Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(назва освітнього ступеня)

на тему: «Розроблення та дослідження адаптивної системи контролю процесу фрезерування»

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи КАм-61
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)

Гаврилюк Д.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Моліцький В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Капаціла Ю.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Козбур В.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Чихіра І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2020

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20___ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Гаврилюку Дмитру Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення та дослідження адаптивної системи контролю процесу фрезерування»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «30» вересня 2020 року № 4/7-705

2. Термін подання студентом завершеної роботи 21 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи Типові схеми різання при фрезеруванні. Типові алгоритми керування процесом фрезерування. Характеристики обладнання та устаткування. Типові схеми вимірювання. Характеристики матеріалу.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Аналітична частина. Технологічна частина. Конструкторська частина. Науково-дослідна частина. Спеціальна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Адаптивний пропорційно-інтегрально-диференціальний цикл керування – 1 аркуш формату А1. Профіль різання – 1 аркуш формату А1. Адаптивний цикл керування розміщенням числа пар полюсів – 1 аркуш формату А1. Блок керування відстежування та налаштування для відомої установки – 1 аркуш формату А1. Блок відстежування та налаштування адаптивного керування – 1 аркуш формату А1. Моделювання процесу різання при фрезеруванні – 1 аркуш формату А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент		
Безпека в надзвичайних	Клепчик В.М., старший викладач		
ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 30 вересня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	10.10.2020	
2	Науково-дослідна частина	20.10.2020	
3	Технологічна частина	10.11.2020	
4	Конструкторська частина	15.11.2020	
5	Спеціальна частина	20.11.2020	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	25.11.2020	
7	Графічна частина	15.12.2020	
8	Захист кваліфікаційної роботи	21.12.2020	

Студент _____ Гаврилюк Д.В..
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Капаціла Ю.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20___ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Моліцькому Василю Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення та дослідження адаптивної системи контролю процесу фрезерування»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «30» вересня 2020 року № 4/7-705

2. Термін подання студентом завершеної роботи 21 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи Базові схеми різання при фрезеруванні. Типові алгоритми керування процесом фрезерування. Характеристики обладнання та устаткування. Типові схеми вимірювання. Характеристики матеріалу.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Аналітична частина. Технологічна частина. Конструкторська частина. Науково-дослідна частина. Спеціальна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Загальний вигляд експериментальної установки – 1 аркуш формату А1. Схема керування сервоприводами – 1 аркуш формату А1. Загальна схема визначення максимального навантаження – 1 аркуш формату А1. Блок-схема контролера приводу подачі – 1 аркуш формату А1. Результати моделювання та експерименту – 2 аркуші формату А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент		
Безпека в надзвичайних	Клепчик В.М., старший викладач		
ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 30 вересня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	10.10.2020	
2	Науково-дослідна частина	20.10.2020	
3	Технологічна частина	10.11.2020	
4	Конструкторська частина	15.11.2020	
5	Спеціальна частина	20.11.2020	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	25.11.2020	
7	Графічна частина	15.12.2020	
8	Захист кваліфікаційної роботи	21.12.2020	

Студент _____ Моліцький В.В..
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Капаціла Ю.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи на тему:

«Розроблення та дослідження адаптивної системи контролю процесу фрезерування»

студентів групи КАм-61 Гаврилюк Д.В, Моліцького В.В.

Розрахунково-пояснювальна записка: 120 арк. формату А4, 39 рисунків, 178 формул; 31 літературне джерело

графічна частина – 12 аркушів формату А1

Мета роботи: дослідження та розроблення адаптивної системи контролю процесу фрезерування.

Для досягнення поставленої мети виконано завдання:

- розглянуто різні методи з теорії адаптивного керування;
- проаналізовано сили різання при фрезеруванні;
- розроблено модель, яка пов’язує швидкість подачі з результуючою силою різання;
- розроблено модель процесу різання, яка разом із моделлю сервоприводу використовується для проектування контролерів;
- розроблено та змодельовано алгоритми керування.

Ключові слова: ТЕХНОЛОГІЯ, ФРЕЗЕРУВАННЯ, РЕЖИМИ РІЗАННЯ, ВЕРСТАТ, КОНТРОЛЕР, СЕРВОПРИВІД, АЛГОРИТМ, ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА 11
1.1 Верстати з числовим програмним керуванням та багатоцільові верстати з пристроями числового програмного керування 11
1.2 Адаптивний контроль 12
1.2.1 Зміна коефіцієнту підсилення 13
1.2.2 Адаптивне керування за еталонною моделлю 14
1.2.3 Саморегулювальне керування 15
1.4. Адаптивне керування процесом різання 16
1.5 Висновки та постановка задачі на кваліфікаційну роботу 23
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА 24
2.1 Процес фрезерування 24
2.2 Моделювання сил різання при фрезеруванні 25
2.3 Моделювання процесу фрезерування 28
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА 34
3.1 Опис експериментальної установки 34
3.2 Експериментальне підтвердження моделювання процесу фрезерування 38
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА 46
4.1 Розроблення та застосування елементів системи керування 46
4.2 Моделювання контролера приводу подачі 47
4.3 Метод ідентифікації параметрів 51
4.4 Адаптивна пропорційно-інтегрально-диференціальна схема керування 54
4.4.2 Адаптивна пропорційно-інтегрально-диференціальна схема для керування процесом фрезерування 55
4.4.3 Результати моделювання та експерименту 62
4.5 Схема адаптивного керування розміщенням числа пар полюсів 68
4.5.1 Загальні положення 68
4.5.2 Аналіз моделі 71

4.5.3 Теорія розміщення числа пар полюсів для керування процесом обробки..... 74
4.5.4 Застосування схеми розміщення числа пар полюсів для керування процесом фрезерування..... 78
4.5.5 Результати моделювання та експерименту..... 81
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА..... 86
5.1 Схема адаптивного керування за еталонною моделлю..... 86
5.2 Теорія адаптивного керування за еталонною моделлю для керування процесом обробки..... 87
5.2 Розробка адаптивного керування за еталонною моделлю..... 92
5.3 Застосування схеми адаптивного керування за еталонною моделлю для керування процесом фрезерування..... 96
5.4 Результати моделювання та експерименту..... 98
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..... 104
6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ..... 104
6.1.1 Розрахунок повітряного обміну в приміщенні..... 104
6.1.2 Розрахунок штучного освітлення люмінесцентними лампами..... 107
6.1.3 Планування робіт з охорони праці..... 110
6.1.4 Контроль за станом охорони праці..... 111
6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ..... 114
6.2.1 Поняття та види надзвичайних ситуацій. Правові основи забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях..... 114
6.2.2 Оцінка інженерної і пожежної обстановки у надзвичайних ситуаціях..... 116
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЩОДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ..... 119
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... 121

ВСТУП

Потреба у механічному обробленні деталей складної геометрії з високою точністю призвела до розроблення верстатів з числовим програмним керуванням та багатоцільових верстатів. Це обладнання зробило можливим виконання складних, а часом і неможливих для оператора, завдань з обробки деталей. Проте проблема вибору параметрів різання, таких як подача та швидкість різання, залишилась. Наприклад, при обробці заготовки з великою кількістю отворів та пазів та змінною осьовою глибиною та радіальною шириною різання, величина сили різання змінюється в процесі механічного оброблення, і якщо граничне зусилля перевищує певну межу, то існує велика імовірність пошкодження заготовки, поломки інструменту і навіть верстату. Щоб уникнути цього, зазвичай застосовують консервативний підхід і вибирають параметри різання відповідно до найгіршого можливого сценарію. Як наслідок, процес хоч може відбуватися в оптимальних умовах для цієї ділянки, параметри будуть незадовільними для інших поверхонь, що призведе до зниження продуктивності.

Одним із способів подолання цієї проблеми є розробка системи керування режимами обробки. Існує три підходи до розроблення таких систем: відкритий цикл адаптивного керування, замкнутий цикл з фіксованим коефіцієнтом підсилення та замкнутий цикл адаптивного керування. У відкритому циклі адаптивного керування умови роботи оптимізовані з метою максимізації показника продуктивності. Цей тип називається адаптивним керуванням з оптимізацією і для нього є характерними кілька недоліків, а саме складність у встановленні відповідного індексу продуктивності, складність конструкції і потреба в високих обчислювальних потужностях. Системи керування з фіксованим коефіцієнтом підсилення і зворотнім зв’язком дуже поширені і характеризуються компенсацією коефіцієнта, а величина зворотного зв’язку використовується для регулювання робочих параметрів, для підтримання сили різання на постійному рівні. Цей тип систем керування, які добре працюють в певних умовах, стає нестабільним при значній глибині різання, нетипових властивостях матеріалу або зміні стану інструменту. У адаптивних системах

замкнутого циклу передбачається, що параметри процесу невідомі і змінюються в часі. Як правило, в таких системах є два цикли керування. Перший – це цикл зворотного зв’язку зусилля різання, інший – призначений для регулювання параметрів системи шляхом отримання інформації з вводу та виводу на обладнання таким чином, що сила різання залишається постійною. Робота останніх двох систем керування базується на накладанні обмежень на процес, наприклад, на постійну потужність або силу. Такі системи мають назву адаптивного керування з обмеженнями.

У зв’язку з цим певний інтерес становить розробка адаптивних систем керування із замкнутим циклом, які здатні регулювати швидкість подачі так, щоб підтримувати зусилля різання на бажаному рівні. Це дозволить підвищити продуктивність, стійкість інструменту і якість поверхні, що обробляється.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Верстати з числовим програмним керуванням та багатоцільові верстати з пристроями числового програмного керування

Розроблення верстатів з числовим програмним керуванням та багатоцільових верстатів з пристроями числового програмного керування було розпочате після Другої світової війни. Потреба у високоточних деталях у ВПС США сприяла дослідженню розробки установок із числовим програмним керуванням. Було очевидно, що звичайні верстати не можуть задовольнити вимоги щодо точності та складності деталей. Першу спробу зробив Джон Парсонс з компанії Parsons Company в Мічигані, який представив методи створення точних плавних кривих. Наприкінці 1940-х ВПС США звернулися до Лабораторії сервомеханізмів Массачусетського технологічного інституту з проханням розробити верстати з числовим програмним керуванням, і врешті-решт до 1952 р. був побудований перший фрезерний верстат з числовим програмним керуванням з трьома керованими вісями [1]. На той час, розвиток числового програмного керування, що базувалось на принципах цифрової електроніки, був революцією у верстатобудівній галузі. Системи з пристроєм числового програмного керування, які замінили виділену провідну логіку керування комп’ютером, були введені на початку сімдесятих. Тенденція від числового програмного керування до багатоцільових систем з пристроєм числового програмного керування означає перехід від обладнання, що базується на апаратному керуванні до такого, що має за основу програмне керування. Залучення комп’ютера у системі надає гнучкості у втіленні складніших алгоритмів керування.

1.2 Адаптивний контроль

У цьому розділі коротко обговорюються розвиток теорії адаптивного керування та розглядаються їхні різні схеми. Ідея адаптивного керування виникла в 1950-х роках. Загальним визначенням для адаптивного керування є: «Адаптивні системи керування - це ті, які автоматично регулюють налаштування контролера з урахуванням змін у процесі, що контролюється, або в його середовищі» [6]. Як описує Астром [5], на початкових етапах адаптивне керування розвивалось з «великим ентузіазмом, поганим обладнанням та теорією, що ще не існувала» і не досягнув значного прогресу. Прогрес у цій галузі зупинився майже на десятиліття, проте за цей час було зроблено значний внесок у вдосконалення теорії керування, а саме розвиток теорії стану простору та стабільності, і подальше вдосконалення теорії стохастичного керування та ідентифікації системи. З іншого боку, нещодавня революція в електронній галузі дозволила впровадити адаптивне керування простим і недорогим способом.

Загалом існує три різні схеми адаптивного керування: зміна коефіцієнту підсилення, адаптивне керування по еталонній моделі та саморегулювання. Всі схеми складаються з циклу керування з регульованим контролером параметрів, процесу та звичайного циклу зворотного зв’язку. Основним завданням є зміна параметрів контролера за наявності порушень та / або зміна динаміки процесу для досягнення специфікацій керування. Відмінний огляд адаптивного керування наведено у посиланні [7].

1.2.1 Зміна коефіцієнту підсилення

Зміна коефіцієнту підсилення використовується, коли можна знайти допоміжну змінну, яка добре корелюється зі змінами в динаміці процесу (рис. 1.1). Тоді параметри контролера можуть бути змінені як функція допоміжної змінної для врахування змін у процесі підсилення.

Оскільки ця схема вперше була використана для встановлення змін коефіцієнта підсилення процесу, вона і називається зміною коефіцієнта підсилення. Для застосування схеми зміни коефіцієнта підсилення необхідні глибокі знання фізики даної системи, щоб знайти допоміжну змінну. Іншим недоліком зміни коефіцієнта підсилення є те, що адаптивна частина керування має відкритий цикл, тому система нагадує систему зворотного зв'язку, де параметри контролера встановлюються за допомогою компенсації подачі вперед.

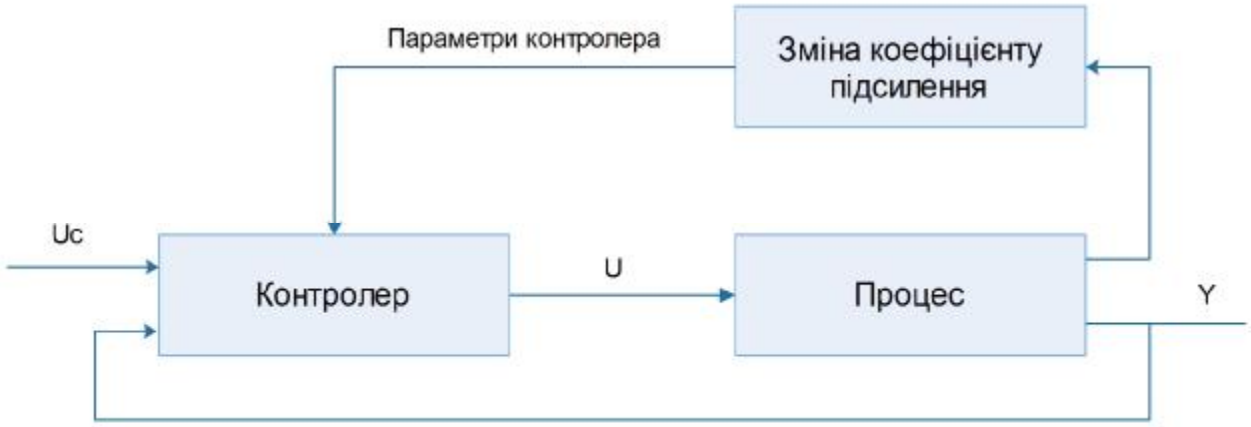


Рисунок 1.1 – Блок-схема методу зміни коефіцієнту підсилення

1.2.2 Адаптивне керування за еталонною моделлю

Адаптивне керування за еталонною моделлю було розроблене Уітакером, Ярмоном та Кезером у 1958 р. [8]. Ідея полягає в пошуку таких ввідних даних керування, щоб результат невідомої установки асимптотично наближався до результату даної еталонної моделі (рис. 1.2).

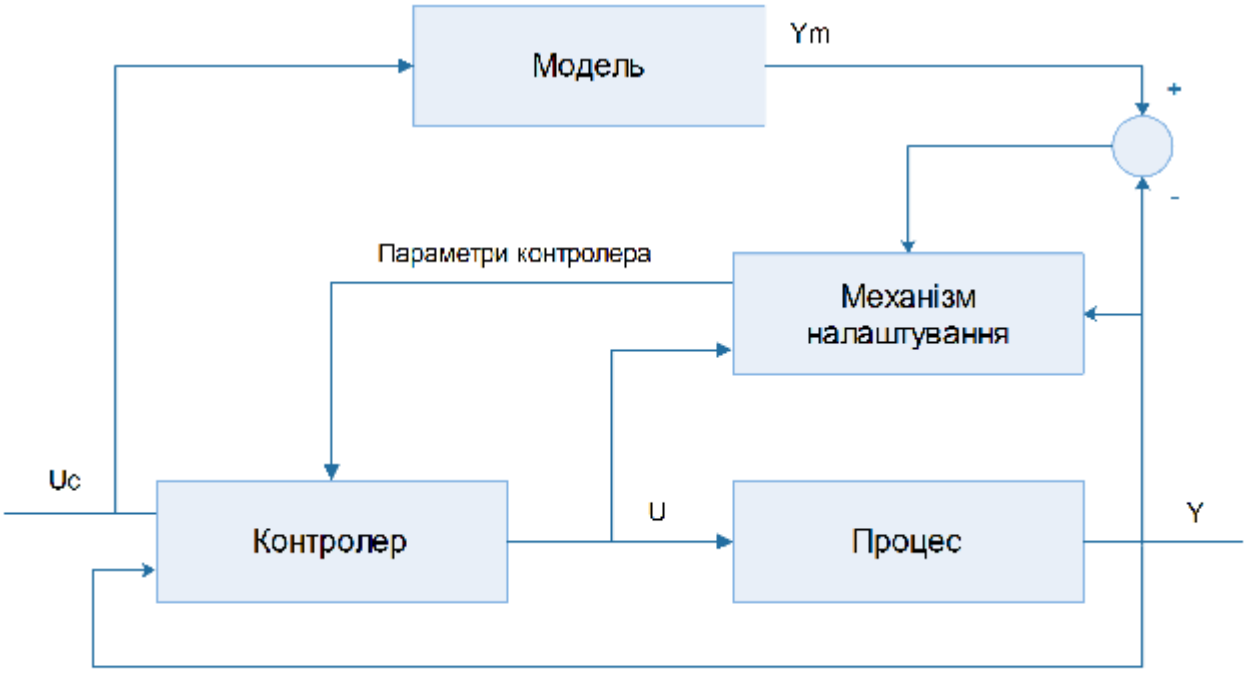


Рисунок 1.2 – Блок-схема методу адаптивного керування за еталонною моделлю

Різниця між результатом процесу та результатом моделі полягає у сигналі про помилку. Цей сигнал про помилку разом із ввідними даними та результатами установок використовується механізмом регулювання для зміни параметрів контролера і зменшення сигналу про помилку до нуля. У адаптивного керування по еталонній моделі існує два підходи: прямий та непрямий. У прямому методі параметри контролера обчислюються безпосередньо з механізму регулювання. У непрямому методі спочатку оцінюються значення параметрів процесу, а потім параметри контролера обчислюються на основі цих значень. Другий підхід має перевагу у доступності параметрів процесу.

1.2.3 Саморегулювальне керування

Принципова схема саморегулювального керування зображена рисунку 1.3.

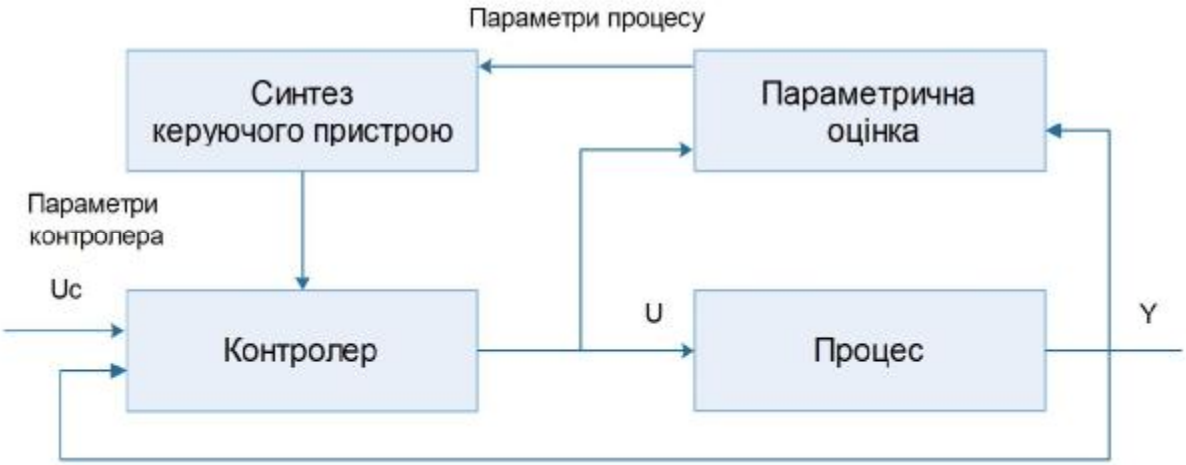


Рисунок 1.3 – Блок-схема методу саморегульованого керування

Система складається з двох циклів: внутрішній цикл – це простий цикл зворотного зв'язку, а зовнішній цикл використовується для оновлення контролера під час кожного зчитування показників. Тут завдання полягає в рекурсивній оцінці параметрів процесу з передбачуваною динамічною моделлю на основі вхідних та вихідних даних. Тоді розрахункові параметри та модель процесу вважаються точно правильними.

Це називається «принципом стохастичної еквівалентності», і параметри контролера змінюються алгоритмом керування. Контроль саморегульованого керування був запропонований Калманом у 1958 р. [9], і завдяки використанню різних оцінювачів та алгоритмів керування можна зустріти варіації цієї схеми в літературі.

1.4. Адаптивне керування процесом різання

Застосування адаптивних схем керування в промислових процесах є відносно сучасною практикою. Перед оглядом літератури необхідно з’ясувати значення адаптивного керування з двох різних точок зору. Раніше виробнича література розглядала просте керування зворотним зв’язком як адаптивну схему. Зрозуміло, що такий підхід повністю відрізнявся від того, що був викладений у попередньому розділі. Контролери зворотного зв’язку – це прості підсилення, і вони стануть нестабільними у відповідь на зміни в динаміці процесів. У цій дипломній роботі проаналізовано адаптивне керування з точки зору інженерного керування. Адаптивні системи керування верстатами також можна класифікувати у три категорії: геометричне адаптивне керування, адаптивне керування з оптимізацією, та адаптивне керування з обмеженнями.

У геометричному адаптивному керуванні такі параметри обробки, як швидкість подачі або частота обертання шпинделя, змінюються таким чином, що підтримується необхідна геометрія або точність заготовки. У геометричного адаптивного керування є дві загальні категорії. У першій є контролери, які змінюють параметри верстату таким чином, що відхилення інструменту залишається на певному рівні. У другій категорії неточності в верстаті, такі як похибки шпинделя або направляючих, вимірюються наперед або в реальному часі, а потім траєкторія інструменту компенсується відповідно до цієї інформації.

Ідея адаптивного керування з оптимізацією полягає у знаходженні показника продуктивності, що зазвичай має форму функції витрат, яка потім оптимізується з урахуванням обмежень обробки. Наприклад, при фрезеруванні сенсори вимірюють такі умови різання, як температура інструменту, подача, крутний момент тощо. Потім ці значення використовуються для розрахунку енергоспоживання, зносу інструменту або швидкості видалення металу. Далі алгоритм продуктивності встановлюється на основі підрахованих значень для пошуку індексу продуктивності. Потім, використовуючи алгоритм оптимізації та обмеження процесу, індекс продуктивності максимізується для отримання таких робочих умов, як швидкість подачі або швидкість шпинделя. Серед обраних

обмежень можуть бути як максимальний крутний момент, подача, температура, максимальна та мінімальна частота обертання шпинделя тощо.

Дослідження в сфері адаптивного керування з оптимізацією були розпочаті Центнером та Іделсоном [10] на початку 1960-х. Вони намагалися змоделювати швидкість зносу інструменту як функцію температури кромки інструменту та швидкості зміни крутного моменту різання. Робота виявила такі проблеми, пов’язані з системами адаптивного керування з оптимізацією.

1. Для розробки точної моделі зносу інструменту потрібно більше знань про процес різання. Ця модель, безумовно, повинна враховувати більше двох змінних які використовували Центнер та Іделсон.

2. Для збору даних потрібні кращі та точніші датчики. Наприклад, у той час вони могли вимірювати температуру в зоні контакту заготовки інструменту, а не на боковій стороні.

