

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри АВП
к.т.н., доцент
_____ Дідик О.К.
«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Автоматизована система рухами металорізальних
верстатів зі зменшенням енергоспоживання»**

**«Automated system for controlling movements of metal-
cutting machines with reduced energy consumption»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу
групи АК-24М
174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»
_____ Гонєць І. Ю.
«__» _____ 2025 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____ Мірошніченко М.С.
«__» _____ 2025 р.

Рецензент

_____ 2025 р.

м. Кропивницький 2025

ЗМІСТ

Вступ

1. Огляд автоматизованих систем управління для підвищення ефективності процесів металообробки

1.1. Класифікація систем управління технологічними процесами металообробки для підвищення їх ефективності

1.2. Аналіз технологічного процесу металообробки як об'єкта керування автоматизованої системи

1.3 Аналіз систем управління підвищення ефективності технологічних процесів металообробки

2 Розробка методів управління і систем управління для підвищення ефективності процесів металообробки

2.1. Основні напрямки удосконалення систем управління процесами металообробки

2.2. Розробка алгоритму керування процесом обробки для підвищення ефективності фрезерування

2.3. Розробка нечіткого регулятора для керування процесом фрезерування

2.4. Система оптимізації технологічного процесу силового шліфування

3 Ідентифікація параметрів технологічного процесу фрезерування як об'єкту управління автоматизованої системи

3.1 Теоретичне обґрунтування визначення математичної моделі об'єкта управління технологічним процесом фрезерування

3.2 Визначення параметрів технологічного процесу фрезерування як об'єкта управління за даними спостережень

4 Дослідження автоматизованих систем управління технологічними процесами металообробки на математичних моделях

4.1. Дослідження системи стабілізації потужності процесу фрезерування з нечітким регулятором

4.2. Дослідження системи оптимізації технологічного процесу силового шліфування

Висновки

Література

Додатки

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промислового виробництва в промислово розвинених країнах, зокрема в Україні, однією з пріоритетних науково-технічних проблем є підвищення продуктивності технологічного обладнання та зниження питомого енергоспоживання. Особливої актуальності ця проблема набуває в машинобудівній галузі, яка характеризується значною концентрацією металорізального обладнання та високою енергоємністю технологічних процесів. У зв'язку з цим підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів і зростання продуктивності обробки є визначальними напрямками розвитку сучасного машинобудування.

Вирішення зазначених завдань значною мірою пов'язане з розробленням і впровадженням автоматизованих систем керування технологічними процесами металообробки. Продуктивність металорізальних верстатів і рівень енерговитрат у процесі виготовлення деталей залежать як від керуючих впливів, якими задаються режими різання, так і від дії збурюючих факторів, зокрема змін глибини та ширини різання, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, а також зносу та затуплення ріжучого інструменту. Зазначені фактори зумовлюють змінність динамічних характеристик процесу обробки та ускладнюють застосування класичних методів керування.

Питанням створення систем керування, орієнтованих на підвищення продуктивності й точності обробки, зниження собівартості продукції та питомого енергоспоживання металорізальних верстатів в умовах змінних збурювальних впливів, присвячено значну кількість наукових праць. Разом із тим, попри наявні результати, низка теоретичних і практичних аспектів керування технологічними процесами металообробки, зокрема процесом фрезерування, залишається недостатньо дослідженою, що обумовлює необхідність подальшого розвитку відповідних методів і засобів керування.

Системи стабілізації силових параметрів процесу фрезерування, запропоновані в наукових дослідженнях, відрізняються структурою регуляторів, складом коригувальних ланок та кількістю керованих робочих рухів верстата і, як правило, реалізуються з використанням спеціалізованих апаратних засобів. Водночас у сучасних автоматизованих системах керування металорізальними верстатами все більш широке застосування знаходять програмовані логічні контролери, які забезпечують реалізацію складних алгоритмів керування, зокрема нечітких. Використання таких контролерів доцільно поширювати не лише на керування робочими циклами верстатів, а й на регулювання режимів обробки в реальному часі.

Особливу наукову й практичну зацікавленість становить застосування нечітких регуляторів для стабілізації потужності різання при фрезеруванні. Це пояснюється тим, що технологічний процес фрезерування як об'єкт автоматизованої системи керування характеризується змінністю коефіцієнта підсилення та постійної часу під впливом збурювальних факторів. Відсутність до початку процесу обробки повної та достовірної інформації про характер і величину цих збурень суттєво ускладнює використання точних кількісних методів керування, що зумовлює доцільність застосування нечітких підходів.

Крім того, недостатньо дослідженими залишаються можливості взаємопов'язаного керування швидкостями подачі та головного руху на фрезерних верстатах з метою зниження енергоспоживання та підвищення продуктивності. Аналіз наукових джерел свідчить, що наявні математичні моделі процесу фрезерування як об'єкта керування автоматизованої системи в окремих випадках є суперечливими та не повністю узгоджуються з експериментальними даними. Зокрема, відсутність достовірних відомостей про залежність постійної часу процесу фрезерування від параметрів режиму обробки ускладнює синтез ефективних систем керування.

Таким чином, розроблення та дослідження системи керування режимами фрезерування на основі нечіткого регулятора, реалізованого програмованим

логічним контролером, зі стабілізацією потужності різання та взаємопов'язаним керуванням швидкостями робочих рухів верстата є актуальним науково-технічним завданням, що має важливе практичне значення для підвищення енергетичної ефективності процесів металообробки.

1 ОГЛЯД АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛООБРОБКИ

1.1. Класифікація систем управління технологічними процесами металообробки для підвищення їх ефективності

У науково-технічній літературі, присвяченій питанням управління процесами металообробки на верстатах, немає єдиного підходу до класифікації систем управління призначених для підвищення ефективності ТПМО.

Системи керування технологічними процесами металообробки виконують ключову роль у забезпеченні ефективності, точності та якості обробки деталей. Їх класифікація дозволяє систематизувати підходи до вибору методів керування та обґрунтувати шляхи вдосконалення виробничих процесів. Залежно від призначення, системи керування процесами металообробки можна поділити на кілька основних груп:

1. Системи керування продуктивністю обробки

Ці системи орієнтовані на підвищення швидкості виготовлення деталей та зменшення часу обробки без втрати якості. До них належать системи оптимізації швидкостей робочих рухів, подачі інструменту та режимів різання з урахуванням властивостей матеріалу та зносу інструменту.

2. Системи керування точністю та якістю обробки

Системи цієї групи забезпечують підтримання заданих геометричних параметрів деталей, допусків та шорсткості поверхні. Вони контролюють стабільність процесу обробки за допомогою регулювання силових параметрів, температури, вібрацій та інших факторів, що впливають на якість обробки.

3. Системи керування допоміжними операціями

До цієї категорії належать системи, що оптимізують роботу механізмів верстата, які не беруть безпосередньої участі в процесі різання, але впливають на загальну продуктивність і стабільність роботи верстата. Сюди відносяться системи керування подачею, охолодженням, автоматичною заміною інструменту, транспортуванням заготовок та інші допоміжні механізми.

4. Системи комплексного управління

Ці системи поєднують функції підвищення продуктивності, точності та оптимізації допоміжних операцій. Вони застосовують інтегровані підходи, у тому числі методи нечіткого керування, адаптивні алгоритми та програмовані логічні контролери, що дозволяє одночасно регулювати швидкості робочих рухів, потужність різання та режим подачі в реальному часі.

Такий поділ дозволяє більш систематично підходити до вибору методів автоматизації технологічних процесів, а також визначати пріоритети при впровадженні нових систем керування залежно від потреб виробництва та характеристик оброблюваного матеріалу.

Класифікація систем управління процесом металообробки включає основу технологічних завдань, які вирішують системи. До цих завдань віднесено забезпечення заданої якості оброблених деталей [6], зокрема точності, та забезпечення заданої продуктивності, а в роботі [3] - віднесено ще собівартість обробки. При цьому системи, які призначені для підвищення точності обробки, можуть забезпечувати управління статичним налаштуванням та динамічним налаштуванням [2]. Для систем підвищення продуктивності виділяють завдання скорочення основного технологічного часу та допоміжного часу. У роботі [6] разом із системами управління точністю обробки розглядають системи управління режимами обробки та системи управління режимами та точністю обробки. Перші з цих систем поділяють на функціональні групи: автоматичного управління та оптимальні пошукові, другі – на комбіновані регулювання (з регулюванням з обурення) та з самонастроюванням.

Класифікацію всіх систем здійснюють за видом зворотного зв'язку та керуючим впливом [4]. Зворотний зв'язок може здійснюватися за силою або потужністю різання, крутним моментом, частотою обертання шпинделя або швидкості різання, швидкості подачі, положенням виконавчих органів верстата, статичним і динамічним характеристикам і деформаціям системи пристосування-інструмент-деталь, температурі в зоні різання, вібрації, зносу. Вплив на процес обробки здійснюється шляхом управління частотою обертання шпинделя, швидкістю подачі, положенням деталі та інструменту, статичними та динамічними характеристиками системи верстат-пристрій-інструмент-деталь. Найбільш докладна класифікація систем управління металообробкою наведена в роботах [5]. В основу класифікації покладено мету застосування системи: підвищення продуктивності обробки, зменшення її собівартості, підвищення точності обробки, підвищення точності обробленої поверхні, забезпечення надійності роботи, максимальне використання технологічних можливостей верстата, інструменту або електроприводів робочих рухів, захист інструменту від поломок. Подальша класифікація здійснюється за керуючим впливом та контрольованими параметрами процесу. До цієї класифікації також належить класифікація систем, що базуються на положеннях теорії автоматичного керування та термінології, встановлених державним стандартом. При цьому за алгоритмом управління автоматизовані системи діляться на розімкнуті та замкнуті, замкнуті системи поділяються на системи регулювання та пошуку.

За алгоритмом функціонування системи бувають стабілізуючі, програмні та слідкуючі. Самоналаштовані системи поділяються на системи із самонастроюванням, самоорганізацією та самоалгоритмізацією.

У роботі [8] розглянуто питання класифікації систем, що підвищують ефективність обробки шляхом керування робочими рухами верстатів. Виділено найбільш важливі системні ознаки: цільові (призначення системи), структурні (кількість елементів та види зв'язку між ними), елементні (призначення та принцип дії окремих елементів). Отримана схема класифікації наведена на рис. 1.1 – 1.3.

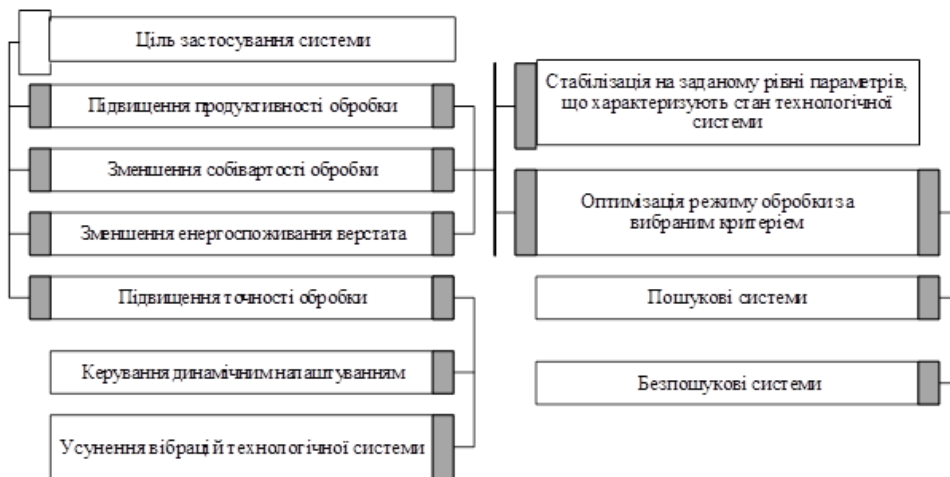


Рис. 1.1. Класифікація систем управління ТПМО за цільовими ознаками

Метою застосування систем керування робочими рухами металорізальних верстатів є підвищення ефективності технологічного процесу обробки. Основні цілі таких систем включають:

- підвищення продуктивності обробки;
- зниження собівартості виготовлення деталей;
- зменшення енергоспоживання верстата;
- підвищення точності та якості обробки (рис. 1.1).

Для досягнення перших трьох цілей застосовуються системи, що забезпечують стабілізацію ключових параметрів процесу, таких як: швидкість робочих рухів, сила або потужність різання, крутний момент на інструменті, а також температура в зоні обробки. Використання таких систем дозволяє не лише підвищити енергоефективність та продуктивність верстата, а й забезпечити стабільність режимів обробки при зміні властивостей оброблюваного матеріалу та зносу інструменту.

Ті ж самі цілі можуть досягатися також за допомогою систем оптимізації режимів обробки. Такі системи поділяються на пошукові та безпошукові.

Пошукові системи здійснюють пошук екстремуму показника ефективності технологічного процесу шляхом пробних впливів на процес обробки, наприклад,

через зміну швидкостей робочих рухів або інших параметрів режиму різання. Після цього аналізується реакція системи на виконані впливи, і за результатами аналізу формується керуючий вплив для досягнення оптимального режиму обробки.

У безпошукових системах положення екстремуму визначається аналітичним способом, з використанням поточної інформації про збурення та параметри процесу обробки. Такий підхід дозволяє оперативно коригувати режими обробки без проведення пробних впливів, що підвищує ефективність управління та скорочує час оптимізації.

Класифікація за основними структурними показниками систем управління робочими рухами верстатів показано на рис. 1.2.

Тут виділено кількість регульованих величин, кількість контурів управління, принцип управління з компенсацією та обуренням або з використанням зворотного зв'язку для регулювання по відхиленням вихідної координати від заданого значення, наявність у системі контурів, які забезпечують самоналаштування до умов обробки, що змінюються.



Рис. 1.2. Класифікація систем управління ТПМО за структурними ознаками

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



Рис. 1.3. Класифікація систем управління ТПМО за елементними показниками

1.2. Аналіз технологічного процесу металообробки як об'єкта керування автоматизованої системи

Побудова автоматизованої системи керування процесом металообробки, зокрема технологічним процесом фрезерування, потребує детального знання характеристик об'єкта управління. Об'єкт управління у цьому випадку складається з кількох взаємопов'язаних компонентів:

1. Приводи головного руху – забезпечують обертання ріжучого інструменту із заданою швидкістю. Динамічні та силові характеристики цих приводів визначаються інерційними, тертєвими та електромеханічними параметрами, що безпосередньо впливають на точність та стабільність різання.

2. Приводи руху подачі – відповідають за переміщення заготовки або інструменту вздовж заданих координат. Їх характеристики, такі як швидкість, прискорення та точність позиціонування, безпосередньо впливають на продуктивність, якість обробки та витрати енергії.

3. Процес фрезерування – безпосередньо включає контакт ріжучого інструменту з оброблюваним матеріалом. Характеризується силовими параметрами (сила та момент різання), термодинамічними умовами в зоні різання, вібраціями та іншими процесами, що обурюють. Ці параметри визначають ефективність та стабільність обробки, впливають на точність, шорсткість поверхні та знос інструменту.

Для побудови ефективної автоматизованої системи керування необхідно враховувати взаємозв'язки між цими елементами: динаміка приводів головного руху і подачі визначає швидкодію та точність позиціонування, тоді як параметри процесу фрезерування визначають режим оптимальної сили і потужності різання. Комплексне моделювання та аналіз цих характеристик дозволяє:

- коректно вибрати структуру системи керування;
- визначити методи регулювання (жорсткі або адаптивні, точні або нечіткі);
- забезпечити стабільність процесу обробки при змінних зовнішніх і внутрішніх збуреннях;
- оптимізувати режими обробки для підвищення продуктивності та енергетичної ефективності.

Таким чином, глибоке розуміння структури та характеристик об'єкта управління є необхідною умовою для розробки автоматизованих систем керування, здатних підтримувати стабільність і ефективність процесів фрезерування у сучасних умовах машинобудівного виробництва.

Передатна функція процесу фрезерування за умови рівномірності фрезерування (наступний зуб вступає в роботу в той момент, коли попередній починає виходити з металу) представляє відношення зображень Лапласа вихідного

силового параметра (сили, моменту, потужності різання) і керуючого впливу, наприклад, величини подачі i , так само як і для ланкою другого порядку:

$$H(p) = \frac{P_p(p)}{v(p)} = \frac{K_p}{(T_{p1}p+1)(T_{p2}p+1)}, \quad (1.1)$$

де K_p - коефіцієнт передачі процесу різання, T_{p1} і T_{p2} - постійні часу.

