

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
Олександр ДІДИК
«__» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:
«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПОТУЖНОСТІ
РІЗАННЯ НА БАЗІ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА»

Виконав здобувач вищої освіти
4 курсу, групи АК-20
ОПП «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
_____ Шамановський К.Ю.
«__» _____ 20__ р.

Керівник роботи
доцент, к.т.н.
_____ Роман ЖЕСАН
«__» _____ 20__ р.

Рецензент

«__» _____ 20__ р.

м. Кропивницький 2024

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олександр ДІДИК

«__» _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Шамановського Кирила Юрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Інтелектуальна система підтримки потужності різання на базі нечіткого регулятора»

2. Керівник роботи Жесан Роман Володимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 27.06.2024 року

Мета та завдання кваліфікаційної роботи система повинна виконувати автоматизоване інтелектуальне керування процесом різання металу з метою збільшення продуктивності обробки верстатом при зменшенні енерговитрат на споживання. Досягнення поставленої мети реалізується за рахунок застосування нечіткого керування в програмованих логічних контролерах, які є у складі пристроїв керування верстатами.

4. Перелік графічного матеріалу: схема регулювання потужності різання;
структура нечіткого регулятора; функції належності та їх параметри;
структура нечіткої САК; схема моделювання роботи системи.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд автоматизованих систем керування потужністю різання в технологічному процесі металообробки	18.04.2024	
2	Аналіз суттєвих параметрів роботи СКПР. Постановка завдання та вибір напрямку досліджень	30.04.2024	
3	Побудова структури нечіткого регулятора	10.05.2024	
4	Побудова функцій належності	16.05.2024	
5	Розробка архітектури системи нечіткого керування	22.05.2024	
6	Моделювання роботи інтелектуальної СКПР з нечітким регулятором	03.06.2024	
7	Побудова динамічних характеристик	11.06.2024	
8	Подання чорнового варіанту пояснювальної записки	18.06.2024	
9	Кінцеве редагування та оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка презентації результатів роботи.	26.06.2024	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника

_____ Жесан Р.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача

_____ Шамановський К.Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота спрямована на удосконалення процесу різання металу в металообробці на верстатах.

Виконано огляд сучасного існуючого обладнання та інструментів.

Розглянуто системи автоматизованого керування процесом різання, їх вхідні змінні та збуджуючі діяння.

На підставі зробленого аналізу запропоновано та розроблено нечіткий регулятор на мові FCL.

Виконано моделювання роботи різних варіантів керування інтелектуальною системою керування потужністю різання з нечітким регулятором. В результаті визначено параметри систем керування, які дозволяють підвищити продуктивність обробки.

ANNOTATION

The qualification work is aimed at improving the metal cutting process in metalworking on machine tools.

An overview of modern existing equipment and tools was carried out.

Systems of automated control of the cutting process, their input variables and disturbing actions are considered.

Based on the analysis, a fuzzy controller in the FCL language is proposed and developed.

Simulation of the operation of various control options of the intelligent cutting power control system with a fuzzy controller was performed. As a result, the parameters of control systems are defined, which allow to increase processing productivity.

ЗМІСТ

Вступ	2
1. Огляд автоматизованих систем керування потужністю різання	4
1.1 Класифікація систем керування процесом потужності різання	4
1.2. Аналіз СКПР	7
1.3. Сучасні напрями удосконалення СКПР	11
1.4. Висновки	12
2. Аналіз суттєвих параметрів роботи СКПР. Розробка нечіткого регулятора для інтелектуальної СКПР	13
2.1. Функціональна схема системи	13
2.2. Визначення зон допустимих значень частоти обертання шпинделя фрези та швидкості подачі	15
2.3. Побудова структури нечіткого регулятора	24
2.4. Висновки	25
3. Розробка інтелектуальної СКПР з нечітким регулятором	26
3.1. Побудова функцій належності	26
3.2. Розробка архітектури системи нечіткого керування	29
3.3. Розробка нечіткої моделі інтелектуальної СКПР	31
3.4. Висновки	34
4. Моделювання роботи інтелектуальної СКПР з нечітким регулятором	35
4.1. Побудова моделі	35
4.2. Побудова динамічних характеристик	37
4.3. Висновки	43
Висновки	44
Список використаних джерел	45

ВСТУП

Актуальність теми. Машинобудівна галузь, яка призначена для виготовлення певних деталей різних машин потребує суттєвої кількості різних верстатів (в тому числі металообробних). Для цієї галузі однією з головних цілей при виробництві є збільшення продуктивності і зменшення витрат на енергоспоживання інструментів та обладнання. Вирішити це завдання можна використовуючи автоматизовані системи керування (рекомендовано максимально з інтелектуальним керуванням без участі людини-оператора).

Одним з головним технологічних процесів в металообробці є процес різання заготовки. Тому продуктивність верстатів та їх енергоспоживання буде залежати від вхідних змінних, що впливають на цей процес, зокрема, швидкість робочих рухів станка, збурюючи впливи (глибина та ширина різання, твердість оброблюваного матеріалу, зношування різального інструменту тощо).

Для керування процесом різання застосовують спеціальні регулятори, але найбільш доцільним є застосування програмованих логічних контролерів. За їх допомогою можна реалізувати роботи нечітких систем, що дозволить керувати циклами роботи станків та режимом обробки одночасно.

Використання такого нечіткого регулятора доцільно також оскільки техпроцес різання під дією збурень характеризується змінами коефіцієнту підсилення та постійної часу.

Для прикладу в роботі було розглянуто вертикально-фрезерний верстат. Модель 6Б75, сірий чавун з кінцевою фрезою для сталі Р6М5.

Таким чином з метою збільшення продуктивності процесу різання при металообробці розробка інтелектуальної системи керування потужністю різання (СКПР) на основі нечіткого є актуальним.

Мета і задачі дослідження. Удосконалення систем автоматизованого керування процесом різання металу за рахунок керування робочими рухами верстатів для забезпечення скорочення витрат на енергоспоживання та підвищення продуктивності.

Для досягнення поставленої в роботі мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити інтелектуальну систему керування потужністю різання на основі нечіткого регулятора.
2. Виконати порівняння роботи та параметрів (продуктивність та енергоспоживання) з різними варіантами керування.

Об'єкт дослідження – технологічний процес різання металу.

Предмет дослідження – засоби автоматизації системи керування процесом різання металу.

Методи дослідження. Аналіз динамічних характеристик запропонованих варіантів керування потужністю різання було виконано шляхом моделювання в програмному пакеті Matlab.

Практичне значення одержаних результатів запропонований та розроблений нечіткий регулятор для керування потужністю різання можна реалізувати на вже існуючих станках з програмованими логічними контролерами, що керують циклом обробки.

Апробація результатів досліджень. На LVIII науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти («День Науки-2024», ЦНТУ, м. Кропивницький, 16.05.2024 року) було представлено основні результати бакалаврської роботи.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна бакалаврська робота має в своєму складі вступ, чотири розділи, висновки та список використаних джерел. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи становить 51 сторінку.

1. ОГЛЯД АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ РІЗАННЯ

1.1. Класифікація систем керування процесом потужності різання

Відповідно до призначення, принципу роботи та автоматизацією системи керування потужністю різання (СКПР) можна представити в наступній класифікації [1-6]:

- 1) підвищення загальної продуктивності обробки матеріалу (забезпечення заданої продуктивності, зменшення технологічного часу);
- 2) підвищення заданої точності та/або показників, за якими можна охарактеризувати якість обробки матеріалу (забезпечення належної якості деталей);
- 3) оптимізації операцій, що застосовуються в процесі різання матеріалу (собівартість обробки);
- 4) автоматичного керування та/або оптимально пошукові (системи керування режимами обробки);
- 5) комбінованого регулювання (в тому числі регулювання по збуренню) та з само налаштуванням (системи керування режимами та точністю обробки);
- 6) граничного контролю;
- 7) адаптивні (з самоналаштуванням параметрів, пошукові та безпошукові);
- 8) системи регулювання (стабілізуючі, програмні і слідкуючі);
- 9) за видом зворотного зв'язку (може здійснюватися за вібрації, силою або потужністю різання, швидкістю подачі, частотою обертання шпинделя або швидкістю різання, крутним моментом, положенням виконавчих органів верстатом, температурою у зоні різання статичними та динамічними характеристиками, деформацією систем пристосування інструменту до деталі, фізичним та моральним зносом обладнання.

Найбільш детальна класифікація систем керування металообробкою, наведена в роботах [9-11].

На рис. 1.1 - 1.3 наведено різні схеми класифікацій СКПР.

З метою отримання бажаного результату при підвищенні якості та продуктивності ефективного процесу керування (зменшення енергоспоживання, собівартості тощо), як правило, беруть системи за допомогою яких можна зробити стабілізацію швидкості, сили або потужності різання, крутного моменту на обладнанні, температури у зоні різання матеріалу (металу).



Рисунок 1.1 – Класифікація СКІР за цільовими ознаками

На рис. 1.2 окремо виділені кількість контурів керування в системі; принцип керування для регулювання відхилення вихідної змінної від необхідного значення; кількість регульованих величин; наявність контурів в системі; принципи керування за компенсацією та збуренням; з використанням зворотнього зв'язку (для забезпечення самоналаштування до змінних умов обробки).

Головними елементами показників, які характеризують призначення та принцип дії окремих елементів системи (рис. 1.3), є вид керуючого впливу, тип керуючого пристрою і тип зворотного зв'язку.



Рисунок 1.2 – Класифікація СКПР за структурними ознаками



Рисунок 1.3 – Класифікація СКПР за елементними показниками

1.2. Аналіз СКПР

Підвищення ефективності потужності різання є одним з найголовніших чинників загалом процесу металообробки. Цього досягають завдяки створенню високопродуктивного обладнання та устаткування інструментів, зменшення часу на технологічний процес та оптимізацією вибору засобів технологічного процесу.

В умовах зміни стану інструменту, що виконує різання, твердості заготовки, а також для керування процесами потужністю різання залежно від глибини і ширини різання, як правило, треба знати миттєві оцінки ефективності процесу [7, 8], його визначають за допомогою показника економічної ефективності:

$$J_c = \frac{C_c(T + t_{cm}) + C_i}{QT}, \quad (1.1)$$

де Q - швидкість знімання металу, мм³/хв.;

T - миттєва оцінка періоду стійкості інструменту, хв.;

C_c - собівартість хвилини роботи верстата, коп.;

t_{cm} - час зміни інструмента, хв.;

C_i - вартість інструменту, витраченого за період стійкості, коп.

Показник енергоефективності:

$$J_E = \frac{Q}{P_o}, \quad (1.2)$$

де P_o - потужність обробки, кВт.

Показник ефективності продуктивності:

$$J_P = \frac{QT}{T + t_{cm}}, \quad (1.3)$$

Величини J_E , J_s , J_p , – це функції для таких миттєвих значень T , Q , P_o , відповідно. Вони повинні залежати від [12, 13]:

- твердості заготовки, яку треба обробити;
- швидкості робочого руху верстата;
- стану інструмента;
- глибини і ширини обробки.

Забезпечити належну якість та високу точність підтримки вихідної координати доцільно із застосуванням нейронечітких систем (нейронних мереж та нечітких регуляторів [14-17, 21-25].

Провівши аналіз джерел [14-25] було визначено, що необхідно мати динамічні математичні моделі для складових СКПР. Таким чином маємо:

для давача потужності різання:

$$W_{\partial m}(p) = \frac{K_{\partial mo}}{T_{\partial mo} \cdot p + 1}, \quad (1.4)$$

де $T_{\partial mo}$, $K_{\partial mo}$ – відповідно, стала часу давача потужності та коефіцієнт передачі.

процесу різання:

$$W_{po}(p) = \frac{K_p}{T_{po} \cdot p + 1}, \quad (1.5)$$

де T_{po} - постійна часу процесу різання;

З допомогою пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора при дотриманні номінального значення величини подачі S_z (модульний оптимум) виконується оптимізація по контуру само налаштування коефіцієнта K_p . З датчика швидкості подачі приводу, а також давача потужності різання до входів спостерігача адаптивного надходять сигнали напруги датчика.

Сигнал зворотнього зв'язку $U_{тс}$ (для обмеження швидкості подачі) може з'явитися тоді коли буде перевищено значення напругою U напруги порівняння. Отримане значення розрахованої потужності різання U потрапляє на вхід елемента порівняння після виконання операції розрахунку значення коефіцієнта різання K_r , що треба перемножити на напругу на вході задавача інтенсивності швидкості. У разі виконання умови, коли ввиміряне значення коефіцієнта різання K_r налаштовується значно швидше, чим змінюється дійсне значення K_r , то система буде мати тільки одну динамічну ланку I-го порядку (таким чином вона має бути стійкою при будь-яких значеннях K_r)

З метою надання системі можливості проводити обробку з максимальною можливою потужністю головного приводу станка існує наступна система, показана на рис. 1.4 [2-5].