3. Алгоритми адаптивного керування з оптимізацією є більш складними, ніж алгоритми адаптивного керування з обмеженнями, тому для їх прорахунку потрібна більша обчислювальна потужність.

Бендіні та Пінотті [11] намагалися застосувати систему адаптивного керування з оптимізацією для периферійного процесу фрезерування. Їх функція витрат базувалася на ширині та глибині різання, швидкості шпинделя, швидкості подачі та зносі інструменту. Серед обмежень, які вони обрали, були момент згинання інструменту, крутний момент шпинделя та потужність різання. Основною складністю їхнього підходу було вимірювання згинального моменту на інструменті.

Через вищезазначені проблеми система адаптивного керування з оптимізацією не отримала широкого визнання у промисловості (за винятком процесу шліфування [14]). Проте дослідницька діяльність у цій галузі продовжується. Нещодавно Корен [12] розробив нову модель зносу інструментів, а Йен та Райт [13] взагалі спробували поєднати підходи адаптивного керування з обмеженнями та адаптивного керування з оптимізацією.

Нещодавно Ватанабе [15] застосував систему адаптивного керування з оптимізацією для моделі кінцевого процесу фрезерування. Він визначив напругу

на зсув та твердість заготовки, кут зсуву та справжню площу контакту на поверхні зносу флангу, а також осьову та радіальну глибину різання. Потім він розрахував швидкість зносу інструменту на основі визначених параметрів. Він дійщов до висновку, що коли параметри процесу змінюються, система адаптивного керування з оптимізацією забезпечує вищу економічну ефективність, ніж система адаптивного керування з обмеженнями.

В цій кваліфікаційній роботі розглядається застосування систем адаптивного контролю з обмеженнями для фрезерування. У системах адаптивного контролю з обмеженнями параметри обробки максимізовані залежно від технологічних та системних обмежень. Наприклад, у цій роботі швидкість подачі змінюється за допомогою алгоритмів керування таким чином, що результуюча сила різання залишається на рівень нижче межі поломки інструменту. Системи адаптивного контролю з обмеженнями мають простіші алгоритми порівняно з системами адаптивного керування з оптимізацією і використовують низьку обчислювальну потужність. З іншого боку, для адаптивного контролю з обмеженнями потрібно менше сенсорів і вони відносно простіші.

Одним недоліком систем адаптивного контролю з обмеженнями є те, що кількість використовуваних обмежень лімітована, а інші обмеження обробляються опосередковано. Наприклад, у цій роботі обмеженням є сила різання для запобігання поломки хвостовика. Але інші важливі аспекти, такі як поломка інструменту, знос інструменту, механічна обробка поверхні тощо, тут не розглядаються. Це важливі питання, які можна було б вивчити при продовженні цієї роботи.

Ідея використання систем адаптивного контролю з обмеженнями з різними підходами до керування при різанні металів була розглянута кількома дослідниками. Бідл і Боллінгер [16] використали систему адаптивного контролю з обмеженнями для торцевого фрезерного верстата. Вони розглянули всю систему як підсилення з однією затримкою часу дискретизації. Потім вони спроектували контролер із замкнутою реакцією замкнутого циклу. Нарешті, щоб знайти коефіцієнт підсилення системи, вони наклали обмеження на максимальне енергоспоживання машини і маніпулювали як швидкістю шпинделя, так і

швидкістю подачі, щоб утримати систему з критичним затуханням на межі стабільності.

Стут та Гоец [17] застосували систему адаптивного керування з обмеженнями для токарно-фрезерного процесу. Вони використали пропорційно-інтегральний контролер із замкнутим циклом, де контрольний ввід надсилався на процес, а модель була паралельна процесу.

Наприклад, при токарній обробці вони використовували модель четвертого порядку, що включала сервопривід першого порядку, процес різання другого порядку та головний привід першого порядку. Швидкі зміни коефіцієнту підсилення процесу через зміну осьової глибини різання викликали їхнє занепокоєння, то вони порівняли вихідні дані моделі та процесу і простим поділом знайшли коефіцієнт підсилення контролера. Така ж техніка була застосована для фрезерування, але з включенням згладжувального фільтру для хвилеподібних властивостей, що притаманні процесу фрезерування.

В іншому підході Тлусти та Елбеставі [18] застосовували адаптивний контроль з обмеженнями для кінцевого процесу фрезерування. Вони розробили передавальну функцію сервоприводу як систему третього порядку і використали простий коефіцієнт підсилення із затримкою на один зубець як динаміку процесу різання. Вони змоделювали цю систему з постійним коефіцієнтом підсилення, а також пропорційно-інтегральним контролером, таким чином, щоб сила могла підтримуватися постійною, маніпулюючи коефіцієнтом підсилення контролера.

Пізніше Улсой, Корен та Расмуссен [14] підсумували попередню роботу з систем адаптивного контролю з обмеженнями і вперше розрізнили два окремі погляди на керування, які вже були наведені вище. Вони розробили моделі для процесу повороту першого порядку та динаміки сервоциклу другого порядку. Вони використали інтегральний контролер, і за допомогою паралельної моделі маніпулювали коефіцієнтом підсилення контролера, щоб підтримувати фактичний коефіцієнт підсилення системи постійним (таким же, як [17]). Цей простий алгоритм був застосований пізніше Масорі та Кореном [20] на токарному верстаті. Для забезпечення стабільності, вони спочатку повинні були знайти критичний коефіцієнт підсилення системи на межі стабільності. З іншого боку,

вибір нижчого коефіцієнта підсилення для гарантії стабільності теж не є оптимальним, оскільки може призвести до млявої перехідної реакції, яка здатна призвести до пошкодження інструменту.

Розглядаючи стабільність всього процесу, варто зазначити, що до цього часу змінами в динаміці процесу різання (параметрами процесу) або нехтують, вважаючи процес простим підсиленням, або не ідентифікують з інженерної точки зору керування . У виробничому середовищі ідентифікація являє собою ніщо більше ніж прості алгебраїчні обрахунки, що базуються на емпіричних формулах. Але ідентифікація процесу динаміки системи, що визначена дискретною змішаною моделлю авторегресії і ковзної середньої, полягає у знаходженні всіх параметрів моделі в кожен час вибірки, коли динаміка процесу змінюється. Визначивши параметри процесу, теорію керування можна було б використовувати для забезпечення загальної стабільності системи правильним чином.

Томізука та ін., [19] були першими хто використав комплексний підхід до застосування адаптивної теорії керування на верстатах. Вони розробили дискретну модель процесу фрезерування першого порядку, і оскільки їх привід машини був ступінчастим двигуном, вони вважали це підсиленням. Вони застосували адаптивне керування по еталонній моделі, що базувалось на основі схеми Ландау та Лозано [21]. У моделі процесу різання було два невідомі параметри. Перший - це підсилення процесу, а другий - пов’язаний з постійною часу. Вони помітили, що другий параметр майже постійний. Тому вони зафіксували цей параметр і спробували алгоритм адаптації одного параметра. Це засвідчило наскільки важливою є хороша оцінка підсилення системи і підтвердило роботу попередніх досліджень. Одним недоліком їхньої роботи є те, що їх еталонна сила становила близько 50 Н, що нижче сили тертя під час багатьох операцій різання.

Пізніше Данешманд і Пак [22] застосували схему адаптивного керування по еталонній моделі [21] на токарному верстаті. Вони поєднали динаміку першого порядку для процесу різання та сервоприводу. Вони також використали неадаптивний цикл зворотного зв’язку з пропорційно-інтегральним контролером

навколо системи, тобто замість еталонної сили на модель надійшов сигнал від пропорційно-інтегрального контролера. Вони виявили оптимальний робочий стан шляхом серії випробувань через зміну параметрів динаміки регулювання та елементів матриці коваріації. Їхній найкращий результат був також при адаптації одного параметра. Вони відфільтрували силовий сигнал за допомогою фільтра низьких частот 5 Гц , але не використовували його динаміку в циклі керування.

Ладербо і Улсой втілили адаптивне керування за еталонною моделлю на фрезерному верстаті.

Їх схема базувалася на ідентифікації параметрів моделі та застосуванні контролера, що слідує за моделлю. Базуючись на експериментах, вони розробили нелінійне диференціальне рівняння другого порядку для процесу, і знехтували серводинамікою, так як це зробили Томізука та ін. Вони помітили, що інерція негативно впливає на контролер, а тому пропустили сигнал сили через фільтр низьких частот.

Елбеставі та Сагеріан змоделювали кілька алгоритмів адаптивного керування для процесу фінішного фрезерування. На їхній установці вони розглядали сервопривід як динаміку третього порядку з фіксованими параметрами на основі попередніх досліджень [18]. Вони також використали лінійну (і в одному випадку нелінійну) модель першого порядку для процесу різання. Їхнє моделювання показало, що аперіодичні контролери підвищеного порядку та дискретні пропорційно-інтегральні контролери з попередженням показують високий результат при лінійній моделі сили різання. Для нелінійної моделі вони використовували аперіодичний контролер. Нещодавно Мохамад та ін. [25] використали такий контролер за тих самих умов для фрезерного верстата. Вони показали, що контролер здатний обробляти зміни в динаміці процесу. Вперше вони ввели в свою модель стохастичну частину, щоб врахувати завади перетворювача та навколишнього середовища, а також завади внаслідок інерції різця.

Інший підхід до застосування системи адаптивного керування по еталонній моделі був розроблений Фюсселем та Срінівасаном. Вони розглянули кінцевий процес фрезерування як підсилення так із затримкою на один зубець і

використали метод ідентифікації параметрів, щоб оцінити єдиний параметр у процесі. Модель включала сервопривід, що розглядався як динамічна система другого порядку, що був поєднаний з динамікою різання. Вони використали послідовно-паралельний еталонний підхід, заснований на [27] і помітили деякі проблеми, пов'язані з інерцією. Як наслідок, вони використали алгебраїчну схему для ідентифікації інерції в режимі реального часу, а потім відняли виміряну силу від інерційної складової сили. У їхній роботі силовий сигнал фільтрувався за допомогою фільтра низького рівня другого порядку, перш ніж надходити на адаптивний контролер. Вони використали неадаптивний цикл зворотного зв’язку, схожий на Данешманд і Пак [22] щодо циклу адаптивного керування з і без пропорційно-інтегрального контролеру.

Причиною використання пропорційно-інтегрального контролеру була мінімізація сигналу помилки з еталонного та виміряного сигналів. Вони отримали кращі результати з пропорційно-інтегрального контролеру з фіксованими параметрами.

1.5 Висновки та постановка задачі на кваліфікаційну роботу

Як свідчать результати літературного огляду, питання механічного оброблення складних деталей на верстатах з числовим програмним керуванням на даний час відпрацьовані достатньо повно. Про це свідчать, зокрема, масштаби промислового впровадження металорізального обладнання з ЧПК. Проте це не означає, що всі питання ґрунтовно вивчені та досліджені і немає так званих «вузьких» місць. Один з таких аспектів і розглядається в цій кваліфікаційній роботі.

Адаптивне керування із замкнутим циклом використовується для регулювання швидкості подачі, щоб підтримувати максимальну результуючу силу різання на бажаному рівні. Тому на невеликій глибині різання фрезерний стіл рухається швидше і навпаки. Таким чином, швидкість видалення металу та продуктивність можуть бути збільшені порівняно з постійною швидкістю подачі. З іншого боку, підтримуючи силу різання на постійному рівні, імовірність поломки інструменту (хвостовика) може бути зменшена або усунена. Максимальна сила різання є основною причиною поломки хвостовика, але інші фактори, такі як крутний момент на фрезі, вібрація та зношення можуть теж спричинити поломку інструменту. Варто зазначити, що, підтримуючи силу різання на сталому рівні, відхилення інструменту залишатиметься сталим як на малій, так і на великій глибині різання, отже, готова деталь матиме кращу фінішну обробку поверхні.

Для розв’язання цієї задачі необхідно розглянути різні методи з теорії адаптивного керування, розглянути сили різання при фрезеруванні та розробити модель першого порядку, що базується на статичному відхиленні інструменту для процесу фрезерування і яка пов’язує швидкість подачі з результуючою силою різання. Для перевірки отриманої моделі необхідно провести експерименти та проаналізувати їх результати. Також необхідно розробити модель процесу різання, яка разом із моделлю сервоприводу буде використовуватися для проектування контролерів. Потрібно розробити та змоделювати різні алгоритми керування, оцінити результати виконання алгоритмів на фрезерному верстаті.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Процес фрезерування

В цьому розділі розглянуто сили різання, що виникають при фрезеруванні. Виведено передавальну функцію процесу фрезерування, яка використовується для розробки алгоритмів керування в четвертому розділі. Також описана експериментальна установка та представлена експериментальна перевірка моделі.

Фрезерування – це процес різання, при якому заготовка обробляється фрезою з утворенням розривної стружки. Фреза може бути однозубою або багатозубою, де, як правило, різальні кромки рівновіддалені від різця. Різання виконується обертанням фрези за допомогою шпинделя, в той час як заготовка, яка затискається на столі, рухається. Фрезерування – це складний процес через перерви в різанні, що призводить до періодичних змін сили різання.

2.2 Моделювання сил різання при фрезеруванні

Отримана сила різання при фрезеруванні має три складові: тангенціальну, радіальну та осьову. Осьова складова незначна. На рисунку 2.1 показано сили, що діють на заготовку. На інструмент діють ті самі сили, але в зворотному напрямку. Тангенціальна сила пропорційна осьовій глибині різання та товщині стружки.

$$F_t = K_s a\ hF_t\,, \tag{2.1}$$

де K_s – питома сила різання;

a – осьова глибина різання;

h – миттєва товщина стружки.

Радіальна сила пропорційна тангенціальній:

$$F_r = r_1 F_t, \tag{2.2}$$

де r_1 – відношення радіальної до тангенціальної сили.

Тоді результуюча сила:

$$F = \sqrt{(F_t^2 + F_r^2)}. \tag{2.3}$$

Питома сила різання, що залежить від геометрії інструментального матеріалу, є функцією товщини стружки:

$$K_s = \acute{K}_s h^{-c} \quad K_s = \acute{K}_s h^{-c}, \tag{2.4}$$

де $\acute{K}_s$ і c це постійні інструментального матеріалу.

Формула 2.4 ілюструє нелінійну природу різальних сил. Ця нелінійність є істотною на низьких швидкостях через бокові та фронтальні сили на інструменті.

Зміна товщини стружки при фрезеруванні зображена на рисунку 2.1.

Швидкість подачі визначається як лінійний хід одного зуба за один оберт фрези.

$$s_t = \frac{f}{NZ}, \tag{3.5}$$

де f – лінійна швидкість подачі (мм/хв);

N – швидкість обертання валу (об/хв);

Z – кількість заходів.

Варто зазначити, що траєкторія зуба вважається близькою до фактичної тороїдальної траєкторії. Миттєва товщина стружки залежить від швидкості подачі як

$$h(\mathrm{j}) = s_t sin(\mathrm{j}), \tag{3.6}$$

де φ – кут заглиблення.

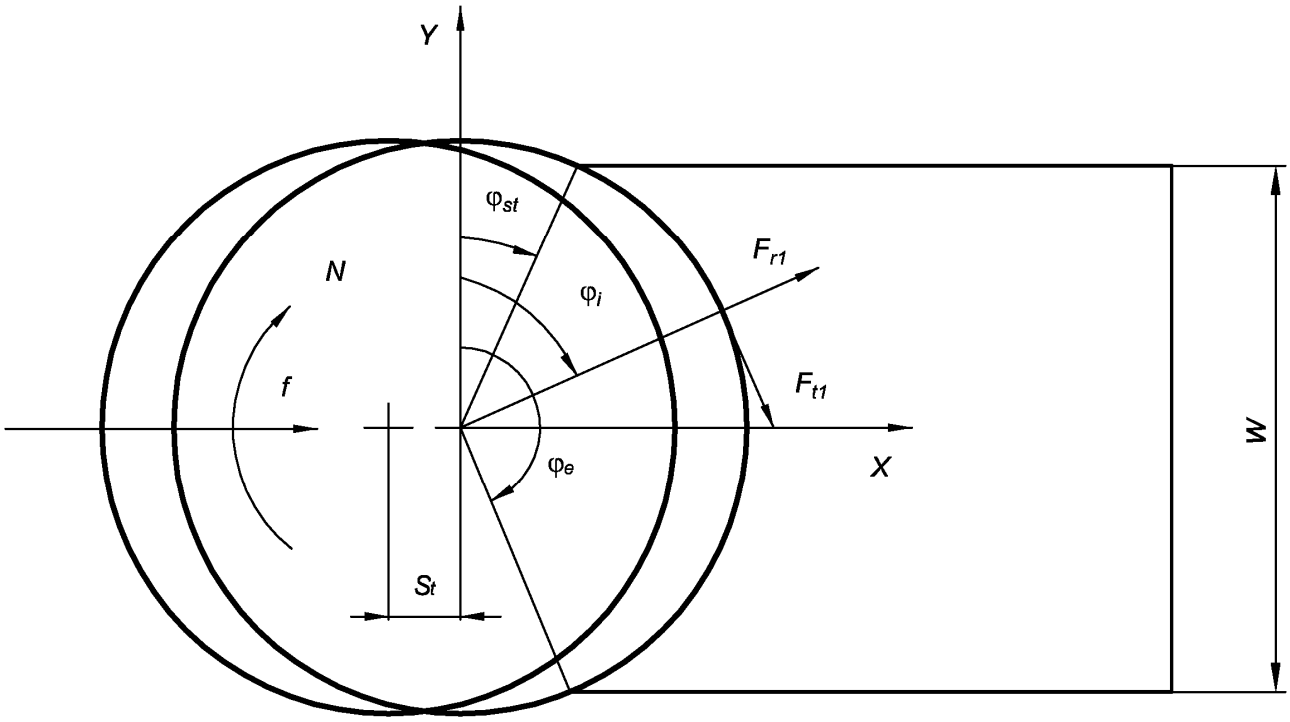


Рисунок 2.1 – Зміна товщини стружки при фрезеруванні

Підставивши рівняння 2.6 в 2.1 і 2.2 отримуємо

$$F_t = K_s a s_t sin(\mathrm{j}\ ). \tag{2.7}$$

$$F_r = K_s a s_t\, r_1 sin(\mathrm{j}\ ). \tag{2.8}$$

Складові сили різання в декартових координатах виражаються як

$$F_x = F_t cos(\mathrm{j}\ ) + F_r sin(\mathrm{j}\ ). \tag{2.9}$$

$$F_y = F_t sin(\mathrm{j}\ ) — F_r cos(\mathrm{j}\ ). \tag{2.10}$$

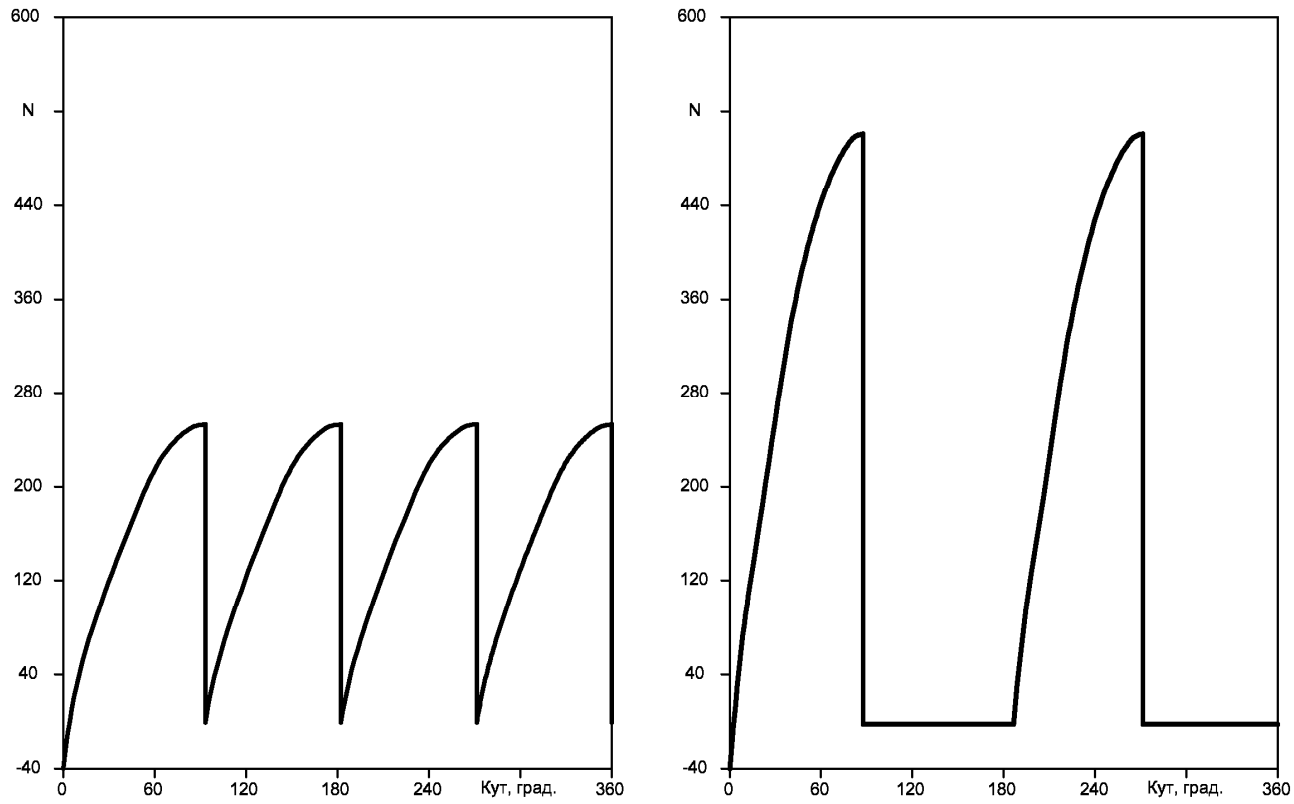
Результуюча сила різання, отримана при моделюванні двозубої та чотиризубої фрез, зображена на рисунку 2.2. Обидва моделювання були проведені за однакових умов різання. Як показано, результуюча сила різання періодична при частоті проходження зуба. Кількість хвиль ідентичної форми рівна кількості зубів у фрези при кожному оберті. Граничні сили є важливими і повинні бути обмежені, щоб уникнути поломки інструменту.

2.3 Моделювання процесу фрезерування

У цій частині представлена модель функції передачі для процесу фрезерування, яка є подальшим продовженням ранніх робіт Тлусті та Томізуки з співавторами. Ця модель, яка є необхідною складовою проектування контролерів та досліджень методом моделювання, є рівнянням в кінцевих різницях, яке пов'язує реакцію сил різання на варіації швидкості подачі двозубої фрези.

Для розробки моделі необхідні ряд припущень:

- модель виведена для повного стану різання;
- процес різання підбирається за циклом зубів;
- інструмент гнучкий і відхиляється переважно у напрямку подачі.



а б

Рисунок 2.2 – Моделювання результуючої сили при різанні:

а) чотиризуба фреза; б) двозуба фреза;

кут входження 0°, кут виходу 90°, K_s=2000 N/мм^2, осьова глибина різання – 25 мм, подача 0.2 мм/об

Граничними зусиллями нехтують, припускаючи, що інструмент гострий.

На рис. 2.3 командне положення інструменту показано пунктиром, тоді як суцільна лінія – це фактичне положення інструменту після прогину. Інструмент та заготовка показані в інтервалах кута занурення у 180 градусів. Фактична товщина стружки за цикл зуба (i + 1) визначається з геометрії (рис. 2.3)

$$h_{i+1} = s_{ti} + \delta_i - \delta_{i+1}, \tag{1.11}$$

де h_{i+1} – результуюча товщина стружки;

s_{ti} – подача/оберти/зуб;

δ_i – відхилення через F_{ri}.