Математична модель процесу різання при точенні [4] має такий вираз:

$$H(p) = \frac{P_p(p)}{v(p)} = \frac{K_p}{(T_p p + 1)} \quad (1.2)$$

де P_p і v - відповідно сила різання та товщина зрізу, які змінюються у часі;

T_p

постійна часу стружкоутворення, яка зменшується зі збільшенням усадки стружки та товщини зрізу.

У роботі [4] отримано передатну функцію процесу поздовжнього точення, яка має вигляд:

$$H(p) = \frac{P_\zeta(p)}{S_o(p)} = \frac{K_p(1-e^{-P\tau})}{p^\tau[1+B+(1-e^{-P\tau})]}, \quad (1.3)$$

де P_ζ - вимірювана складова сили різання; S_o - продольна подача, мм/об; B - коефіцієнт, який враховує вплив пружної системи верстата; τ - час одного обороту за секунди.

Таким чином, всі вирази, що використовуються для побудови передавальних функцій процесу різання та визначення їх параметрів, були сформовані емпіричним шляхом. Емпіричні залежності для оцінки сил різання враховують параметри режиму обробки, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу та закони пластичної деформації. Водночас зазначені формули мають обмежену точність при визначенні постійної часу процесу, яка є критичною характеристикою динамічної ланки системи керування.

У процесі фрезерування технологічна система піддається пружним деформаціям, величина яких визначається жорсткістю елементів системи, тобто їх здатністю протидіяти діючим силам різання. Жорсткість технологічної системи визначається як відношення радіальної сили різання (P_z), спрямованої перпендикулярно до оброблюваної поверхні, до величини пружного зміщення у тому ж напрямку. Врахування жорсткості дозволяє більш точно моделювати динамічні характеристики процесу фрезерування, що, у свою чергу, забезпечує підвищення ефективності автоматизованого керування та стабілізації режимів різання.

Однак, на практиці постійна час процесу обробки залежить не тільки від частоти обертання шпинделя, але і від багатьох технологічних факторів. З порівняння результатів, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом, видно, що похибки становлять 11% та 45% відповідно.

1.3 Аналіз систем управління підвищення ефективності технологічних процесів металообробки

Одним із ключових чинників технічного прогресу в металообробці є підвищення ефективності технологічних процесів. Підвищення ефективності обробки досягається за рахунок створення високопродуктивних конструкцій ріжучого інструменту, скорочення допоміжного часу та часу на обслуговування верстатів, а також вибору оптимальної послідовності операцій технологічного процесу. Після визначення конкретного верстата та інструменту забезпечення високої ефективності обробки здійснюється шляхом встановлення оптимального режиму обробки за допомогою автоматизованої системи керування.

У процесі керування технологічними процесами металообробки, особливо в умовах змінної глибини та ширини різання, стану ріжучого інструменту та твердості оброблюваного матеріалу, застосовуються миттєві оцінки ефективності

процесу. Такі оцінки дозволяють оперативно коригувати режими обробки, підтримуючи стабільність технологічних параметрів, підвищуючи продуктивність і забезпечуючи необхідну якість оброблених поверхонь. [1]. Показник економічної ефективності

$$J_c = \frac{C_c(T + t_{cm}) + C_{и}}{QT}, \quad (1.9)$$

де Q – швидкість знімання металу, ммЗ/хв; T – миттєва оцінка періоду стійкості інструменту, хв; C_c – собівартість хвилини роботи верстата, грн.; t_{cm} – час зміни інструменту, хв; $C_{и}$ – вартість інструменту, витраченого за період стійкості, грн.

У [8] цей показник представлений залежністю, зворотної (1.9), щоб оптимальному режиму обробки відповідав максимум.

Показник продуктивності

$$J_{п} = \frac{QT}{T + t_{cm}} \quad (1.10)$$

Показник енергетичної ефективності

$$J_e = \frac{Q}{P_z}, \quad (1.11)$$

де P_z – потужність обробки, кВт.

Показники J_c , $J_{п}$, J_e являють собою функції миттєвих значень Q , P_z та T , які, залежать від швидкостей робочих рух верстатів, глибини та ширини обробки, стану інструменту, твердості оброблюваної заготовки.

Вирази, що відображають залежність показників ефективності процесу від керуючих та обурювальних впливів, виступають у ролі цільових функцій, екстремальне значення яких відповідає оптимальному режиму металообробки.

У роботах [1, 3] показано, що для процесу фрезерування розглянуті цільові функції не мають екстремуму всередині області допустимих значень швидкості подачі та частоти обертання фрези; максимальні значення показників ефективності досягаються на межах цієї області, які визначаються технічними та технологічними обмеженнями.

З метою забезпечення виконання процесу обробки з максимально можливими значеннями показників ефективності в умовах змінних обурювальних впливів запропоновано метод узгодженого керування швидкостями робочих рухів верстатів. У рамках цього підходу розроблено системи керування з взаємопов'язаним регулюванням швидкості подачі та частоти обертання фрези, що забезпечують стабілізацію потужності різання та реалізацію процесу обробки з максимальними значеннями інтегральних показників ефективності J_c , J_n , J_e . Такий підхід дозволяє одночасно враховувати вплив технологічних обмежень та обурювальних факторів на параметри процесу, підвищуючи продуктивність, точність і енергетичну ефективність обробки.

Системи стабілізації силових параметрів процесів обробки розроблені у ряді варіантів для керування різними верстатами. Для цих систем проведено технологічне обґрунтування їх застосування [4], проаналізовано ефективність застосування [3], запропоновано математичний опис об'єкта та системи управління [5], визначено галузі стійкості систем [5], запропоновано конкретні технічні рішення [6], вирішено питання гасіння вібрацій [7].

Для забезпечення стійкості та досягнення необхідного рівня якості регулювання в системах стабілізації потужності різання, що реалізують регулювання відхилення вихідної координати від заданого значення, застосовуються попереджувальні коригувальні пристрої [10]. Такі системи не володіють астатизмом по впливу обурювальних факторів, що призводить до значного перерегулювання у перехідних процесах, яке може перевищувати 20% від заданого значення потужності.

Нейромережеві системи, розроблені для регулювання потужності різання, забезпечують високу якість перехідного процесу та точне підтримання вихідної координати лише за умови незмінного коефіцієнта передачі об'єкта управління [2]. Водночас для цих систем не проведено синтезу по впливу обурювальних факторів, а їх динамічні характеристики в умовах варіації глибини різання залишаються недостатньо дослідженими. Така обмеженість підкреслює необхідність подальшого розвитку методів керування, здатних забезпечувати стабільність і точність регулювання в умовах змінних технологічних впливів.

Застосування систем стабілізації потужності дозволяє підвищити ефективність технологічних процесів механічної обробки (ТПМО) як на металорізальних верстатах, так і в прокатному виробництві. Зокрема, використання таких систем для пилок гарячого різання сортового прокату забезпечує скорочення тривалості циклу різання та підвищення якості оброблюваної поверхні, що сприяє збільшенню продуктивності та енергетичної ефективності виробничого процесу [4]. У роботі [6] представлено розробку системи стабілізації потужності різання для систем з обмеженим прискоренням, яка ілюструється функціональною схемою на рис. 1.6.

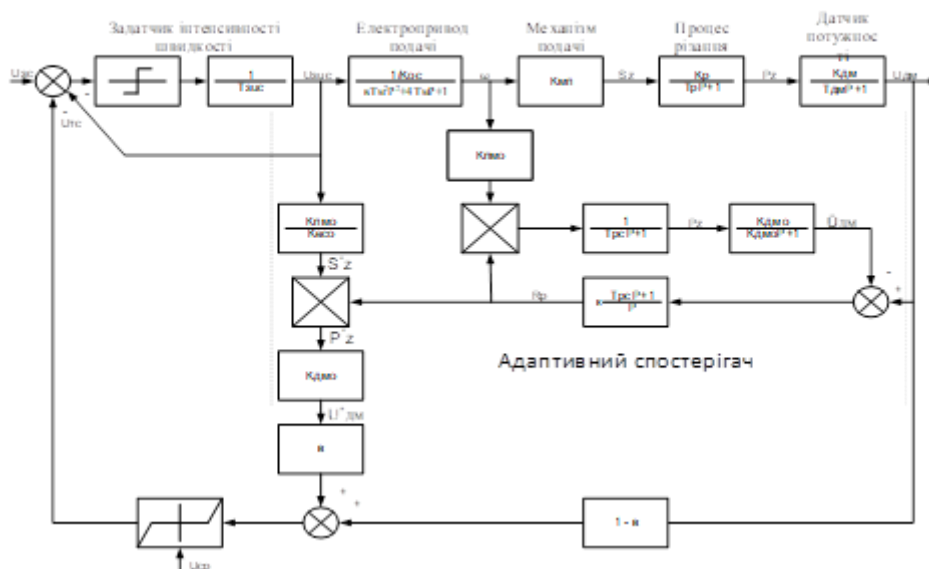


Рис. 1.6. Структурна схема системи стабілізації потужності різання з адаптивним спостерігачем

Структурна схема системи стабілізації потужності різання із застосуванням адаптивного спостерігача (рис.1.6) містить динамічні моделі: процесу різання

$$W_{po}(p) = \frac{K_p}{T_{po} \cdot p + 1}, \quad (1.12)$$

де T_{po} -- розрахункове значення постійного часу процесу різання;

датчика потужності різання

$$W_{dm}(p) = \frac{K_{dmo}}{T_{dmo} \cdot p + 1}, \quad (1.13)$$

де K_{dmo} и T_{dmo} -розрахункові коефіцієнти передачі та постійна часу датчика потужності

На входи адаптивного спостерігача подаються сигнали від датчика потужності різання та датчика швидкості приводу подачі. Контур самоналаштування коефіцієнта різання K_p оптимізується за модульним критерієм оптимуму з використанням ПІ-регулятора при номінальному значенні подачі S_z . Обчислене значення коефіцієнта різання K_p перемножується з напругою на вході задатчика інтенсивності швидкості, а отримане значення обчисленої потужності різання подається на вхід елемента порівняння. При перевищенні напругою порогового значення формується сигнал зворотного зв'язку U_{dm}^* , який обмежує швидкість подачі.

За умови, що вимірне значення коефіцієнта різання K_p налаштовується швидше, ніж змінюється його дійсне значення, систему можна розглядати як одноланкову динамічну систему першого порядку, що забезпечує її стійкість за будь-якого значення K_p .

Застосування динамічної моделі процесу різання дозволяє зменшити статичну помилку системи стабілізації при збільшенні обурень. При цьому

наводяться графіки роботи системи при постійному значенні коефіцієнта передачі об'єкта управління, що ілюструють аперіодичний процес стабілізації потужності.

У роботі [10] для підвищення продуктивності за рахунок можливості вести обробку при максимально можливої потужності головного приводу верстата запропонована система (рис. 1.7), яка містить головний привід 1, механізм обертання заготовки 2, привід 3 подачі з механізмом переміщення резцетримача 4, датчик частоти 5 частоти обертання, тахогенератор 1 та регулятор різання, встановлений в резцетримачі 4, регулятор 8 подачі, задатчик 9 найменшої частоти обертання, задатчик 13 потужності різання, датчик 13 найбільшої подачі, задатчик 12 найбільшої подачі, задатчик 13 потужності різання, датчик 1.

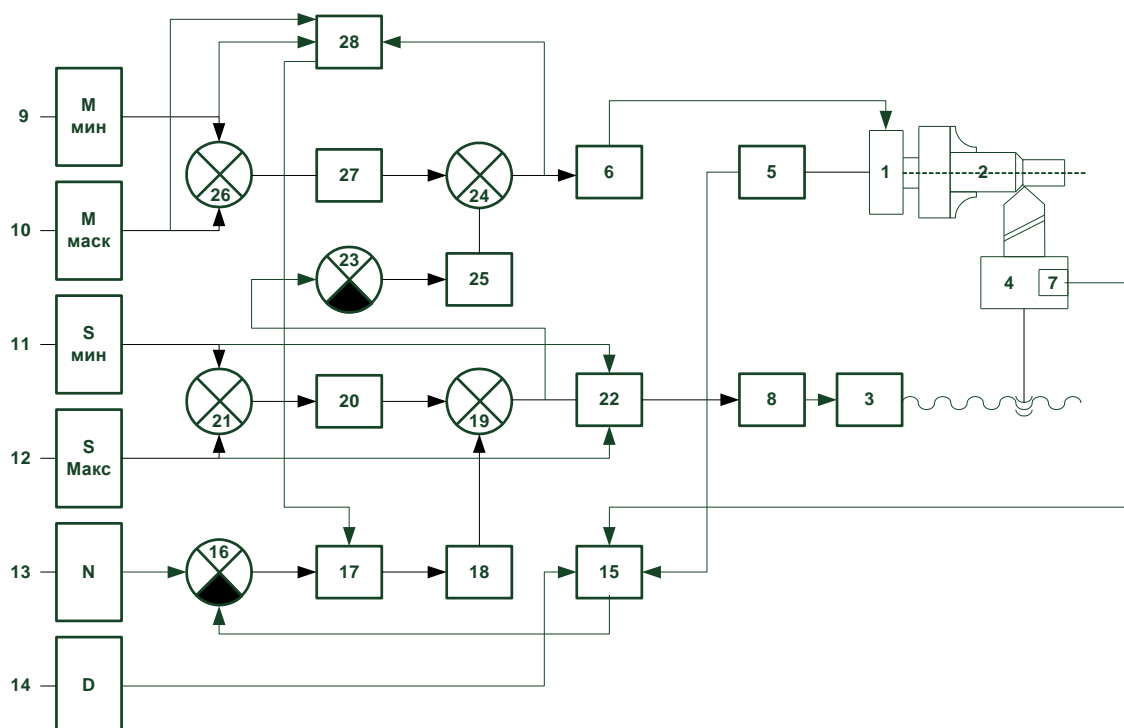


Рис.1.7. Пристрій регулювання потужності різання

Входи елемента порівняння 16 з'єднані із задатчиком 13 та виходом блоку 15 множення, а вихід елемента через аналоговий ключ 17 підключений до входу регулятора 18 напруги, виконаного на основі потенціометра з мікродвигуном постійного струму. Перший вхід елемента 19 підсумовування пов'язаний із регулятором напруги 18, тоді як другий вхід через дільник 20 підключений до виходу елемента 21 підсумовування.

До складу системи також входять двограничний обмежувач напруги 22, елемент 23 порівняння, елемент 24 підсумовування, підсилювач 25, елемент 26 підсумовування, дільник 27 та двогранична порогова схема 28.

Таким чином, управління процесом різання здійснюється за допомогою висококомплексного спеціалізованого регулятора, який забезпечує узгоджену роботу численних компонентів системи, що дозволяє підтримувати стабільність режимів різання та високий рівень точності регулювання параметрів технологічного процесу.

При силовому шліфуванні на верстатах з круглим столом і вертикальним шпинделем кожен із показників ефективності J_c , J_p , J_e має один явно виражений екстремум в області робочих швидкостей вертикальної подачі і є унімодальною функцією [8]. Положення цього екстремуму може змінюватися внаслідок впливу факторів, що обурюють технологічний процес, зокрема пов'язаних зі зміною швидкості зносу шліфувального кола. Для визначення екстремальних значень показників ефективності обробки безпосередньо під час процесу застосовується алгоритм керування швидкістю вертикальної подачі верстата, який базується на методі крокового пошуку з комбінованим використанням пробних та робочих кроків.

Такий підхід дозволяє адаптивно регулювати режим подачі в реальному часі, забезпечуючи підтримку максимальної продуктивності та стабільності процесу обробки, незважаючи на зміну умов зношування інструменту та інших технологічних параметрів [10].

Недоліком систем крокового пошуку є їхня робота при безперервній зміні швидкості подачі, що обмежує можливості підвищення якості обробки поверхні. Крім того, у крокових пошукових системах для скорочення тривалості пошуку екстремуму необхідно здійснювати зміну швидкості подачі великими кроками, що призводить до зниження точності підтримки екстремальних значень показника ефективності.

