos (2003) [22] навели різні методології та практики, які використовуються для прогнозування шорсткості поверхні. Підходи були класифіковані на основі теорії машин, експериментальних досліджень, проектування експериментів і штучного інтелекту (ШІ). Вони зазначили, що кожна методика має свої переваги та недоліки, проте моделі штучного інтелекту видаються найбільш реалістичними, точними та мають найвищий рівень інтеграції з комп'ютерами. Тому цей підхід можна використовувати в поєднанні з іншими більш традиційними методами для підвищення його ефективності. У цій роботі для прогнозування було використано модель на основі штучного інтелекту.

Benardos і Vosniakos (2002) [23] запропонували модель прогнозування шорсткості поверхні при торцевому фрезеруванні з ЧПК на основі ШІМ. Вони провели експеримент для отримання набору даних, який планували використати для навчання мережі та тестування нейронної мережі. Експеримент проводився відповідно до принципів методу планування експерименту Тагучі.

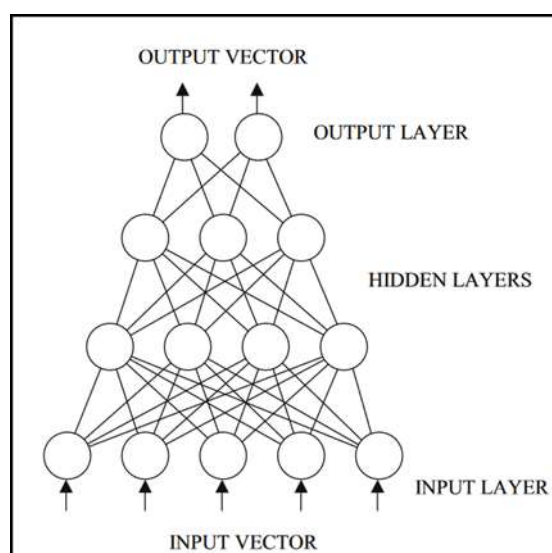


Рисунок 1.12 -Типова штучна нейронна мережа

В якості параметрів процесу різання розглядаються різні фактори, такі як

глибина різання, подача на зуб, швидкість різання, зачеплення і знос ріжучого інструменту, використання мастильно-охолоджувальної рідини і три складові сили різання. Вони використовували ШНМ, навчену за алгоритмом Левенберга-Марквардта, і за допомогою цієї комбінації визначили найбільш впливові фактори для обробки. Вони отримали структуру ШНМ 5-3-1 із середньоквадратичною похибкою прогнозування якості поверхні 1,86%. У цій статті наведені характеристики ШНМ як потужного інструменту, простого у використанні для вирішення складних задач, надзвичайно надійного і точного для моделювання прогнозування шорсткості поверхні. Ця методика також може бути використана у зворотному напрямку для отримання бажаного визначеного результату. Ця методологія може бути розширена до створення бази даних навчених ШНМ для різних випадків.

2. РЕГРЕСІЙНІ МОДЕЛІ

2.1. Загальні відомості

Під регресією розуміється одностороння стохастична залежність однієї випадкової змінної від іншої чи кількох інших випадкових змінних. У цьому сенсі регресія використовується для дослідження та оцінки залежностей між економічними явищами, породженими сукупним впливом комплексу причин. При аналізі причинно-наслідкових зв'язків намагаємося виявити дію суттєвих причин, визволившись від елементів випадковості та вторинних причин.

У цьому контексті важливо враховувати об'єктивність зв'язку між причиною і наслідком, керуючись діалектичним матеріалізмом та розуміючи, що зміна у причині відображається у відповідній зміні наслідка. Математично це виражається отриманням функції регресії, яка дозволяє досліджувати залежність між економічними показниками.

Застосування методів математичної статистики дозволяє дослідити залежність між економічними показниками, такими як національний дохід, капітальні вкладення та трудові ресурси.

Перед застосуванням математично-статистичного апарату важливо інтерпретувати дані з змістовної точки зору. На основі логічного аналізу дослідник вирішує, яку змінну розглядати як залежну (наслідок) та яку вважати пояснювальною (причина).

Розуміння причин та наслідків, а також ефективне використання кореляційного та регресійного аналізу досягається у тісній співпраці між статистиками та фахівцями економіки. Такий підхід дозволяє уникнути формалізму при обчисленнях та інтерпретації результатів. У висновках проведеного аналізу важливо з'ясувати можливість ринкової комерціалізації проекту, оцінити перспективи впровадження та визначити доцільність подальшої імплементації проекту.

2.2. Метод найменших квадратів

На основі професійно-теоретичних врахувань дослідник розглядає можливість опису залежності вивчених явищ лінійною функцією. При цьому слід враховувати характер розташування точок на діаграмі розсіювання. Після економічного аналізу можна приступати до вирівнювання експериментальних даних, що полягає в побудові гіпотетичної лінії. Природною вимогою є мінімізація помилок при визначенні форми зв'язку між змінними. Однак ці помилки виявляються через відхилення емпіричних даних y_i від значень регресії $\hat{y}_i$, тобто вони формують значення збуджуючої змінної u :

$$y_i - \hat{y}_i = \hat{u}_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2.1)$$

З графіка на рис. 2.1 видно, що $\hat{u}_i$ - відхилення експериментальної точки від оціненої лінії, виміряне по вертикалі. Це відхилення може бути позитивним або негативним, залежно від того, по яку сторону від лінії знаходиться конкретна точка.

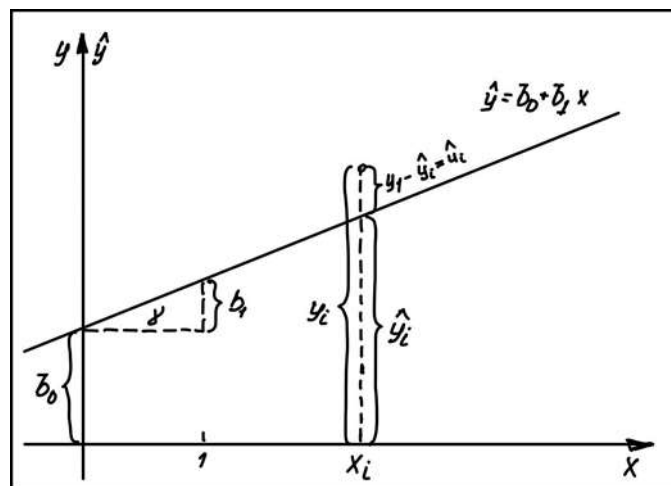


Рисунок 2.1 - Регресійна пряма та її параметри

При підборі прямої можна було б висунути вимогу, щоб сума відхилень всіх точок від лінії регресії дорівнювала нулю, тобто:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) = \sum_{i=1}^n \hat{u}_i = 0 \quad (2.2)$$

Іншими словами, це умову можна сформулювати так: сума позитивних відхилень повинна дорівнювати сумі негативних відхилень. Але дотримання цієї умови не надає можливості однозначно визначити положення цієї прямої на площині. Практично нескінченна кількість прямих буде відповідати умові (2.2), а саме: це будуть всі прямі, які проходять через точку з координатами $\bar{x}$ і $\bar{y}$ (рис. 2.2.).

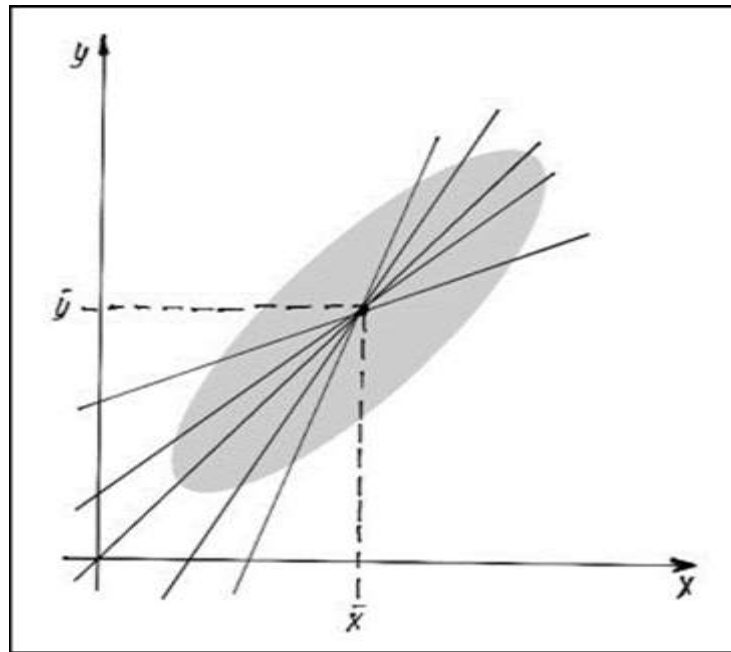


Рисунок 2.2 - Регресійна прямі, що задовільняють критерії

Для знаходження однозначного рішення використовують одну з природних характеристик точності вибору прямої. Якщо всі відхилення піднести до квадрата і додати, то результат буде безпосередньо залежати від розкиду точок навколо шуканої лінії. З усіх можливих прямих повинна бути вибрана та, для якої міра розсіювання експериментальних точок (x_i та y_i) буде мінімальною. Розгляди, за якими мінімізується сума квадратів відхилень, а не сума,

наприклад, абсолютних величин відхилень, аналогічні тим, за якими стандартне відхилення обирається над середнім лінійним відхиленням.