F_{ri} та F_{ti} це максимальні радіальна та тангенціальна сили у кожному випадку.

$$F_{ti+1} = K_s a_i h_{i+1} = K_s a_i (s_{ti} + \delta_i - \delta_{i+1}) = F_{yi+1}. \tag{2.12}$$

$$F_{ri+1} = r_1 K_s a_i h_{i+1} = r_1 K_s a_i (s_{ti} + \delta_i - \delta_{i+1}) = F_{xi+1}. \tag{2.13}$$

Радіальна сила відхиляє кінець фрези в протилежну сторону від вектору швидкості подачі

$$F_{ri} = K_x \delta_i, \tag{2.14}$$

де K_x це еквівалент твердості інструменту на валу. Прирівнюючи рівняння 2.13 та 2.14 отримуємо:

$$K_x \delta_{i+1} = r_1 K_s a_i (s_{ti} + \delta_i - \delta_{i+1}). \tag{2.15}$$

Перестановка вищенаведеного рівняння приводить до

$$\delta_{i+1} = \frac{r_1 m}{1 + r_1 m}\left(s_{ti} + \delta_i\right). \qquad (2.16)$$

де $$m = \frac{K_s + a_i}{K_x}. \qquad (2.17)$$

Підставивши рівняння 2.14 в 2.16 отримуємо

$$F_{r_i+1} = \frac{K_x r_1 m}{1 + r_1 m}\left(s_{ti}\right) + \frac{r_1 m}{1 + r_1 m}\left(F_{ri}\right), \qquad (2.18)$$

де F_{ri} та F_{ri+1} це дійсне та майбутнє значення радіальної сили, які пов'язані оператором зміни (z):

$$F_{ri+1} = z\, F_{ri}. \qquad (2.19)$$

Підставлення рівняння 2.19 в 2.18 дає

$$F_{ri}\left(z - \frac{r_1 m}{1 + r_1}\right) = \frac{K_x r_1 m}{1 + r_1 m}\left(s_{ti}\right). \qquad (2.20)$$

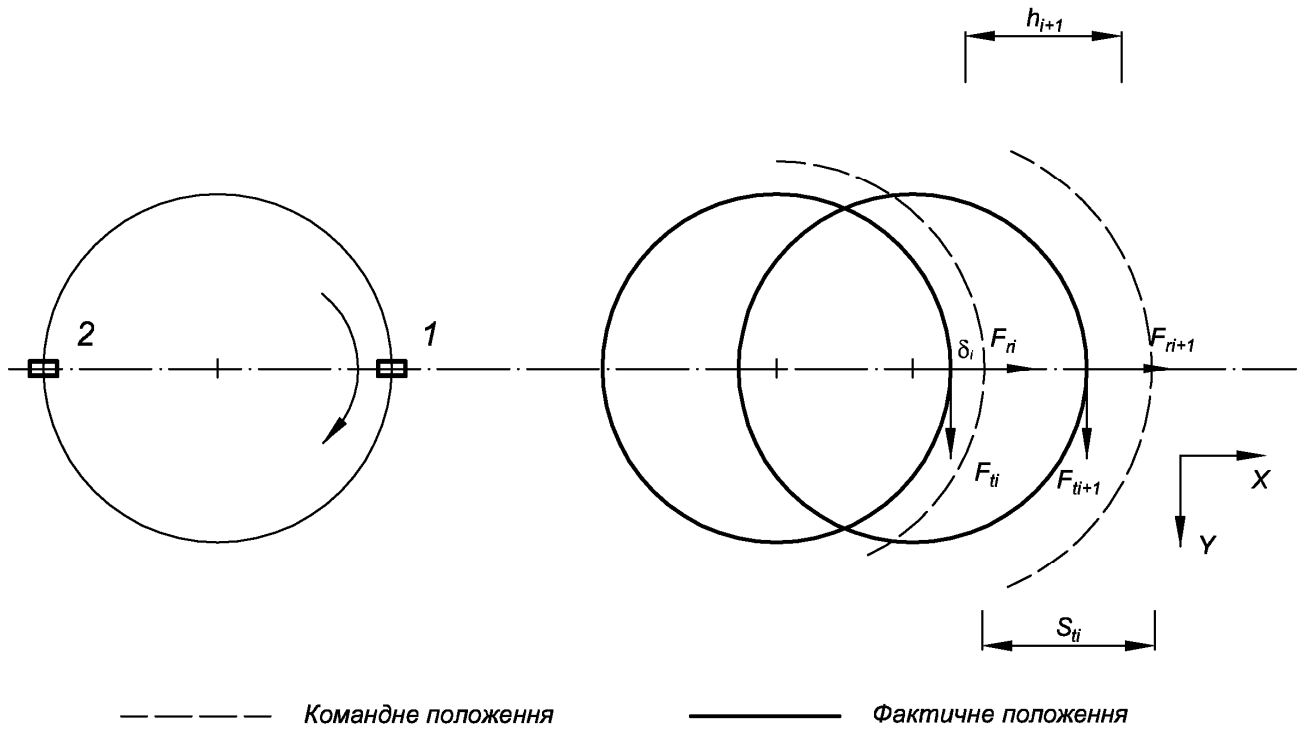


Рисунок 2.3 – Моделювання процесу різання при фрезеруванні

Максимальна результуюча сила (F_i) виводиться з рівнянь 2.3 та 2.19

$$F_i = \sqrt{F_{ti}^2 + F_{ri}^2} = \sqrt{\frac{F_{ri}^2}{r_1^2} + F_{ri}^2} = \frac{F_{ri}}{r_1}\sqrt{1 + r_1^2}. \qquad (2.21)$$

Підставивши рівняння 2.21 в 2.20 отримуємо:

$$\frac{F_i}{s_{ti}} = \frac{\left[K_x \mu / \left(1 + r_1 \mu\right)\right]\sqrt{1 + r_1^2}}{z - \left[r_1 \mu / \left(1 + r_1 \mu\right)\right]}. \qquad (2.22)$$

Рівняння 2.22 – це динамічна модель сили подачі в процесі фрезерування, яка є системою першого порядку. Полюс процесу $\frac{r_1 \mu}{1 + r_1 \mu}$ завжди менший одиниці. Зрозуміло, що якщо r_1 μ << 1 або $r_1 K_s a_i / K_x$ дуже малі, то процес фрезерування можна розглядати як простий коефіцієнт підсилення із затримкою в один крок. Це ситуація, коли осьова глибина різання невелика або інструмент дуже жорсткий.

Виведена вище передавальна функція призначена для особливого випадку, коли одночасно ріже лише один зуб. Однак його можна поширити на випадки, коли більше одного зуба в дії.

В цілому, для жорсткого різання максимальна різальна сила F_i може бути виражена як

$$F_i = K_з \sqrt{1 + r_1^2}\, C_1\left(\varphi_i, Z\right). \qquad (2.23)$$

де $C_1(\varphi_i, Z)$ є параметром що залежить від глибини різання (φ_i) та кількості зубів в різці.

Змінна в часі константа різання, яка є загальною для будь-якої глибини та кількості зубів, може бути виражена як

$$K_{ci} = K_з \sqrt{1 + r_1^2} C_1 (\varphi_i, Z). \quad (2.24)$$

Константа різання K_{ci} змінюється разом з функцією глибин (φ_i), що може мінятися з часом. Максимальна сила (F_i) залежить від відхилення інструменту таким чином:

$$F_i = K_i \delta_i. \quad (2.25)$$

де K_i – оорієнтована жорсткість у напрямку швидкості подачі.

Варто звернути увагу, що оскільки занурення може змінюватися з часом у залежності від геометрії обробленої заготовки, орієнтована жорсткість K_i також може змінюватися в часі. Прирівнюючи дві сили різання, одержимо

$$K_{ci} a_i s_{ti} = K_i \delta_i. \quad (2.26)$$

Передбачається, що орієнтована жорсткість K_i змінюється поступово (тобто відбувається поступова зміна глибини різання):

$$K_i \gg K_{i+1} = K. \quad (2.27)$$

Підставивши замість s_{ti} фактичний еквівалент подачі центру фрези з рівняння 3.11 отримуємо:

$$K \delta_{i+1} = K_{ci} a_i (s_{ti} + \delta_i - \delta_{i+1}), \quad (2.28)$$

або

$$\delta_{i+1} = \frac{m}{1+m} (s_{ti} + \delta_i), \quad (2.29)$$

де $m = \frac{K_{ci} a_i}{K}$. (2.30)

Через відхилення δ_{i+1} при циклі зуба (i+1) максимальна різальна сила (F_{i+1}) може бути виражена як

$$F_{i+1} = K\mathrm{d}_{i+1} = \frac{K\mathrm{m}}{1+\mathrm{m}}\left(s_{ti} + \mathrm{d}_i\right) = \frac{K\mathrm{m}}{1+\mathrm{m}}s_{ti} + \frac{\mathrm{m}}{1+\mathrm{m}}F_i. \tag{2.31}$$

Функція дискретного перенесення процесу фрезерування внаслідок статичного відхилення інструменту може бути отримана з рівняння 2.31.

$$\frac{F(z)}{s_t(z)} = \frac{b_0}{z + a_1}, \tag{2.32}$$

де $b_0 = \frac{K\mathrm{m}}{1+\mathrm{m}}$; $a_1 = -\frac{\mathrm{m}}{1+\mathrm{m}}$.

Варто зазначити, що параметри процесу b_0 і a_1 змінюються в часі і залежать від геометрії заготовки. Наприклад, під час механічної обробки блоків двигуна або крил літаків як ширина різання (тобто занурення), так і глибина різання можуть змінюватися залежно від заготовки та вибраної геометрії шляху інструменту.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Опис експериментальної установки

Для дослідження процесу фрезерування різання було використано вертикальний консольно-фрезерний верстат 6Н14Ф3 (рис. 3.1). Установку було модернізовано трьома двигунами з постійними магнітами широтно-імпульсної модуляції BALDOR. Кожен двигун має тахометр та модулятор для зворотного зв’язку швидкості та положення (рис. 3.2). Модулятор має роздільну здатність у 1000 імпульсів за оберт у кожному з двох квадратурних каналів, що дає загальну роздільну здатність у 4000 імпульсів за оберт. Один імпульс це роздільна здатність положення сервоприводу і дорівнює одній базовій одиниці довжини. Датчик положення встановлений на валу двигуна, який безпосередньо з’єднаний із ведучим гвинтовим валом. Ведучий гвинт рухається з кроком 5 мм за оберт, а тому кожні 0,025 мм лінійного руху стола дорівнює двадцяти імпульсам датчика.

Сигнали надсилаються на сервоприводи через підсилювачі UNIDRIVE. Підсилювачі отримують сигнали зворотного зв’язку тахометра для точного регулювання швидкості. Повністю програмований триосевий сервопривідний контролер (DMC 230) використовується для керування положеннями трьох лінійних осей установки. Картка керування рухом включає процесор Motorola 68008 і 16 ліній вводу/виводу для функцій логічного керування. Контролер має вхід зворотного зв`язку модулятора та цифровий контрольований компенсатор відставання з параметрами, що регулюються в режимі реального часу. Термінал VT 100 під’єднується до контролера руху через лінію зв’язку RS 232 для надсилання команд двигунам. Для керування використовується центральний процесор Intel та персональний комп’ютер (ПК). ПК оснащений інтерфейсним адаптером ULTRALINK PC до блоку установки друкованих карт шини MultiBus, яка містить контролер DMC-230.

Трикомпонентний п`єзоелектричний динамометр (модель Kistler 9257a) встановлений на столі для вимірювання сил різання в поздовжньому та поперечному напрямках (X та Y). На динамометрі для кожної складової сили

встановлюється пропорційний електричний заряд. Ці заряди надсилаються в підсилювачі заряду (Dual mode модель 5004), де вони перетворюються у пропорційні напруги. Динамометр має велику пропускну здатність з власною частотою понад 4 кГц для кожної осі, що набагато вище, ніж частота сили різання у 25 Гц, використана в експерименті. Таким чином, динаміку динамометра можна розглядати як підсилення.

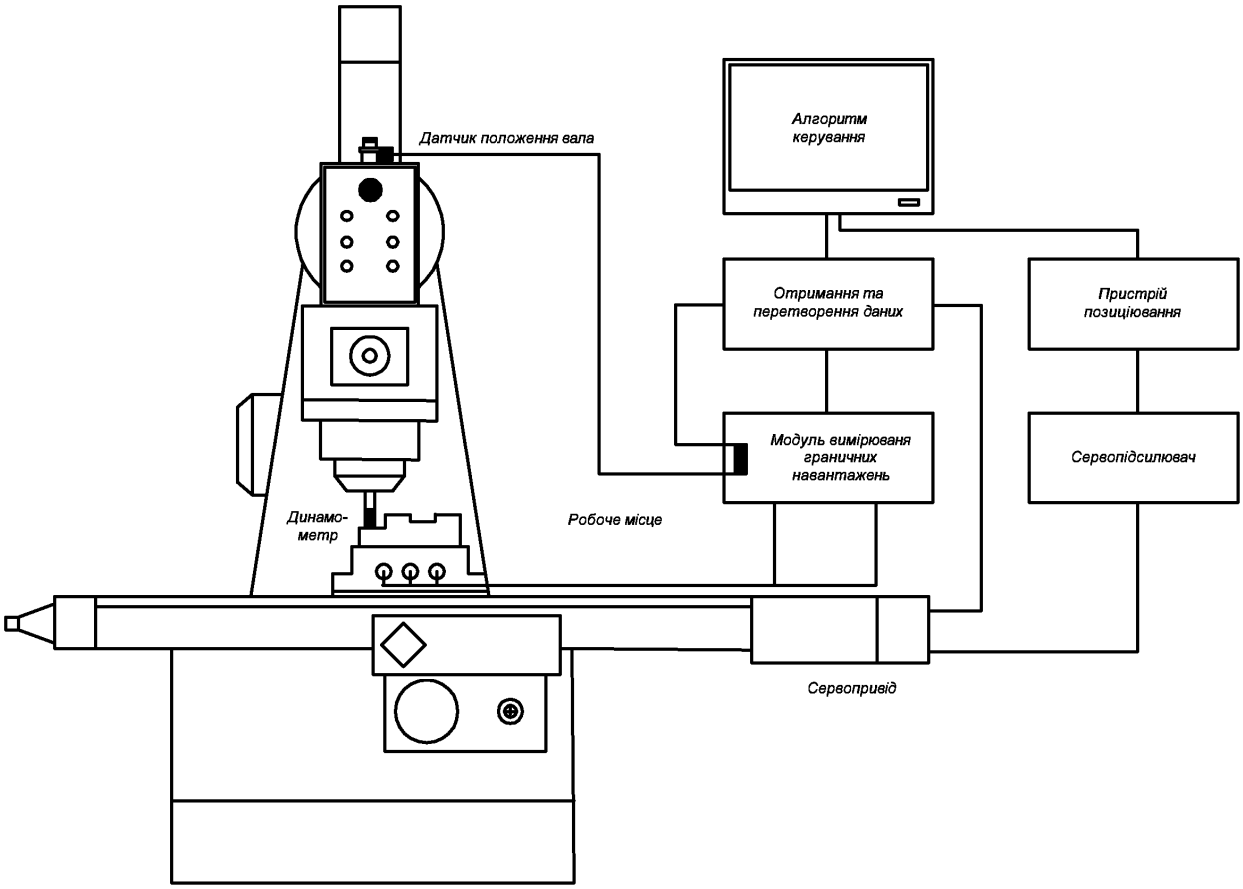


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд експериментальної установки

Система збору даних складається з двох основних частин: апаратного та програмного забезпечення. Апаратне забезпечення включає в себе ПК та карту збору даних моделі Data Translation DT 2801-A із зовнішньою коробкою роз’ємів. Існуюче програмне забезпечення для збору даних у режимі реального часу було модифіковане, щоб забезпечити швидкість збору даних. Плата збору даних може опрацювати 8 двосторонніх аналогових каналів з діапазоном ±10 V і 12-бітовою роздільною здатністю. Дані передаються в пам’ять через блок прямого доступу до пам’яті, тому програма керування може продовжувати виконання незалежно від

процесу збору даних.

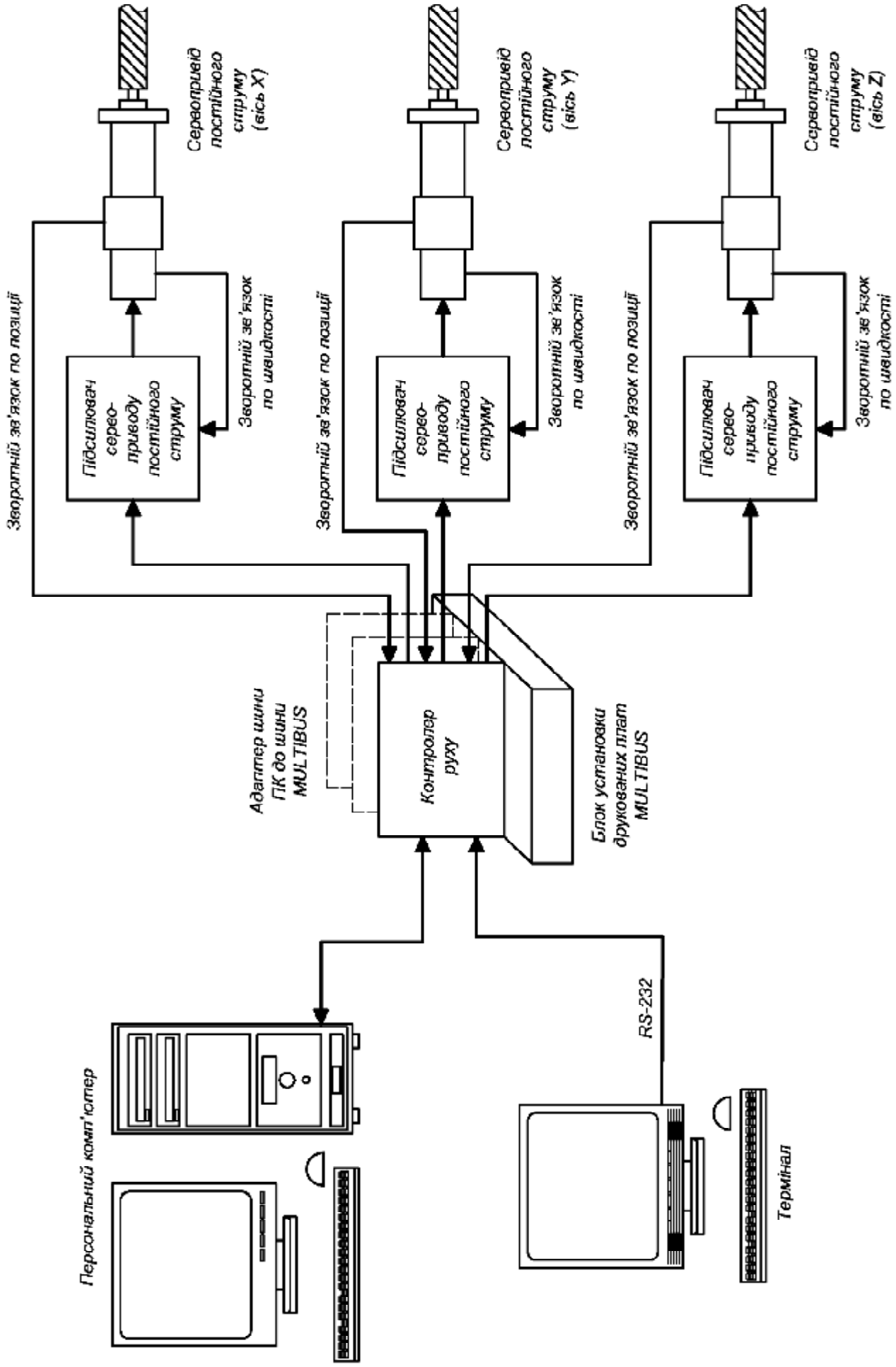


Рисунок 3.2 – Схема керування сервоприводами

Для синхронізації обробки з частотою проходження зубів використовується зовнішній тригер. Зовнішній тригер – це оптичний модулядор з диском, встановленим на шпинделі. На диску є кілька слотів, які, проходячи через оптичний сенсор, надсилають тригерні сигнали на плату збору даних. В експериментах було використано два диски. Перший диск мав 64 слоти і використовувався для збору даних для аналізу в режимі офлайн. Для керування процесом різання був використаний диск із двома слотами. Причиною цього було те, що впродовж всього часу використовувалась твердосплавна фреза з двома зубами, і в алгоритмах контролю була потрібна максимальна сила на кожному циклі зуба (час вибірки).

Силові сигнали в напрямках X та Y спочатку були надіслані в коробку детектора піків, де їх було зведено в квадрат і додано (рис. 3.3). Потім було зібрано пікове значення в кожному циклі зуба, яке разом із сигналом тахогенератора надсилалося на плату збору даних у кожному циклі зуба. Програмно був добутий корінь квадратний сигналу сили, щоб отримати максимальну результуючу силу. І тахосигнали, і силові сигнали були помножені на їх відповідні коефіцієнти підсилення, щоб перетворити їх з виміряної напруги на реальні значення. Ці вибіркові дані оброблялись відповідно до алгоритму керування, і контрольований вхідний сигнал та швидкість подачі надсилалися при кожному відліку часу на контролер двигуна DMC 230.

3.2 Експериментальне підтвердження моделювання процесу фрезерування

Для перевірки розробленої моделі був проведений експеримент. Матеріалом заготовки був алюміній 7075T651. Було обрано фрезу діаметром 25,4 мм з двома твердосплавними зубами та негативним кутом нахилу у 5°. Швидкість шпинделя була 775 об/хв а осьова глибина різання становила 2,54 мм. Швидкість подачі змінювалася під час повного занурення при фрезеруванні, та проводились заміри зусилля різання в напрямках X та Y та сигнали тахогенератора. Вимірювання були зібрані системою збору даних із використанням 64-слотового кодового валу, що призвело до періоду вибірки 1,21 мс.

Граничне результуюче зусилля в кожному циклі зуба (32 зразки) обчислювалася на основі виміряних сил у напрямках X та Y. Варто зазначити, що складова сили різання в напрямку Z (перпендикулярно до столу) були незначними для використовуваної фрези, і вона не вимірювалася. Заміри результуючої сили різання показані на рис. 3.4.

Для імітації моделі, описаної рівнянням 2.22 необхідно було розрахувати константи різання K_s і r_1 використовуючи наведені вище заміри.