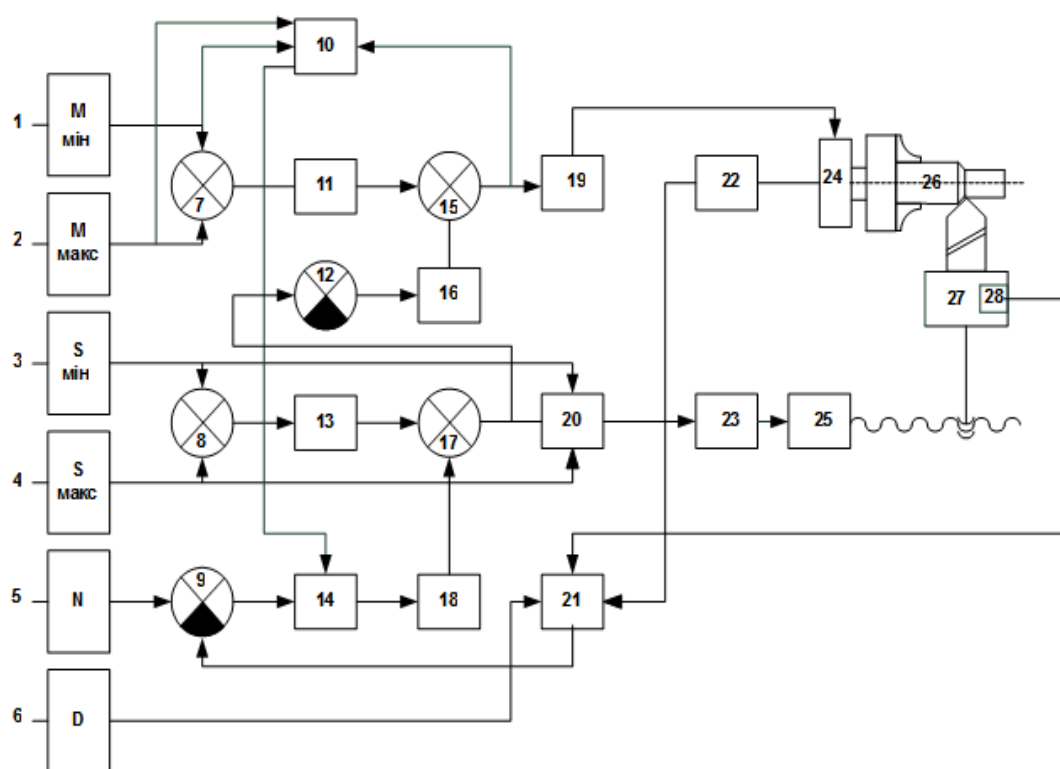


Рисунок 1.4 – Пристрій регулювання потужності різання

Схема має у своєму складі:

задавачі:

- 1 з найменшою частоти обертання;
- 2 з найбільшою частоти обертання;
- 3 найменшої подачі;
- 4 найбільшої подачі;
- 5 потужності різання;
- 6 датчик діаметру, який оброблюють;
- 7, 8, 15, 17 суматори (елемент підсумовування);
- 9, 12 елементи порівняння;
- 10 двоступенева порогова схема;
- 11, 13 дільники;
- 14 аналоговий ключ;
- 16 підсилювач;
- 18 регулятор напруги (на основі потенціометра) з мікродвигунами постійного струму;
- 19 регулятор частоти обертання головного приводу;
- 20 двоступеневий обмежувач 20 напруги;
- 21 блок множення;
- 22 датчик частоти обертання;
- 23 регулятор подачі;
- 24 головний привод;
- 25 привід подачі;
- 26 механізм обертання заготовки;
- 27 механізм переміщення різцетримача;
- 28 датчик сили різання.

Як бачимо, задачу керування процесом різання неможливо розв'язати без використання істотно складного (який підходить для певних умов) регулятора.

1.3. Сучасні напрями удосконалення СКПР

У сучасних умовах в народного господарчому виробництві актуальним є вирішення завдання щодо збільшення продуктивності обладнання та інструментів для різання матеріалу одночасно зі зменшенням всіх витрат (енергетичні, матеріальні тощо) при виробництві продукції.

Враховувати при цьому слід, що керування СКПР (при дотриманні умови скорочення витрат) має бути обов'язково узгоджене з рішеннями першочергової задачі технологічного процесу, згідно з отриманням деталей заданої форми й розмірів і при цьому відповідати вимогам по забезпеченню заданої високопродуктивності технологічного обладнання.

Як правило, існуючі режими різання, що відповідають максимальним значенням всіх показників енергоефективності, знаходяться на межах області допустимих значень величин швидкостей робочих рухів станків.

Таким чином удосконалювати СКПР можна в таких напрямках [8, 20]:

1. Оскільки при застосуванні спеціальних регуляторів виникають додаткові капітальні витрати (що збільшує вартість системи в цілому), то доцільним є відмовитись від таких регуляторів при керуванні режимами різання.

2. Використання програмовано-логічних контролерів (ПЛК) доцільно застосовувати з метою забезпечення керування циклом обробки. Це дасть можливість при керуванні швидкостями робочих рухів станка (з урахуванням наявності ПЛК) автоматично визначати ефективне енергоспоживання режиму обробки.

3. Застосування нечіткого регулятора (НР) в СКПР є доцільним та обґрунтованим, оскільки наявні ПЛК вже мають програмне забезпечення (зазвичай на мові нечіткого керування або мовою FCL). Крім того, сучасні серійно випускаємі контролери мають можливість для реалізації програм нечіткого висновку (виводу), записану на мові FCL.

4. За допомогою НР можна здійснювати підтримку технологічних параметрів (глибина та ширина обробки, твердість матеріалу, стан різального інструменту тощо) в заданому інтервалі відхилень від необхідного значення,

враховуючи наявність про збурюючі фактори, які впливають на зміну силових параметрів процесу різання.

1.4. Висновки

Існуючі сучасні системи, які призначені для керування процесом різання, як правило, застосовують спеціалізовані регулятори. Але це не дозволяє в процесі керування враховувати існуючі збурюючі діяння. Тому доцільним є використання ПЛК з можливістю реалізації застосування нечітких регуляторів (інтегровані fuzzy команди в промислових контролерах вбудованих пристроїв).

2. АНАЛІЗ СУТТЄВИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СКПР. РОЗРОБКА НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СКПР

2.1. Функціональна схема системи

Загальний принцип роботи СКПР можна представити у вигляді функціональної схеми, показаної на рис. 2.1

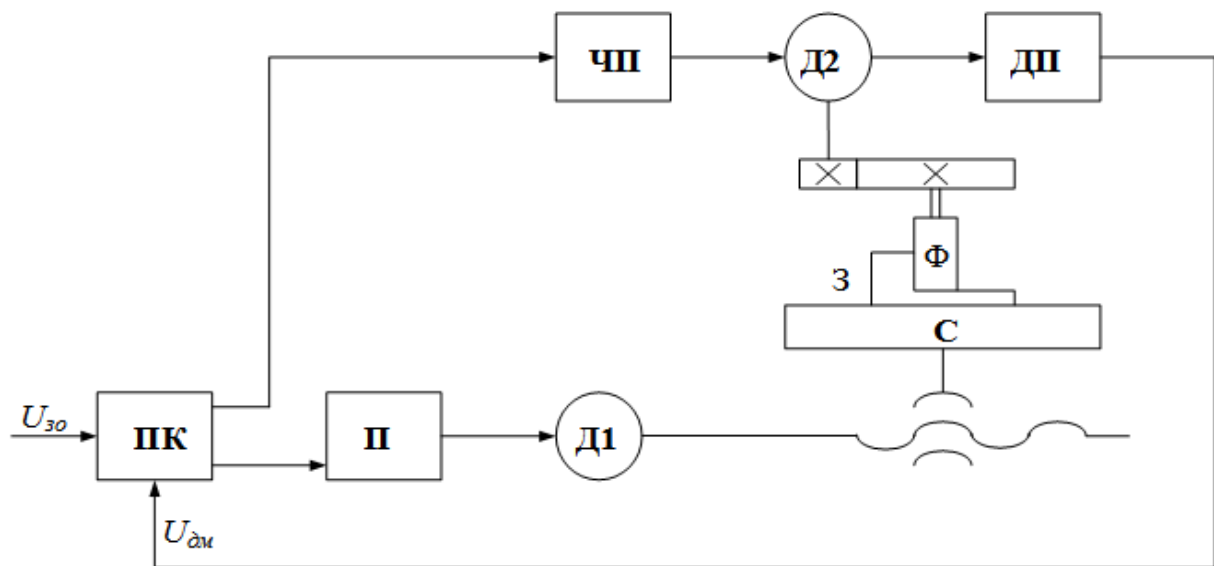


Рисунок 2.1 – Функціональна схема СКПР

Система працює за наступним алгоритмом [4, 5, 8, 11, 12]:

1. На столі С верстата встановлено заготовку 3, яку необхідно обробити. Цю заготовку переміщують на передачі гвинт-гайка за допомогою двигуна подачі Д1, що отримує живлення від перетворювача П.
2. Фреза Ф виконує обробку. Початок роботи фрези завдяки обертання приводом головного руху за допомогою двигуна Д2 та перетворювача ЧП.
3. Пристрій керування ПК призначений для формування сигналів керування приводами робочих рухів верстата. Перед початком на ПК (ПЛК) від датчика потужності ДП та/або датчика потужності двигуна головного руху

потрапляють сигнали задання потужності обробки U_{30} та зворотного зв'язку за потужністю $U_{\text{дм}}$.

Обов'язковим є дотримання сталого режиму роботи. Для такого режиму роботи необхідна математична модель об'єкта керування (техпроцес фрезерування), яку можна сформулювати системою рівнянь наступним чином [2, 4]:

- для потужності обробки усталеному режимі роботи:

$$P_z = \frac{F_z V}{60 \cdot 1020}, \quad (2.1)$$

- для швидкості різання:

$$V = \pi D_{\phi} n \cdot 10^{-3}, \quad (2.2)$$

де n - частота обертання шпинделя фрези, об / хв;

D_{ϕ} - діаметр фрези, мм.

- для головної складової потужності сили різання

$$F_z = \frac{10 C_p t_p^x S_z^y B_z^u K_p}{D_{\phi}^q n^w}, \quad (2.3)$$

де x, q, C_p, w, u - коефіцієнти та величини показників степені (залежать від матеріалу та інструменту, яким виконують обробку);

K_p - коефіцієнт, для врахування умов обробки.

- для подачі на зуб фрези:

$$S_z = \frac{S}{n \cdot z}, \quad (2.4)$$

де z - кількість зубів відповідної фрези.

З урахуванням виразів (2.1)-(2.4) отримаємо:

- залежність потужності різання від частоти обертання шпинделя фрези та швидкості подачі, маємо:

$$P_z = \frac{C_p t_p^x S^y B^u z^{(1-y)} \pi D_\phi^{(1-q)} K_p}{6 \cdot 1020 \cdot 10^3 n^{(w+y-1)}}, \quad (2.5)$$

- залежність для фрези миттєвої оцінки частоти її обертання і швидкості подачі від періоду стійкості фрези, маємо:

$$T = \left(\frac{C_v D_\phi^{(qT-1)} K_v}{10^{-3} \pi n t_p^x \left(\frac{S}{n} \right)^{yT} B^{uT} z^{(pT-yT)}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (2.6)$$

На основі цих рівнянь тепер можна визначити межі можливих змін ширини та глибини обробки, і при цьому визначити певні граничні значення частоти обертання фрези та швидкості подачі. Для обох рівнянь необхідно використовувати однакові значення подачі відповідно до даних певного інструменту та його рекомендованих технічних характеристик, наданих виробником [2, 4, 8].

2.2. Визначення зон допустимих значень частоти обертання шпинделя фрези та швидкості подачі

Найрозповсюдженішими параметрами для техпроцесу обробки при різанні, є потужності приводів головного руху, які становлять від 2,3 до 10,8 кВт [2, 4]. Для визначення зон допустимих значень параметрів швидкості подачі і частоти обертання шпинделя було взято значення потужності, яке дорівнює 3 кВт.

З джерел [2, 4] було взято параметри для заготовки з сірого чавуну HB = 190 ширина 4 см та глибина 2-4 мм торцевої фрези, що має пластинки із твердого сплаву ВК6 з 6 зубцями.

Використовуючи наведені нижче програми (використовуючи програмний пакет Mathcad) було визначено та побудовано лінії зон обмеження з допустимими значеннями швидкості подачі та частотою обертання фрези, показані на рис. 2.2 та рис. 2.3.

Розрахунок зон допустимих значень параметрів частоти обертання фрези та швидкості подачі

```

QU := | i ← 0
      | for n ∈ 1, (1 + 0.2) .. 1000
      |
      | 
$$P_{i,0} \leftarrow \left[ \frac{P_{zz} \cdot 60 \cdot 1020 D^{qv-1}}{[10 \cdot C_p \cdot t_{pH}^{xv} \cdot B^{uv} \cdot (Z \cdot n)^{1-yv} \cdot 3.14 \cdot 0.001]} \right]^{\frac{1}{yv}}$$

      |
      | 
$$P_{i,1} \leftarrow \left[ \frac{F_z \cdot D^{qv} \cdot n^{w+yv}}{10 \cdot C_p \cdot t_{pH}^{xv} \cdot B^{uv} \cdot (Z)^{1-yv}} \right]^{\frac{1}{yv}}$$

      |
      | 
$$P_{i,2} \leftarrow \left( \frac{C_v \cdot D^{q-1} \cdot K_v \cdot n^{y-1} \cdot Z^{y-p}}{T1^m \cdot 3.14 \times 0.001 \cdot t_{pH}^x \cdot B^u} \right)^{\frac{1}{y}}$$

      |
      |  $P_{i,3} \leftarrow S_z n \cdot Z$ 
      |
      | break if  $P_{i,0} \leq P_{i,3}$ 
      |
      |  $P_{i,4} \leftarrow n$ 
      |
      | i ← i + 1

```

Розрахунок потужності різання при обробці з постійними параметрами швидкостей робочих рухів

```

PROG1:= | i ← 0
        | for L ∈ 0..300
        |   | tp ← | tp ← 2 if L ≤ 100
        |   |   | tp ← 3 if 200 > L > 100
        |   |   | tp ← 4 if L ≥ 200
        |   | n ← 200
        |   | S ← 239
        |   | 
$$P \leftarrow \frac{10 \cdot C_p \cdot (tp)^{x_f} \cdot (Sz)^{y_f} \cdot B^{u_f} \cdot Z \cdot (3.14 \cdot df \cdot 0.001 \cdot n)}{60 \cdot 1020 \cdot \left[ df^{q_f} \cdot (n)^w \right]}$$

        |   | Mi,0 ← L
        |   | Mi,1 ← S
        |   | Mi,2 ← n
        |   | Mi,3 ← P
        |   | i ← i + 1
        | M

```

На рис. 2.2-2.3 лінії обмеження позначають:

- 1 максимальну допустиму величину подачі [2, 4];
- 2 максимальну допустимий момент на фрезі;
- 3 номінальну потужність двигуна головного руху;
- 4 задане значення періоду стійкості фрези;
- 5 мінімальну швидкість подачі;
- 6 мінімальну частоту обертання фрези.