Згідно з наведеними розсудженнями обчислюємо вибірккову дисперсію, що характеризує міру розкиду експериментальних даних (x_i та y_i) навколо значень регресії, тобто дисперсію залишкових величин $\widehat{u}_i^*$:

Так як $\sum_{i=1}^n \widehat{u}_i = 0$. Звідси маємо дисперсію залишкових величин, яка визначається наступним чином:

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{u}_i - \widehat{u})^2}{n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{u}_i - 0)^2}{n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n \widehat{u}_i^2}{n - 2} \#(2.3)$$

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2}{n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n \widehat{u}_i^2}{n - 2} = 0 \#(2.4)$$

Вираз, який знаходиться у знаменнику, вказує на кількість ступенів свободи. Воно визначається як різниця між обсягом вибірки та кількістю параметрів регресії, які підлягають оцінці. Оскільки в простій лінійній регресії одна пояснювальна змінна ($m = 1$), то кількість ступенів свободи дорівнює:

$$n - 1 - 1 = n - 2 \#(2.5)$$

Квадратний корінь з виразу (2.4) називається стандартною помилкою оцінки регресії.

На основі висунутої нами вимоги стандартна помилка повинна бути мінімальною, що може бути записано також у формі:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2 \rightarrow \min \#(2.6)$$

Тобто сума квадратів відхилень емпіричних значень змінної y від значень, розрахованих за рівнянням прямої, повинна бути мінімальною. З цим

завданням мова йде про відхилення, виміряні вздовж вертикальної вісі (рис.2.3):

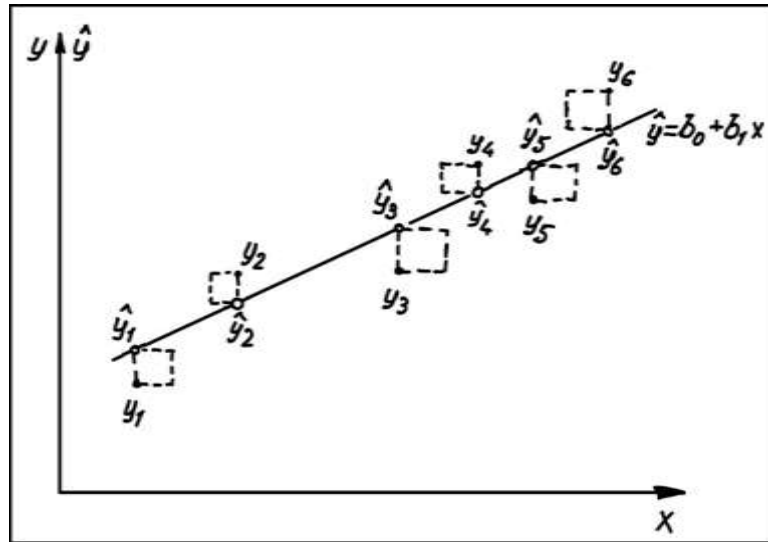


Рисунок 2.3 - Ілюстрація метода найменших квадратів

Метод, що базується на вимозі мінімізації суми квадратів відхилень, називається методом найменших квадратів. За його допомогою знаходять оцінки параметрів рівняння регресії, які зводять обрану міру розкиду S_u^2 до мінімуму. При цьому відбувається вирівнювання емпіричних значень в одну лінію регресії. У випадку лінійного зв'язку між змінними ця лінія є прямою прямої регресії.

Побудована таким чином пряма надалі буде називатися вирівняною або емпіричною регресійною прямою, на відміну від істинної (теоретичної) лінії регресії, яка існує в загальній сукупності, а також від ламаної, отриманої на основі часткових середніх значень.

Замінемо в (2.6) $\hat{y}_i$ через $b_0 + b_1 x_i$, а також позначимо весь вираз символом $S(b_0 b_1)$:

$$S(b_0 b_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2 \rightarrow \min \quad (2.7)$$

У формулі (2.7) y_i та x_i - відомі емпіричні значення, а b_0 та b_1 - невідомі параметри. При заданих значеннях y_i та x_i сума квадратів відхилень у (2.7) залежить від цих параметрів. Залежно від вибору значень параметрів b_0 та b_1 ця сума може збільшуватись або зменшуватись. Відповідно до цього сума квадратів відхилень $S(b_0, b_1)$ буде функцією шуканих параметрів b_0 та b_1 , тобто функцією від двох змінних: $S = f(b_0, b_1) = S(b_0, b_1)$. Таким чином, проблема визначення лінії регресії за сформульованими вище вимогами сводиться до мінімізації функції від двох змінних. З математичного аналізу відомо, що необхідною умовою для цього є рівність нулю частинних похідних цієї функції за кожним з параметрів b_0 та b_1 , та додатність других частинних похідних за b_0 та b_1 .

Прирівняємо перші частинні похідні функції (2.7) за b_0 та b_1 до нуля:

$$\frac{\partial S(b_0, b_1)}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i) = 0 \quad \#(2.8)$$

$$\frac{\partial S(b_0, b_1)}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i) x_i = 0 \quad \#(2.9)$$

З виразів других частинних похідних по параметрам робимо b_0 та b_1 висновок, що вони додатні:

$$\frac{\partial^2 S(b_0, b_1)}{\partial b_0^2} = 2n > 0 \quad \#(2.10)$$

$$\frac{\partial^2 S(b_0, b_1)}{\partial b_1^2} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 > 0 \quad \#(2.11)$$

Оскільки мова йде про функцію від двох змінних, для існування мінімуму цієї функції також потрібно виконання достатньої умови:

$$\frac{\partial^2 S(b_0, b_1)}{\partial b_0^2} \cdot \frac{\partial^2 S(b_0, b_1)}{\partial b_1^2} - \left(\frac{\partial^2 S(b_0, b_1)}{\partial b_0 \partial b_1} \right)^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 > 0 \quad \#(2.12)$$

Як бачимо, ця умова також виконується, оскільки пояснювальна змінна приймає різні значення. Тому її дисперсія є позитивною, тобто $s_i^2 > 0$. У протилежному випадку було б неможливо однозначно визначити параметри b_0 та b_1 .

Отже, функція $S(b_0, b_1)$ в (2.7) досягає мінімуму, якщо b_0 та b_1 визначаються згідно з (2.8) і (2.9). Проведення відповідних розрахунків надає нам наступні рівняння, отримані з (2.8) і (2.9):

$$nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad \#(2.13)$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad \#(2.14)$$

Ми прийшли до системи двох лінійних рівнянь відносно невідомих параметрів b_0 та b_1 : вирази (2.13) і (2.14) формують систему нормальних рівнянь, складених з урахуванням вимог методу найменших квадратів. Розв'язання цих рівнянь є основою для визначення прямої регресії, оскільки параметри b_0 та b_1 мінімізують функцію $S(b_0, b_1)$ тоді і тільки тоді, коли вони задовольняють нормальним рівнянням.

У нормальних рівняннях (2.13) і (2.14) відомі лише параметри b_0 та b_1 . Їх можна визначити за допомогою детермінантів (правило Крамера). Уведемо для

простоти позначення для суми без індексів $\sum_{i=1}^n = \Sigma$, і отримаємо вирази для b_0 та b_1 :

$$b_0 = \frac{\begin{vmatrix} \Sigma y_i & \Sigma x_i \\ \Sigma x_i y_i & \Sigma x_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \Sigma x_i \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 \end{vmatrix}} = \frac{\Sigma y_i \Sigma x_i^2 - \Sigma x_i \Sigma x_i y_i}{n \Sigma x_i^2 - \Sigma x_i \Sigma x_i} \#(2.15)$$

$$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & \Sigma y_i \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i y_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \Sigma x_i \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 \end{vmatrix}} = \frac{n \Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{n \Sigma x_i^2 - \Sigma x_i \Sigma x_i} \#(2.16)$$

Після визначення b_0 та b_1 , можна розрахувати значення регресії для заданого діапазону значень пояснювальної змінної x . Ці значення регресії представляють собою найкраще в сенсі методу найменших квадратів лінійне наближення (апроксимацію) до емпіричних значень y_i , оскільки обрана міра розкиду s_u зводиться при цьому до мінімуму.