Одним із способів обчислення цих параметрів є отримання середніх сил за цикл зуба при подачі і нормалі або у напрямках X та Y, використовуючи рівняння 2.9, 2.10 та 2.6.

$$F_{ax} = \frac{1}{\mathrm{j}\ T} \int_0^{\mathrm{j}\ S} F_x d\mathrm{j}\ . \tag{3.1}$$

$$F_{ay} = \frac{1}{\mathrm{j}\ T} \int_0^{\mathrm{j}\ S} F_y d\mathrm{j}\ . \tag{3.2}$$

або

$$F_{ax} = \frac{K_s a s_t}{\mathrm{j}\ T} \int_0^{\mathrm{j}\ S} \left(\mathrm{Sin}\mathrm{j}\ \mathrm{Cos}\mathrm{j}\ + r_1 \mathrm{Sin}^2 \mathrm{j}\ \right) d\mathrm{j}\ , \tag{3.3}$$

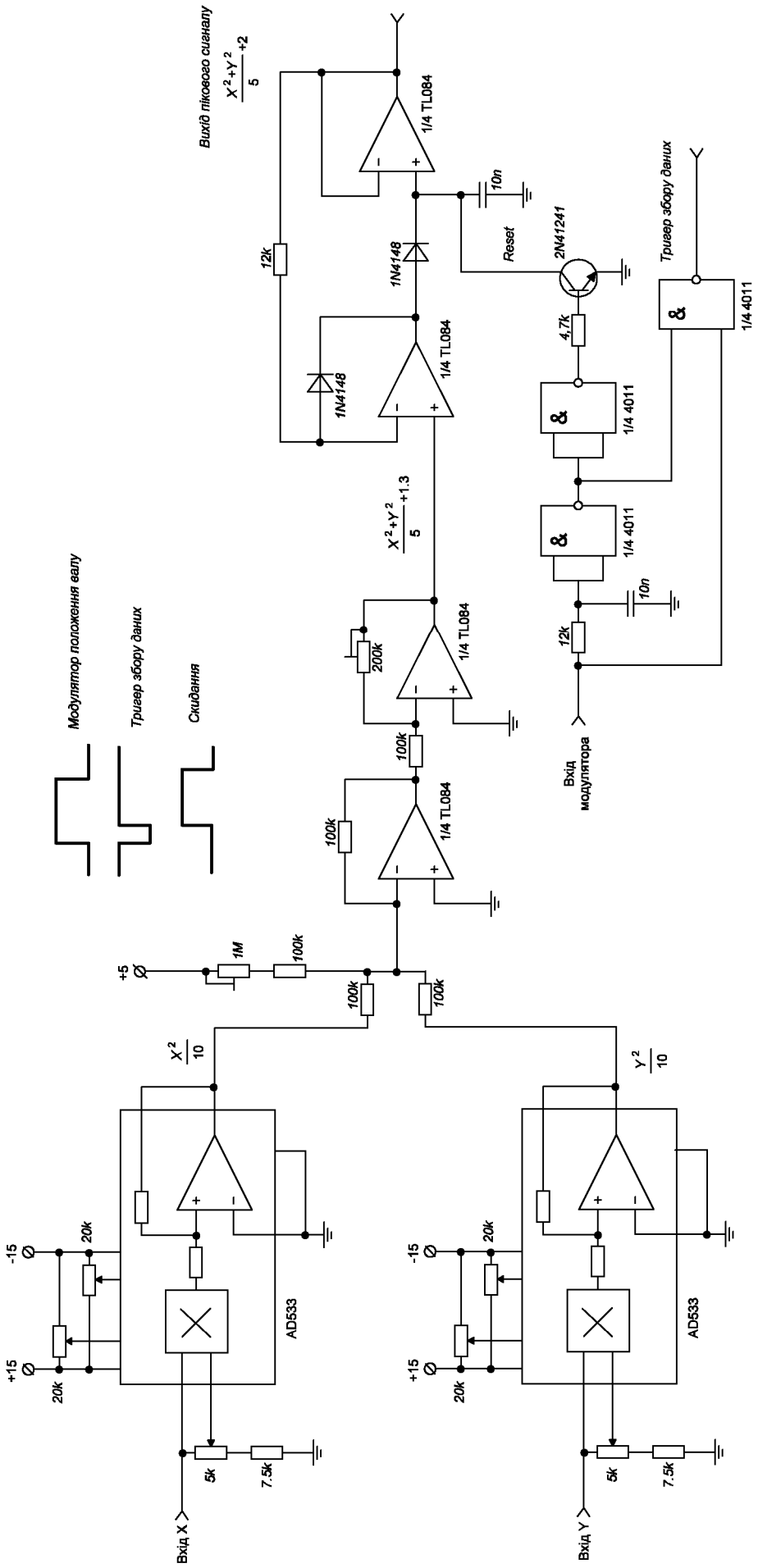


Рисунок 3.3 – Загальна схема детектора максимального навантаження

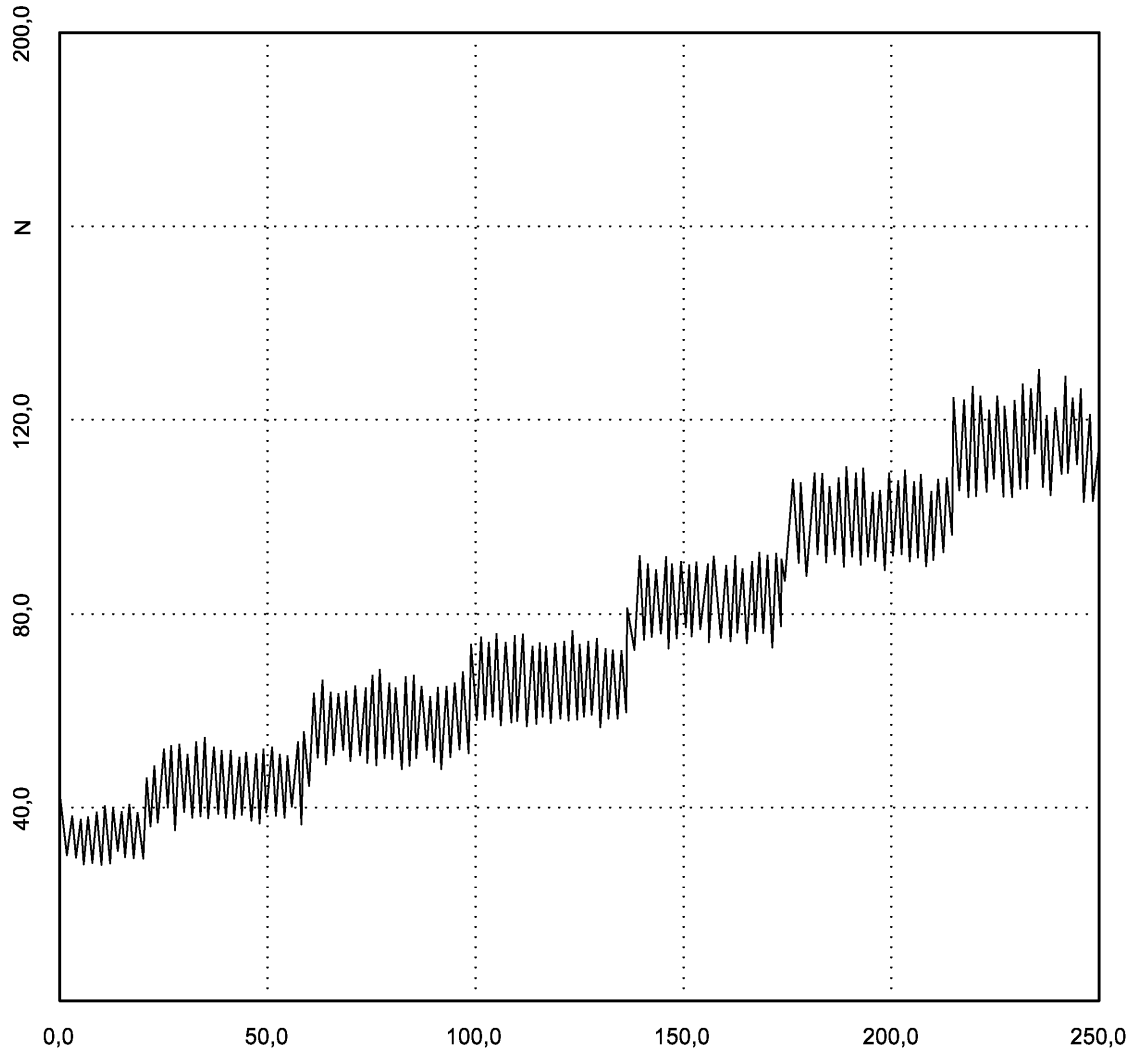


Рисунок 3.4 – Виміряна гранична результуюча сила різання для двозубої твердосплавної фрези діаметром 2,54 мм, осьова глибина різання 2,54 мм, частота обертання шпинделя 775 об/хв, швидкості подачі 0.024, 0.049, 0.073, 0.098, 0.147, 0.196, 0.245 мм/об/зуб

$$F_{ay} = \frac{K_s a s_t}{\varphi_T} \int_0^{\varphi_S} \left(\sin^2 \varphi - r_1 \sin\varphi \cos\varphi \right) d\varphi \,. \qquad (3.4)$$

де Z – кількість зубів фрези;

$\varphi_T = 2\pi/Z$ – кут подачі фрези;

φ_S – змінений кут різання.

Припускається, що вильоту немає і що зуби розміщені рівномірно.

Об’єднавши вищенаведені рівняння отримуємо:

$$F_{ax} = \frac{K_s a s_t Z}{8p}\left\{\left(1 - \operatorname{Cos} 2j_s\right) + r_1\left(2j_s - \operatorname{Sin} 2j_s\right)\right\}. \quad (3.5)$$

$$F_{ay} = \frac{K_s a s_t Z}{8p}\left\{\left(2j_s - \operatorname{Sin} 2j_s\right) - r_1\left(1 - \operatorname{Cos} 2j_s\right)\right\}. \quad (3.6)$$

Для двозубої фрези і повної глибини різання отримуємо

$$F_{ax} = \frac{r_1 K_s a s_t}{2}. \quad (3.7)$$

$$F_{ay} = \frac{K_s a s_t}{2}. \quad (3.8)$$

Середні значення сил в напрямках X та Y у кожному циклі зуба були розраховані на основі замірів та побудовані в залежності від швидкості подачі. Результати показані на рисунку 3.5. Варто зауважити, що криві не виходять з початку координат через наявність реберних зусиль при низькій швидкості подачі.

Постійні різання розраховуються з вищенаведених рівнянь та рис. 3.5.

$$K_s = 1212 N / \text{мм}^2; r_1 = 0,78.$$

Еквівалентну жорсткість інструменту на шпинделі, K_x, вимірювали статично. Висотомір використовувався для вимірювання прогину інструменту у відповідь на горизонтальні навантаження, що діють на інструмент. Прогин шпинделя вимірювався окремо і був незначним. На рис. 3.6 показано прогин фрези під навантаженням. Значення K_x дорівнює 12100 Н/мм.

Процес фрезерування моделювався із зазначеними вище постійними різання, а результат наведено на рис. 3.6.

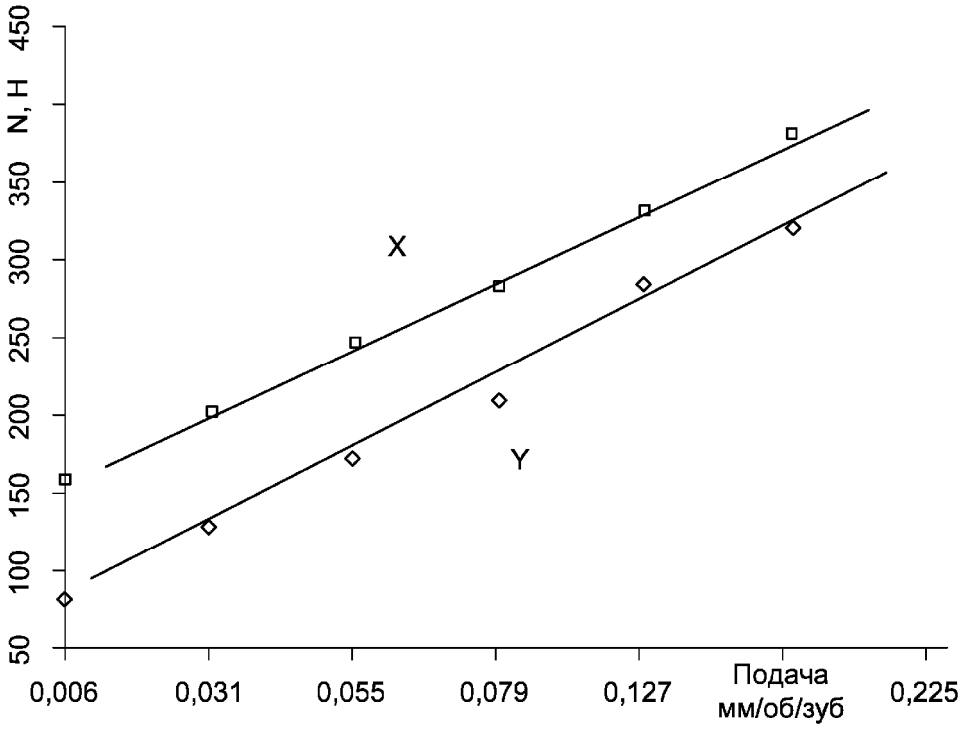


Рисунок 3.5 – Середні значення сил в напрямках X та Y для двозубої твердосплавної фрези діаметром 2,54 мм, осьова глибина різання 2,54 мм, частота обертання шпинделя 775 об/хв

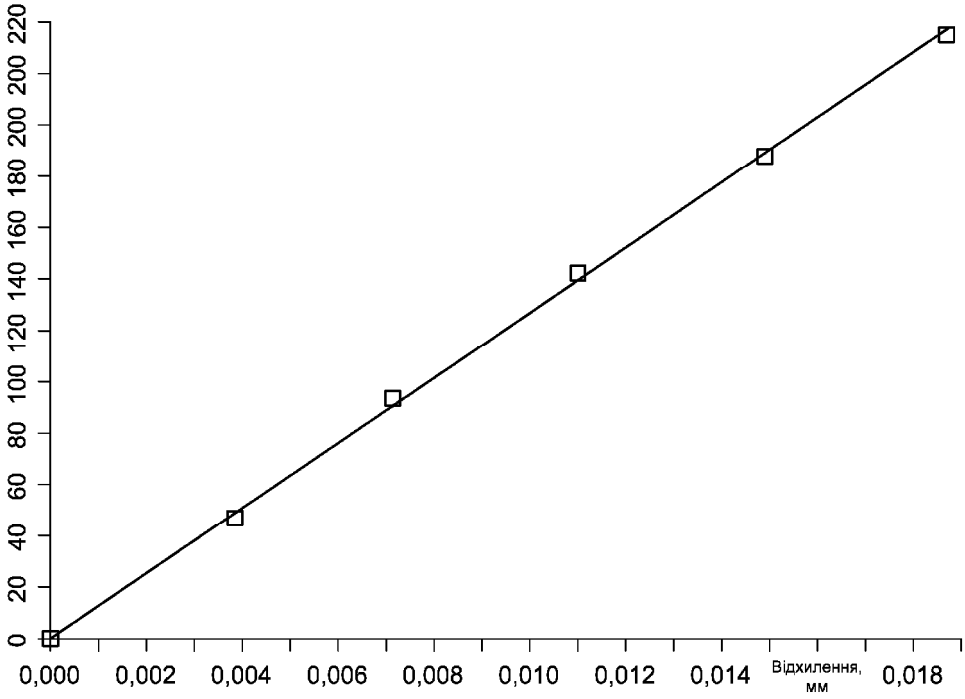


Рисунок 3.6 – Відхилення закріпленої на шпинделі двозубої твердосплавної фрези

діаметром 2,54 мм під змінним навантаженням

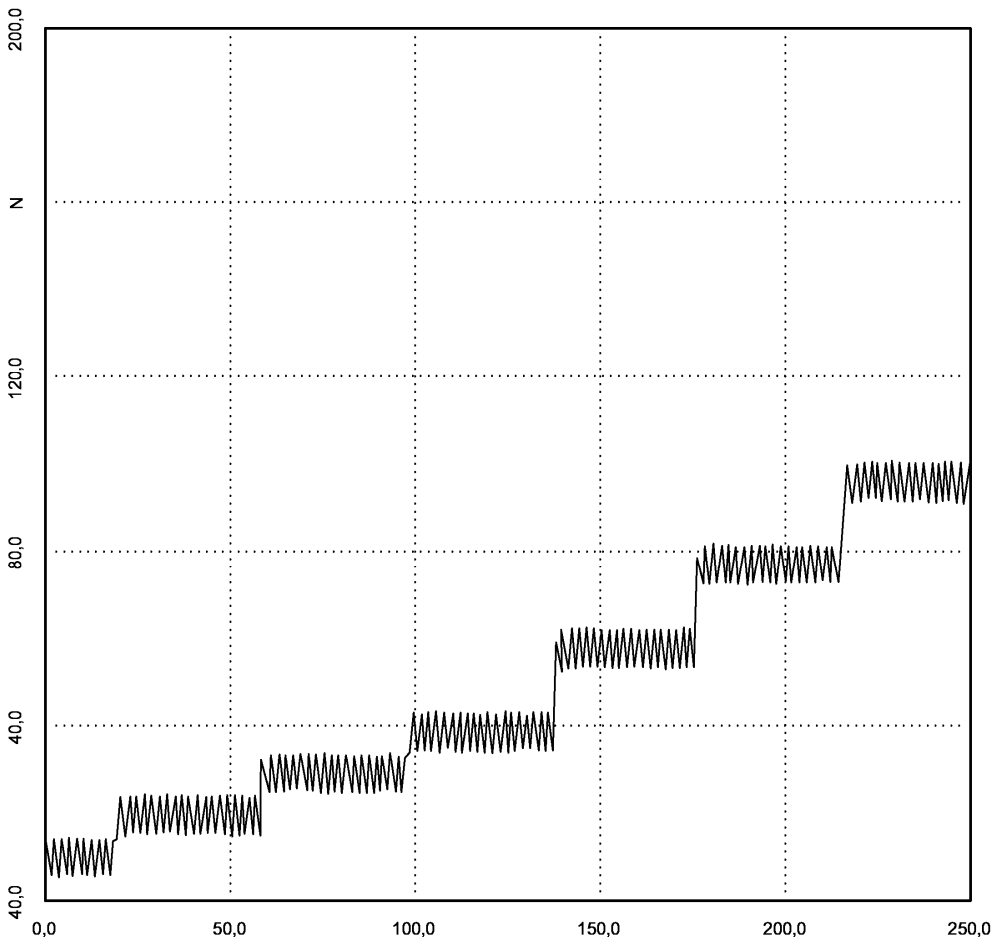


Рисунок 3.7 – Змодельована максимальна результуюча сила різання для двозубої твердосплавної фрези діаметром 2,54 мм, осьова глибина різання 2,54 мм, швидкості подачі 0.024, 0.049, 0.073, 0.098, 0.147, 0.196, 0.245 мм/об/зуб

Порівняння рис. 3.6 та 3.7, які мають однакові умови, показує, що модель слідує тій самій тенденції, що і експеримент. Зміщення постійного струму у виміряному значенні не є вирішальним у конструкції керування, оскільки параметри моделі оцінюються в режимі реального часу в циклі керування. Цей момент набуває ясності в наступному експерименті.

Раніше було заявлено, що модель процесу різання є моделлю першого порядку, але за особливих умов вона може трактуватися як підсилення. В іншому експерименті швидкість подачі змінювали по черзі між 0,295 і 0,59 мм/об/зуб, тоді як осьова глибина різання залишалася постійною (2,54 мм). Швидкість подачі була змінена після 10 обертів шпинделя, а однозуба фреза була використана для повного уникнення ефекту вильоту. Швидкість шпинделя становила 362 об/хв.

Тахо- та силові сигнали передавалися через фільтр низьких частот у 100 Гц. Заміри максимальної сили показані на рис. 3.8. Перехідні процеси максимальної сили показують динаміку сил фрезерування, яка відрізняється від простого підсилення. Модель першого порядку може слідувати перехідним процесам і моделюється відповідно до рівняння з однаковими константами різання, розрахованими вище. Результат показаний на рис. 3.8.

В алгоритмах керування для ідентифікації використовуються тахосигнали та сигнали пікової результуючої сили. Тут модель процесу різання трактується як коефіцієнт підсилення, а також як система першого порядку, і ці сигнали використовуються для побудови передбачуваного результату. На рисунку 3.9 показано виміряну пікову результуючу силу разом із передбаченими силами для підсилення та систем першого порядку. Система першого порядку слідує виміряній силі краще, ніж коефіцієнт підсилення. Функція витрат, заснована на підсумовуванні квадратів помилок, також нижча для системи першого порядку.

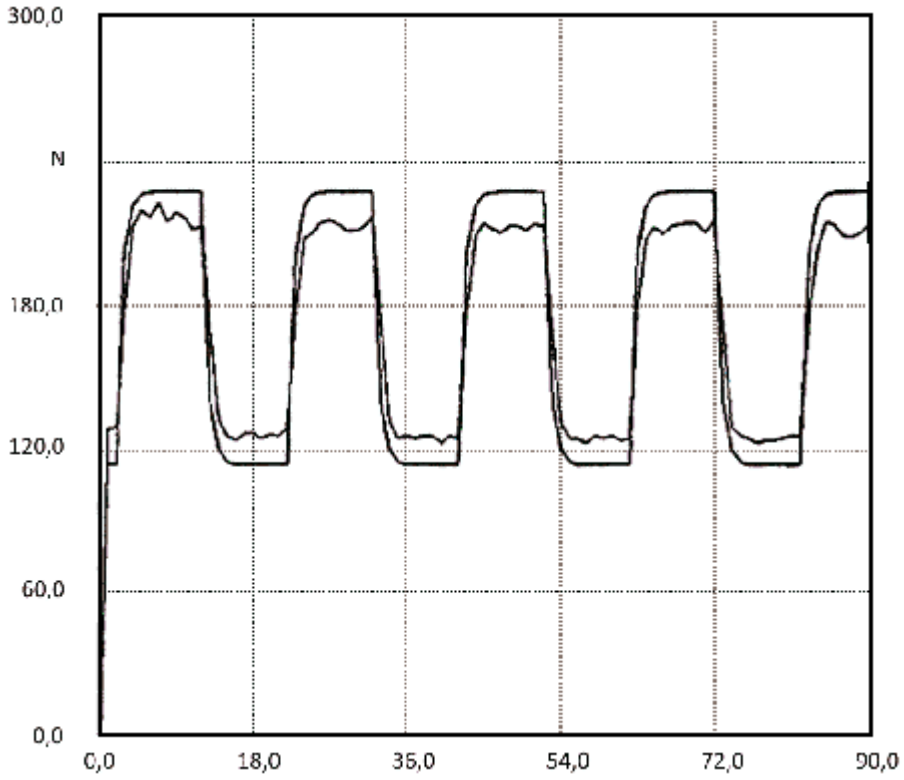


Рисунок 3.7 – Виміряна пікова результуюча сила різання та теоретична модель першого порядку, швидкості подачі 0,295 та 0,59 мм/об/зуб, осьова глибина різання 2,54 мм, швидкість шпинделя 362 об/хв

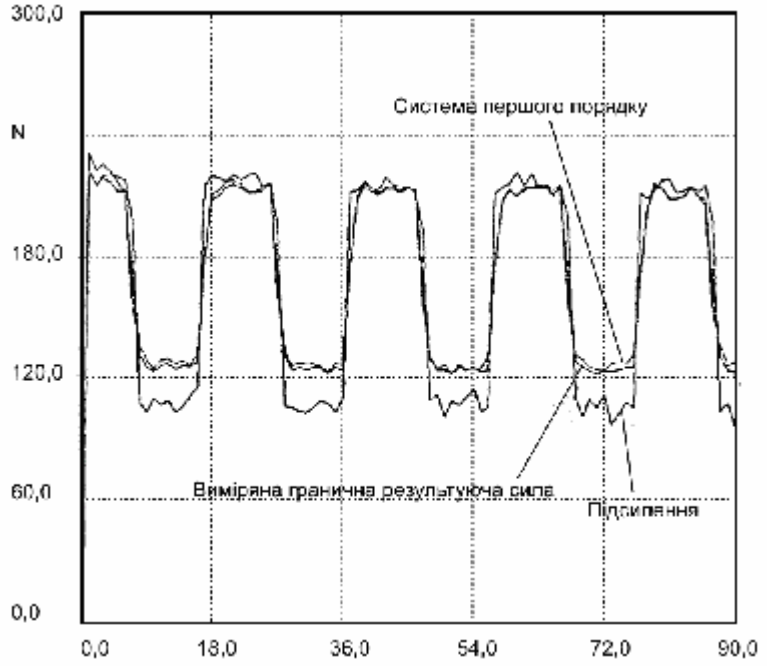


Рисунок 3.8 – Виміряна пікова результуюча сила та прогнозовані сили

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Розроблення та застосування елементів системи керування

Адаптивний цикл керування процесами обробки має три основні блоки керування. Перший блок – контролер, який адаптивно регулює швидкість подачі, щоб утримувати сили різання нижче бажаного рівня. Другий блок – незмінна в часі динаміка системи керування положенням приводу подачі. Третій блок являє змінну в часі динаміку процесу обробки.

У цьому розділі спочатку буде виведена дискретна часова модель системи керування приводом подачі. Оскільки параметри процесу обробки змінюються в часі, розглянеммо метод, що використовується для їх ідентифікації в реальному часі. На верстаті з ЧПК змодельовано та реалізовано три адаптивні алгоритми керування, які використовуються для керування зусиллями фрезерування.