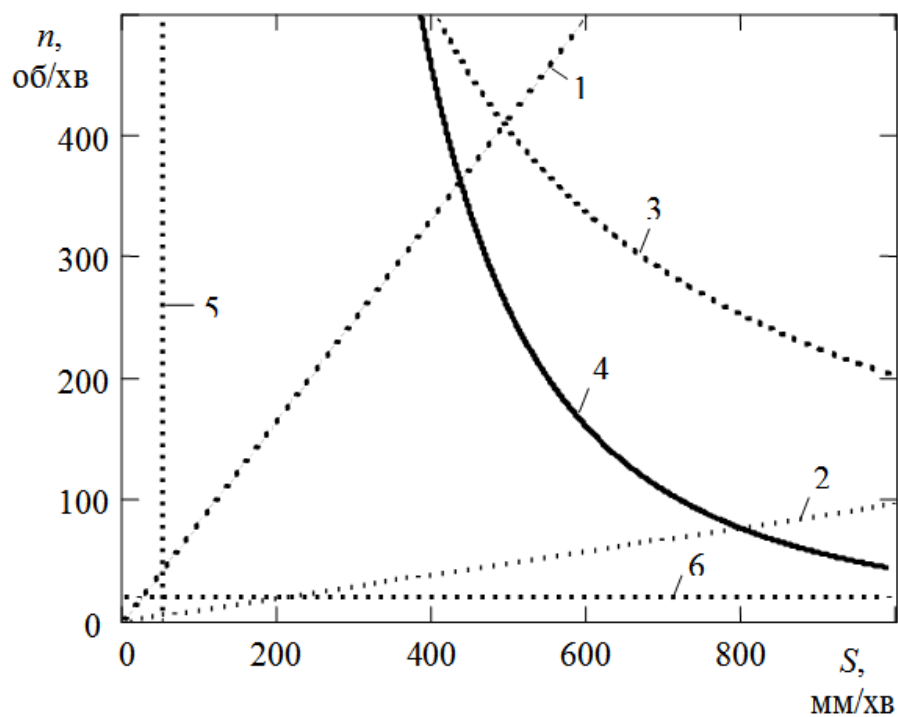


Рисунок 2.2 – Зони області гранично-допустимої швидкості робочих рухів (глибина обробки 2 мм)

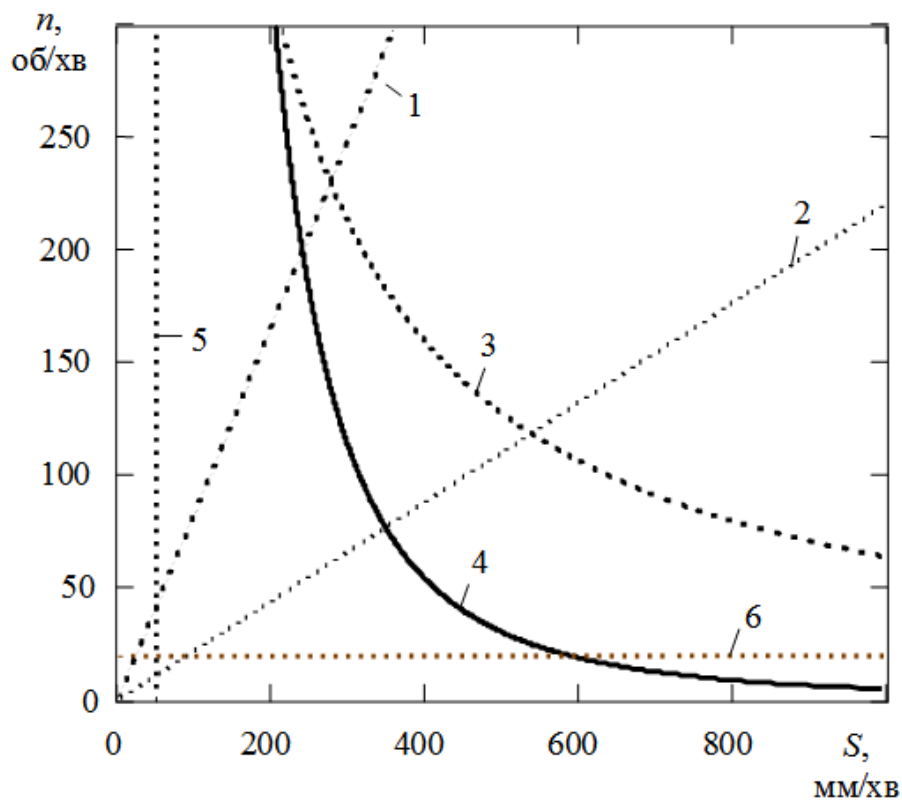


Рисунок 2.3 – Зони області гранично-допустимої швидкості робочих рухів (глибина обробки 4 мм)

За межами зон, показаних на рис. 2.2 та рис. 2.3 знаходяться максимальні значення частоти обертання фрези та швидкості подачі (за умов реалізації електроприводами робочих рухів станка). Для цих умов відповідає точка перетину 1 та 3 лінії (потужності обробки $P_z = 3$ кВт, мінімальна глибина обробки становить $t_p = 2$ мм). Для забезпечення максимально можливої обробки значення показників ефективності необхідно, щоб робоча точка пересувалась згідно заданих ліній обмеження зон допустимих режимів (за умови взаємозв'язаного керування частотою обертання фрези та швидкістю подачі).

З метою перевірки такого принципу керування процесом різання та виконання порівняння з іншими способами керування для прикладу було взято заготовку з чавуну HB = 190 з пластинами твердого сплаву ВК6 (зміна глибини обробки 2-4 мм).

Припустимо що t_p змінюється ступінчасто по довжині поверхні L , а загальна довжина оброблюваної заготовки становить 300 мм [2, 4, 8]:

$$t_p(L) = \begin{cases} t_p = 2 \dots \text{якщо} \dots L \leq 100 \\ t_p = 3 \dots \text{якщо} \dots L \geq 100 \\ t_p = 4 \dots \text{якщо} \dots L \geq 200 \end{cases}, \quad (2.7)$$

Основний робочий час в хвилинах визначається за формулою [2, 4, 8]:

$$t_0 = \sum_{i=1}^k \frac{L_i}{S_i}, \quad (2.8)$$

де L_i - довжина i -ої ділянки поверхні, яку оброблюють мм;

S_i - швидкість подачі на i -й ділянці, мм / хв;

k - число ділянок (для кожної ділянки різна глибина різання).

Енергію, що витрачена на обробку визначаємо за виразом [2, 4, 8]:

$$W = \sum_{i=1}^k P_{zi}(t) \cdot t_i, \quad (2.9)$$

де P_{zi} - потужність різання на певній i -ій ділянці;

t_i - тривалість обробки певної i -ї ділянки.

Визначаємо залежність частоти обертання шпинделя від довжини матеріалу [2, 4, 8]:

$$n(L) = \left[\frac{P_z \cdot 60 \cdot 1020 \cdot D_\phi^{q-1}}{10 \cdot C_p \cdot t_p(L)^x \cdot B^u \cdot S_z^y \cdot Z \cdot 3.14 \cdot 0.001} \right]^{\frac{1}{1-w}}, \quad (2.10)$$

Потужність обробки, кВт

$$P(L) = \left[\frac{10 \cdot C_p \cdot t_p(L)^x \cdot B^u \cdot S_z^y \cdot Z \cdot 3.14 \cdot 0.001}{60 \cdot 1020 \cdot D_\phi^q \cdot t_p(L)^w} \right], \quad (2.11)$$

На рис. 2.4 наведені результати усталених режимів системи.

Якщо керувати лише швидкістю подачі, то частота обертання шпинделя фрези буде відповідати максимальному показнику значення при глибині 2мм точка перетину ліній 1 і 4 (див. рис. 2.2).

Швидкість подачі визначають за виразом [2, 4, 8]:

$$S(L) = \left[\frac{P_z \cdot 60 \cdot 1020 \cdot D_\phi^{q-1}}{10 \cdot C_p \cdot t_p(L)^x \cdot B^u \cdot (Z \cdot n(L))^{1-y} \cdot 3.14 \cdot 0.001} \right], \quad (2.12)$$

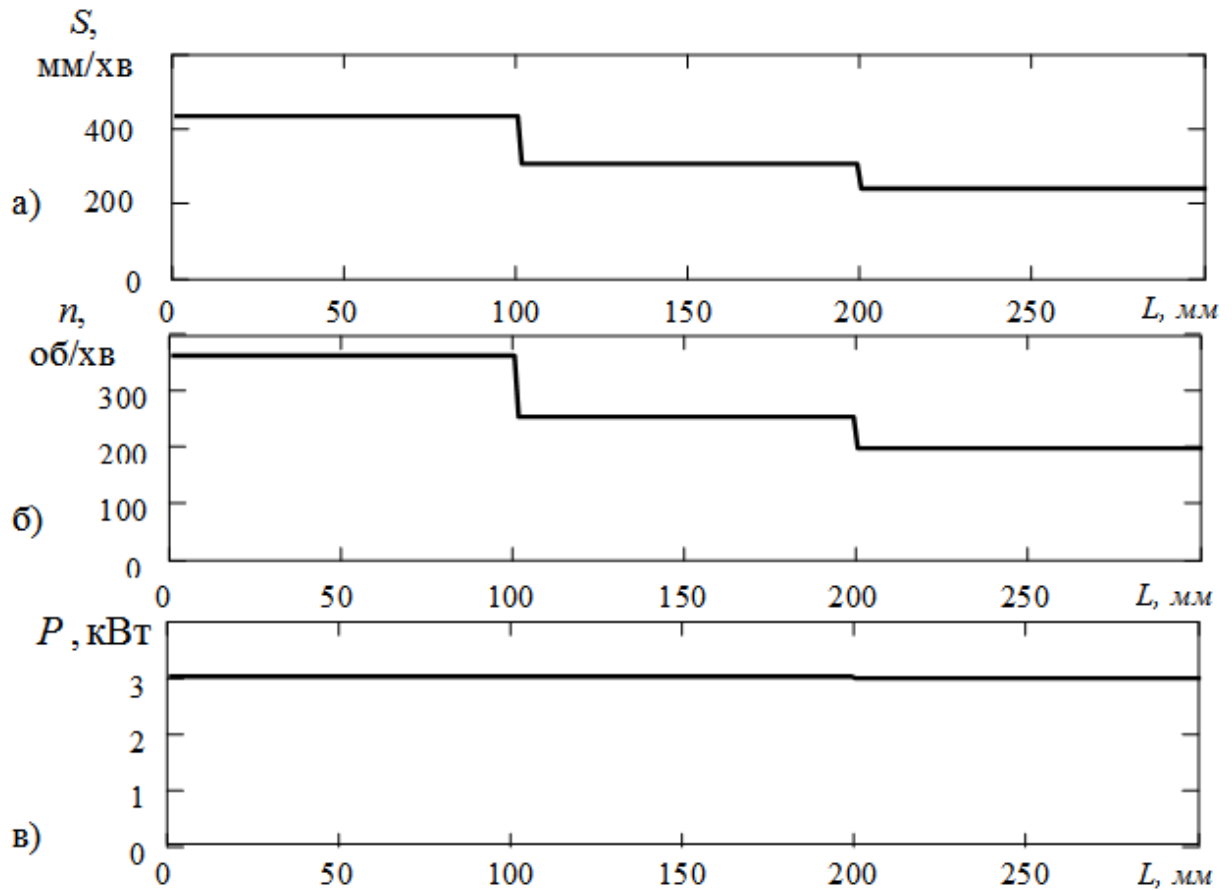


Рисунок 2.4 – Графіки залежності довжини оброблюваної поверхні заготовки в умовах взаємопов'язаного керування робочими рухами станка:
а) швидкості подачі; б) частоти обертання шпинделя; в) потужності різання

Потужність обробки:

$$P(L) = \left[\frac{10 \cdot C_p \cdot t_p(L)^x \cdot B^u \cdot \left(\frac{S(L)}{Z \cdot n(L)} \right)^y \cdot 3.14 \cdot 0.001 \cdot n(L)}{60 \cdot 1020 \cdot D_\phi^q \cdot t_p(L)^w} \right], \quad (2.13)$$

Згідно рис. 2.3 при глибині 4 мм відповідають точці перетину ліній 1 і 3 (за умови обробки з постійними швидкостями робочих рухів станка)

Результати розрахунків наведені на рис. 2.5 та рис. 2.6.