Сучасні системи управління швидкістю подачі, розроблені для оптимізації технологічного процесу силового шліфування та підвищення енергетичної ефективності, також застосовують методи крокового пошуку екстремуму. Проте в них не забезпечується одночасне досягнення високої швидкодії пошуку та точності підтримки екстремуму показника ефективності.

Таким чином, існує потреба у розробці нового, більш ефективного методу управління, здатного поєднувати високу швидкодію пошуку та точність підтримки оптимальних режимів обробки.

2 РОЗРОБКА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛООБРОБКИ

2.1. Основні напрямки удосконалення систем управління процесами металообробки

У сучасних умовах для всіх галузей машинобудування одним із пріоритетних завдань є підвищення продуктивності металорізальних верстатів та зменшення енергоспоживання при виробництві продукції. При цьому управління

процесом металообробки з урахуванням скорочення енергетичних витрат має бути узгоджене з виконанням основного технологічного завдання — отриманням деталей заданої форми та розмірів — і не повинно суперечити вимогам забезпечення високої продуктивності технологічного обладнання.

Для процесів фрезерної обробки характерно, що режими різання, які відповідають екстремальним значенням всіх показників ефективності, включно з енергетичним, знаходяться на межах області допустимих значень швидкостей робочих рухів верстатів. Удосконалення систем керування процесом фрезерної обробки може здійснюватися у таких напрямках. При керуванні режимами різання доцільно відмовитися від застосування спеціалізованих регуляторів, використання яких потребує додаткових капітальних витрат і підвищує вартість системи управління.

При автоматичному визначенні ефективного з точки зору енергоспоживання режиму обробки доцільно покласти функції регулювання швидкостей робочих рухів верстата на керуючі пристрої, що вже встановлені на верстатах і забезпечують управління циклом обробки. До таких пристроїв належать програмовані логічні контролери (ПЛК), які дозволяють реалізувати адаптивне управління режимами обробки без значних додаткових витрат.

Контролери провідних світових виробників, що серійно випускаються, надають можливість реалізації програм нечіткого висновку, написаних, наприклад, мовою нечіткого управління або FCL. Тому при розробці систем управління доцільно використовувати наявне програмне забезпечення контролерів. Застосування нечіткого регулятора (НР) у системах керування технологічними процесами металообробки є виправданим, оскільки в процесі обробки можуть значною мірою змінюватися обурювальні впливи, такі як глибина та ширина різання, твердість оброблюваного матеріалу та стан ріжучого інструменту [10].

При цьому до початку процесу обробки відсутня точна інформація про збурення та фактори, що впливають на зміну силових параметрів процесу різання.

Основним завданням НР є підтримка технологічного параметра в межах допустимих відхилень від заданого значення при виникненні контрольованих і неконтрольованих збурень.

Для процесу силового шліфування на верстатах з круглим столом та вертикальним шпинделем характерним є розташування екстремуму показника енергетичної ефективності процесу всередині області допустимих значень швидкостей вертикальних подач. Одночасно процес піддається дії великої кількості збурень. Основним фактором, що обумовлює зміни положення екстремуму показника енергетичної ефективності відносно швидкості подачі, є зміна швидкості зносу шліфувального кола, що працює в режимі самозаточування.

Це зумовило застосування пошукових систем управління для оптимізації процесу силового шліфування. Основним недоліком таких систем є значна тривалість пробних впливів, що здійснюються у вигляді зміни швидкості подачі для пошуку оптимального режиму, при цьому обробка протягом тривалого часу відбувається в режимі, який лише наближено відповідає оптимальному з точки зору енергоспоживання.

Удосконалення систем управління процесом силового шліфування передбачає створення безпошукової системи, здатної аналітично визначати оптимальне значення показника енергетичної ефективності. Для цього необхідно встановити функціональну залежність між швидкістю подачі, яка забезпечує досягнення екстремуму показника ефективності, та параметрами, що характеризують ступінь зношування інструменту. Визначення цієї залежності дозволяє реалізувати безперервне та адаптивне регулювання швидкості подачі без проведення пробних впливів, що скорочує час встановлення оптимального режиму обробки. Крім того, такий підхід підвищує точність підтримки екстремальних значень показника енергетичної ефективності, забезпечує стабільність процесу та сприяє зменшенню енергоспоживання й підвищенню продуктивності технологічного процесу шліфування.

Принцип роботи безпошукової системи полягає у побудові математичної моделі, яка описує залежність показника енергетичної ефективності від швидкості подачі та стану інструменту. На основі цієї моделі нечіткий регулятор (НР) або програмований логічний контролер (ПЛК) в реальному часі обчислює оптимальне значення швидкості подачі та автоматично коригує подачу без проведення тривалих пробних впливів. Такий підхід дозволяє одночасно підвищувати енергетичну ефективність процесу, скорочувати час обробки та забезпечувати стабільну якість оброблюваної поверхні.

2.2. Розробка алгоритму керування процесом обробки для підвищення ефективності фрезерування

Для підвищення продуктивності та якості обробки на металорізальних верстатах застосовуються автоматизовані системи керування, призначені для стабілізації потужності різання. Загальну структуру такої системи для фрезерного верстата доцільно розглянути за допомогою функціональної схеми (рис. 2.1).

Оброблювана заготівля Z встановлюється на столі C верстата, який переміщується за допомогою передачі гвинт-гайка приводом двигуна подачі $D1$, живлення якого здійснюється від перетворювача ТП. Обробка виконується фрезою F , що обертається приводом головного руху з двигуном $D2$ та перетворювачем частоти ЧП.

Наведена функціональна схема дозволяє відобразити основні складові системи стабілізації потужності різання, включаючи датчики контролю технологічних параметрів, регулятори та виконавчі механізми. Вона забезпечує узгоджену роботу приводу подачі та головного руху, що дозволяє підтримувати необхідний рівень потужності різання в реальному часі та гарантує стабільність і точність виконання технологічного процесу. У пристрій управління УУ, виконане на базі програмованого контролера, надходять сигнал завдання потужності обробки $u_{\text{дм}}$, сигнал зворотного зв'язку по потужності $u_{\text{дм}}$ від датчика потужності

ДМ обробки, який може бути датчиком потужності двигуна головного руху. УУ формує сигнали керування приводами робочих рухів верстата.

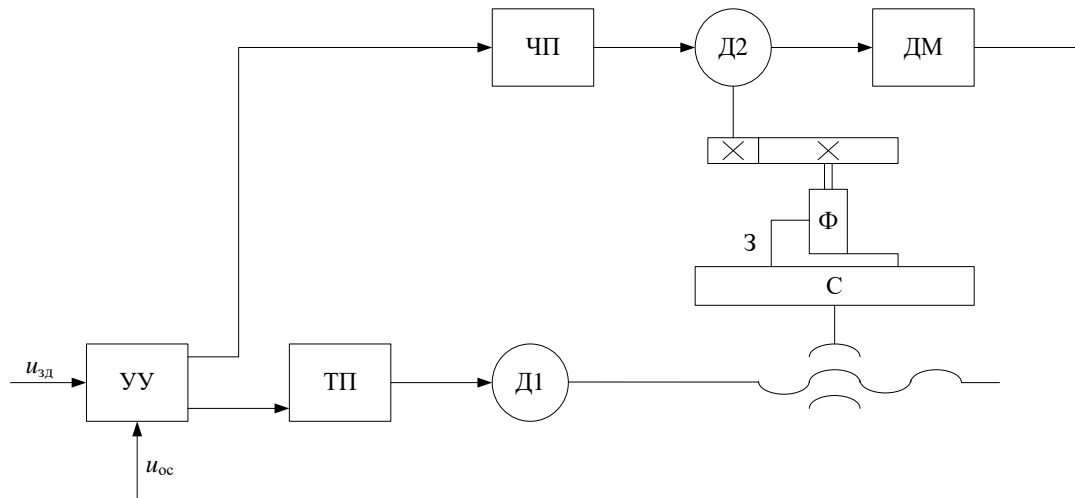


Рис. 2.1. Функціональна схема системи стабілізації потужності обробки фрезерного верстата

Для режиму роботи математична модель об'єкта управління, яким є технологічний процес фрезерування, може бути сформована за допомогою системи рівнянь, до складу якої входять наступні залежності [7].

Швидкість різання

$$V = \pi D_{\phi} n \cdot 10^{-3}, \quad (2.1)$$

де n – частота обертання шпінделя (фрези), об/хв;

D_{ϕ} – діаметр фрези, мм

Подача на зуб

$$S_z = \frac{S}{n \cdot z}, \quad (2.2)$$

де z – кількість зубців фрези.

Головна складова сили різання

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

де C_p, q, x, u, w — коефіцієнти та показники ступеня, які залежать від оброблюваного матеріалу та інструменту;

K_p — коефіцієнт, що враховує умови обробки.

Потужність обробки в режимі роботи, що встановився:

$$P_z = \frac{F_z V}{60 \cdot 1020}, \quad (2.4)$$

Для формування закону взаємопов'язаного управління повинні бути визначені межі можливої зміни глибини та ширини обробки та встановлені відповідні граничні значення частоти обертання фрези та швидкості подачі. Якщо ТПМО буде відбуватися з допустимими значеннями поточних оцінок періоду стійкості фрези, то ці граничні значення відповідають точкам перетину ліній обмеження по максимальній подачі і номінальної потужності на шпинделі верстата при максимальному і мінімальному передбачуваному поєднаннях величин t_p і V . Тобто для передбачуваних умов виду

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{6P_{z3} D_\phi^{q-1} 10^6}{3,14 C_p t_p^x B^u (zn)^{1-y}}, \\ S &= S_z n z \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

де P_{z3} — задане значення потужності обробки, кВт.

$$P_{z3} = \frac{P_H}{d_{\text{ЭПГ}} \eta}, \quad (2.6)$$

де P_H — номінальна потужність двигуна головного руху верстата, кВт;

$d_{\text{ЭПГ}}$ — діапазон регулювання швидкості електроприводом головного руху електричним способом, для якого допустимим нагріванням двигуна навантаженням є постійний момент, рівний номінальному;

η – ККД механічної передачі між валом двигуна головного руху та шпинделем.

Для технологічного процесу обробки при фрезеруванні, потужності приводів головного руху найбільш поширених горизонтально фрезерних та вертикально фрезерних верстатів становлять від 2,2 до 11 кВт [7]. Тому визначення області допустимих значень швидкості подачі і частоти обертання шпинделя орієнтуємося значення потужності 3 кВт. Для випадку фрезерування заготовки з сірого чавуну HB = 190 шириною 40 мм і глибиною від 2 мм до 4 мм торцевої фрези з пластинками з твердого сплаву ВК6 з шістьма зубцями, за наведеними в [8] значеннями коефіцієнтів і показників ступеня розраховані за програмою, лінії скорочення фрези (рис. 2.2, рис. 2.3).

Лінії обмеження на схемі відповідають наступним факторним обмеженням:

- 1 – максимально допустима величина подачі [8];
- 2 – максимально допустимий крутний момент на фрезі;
- 3 – номінальна потужність двигуна головного руху;
- 4 – бажане значення періоду стійкості фрези;
- 5 – мінімальна швидкість подачі;
- 6 – мінімальна частота обертання.

При цьому максимальні значення швидкості подачі та частоти обертання фрези, які можуть бути реалізовані електроприводами робочих рухів верстата, виходять за межі області, наведеної на рис. 2.2 та рис. 2.3.

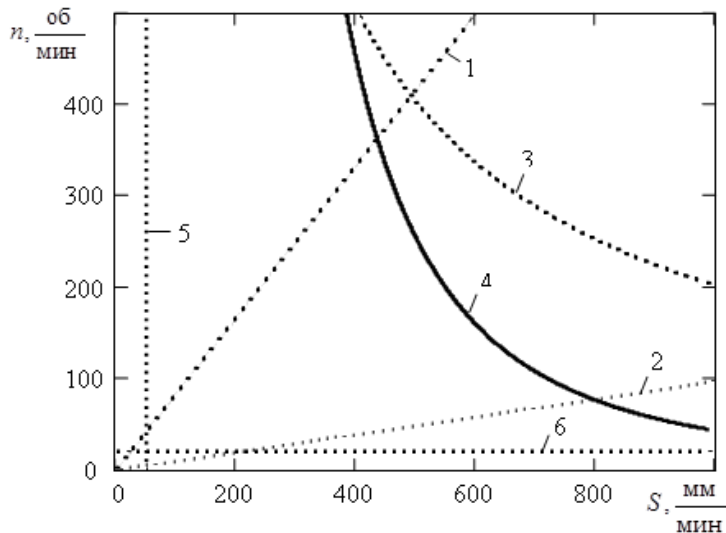


Рис. 2.2. Области допустимих швидкостей робочих рухів при глибині обробки 2 мм

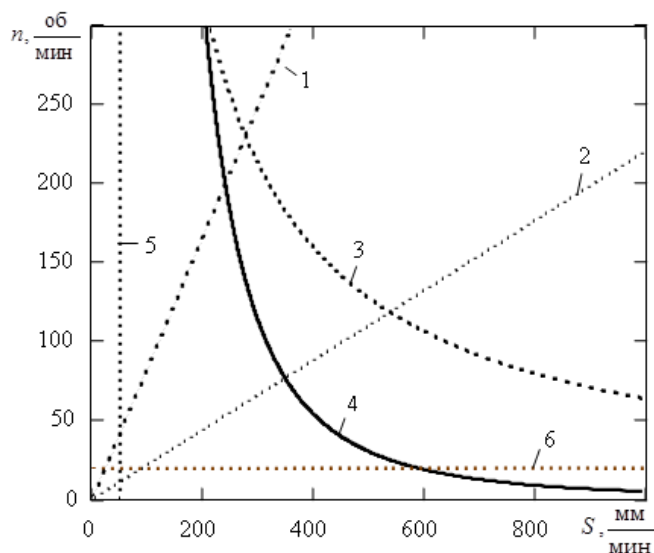


Рис. 2.3. Области допустимих швидкостей робочих рухів при глибині обробки 4 мм

Максимальній швидкості подачі та максимально можливим граничним значенням показників ефективності обробки в цих умовах відповідає точка перетину ліній 1 та 3, остання відповідає потужності обробки $P_z = 3$ кВт.

При мінімальній глибині обробки $t_p=2$ мм максимальна допустима швидкість подачі відповідає точці перетину ліній 1 і 3.

Однак, як показали проведені розрахунки, цій точці відповідає поточне значення періоду стійкості інструменту, яке становить 58 хв. Оскільки дане значення T є миттєвою оцінкою для конкретного рівня допуску та відповідного режиму обробки, і протягом обробки заготовки ця оцінка буде збільшуватися, його можна вважати допустимим. Якщо ж мале поточне значення T не влаштовує користувача верстата, то робоча точка при глибині обробки $t_p = 2$ мм повинна відповідати точці перетину ліній 1 і 4 (на рис. 2.2 лінія 1 є допустимою для цієї глибини обробки подачі $S_{zm} = 0,196$ мм/зуб, а лінія 60 хв).

За умов взаємопов'язаного керування швидкістю подачі та частотою обертання фрези робоча точка переміщується вздовж заданих ліній обмеження області допустимих режимів, що забезпечує досягнення максимально можливих за конкретних умов обробки значень показників ефективності.

З метою перевірки запропонованого способу керування технологічним процесом фрезерування та його порівняння з іншими відомими методами управління розглянуто випадок обробки заготовки з сірого чавуну з твердістю HB = 190 торцевою фрезою, оснащеною пластинами з твердого сплаву ВК6. Обробка здійснювалась зі зміною глибини різання в діапазоні від 2 мм до 4 мм із застосуванням розробленого методу взаємопов'язаного керування швидкостями, відповідно до ліній обмеження, наведених на рис. 2.2 та рис. 2.3.

Для дослідження режимів роботи системи, що встановилися, з взаємопов'язаним управлінням швидкостями робочих рухів передбачалося, що глибина різання t_p змінюється ступінчасто щодо довжини оброблюваної поверхні L , а загальна довжина заготовки дорівнює 300 мм

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

Основний технологічний час (хв) визначається за формулою:

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

де L_i – довжина i -ої ділянки оброблюваної поверхні, мм; S_i – швидкість подачі на i -ій ділянці, мм/мин; k – кількість ділянок з різною глибиною різання.