Значення b_0 та b_1 можна отримати іншим способом. Розділімо нормальне рівняння (2.13) на n :

$$\begin{aligned} b_0 + \frac{b_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n} &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \\ b_0 + b_1 \bar{x} &= \bar{y} \\ b_0 &= \bar{y} - b_1 \bar{x} \#(2.17) \end{aligned}$$

Після підстановки (2.17) в загальне рівняння для простої регресії (2.18) та деяких перетворень будемо мати (2.19):

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \bar{x} \#(2.18)$$

$$\hat{y} = \bar{y} + b_1(x - \bar{x}) \quad \#(2.19)$$

Якщо b_1 визначено, то b_0 легко обчислити за допомогою (2.17). Формула (2.19) показує, що шукана лінія проходить через точку середніх значень $(\bar{x}, \bar{y})$ - центр ваги згущення точок на діаграмі розсіювання.

Коефіцієнт регресії також може бути представлений наступним чином:

$$b_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad \#(2.20)$$

Розділивши в формулі (2.20) чисельник і знаменник на $(n - 1)$, отримаємо в чисельнику коваріацію між змінними x та y , а в знаменнику — дисперсію змінної x . Отже, коефіцієнт регресії можна представити у вигляді відношення коваріації s_{xy} до дисперсії s_x^2 :

$$b_1 = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad \#(2.21)$$

Як вже згадувалося, b_1 - це міра, яка в середньому вказує на вплив зміни пояснювальної змінної x на залежну змінну y . Часто в економічних дослідженнях цікавлять саме коефіцієнти регресії, а не сама регресійна пряма. У цьому випадку йдеться передусім про визначення коефіцієнтів регресії.

3. СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

3.1. Формулювання задачі

Модель необхідна для оптимізації параметрів різання з метою досягнення визначеної шорсткості поверхні та для прогнозування поведінки системи за межами наявних спостережень.

Для побудови регресійної моделі використовується система ПРИАМ. Цей підхід спрощує обчислення та уникне помилок округлення, особливо при використанні високих ступенів поліномів.

Основними вимогами до моделі є врахування взаємодій між факторами та можливість прогнозування системи за межами існуючих даних.

Детальний аналіз та структурування об'єкта дослідження проведено з урахуванням вищезазначених вимог та визначено вимоги до розробленої моделі.

Визначемо об'єкти дослідження:

Незалежні змінні:

- Подача F , мм/зуб. Позначимо цей параметр як X_1
- Швидкість обертання шпинделю S , об/хв. Позначимо як X_2 .
- Ширина різання L , мм. Позначимо як X_3 .
- Наявність мастильно-охолоджуючої рідини. Якщо 1 – то є, якщо 0 – то немає. Позначимо як X_4 .

Залежна змінна:

- Шорсткість поверхні (Будемо визначати R_a). Позначимо як Y .

3.2. Дослідна частина

Для проведення дослідження та визначення змінних параметрів я скористався наступним обладнанням:

– Фреза: PM-4E-D6.0

Таблиця 3.1 - Характеристики фрези

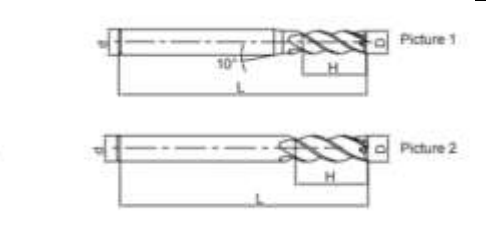
PM-4E  Corner protection Very suitable for side milling and shallow slot machining. Wide application.  Picture 1 					
Назва	D	d	H	L	К-сть зубів
PM-4E-D6.0	6	6	16	50	4



Рисунок 3.1 - Фреза

- Станок: Haas VF 2 SS



Рисунок 3.2 - HAAS VF2 SS

- Матеріал: Сталь 40X. Це конструкційна легована сталь, призначена для виробництва деталей підвищеної міцності.

Таблиця 3.2 - Механічні властивості сталі 40X

Термічна обробка	Межа плинності, (МПа)	Тимчасовий опір, (МПа)	Мінімальне відносне подовження, %	Відносне звуження, %
Загартування від 860°C в маслі, відпуск при 500°C	≥ 785	≥ 980	≥ 10	≥ 45

- Профілограф: Surftest SJ-400



Рисунок 3.3 - Surftest SJ-400

3.2.1. Визначення параметрів

Визначимо кількість рівнів варіювання параметрів, що були описані вище (див. розділ 3.2) і діапазон зміни даних.

Оскільки ми не можемо передбачити, яка буде залежність, обираємо кількість рівнів з запасом для точної оцінки.

Для фактору подачі (X_1) обираємо кількість рівнів - 5.

Тепер визначимо діапазон зміни даних на цих рівнях. Оберемо для нашої фрези режими різання з каталогу виробника:

- Оберемо діапазон подач між 0,02 та 0,1 мм/зуб.
- Оберемо діапазон швидкості обертання шпинделя між 1000 та 9000 об/хв.

Крок варіювання ширини різання оберемо 0,3 мм. Рівнів варіювання буде 3.

Також врахуємо і наявність мастильно-охолоджуючої рідини. Тут варіантів небагато, лише є та немає.

Глибина різання для виконання дослідів буде стала = 6 мм.

Отримаємо наступну таблицю значень:

Таблиця 3.3. - Опис параметрів

Назва параметру	Позначка параметру	Рівні варіювання				
		0	1	2	3	4
Подача F, мм/зуб	X1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
S, об/хв	X2	1000	3000	5000	7000	9000
Ширина різання L, мм	X3	0,3	0,6	0,9	-	-
МОР (1;0)	X4	1	0	-	-	-

3.2.2. Проведення дослідів

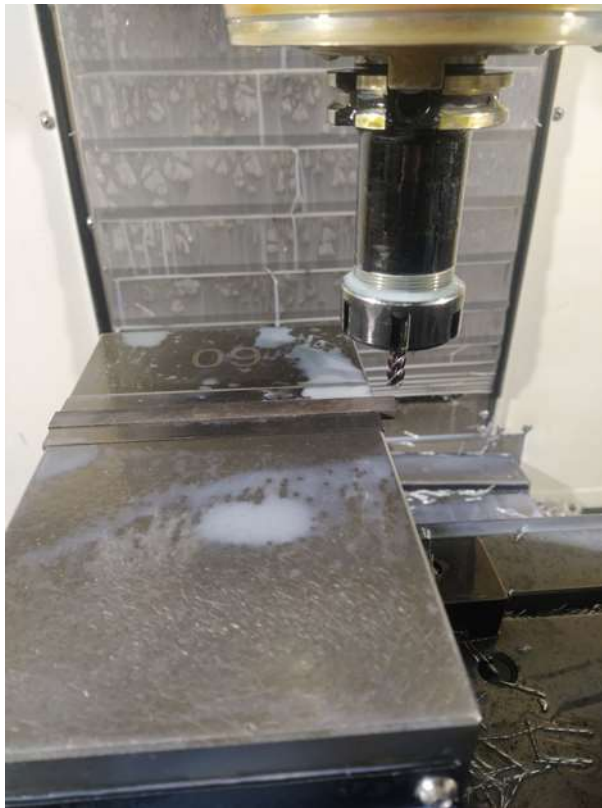


Рисунок 3.4 – Виконання дослідів - 1



Рисунок 3.5 – Виконання дослідів - 2

Отримані результати шорсткості наведемо у таблицях:

Таблиця 3.4 - Отримані результати-1.

№ досліду		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	1000	1000	1000	1000	1000	3000	3000	3000	3000	3000
	x3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	x4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Відгук	y	3,72	4,01	5,01	5,57	6,32	3,51	3,88	4,01	4,46	5,72
№ досліду		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	5000	5000	5000	5000	5000	7000	7000	7000	7000	7000
	x3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	x4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Відгук	y	3,2	2,68	3,32	4,32	5,52	4,2	4,01	4,39	6,01	6,42
№ досліду		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	9000	9000	9000	9000	9000	1000	1000	1000	1000	1000
	x3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	x4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Відгук	y	4,2	3,7	3,95	5,1	6,52	3,79	4,23	5,12	5,65	6,3
№ досліду		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	3000	3000	3000	3000	3000	5000	5000	5000	5000	5000
	x3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	x4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Відгук	y	3,5	3,72	4,18	4,49	5,79	3,17	2,78	3,23	4,54	5,43
№ досліду		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	7000	7000	7000	7000	7000	9000	9000	9000	9000	9000
	x3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	x4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Відгук	y	4,21	4,45	4,68	6,00	6,87	4,2	3,7	3,75	4,9	5,98
№ досліду		51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	1000	1000	1000	1000	1000	3000	3000	3000	3000	3000

	x3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	x4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Відгук	y	5,21	4,56	6,12	5,78	6,45	4,35	3,35	4,02	4,89	5,45

Таблиця 3.5 - Отримані результати-2.