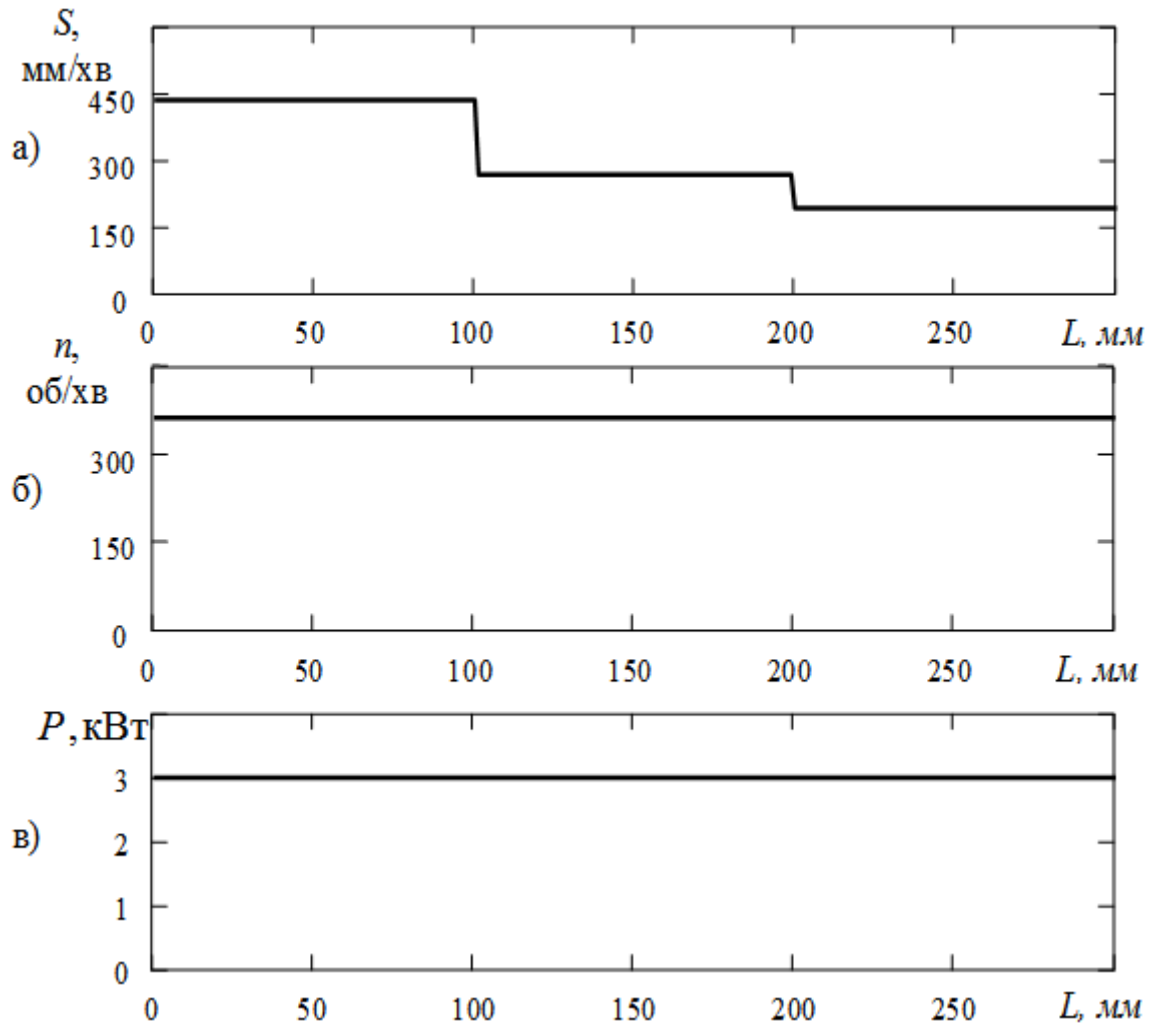


Рисунок 2.5 – Залежність довжини матеріалу, що оброблюють, при керуванні лише швидкістю подачі:

а) швидкості подачі;

б) частоти обертання шпинделя;

в) потужності різання

Аналіз результатів розрахунку при різних способах керування показав, що при керуванні лише електроприводом подачі можливо зменшення тривалості обробки порівняно з використанням постійних швидкостей робочих рухів складає 11,33 %, а зростання споживання електроенергії складає 8,92%.

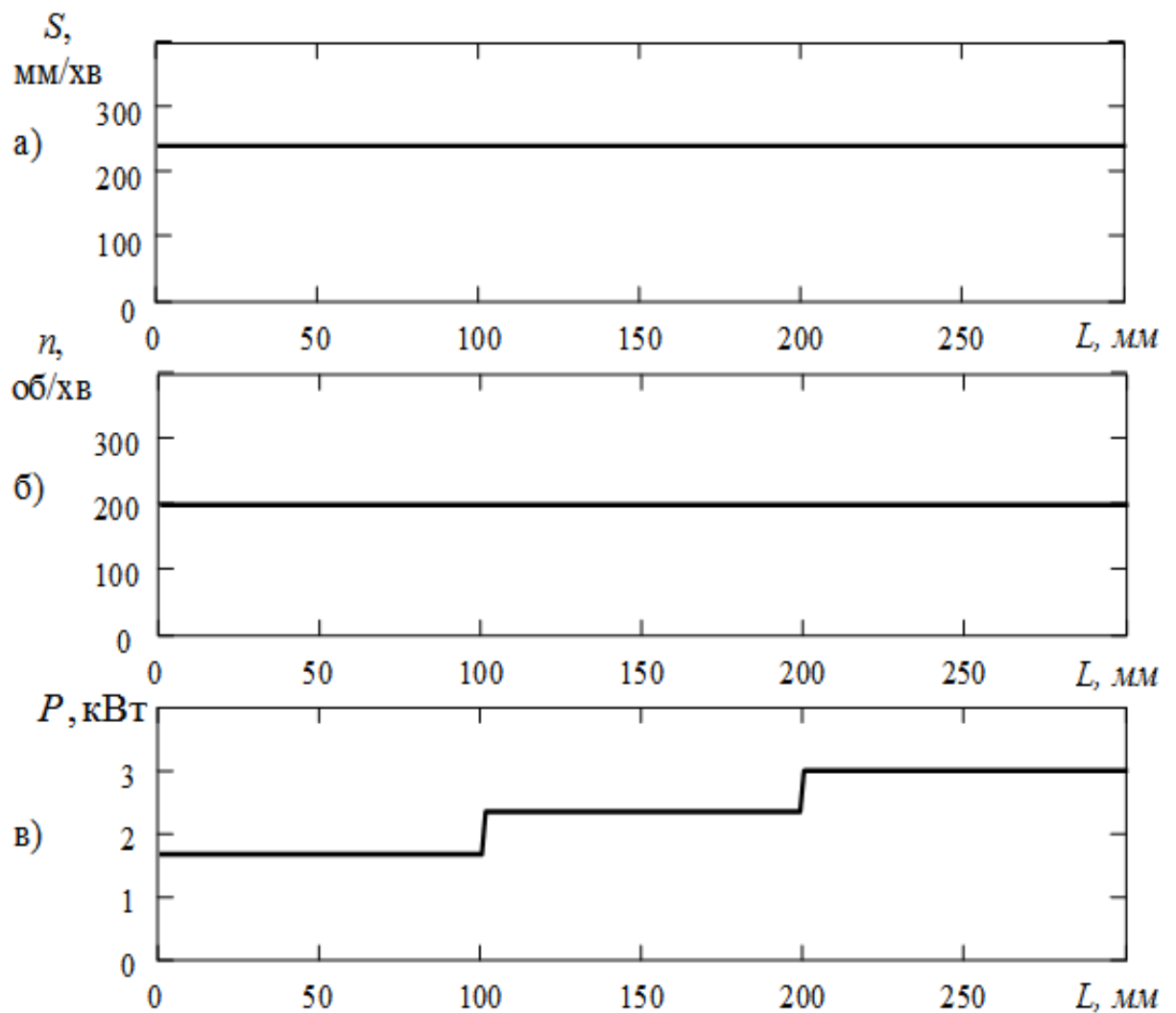


Рисунок 2.6 – Залежність довжини матеріалу при обробці з постійними швидкостями робочих рухів:

а) швидкості подачі;

б) частоти обертання шпинделя;

в) потужності різання

Аналіз результатів при взаємозв'язаному керуванні швидкостями робочих рухів показав, що відносне зменшення тривалості обробки порівняно з постійними швидкостями робочих рухів дорівнює 18 %, а витрати електроенергії не змінюються.

2.3. Побудова структури нечіткого регулятора

Для розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень керуванні СКПР доцільно використати нечітке керування. Таким чином загальну структуру нечіткого регулятора (НР) для інтелектуальної СКПР можна представити у вигляді на рис. 2.7.

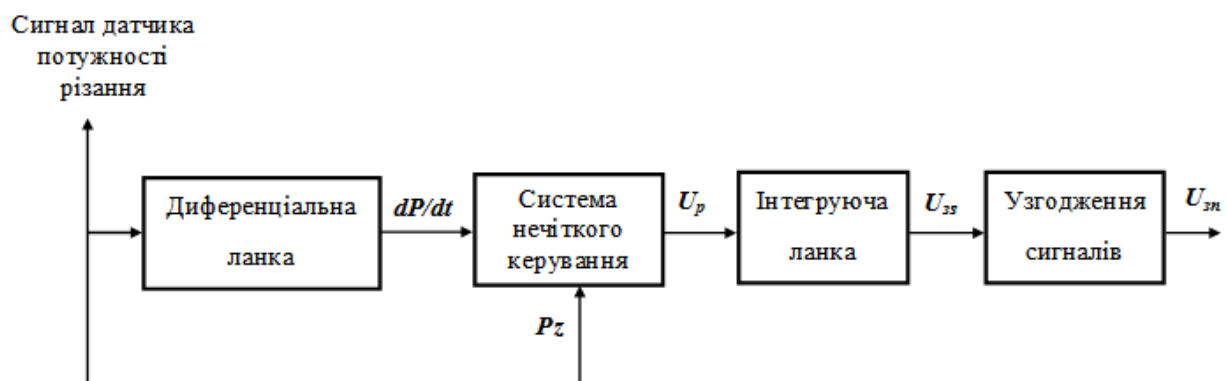


Рисунок 2.7 – Схема нечіткого регулятора для інтелектуальної СКПР

Для використання нечіткого лінгвістичного опису необхідна наявність бази даних (БД) за допомогою якої будуть пов'язані лінгвістичні змінні (ЛЗ) через правила нечітких продукцій з відповідними до них функцій належності (ФН).

На вхід НР будуть надходити вхідні лінгвістичні змінні з інформацією щодо сигналів, що пропорційні потужності різання P_z (а також похідної для неї).

Функція належності це функція, за допомогою якої можна обчислити величину приналежності будь якого елемента універсальної множини з нечіткою множиною [14-18]. На виході нечіткого регулятора формується інформація, яка відповідає сигналу задання величини прискорення для електропривода подачі станка U_p (вихідна змінна). Інтегратор формує в свою чергу сигнал задання швидкості подачі.

З метою спрощення чисельних розрахунків та обчислювальних ресурсів доцільно при реалізації НР необхідно застосовувати нечіткі множини, які можна представити у вигляді простої математичної функції.

У відповідності з виразом 2.14 здійснюється формування сигналів задання швидкості електропривода головного руху для стабілізації подачі узгодження частоти обертання шпинделя фрези та швидкості подачі:

$$U_{зп} = \frac{U_{zs} \cdot k_{еп} \cdot k_{мппп}}{S_z \cdot z \cdot k_{егр} \cdot k_{мпгр}}, \quad (2.14)$$

де $k_{еп}$, $k_{егр}$ - коефіцієнти електроприводів подачі і головного руху;

$k_{мппп}$, $k_{мпгр}$ - коефіцієнти механічних передач приводів подачі і головного руху.

2.4. Висновки

З метою забезпечення необхідно заданої послідовності технооперацій у станках використовують ПЛК з можливістю нечіткого керування (fuzzy-регулятор). Застосування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень дозволить розширити можливості системи керування потужністю різання, шляхом циклового програмного керування, що дозволить підвищити продуктивність та зменшити енергоспоживання обладнання та інструментів.

3. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СКПР З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

3.1. Побудова функцій належності

Правила визначення та побудови функцій належності та їх опис наведено в [1, 15, 16, 18, 23-27]. Скориставшись інформацією з цих джерел було побудовано функції належності для терм-множин лінгвістичних змінних (ЛЗ) потужності різання P , швидкості зміни потужності dP та прискорення завдання електроприводу подачі U_p інтелектуальної СКПР.

Маємо такі терм-множини:

1 – ЛЗ потужність P :

$$P = \left\{ \begin{array}{l} PNB \text{ потужність різання менше заданої,} \\ Z \text{ потужність дорівнює заданій,} \\ PPS \text{ потужність більше заданої} \end{array} \right\}$$

2 – ЛЗ похідна потужності dP :

$$dP = \left\{ \begin{array}{l} NB \text{ потужність зменшується дуже швидко,} \\ NS \text{ потужність зменшується швидко,} \\ Z \text{ потужність не змінюється,} \\ PS \text{ потужність збільшується швидко,} \\ PB \text{ потужність збільшується дуже швидко} \end{array} \right\}$$

3 – ЛЗ прискорення U_d :

$$U_p = \left\{ \begin{array}{l} NB \text{ прискорення від'ємне велике,} \\ NM \text{ прискорення негативне середнє,} \\ NS \text{ прискорення від'ємне мале,} \\ Z \text{ прискорення дорівнює нулю,} \\ PS \text{ прискорення позитивне мале,} \\ PM \text{ прискорення позитивне середнє,} \\ PB \text{ прискорення позитивне велике} \end{array} \right\}$$

Графіки функції належності для цих терм-множин показані на рис. 3.1.