4.2 Моделювання контролера приводу подачі

Дослідна установка – вертикальний консольно-фрезерний верстат з трьома осями переміщення – поздовжньою, нормальною та вертикальною. Кожна вісь має рециркуляційний кульковий гвинтовий привід, керований постійним магнітними, серводвигунами постійного струму, які модулюються за шириною імпульсу. Двигуни безпосередньо підключені до приводних валів подачі без будь-якого зменшення передаточного числа. Швидкість і положення кожної вісі контролюється аналоговим та цифровим модулями керування. Структурна схема контролера приводу подачі показана на рис. 4.1. Аналогова частина системи складається з аналогового підсилювача та приводу. Підсилювач має зворотній сигнал швидкості від тахогенератора з тахоконстантою H_g і коефіцієнтом тахопідсилення T_g, коефіцієнтом підсилення сигналу підсилювача S_g, коефіцієнтом підсиленням підсилювача струму R_g і константою крутного моменту приводу K_t. Привід складається з функції передачі першого порядку двигуна постійного струму та коефіцієнта підсилення лічильника K_e.

Передавальну функцію неперервної частини обчислюють таким чином.

З частини поступальної подачі циклу зворотного зв’язку швидкості отримуємо

$$G_1(s) = R_g K_t \frac{1}{J_s + B_f}, \tag{4.1}$$

де J – еквівалентна інерція, відбита на валу двигуна,

B_f – коефіцієнт тертя.

Тоді функція передачі замкненого циклу зворотного зв’язку за швидкістю визначається як

$$G_2(s) = \frac{G_1}{1 + G_1 H_1} = \frac{R_g K_t}{J_s + B_j + R_g K_t T_g H_g}. \tag{4.2}$$

Варто зазначити, що крутний момент навантаження встановлюється рівним нулю.

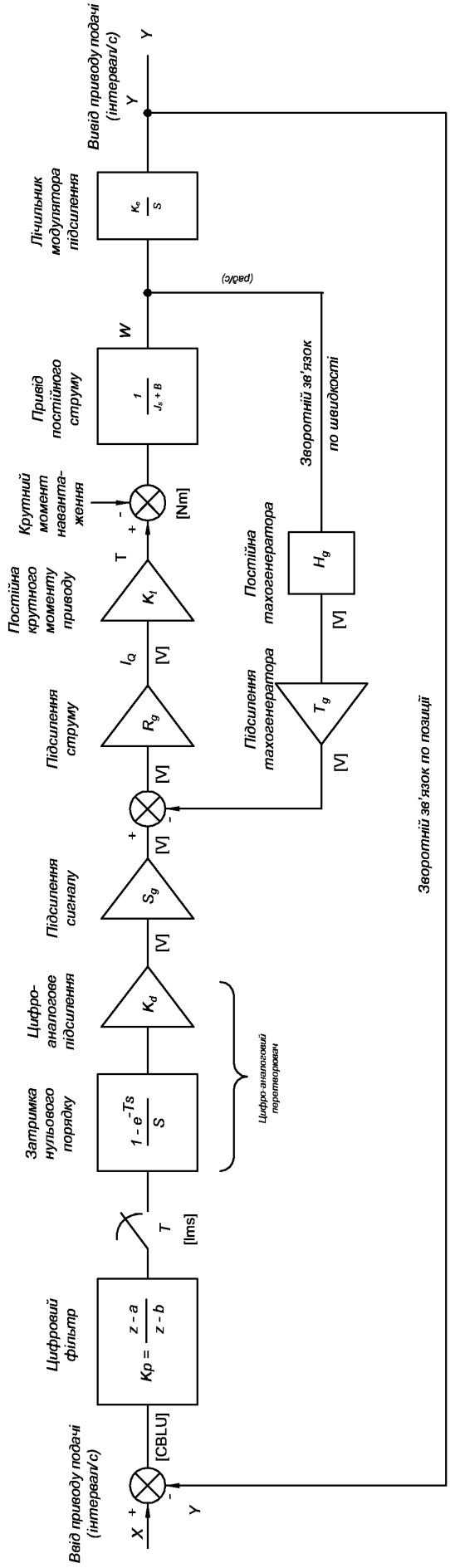


Рисунок 4.1 – Блок-схема контролера приводу подачі

Поєднання вищезазначеного рівняння з коефіцієнтом цифро-аналогового підсилення, коефіцієнтом підсилення підсилювача та коефіцієнтом підсилення модулятора виглядає так

$$G_3(s) = G_2(s)\frac{K_{da}S_gK_e}{s}, \tag{4.3}$$

або

$$G_3(s) = \frac{K_dS_gR_gK_tK_e/J}{s\left[s + \left(B_f + R_gK_tT_gH_g\right)/J\right]}. \tag{4.4}$$

Цифрова частина складається з цифрового фільтра з коефіцієнтом підсилення K_p, затримкою нульового порядку, коефіцієнтом підсилення постійного струму K_{da} та сигналом зворотного зв'язку по позиції з модулятора. Цифровий фільтр має функцію передачі

$$G_4(z) = K_p\frac{z - a}{z - b}. \tag{4.5}$$

Цикл проби адаптивного контролю дорівнює циклу зубів, який набагато більший, ніж час дискретизації цифрового фільтра T_1. Таким чином, використовуючи трансформацію Тустіна

$$z = \left(2 + sT_1\right) / \left(2 - sT_1\right), \tag{4. 6}$$

приймаючи $b = 0$, одержимо:

$$G_4(z) = K_p\frac{s + \dfrac{2 - 2a}{T_1 + aT_1}}{\dfrac{2 + sT_1}{T + aT_1}}. \tag{4.7}$$

Система багатоцільового верстату з системою числового програмного керування налаштована таким чином, що нуль на цифровому фільтрі анулює

швидкість полюсу зворотного зв’язку:

$$\frac{2-2a}{T_1+aT_1}=\frac{B_f+R_gK_tT_gH_g}{J}. \tag{4.8}$$

Якщо їх перемножити

$$G_5(s)=G_3(s)G_4(s)=K_p\frac{(T_1+aT_1)}{(2+sT_1)}\frac{(K_{da}S_gR_gK_tK_c)}{sJ}. \tag{4.9}$$

Функція передачі закритого циклу зі зворотним зв’язок модулятора

$$G_s(s)=\frac{G_5}{1+G_5}, \tag{4.10}$$

або

$$G_s(s)=\frac{\left[(1+a)K_{da}S_gR_gK_tK_eK_p\right]/J}{s^2+(2s)(T_1)+\left[(1+a)K_{da}S_gR_gK_tK_e\right]/J}, \tag{4.11}$$

де J = 0,006 кг м^2,

K_d = 0,0781 В/інтервал,

S_g = 0,0627 В/В,

R_g = 208,3 А/В,

K_t = 0,3 Н м/А,

K_e = 636,6 інтервал/рад,

T_1 = 0,001 с.

З рівняння 4.48 отримуємо a = 0.882 і K_p закладено як K_p = 2.5 щоб отримати відповідь позиції з затухання. Підставлення параметрів в рівняння 4.51 дає

$$G_s(s)=\frac{152591.6}{s^2+2000s+142591.6}. \tag{4.12}$$

Тому для сервоприводу отримується функція передачі другого порядку. Природна частота та коефіцієнт затухання швидкості подачі сервоприводу відповідно становлять 390,67 рад/с та 2,56.

4.3 Метод ідентифікації параметрів

Існує кілька методів оцінки параметрів лінійного процесу, що змінюється у часі. Рекурсивна методика найменших квадратів є найбільш популярною в задачах керування.

Розглянемо динамічну систему з дискретизованим ввідним сигналом $u(t)$ та вивідним сигналом $y(t)$. Вибрані значення можуть бути пов'язані за допомогою лінійного рівняння в кінцевих різницях

$$A\left(z^{-1}\right)y(t) = B\left(z^{-1}\right)u(t). \tag{4.13}$$

де $A(z^{-1})$ і $B(z^{-1})$ є поліномами, визначеними в операторі зсуву назад (z^{-1}).

$$A\left(z^{-1}\right) = 1 + a_1 z^{-1} + \text{¼} + a_n z^{-n}. \tag{4.14}$$

$$B\left(z^{-1}\right) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \text{¼} + b_m z^{-m}. \tag{4.15}$$

Тут n та m це порядок поліномів A та B. Коротка форма вищенаведеної моделі може бути записана таким чином

$$y(t) = \text{q}^T \text{j}\ (t), \tag{4.16}$$

де

$$\text{q}^T = (a_1, \text{¼}, a_n, b_1, \text{¼}, b_m) \tag{4.17}$$

це вектор параметру і вектор спостереження і його компоненти називаються регресорами.

$$\varphi^T(t) = \left(-y(t-1), \ldots, -y(t-n), u(t-1), \ldots, (t-m)\right). \qquad (4.18)$$

Вектор параметрів θ повинен бути визначений на основі вимірювань вхідних та вихідних даних за час відбору проб N, тобто $y(t)$, $\varphi(t)$, $t = 1,2, \ldots, N$ та мінімізуючи функцію витрат $V_N(\theta)$

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} a_t \sum_{t=1}^{N} a_t \left[y(t) - \theta^T \varphi(t)\right]^2. \qquad (4.19)$$

Вищевказане рівняння являє собою дисперсію виміряного та розрахункового випуску. a_t є ваговим коефіцієнтом для спостережень і часто вибирається рівним одиниці. Цей критерій є квадратичним у θ, тому його можна мінімізувати аналітично щодо θ, що дозволяє записати розрахунковий вектор параметрів як у випадку, якщо існує інверсія матриці.

$$\hat{\theta}[N] = \left[\sum_{t=1}^{n} a_t \varphi(t) \varphi(t)^T\right]^{-1} \sum_{t=1}^{N} a_t \varphi(t) y(t). \qquad (4.20)$$

Можна показати, що розрахунковий вектор параметрів можна знайти в рекурсивній формі на кожному інтервалі проб

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t)\left[y(t) - \hat{\theta}^T(t-1)\varphi(t)\right]. \qquad (4.21)$$

$$L(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{1/a_t + \varphi^T P(t-1)\varphi(t)}. \qquad (4.22)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda}\left[P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)p(t-1)}{\lambda/a_t + \varphi^T(t)p(t-1)\varphi(t)}\right]. \qquad (4.23)$$

де λ – коефіцієнт знецінення,

$L(t)$ – вектор підсилення,

$P(t)$ - матриця коваріації.

Матриця коваріації та вектор параметрів повинні бути ініціалізовані перед

запуском. Вибір фактора забування зазначений у моделюванні.

Нижче наведено псевдокод для рекурсивного методу найменших квадратів.

1. Визначити модель процесу відповідно до рівняння 4.13, наприклад порядок параметрів A і B.

2. Налаштувати вектор параметрів та матрицю коваріацій та ініціювати їх (рівняння 4.17 та 4.13). Типовим вибором початкових значень є $\theta(0) = 0$ і $P(0) = C.I$, де C це якась велика постійна і I одинична матриця.

3. Оновити вектор спостереження новими даними (рівняння 4.18).

4. Розрахувати матрицю коваріацій (рівняння 4.23).

5. Розрахувати вектор підсилення (рівняння 4.22).

6 Розрахувати нові параметри (рівняння 4.21).

7. Повернутися до кроку 3 і повторити.

4.4 Адаптивна пропорційно-інтегрально-диференціальна схема керування

Пропорційно-інтегрально-диференціальне керування розповсюджене у промисловості, оскільки воно просте і порівняно легке реалізації. У пропорційно-інтегрально-диференціальному керуванні правильна комбінація трьох дій керування маніпулює змінною, скажімо, сигналом про помилку. Для отримання ввідного сигналу керування похибка множиться на пропорційний коефіцієнт підсилення, інтегрується, диференціюється і помножується на інтегральний та похідний коефіцієнти підсилення, де всі три дії поєднуються разом. Пропорційно-інтегрально-диференціальне керування подібне до фазового компенсатора відставання. Він впливає як на високочастотні, так і на низькочастотні області, покращує стабільність системи, збільшує швидкість реакції та зменшує помилку стаціонарного стану. Поки параметри установки не змінюються, підсилення пропорційно-інтегрально-диференціального контролера можуть бути налаштовані для стабільної роботи. Для процесів, що змінюються в часі, ці параметри слід розраховувати адаптивно. Хоча пропорційно-інтегрально-диференціальне керування користується популярністю, про його впровадження в процеси механічної обробки ще не відомо.

4.4.2 Адаптивна пропорційно-інтегрально-диференціальна схема для керування процесом фрезерування

В цій роботі використовується схема самоналаштування як вона показана на рис. 4.2. В цілому параметри установки повинні бути ідентифіковані протягом кожного часу відбору проб, а параметри контролера регулюватися відповідно до методики проектування. Цьому підходу властиві кілька проблем, а саме збіжність параметрів та час обчислення, необхідний для ідентифікації параметрів процесу. Одним із способів подолання цієї проблеми є відокремлення незмінного в часі сервоприводу подачі від змінного в часі блоку процесу різання. Тому лише параметри процесу різання визначаються за допомогою вимірювань швидкості подачі та сили, використовуючи рекурсивну методику найменших квадратів, а потім ці параметри використовуються для визначення коефіцієнтів пропорційно-інтегрально-диференціального підсилення, як це буде пояснено далі. Цей метод зменшить кількість розрахункових параметрів з п’яти до двох, і не лише зменшить час обчислення, що критично для реального застосування, але також підвищує точність ідентифікації для пошуку ввідного сигналу керування.

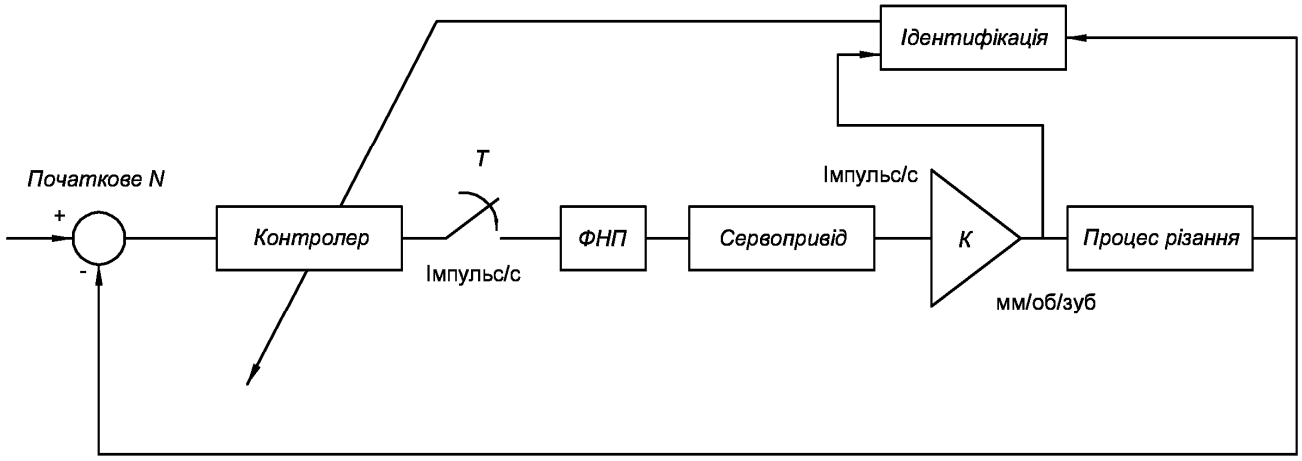


Рисунок 4.2 – Адаптивний пропорційно-інтегрально-диференціальний цикл керування

Вибір часу відбору проб важливий для проектування контролю. Високі частоти дискретизації є сприятливими, але вони збільшують вартість обладнання.

З іншого боку, низькі частоти дискретизації можуть пошкодити ввід керування і можуть призвести до нестабільності. Час забору повинен бути невеликим, але більшим, ніж час, необхідний для ідентифікації параметрів та обчислення ввідного сигналу керування. У цій роботі було обрано час забору проб у один цикл зуба. Причина в тому, що сили різання при фрезеруванні і частота проходження зуба періодичні, і найважливішою інформацією є максимальна результуюча сила в кожному циклі зуба.

Для всіх експериментів використовувалась фреза із двома зубами. Швидкість обертання шпинделя становила 775 об/хв на схемі керування.

Тому цикл відбору проб обчислюється як

$$T = \frac{60}{NZ} = \frac{60}{2 \times 775} = 0,0387. \tag{4.24}$$

Зважаючи на наявну обчислювальну потужність, цей час відбору проб достатній для розрахунку параметрів та керування вводом.

Еквівалентність фіксатора нульового порядку сервоприводу з часом забору рівним одному циклу зуба

$$G_S(z) = \frac{0,9518086(z + 0,00220946)}{z(z - 0,0461992)}. \tag{4.25}$$

Процес різання зображено з такою структурою:

$$G_p(z) = \frac{b_0}{z - a_1}. \tag{4.26}$$

Структура пропорційно-інтегрально-диференціального контролера [33]

$$G_C(z) = K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_d\left(1 - z^{-1}\right). \tag{4.27}$$

або

$$G_C(z) = \frac{z^2\left(K_p + K_I + K_d\right) + z\left(-K_p - 2K_d\right) + K_d}{z(z-1)}. \qquad (4.28)$$

Три невизначених параметри контролера (тобто K_p, K_I, K_d) мають бути прораховані на кожному циклі зуба.

Параметри сервоприводу подачі є незмінними в часі і наведені у рівнянні 4.25. Сервопривід подачі має два полюси, один в центрі (z = 0), а другий близько до центру (тбто z = 0,0461992). Другий полюс можна спокійно скасувати одним з нулів пропорційно-інтегрально-диференціального контролера. Параметри різання оцінюються рекурсивно для кожного циклу зуба. В попередньому розділі було показано, що параметр a_1 в процесі фрезерування завжди менший одиниці, таким чином полюс процесу повинен бути в межах одиничного кола, і його можна безпечно скасувати іншим нулем пропорційно-інтегрально-диференціального контролера.

Зв'язану функцію передачі сервоприводу подачі та процесу різання можна описати як установку $G_{pl}(z)$

$$G_{pl}(z) = G_S(z)G_p(z) = \frac{0{,}9518086\left(z + 0{,}0020946\right)K\hat{b}_0}{z\left(z^2 - \left(0{,}0461992 + \hat{a}_1\right)z + \left(0{,}0461992\right)\hat{a}_1\right)}, \qquad (4.29)$$

де K це коефіцієнт підсилення ведучого гвинта столу який рівний 0,0000491 мм/об/зуб/імпульс/с;

$\hat{b}_0, \hat{a}_1$ - параметри процесу різання.

Щоб усунути нульові значення сигналу

$$z^2 - \frac{K_p + K_d}{K_p + K_I + K_d}z + \frac{K_d}{K_p + K_I + K_d} = z^2\left(0{,}0461992 + \hat{a}_1\right)z + \left(0{,}0461992 + \hat{a}_1\right). \qquad (4.30)$$

Для вищенаведеного рівняння поліномні коефіцієнти мають бути рівними

$$\frac{K_p + 2K_d}{K_p + K_I + K_d} = \hat{a}_1 + 0,0461992 \frac{K_p + 2K_d}{K_p + K_I + K_d} = a. \tag{4.31}$$

$$\frac{K_d}{K_p + K_I + K_d} = \hat{a}_1 \times 0,0461992. \tag{4.32}$$

Є три невідомих параметри у двох рівняннях. Третє необхідне рівняння можна знайти з рівняння стійкості системи. Тест на стійкість Журі показує, чи корені поліномів знаходяться всередині одиничного кола. Процедура проста у застосуванні, її можна знайти в більшості підручників з керування. Щоб застосувати тест Журі, слід вивести характеристичне рівняння. Якщо припустити, що два поліноми скасовані через усунення нульових значень сигналу, залишковий перехідний цикл функції системи зменшується до

$$G_{OL(z)} = \frac{K\left(K_p + K_I + K_d\right) b_0 \left(0,9518086\right)\left(z + 0,0020946\right)}{z\left(z - 1\right)}. \tag{4.33}$$

Закритий цикл функції передачі системи стає

$$G_{CL} = \frac{G_{OL}\left(z\right)}{1 + G_{OL}\left(z\right)}; \tag{4.34}$$

$$G_{CL} = \frac{A\left(z + 0.0020946\right)}{z^3 + z^2 + A_z + \left(0,0020946\right) A}; \tag{4.35}$$

де $$A = K\left(K_p + K_I + K_d\right)\left(0.9518086\right)\hat{b}_0. \tag{4.36}$$

Характеристичне рівняння

$$F(z) = z^3 + z^2 + A\,z + 0,0020946A, \tag{4.37}$$

або

$$\begin{gathered} F(z) = z^3 + z^2 + (K_p + K_I + K_d)(K\hat{b}_0 0,9518086) + \\ (K_p + K_I + K_d)(K\hat{b}_0)(0,0020946)(0,9518086) \end{gathered} \tag{4.38}$$

Загальна форма характеристичного рівняння

$$F(z) = a_o z^n + a_1 z^{n-1} + ¼ + a_{n-1} z + a_n. \tag{4.39}$$

Вимоги до тесту Журі такі.

1. $|a_n| < 1$ що означає

$$0,0020946A < 1, \tag{4.40}$$

або

$$K(K_p + K_I + K_d)(0,0019936) < 1. \tag{4.41}$$

2. $F(z=1) > 0$ або

$$A + 0,0020946A > 0. \tag{4.42}$$

і оскільки і коефіцієнт підсилення ведучого гвинта K та коефіцієнт підсилення процесу різання $\hat{b}_0$ позитивні, то

$$K_p + K_I + K_d > 0. \tag{4.43}$$

3. $F(z=-1)<0.$

$$-2-A+0,0020946A<0, \tag{4.44}$$

що не приносить ніякої нової інформації

4. З таблиці Журі

$$\left|0,0020946A^2-1\right| > \left|0,0020946A+A\right|, \tag{4.45}$$

що за допомогою першої умови та, нехтуючи умовою другого порядку, скорочується до

$$A < 0,9979097; \tag{4.46}$$

або

$$K_p+K_I+K_d<\frac{1,0484353}{\hat{b}_0K}. \tag{4.47}$$

Рівняння 4.43 та 4.47 ілюструють обмеження стійкості пропорційно-інтегрально-диференціального контролера. Тим не менше, ці рівняння не вказують де розміщені полюси системи закритого циклу. Дві умови можна об’єднати таким чином

$$0<K_p+K_I+K_d<\frac{1,0484353K_G}{\hat{b}_0K}, \tag{4.48}$$

де K_G коефіцієнт між 0 та 1.

Для кращого розуміння місця розташування полюсів, підставляємо рівняння 4.48 у рівняння 4.33, а кореневий геометричний простір системи наноситься як показано на рис. 4.3. Один полюс завжди залишається близько до центру одиничного кола. Зі збільшенням K_G два полюси рухаються назустріч один

одному по реальній осі, один від початку, а другий по одиничному колу. Коли збігаються полюси, K_G має значення 0,2495, і система стає критично затухаючою. Полюси відходять від реальної осі і досягають своїх кінцевих значень 0,5019 ± 0,8618j на одиничному колі, де система досягає межі стійкості, а K_G стає одиницею. У цій роботі K_G обрано на рівні 35% від його кінцевого значення, що відповідає одному полюсу у початку координат, а два інших - 0,5019 ± 0,3158j. Система має коефіцієнт затухання 0,71 і власну частоту 20,3 рад/сек. Час підйому та час затухання системи становлять 123 мілісекунди та 323 мілісекунди відповідно. Класично це оптимальний вибір, оскільки при невеликому перебігу досягається найшвидша реакція.

4.4.3 Результати моделювання та експерименту

Для оцінки продуктивності системи, цей контролер змодельований для різної осьової глибини різання. Схема різання показана на рис. 4.3. Для всіх експериментів використовувався однаковий профіль заготовки.