№ досліду		61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	5000	5000	5000	5000	5000	7000	7000	7000	7000	7000
	x3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	x4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Відгук	y	3,01	3	3,27	4,53	5,41	4,35	4,65	4,74	6,08	6,57
№ досліду		71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	9000	9000	9000	9000	9000	1000	1000	1000	1000	1000
	x3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	x4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Відгук	y	4,21	3,75	3,85	4,75	5,76	4,23	4,73	5,54	6,06	6,99
№ досліду		81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	3000	3000	3000	3000	3000	5000	5000	5000	5000	5000
	x3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відгук	y	4,12	4,32	4,52	5,19	6,28	3,8	3,08	4,02	4,85	6,07
№ досліду		91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	7000	7000	7000	7000	7000	9000	9000	9000	9000	9000
	x3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відгук	y	5	4,64	4,8	6,58	7,1	4,86	4,22	4,66	5,5	7,13
№ досліду		101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	1000	1000	1000	1000	1000	3000	3000	3000	3000	3000
	x3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відгук	y	4,49	4,72	5,64	6,28	6,99	4,12	4,12	4,6	4,93	6,49
№ досліду		111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	5000	5000	5000	5000	5000	7000	7000	7000	7000	7000

	x3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відгук	y	3,94	3,43	3,77	5,15	6,04	4,77	5,13	5,1	6,6	7,41

Таблиця 3.6 - Отримані результати-3.

№ досліду		121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	9000	9000	9000	9000	9000	1000	1000	1000	1000	1000
	x3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відгук	y	5	4,2	4,4	5,55	6,66	5,87	5,34	6,8	6,39	7,1
№ досліду		131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	3000	3000	3000	3000	3000	5000	5000	5000	5000	5000
	x3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відгук	y	4,77	3,89	4,5	5,31	6,2	3,61	3,48	3,85	5,19	5,84
№ досліду		141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
Фактори	x1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
	x2	7000	7000	7000	7000	7000	9000	9000	9000	9000	9000
	x3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	x4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відгук	y	4,92	5,39	5,4	6,63	7,13	4,91	4,47	4,4	5,54	6,39

3.3. Обробка отриманих результатів

Обробку отриманих результатів було проведено у середовищі PRIAM.

Отримана модель має вигляд:

$$\begin{aligned}
 Y = & 4.91773 + 1.1158 \cdot x_1 - 0.466 \cdot u_2 + 0.3781 \cdot z_1 - 0.297467 \cdot x_4 \\
 & + 0.345095z_2 - 0.454971 \cdot v_2 + 0.206286 \cdot z_1 \cdot x_2 - 0.1651 \cdot x_2 \cdot x_3 \\
 & - 0.1286 \cdot u_1 + 0.137429 \cdot z_1 \cdot u_2
 \end{aligned}$$

Де:

$$x_1 = 25 \cdot (X1 - 0.06);$$

$$x_2 = 0.00025 \cdot (X2 - 5000);$$

$$x_3 = 3.33333 \cdot (X3 - 0.6);$$

$$x_4 = 2 \cdot (X4 - 0.5);$$

$$u_1 = 3.33333 \cdot (x_1^3 - 9.04713e^{-0.08} \cdot x_1^2 - 0.85x_1 + 1.7296e^{-0.08});$$

$$u_2 = 3.33333 \cdot (x_2^3 - 0.85 \cdot x_2);$$

$$z_1 = 2 \cdot (x_1^2 - 5.58794e^{-0.08} \cdot x_1 - 0.5);$$

$$z_2 = 2 \cdot (x_1^2 - 0.5);$$

$$z_3 = 1.5 \cdot (x_3^2 + 9.93411e^{-0.08} \cdot x_3 - 0.666667);$$

$$v_1 = 7.77778 \cdot (x_1^4 - 5.54359e^{-0.08} \cdot x_1^3 - 1.10714 \cdot x_1^2 + 1.88481e^{-0.09} \cdot x_1 + 0.128571);$$

$$v_2 = 7.77778 \cdot (x_2^4 - 1.10714 \cdot x_2^2 + 0.128571);$$

3.4. Аналіз адекватності моделі

Остаточна дисперсія: 0.0759183

Дисперсія відтворюваності: 0.245887

Розрахункове значення F-критерію: 15.9329

Рівень значущості F-критерію для адекватності: 0.05

для ступенів свободи $v_1 = 11$, $v_2 = 138$

Табличне значення F-критерію для адекватності: 1.85865

Табличне значення F-критерію (при відсутності повторних експериментів):
1.06339

Стандартна помилка оцінки: 0.275533

Модель адекватна.

3.5. Аналіз інформативності моделі

Доля розсіювання, пояснена моделлю: 0.94187

Введено регресорів (ефектів): 12

Коефіцієнт множинної кореляції: 0.9705

(скоригований з урахуванням ступенів свободи): 0.96811

F-відношення для R: 203.272

Рівень значущості F-критерія для інформативності: 0.05

для ступенів свободи $v_1 = 11$, $v_2 = 138$

Табличне значення F-критерія для інформативності: 1.85865

Модель ІНФОРМАТИВНА

Критерій Бокса і Века для інформативності: 9

Інформативність моделі: ДУЖЕ ВИСОКА

Таблиця 3.7. - Статичні характеристики

Ім'я/номер коефіцієнту	Коефіцієнт регресії	Станд. Похибка/ коэф. Регресії	Визначене t знач.	Частка участі
x1	1.1158	0.0404876	19.4872	0.518093
u2	-0.466	0.0404876	8.13859	0.0903663
z1	0.378143	0.0404876	7.81417	0.0833056
x4	-0.297467	0.0404876	7.34711	0.0736446
z2	0.345095	0.0404876	7.13126	0.069381
v2	- 0.454971	0.0404876	7.00769	0.0669975
z1x2	0.206286	0.0404876	3.01426	0.0123957
v1x2	-0.218714	0.0404876	2.38206	0.00774131
x2x3	-0.1651	0.0404876	2.35431	0.00756201

u1	-0.1286	2.24597	2.24597	0.00688204
z1u2	0.137429	0.0404876	2.00812	0.00550157

Таблиця 3.8. - Таблиця мультиколінеарності

Ім'я/номер регресора	Макс. Коеф. Кореляції	З яким регресором	Коеф. Кореляції з відгуком
x1	0	з усіма	0.719786
u2	0	з усіма	0.30061
z1	0	з усіма	0.288627
x4	0	з усіма	0.271375
z2	0	з усіма	0.263403
v2	0	з усіма	0.258839
z1x2	0	з усіма	0.111336
v1x2	0	з усіма	0.0879847
x2x3	0	з усіма	0.0869598
u1	0	з усіма	0.082958
z1u2	0	з усіма	0.0741726

Таблиця 3.9. - Таблиця залишків-1

№	Відгук по експерименту	Відгук по моделі	Залишок	% відхилення
1	3.72	4.04553	-0.325529	-8.75077
2	4.01	4.07355	-0.0635522	-1.58484
3	5.01	5.073	-0.0630046	-1.25758
4	5.57	5.44655	0.123448	2.2163
5	6.32	6.14853	0.171472	2.71316
6	3.51	3.58164	-0.0716381	-2.04097
7	3.88	3.23686	0.643136	16.5757
8	4.01	3.89941	0.110588	2.75781
9	4.46	4.60986	-0.149864	-3.36018
10	5.72	5.68464	0.0353617	0.618212
11	3.2	3.14684	0.0531572	1.66116
12	2.68	2.94463	-0.264629	-9.8742

13	3.32	3.44206	-0.122057	-3.67642
14	4.32	4.31763	0.00237157	0.0548974
15	5.52	5.24984	0.270157	4.89415