Енергія, що витрачається на обробку, розраховується за формулою

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

де P_{zi} – потужність різання на i -ій ділянці; t_i – тривалість обробки i -ї ділянки.

Запишемо для частоти обертання шпинделя (фрези) з урахуванням (2.1), (2.4) та (2.9) залежність частоти обертання шпинделя при фрезеруванні від довжини оброблюваного матеріалу

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

На рисунку 2.4 подано результати розрахункового аналізу режимів функціонування системи стабілізації потужності в процесі фрезерування за умови регулювання швидкості подачі. Порівняльне дослідження різних стратегій керування процесом фрезерної обробки показало, що використання стабілізації потужності з впливом виключно на електропривод подачі дозволяє суттєво інтенсифікувати процес різання. Зокрема, тривалість обробки скорочується на 11,3 % відносно базового режиму з фіксованими швидкостями робочих рухів.

Разом із тим підвищення продуктивності досягається за рахунок зростання енергоспоживання: сумарні витрати електроенергії у такому режимі перевищують відповідні показники традиційної обробки на 8,9 %, що свідчить про компромісний

характер даного способу керування між продуктивністю та енергетичною ефективністю.

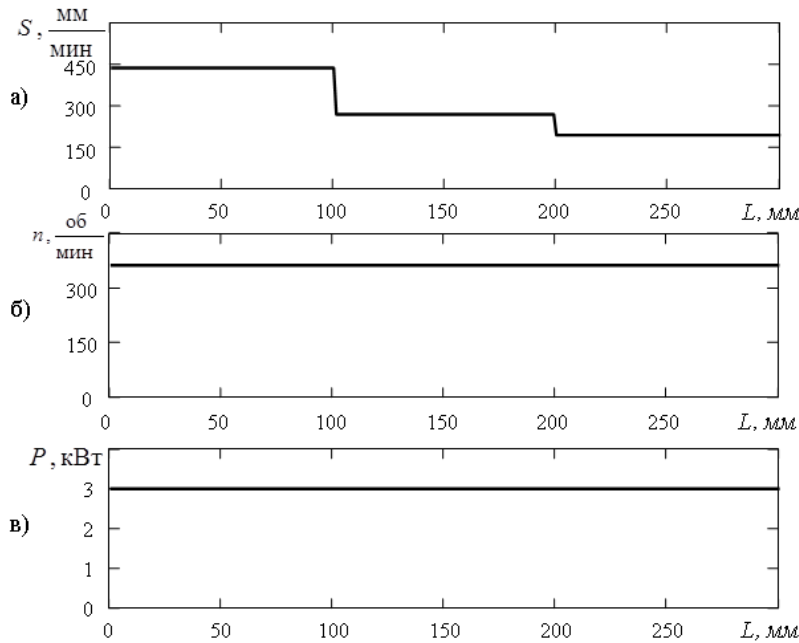


Рис. 2.4. Залежності: а) швидкості подачі; б) частоти обертання шпинделя; в) потужності різання від довжини оброблюваного матеріалу при керуванні тільки швидкістю подачі верстата.

При взаємопов'язаному управлінні швидкостями робочих рухів верстата відносно скорочення тривалості обробки порівняно з обробкою при постійних швидкостях робочих рухів становить 19% за таких самих витрат енергії.

2.3. Розробка нечіткого регулятора для керування процесом фрезерування

Загальна структура нечіткого регулятора системи стабілізації потужності різання верстата фрезерного показана на рис. 2.5.

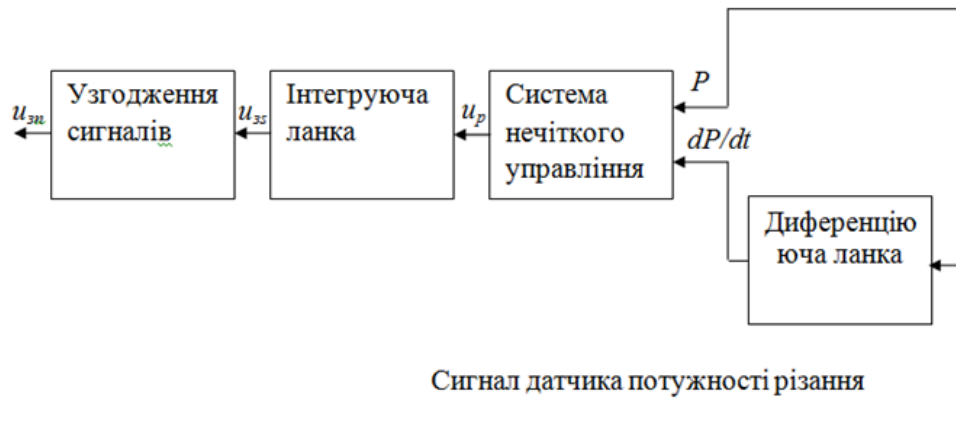


Рис. 2.5. Загальна структура нечіткого регулятора для керування процесом фрезерування

На вхід нечіткого регулятора подаються сигнали, що є пропорційними поточному значенню потужності різання P_z та її часовій похідній, які виступають вхідними лінгвістичними змінними системи. Вихідна інформація нечіткого регулятора формується у вигляді сигналу завдання прискорення електроприводу подачі верстата. Подальше формування сигналу завдання швидкості подачі здійснюється шляхом інтегрування зазначеного сигналу прискорення. Узгодження швидкості подачі з частотою обертання фрези з метою стабілізації режиму різання реалізується через формування сигналу завдання швидкості електроприводу головного руху.

Нечітке лінгвістичне представлення інформації передбачає використання бази даних, у якій встановлюється відповідність між лінгвістичними змінними та їх функціями приналежності. Функція приналежності визначає міру належності елемента універсальної множини до відповідної нечіткої множини та є основним інструментом кількісного опису нечітких понять. Формальне означення нечіткої множини не встановлює обмежень щодо вибору виду функції приналежності [5]. Водночас при синтезі нечіткого регулятора доцільно застосовувати функції приналежності, що допускають аналітичне подання у вигляді простих математичних залежностей, оскільки це істотно спрощує чисельну реалізацію алгоритмів нечіткого виведення та зменшує обчислювальні витрати.

На рис. 2.6. зображено графіки функції приладдя для термів лінгвістичних змінних потужності різання та швидкості зміни потужності, прискорення завдання електроприводу подачі.

Функції приналежності описують терми лінгвістичної змінної; «потужність дорівнює заданій Z , швидкість зміни потужності дорівнює нулю Z , прискорення дорівнює нулю Z ». Приймаємо трикутну функцію приналежності, яка може бути задана аналітично наступним виразом:

$$\mu_{A1}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a \vee c \leq x \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{при } b \leq x \leq c \end{cases}, \quad (2.11)$$

де a, b, c - деякі числові параметри, що набувають довільних дійсних значень і впорядковані ставленням: $a < b < c$.

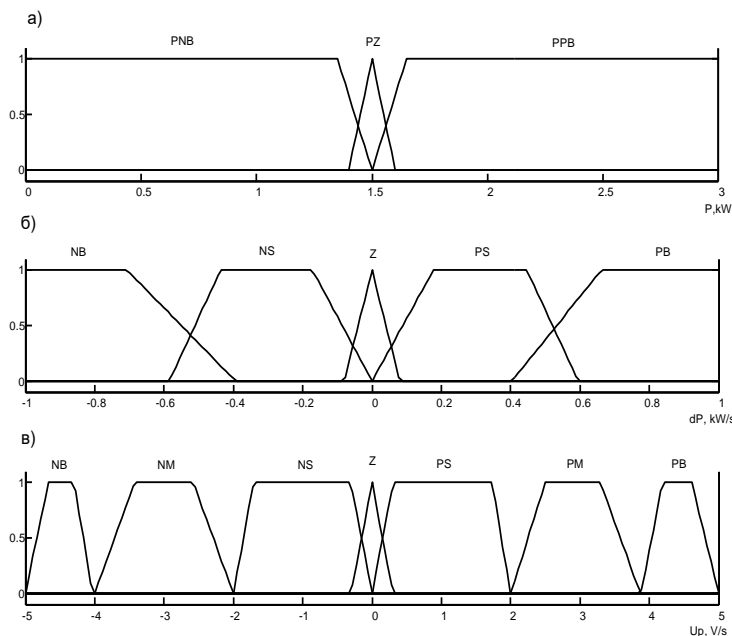


Рис. 2.6. Функції приладдя, що характеризують величину а) потужності різання P_z б) швидкості її зміни dP/dt в) завдання прискорення електроприводу подачі верстата u_p .

Друга функція приналежності (трапецієподібна) описує решту терм лінгвістичної змінної, яка в загальному випадку може бути задана аналітичним виразом:

$$\mu_{A2}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq a \vee d \leq x \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{при } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{при } c \leq x \leq d \end{cases}, \quad (2.12)$$

де a, b, c, d - деякі числові параметри, що набувають довільних дійсних значень і впорядковані ставленням: $a < b < c < d$.

Структуру системи нечіткого управління (рис. 2.7) можна подати у вигляді трьох основних блоків: блоку фазифікації, блоку системи інференції та блоку дефазифікації.

У першому блоці відбувається фазифікація вхідних сигналів, тобто. чітко визначені сигнали перетворюються на нечітку форму. Для цього спочатку визначимося з кількістю нечітких висловлювань для кожного вхідного сигналу, якими оперуватиме база знань НР, яка є змістовним компонентом блоку нечіткого виведення. Оперуючи отриманими вхідними та вихідними лінгвістичними змінними та поставленою метою управління, складаємо базу знань НР (табл. 2.1). Варіант правил нечіткої продукції для системи нечіткого виведення може бути записаний у формі:

ПРАВИЛА <#> ЯКЩО “ $P \in \alpha$ ” І “ $dP \in \beta$ ” ТО “ $Up \in v$ ” (2.11) де P, dP, Up нечіткі множини потужності різання, її швидкості зміни та сигнал завдання прискорення електроприводу подачі, які відповідають термам α, β, v .

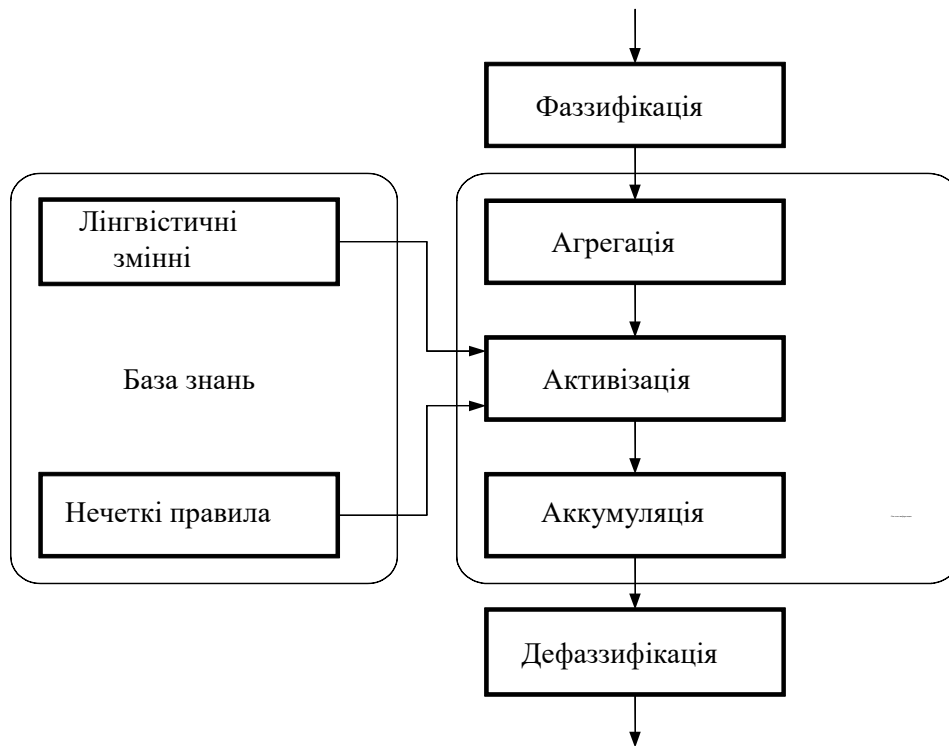


Рис. 2.7. Структура системи нечіткого управління

Таблиця 2.1 База правил нечіткого регулятора

		Мощность резания		
		PNB	PZ	PPB
Скорость изменения мощности	PB	NM	NM	NB
	PS	Z	NS	NS
	Z	PS	Z	NS
	NS	PM	PM	Z
	NB	PB	PS	PS

Після вибору лінгвістичних змінних та формування бази знань нечіткого регулятора здійснюється етап фазифікації, основною метою якого є встановлення відповідності між конкретними числовими значеннями вхідних змінних регулятора та значеннями функцій приналежності відповідних термів вхідних лінгвістичних змінних. У результаті виконання цього етапу визначаються числові значення

функцій приналежності для кожного лінгвістичного терма, що використовуються для всіх вхідних змінних, наведених у табл. 2.1.

При синтезі механізму нечіткого виведення застосовано алгоритм інференції за методом Мамдані, який відрізняється простотою реалізації та наочністю інтерпретації результатів. Хоча зазначений алгоритм традиційно рекомендується для використання в експертних системах і системах підтримки прийняття рішень [5], практика показує, що він також є ефективним при розробленні нечітких систем керування технологічними процесами.

Агрегування умов у нечітких правилах здійснюється з використанням нечітких логічних операцій, за допомогою яких визначається ступінь істинності передумов кожного правила. Правила, для яких ступінь істинності є відмінним від нуля, вважаються активними та залучаються до подальших етапів нечіткого виведення і формування керуючого впливу.

Для забезпечення заданої послідовності виконання технологічних операцій у металорізальних верстатах широко застосовуються програмовані логічні контролери, окремі моделі яких підтримують реалізацію фазі-регуляторів. Це створює передумови для побудови не лише систем циклового програмного управління, а й систем автоматичного керування режимами обробки, спрямованих на підвищення продуктивності та зниження енергоспоживання верстатного обладнання.

З метою вдосконалення системи керування технологічним процесом фрезерування, що забезпечує стабілізацію потужності різання, було модифіковано структуру фазі-регулятора. Процедура його налаштування (рис. 2.7) базується на алгоритмі Мамдані та реалізована з використанням мікроконтролера, який виконує функції коригувального пристрою [11].

Стандартизація елементів мови FCL здійснюється з метою уніфікації представлення даних та забезпечення можливості перенесення програм нечіткого

керування між системами різних виробників, що підвищує сумісність та масштабованість розроблюваних систем управління.

Як алгоритм нечіткого виведення в роботі обрано алгоритм Мамдані, що є одним із найбільш поширених та апробованих підходів у задачах нечіткого керування технологічними процесами. Активізація нечітких правил здійснюється з використанням оператора *min*, який дозволяє визначити ступінь виконання кожного правила на основі мінімального значення функцій належності його передумов.

Для акумуляції часткових висновків застосовано оператор *max*, що відповідає класичній схемі нечіткого виведення за методом Мамдані та забезпечує об'єднання результатів активних правил у єдину нечітку множину вихідної змінної.

Процедура дефазифікації реалізується за методом центру тяжіння для одноелементних множин (*Center of Gravity for Singletons*), який задається ключовим словом **COGS**. Використання даного методу забезпечує отримання числового значення керуючого впливу, адекватного сформованому нечіткому висновку, та є доцільним з огляду на простоту обчислень і стабільність результатів у реальному часі.

2.4. Система оптимізації технологічного процесу силового шліфування

Оптимальне керування процесом силового шліфування на верстатах з круглим столом і вертикальним шпинделем передбачає визначення безпосередньо в ході обробки такого значення швидкості електроприводу вертикальної подачі, за якого забезпечується максимальна ефективність технологічного процесу відповідно до обраного критерію оптимальності, з одночасним дотриманням вимог щодо якості оброблюваної деталі та наявних технологічних обмежень.

Запропоноване удосконалення алгоритму керування процесом силового шліфування полягає у відмові від використання пошукових методів визначення екстремуму цільової функції, що базуються на введенні пробних керуючих впливів у процес обробки, та переході до безпошукового алгоритму, в основі якого лежить аналітичне визначення положення екстремуму показника ефективності.