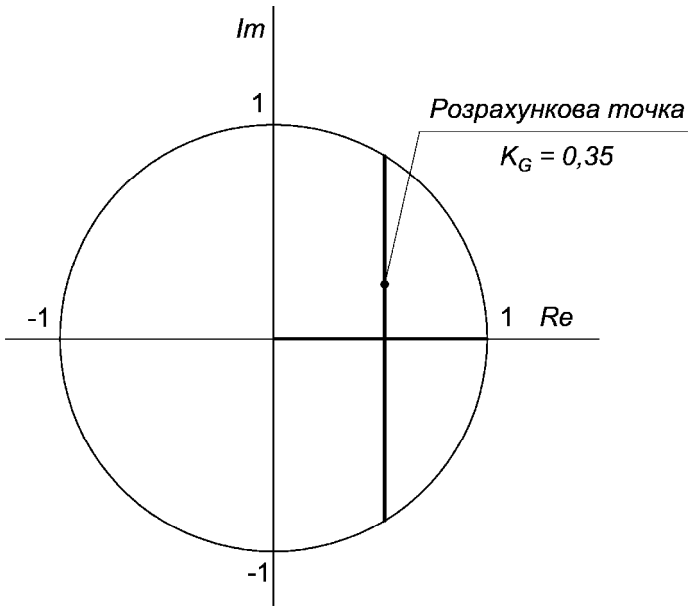


Рисунок 4.3 – Кореневий геометричний простір для пропорційно-інтегрально-диференціальної схеми

На рис. 4.4 показано силу різання та вхід керування. Контролер регулює швидкість подачі таким чином, що результуюча сила відстежує необхідну еталонну силу після кожного кроку зміни осьової глибини різання. Стрибки сили різання зумовлені часом, необхідним для ідентифікації параметрів установки після різких змін осьової глибини різання. Ідентифікація відіграє важливе значення у роботі контролерів цього типу. В ідеалі, час, необхідний для ідентифікації параметрів, щонайменше дорівнює кількості параметрів, помножених на час відбору проб (що в цьому випадку становить один оборот різця). На практиці він більший і стосується сили ввідного сигналу керування. Коефіцієнт забуття встановлюється рівним одиниці. Коли прогнозована помилка, тобто різниця між прогнозованим та виміряним виводом, перевищує 5 відсотків еталонної сили, матриця коваріації скидається до великого значення (1000), а

коефіцієнт забуття зменшується до 0,995. Це допоможе методу ідентифікації зійтися швидше. Варто зазначити, що в «стаціонарних умовах» або коли в процесі відсутні зміни, значення матриці коваріації дорівнює нулю, і зазвичай кажуть, що алгоритм оцінки «спить». Коли відбувається різка зміна осьової глибини різання, ідентифікація не може працювати належним чином, і контролер стає коливальним. Це коливання небажане, хоч і допоможе врешті-решт алгоритму оцінки зійтися. Скидання здійснюється нечасто, і лише при перевірці лічильника, оскільки занадто часте скидання також шкідливе. На полюс процесу різання накладається обмеження, оскільки можливо, що після кожної зміни процесу деякі початкові параметри оцінки помиляються. Полюс процесу в цих випадках обмежується одиничним колом.

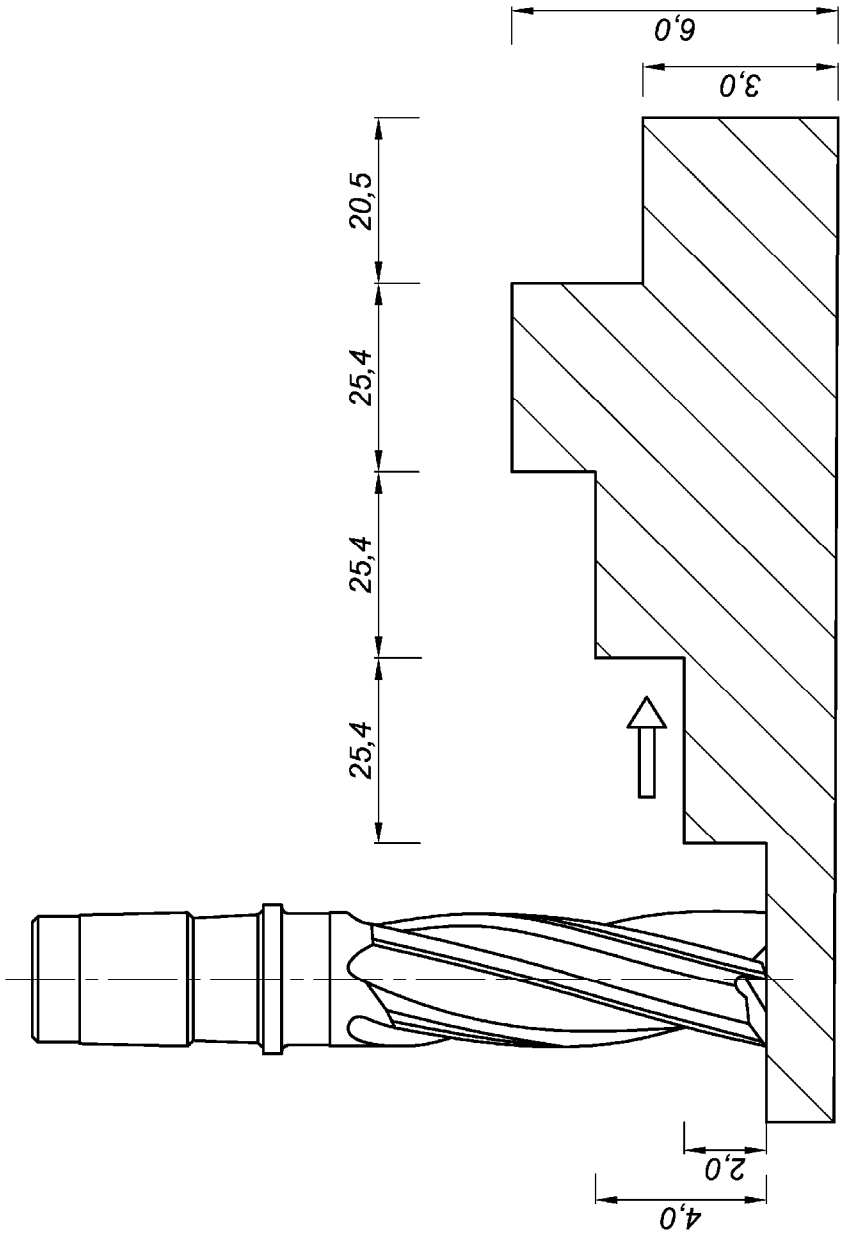


Рисунок 4.4 – Профіль різання

Таке ж моделювання було проведено за наявності вильоту, який моделюється шляхом накладення зміни 10% глибини різки у кожному циклі зуба. Це важливо, оскільки, регулюванням вставок на інструменті, виліт був завжди зведений до мінімуму, проте він всерівно був присутній. Це явище, яке діє як визначені завади в системі, має негативний вплив на контролер під час різання. На рисунку 4.6 показано силу різання та ввід керування для пропорційно-інтегрально-диференціального контролера за наявності вильоту. Зрозуміло, що система піддається доброму керуванню.

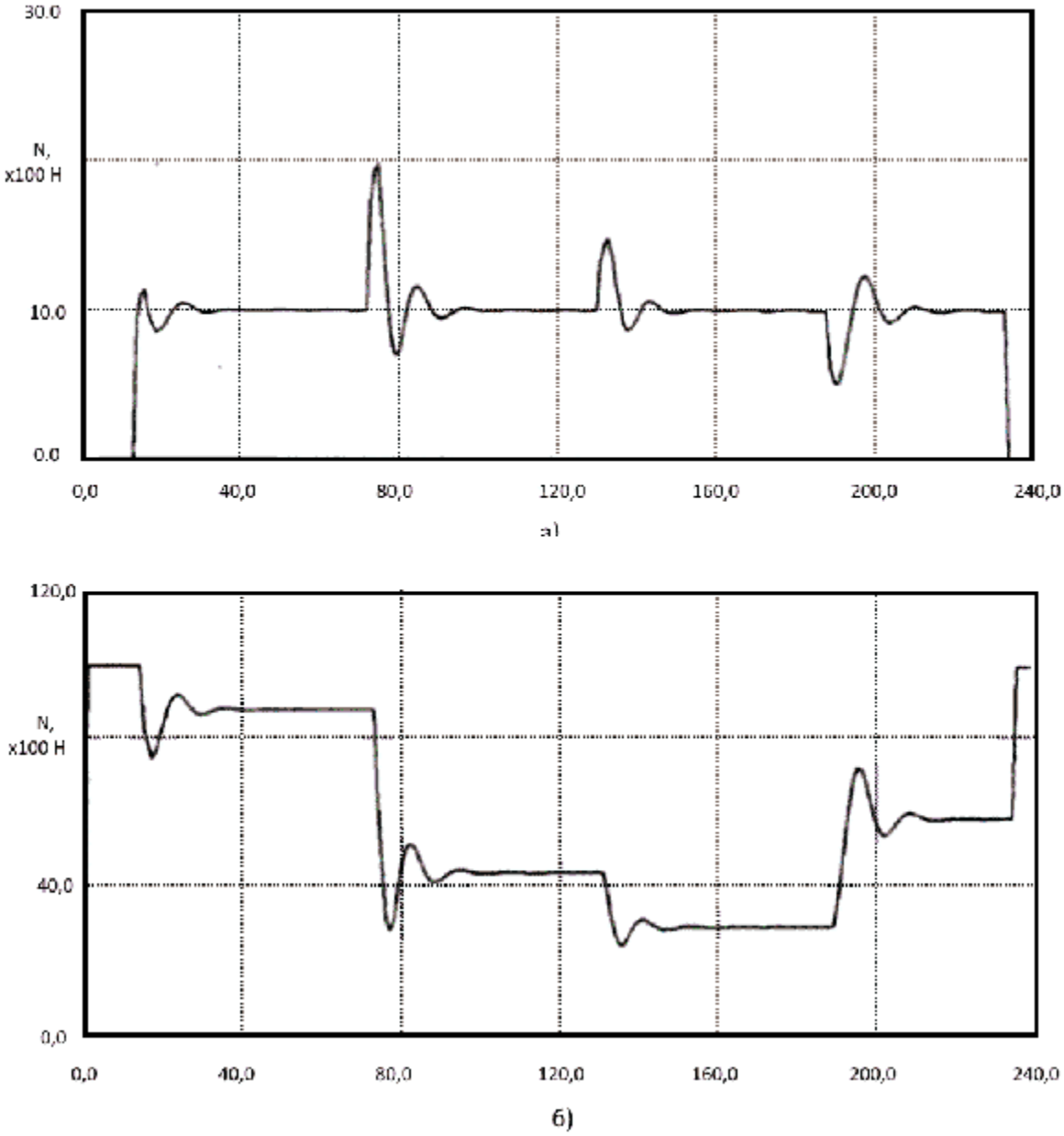


Рисунок 4.5 – Моделювання пропорційно-інтегрально-диференціального контролера : а) реакція сили різання; б) ввід керування

У серії випробувань пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер був встановлений на багатоцільовому верстаті з пристроєм числового програмного керування. Матеріал заготовки – алюміній 7075T651. Для перевірки алгоритму було вирізано прямий паз. Швидкість шпинделя становила 775 об/хв, а діаметр фрези був 2,54 мм. Еталонна сила становила 1000 Ньютонів. Для усунення високочастотних завад при вимірюванні був використаний фільтр низьких частот з частотою розриву 100 Гц. Тахосигнал та силові сигнали в напрямку X та Y передавались через фільтр. Щоб вберегти установку від несподіваних команд керування, які найбільш імовірні при кроках передачі,

контролер був обмежений до максимального значення. З іншого боку, щоб запобігти руху столу назад, нижня межа також була накладена на контролер. До і після механічної обробки, або під час різання в повітрі, контролер встановлювався для переміщення столу з постійною швидкістю. Виміряна максимальна сила показана на рисунку 4.6.

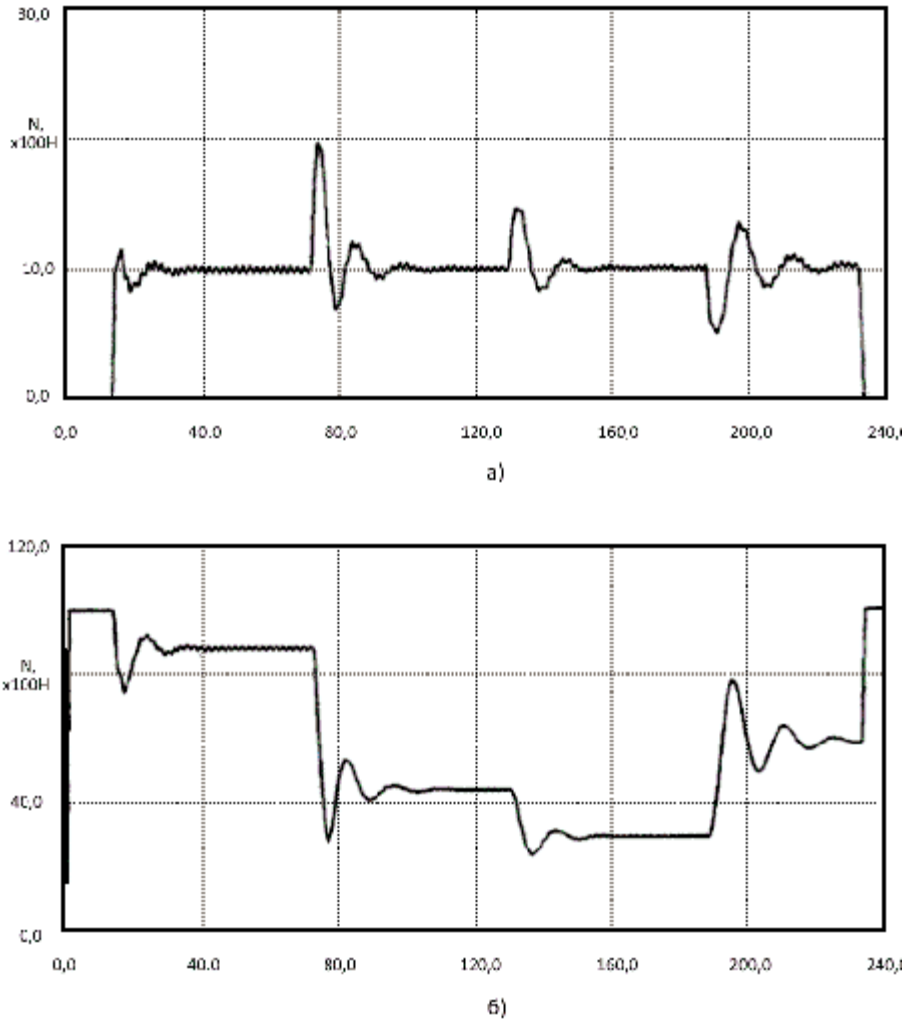


Рисунок 4.6 – Моделювання пропорційно-інтегрально-диференціального контролера з вильотом: а) реакція сили різання; б) ввід керування

Максимальна сила відслідковує еталонну силу, хоча під час змін у осьовому напрямку в сигналі сили спостерігаються «стрибки». Ввід керування, виміряний тахосигнал швидкості подачі та розрахункові параметри показані на рис. 4.7, 4.8 та 4.9. Реакцією вхідного сигналу керування є дзеркальне відображення профілю різання.

Одним недоліком цього контролера є вимога до ґрунтовних знань сервопроцесів та різання для усунення нульових значень сигналу. В протилежному випадку характеристичне рівняння може мати вищий порядок з

полюсом або полюсами поза одиничним колом.

4.5 Схема адаптивного керування розміщенням числа пар полюсів

4.5.1 Загальні положення

Контролери з функцією самоналаштування на основі розміщення числа пар полюсів були вперше запропоновані Велштед з співавторами і Астром і Віттенмарк. В цьому підході спочатку також визначаються параметри моделі, а потім розробляється контролер, припускаючи, що ці розрахунки параметрів є правильними. Пояснена тут процедура проектування базується на моделі введення-виведення. Основна ідея полягає у виборі лінійної структури контролера, як показано на рис. 4.12, та зміні її параметрів таким чином, щоб система замкнутого циклу мала бажані технічні характеристики. Однією з переваг контролера розміщення числа пар полюсів є те, що стабільність системи може бути забезпечена правильним вибором полюсів закритої системи. З іншої сторони, завдяки редагуванню нулів замкнутої системи покращується перехідний процес.

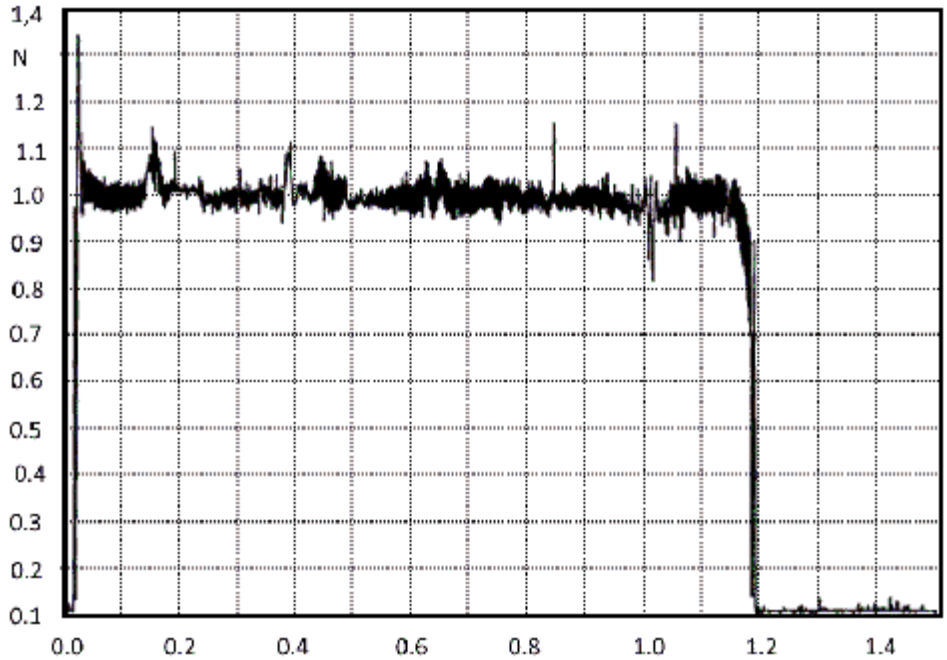


Рисунок 4.7 – Тестова механічна обробка з пропорційно-інтегрально-диференціальним контролером, вимірювання грвничної сили

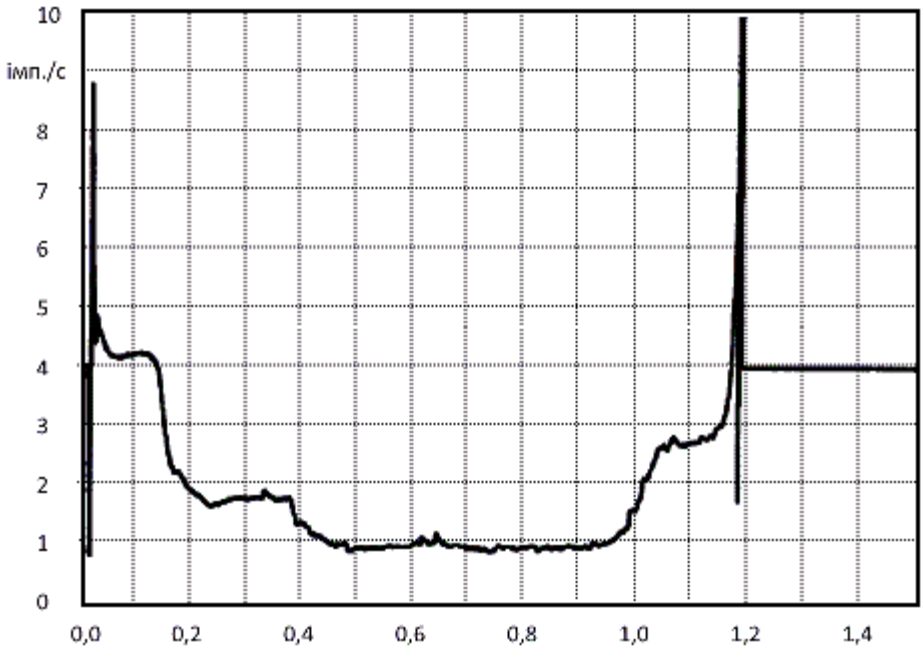


Рисунок 4.8 – Тестова механічна обробка з пропорційно-інтегрально-диференціальним контролером, ввід керування

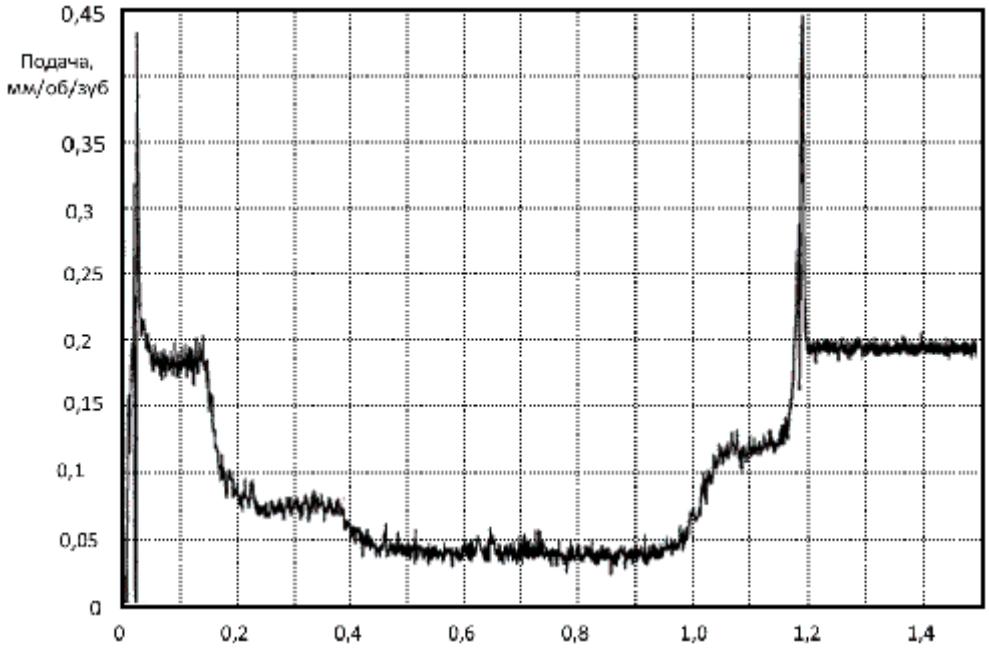


Рисунок 4.9 – Тестова механічна обробка з пропорційно-інтегрально-диференціальним контролером, вимірювання швидкості подачі