Таблиця 3.10. - Таблиця залишків 2

16	4.2	4.57371	-0.373714	-8.89796
17	4.01	4.51406	-0.504059	-12.5701
18	4.39	4.84637	-0.456369	-10.3957
19	6.01	5.88706	0.122941	2.0456
20	6.42	6.67671	-0.256714	-3.99866
21	4.2	4.38682	-0.186824	-4.44819
22	3.7	3.95437	-0.254371	-6.8749
23	3.95	3.94978	0.00022386	0.00566734
24	5.1	5.32737	-0.227371	-4.45826
25	6.52	6.48982	0.0301762	0.462825
26	3.79	4.21063	-0.420629	-11.0984
27	4.23	4.23865	-0.00865236	-0.204548
28	5.12	5.2381	-0.118105	-2.30674
29	5.65	5.61165	0.0383476	0.678719
30	6.3	6.31363	-0.0136284	-0.216323
31	3.5	3.66419	-0.164188	-4.69109
32	3.72	3.31941	0.400586	10.7684
33	4.18	3.98196	0.198038	4.73775
34	4.49	4.69241	-0.202415	-4.50812
35	5.79	5.76719	0.0228119	0.393988
36	3.17	3.14684	0.0231572	0.730512
37	2.78	2.94463	-0.164629	-5.92189
38	3.23	3.44206	-0.212057	-6.56524
39	4.54	4.31763	0.222371	4.89805
40	5.43	5.24984	0.180157	3.31781
41	4.21	4.49116	-0.281164	-6.67849
42	4.45	4.43151	0.0184903	0.415513
43	4.68	4.76382	-0.0838192	-1.79101
44	6	5.80451	0.19549	3.25817
45	6.87	6.59416	0.275836	4.01507
46	4.2	4.22172	-0.021724	-0.517238
47	3.7	3.78927	-0.0892714	-2.41274
48	3.75	3.78468	-0.0346762	-0.924699
49	4.9	5.16227	-0.262271	-5.35247

50	5.98	6.32472	-0.344724	-5.76461
51	5.21	4.37573	0.834272	16.0129
52	4.56	4.40375	0.156248	3.42648

Таблиця 3.11. - Таблиця залишків 3

53	6.12	5.4032	0.716795	11.7123
54	5.78	5.77675	0.00324778	0.05619
55	6.45	6.47873	-0.0287287	-0.445406
56	4.35	3.74674	0.603262	13.8681
57	3.35	3.40196	-0.0519643	-1.55117
58	4.02	4.06451	-0.0445119	-1.10726
59	4.89	4.77496	0.115036	2.35247
60	5.45	5.84974	-0.399738	-7.33465
61	3.01	3.14684	-0.136843	-4.54627
62	3	2.94463	0.0553714	1.84571
63	3.27	3.44206	-0.172057	-5.26169
64	4.53	4.31763	0.212372	4.68811
65	5.41	5.24984	0.160157	2.96039
66	4.35	4.40861	-0.0586144	-1.34746
67	4.65	4.34896	0.301041	6.47399
68	4.74	4.68127	0.0587307	1.23904
69	6.08	5.72196	0.35804	5.88882
70	6.57	6.51161	0.0583859	0.888674
71	4.21	4.05662	0.153376	3.64314
72	3.75	3.62417	0.125829	3.35543
73	3.85	3.61958	0.230424	5.98503
74	4.75	4.99717	-0.247171	-5.20361
75	5.76	6.15962	-0.399624	-6.93791
76	4.23	4.64046	-0.410462	-9.70359
77	4.73	4.66849	0.0615143	1.30051
78	5.54	5.66794	-0.127938	-2.30935
79	6.06	6.04149	0.0185141	0.305514
80	6.99	6.74346	0.246538	3.52701
81	4.12	4.17657	-0.0565715	-1.37309
82	4.32	3.8318	0.488203	11.301
83	4.52	4.49435	0.0256548	0.567583
84	5.19	5.2048	-0.0147975	-0.285116
85	6.28	6.27957	0.000428858	0.00682894
86	3.8	3.74178	0.0582238	1.5322

87	3.08	3.53956	-0.459562	-14.9208
88	4.02	4.03699	-0.0169905	-0.42265
89	4.85	4.91256	-0.062562	-1.28994

Таблиця 3.12. - Таблиця залишків 4

90	6.07	5.84478	0.225224	3.71044
91	5	5.16865	-0.168648	-3.37295
92	4.64	5.10899	-0.468993	-10.1076
93	4.8	5.4413	-0.641302	-13.3605
94	6.58	6.48199	0.0980071	1.48947
95	7.1	7.27165	-0.171648	-2.41757
96	4.86	4.98176	-0.121757	-2.50529
97	4.22	4.5493	-0.329305	-7.80343
98	4.66	4.54471	0.11529	2.47404
99	5.5	5.9223	-0.422305	-7.67827
100	7.13	7.08476	0.045243	0.634544
101	4.49	4.80556	-0.315562	-7.02811
102	4.72	4.83359	-0.113586	-2.40648
103	5.64	5.83304	-0.193038	-3.42266
104	6.28	6.20659	0.0734144	1.16902
105	6.99	6.90856	0.0814379	1.16506
106	4.12	4.25912	-0.139121	-3.37673
107	4.12	3.91435	0.205652	4.99156
108	4.6	4.5769	0.0231047	0.502276
109	4.93	5.28735	-0.357348	-7.24843
110	6.49	6.36212	0.127878	1.97039
111	3.94	3.74178	0.198224	5.03106
112	3.43	3.53956	-0.109562	-3.19422
113	3.77	4.03699	-0.266991	-7.08198
114	5.15	4.91256	0.237438	4.61045
115	6.04	5.84478	0.195224	3.23218
116	4.77	5.0861	-0.316098	-6.62678
117	5.13	5.02644	0.103557	2.01866
118	5.1	5.35875	-0.258752	-5.07358
119	6.6	6.39944	0.200557	3.03874
120	7.41	7.1891	0.220902	2.98114
121	5	4.81666	0.183343	3.66686
122	4.2	4.3842	-0.184205	-4.38583
123	4.4	4.37961	0.0203906	0.463422

124	5.55	5.7572	-0.207204	-3.73341
125	6.66	6.91966	-0.259657	-3.89876
126	5.87	4.97066	0.899338	15.3209

Таблиця 3.13. - Таблиця залишків 5

128	6.8	5.99814	0.801862	11.7921
129	6.39	6.37169	0.0183141	0.286606
130	7.1	7.07366	0.0263381	0.370959
131	4.77	4.34167	0.428329	8.97964
132	3.89	3.9969	-0.106897	-2.74801
133	4.5	4.65945	-0.159445	-3.54323
134	5.31	5.3699	-0.0598976	-1.12802
135	6.2	6.44467	-0.244672	-3.94631
136	3.61	3.74178	-0.131776	-3.65031
137	3.48	3.53956	-0.0595619	-1.71155
138	3.85	4.03699	-0.186991	-4.8569
139	5.19	4.91256	0.277438	5.34563
140	5.84	5.84478	-0.00477602	-0.0817811
141	4.92	5.00355	-0.0835475	-1.69812
142	5.39	4.94389	0.446107	8.27657
143	5.4	5.2762	0.123798	2.29255
144	6.63	6.31689	0.313107	4.72258
145	7.13	7.10655	0.0234525	0.328927
146	4.91	4.65156	0.258443	5.2636
147	4.47	4.2191	0.250895	5.61286
148	4.4	4.21451	0.185491	4.21569
149	5.54	5.5921	-0.0521048	-0.940519
150	6.39	6.75456	-0.364557	-5.70512

3.6. Висновок

Оскільки не було повторних дослідів, то припинення включення регресорів в модель виконане за теоретичними показниками.

Можливої небезпекою в даному конкретному випадку є те, що в машинному навчанні називається «перенавчання моделі», а в регресійному аналізі «надлишкові члени моделі». Це означає, що ми включили в модель

члени, які забезпечують відслідковування не основних залежностей, а випадкових змін, які відповідають тільки конкретному експерименту.

В даній моделі на це можуть вказувати регресори (головні і взаємодії) високих степенів (4 і 5). Проти цього – високе значення показника Бокса-Веца $\hat{\sigma}^2=9$, а також незначна різниця між стандартним і зкорегованим значенням коефіцієнта множинної кореляції.

Рекомендується провести смисловий аналіз для прийняття рішення про подальшу роботу з моделлю.

4. СТАРТАП

4.1. Опис ідеї проекту

Ідея: Створення інноваційної онлайн-платформи, яка об'єднає виробництва з усієї України, дозволяючи користувачам реалізувати свої ідеї в сфері машинобудування та виготовлення комплектуючих. Платформа сприяє зручному взаємозв'язку між замовниками та виробниками, де можна виготовляти різноманітні деталі та вироби з металу, дерева, або пластику.

Можливі напрямки використання: Металообробка, деревообробка, пластикові вироби: Платформа об'єднає виробників, які спеціалізуються в різних напрямках, включаючи фрезерування металевих елементів, виготовлення дерев'яних деталей та створення пластикових виробів.

Основні вигоди для користувача:

- Широкий Вибір: Користувачі мають можливість вибирати серед різноманітних виробників та послуг для реалізації своїх ідей.
- Ефективність та Зручність: Інтегрований процес вибору та комунікації на платформі спрощує співпрацю та полегшує контроль над виробництвом онлайн.
- Швидкість та Гнучкість: Замовники можуть швидко знаходити виконавців та реагувати на зміни у проекті безпосередньо через платформу.