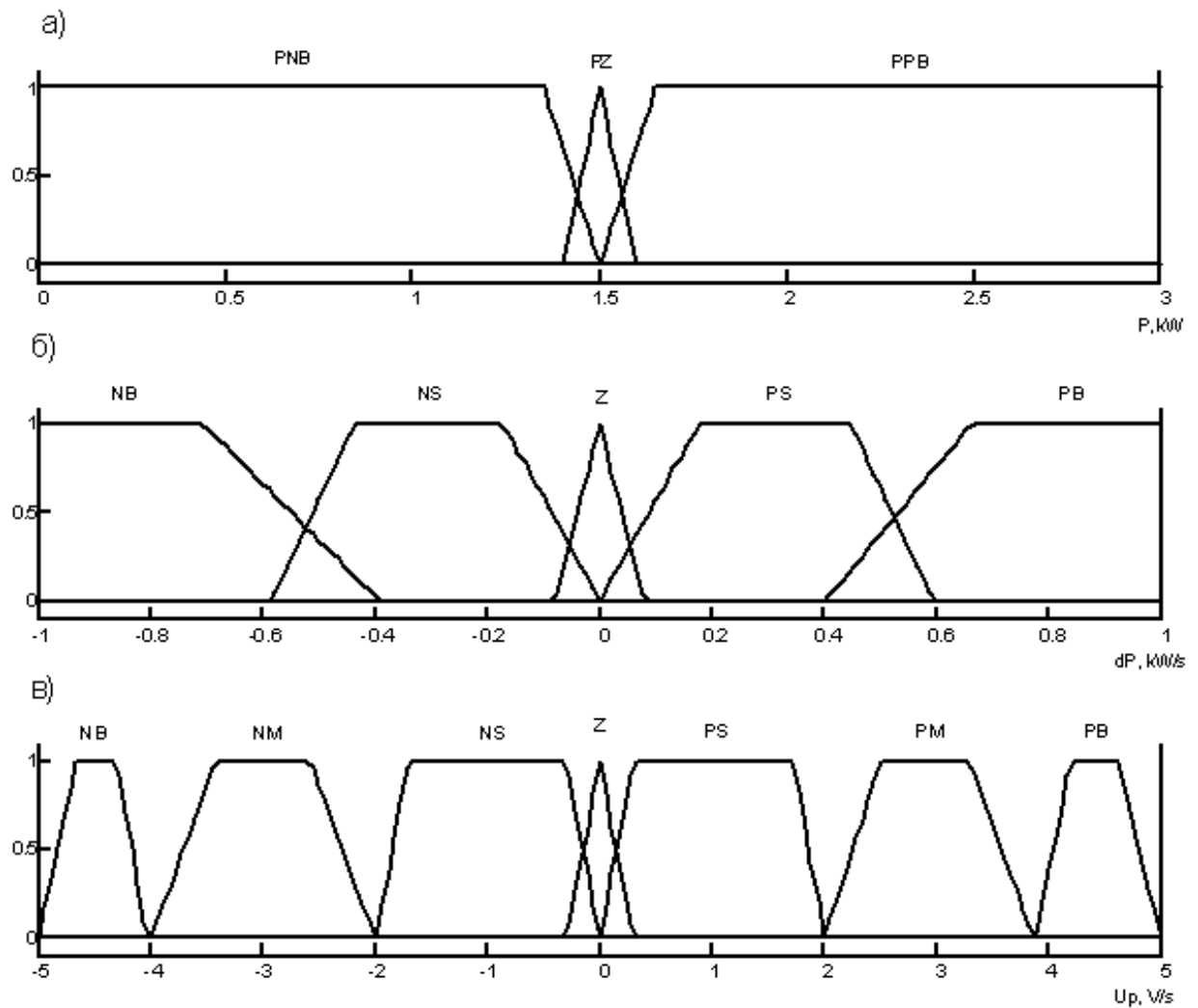


Рисунок 3.1 – Функції належності для нечіткого регулятора інтелектуальної СКІР:

а) потужність різання P_z ; б) швидкість зміни потужності dP / dt ; в) прискорення електропривода подачі U_p

Функції належності допомагають виконати опис таких термів ЛЗ:

- «потужність дорівнює заданій Z
- швидкість зміни потужності дорівнює нулю Z
- прискорення дорівнює нулю Z ».

Було взято трикутну форму функцій належності за таким виразом [25, 27]:

$$\mu_{A1}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a \vee c \leq x \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{при } b \leq x \leq c \end{cases}, \quad (3.1)$$

де a, b, c - певні числові параметри, які можуть приймати дійсні значення відповідно до відношення $a < b < c$.

Значення параметрів a, b, c наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри a, b, c для функції належності

Параметри	a	b	c
P	1.42	1.52	1.62
dP	-0.083	0	0.082
Up	-0.33	0	0.32

Для трапецієвидної форми функції належності необхідно застосовувати таку формулу [25, 27]:

$$\mu_{A2}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq a \vee d \leq x \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{при } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{при } c \leq x \leq d \end{cases}, \quad (3.2)$$

де a, b, c, d - певні числові параметри, які можуть приймати дійсні значення відповідно до відношення $a < b < c < d$.

Параметри a , b , c , d наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення параметрів a , b , c , d

Параметри		a	b	c	d
P	PNB	0	0	1.36	1.49
	PPB	1.4	1.6	3,1	3,1
dP	NB	-1	-1	-0.72	-0.4
	NS	-0.62	-0.41	-0.2	0
	PS	0	0.21	0.42	0.61
	PB	0.41	0.62	1,2	1
Up	NB	-5	-4.65	-4.3	-4
	NM	-4	-3.52	-2.5	-2
	NS	-2,1	-1.72	-0.3	0
	PS	0	0.3	1.7	2
	PM	2,6	2.51	3.52	3.8
	PB	3.8	4.3	4.65	5,2

3.2. Розробка архітектури системи нечіткого керування

На рис. 3.2 показана архітектура інтелектуальної системи нечіткого керування потужністю різання. Загалом вона складається з таких блоків:

БФаз - блок фазифікації;

БСІ - блок системи інференції;

БДеф - блок дефазифікації.

Перший блок БФаз призначений для фазифікація входних сигналів (перетворення чітко визначених сигналів у нечітку форму). Таким чином, спочатку необхідно визначити кількість нечітких висловлювань кожному входному сигналу (для БЗ НР), оскільки БЗ входить до блоку нечіткого виводу.

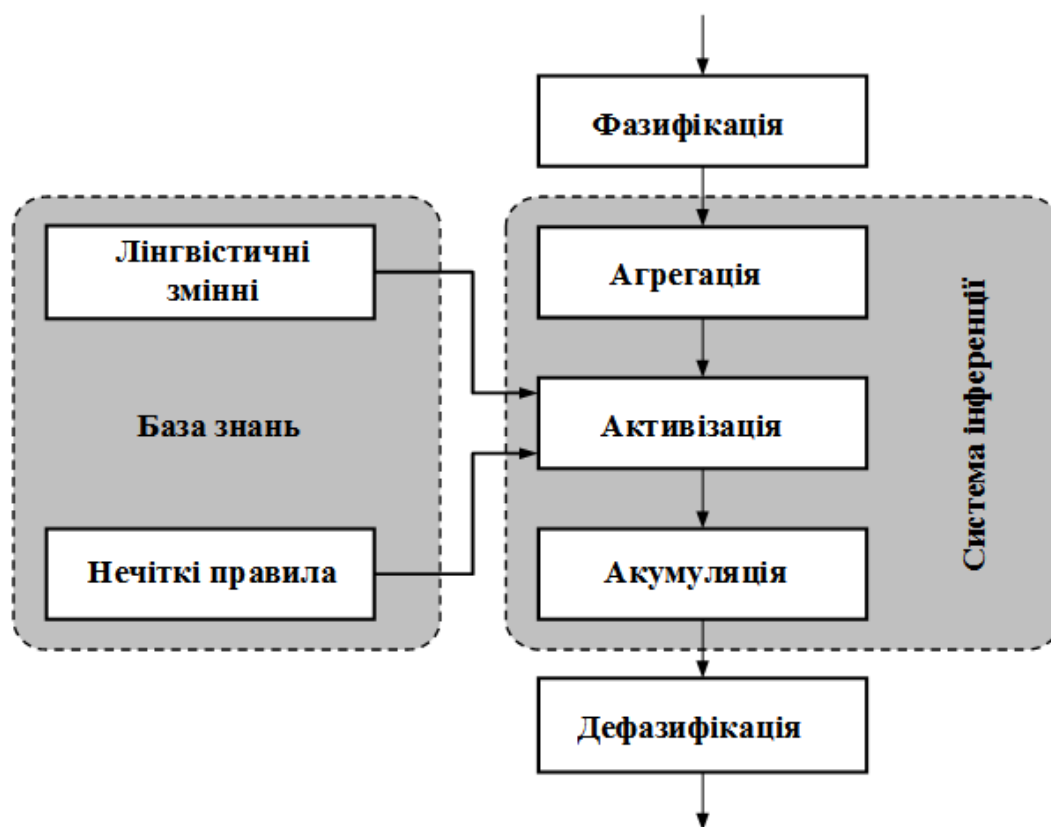


Рисунок 3.2 – Архітектура інтелектуальної системи нечіткого керування

Врахувавши значення вхідних та вихідних ЛЗ було сформовано БЗ НР, яка представлена в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – База правил нечітких продукцій НР

		P		
		PNB	PZ	PPB
dP	PB	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>
	PS	<i>Z</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
	Z	<i>PS</i>	<i>Z</i>	<i>NS</i>
	NS	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>Z</i>
	NB	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>

Оскільки алгоритм опрацювання інформації та виведення Мамдані найпростіший з усіх, то його було застосовано при синтезі системи інференції.

Проте цей алгоритм також рекомендують застосовувати й в інших областях [26] (СППР та експертні системи).

При агрегуванні підумов в нечітких правилах користуються умовою, що ті правила у яких ступень істинності відмінна ніж нуль, треба вважати активними для подальших розрахунків. З метою скорочення часу виведення необхідно враховувати лише активні правила.

Виконання акумуляції висновків нечітких правил-продукцій здійснюється шляхом складання нечітких множин з відповідними до них термами підвисновків, які належать одній і тій же ЛЗ.

За методом центру тяжіння виконується дефазифікації вихідних змінних [НР]:

$$y = \frac{\frac{\max}{\int x \mu(x) dx}}{\frac{\max}{\int \mu(x) dx} \frac{\min}{\int \mu(x) dx}}, \quad (3.3)$$

де y - результат дефазифікації;

x - змінна, відповідна вхідній ЛЗ;

$\mu(x)$ - функція належності нечіткої множини;

$\min$, $\max$ - відповідно ліві та праві точки інтервалу носія нечіткої множини для вхідної ЛЗ.

3.3. Розробка нечіткої моделі інтелектуальної СКПР

Як було зазначено в попередньому підрозділі - етапи виконання налагодження НР (див. рис. 3.1 та рис. 3.2) полягають на використанні алгоритма Мамдані на основі мікроконтролера з нечітким ПЛК.

Для мови FCL необхідний стандарт ІЕС1131-3. При цьому взаємодія алгоритму нечіткого керування з середовищем програмування повинно бути

приховано від відповідних програм. Саме тому алгоритм нечіткого керування слід представляти у формі функціонального блоку.

В якості алгоритму нечіткого висновку використано алгоритм Мамдані. Метод активізації **min**, для акумуляції висновків метод **max**. Для методу дефазифікації метод центру тяжіння, який задається ключовим словом **COGS**.

Фазифікація в мові FCL описується такими ключовими словами **FUZZIFY** і **END_FUZZIFY** так: (*Ім'я_терма: = функція_належності ;*).

Знаходження нечіткого значення кожної вихідної змінної описується ключовими словами **DEFUZZIFY** та **END_DEFUZZIFY** змінна, яку застосовують для дефазифікація. Її слід записувати після ключового слова **DEFUZZIFY**. Також це ім'я треба задати на початку в **VAR_INPUT**.

Для визначення механізму нечіткого виводу використовується один або кілька блоків правил. З метою зручності та надання можливості декомпозиції бази правил на окремі модулі дозволяється використовувати кілька блоків правил. При цьому кожен блок правил повинен мати унікальне ім'я. Правила повинні бути визначені між ключовими словами **RULEBLOCK** і **END_RULEBLOCK**.

Текст-лістинг програми представлений нижче.