В основу математичної моделі процесу обробки, яка визначається на підставі пробних впливів зі зміни швидкості електроприводу подачі верстата, покладена залежність прогнозованого значення періоду стійкості шліфувального кола T від швидкості електроприводу подачі S

$$T = \frac{C_T}{S^y}, \quad (2.13)$$

де C_T – коефіцієнт, y – показник степені.

Показник енергетичної ефективності процесу обробки характеризує кількість енергії, витрачену при зніманні одиниці об'єму металу.

$$J_e = \frac{O}{A} = \frac{QT}{P_z T} = \frac{Q}{P_z}, \quad (2.14)$$

де O – обсяг металу, знятий за період стійкості інструменту, мм³; A – енергія, спожита верстатом за період стійкості, кВт•хв, Q – швидкість знімання металу, мм³/хв; P_z – потужність, що споживається з мережі під час обробки, кВт.

$$Q = G \left(S - \frac{H}{T} \right),$$

де G – площа оброблюваної деталі, мм²;

H – допустима величина зношування абразивних сегментів за висотою, мм.

Процес силового шліфування характеризується дією значної кількості випадкових і неконтрольованих збурювальних факторів, у зв'язку з чим період стійкості шліфувального інструменту T доцільно розглядати як стохастичний параметр технологічної системи. Значення коефіцієнта C_T та показника степеня y , що входять до аналітичної залежності (2.14), зазнають варіацій не лише внаслідок зміни фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, типу та

характеристик інструменту, а також ширини обробки, але й у межах виготовлення однотипних деталей, а інколи — навіть протягом обробки однієї заготовки.

За таких умов положення екстремального значення показника енергетичної ефективності процесу силового шліфування відносно швидкості вертикальної подачі визначається поточними значеннями параметрів C_T та y , що відображають інтенсивність зношування інструменту. З метою кількісної оцінки впливу варіацій зазначених параметрів на зміну координат екстремуму показника енергетичної ефективності було проведено чисельні дослідження із застосуванням методу дихотомії (методу половинного поділу). У ході розрахунків визначено значення швидкостей подачі, які відповідають екстремальним значенням критерію енергетичної ефективності за різних комбінацій коефіцієнта C_T та показника степеня y .

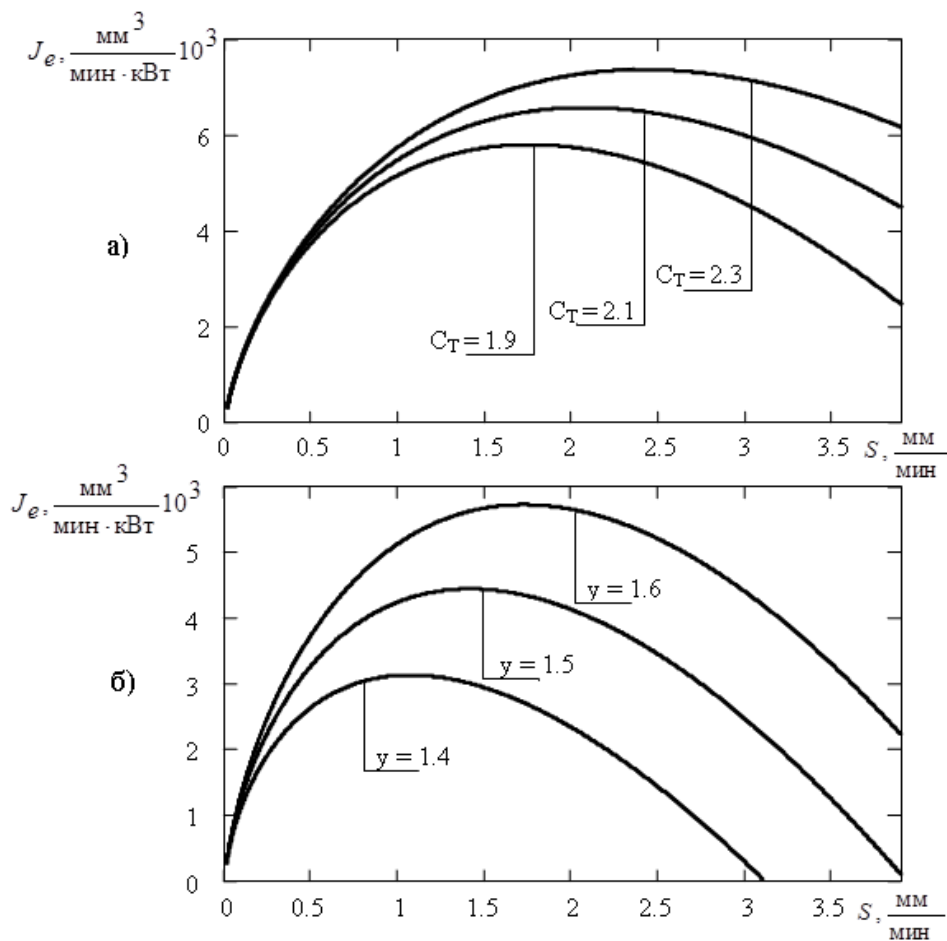


Рис. 2.8. Графіки залежності енергетичного показника ефективності обробки швидкості вертикальної подачі при зміні складових миттєвої оцінки

періоду стійкості: а) при зміні коефіцієнта C_T ; б) при зміні показника ступеня y

Розрахунок виконується для кількох значень коефіцієнта C_T та показника ступеня y (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Розрахункові значення C_T и y

C_T	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
y	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2

У процесі досліджень виходить статистичний ряд розрахунків двох величин, коли кожному значення функції $S_{OPT 1}, S_{OPT 2}, S_{OPT n}$ відповідає певне значення коефіцієнта $C_{T1}, C_{T2}, \dots, C_{Tn}$. За підсумками розрахункових даних побудований графік залежності $S_{OPT} = f(C_T)$ (рис. 2.8, а, б, ...). Можна підібрати відповідно до цього графіка вираз алгебри, що є наближеним виразом аналітичної формули.

Функціональна схема системи управління процесом силового шліфування на верстаті з круглим столом та вертикальним шпинделем показана на рис. 2.9.

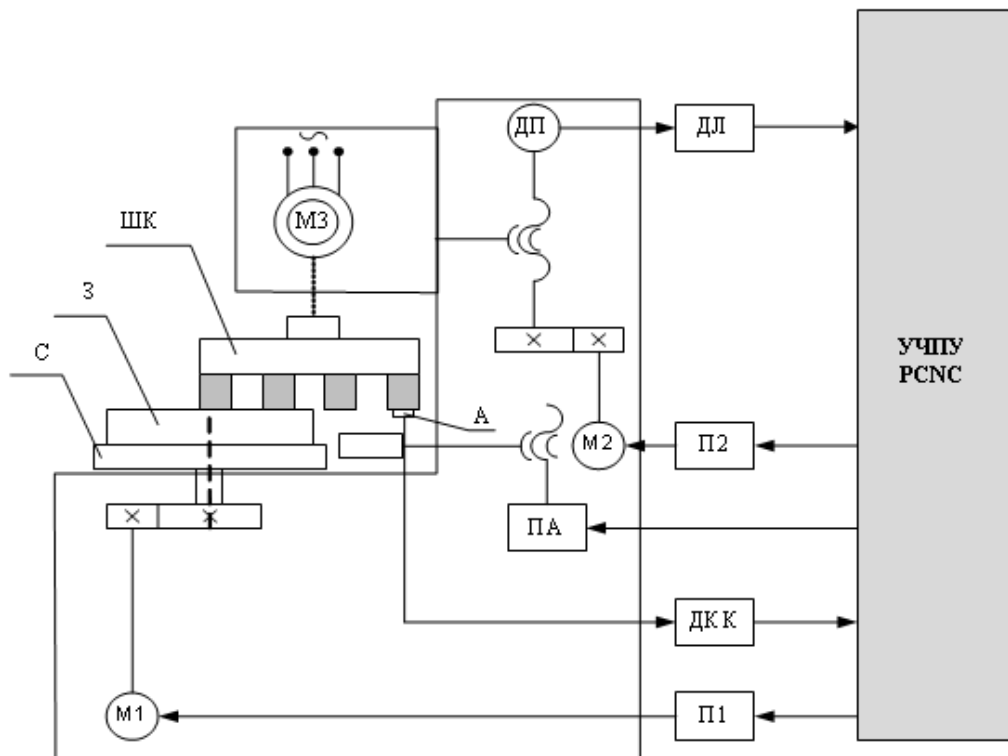


Рис. 2.9. Функціональна схема автоматизованої системи керування для оптимізації процесу силового шліфування

Оброблювана заготовка 3 закріплюється на столі С верстата, обертання якого здійснюється за допомогою регульованого електроприводу, що включає електродвигун М1 та силовий перетворювач П1. Переміщення бабки зі шліфувальним кругом ШК у вертикальному напрямку реалізується електроприводом вертикальної подачі, до складу якого входять двигун М2 і перетворювач П2. Обертання шліфувального круга забезпечується асинхронним електродвигуном М3 з короткозамкненим ротором. На колоні верстата встановлено пристрій правки з алмазним інструментом А, призначений для відновлення ріжучих властивостей шліфувального круга.

Керування технологічним процесом на верстаті здійснюється за допомогою пристрою числового програмного керування, реалізованого на базі персонального комп'ютера. Функціонально процес керування розподіляється між програмними модулями, що працюють у різних режимах: диспетчер циклу обробки виконується у фоновому режимі, тоді як програми основних задач функціонують у режимі обробки переривань.

Програмний модуль оптимізації режиму обробки виконує визначення значення швидкості подачі, яке відповідає екстремальному значенню обраного показника ефективності, та формує відповідний сигнал завдання у вигляді напруги керування електроприводом подачі. Даний модуль реагує на сигнали переривань, що формуються датчиком контролю координат. Окремий програмний модуль забезпечує керування переміщенням пристрою правки шліфувального круга та обробляє сигнали переривань, сформовані системним таймером. Зазначена програма має вищий пріоритет порівняно з програмою оптимізації режиму обробки та передає їй інформацію щодо тривалості роботи на кожному кроці переміщення пристрою правки. Програма – диспетчер циклу обробки (рис. 2.10) передбачає таку послідовність операцій [2].

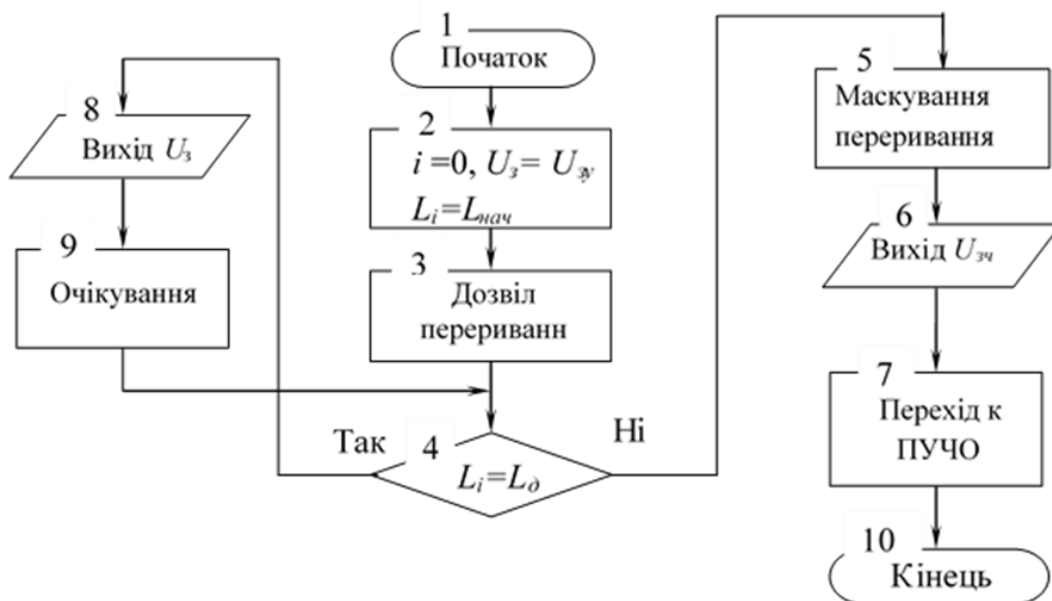


Рис. 2.10. Алгоритм диспетчера циклу обробки

На початку процесу управління напрузі завдання швидкості електроприводу вертикальної подачі U_z надається значення $U_{z\gamma}$, яке відповідає прискореному переміщенню шліфувальної бабки з колом до деталі, що обробляється. Номер i шару металу, знятий у процесі обробки, набуває нульового значення, а поточна висота оброблюваної заготовки L – початкове значення $L_{нач}$ (блоки 1, 2).

Після дозволу переривання програми (блок 3) перевіряється досягнення заготовлею заданої висоти оброблюваної деталі L_d (блок 4). При виконанні цієї умови відбувається маскування переривання, виведення напруги завдання $U_{zч}$, та перехід до програми управління чистовою обробкою ПУЧО (блоки 5–7). Поки задана висота L_d не досягнута, забезпечується виведення поточного значення напруги завдання U_z та перехід у режим очікування переривання (блоки 8–9).

3 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФРЕЗУВАННЯ ЯК ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Теоретичне обґрунтування визначення математичної моделі об'єкта управління технологічним процесом фрезерування

Технологічний процес фрезерування, як складова автоматизованої системи управління, може бути представленим аперіодичною ланкою першого порядку, параметри якої визначаються емпіричним шляхом. Водночас експериментально встановлені значення постійної часу процесу фрезерування не завжди збігаються з результатами розрахунків, отриманих за наявними аналітичними формулами.

Метою даного дослідження є уточнення математичної моделі процесу різання при фрезеруванні. Зокрема, необхідно більш точно визначити параметри технологічного процесу, що впливають на величину постійної часу у передавальній функції процесу фрезерування як об'єкта управління автоматизованої системи.

Рівняння зв'язку між вхідними та вихідними змінними можна записати у різній формі. Найбільш універсальною є диференціальне рівняння об'єкта [7]

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx(t)}{dt} + b_m x(t) \quad (3.1)$$

де $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ постійні коефіцієнти.

Широко використовується також рівняння зв'язку між входом та виходом типу інтеграла згортки (інтеграл Дюамеля)

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) \omega(t - \tau) d\tau = \int_0^t \omega(\tau) x(t - \tau) d\tau, \quad (3.2)$$

где $\omega(\tau)$ – функція ваги об'єкта, тобто реакція об'єкта на вхідний сигнал у вигляді дельта функції

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 \cdot n_{pu} \cdot t \neq 0 \\ \infty \cdot n_{pu} \cdot t = 0 \end{cases}; \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) = 1, \quad (3.3)$$

Диференціальні рівняння та передатна функція є найбільш загальними формами зв'язку між змінними станами на вході та виході лінійної системи. Але в реальних умовах спостерігаємо лише сигнали управління та реакцію системи, за якими необхідно отримати рівняння зв'язку.

При розробці математичної моделі процесу фрезерування слід враховувати, що інформацію про динаміку потужності різання в часі можна отримати шляхом реєстрації змін активної потужності, споживаної двигуном головного руху верстата від електромережі під час обробки заготовки. У цьому контексті необхідно приймати до уваги вплив електромеханічної та електромагнітної інерційності асинхронного двигуна головного руху, а також динамічні властивості датчика, що фіксує активну потужність, оскільки вони безпосередньо впливають на точність оцінки силових параметрів процесу та визначають динамічні характеристики моделі об'єкта управління. Процес обробки був представлений у роботах [8] аперіодичною ланкою першого порядку з передатною функцією:

$$H_{\text{по}}(p) = \frac{P_z(p)}{S(p)} = \frac{K_{no}}{(T_{no} p + 1)}, \quad (3.4)$$

де K_{no} - коефіцієнт передачі процесу різання;

T_{no} - постійна часу процесу різання.

Рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна головного руху верстата має вигляд [6]

$$(T_9 p + 1)M = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (3.5)$$

де T_9 – електромагнітна постійна часу двигуна, с;

β - модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики асинхронного двигуна, Нм·с/рад;

ω_0, ω – кутові швидкості магнітного поля та ротора, рад/с;

M – електромагнітний момент двигуна, Нм.