Короткий зміст переліченого наведено у табл. 4.1:

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення онлайн-платформи для об'єднання виробництв	Об'єднання виробництв по всій Україні, що виготовляють різні продукти з використанням станків та різних матеріалів.	Можливість реалізації ідей користувачів шляхом створення унікальних продуктів за допомогою залучення виробників з різних регіонів.

4.2. Аналіз переваг стартапу порівняно із пропозиціями конкурентів

1. Визначення конкурентів:

Основні конкуренти схожих платформ:

a) Alibaba.com

Техніко-економічні властивості:

- Широкий вибір виробників;
- Міжнародний рівень обслуговування;
- Доступність для різних секторів.

b) ThomasNet

Техніко-економічні властивості:

- Спеціалізація на об'єднанні виробників у різних секторах;
- Можливість знаходження виробників за регіонами.

c) Maker's Row

Техніко-економічні властивості:

- Фокус на підтримці малих виробників та стартапів;
- Простий інтерфейс для вибору виробників.

d) Xometry

Техніко-економічні властивості:

- Автоматизована система виробництва;
- Широкий вибір матеріалів та технологій.

2. Проведення аналізу:

Результати аналізу наведено у табл. 4.2.1 та табл. 4.2.2. :

Таблиця 4.2.1 - Аналіз стартапу 1

Назва	Стартап	Alibaba.com	ThomasNet
Якість продукту чи послуги	Висока, з фокусом на індивідуальному підході	Висока, широкий вибір виробників	Висока, спеціалізація на різних секторах
Вартість виробництва та вартість для користувача	Гнучка система ціноутворення	Залежить від обраного виробника	Залежить від сектора та регіону
Інноваційність та унікальність функцій	Унікальний підхід до реалізації ідей	Спеціалізовані рішення для різних галузей	Спеціалізація за секторами
Доступність та ефективність впровадження	Легкий доступ через онлайн-платформу	Міжнародний доступ, але можливі труднощі з вибором	Зручний доступ за секторами та регіонами
Ринкова стратегія та позиціонування	Унікальна платформа для індивідуальних замовлень	Широкий ринок, міжнародне позиціонування	Спеціалізація за секторами

Таблиця 4.2.2 - Аналіз стартапу 2

Критерій	Стартап	Maker's Row	Xometry
Якість продукту чи послуги	Висока, з фокусом на індивідуальному підході	Висока, підтримка малих виробників	Висока, автоматизована система
Вартість виробництва та вартість для користувача	Гнучка система ціноутворення	Залежить від обраного виробника	Залежить від матеріалу та технології
Інноваційність та унікальність функцій	Унікальний підхід до реалізації ідей	Підтримка малих виробників	Автоматизована система виробництва
Доступність та ефективність впровадження	Легкий доступ через онлайн-платформу	Легкий доступ для малих виробників	Швидкий та простий доступ
Ринкова стратегія та позиціонування	Унікальна платформа для індивідуальних замовлень	Підтримка малих виробників	Автоматизована система виробництва

3. Визначення переваг і недоліків

Проаналізувавши всю вище перелічену інформацію, я дійшов висновку, що даний стартап має наступні переваги та недоліки. Дані наведені в табл. 4.3 та табл. 4.4. :

Таблиця 4.3. - Переваги стартапу

Перевага	Опис	Вигода
Індивідуальний підхід	Платформа надає можливість користувачам отримати індивідуальний дизайн та виготовлення виробів.	Клієнти можуть реалізувати унікальні ідеї та отримати товар, який відповідає їхнім унікальним потребам
Гнучка система ціноутворення	Система дозволяє адаптувати ціни в залежності від складності та об'єму замовлення	Користувачі можуть контролювати витрати та отримати конкурентноздатні ціни за індивідуальні проекти.
Зручний онлайн-доступ	Користувачі можуть взаємодіяти з платформою, розміщати замовлення та обирати виробників онлайн	Максимальна зручність у взаємодії зі стартапом через онлайн-платформу.

Таблиця 4.4. - Недоліки стартапу

Недолік	Опис	Вирішення
Потреба у рекламі	Для залучення виробників та користувачів може знадобитися активна маркетингова кампанія.	Розробка ефективної рекламної стратегії та партнерська співпраця для привертання уваги.
Конкуренція з великими міжнародними платформами	Існує конкуренція з великими гравцями, такими як Alibaba, Xometry тощо.	Формування унікальної пропозиції для вирізнення від конкурентів та пошук нішевих ринків.
Партнерство та масштабування	Для розвитку стартапу може бути важливою партнерська співпраця та масштабування.	Розгляд можливостей партнерства з виробниками, а також розширення географії обслуговування.

4. Висновок:

Проаналізувавши плюси та мінуси стартапу, я дійшов висновку, що проект має потенціал стати унікальною індустріальною платформою за умови успішного вирішення недоліків та активного підходу до реклами та партнерства. Індивідуальний підхід та гнучка ціноутворення є сильними конкурентними перевагами, які можуть привертати увагу користувачів.

4.3. Технічний аудит ідеї проекту

1. Технологія виготовлення товару

Типова технологія виготовлення деталей, виробів, комплектуючих, тощо:

- Використання верстатів з числовим керуванням (ЧПК) для точного оброблення матеріалів.
- Використання різноманітних матеріалів, таких як метал, пластик, дерево.
- Використання різноманітних технологій обробки, включаючи фрезерування, токарення, лазерну різку, 3Д-друк тощо.

2. Чи є такі технології?

Існуючі технології та їх розвиток:

- Багато існуючих технологій для обробки матеріалів вже існують (ЧПК, лазерна різка, тощо).
- Можливість розробки додаткових технологій для специфічних потреб, наприклад, оптимізація виробництва або використання нових матеріалів.

3. Доступність технологій для авторів проекту:

Багато існуючих технологій є відкритими для використання через партнерство зі спеціалізованими виробниками.

4. Висновок:

Технічний аудит показує, що технології для виготовлення комплектуючих вже існують і є доступними для використання. Існуючі стандартні технології, такі як ЧПК-верстати, забезпечують можливість виготовлення широкого спектру деталей з різних матеріалів. Також, існує можливість вдосконалення та адаптації технологій для вирішення конкретних завдань проекту.

4.4. Аналіз ринкових можливостей

Спочатку проведемо аналіз ринку:

1. Огляд Ринку:

Зростаючий попит на індивідуалізовані та унікальні вироби в різних галузях промисловості.

Збільшення обсягу виробництва в Україні та розвиток малого та середнього бізнесу.

2. Можливості Ринку:

Широкий Спектр Застосувань: Забезпечення виробників різних галузей (автопромисловість, меблева галузь, електроніка) комплектуючими за індивідуальними проектами.

Партнерство з Виробниками: Співпраця з існуючими виробниками для розширення обсягів та можливостей виробництва.

3. Загрози та Виклики:

Конкуренція з-за Кордону: Конкуренція з іншими платформами, такими як Xometry. Технологічні Виклики: Потреба у вдосконаленні та адаптації до нових технологій.

4. Висновки

Потенціал Ринку: Значний попит на індивідуалізовані вироби створює перспективи для успішного впровадження стартапу.

Партнерство важливо: Співпраця з існуючими виробниками та створення партнерств може сприяти розвитку бізнесу.

Наступним кроком визначемо потенційних клієнтів:

Таблиця 4.5. - Потенційні клієнти та вимоги до товару

Група Клієнтів	Характеристики	Вимоги до Товару
Індивідуальні Замовники	Кінцеві споживачі, що шукають унікальні вироби	Особливий дизайн та індивідуалізовані параметри
Малі Бізнеси	Малі виробники та майстерні	Забезпечення малими партіями - Технічна підтримка
Великі Виробники	Великі виробничі компанії	Оптові поставки - Стабільність та висока якість
Архітектори та Дизайнери	Професійні творчі особистості	Можливість співпраці з дизайнерами - Висока якість виконання

Тепер знайдемо фактори загроз та можливостей:

Таблиця 4.6 -Фактори можливостей

№	Фактори можливостей	Вплив на Проект
1	Зростання попиту на унікальні та індивідуалізовані вироби	Значущий
2	Розвиток онлайн-платформ та електронної комерції	Значущий
3	Потреба виробників у зовнішніх постачальниках	Важливий
4	Збільшення індивідуалізації та персоналізації виробів	Важливий
5	Тенденція до підтримки локальних виробників	Важливий

Таблиця 4.7 - Фактори загроз

№	Фактори загроз	Вплив на Проект
1	Значна конкуренція в індустрії електронної комерції	Значущий
2	Труднощі в організації поставок та логістики	Значущий
3	Можливі труднощі з рекламою та популяризацією	Важливий
4	Недостатність досвіду в управлінні онлайн-платформою	Важливий
5	Можливі технічні проблеми та забезпечення безпеки	Важливий

Проведемо аналіз ринкових можливостей. Спочатку проведемо ступеневий аналіз конкуренції на рику. Таким чином визначемо тип конкуренції, галузеву ознаку, тощо. Результат аналізу наведено у табл. 4.8.