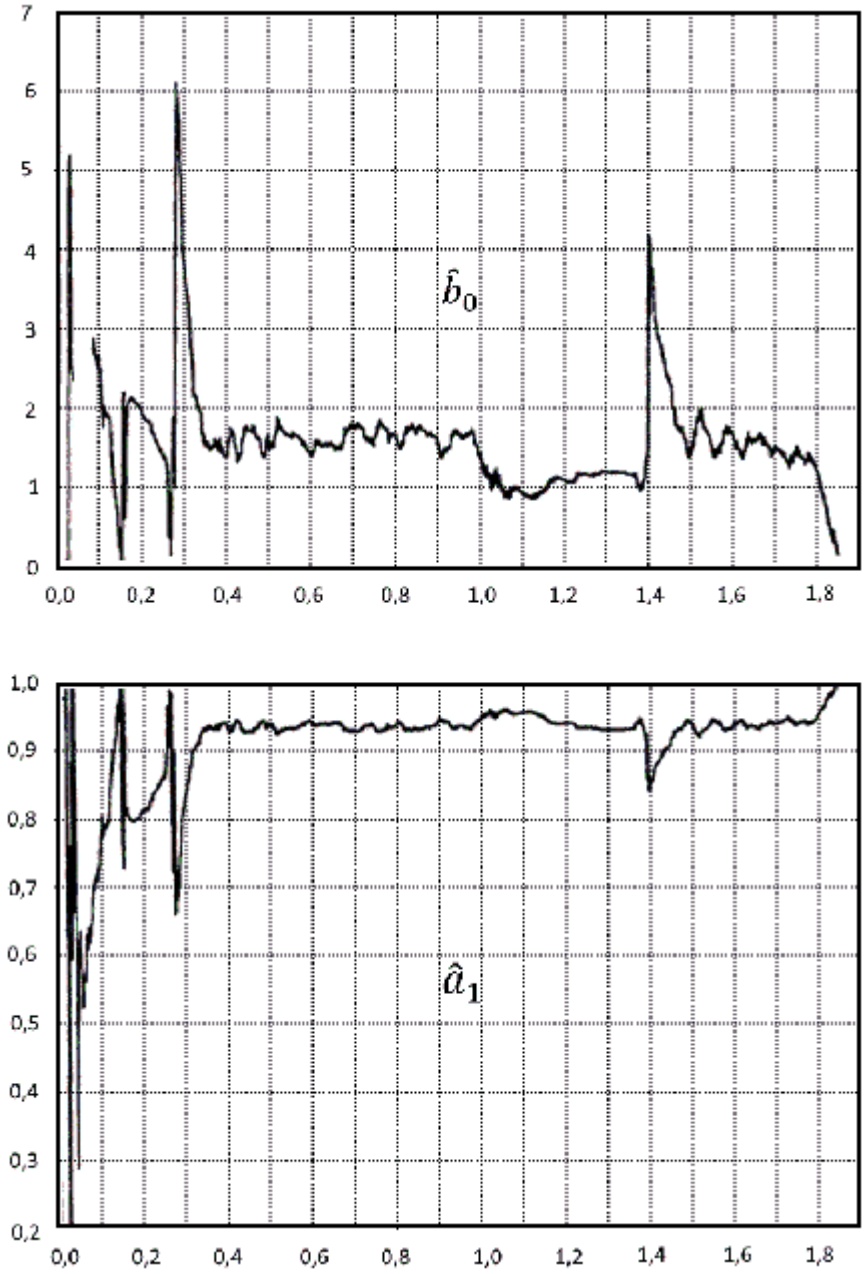


Рисунок 4.10 – Тестова механічна обробка з пропорційно-інтегрально-диференціальним контролером, розрахункові параметри

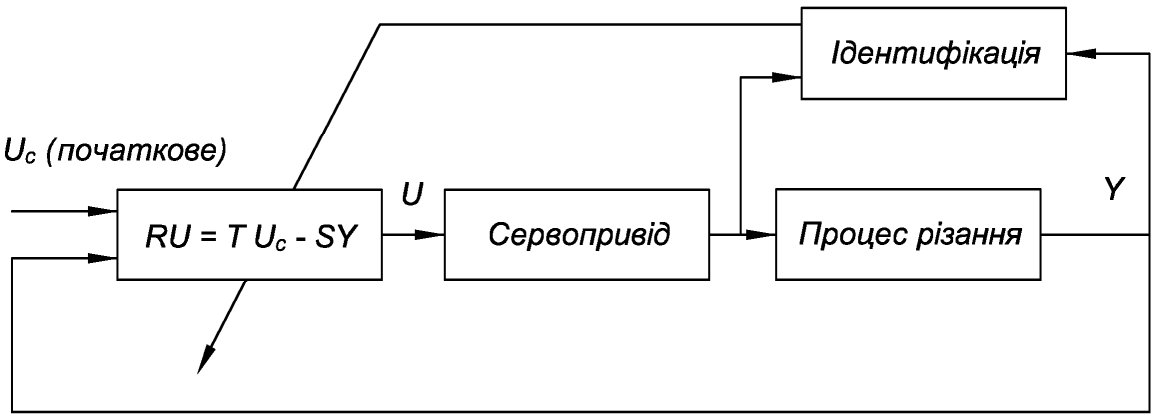


Рисунок 4.11 – Адаптивний цикл керування розміщенням числа пар полюсів

4.5.2 Аналіз моделі

Бажано розробити адаптивний контролер, який може підтримувати прикладену силу різання на хвостовику фрези на безпечному постійному рівні. Контролер повинен бути стабільним, стійким до змін умов різання та мати прийнятну перехідну реакцію. Керований процес має дві каскадні динаміки. Перша - це динаміка керування приводом подачі, що змінюється в часі (див. рівняння 4.65), а друга - це змінний у часі процес різання, параметри якого змінюються залежно від змін геометрії заготовки під час обробки. Комбіноване керування приводом подачі та динаміка процесу обробки називаються установкою. Передача функції установки подається як:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{B\left(q^{-1}\right)}{A\left(q^{-1}\right)}, \tag{4.49}$$

де $y(t)$ і $u(t)$ це відповідно сила та керування ввідним сигналом, а q це оператор зміщення часу вперед. Припущено, що поліноми A та B відносно прості та $\deg A \geq \deg B$, тобто система описує зв'язок причини і наслідку. Поліномне A припущене як нормоване, тобто перший коефіцієнт рівний одиниці. Підстановка параметрів керування та процесу приводу подачі в рівняння 4.49 дає функцію передачі установки, яка включає всі вищезазначені вимоги.

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{k_1(z+a)}{z\left(z^2 + A_1 z + A_2\right)}, \tag{4.50}$$

де $k_1 = K\hat{b}_0 \times 0,09518$;

$a = 0,0020946$;

$A_1 = -\hat{a}_1 - 0,04614$;

$A_2 = +0,04614 \times \hat{a}_1$.

Параметри процесу різання $\hat{a}_1$ та $\hat{b}_0$ змінні в часі, та розраховуються на кожен цикл зуба, використовуючи рекурсивну методику найменших квадратів.

Адаптивний контролер, що використовує схему розміщення числа пар полюсів, націлений на те, щоб передавальна функція закритого циклу між еталонною та фактичною силами підпорядковувалась даній бажаній динаміці моделі

$$\frac{y(t)}{u_c(t)} = \frac{B_m(q)}{A_m(q)}. \tag{4.51}$$

Корені характеристичного рівняння A_m вибираються в межах одиничного кола, щоб забезпечити стабільність системи. Більше того, A_m закладено для забезпечення перехідних характеристик відгуку контролера. Для відображення бажаного результату обрано динаміки другого порядку

$$A_m(z) = z^2 - 2e^{-z_n wT}\cos\left(w_n\sqrt{1-z^2T}\right)z + e^{-2zw_nT}, \tag{4.52}$$

що відповідає безперервній системі з бажаним коефіцієнтом затухання ζ і власною частотою ω_m. T – час відбору проб, який дорівнює одному циклу зуба. Вибирається ідеальна пропорція затухання ζ = 0,7 для отримання мінімального промаху під час перехідних процесів. Обраний час наростання чотирьох циклів зуба відповідає природній частоті 16 рад/с.

$$w_m = \frac{2,5}{4T} = 16 \text{ рад/с}. \tag{4.53}$$

Характеристичне рівняння результуючої моделі можна знайти з рівняння 4.92:

$$A_m(z) = z^2 - 1,162z + 0,4132. \tag{4.54}$$

Щоб знову отримати закритий одиничний цикл, чисельник моделі

вибирається як

$$B_m(z) = A_m(z=1) = 0,2512. \tag{4.55}$$

Бажана передавальна функція системи тоді виражається як:

$$\frac{B_m(z)}{A_m(z)} = \frac{0,2512}{z^2 - 1,162z + 0,4132}. \tag{4.56}$$

4.5.3 Теорія розміщення числа пар полюсів для керування процесом обробки

Загальна форма самоналаштовуваного регулятора показана на рис. 4.11. Поліноми $S(q^{-1}), T(q^{-1})$ та $R(q^{-1})$ відповідно представляють регулятори зворотного зв'язку, прямої подачі та помилок, які повинні визначатися адаптивно в кожному циклі зуба. Установка, якою здійснюється керування, описана рівнянням. 4.50, яке можна переписати у вигляді різницевого рівняння як рівняння 4.49. Функція передачі замкнутого циклу контролера отримана з рис. 4.12 як:

$$\frac{y(k)}{u_c(k)} = \frac{BT}{AR + BS}, \tag{4.57}$$

де k – лічильник вибірки.

Зауважимо, що оператор q опущений як аргумент поліномів для спрощення. Для того, щоб система поводилась як бажана модель, має бути забезпечена така рівність

$$\frac{BT}{AR + BS} = \frac{B_m}{A_m}. \tag{4.58}$$

Завдання на проектування визначається як знаходження поліномів R, S і T за допомогою функції установки та бажаної передавальної функції моделі.

Зв’язок між бажаною еталонною силою F_r і регульованою швидкістю подачі u можна виразити як

$$R \times u \times (k) = T \times u_c \times (k) - S \times y \times (k). \tag{4.59}$$

У теорії простору станів показано, що регулятор, заданий рівнянням 4.59 відповідає поєднанню оператора та стану зворотного зв’язку. Оператор

розроблений таким чином, що зміни в командних сигналах не породжують помилок у оператора. Хоча командним сигналом при керуванні процесом фрезерування є еталонна сила, яка є сталою, розглядається загальний випадок, коли еталонна сила може змінюватися. Це призводить до скасування коефіцієнта в правій частині рівняння. 4.58 і може бути інтерпретований як поліном оператора A_0, який підібраний таким чином, щоб усі його нулі були в одиничному колі. Звідси випливає, що рівняння 4.58 можна записати як

$$\frac{BT}{AR+BS}=\frac{B_m A_0}{A_m A_0}. \tag{4.60}$$

На установці, якою має здійснюватися керування, є один нуль всередині одиничного кола, а тому він можу бути легко скасований одним з полюсів закритого циклу, щоб отримати бажану відповідь. Чисельник установки можна ввести як

$$B=B^{+}\times B^{-}, \tag{4.61}$$

де $B^{+}=z+0,002046,\ B^{-}=0,9518\times K\times\hat{b}_0.$

Отже B^{-} постійна. A та B взаємно прості, тому щоб скасувати B^{+} одним з полюсів передавальної функції закритого циклу, поліномне R має задовільнити наступну умову

$$R=B^{+}R¢ \tag{4.62}$$

Оскільки B^{-} зберігається, воно не є коефіцієнтом характеристичного рівняння системи замкненого циклу, а тому, щоб задовольнити рівняння. 4.60, ним повинен бути коефіцієнт B_m

$$B_m = B^- B_m^{¢}. \tag{4.63}$$

Підставивши рівняння 4.61, 4.62 і 4.63 в рівняння 4.60 отримаємо

$$\frac{B^- T}{AR^{¢} + B^- S} = \frac{B^- B_m^{¢} A_0}{A_m A_0}. \tag{4.64}$$

Наступна умова має бути виконана щоб задовольнити рівняння 4.64

$$AR^{¢} + B^- S = A_m A_0. \tag{4.65}$$

$$T = B_m^{¢} A_0. \tag{4.66}$$

Поліноми A, A_m та A_0 в рівнянні 4.65 є відомими, коли для поліномів R' та S потрібно знайти рішення. Щоб отримати унікальне рішення діофантового рівняння (рівняння 4.65) , необхідно забезпечити умову:

$$\deg S \text{ £ } \deg A. \tag{4.67}$$

Степінь поліномного S підібрано як

$$\deg S = \deg A - 1. \tag{4.68}$$

Більше того, щоб закон керування в рівнянні 4.59 спрацював, наступні умови мають бути забезпечені:

$$\deg A_0 \text{ ³ } 2\deg A_0 - \deg A_m - \deg B^+ - 1. \tag{4.69}$$

$$\deg R \text{ ³ } \deg A_0 + \deg A_m + \deg B^+ - \deg A. \tag{4.70}$$

4.5.4 Застосування схеми розміщення числа пар полюсів для керування процесом фрезерування

Описана в попередньому розділі схема розміщення числа пар полюсів була застосована для управління процесом фрезерування на установці, описаній рівнянням 4.50. Бажано, щоб процес фрезерування проходив відповідно до моделі, обраної в рівнянні 4.56.

Умови перераховані в рівняннях 4.68 та 4.69 застосовані на установці та моделі щоб знайти порядок поліномів.

$$\text{Deg } A_0 = 2;$$
$$\text{Deg } S = 2;$$
$$\text{Deg } R = 2.$$

Як правило, динаміка оператора має бути швидшою ніж бажана реакція закритого циклу [41, с 502-503], а тому аперіодичний оператор обирається як

$$A_0 = z^2. \tag{4.71}$$

Оскільки коефіцієнт поліномного R скасовується нульовим B^+ установки (рівняння 4.102), поліномне $R¢$ можна виразити як поліном першого порядку

$$R¢ = z + r_1. \tag{4.72}$$

Регулятор зворотного зв’язку S виражений як:

$$S(z) = s_0 z^2 + s_1 z + s_2. \tag{4.73}$$

$$\begin{gathered} z(z - 0,0461992)\times(z - \hat{a}_1)\times(z + r_1) + \\ +(s_0 z^2 + s_1 z + s_2)\times K = z^2(z^2 - 1,162z + 0,4132), \end{gathered} \tag{4.74}$$

$$r_1 = -1{,}1158 + \hat{a}_1 r. \tag{4.75}$$

$$s_0 = \frac{0{,}4132 + r_1\hat{a}_1 + 0{,}0461992\left(r_1 - a_1\right)}{k_1}. \tag{4.76}$$

$$s_1 = \frac{-0{,}0461992\left(r_1\hat{a}_1\right)}{k_1}. \tag{4.77}$$

$$s_2 = 0. \tag{4.78}$$

Підстановка поліномів в рівняння 4.65 дає діофантове рівняння отримане результатами r_1, s_0 та s_1 обчислені використовуючи вищенаведені рівняння за кожен відбір проби, а поліноми S та R розраховані таким чином

$$S = z\left(s_0 z + s_1\right), \tag{4.79}$$

і з рівняння 4.102

$$R = B^{+}R¢= \left(z + 0{,}0020946\right)\left(z + r_1\right). \tag{4.80}$$

Поліномне T розраховане з рівняння 4.76

$$T = B_m¢A_0 = z^2\,\frac{0{,}2639}{K\hat{b}_0}. \tag{4.81}$$

Процес обробки параметрів $\hat{b}_0$ та $\hat{a}_1$ визначені рекурсивно на кожному проміжку керування (тобто циклі зуба), щоб адаптивно визначити поліномні параметри наведені в рівняннях 4.119, 4.120 і 4.121.

Ці поліноми задовольняють причинно-наслідкові вимоги

$$\deg R \le \deg T;$$
$$\deg R \le \deg S.$$

Ввідний сигнал управління даний як

$$R(q^{-1})u(k) = T(q^{-1})u_c(k) - S(q^{-1})y(k). \tag{4.82}$$

Псевдокод для пропорційно-інтегрально-диференціального алгоритму керування можна побудувати таким чином.

1. Виміряти максимальну результуючу силу та тахосигнал.
2. Визначити параметри моделі.
3. Знайти коефіцієнти підсилення K_p, K_I та K_d.
4. Обчислити помилку сигналу віднявши виміряну силу різання від еталонного ввідного сигналу.
5. Обчислити ввід керування використовуючи відомі підсилення та помилку сигналу як аргументи рівняння 4.68.
6. Зачекати до наступного відбору проби, повернутися до першого кроку та повторити.

Псевдокод для алгоритму керування розміщенням числа пар полюсів.

1. Виміряти максимальну результуючу силу та тахосигнал.
2. Визначити параметри моделі.
3. Обчислити поліноми R, S та T згідно рівнянь 4.60, 4.69 та 4.61.
4. Обчислити ввідний сигнал керування з рівняння 4.62.
5. Зачекати до наступного відбору проби, повернутися до першого кроку та повторити.

4.5.5 Результати моделювання та експерименту

Результати моделювання для контролера розміщення числа пар полюсів зображені на рис. 4.12. Було використано такий самий профіль різального інструменту та значення еталонної сили, що і у випадку з пропорційно-інтегрально-диференціальним контролером. Алгоритм також був змодельований за наявності вильоту. Реакція сили різання та вводу керування показані на рис. 4.28. Як показано в моделюванні, контролер розміщення числа пар полюсів може слідувати еталонній силі навіть при різких змінах осьової глибини різання. Реакція подібна до реакції пропорційно-інтегрально-диференціального контролера, оскільки характеристичні рівняння для обох схем майже однакові.

Щоб дозволити порівняння, алгоритм розміщення числа пар полюсів був запущений на багатоцільовому верстаті з пристроєм числового програмного керування за тих самих умов, що і пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер. Ідентифікація параметрів має ту саму процедуру, що і у пропорційно-інтегрально-диференціальному випадку, щоб запобігти дрейфу параметрів. Якщо передбачена помилка була меншою за мінімальне значення (один відсоток еталонної сили) під час різання в стаціонарному режимі, тоді попереднє вхідне значення управління надсилається на сервопривід. Виміряна сила різання показана на рис. 4.13. Вивід добре відстежує еталонний сигнал. Варто зазначити, що висота стрибків під час експериментальної механічної обробки, як правило, нижча, ніж модельованих. Причина полягає в тому, що під час різання фреза поступово проникає у плоску поверхню заготовки, коли при моделюванні зміни відбуваються раптово. Керуючий ввідний сигнал, виміряний тахосигнал та розрахункові параметри показані на рис. 4.14, 4.15 та 4.16. Параметри повільно сходяться до своїх справжніх значень. Зміна осьової глибини різання від 6 до 3 мм демонструє однакову реакцію при моделюванні та експерименті. Варто зазначити, що після відповіді схожої на «сплеск», параметри швидко сходяться до своїх кінцевих значень, і контролер працює задовільно.

Одним недоліком схеми розміщення числа пар полюсів є те, що структура

установки повинна бути відома заздалегідь. Якщо модель і процес не збігаються, контролер може стати нестабільним.

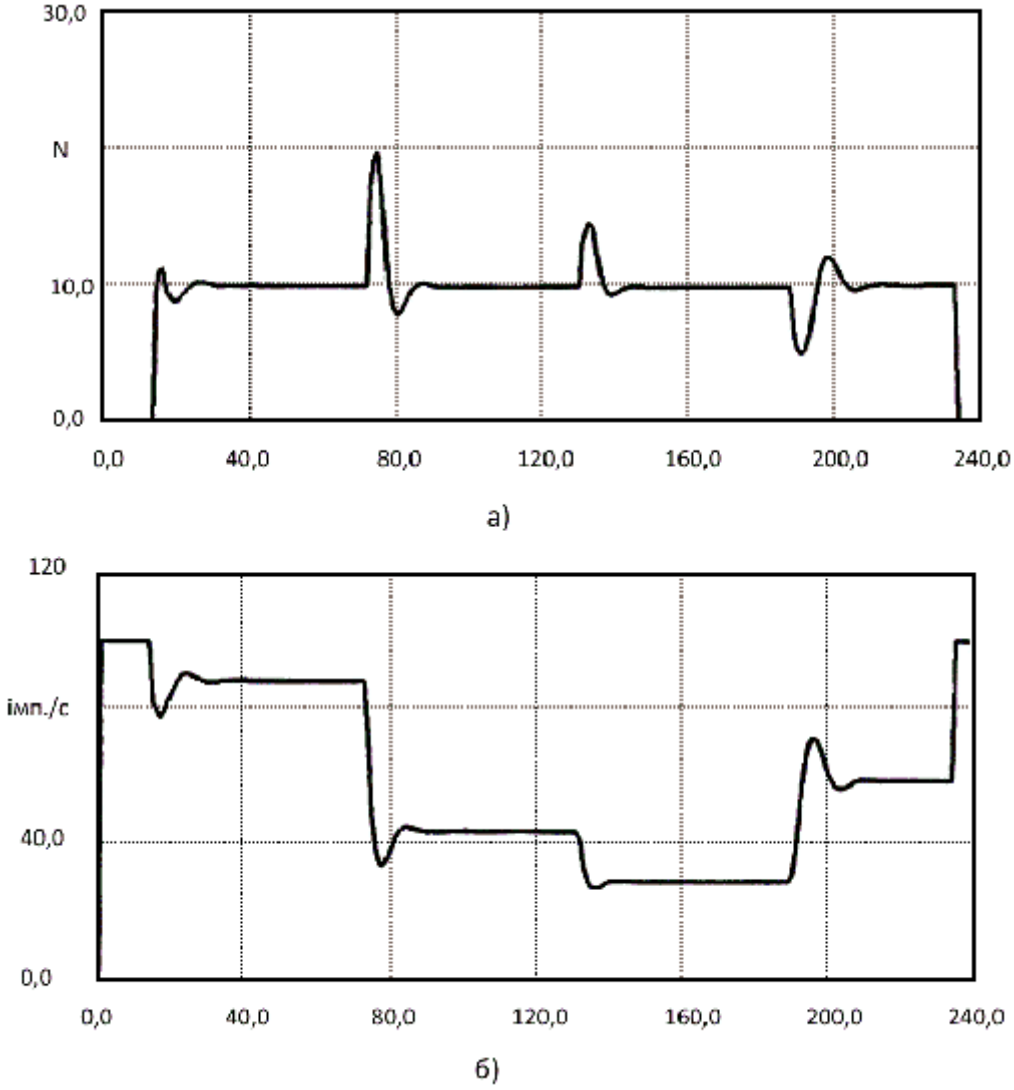


Рисунок 4.12 – Моделювання контролера розміщення числа пар полюсів: а) реакція сили різання; б) ввід керування

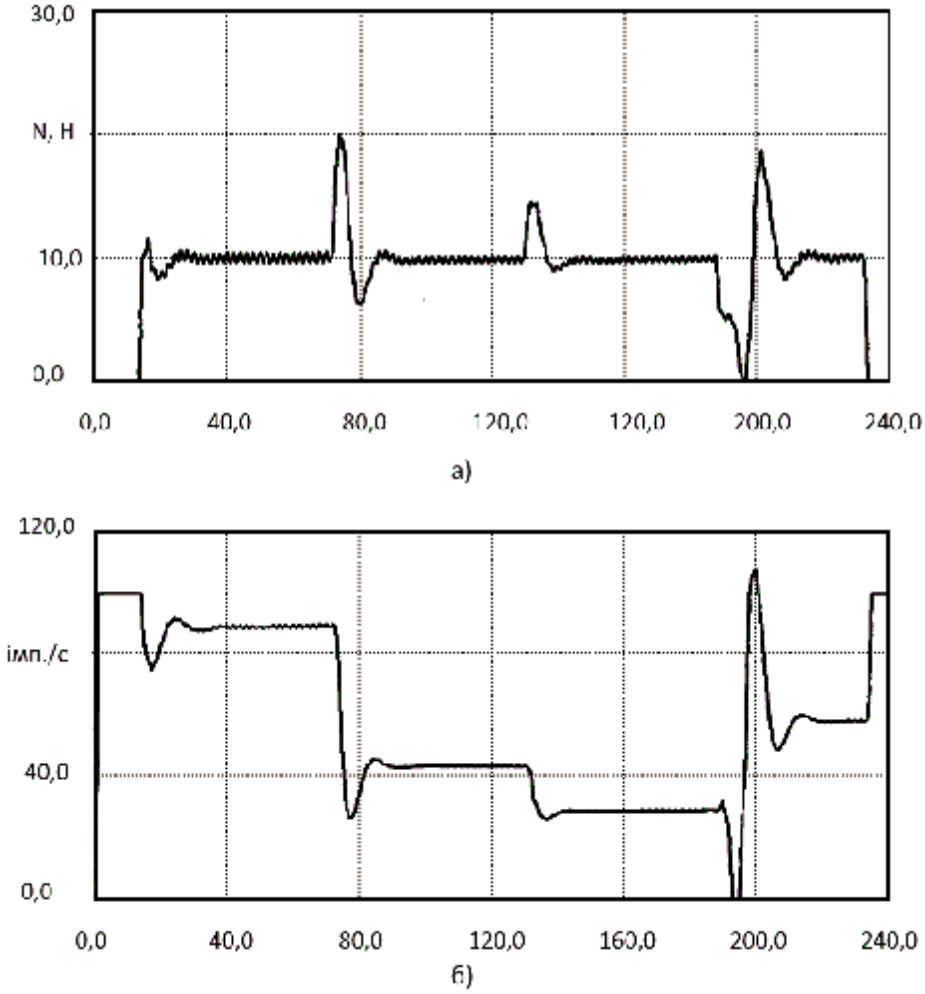


Рисунок 4.13 – Моделювання контролера розміщення числа пар полюсів з вильотом: а) реакція сили різання; б) ввід керування