Зв'язок моменту, що розвивається двигуном, моменту навантаження, наведеного до його валу M_c і швидкості двигуна встановлює рівняння руху

$$M - M_c = j \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.6)$$

где j – наведений до валу двигуна момент інерції механічної частини з урахуванням коробки швидкостей, кг м².

На підставі рівнянь (3.5) та (3.6) отримано структурну схему асинхронного двигуна, лінеаризованого в межах робочої ділянки статичної механічної характеристики (рис. 3.1).

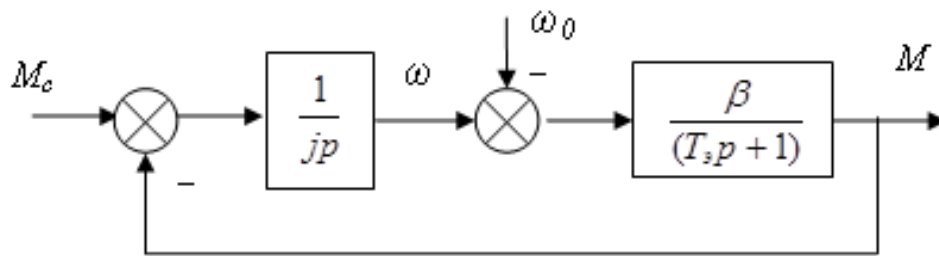


Рис. 3.1. Структурна схема лінеаризованого асинхронного двигуна

Передатна функція двигуна головного руху

$$\frac{M(p)}{M_c(p)} = \frac{1}{T_s T_m p^2 + T_m p + 1}$$

Так як електромагнітна постійна асинхронного двигуна T_e при живленні від джерела напруги невелика і становить 0,006 с [3], то можна знехтувати складовою $T_s T_m p^2$ і вважати двигун головного руху аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією

$$\frac{M(p)}{M_c(p)} = \frac{1}{T_m p + 1}$$

Аналогічно є і передатна функція двигуна у вигляді відношення зображень Лапласа його активної потужності та потужності різання

$$H_d(p) = \frac{P(p)}{P_z(p)} = \frac{1}{T_M p + 1}. \quad (3.7)$$

Датчик потужності представлений аперіодичною ланкою з передавальною функцією

$$H_{\partial M}(p) = \frac{u_{\partial M}(p)}{P(p)} = \frac{K_{\partial M}}{T_{\partial M} p + 1}, \quad (3.8)$$

где $T_{\partial M}$ - постійна часу датчика потужності, с;

$K_{\partial M}$ – коефіцієнт передачі датчика потужності

Враховуючи (3.4), (3.7), (3.8) об'єкт управління автоматизованої системи може бути представлений аперіодичною ланкою 3-го порядку ланкою, його структурна схема наведена на рис. 3.2.

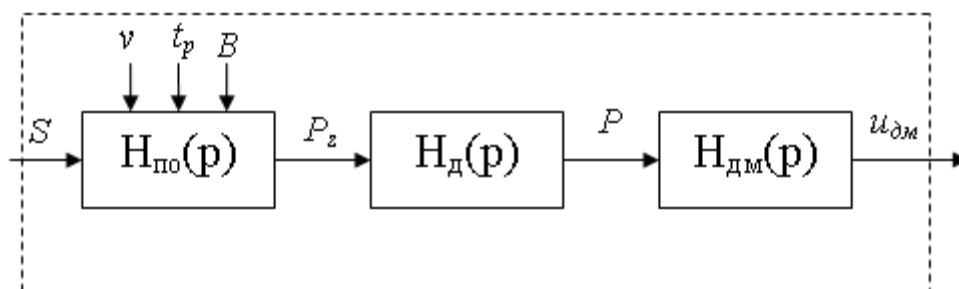


Рис. 3.2. Структурна схема досліджуваного об'єкта управління

Розглядається поетапна процедура розв'язання задачі синтезу лінійної математичної моделі об'єкта автоматичного управління на підставі експериментально отриманих перехідних характеристик. Вихідні дані подані у вигляді табличних масивів, сформованих за результатами дискретної реєстрації значень вихідної координати з фіксованим часовим інтервалом у процесі проведення випробувань. У межах даного підходу ставиться завдання побудови узагальненої моделі об'єкта у формі передавальної функції, що адекватно відтворює його динамічні властивості та може бути використана для подальшого

аналізу, синтезу та оптимізації системи автоматизованого керування.

$$H_{\varepsilon}(p) = H_{no}(p) \cdot H_{\delta}(p) \cdot H_{\delta m}(p) = \frac{k_{no}}{T_{no} p + 1} \cdot \frac{1}{T_m p + 1} \cdot \frac{k_{\delta m}}{T_{\delta m} p + 1}. \quad (3.9)$$

Оскільки в процесі проведення експерименту спостерігаємо лише реакції системи (перехідну функцію), її можна отримати за допомогою операторного методу. Знаючи оператор ланки, перехідну функцію можна знайти за формулою зворотення [7]:

$$h(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot j} \int_{p=c-j\infty}^{p=c+j\infty} \frac{H_{\varepsilon}(p)}{p} e^{pt} dp, \quad (3.10)$$

Таким чином, за допомогою експерименту можна отримати графік, що визначає приватне рішення дистанційного керування при певному вхідному сигналі. Потім, апроксимували аналітичним виразом отримані реалізації, можна отримати параметри моделі об'єкта.

Завдання визначення параметрів передавальної функції об'єкта по кривій розгону відноситься до задач нелінійної регресії.

Регресійний аналіз передбачає завдання виду функції $f(t_k, x_1, x_2, \dots, x_m)$ та визначення чисельних значень її параметрів x_1, x_2, \dots, x_m , що забезпечують найменшу похибку наближення до безлічі значень h_k . Похибка наближення обчислюється шляхом найменших квадратів (МНК). Для цього виконується мінімізація функції квадратів залишкових помилок.

Для оцінювання параметрів p_1, p_2, \dots, p_m здійснюється диференціювання функції залишкових похибок за всіма шуканими параметрами. Отримані рівняння, що відповідають частинним похідним, прирівнюються до нуля, після чого розв'язуються спільно з метою визначення оптимальних значень параметрів моделі.

У результаті диференціювання рівнянь (3.11) за параметрами формується система нелінійних алгебраїчних рівнянь. Пряма мінімізація такої системи

пов'язана зі значною обчислювальною складністю та потребує великих ресурсних витрат. Тому на практиці зазвичай застосовують лінеаризацію вихідних співвідношень у околі робочої точки з подальшим використанням методу найменших квадратів для оцінювання параметрів моделі.

3.2 Визначення параметрів технологічного процесу фрезерування як об'єкта управління за даними спостережень

Для виконання експериментальних досліджень, за результатами яких здійснювалося визначення параметрів математичної моделі процесу фрезерування, була розроблена та змонтована спеціалізована експериментальна установка. Її функціональну схему наведено на рис. 3.3. Експериментальні дослідження проводилися на вертикально-фрезерному верстаті моделі 6Б75 під час обробки заготовок із сірого чавуну кінцевою фрезою, виготовленою зі швидкорізальної сталі марки Р6М5.

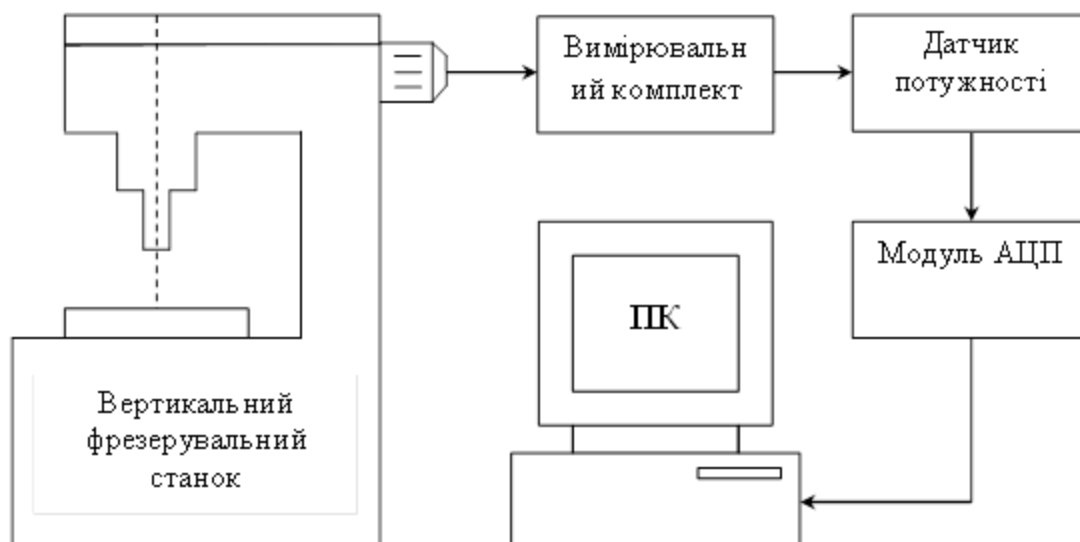


Рис. 3.3. Функціональна схема експериментальної установки

Двигун головного руху фрезерного верстата підключено до вимірювального комплексу К-50 та датчика активної потужності асинхронного двигуна. Використаний вимірювальний комплект забезпечує можливість контролю значень активної потужності в кожній фазі електродвигуна за допомогою ватметра з класом точності 0,5, що дозволяє отримувати достовірні експериментальні дані. Принципову електричну схему датчика активної потужності наведено на рис. 3.4.

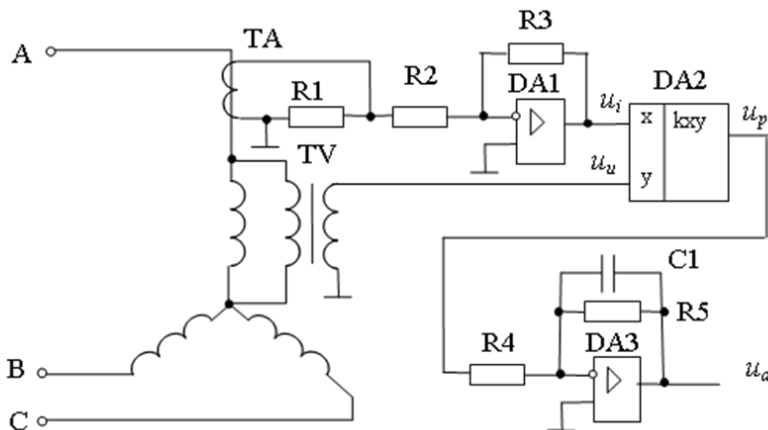


Рис. 3.4. Принципова схема датчика активної потужності фази асинхронного двигуна

Він виконаний на основі трансформаторів напруги TV та струму TA, включених у фазу асинхронного двигуна головного руху. Вихідна напруга трансформаторів перемножується аналоговим перемножувачем DA2. Напруга u_p на виході DA2 пропорційно до миттєвої потужності фази двигуна. Ця частина датчика є практично безінерційною. Формування сигналу u_a , пропорційного активної потужності фази двигуна, забезпечується фільтром низької частоти на операційному підсилювачі DA3. Цей фільтр є аперіодичним ланкою першого порядку з постійної часу $T_{дм} = R5 C1$, яка становить 0,2 с.

Для перетворення на цифровий код аналогового сигналу датчика потужності застосований модуль АЦП типу E14-440 компанії L – card. Збір та запам'ятовування даних, що надходять з модуля АЦП здійснюється персональним комп'ютером через USB-порт.

На підготовчому етапі експериментальних досліджень здійснювалася попередня підготовка поверхні заготовки шляхом задання фіксованих значень ширини фрезерування B та глибини різання t_p . Такий підхід дозволив забезпечити стабільність умов обробки та відтворюваність експериментальних результатів.

Під час побудови математичної моделі процесу різання необхідно обрати таку характеристику режиму різання, яка забезпечує можливість визначення параметрів передавальної функції з точністю, достатньою для практичного застосування в задачах аналізу та синтезу систем автоматизованого керування.

На рис. 3.5-3.6 показані залежності постійної часу від частоти обертання шпинделя та швидкості подачі, за сталості інших параметрів ($t_p, Z = \text{const}$)

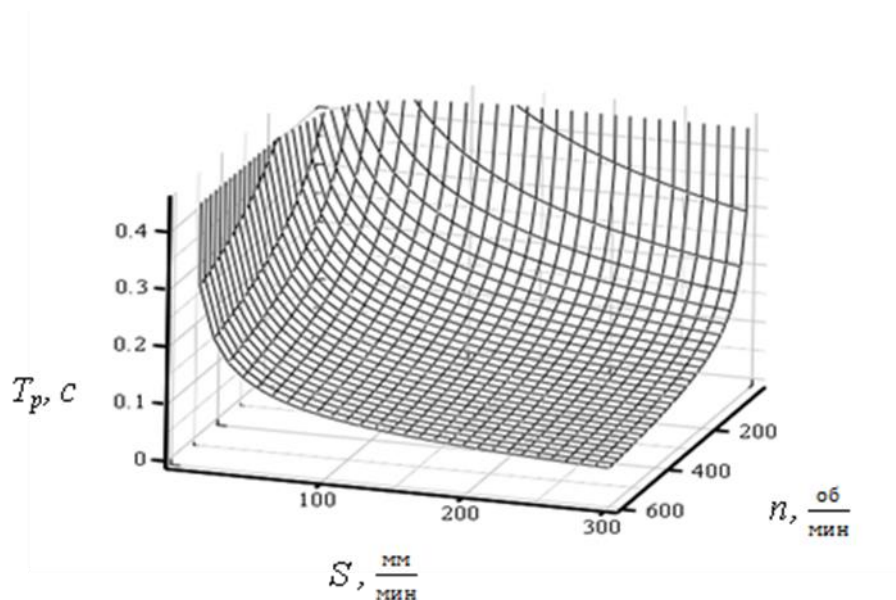


Рис. 3.5. Залежність постійного часу процесу фрезерування від частоти обертання фрези

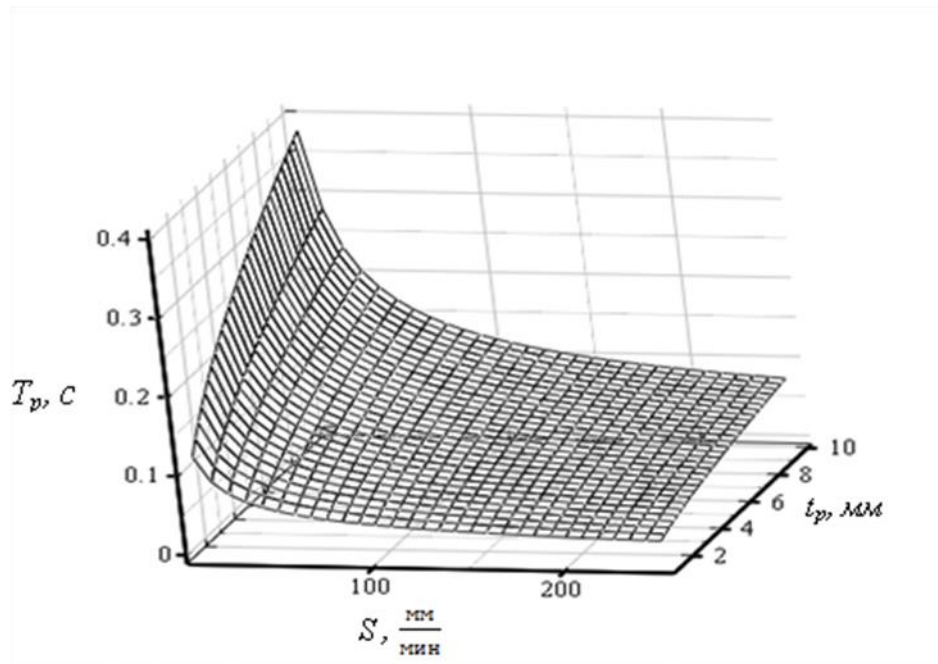


Рис. 3.6. Залежність постійного часу процесу фрезерування від швидкості подачі та глибини різання

4 ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ МЕТАЛООБРОБКИ НА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ

4.1. Дослідження системи стабілізації потужності процесу фрезерування з нечітким регулятором

Для дослідження розробленої автоматизованої системи управління процесом фрезерування з фазі-регулятором у середовищі Simulink створено модель (рис. 4.1).