Лістинг нечіткої моделі інтелектуальної СКПР з використанням мови FCL стандарту IEC-61131/3

FUNCTION_BLOCK

VAR_INPUT потужність різання: **REAL**; **END_VAR**

VAR_INPUT швидкість зміни потужності: **REAL**; **END_VAR**

VAR_OUTPUT прискорення: **REAL**; **END_VAR**

FUZZIFY потужність різання

TERM PNB : = (0 0 1.38 1.8);

TERM PZ : = (1.6 1.7 1.8);

TERM PPB : = (1.7 1.85 3 5);

END_FUZZIFY

FUZZIFY швидкість зміни потужності

```

TERM NS:=(-0.8 -0.46 -0.19 0);
TERM Z:=(-0.09 0 0.07);
TERM PS:=(0 0.16 0.48 0.8);
TERM NB:=(-2.6 -1.3 -0.74 -0.5);
TERM PB:=(0.5 0.69 1.23 2.84);
END_FUZZIFY
DE FUZZ IFY прискорення
TERM NS:=(-2 -1.75 -0.5 0);
TERM Z:=(-0.3 0 0.4);
TERM PS:=(0 0.2 1.75 2);
TERM NM:=(-4 -3.45 -2.55 -2);
TERM PM:=(2 2.3 3.3 3.89);
TERM NB:=(-5 -4.65 -4.6 -4.06);
TERM PB:=(3.86 4.21 4.66 5);
ACCU:MAX;
METHOD : COGS;
DEFAULT: =0;
END_DEFUZZIFY
RULEBLOCK NUMBER_1
AND: MIN;
    RULE 1 :IF потужність різання IS PZ AND швидкість зміни потужності IS Z THEN прискорення IS Z;
    RULE 2 :IF потужність різання PI3 IS PZ AND швидкість зміни потужності IS PS THEN прискорення IS NS;
    RULE 3 :IF потужність різання PI3 IS PZ AND швидкість зміни потужності IS PB THEN прискорення IS NM;
    RULE 4 :IF потужність різання PI3 IS PZ AND швидкість зміни потужності IS NS THEN прискорення IS PS;
    RULE 5 :IF потужність різання PI3 IS PZ AND швидкість зміни потужності IS NB THEN прискорення IS PM;
    RULE 6 :IF потужність різання PI3 IS PPB AND швидкість зміни потужності IS Z THEN прискорення IS NS;

```

RULE 7 :IF потужність різання PI3 IS PPB AND швидкість зміни потужності IS PS THEN прискорення IS NM;

RULE 8 :IF потужність різання PI3 IS PPB AND швидкість зміни потужності IS PB THEN прискорення IS NB;

RULE 9 :IF потужність різання PI3 IS PPB AND швидкість зміни потужності IS NS THEN прискорення IS Z;

RULE 10 :IF потужність різання PI3 IS PPB AND швидкість зміни потужності IS NB THEN прискорення IS PS;

RULE 11 :IF потужність різання PI3 IS PNB AND швидкість зміни потужності IS Z THEN прискорення IS PS;

RULE 12 :IF потужність різання PI3 IS PNB AND швидкість зміни потужності IS NS THEN прискорення IS PM;

RULE 13 :IF потужність різання PI3 IS PNB AND швидкість зміни потужності IS NB THEN прискорення IS PB;

RULE 14 :IF потужність різання PI3 IS PNB AND швидкість зміни потужності IS PS THEN прискорення IS Z;

RULE 15 :IF потужність різання PI3 IS PNB AND швидкість зміни потужності IS PB THEN прискорення IS NS;

RND_RULEBLOCK

END_FUNCTION_BLOCK

3.4. Висновки

Визначено лінгвістичні змінні: потужність різання, швидкість її зміни та прискорення електропривода подачі. Для цих змінних побудовано функції належності та визначено терм-множини. Визначено числові параметри для кожної з функцій належності, при цьому в таблицях значень параметрів не наведено терм Z, оскільки він не змінюється та дорівнює нулю.

Наведено архітектуру нечіткої інтелектуальної СКІР, яка має в своєму складі базу знань, що складається з ЛЗ та нечітких правил, а також система інференції до складу якої входять блоки агрегації, активізації та акумуляції висновків. Згідно даної архітектури наведено лістинг програми на мові FCL.

4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СКПР З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

4.1. Побудова моделі

Для дослідження розробленої інтелектуальної СКПР фазі-регулятором в середовищі Simulink (програмний пакет Matlab [19]) було побудовано наступну модель, показану на рис. 4.1.

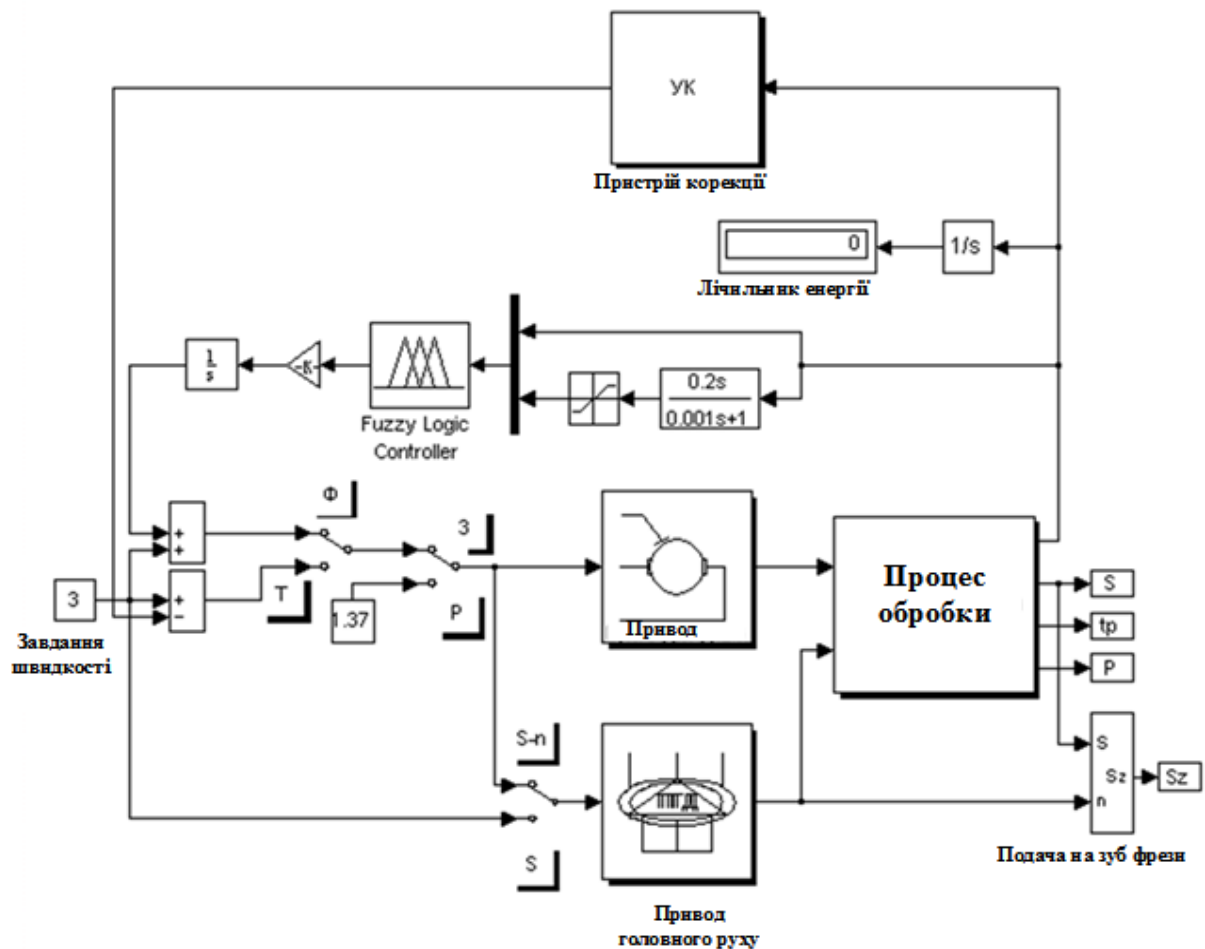


Рисунок 4.1 – Інтелектуальна СКПР. Схема моделі.

Для моделювання процесу обробки матеріалу з датчиком потужності різання, електроприводами подачі та головного руху станка та фаззі-контролером ці блоки було включено до блоків підсистем, які моделюють ці процеси.

На рис. 4.2 наведено схему моделювання процесу різання. Потужність обробки пов'язана з діями, які керують швидкістю електроприводів головного руху та подачі, збурюючими діями (змiна глибини й ширини обробки).

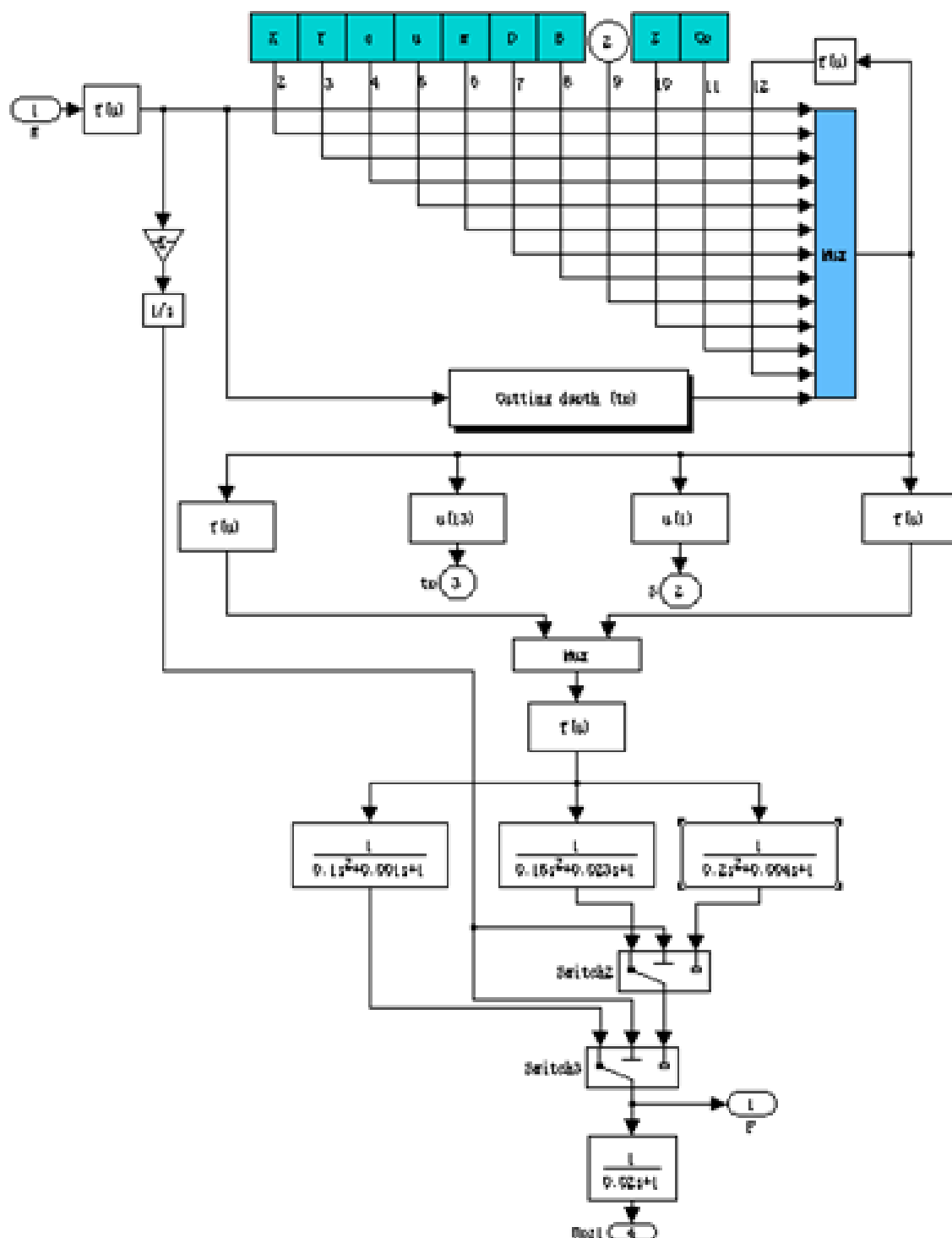


Рисунок 4.2 – Схема для моделювання процесу різання

Оскільки постійна часу обернено пропорційна частоті обертання фрези та швидкості подачі (крім того змінюється пропорційно відносно кількості числа зуб фрези та глибини різання), то аперіодичну ланку II порядку з постійною часу було застосовано для обліку динамічних властивостей процесу обробки.

Імпульсному електроприводу постійного струму відповідає модель електропривода подачі столу станка. Система керування цього електропривода містить ПІ-регулятор швидкості й релейний регулятор струму двигуна. Тобто модель електропривода головного руху побудована на роботу для системи перетворювач частоти-асинхронний двигун.

Крім того, можна обирати різні варіанти дослідження систем керування процесом обробки на станку. Для цього передбачено наявність спеціальних перемикачів. Для моделювання системи із фазі-регулятором або традиційним регулятором треба застосовувати перемикач Ф-Т. Для дослідження роботи замкненої або розімкнутої системи необхідно використовувати перемикач З-Р. Реалізацію варіантів систем з керуванням забезпечує перемикач S-n-S (взаємозв'язане керування швидкостями електроприводів головного руху і подачі/керування тільки швидкістю електроприводу подачі).

Для підрахунку витраченої на здійснення процесу обробки заготовки запропоновано лічильник енергії.

4.2. Побудова динамічних характеристик

На рис. 4.3 наведено динамічні характеристики без зворотнього зв'язку. При дослідженні системи з НР на входи електроприводів надходить інформація про сигнал задання тах швидкості (одночасно з вихідним сигналом інтегратора) на вхід інтегратора надходить сигнал від НР.