Таблиця 4.8. - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	Виявлення характеристик	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції	Монополістична	Диверсифікація продукції та вдосконалення обслуговування для залучення більшої кількості клієнтів.
Рівень конкурентної боротьби	Національний	Розвиток регіональних стратегій, адаптація до потреб місцевих ринків.
Галузева ознака	Міжгалузева	Розширення асортименту продукції для охоплення різних секторів.
Конкуренція за видами товарів	Товарно-родова	Спрощення процесу вибору товару для клієнтів, пропозиція унікальних характеристик продукції.
Характер конкурентних переваг	Нецінова	Зосередження на якості продукції, покращення обслуговування, підвищення лояльності клієнтів.
Інтенсивність	Марочна	Створення унікального бренду, акцентування на корпоративному стилі та якості продукції.

Наступним кроком, на основі отриманих даних, проведемо аналіз конкуренції в галузі за М.Портером.

Таблиця 4.9. - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Alibaba.com, ThomasNet, Maker's Row, Xometry	Відсутні	Виробники матеріалів та комплектуючих, технічні платформи	Індивідуальні та корпоративні клієнти	Інші онлайн-платформи, майстерні, традиційні постачальники
Висновки	Велика кількість учасників, високий рівень конкуренції, технологічний бар'єр, потреба в значних інвестиціях	Постачальники матеріалів та комплектуючих не диктують умови, адаптуються до вимог ринку	Значна концентрація клієнтів, велика кількість альтернатив	Широкий вибір аналогічних платформ та постачальників	Висока

Висновок:

Аналіз конкуренції за моделлю 5 сил М. Портера показав, що галузь характеризується високим рівнем конкуренції через велику кількість прямих конкурентів і доступність альтернативних постачальників та платформ. Потенційні бар'єри для нових учасників високі, особливо у зв'язку з високим рівнем технологічної складності та необхідністю великих інвестицій. Важливо зазначити, що існуючі конкуренти, такі як Alibaba.com, ThomasNet, Maker's Row та Xometry, мають свої техніко-економічні переваги та слабкі сторони. Успішний запуск стартапу вимагатиме детального планування та унікального підходу для залучення клієнтів та постачальників.

Завершаючий аналіз SWOT проекту:

Таблиця 4.10 - SWOT-аналіз стартап проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Широкий обсяг мережі: Здатність об'єднати виробництва по всій Україні дозволяє нам мати широкий вибір виробників та регіональні особливості.	1. Велика конкуренція: Ринок вже насичений подібними платформами, такими як Alibaba.com, Xometry тощо, що створює високий рівень конкуренції.
2. Різноманіття виробництв: Включення виробників різних товарів і матеріалів (пластик, дерево, метал) робить нашу платформу універсальною.	2. Високі технологічні вимоги: Запуск і підтримка платформи вимагатиме значних інвестицій у технічні розробки та безпеку.
3. Легкість користування: Простий інтерфейс для користувачів, що дозволяє легко реалізувати ідеї та замовляти виготовлення деталей.	
Можливості	Загрози
1. Розвиток співпраці з великими підприємствами: Залучення великих виробників та підприємств до співпраці може збільшити обсяги виробництва на платформі.	1. Економічні коливання: Негативні зміни в економіці можуть призвести до зменшення попиту на виробництво.
2. Розширення асортименту послуг: Додавання нових функцій та послуг, таких як консультації з дизайну, може привести до зростання інтересу користувачів.	2. Зміни законодавства: Зміни у виробничому та експортному законодавстві можуть вплинути на діяльність платформи та її партнерів.

Тепер визначемо альтернативи ринкового впровадження:

Таблиця 4.11. - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Розширення співпраці з великими підприємствами	Висока	6-12 місяців
2	Вдосконалення технічної платформи та додавання нових функцій	Середня	8-14 місяців
3	Активна рекламна кампанія та залучення нових користувачів	Висока	4-10 місяців
4	Поглиблення співпраці з регіональними виробниками	Висока	6-12 місяців
5	Глобальна експансія та виход на зовнішні ринки	Низька	12-24 місяці

Висновок:

З урахуванням всіх аспектів, рекомендується обрати Альтернативу 1: Розширення співпраці з великими підприємствами.

Ця альтернатива виправдовується високою ймовірністю отримання ресурсів, що сприятиме швидкому та успішному впровадженню проекту. Співпраця з великими підприємствами відкриє нові можливості для розвитку та забезпечить стабільність у партнерських відносинах.

4.5. Розроблення ринкової стратегії проекту

Спочатку треба визначити цільову групу потенційних споживачів. Приблизні групи наведені у табл. 4.12.:

Таблиця 4.12. - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Конкуренція	Простота входу у сегмент
1	Малі підприємства виробничого сектора	Середня	Середні обсяги	Висока	Висока
2	Дизайнерські студії та індивідуальні дизайнери	Висока	Обмежені обсяги	Середня	Середня
3	Замовники, які шукають масштабовані виробництва	Висока	Великі обсяги	Висока	Висока

Цільові групи, обрані для стратегії охоплення ринку:

- Малі підприємства виробничого сектора.
- Дизайнерські студії та індивідуальні дизайнери.
- Замовники, які шукають масштабовані виробництва.

Обрана стратегія охоплення ринку:

Стратегія **концентрованого** маркетингу, орієнтована на обрані цільові групи та спрямована на задоволення їхніх унікальних потреб і вимог.

Далі оберемо базову стратегію розвитку та конкурентної поведінки:

Таблиця 4.13 Визначення базової стратегії розвитку

Сфера діяльності	Значущі аспекти розвитку
Малі підприємства виробничого сектора	1. Розширення співпраці з існуючими виробниками.
	2. Впровадження нових технологій виробництва.
	3. Залучення уваги через участь у виставках та промоакціях.
	4. Розвиток індивідуальних підходів до кожного клієнта.
Дизайнерські студії та індивідуальні дизайнери	1. Розширення асортименту матеріалів та деталей.
	2. Партнерство з визначеними брендами та дизайнерами.
	3. Розробка унікальних дизайнерських рішень та концепцій.
	4. Запровадження інновацій в області дизайну та конструкцій.
Замовники, які шукають масштабовані виробництва	1. Розширення виробничих потужностей для масового виробництва.
	2. Посилення контролю якості та технічної підтримки.
	3. Залучення фінансування для впровадження нових технологій.
	4. Активна маркетингова кампанія для привертання нових клієнтів.

Таблиця 4.14 Визначення конкурентної поведінки

Сфера діяльності	Значущі аспекти розвитку
Малі підприємства виробничого сектора	Стратегія диференціації: Зосередження на унікальних характеристиках продукції та наданні додаткових послуг для створення конкурентної переваги.
Дизайнерські студії та індивідуальні дизайнери	Стратегія фокусування: Спрямування на конкретний сегмент ринку (наприклад, високоякісний дизайн для елітного клієнтства) для досягнення конкурентних переваг.
Замовники, які шукають масштабовані виробництва	Стратегія лідерства вартості: Забезпечення масового виробництва за конкурентоспроможними цінами та високою якістю для залучення широкого кола клієнтів.

Опис стратегій:

Стратегія **диференціації**: Компанія фокусується на створенні унікальних та відмінних властивостей своєї продукції, що вирізняється серед конкурентів. Це може бути досягнуто шляхом високої якості, інноваційного дизайну та інших додаткових переваг.

Стратегія **фокусування**: Компанія обирає конкретний сегмент ринку (наприклад, елітне клієнтство) та спрямовує свої зусилля на задоволення потреб цього сегменту. Фокусування дозволяє забезпечити високу якість та унікальність в обраному сегменті.

Стратегія **лідерства вартості**: Компанія прагне досягти конкурентних переваг через масове виробництво та надання товарів із значною вартісною користю за доступними цінами.

Ці стратегії допомагають компанії ефективно конкурувати на ринку та забезпечують гнучкість в адаптації до різних вимог різних сегментів.

Наступним кроком треба обрати стратегію позиціонування стартапу:

Таблиця 4.14. - Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Вимоги елітного клієнтства	Стратегія фокусування	Унікальний та ексклюзивний дизайн, персоналізований підхід	Елітний, ексклюзивний, індивідуалізований
2	Вимоги високої якості та інновацій	Стратегія диференціації	Високоякісні та інноваційні рішення у дизайні та виробництві	Якість, інновації, технологічність
3	Вимоги доступності та конкурентоспроможності	Стратегія лідерства вартості	Доступні ціни, широкий вибір, масове виробництво	Доступність, конкурентоспроможність, різноманіття

Опис стратегій позиціонування:

Елітний, ексклюзивний, індивідуалізований: Проект позиціонує себе як виробник товарів для елітного клієнтства, забезпечуючи унікальний та індивідуалізований дизайн.