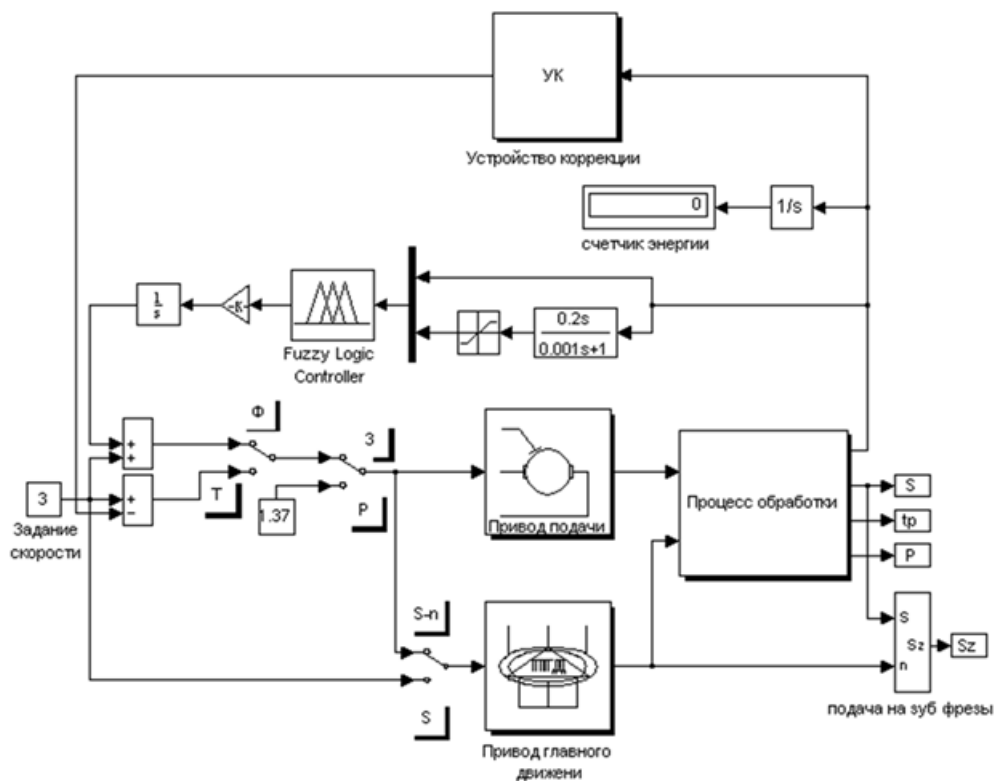


Рис. 4.1. Схема моделі для дослідження автоматизованих систем керування процесом фрезерування

Ключовими елементами розробленої моделі є функціональні блоки підсистем, що відтворюють технологічний процес обробки разом із датчиком

потужності різання, електроприводи подачі та головного руху верстата, а також нечіткий контролер. Сукупність зазначених підсистем забезпечує комплексне відображення взаємодії між керуючими та збурюючими чинниками у процесі різання.

Математичний опис процесу обробки сформовано на основі експериментально встановлених залежностей, які пов'язують потужність різання з керуючими впливами — швидкостями електроприводів головного руху та подачі — а також із збуреннями, зумовленими змінами глибини та ширини обробки (рис. 4.2). Такий підхід дозволяє адекватно врахувати вплив технологічних параметрів на енергетичні характеристики процесу.

Для адекватного відтворення динамічних характеристик процесу різання у складі математичної моделі використано аперіодичну ланку другого порядку. Значення її постійної часу перебуває в оберненій залежності від частоти обертання фрези та швидкості подачі, одночасно зростаючи пропорційно глибині різання та кількості зубів інструмента. Такий підхід забезпечує коректний облік інерційних властивостей технологічного процесу.

Модель електроприводу подачі стола верстата побудована на основі імпульсного електроприводу постійного струму. Система його керування включає пропорційно-інтегральний регулятор швидкості та релейний регулятор струму двигуна. Механічну частину електроприводу подачі описано у вигляді двомасової розрахункової схеми, що дозволяє врахувати пружні та інерційні властивості механічної передачі.

Математична модель електроприводу головного руху сформована для структури типу «перетворювач частоти – асинхронний двигун», що відповідає сучасним системам приводу фрезерних верстатів і забезпечує адекватне відображення їх електромеханічної динаміки.

У межах розробленої моделі передбачено можливість аналізу кількох варіантів систем керування процесом фрезерування. Вибір конкретної структури

реалізується за допомогою перемикачів: перемикач «Ф–Т» дозволяє здійснювати моделювання системи з нечітким або традиційним регулятором, тоді як перемикач «З–Р» забезпечує дослідження як замкнених, так і розімкнених систем керування.

Перемикач **S–n–S** призначений для реалізації різних структур систем керування, зокрема варіантів із взаємопов'язаним регулюванням швидкостей електроприводів головного руху та подачі, а також систем, у яких здійснюється керування виключно швидкістю електроприводу подачі. Крім того, у складі моделі передбачено використання лічильника енергії, що забезпечує кількісну оцінку енергетичних витрат, пов'язаних з виконанням процесу обробки заготовки.

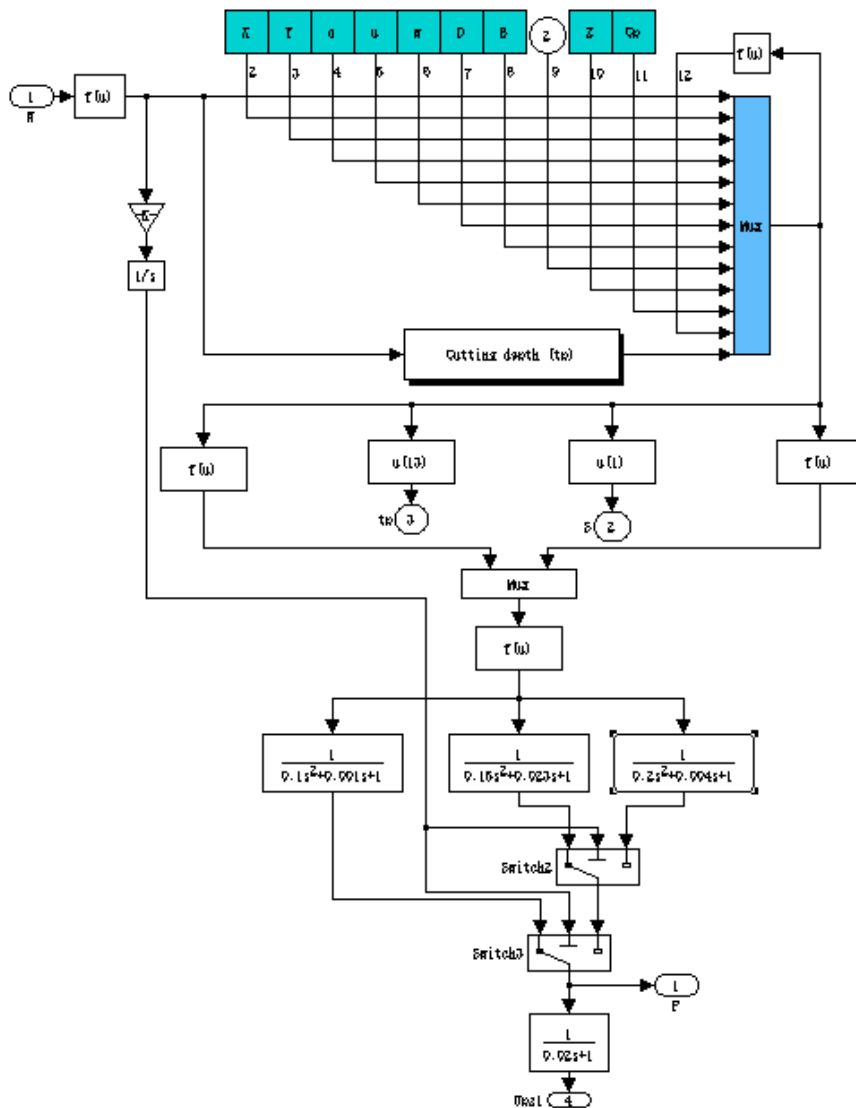


Рис. 4.2. Модель процесу фрезерування у системі стабілізації потужності обробки

Під час дослідження системи керування з фазі-регулятором на входи електроприводів подачі та головного руху подається сигнал завдання гранично допустимої швидкості разом із вихідним сигналом інтегратора, на вхід якого надходить керуючий вплив, сформований фазі-регулятором. Фазі-регулятор здійснює аналіз двох інформаційних сигналів, що є пропорційними поточному значенню потужності різання та швидкості її зміни у часі.

Незалежно від обраного режиму керування, тривалість процесу обробки прагне до мінімального можливого значення за умови реалізації максимально допустимої швидкості подачі з урахуванням технічних і технологічних обмежень. Для верстатів, оснащених електродвигунами головного руху невеликої потужності, визначальним технічним обмеженням є номінальна потужність цього двигуна. Серед технологічних факторів основним обмеженням виступає допустиме значення подачі на зуб фрези, яке визначається умовами міцності кінематичних ланцюгів приводу головного руху, міцності різального інструменту за заданих глибини та ширини різання, а також вимогами до точності обробки з урахуванням жорсткості технологічної системи верстата.

У системах із взаємопов'язаним керуванням узгодження швидкостей електроприводів головного руху та подачі здійснюється на основі підтримання максимально допустимого значення подачі, що забезпечує гранично ефективний режим обробки. Значення частоти обертання шпинделя та швидкості подачі в усталеному режимі, як у випадку використання постійних швидкостей робочих рухів, так і при застосуванні систем стабілізації потужності з керуванням одним або двома робочими рухами, можуть бути визначені відповідно до співвідношення (2.13).

За результатами імітаційного моделювання проведено порівняльний аналіз ефективності розглянутих систем керування, який охоплює оцінку тривалості обробки (рис. 4.3) та сумарних енергетичних витрат (рис. 4.4).

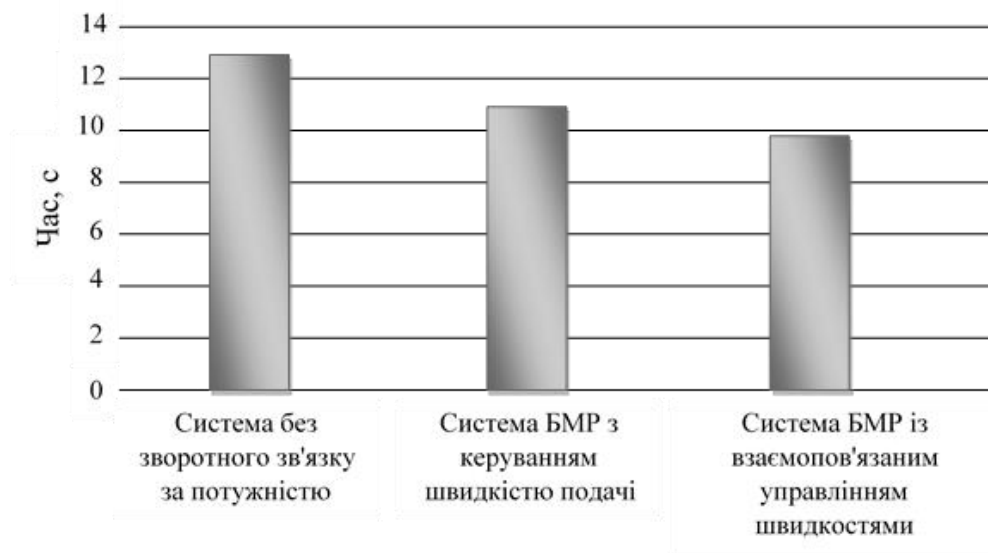


Рис. 4.3. Порівняльна оцінка тривалості обробки при застосуванні розглянутих варіантів систем

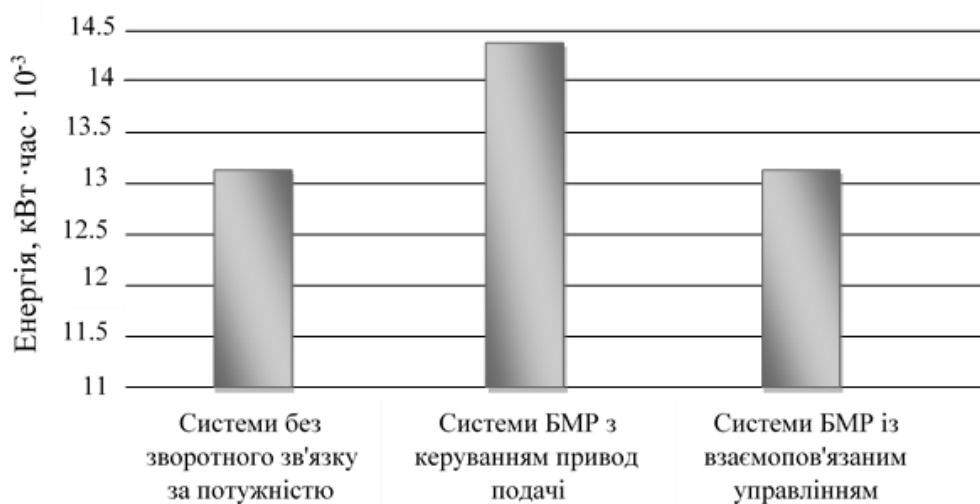


Рис. 4.4. Порівняльна оцінка витрат енергії при застосуванні розглянутих варіантів систем

Аналіз графіків, отриманих у результаті моделювання, демонструє, що при застосуванні системи стабілізації потужності фрезерування з керуванням лише електроприводом подачі відносно скорочення тривалості обробки порівняно з

режимом обробки при постійних швидкостях робочих рухів складає 11,3%. Водночас розрахунки показали, що при цьому споживана енергія зростає на 8,9%.

Використання системи стабілізації потужності з узгодженим керуванням швидкістю електроприводів подачі та головного руху, при якому підтримується задане значення подачі, дозволяє досягти аналогічного рівня енергоспоживання, як у випадку обробки з постійними швидкостями, водночас забезпечуючи скорочення тривалості обробки на 19%.

Аналогічні результати були отримані в умовах моделювання обробки заготовок з різних матеріалів та з використанням інших типів фрез, що підтверджує ефективність запропонованого підходу та його універсальність для різних технологічних режимів.

4.2. Дослідження системи оптимізації технологічного процесу силового шліфування

У середовищі Simulink була створена модель системи керування електроприводом вертикальної подачі верстата з круглим столом і вертикальним шпинделем для оптимізації технологічного процесу силового шліфування (рис. 4.5). Модель включає п'ять основних блоків підсистем: формування завдання швидкості подачі, електропривід подачі, прогноз поточного значення періоду стійкості інструменту та розрахунок оптимальної швидкості процесу.

Блок завдання швидкості подачі (рис. 4.6) забезпечує формування керуючого сигналу для електроприводу подачі. До складу цієї підсистеми входить сигнал завдання швидкості U_z («constant 1»), який подається на вхід ключового елемента «Switch1» до досягнення заданого значення часу холостого ходу t_x . Після досягнення цього часу здійснюється перемикання ключового елемента на сигнал «constant 2», що відповідає робочій швидкості.

На вхід ключового елемента «Switch2» подається сигнал з виходу «Switch1». Перемикання на сигнал з блоку розрахунку оптимальної швидкості подачі відбувається при досягненні заданого значення глибини обробки ΔL .

Таким чином, реалізована модель забезпечує послідовне формування керуючих сигналів залежно від етапу технологічного процесу, що дозволяє ефективно управляти електроприводом подачі та забезпечувати оптимальні режими шліфування.