При дослідженні в якості прикладу для моделі було взято кінцеву фрезу з поверхнею заготовки припуску. Припуск може змінюватись рівнями глибиною до 1,5 мм, 2,0 мм, 2,5 мм, а також змінюватись у довжину до 10 мм кожен.

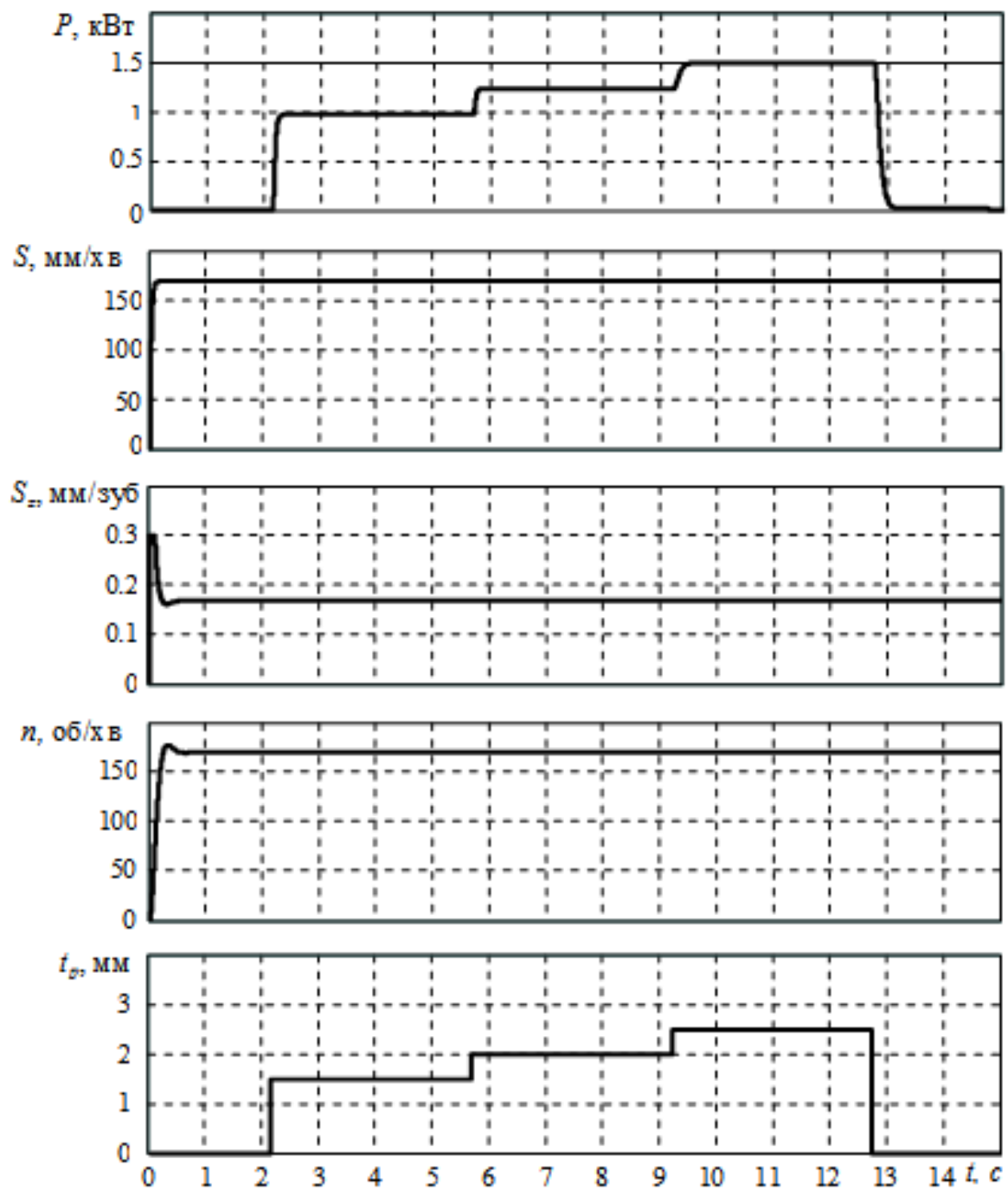


Рисунок 4.3 – Динамічні характеристики без зворотнього зв’язку для потужності

Згідно даного рисунка для станка з постійною швидкістю робочих рухів та одночасним забезпеченням найменш можливої тривалості обробки доцільно обирати найбільш допустиме значення подачі. Але при цьому частота обертання

шпинделя має бути для найбільшою. Також потужність обробки досягне заданого значення якщо буде максимальна глибина різання. Результати моделювання представлено як графіки залежності потужності P , частоти обертання шпинделя n , швидкості подачі S , глибини обробки t_p від часу t та подачі на зуб фрези S_z .

Регулятор повинен аналізувати стани 2 вхідних сигналів. Вони є пропорційними потужності обробки та її похідної.

Головне обмеження техпроцесу це допустиме значення подачі на зуб фрези [4]. Це значення визначається відповідно до умов міцності ланцюгів приводу головного руху та обладнання (інструменту) у разі відомих значень ширини та глибини обробки. При обробці з малою потужністю двигуна головного руху головним обмеженням може бути номінальна потужність двигуна.

Потім було змодельовано ситуацію обробки цієї ж заготовки з використанням НР та керування тільки лише швидкістю подачі при зміні глибини обробки (при цьому буде змінюватись швидкість подачі та значення подачі на зуб фрези). Характеристики такого варіанту показані на рис. 4.4.

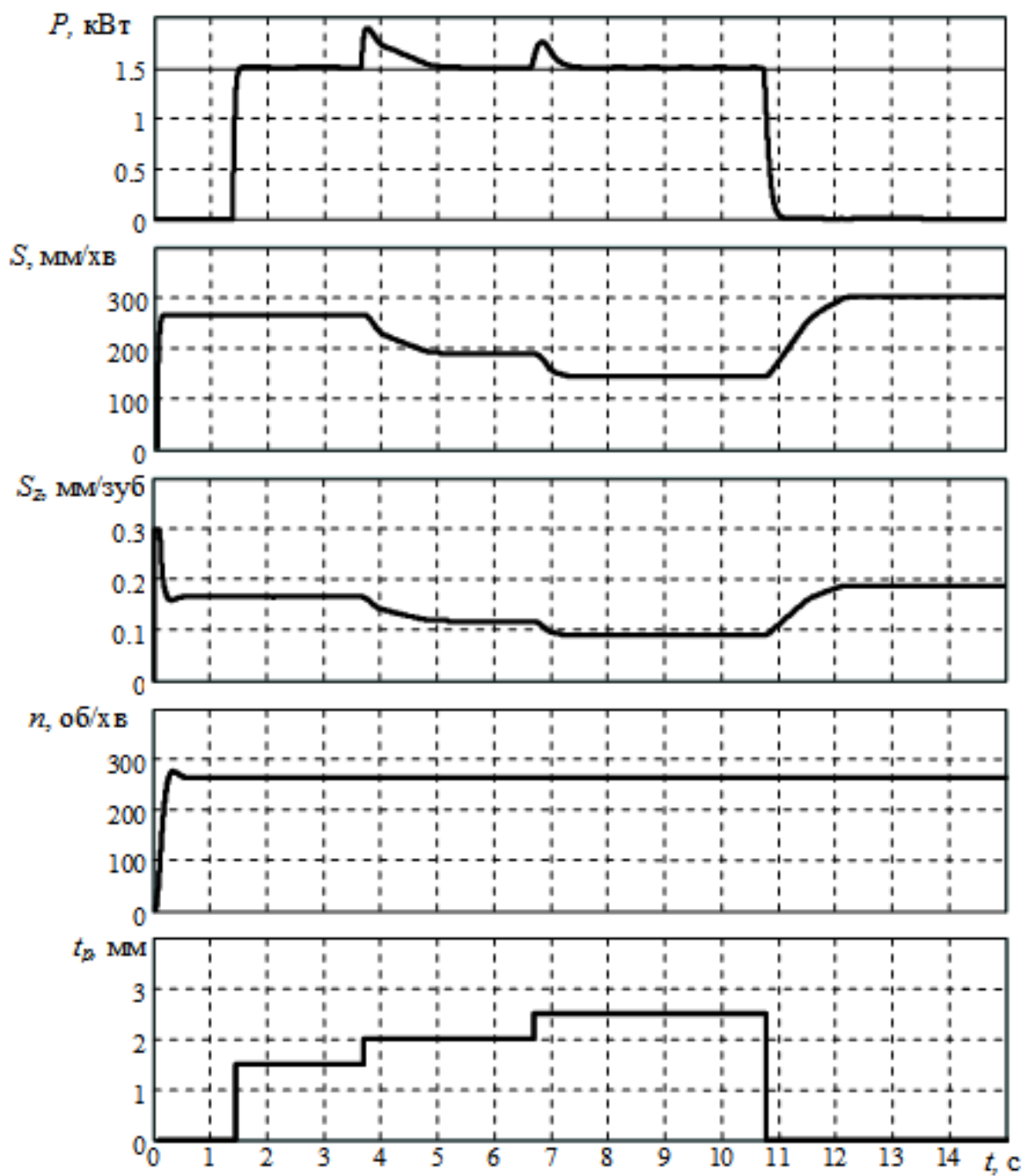
Для варіанту з НР зміна глибини обробки змінюється частота обертання шпинделя фрези, але при цьому задане значення подачі підтримується в незмінному стані. Графіки показані на рис. 4.5.

Щоб порівняти всі запропоновані варіанти моделювання їх треба порівняти. Будемо порівнювати за оцінкою тривалості обробки та витрат електроенергії. На рис. 4.6 показана порівняльна оцінка за тривалістю обробки, а на рис. 4.7 порівняння за витратами на електроенергію.

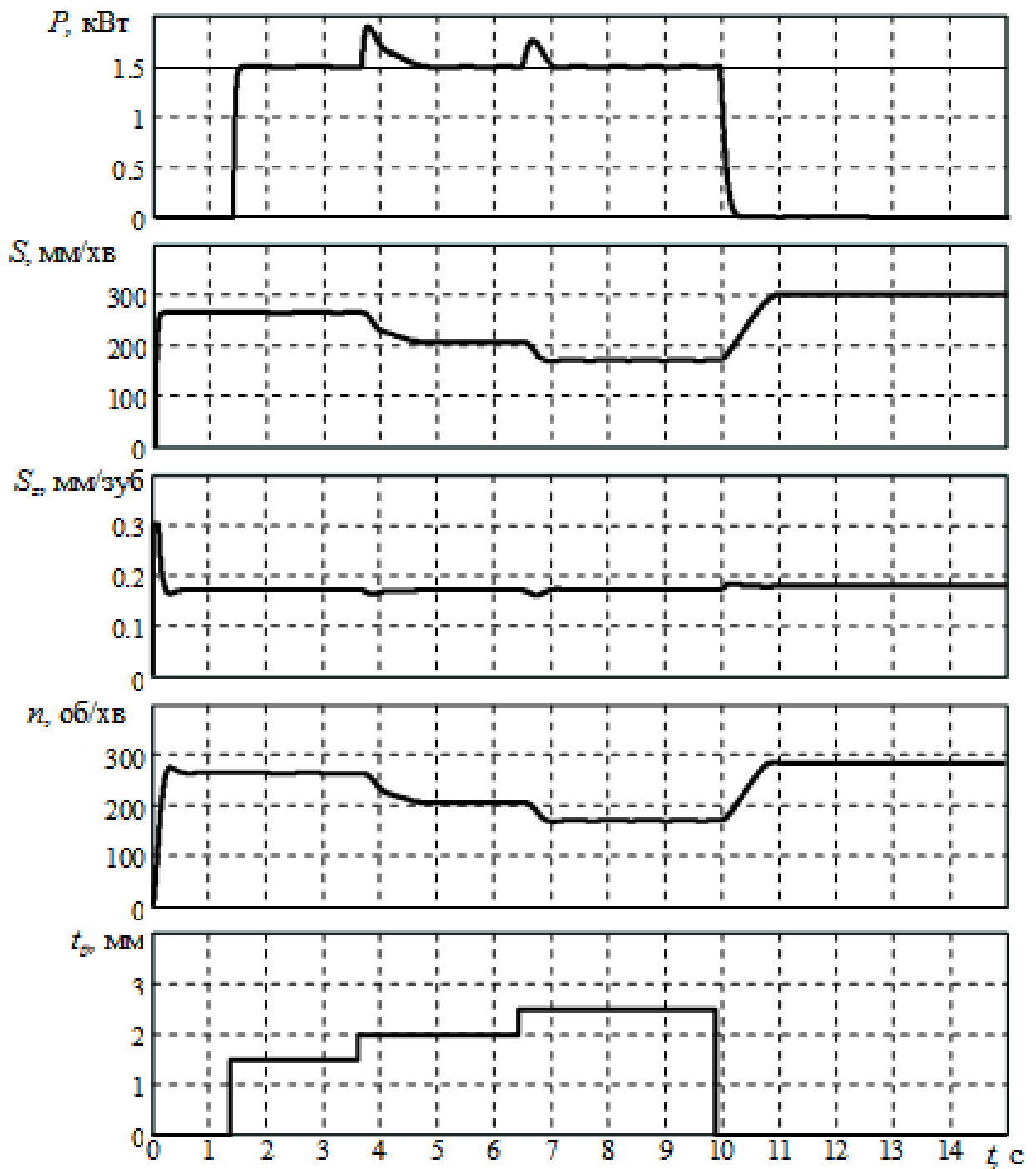
Таким чином в результаті видно, що коли потужність різання стабілізується за допомогою керування тільки електроприводом подачі, то відносне зменшення тривалості обробки (у порівнянні з обробкою з постійними швидкостями робочих рухів) становить близько 11,32 %. Але при цьому одночасно збільшується відносне електроспоживання майже на 9%.