Якість, інновації, технологічність: Спрямований на вимоги високої якості та інновацій, надаючи передові технологічні рішення у дизайні та виробництві.

Доступність, конкурентоспроможність, різноманіття: Фокусується на забезпеченні доступних цін, масовому виробництві та широкому виборі товарів для конкурентоспроможності на ринку.

Ці стратегії позиціонування допоможуть стартап-компанії чітко визначити своє місце на ринку та вражати цільову аудиторію.

4.6. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова програма стартапу:

- **Характеристики товару:** Онлайн платформа пропонує широкий вибір виробників, забезпечуючи зручний інтерфейс для вибору партнерів з виробництва.
- **Унікальні характеристики:** Ми вирізняємося автоматизованою системою виробництва, що дозволяє замовникам отримувати високоякісні вироби за оптимальними цінами.
- **Цільова аудиторія:** Наша цільова аудиторія - підприємці та стартапи, які шукають надійних виробників для своїх продуктів.
- **Позиціонування:** Ми прагнемо стати провідним партнером для тих, хто цінує ефективність та якість виробництва.
- **Цінова стратегія:** Наша стратегія базується на конкурентоспроможних цінах за допомогою автоматизованої системи та оптимізації виробничих процесів. Ціни кардинально відрізняються від типу матеріалу та способу виготовлення виробу.
- **Продажі та просування:** Ми плануємо використовувати цифрові канали, соціальні мережі та контент-маркетинг для забезпечення широкого охоплення та свідомості.
- **Співпраця та партнерство:** Ми відкриті до співпраці з малими виробниками та стартапами, надаючи їм можливість легко знайти виробників для своїх ідей.

4.7. Висновки

Можливість Ринкової Комерціалізації:

Аналіз показав наявність значного попиту на подібні послуги серед малих та середніх підприємств. Динаміка ринку свідчить про зростання інтересу до онлайн платформ для пошуку виробників.

Перспективи Впровадження:

Проект має перспективи впровадження, оскільки спрямований на розв'язання актуальної проблеми у сфері забезпечення виробників та підприємств ефективним інструментом співпраці.

Альтернативи Впровадження:

Серед альтернатив впровадження слід обрати стратегію диференційованого маркетингу, зосереджуючись на підтримці малих бізнесів та стартапів.

Подальша Імплементація:

Рекомендації спрямовані на подальший розвиток та удосконалення платформи, зокрема, розширення функціоналу для задоволення потреб різних груп користувачів.

Загальний Висновок:

Проект є життєздатним та має перспективи на успішну ринкову комерціалізацію. Ретельно розроблена стратегія маркетингу та розвитку може забезпечити стабільний ріст та конкурентоспроможність у даній ніші.

Цей аналіз дозволяє зробити висновок, що імплементація проекту є доцільною та може призвести до успішного входу на ринок та отримання значущої частки у ньому.

5. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Girish K. Predictive Modelling and Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Artificial Neural Network Coupled with Genetic Algorithm [Електронний ресурс] / K. Girish, S. Kuldip Singh // Procedia CIRP. – 2015. – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115002413>.
2. Kuldip Singh S. Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Integrated ANN-GA Approach [Електронний ресурс] / S. Kuldip Singh, S. Sachin, K. Girish // Procedia CIRP. – 2015. – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115000402>.
3. Girish K. Predictive Modeling for Power Consumption in Machining Using Artificial Intelligence Techniques [Електронний ресурс] / K. Girish, S. Kuldip Singh // Procedia CIRP. – 2015. – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114008853>.
4. D. R. M. Rajesh M., “Prediction of surface roughness of freeform surfaces using Artificial Neural Network,” 2014, no. Aimtdr, pp. 12–17.
5. Surface Roughness Prediction using Artificial Neural Network in Hard Turning of AISI H13 Steel with Minimal Cutting Fluid Application [Електронний ресурс] / A. B., K. E., R. P., L. K. // Procedia Engineering. – 2014. – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814033025>.
6. I. A. T. Sarosh hashmi, Omar M Barukab, Amir Ahmad, “Novel machine learning based models for estimating minimum surface roughness value in the end milling process,” life Sci. J., vol. 11, no. 12, pp. 47–56, 2014.

7. Thakur P. M. Optimal Selection of Process Parameters in CNC End Milling of Al 7075-T6 Aluminium Alloy Using a Taguchi-fuzzy Approach [Электронный ресурс] / P. M. Thakur, R. R. // Procedia Materials Science. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814008669>.
8. Vasudevan H. Grey Fuzzy Multiobjective Optimization of Process Parameters for CNC Turning of GFRP/Epoxy Composites [Электронный ресурс] / H. Vasudevan, N. C. Deshpande, R. R. Rajguru // Procedia Engineering. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814032871>.
9. B. Suresh K. Integration of fuzzy logic with response surface methodology for thrust force and surface roughness modeling of drilling on titanium alloy [Электронный ресурс] / K. B. Suresh, B. N. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-012-4275-0>.
10. Dev Wins L. SIMULATION OF SURFACE MILLING OF HARDENED AISI4340 STEEL WITH MINIMAL FLUID APPLICATION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK [Электронный ресурс] / L. Dev Wins, V. A. S. // Advances in Production Engineering & Management. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: https://apem-journal.org/Archives/2012/APEM7-1_051-060.pdf.
11. Artificial Intelligence Based Surface Roughness Prediction Modeling for Three Dimensional End Milling [Электронный ресурс] // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: https://www.researchgate.net/profile/Md-Shahriar-Hossain/publication/280311081_Artificial_Intelligence_Based_Surface_Roughness_Prediction_Modeling_for_Three_Dimensional_End_Milling/links/55b16fd408aec0e5f431141c/Artificial-Intelligence-Based-Surface-Roughness-Prediction-Modeling-for-Three-Dimensional-End-Milling.pdf.

12. M. R. H. M. Adnan, A. M. Zain and H. Haron, "Fuzzy rule-based for predicting machining performance for SNTR carbide in milling titanium alloy (Ti-6Al-4v)," 2012 4th Conference on Data Mining and Optimization (DMO), Langkawi, Malaysia, 2012, pp. 86-90, doi: 10.1109/DMO.2012.6329803.
13. A.D. A. S. A Fuzzy Logic Based Model to Predict Surface Roughness of A Machined Surface in Glass Milling Operation Using CBN Grinding Tool [Электронный ресурс] / A. S. A.D., S. M., M. Hamdi // International Scholarly and Scientific Research & Innovatio. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: <https://publications.waset.org/4307/a-fuzzy-logic-based-model-to-predict-surface-roughness-of-a-machined-surface-in-glass-milling-operation-using-cbn-grinding-tool>.
14. S. H. SURFACE ROUGHNESS PREDICTION MODEL USING ANN & ANFIS [Электронный ресурс] / H. S., S. K., B. K. // International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.technicaljournalonline.com/ijaers/VOL%20I/IJAERS%20VOL%20I%20ISSUE%20I%20%20OCTBER%20DECEMBER%202011/21%20IJAERS.pdf>.
15. Mohl Zain A. Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network [Электронный ресурс] / A. Mohl Zain, H. Haron, S. Shafir // Expert Systems with Applications. – 2010. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409006903>.
16. Karayel D. Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network [Электронный ресурс] / Durmus Karayel // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608005773>.

17. Özel T. Neural network process modelling for turning of steel parts using conventional and wiper inserts [Электронный ресурс] / T. Özel, E. C. A., P. D. J. // Int. J. Materials and Product Technology. – 2009. – Режим доступа до ресурсу:
<http://coewww.rutgers.edu/marl/pdf/IJMPT%200014%20Ozel%20et%20al.pdf>.
18. J. P. D. Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models [Электронный ресурс] / P. D. J., G. V. N., K. S. R. // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360701103X>.
19. Oktem H. Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm [Электронный ресурс] / H. Oktem, T. Ezulumlu, F. Ezincanli // Materials & Design. – 2006. – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306905000336>.
20. Cus F. Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks [Электронный ресурс] / F. Cus, U. Zuperl // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605009611>.
21. Özel T. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks [Электронный ресурс] / T. Özel, Y. Karpat // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695504002299>.
22. P.G. B. Predicting surface roughness in machining: A review [Электронный ресурс] / B. P.G., V. G.-C. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503000592>.

23. P.G B. Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments [Электронный ресурс] / B. P.G, V. G.C // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2002. –

Режим доступа до ресурсу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584502000054>.