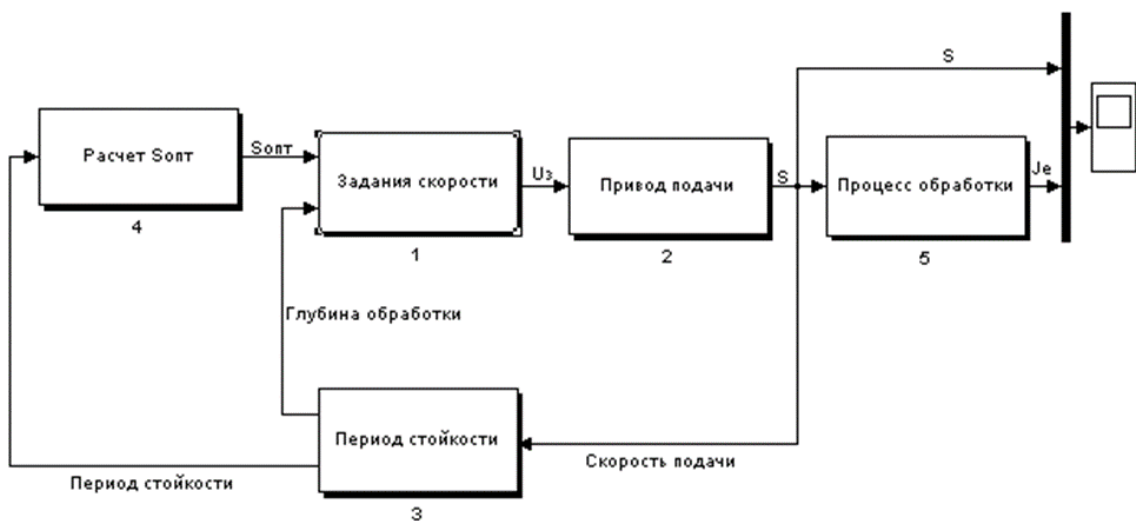


Рис. 4.5. Модель системи управління рухом подачі для оптимізації процесу силового шліфування

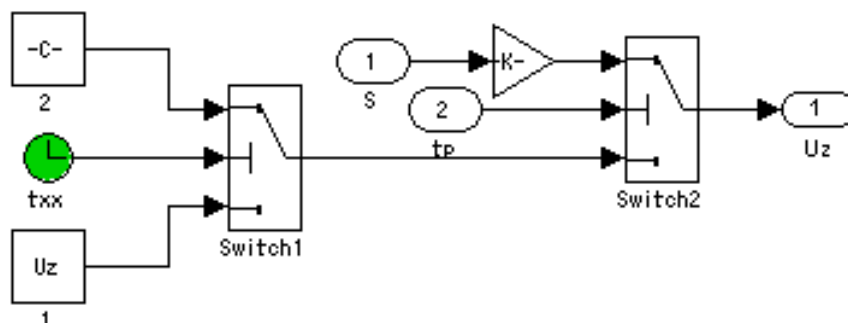


Рис. 4.6. Блок формування сигналу завдання електроприводу подачі

перемикання ключового елемента при досягненні глибиною обробки встановленого значення.

Робота блоку SF діаграм полягає у визначенні періоду стійкості інструменту відповідно до отриманої інформації від датчика контролю контакту шліфувального кола. У стані IN_ дається експериментальне значення періоду стійкості інструменту $T = 100$ хв, під час, коли шліфувальна бабка переміщається до поверхні деталі, умова ($mod > 0$) виконано, система переходить до стану A_ початку роботи на даному кроці знімається припуску ΔL і розраховується прогнозоване значення періоду стійкості. У стані Q_ розраховується кількість шарів, що знімаються, в стані B_ запам'ятовується значення періоду стійкості і задається на виході SF-діаграми, також розраховується глибина обробки шляхом множення кількості шарів на товщину шару припуску ΔL , яке дорівнює 0.05мм.

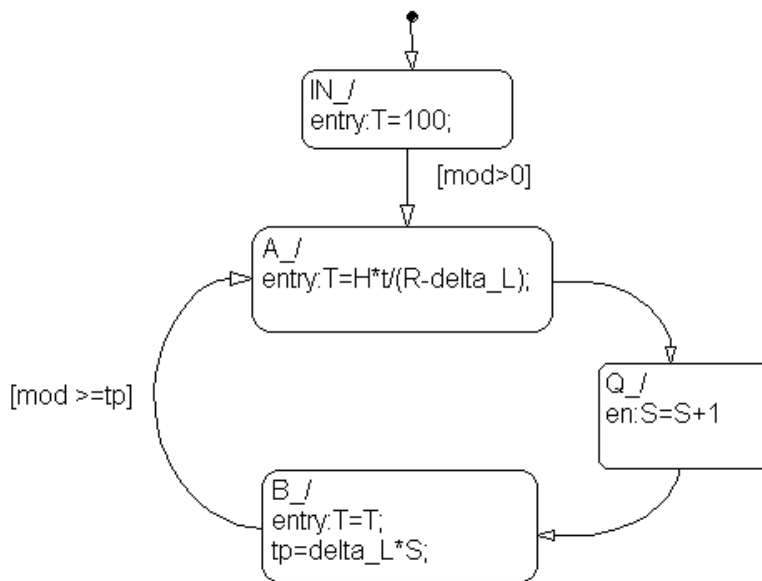


Рис. 4.9. SF-діаграма для прогнозу поточного значення періоду стійкості інструменту

Переходи стану B_ до стану A_ пов'язані з виконанням умови зняття поточного шару і формування сигналу контролю контакту шліфувального кола з пристроєм правки ($mod \geq tp$). Ця процедура виконується доти, доки не знімається потрібна глибина m , яка складена з використанням блоків if і if action subsystem

(рис. 4.8). Ці блоки забезпечують перехід до виконання команди стоп, якщо знімається потрібна глибина.

За результатами, які обчислені в блоці SF діаграми, складаються послідовні розрахунки залежності $C_t(T)$, $y(T)$, $u(y)$, $K_n(u)$ у блоці 4 "Розрахунок S_{opt} " (рис. 4.10) для визначення оптимальної швидкості подачі.

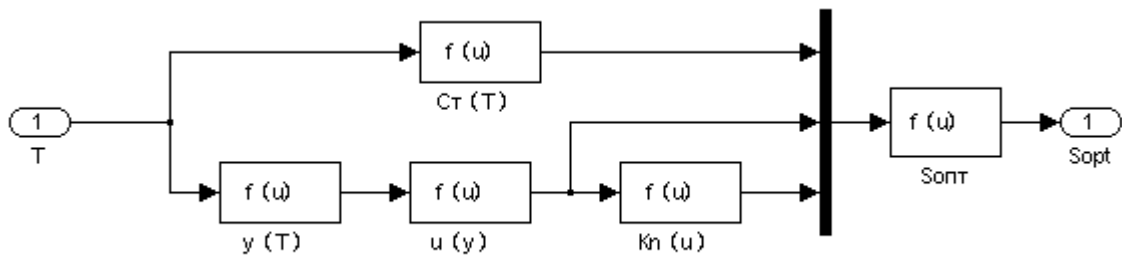


Рис. 4.10. Блок розрахунку оптимальної швидкості подачі

Склад блоку моделі «Процес обробки» наведено на рис. 4.11. На вхід цього блоку подається сигнал швидкості подачі, сформований моделлю електроприводу. Миттєві оцінки періоду стійкості шліфувального кола обчислюються в блоці 3. Обчислення потужності обробки здійснюється у блоці-функції «Потужність обробки» відповідно до наведеної формули:

$$P_z = C_p (\pi D n)^z B^u \left(\frac{S}{n} \right)^q, \quad (4.1)$$

Константа (блок Constant 1) на вході зазначених блоків визначає постійне значення частоти обертання стола верстата.

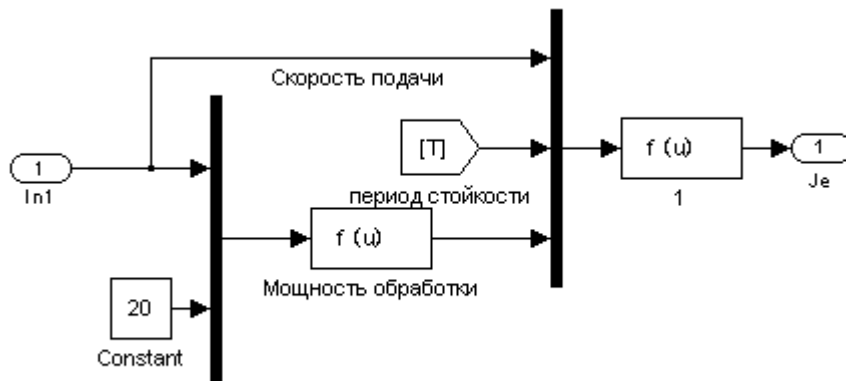


Рис. 4.11. Модель технологічного процесу силового шліфування

За допомогою отриманої моделі процесу обробки здійснюється визначення екстремального значення показника енергетичної ефективності процесу J_e . Результати моделювання роботи системи оптимізації процесу силового шліфування представлені графічно у вигляді залежностей швидкості подачі S та енергетичного критерію J_e від часу t (рис. 4.12).

На початковому етапі процесу, протягом перших 2,5 секунд, шліфувальне коло підводиться до заготівлі зі швидкістю подачі $S=2,5$ мм/хв. Після цього встановлюється початкове значення робочої швидкості подачі $S=0,4$ мм/хв, і розпочинається обробка з цією швидкістю, що забезпечує проведення першої контрольної дії.

Після зняття першого шару металу та визначення миттєвої оцінки стійкості інструменту виконується обчислення швидкості подачі, яка відповідає екстремуму функції $J_e(S)$. Отриманий сигнал завдання подається на вхід електроприводу, що відбувається у момент часу $t=13$ с.

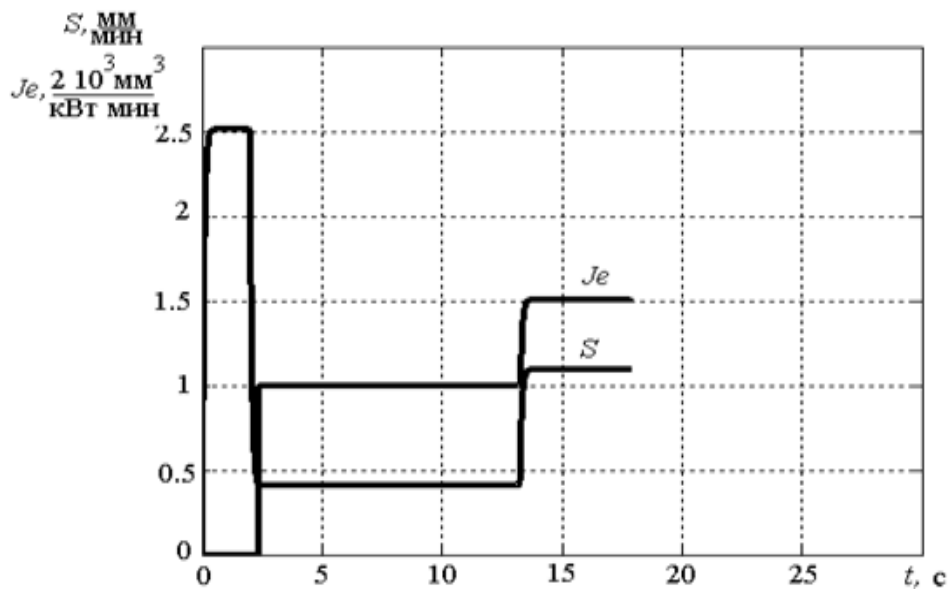


Рис. 4.12. Динамічні характеристики системи оптимізації силового шліфування

Аналіз роботи системи за запропонованим алгоритмом підтверджує його ефективність та переваги порівняно з кроковими пошуковими алгоритмами. Зіставлення графіків функціонування системи показує, що при використанні крокового методу пошуку значення оптимальної швидкості подачі визначається протягом 21 секунди. Натомість запропонований алгоритм забезпечує підтримку оптимальної швидкості подачі під час обробки без необхідності здійснення пробних впливів для виявлення екстремуму. Такий підхід дозволяє значно скоротити час пошуку оптимального значення показника ефективності та визначити його практично відразу після обробки першого шару металу.

ВИСНОВКИ

Внаслідок виконаних у роботі досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Проведено аналіз систем керування робочими рухами верстатів для підвищення ефективності процесів металообробки, на підставі якого визначено наявні недоліки цих систем та сформульовано мету та завдання магістерської роботи.
2. На основі методів теорії нечітких множин розроблений нечіткий регулятор для системи стабілізації потужності різання при фрезеруванні, що дозволяє стабілізувати силові параметри на заданому рівні. Розроблено програму нечіткого управління систем ТПМО мовою FLC.
3. Проведено аналіз режиму роботи системи управління технологічним процесом фрезерування. Результати аналізу показали, що застосування системи із взаємопов'язаним управлінням швидкістю електроприводів подачі та головного руху зі стабілізацією подачі процесу обробки відбувається з такими ж витратами енергії, але з більш високою продуктивністю, ніж при обробці постійних швидкостей робочих рухів. У цьому відношенні скорочення тривалості обробки становить 19%.
4. Встановлено, що передатна функція процесу фрезерування як динамічної ланки автоматизованої системи управління відповідає аперіодичному ланці другого порядку з однаковими постійними часу. На основі проведеного дослідження встановлено вплив на значення постійного часу глибини різання, частоти обертання інструменту та швидкості подачі. Отримано математичне вираз опису залежності постійної часу від параметрів процесу обробки.

5. Проаналізовано роботу безпошукової системи оптимізації технологічного процесу силового шліфування за енергетичним критерієм. Аналіз показав, що при роботі системи за запропонованим алгоритмом, відносне скорочення тривалості пошуку оптимальної величини подачі порівняно з кроковою системою для знаходження першого значення екстремуму становить 38%, подальша робота системи забезпечується з оптимальною швидкістю подачі протягом усього часу обробки без пробних впливів для знаходження екстремуму.

ЛІТЕРАТУРА

1. Водічев В.А. Керування швидкістю подачі верстата при багатокритеріальній оптимізації процесу силового шліфування // Електромашинобуд. та електрообладн. – 2013. – Вип. 61. – С. 3-10.
2. Закутний А.С. Методика синтезу нейромережевої системи стабілізації потужності різання// Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. збірник. – К.: Техніка. – 2001. – Вип. 56. – С. 10–15.
3. Копчак Л.С., Мусіхіна Н.П., Тверд М. Мікропроцесорна система керування верстатним електроприводом змінного струму з регулюванням технологічного параметра // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірка наукових праць. Тематичний збірник наукових праць „Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2022, №12, Т.1. – С. 228–229.
4. Попович М.Г., Печеник М.В., Ковальчук О.В., Кіселичник О.І. Екстремальні енергозберігаючі електромеханічні системи з асинхронним електроприводом // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2021. – С. 314–318.
5. Романець Р.А., Хмелев А.Г., Коцюбинський В.С., Закутний А.С. Стабілізація потужності різання у системах з обмеженим прискоренням // Електромашинобудування та електроустаткування: Міжвід. наук.-техн. збірник. – Одеса: ОДПУ. – 2016. – Вип. 48. – С. 27–30.
6. Смирнов В.С., Липковський К.А., Устенко Л.В. Побудова інваріантних перетворювальних систем з використанням теорії нечітких множин// Вісник національного технічного університету України «КПІ» інститут електродинаміки НАН України. - Київ: "КПІ".– 2021. – С. 432-434.

7. Управління процесом шліфування/А.В. Якимів, О.М. Перваков, В.І. Свірцов, В.П. Ларшин. - К.: Техніка, 2013. – 184 с.

8. Фаззі-управління складними електромеханічними системами із моделлю, що задає Чермалих В.М., Чермалих А.В., Данилін А.В. // Вісник національного технічного університету України "КПІ". - Київ: "КПІ".– С. 418-420.

9. Христофоров А.М., Шапарєв Н.К. Цифровий датчик активної потужності асинхронного електродвигуна // Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 39. – Київ: «Техніка».– 2015. – С.57-59

10. Чермалих В.М., Чермалих А.В., Данилін А.В. Адаптивний фазі-регулятор для керування складними електромеханічними системами із змінними параметрами // Вісник національного технічного університету України «КПІ». - Київ: "КПІ".– С. 268-270.

11. Шапарєв Н.К. Розрахунок автоматизованих електроприводів систем управління металообробкою: Навч. посібник. - 2-ге вид., перероб. та дод. - К.: Либідь, 2012. – 272 с.

12. Шапарєв Н.К. Дослідження динаміки автоматизованої системи електроприводу фрезерного верстата // Електромашинобудування та електроустаткування: Респ. міжвід. наук.-техн. збірка. - К.: Техніка. - 2016. - Вип. 40 – С. 44-50.

ДОДАТКИ