При варіанті керування швидкістю електроприводів головного руху та подачі підтримуючі при цьому задане значення подачі (в умовах однакових

витрат при обробці з постійними швидкостями робочих рухів) відносне зменшення тривалості обробки складає майже 20%.



**Рисунок 4.4 – Динамічні характеристики системи
за умови керування лише
швидкістю електропривода подачі**



**Рисунок 4.5 – Динамічні характеристики системи
при взаємопов'язаному керуванні
електроприводами головного руху та подачі**

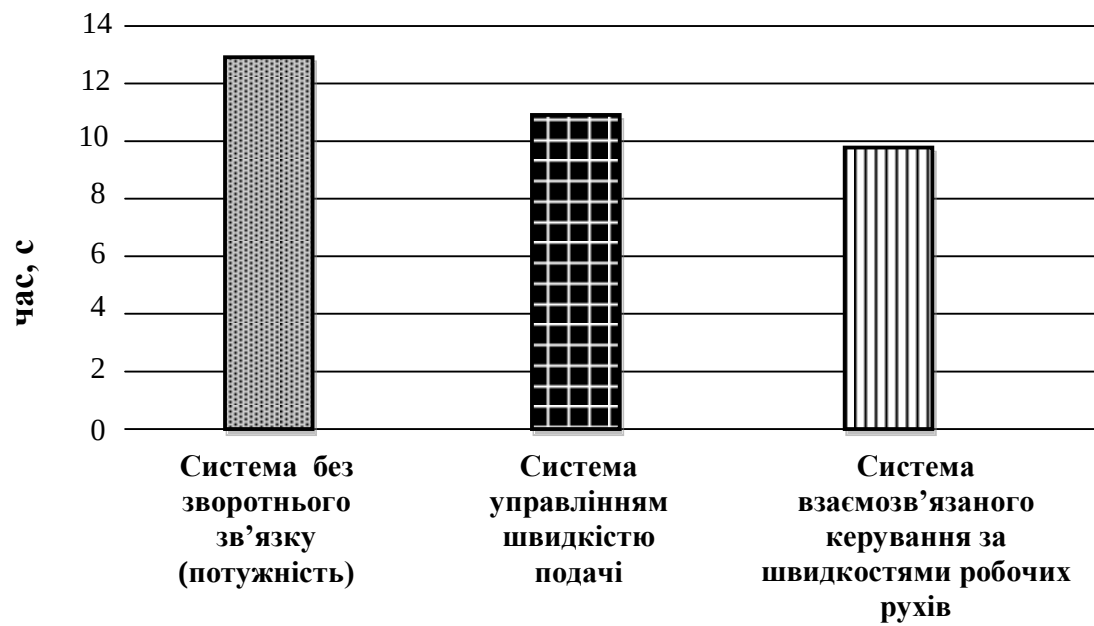


Рисунок 4.6 – Гістограма порівняльної оцінки тривалості обробки

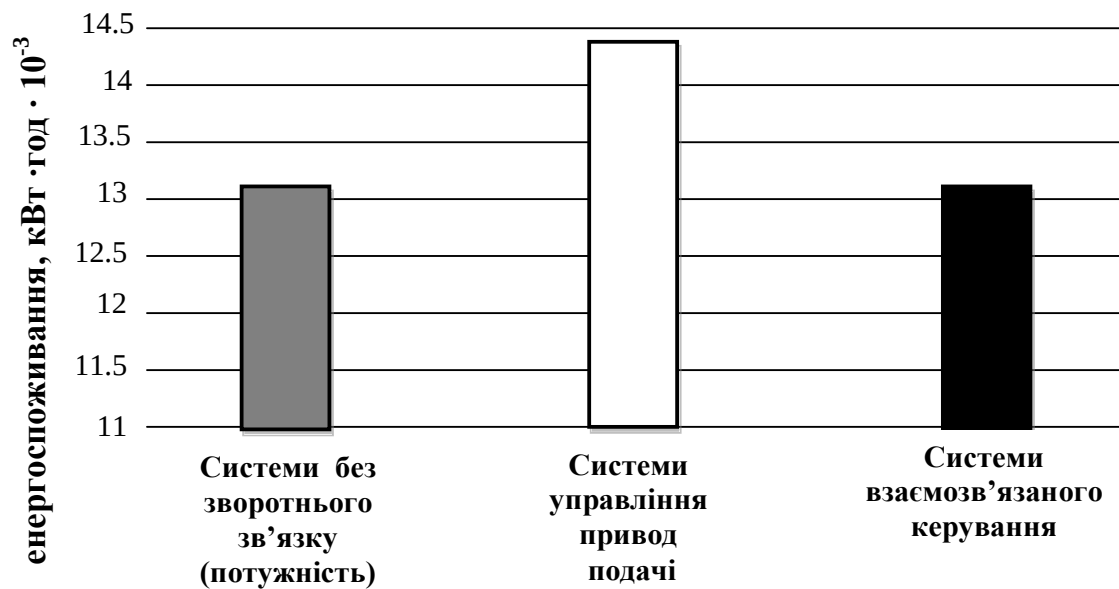


Рисунок 4.7 – Гістограма порівняльної оцінки енерговитрат

4.3. Висновки

1. Виконано моделювання роботи інтелектуальної СКПР з нечітким регулятором. Розроблені моделі передбачають задання різних варіантів керування, зокрема, при постійній та змінній швидкості та взаємопов'язаному керуванні.

2. Таким чином, при керуванні тільки швидкістю подачі відносне зменшення тривалості обробки становить близько 11,3% у порівнянні з варіантом обробки з постійними швидкостями робочих рухів станка. Однак відносне енергоспоживання збільшується майже на 9%.

3. Якщо керувати лише швидкістю електроприводу подачі та головного руху, за умови підтримання необхідно заданого рівня значення подачі, залишаючи енерговитрати однаковими для обох варіантів (з постійною швидкістю робочих рухів), то майже на 20% зменшується тривалості обробки.

ВИСНОВКИ

Головними висновками кваліфікаційної бакалаврської роботи є:

1. З метою забезпечення необхідно заданої послідовності технооперацій у станках використовують програмовані логічні контролери з можливістю нечіткого керування. Застосування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень дозволить розширити можливості системи керування потужністю різання, шляхом циклового програмного керування, що дозволить підвищити продуктивність та зменшити енергоспоживання обладнання та інструментів.
2. Визначено лінгвістичні змінні: потужність різання, швидкість її зміни та прискорення електропривода подачі. Для цих змінних побудовано функції належності та визначено терм-множини. Визначено числові параметри для кожної з функцій належності.
3. Наведено архітектуру нечіткої інтелектуальної СКПР, яка має в своєму складі базу знань, що складається з лінгвістичних змінних та нечітких правил, а також система інференції до складу якої входять блоки агрегації, активізації та акумуляції висновків. Згідно даної архітектури наведено лістинг програми на мові FCL.
4. Виконано моделювання роботи інтелектуальної СКПР з нечітким регулятором. Розроблені моделі передбачають задання різних варіантів керування, зокрема, при постійній та змінній швидкості та взаємопов'язаному керуванні.
5. Таким чином, при керуванні тільки швидкістю подачі відносне зменшення тривалості обробки становить близько 11,3% у порівнянні з варіантом обробки з постійними швидкостями робочих рухів станка. Однак відносне енергоспоживання збільшується майже на 9%.
6. Якщо керувати лише швидкістю електроприводу подачі та головного руху, за умови підтримання необхідно заданого рівня значення подачі, залишаючи енерговитрати однаковими для обох варіантів (з постійною швидкістю робочих рухів), то майже на 20% зменшується тривалості обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закутний О.С., Коцюбинський В.С. Нейронне керування процесом металообробки // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика: Вісник ХДПУ. Спеціальний випуск. – Харків: ХДПУ. – 1998. – С. 391–392.
2. Коцюбинський В.С. Оптимізація процесу керування металообробкою // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 113. – Харків: ХДПУ. – 2000. – С. 199–200.
3. Керування процесом шліфування / А.В. Якімов, А.Н. Першаков, В.І. Свирщев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 184 с.
4. Шапарев Н.К. Розрахунок автоматизованих електроприводів систем керування металообробкою: Навчальний посібник – 2-ге вид-ня., перероб. та доп. – К.: Либідь, 1992. – 272 с.
5. Романець Р.А., Хмелєв О.Г., Коцюбинський В.С., Закутний О.С. Стабілізація потужності різання в системах з обмеженим прискоренням // Електромашинобудування та електроустаткування: Міжвід. наук.-техн. збірник. – Одеса: ОДПУ. – 1996. – Вип. 48. – С. 27–30.
6. Металообробка нові технології та рішення: найкращі практики. *Martensit* +. URL: <https://martensit-plus.com/metaloobrobka-novi-tehnologiyi-ta-rishennya/>.
7. Скицюк В.І., Клочко Т.Р. “Вплив технологічного фантому точності виготовлення деталей у приладобудуванні”, Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування, Вип. 53(1), pp. 69-77, 2017
8. Скицюк В., Клочко Т. Аналітична модель руху об'єктів технологічного процесу контурного фрезерування металів. *Високоєфективні технологічні процеси в приладобудуванні*. 2019. Т. 2, № 58. С. 63–69. URL: <http://visnykpb.kpi.ua/article/view/189414/188800>.
9. Організація виробництва. *FEB - Факультет Економіки та Бізнесу*. URL: <http://feb.tsatu.edu.ua/ebook/mn/ov/page3.html>.

10. Васильков В.Г. Організація виробництва: Навчальний посібник/ В.Г. Васильков.-К.: КНЕУ, 2005.-524с.
11. Плоткін Я.Д. Організація і планування виробництва на машинобудівному підприємстві: навч. видання / Я.Д.Плоткін, О.К.Янушкевич. - Львів: Світ, 1996.-352с.
12. І.А. Березюк, О.П. Голик, В.П. Солдатенко Динамічне проектування оптимальної системи стохастичної стабілізації потужності різання для стрічкопилкового верстата/ Березюк І.А., Голик О.П., Солдатенко В.П.// Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 2020, вип. 3(34).- С. 169-174
13. Березюк І.А. Оцінювання робастної стійкості системи стабілізації потужності різання з оптимальним регулятором для стрічкової пилорами/ І.А. Березюк //Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: Видавництво ПП Вишемирський В. С., 2017. – С. 38-39 (ISBN 978-617-7273-61-4)
14. Ситнік Б. Т. Комп'ютерні системи керування : навч. посіб. Ч. 1. Моделювання систем. Харків : УкрДУЗТ, 2019. 182 с.
15. Пушкар, О. І., Гіковатий В. М., Євсєєв О. С., Потрашкова Л. В. Системи підтримки прийняття рішень: навч. посібник. Харків : Інжек, 2006. 304с.
16. Системи і методи підтримки прийняття рішень : підручник / П. І. Бідюк та ін. Київ : «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського», 2022. 610 с.
17. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48418/1/Systemy_i_metody_pidtrymky_pryiniattia_rishen.pdf
18. Штовба С., Ротштейн О. Проектування нечітких баз знань: лабораторний практикум та курсове проектування. Вінниця : ВДТУ, 1999. 70 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/280774213_Proektuvanna_necitkih_baz_znan_laboratornij_praktikum_ta_kursove_proektuvanna.
19. Калюжний О.Я. Моделювання систем передачі сигналів в обчислювальному середовищі MATLAB-Simulink: Навч. Посібник. –К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. - 136 с

20. Аналіз, синтез і проектування цифрових систем керування : навч. посібник / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 150 с.
21. Архангельський В. І. Нейроні мережі в системах автоматизації / В. І. Архангельський, І. Н. Богаєнко, Г. Г. Грабовський, Н. А. Рюмшин – К.: Техніка, 1999. – 364 с.
22. Федорчук Є.Н. Програмування систем штучного інтелекту. Експертні системи / Є.Н.Федорчук, Вид-во Львівської політехніки, 2012. - 168 с.
23. Ямпольський Л. С. Гнучкі комп'ютерно-інтегровані системи: планування, моделювання, верифікація, управління: комплекс підруч. в 2-х книгах з мультимедійними комп'ютерно-інтегрованими засобами ДВН для студ. вищ. навч. закл. / Л. С. Ямпольський, П. П. Мельничук, К. Б. Остапченко, О. І. Лісовиченко. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 786 с.
24. Леоненков С. Н. Target optimization of a supercomputer task flow. *Numerical Methods and Programming (Vychislitel'nye Metody i Programmirovaniye)*. 2019. No. 3. P. 199–210. URL: <https://doi.org/10.26089/nummet.v20r319> (date of access: 16.06.2024).
25. Сявавко Н.С. Інтелектуалізована інформаційна система «Нечіткий експерт». – Видавничий центр ЛНУ, 2007. – 320 с.
26. Shtovba, Serhiy & Rotshtein, Alexander. (1999). Проектування нечітких баз знань: лабораторний практикум та курсове проектування.
27. Штовба С., Резнік Р. Покращення точності нечіткої бази Мамдані за допомогою суперечливих правил. *Ukrainian Journal of Information Systems and Data Science*. 2023. № 1. С. 67–86. URL: <https://doi.org/10.31558/2786-9482.2023.1.5> (дата звернення: 16.06.2024).