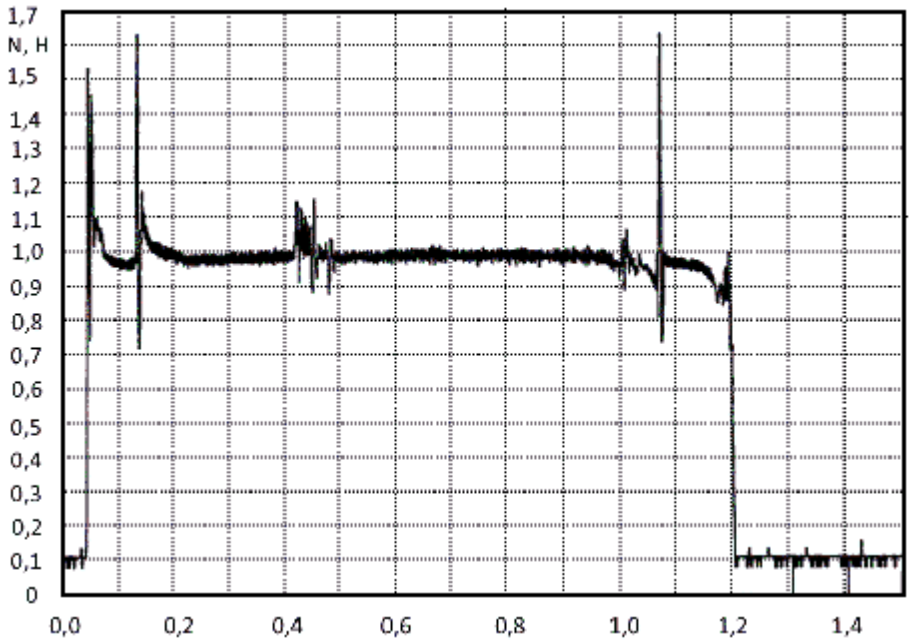


Рисунок 4.14 – Тестова механічна обробка з адаптивним розміщенням числа пар полюсів, вимірювання граничного зусилля

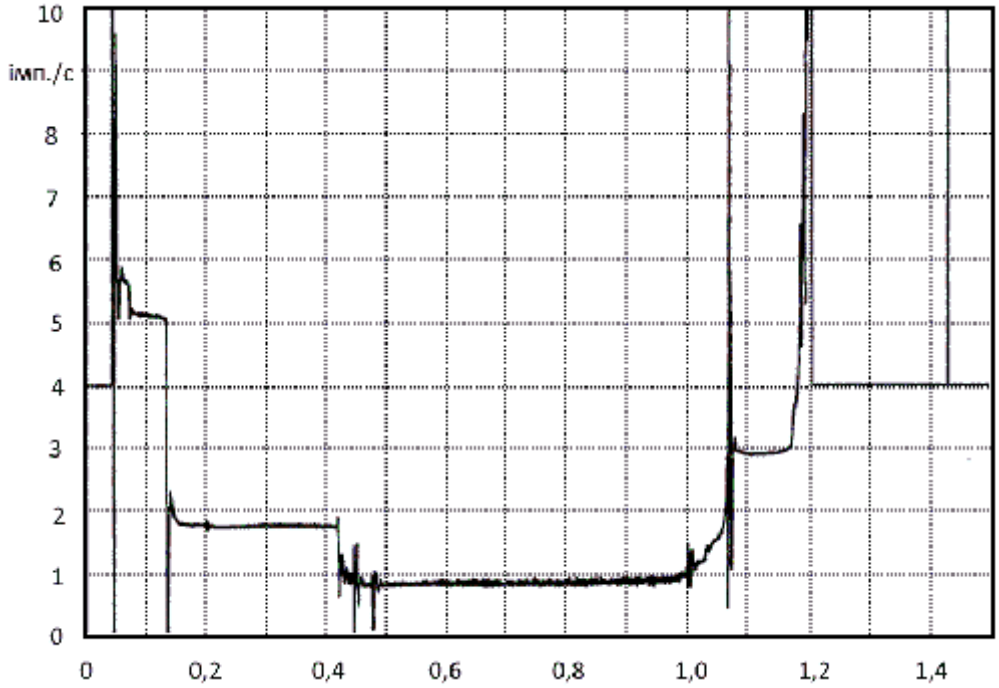


Рисунок 4.15 – Тестова механічна обробка з адаптивним розміщенням числа пар полюсів, ввід керування

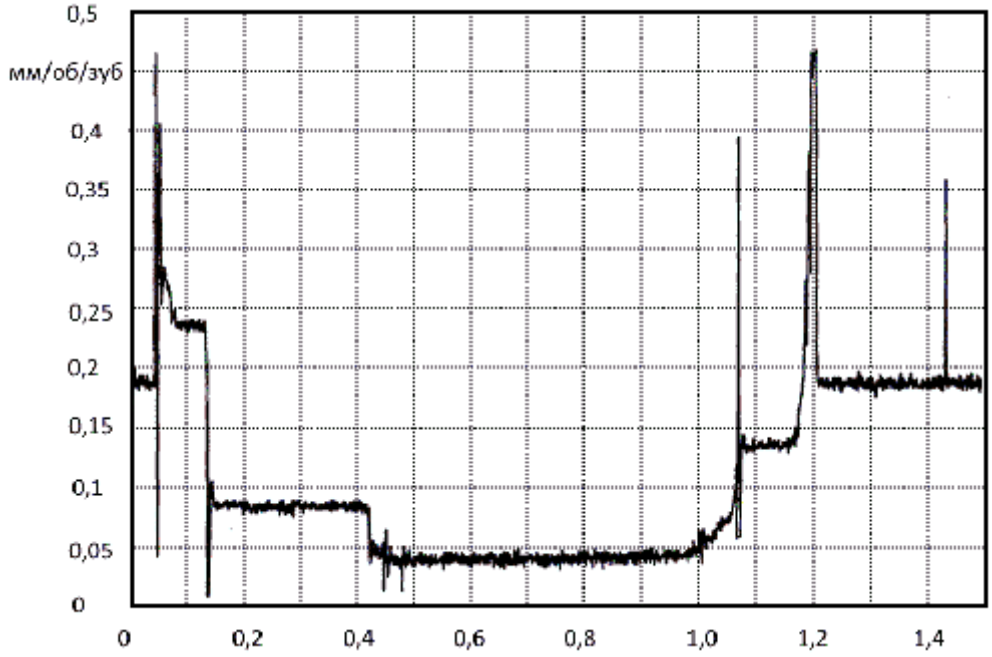


Рисунок 4.16 – Тестова механічна обробка з адаптивним розміщенням числа пар полюсів, вимірювання швидкості подачі

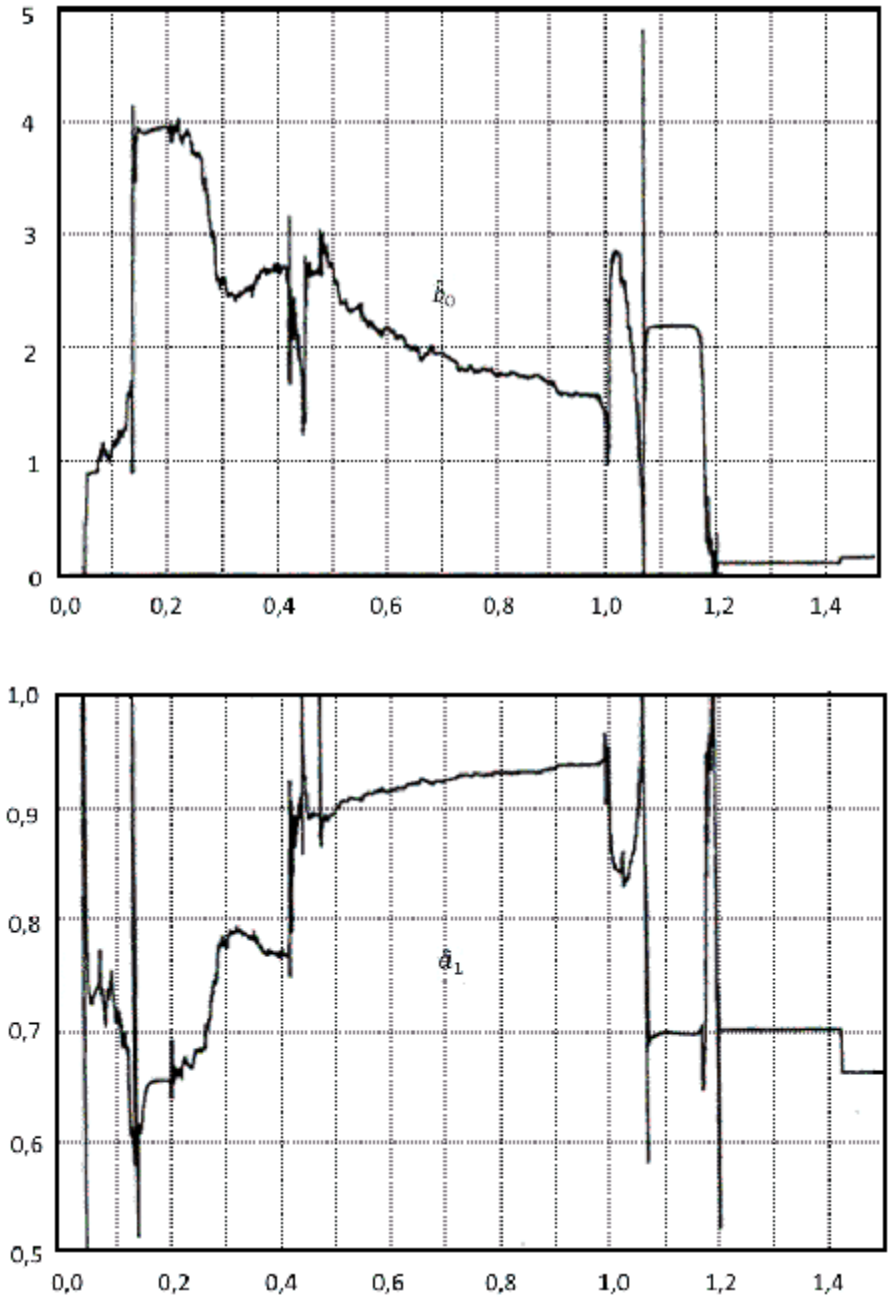


Рисунок 4.17 – Тестова механічна обробка з адаптивним розміщенням числа пар полюсів, розрахункові параметри

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Схема адаптивного керування за еталонною моделлю

Перша спроба проектування стабільних адаптивних систем керування була в галузі адаптивного керування за еталонною моделлю запропонована Вітакером та співавторами наприкінці 1950 років. Тим часом у цій галузі було проведено чималу роботу, особливо щодо стабільності контролера. Оригінальна модель адаптивного керування за еталонною моделлю представила дві нові ідеї. Першою було те, що продуктивність системи визначалася моделлю; а по-друге, параметри контролера були скориговані на основі помилки між еталонною моделлю та системою таким чином, що вивід невідомої системи асимптотично наближався до даної еталонної моделі.

Системи на базі моделі адаптивного керування по еталонній моделі спочатку були виведені для сервозавдань у визначених системах безперервного часу, але теорія була розширена, щоб охопити системи дискретного часу та системи зі стохастичними збуреннями. Раніше роботи в цій галузі базувалися на формулюванні простору станів, але з практичної точки зору розробка стабільних контролерів адаптивного керування по еталонній моделі зосереджена на сигналах вводу-виводу. У цьому розділі представлено загальний підсумок схеми адаптивного керування по еталонній моделі Ландау, яка базується на незалежному відстеженні та регулюванні.

5.2 Теорія адаптивного керування за еталонною моделлю для керування процесом обробки

Адаптивне керування по еталонній моделі базується на завданні еталонної моделі. Завдання еталонної моделі полягає в тому, що для незмінної в часі установки параметри регулятора регулюються таким чином, що закритий цикл передавальної функції наближений до специфічної моделі.

Розглянемо дискретну лінійну та незмінну в часі установку з одним вводом і одним виводом як

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})\ u(k), \tag{5.1}$$

$$A\left(q^{-1}\right) = 1 + a_1 q^{-1} + ¼\ \ + a_{nA} q^{-nA}; \tag{5.2}$$

$$B\left(q^{-1}\right) = b_0 + b_1 q^{-1} + ¼\ \ + b_{nB} q^{-nB}. \tag{5.3}$$

де d – час відставання установки,

q^{-1} коефіцієнт зсуву назад;

$u(k)$ та $y(k)$ – відповідно ввід та вивід установки.

Припускається, що всі нулі установки знаходяться всередині одиничного кола, що справедливо для процесу фрезерування та сервоприводу. При механічній обробці обов’язковим завданнями для контролера є слідування силами різання на виводі еталонному вводу, а також система повинна усувати зворушення і залишатися стабільною.

Ці умови можна розглядати таким чином.

1. При відстеженні вивід повинен задовольняти рівняння

$$C_1\left(q^{-1}\right)y(k) = q^{-d}D\left(q^{-1}\right)u^M(k), \tag{5.4}$$

де $u^M(k)$ – еталонний ввід;

$C_1(q^{-1})$ та $D(q^{-1})$ – поліноми які визначають явну еталонну модель як

$y^M(k)$ це вивід моделі.

$C_1(q^{-1})$ повинен бути стабільним поліномом.

$$C_1\left(q^{-1}\right)y^M(k)=q^{-d}D\left(q^{-1}\right)u^M(k). \tag{5.5}$$

2. Під час керування, $[u^M(k)=0]$, початкове збурення $\left(y(0)\neq 0\right)$ усувається динамікою, що описана

$$C_2\left(q^{-1}\right)y(k+d)=0k\geq 0, \tag{5.6}$$

де $C_2\left(q^{-1}\right)=1+C_1^2q^{-1}+\ldots+C_{nc2}^2q^{-nc2}$ – стабільний поліном.

Помилка моделі установки визначається як

$$e(k)=y(k)-y^M(k). \tag{5.7}$$

Цілі керування забезпечені, якщо справджується така умова

$$C_2\left(q^{-1}\right)e(k+d)=0. \tag{5.8}$$

Структура контролера може бути обрана в загальній формі так як і схема розміщення числа пар полюсів:

$$S'\left(q^{-1}\right)u(k)=T'\left(q^{-1}\right)u^M(k)-R'\left(q^{-1}\right)y(k). \tag{5.9}$$

Одним з шляхів вибору поліномів $S'\left(q^{-1}\right), T'\left(q^{-1}\right)$ та $R'\left(q^{-1}\right)$ є

$$S'\left(q^{-1}\right)=B\left(q^{-1}\right)S\left(q^{-1}\right), \tag{5.10}$$

$$T¢\left(q^{-1}\right)=C_2\left(q^{-1}\right)\frac{D\left(q^{-1}\right)}{C_1\left(q^{-1}\right)}. \tag{5.11}$$

$$R¢(q^{-1})=R(q^{-1}). \tag{5.12}$$

де

$$S(q^{-1})=1+s_1q^{-1}+s_2q^{-1}+...+S_{nS}q^{-nS}. \tag{5.13}$$

$$R(q^{-1})=r_0+r_1q^{-1}+r_2q^{-1}+...+r_{nR}q^{-nR}. \tag{5.14}$$

а отже контролер набуває форми

$$BSu\left(k\right)=C_2\frac{D}{C_1}u^M\left(k\right)-Ry\left(k\right). \tag{5.15}$$

Варто зазначити, що аргументи поліномів пропущено для спрощення.

Рівняння 5.15 можна переписати як

$$BS\frac{A}{B}y\left(k\right)=C_2\frac{C_1}{D}\times\frac{D}{C_1}y\left(k+d\right)-Ry(k). \tag{5.16}$$

$$A\,S+R\,q^{-d}=C_2. \tag{5.17}$$

$$\begin{gathered} n_S=d-1; \\ n_R=max\left(n_A-1,\ n_{c2}-2\right). \end{gathered} \tag{4.18}$$

З допомогою рівняння 5.17 можна показати, що необхідна умова керування, а саме рівняння 5.20, справджується.

$$C_2 e(k+d) = C_2 y(k+d) - C_2 y^M(k+d) \tag{5.19}$$

використовуючи рівняння 4.141, 4.139, та 1.127

$$C_2 e(k+d) = (AS + Rq - d)y(k+d) - C2\frac{D}{C_1}uM(k), \tag{5.20}$$

або

$$C_2 e(k+d) = BSu(k) + Ry(k) - C2\frac{D}{C_1}uM(k). \tag{5.21}$$

Якщо повернутись до рівняння 5.15, то права частина вищенаведеного рівняння рівна нулю, а отже умова рівняння 5.8 виконана.

Поліноми контролера, рівняння 4.15, можна розширити і переписати як

$$b_0 u(k) + q_0^T j_0(k) = C_2 y^M(k+d) - R\,y(k), \tag{5.22}$$

де

$$j_0^T(k) = \begin{bmatrix} u(k-1), \ldots, u(k-d-n_B+1), y(k), \ldots, y(k-n_R) \end{bmatrix}. \tag{5.23}$$

$$q_0^T = [b_0 s_1 + b_1, b_0 s_2 + b_1 s_1 + b_2, \ldots, b_{nB} s_{d-1}, r_0, \ldots, r_{nR}]. \tag{5.24}$$

Ввід керування можна вивести р рівняння 5.22 таким чином

$$u(k) = \qquad u(k) = \frac{1}{b_0}[C_2(q^{-1})y^M(k+d) - q_0^T j_0(k)]. \tag{5.25}$$

Рис. 5.1 зображає лінійну модель такої схеми керування у вигляді блок-схеми.

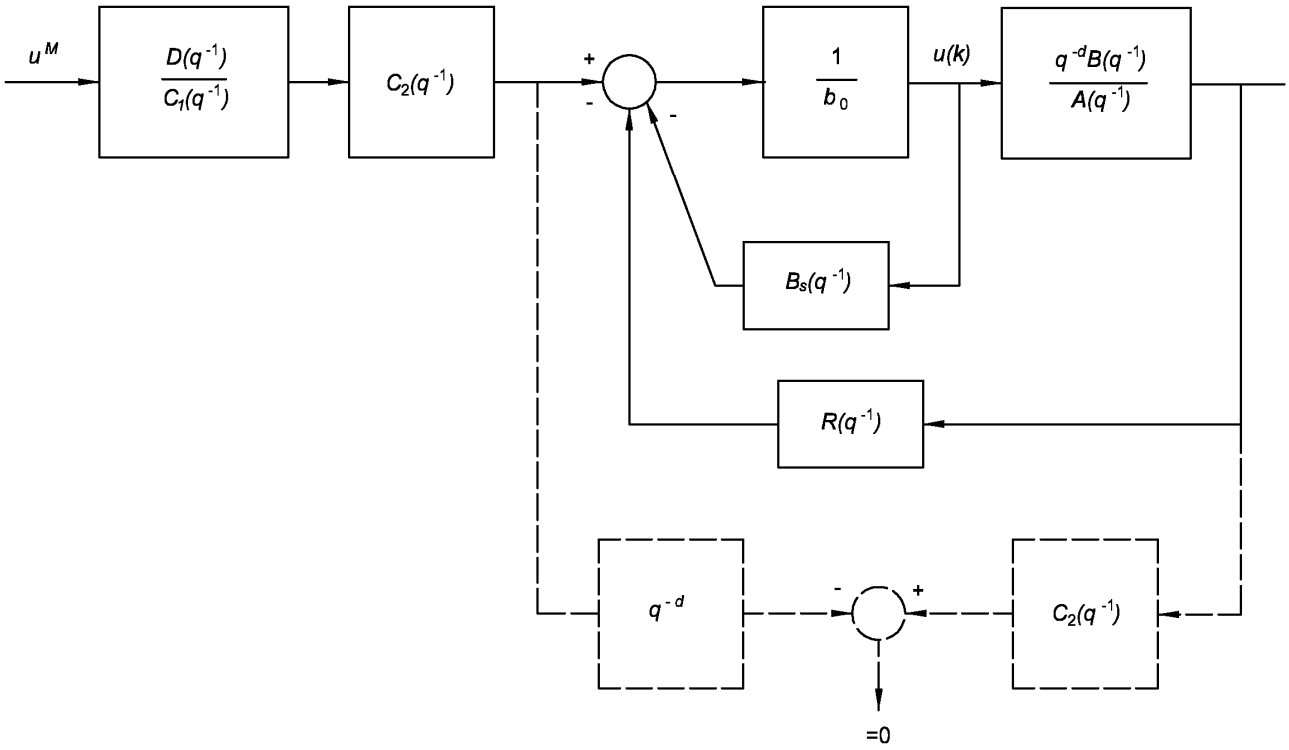


Рисунок 5.1 – Блок керування відстежування та налаштування для відомої установки

5.2 Розробка адаптивного керування за еталонною моделлю

На рисунку 5.2 зображено схему адаптивного керування згідно цієї моделі.

Коли параметри установки невідомі, їх заміняють розрахунковими значеннями з механізму адаптації. Таким чином закон керування у адаптивному випадку виражається як

$$u(k) = \frac{1}{b_0(k)}[C_2(q^{-1})y^M(k+d) - \hat{\theta}_0^T \varphi_0(k)]. \qquad (5.26)$$

або ж

$$\hat{\theta}^T(k)\varphi(k) = C_2(q^{1})y^M(k+d), \qquad (5.27)$$

де

$$\hat{\theta}^T(k) = \left[\hat{b}_0(k)\right]. \qquad (5.28)$$

$$\varphi^T(k) = \left[u(k); \varphi_0^T\right]. \qquad (5.29)$$

Ввівши рівняння 5.27 та 5.27 в 5.20 отримуємо

$$C_2(q^{-1})e^{(k+d)} = [\theta - \hat{\theta}(k)\varphi(k). \qquad (5.30)$$

Завдання на розробку полягає у знаходженні адаптивного механізму що забезпечує сходження похибки моделі установки до нуля та зв’язність вводу та виводу моделі.

$$\begin{gathered} \lim_{k\to\infty} e(k) = 0, \\ \|\varphi(k)\| \le M < \infty, \ \forall k. \end{gathered} \qquad (5.31)$$

Оскільки параметри установки невідомі, рівняння 4.152 не може бути прямо розв’язане, але до нього можна використати такий підхід.

Визначити очищену похибку моделі установки як

$$\varepsilon^f(k) = C_2\left(q^{-1}\right)\varepsilon^k = \left[\theta - \hat{\theta}(k)\right]^T \varphi(k-d)\varepsilon^f(k) = C_2\left(q^{-1}\right)\varepsilon^k. \qquad (5.32)$$

Визначити допоміжну похибку як

$$\bar{\varepsilon}(k) = \left[\hat{\theta}(k-d) - \theta(k)\right]^T \varphi(k-d). \qquad (5.33)$$

Сума вищенаведених похибок дає розширену похибку

$$\varepsilon^*(k) = \varepsilon^f(k) + \bar{\varepsilon}(k). \qquad (5.34)$$

Можна довести, що якщо

$$\lim_{k \to \infty} \bar{\varepsilon}(k) = 0, \qquad (5.35)$$

то умови рівняння 5.31 виконано. Механізм адаптації, що забезпечує умови рівняння 5.35 виражається як

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P_k \varphi(k-d)\varepsilon^*(k). \qquad (5.36)$$

$$P_{k+1} = \frac{1}{\lambda_1(k)}\left[P_k - \frac{P_k \varphi(k-d)\varphi^T(k-d)P_k}{\lambda_1(k)/\lambda_2(k) + \varphi^T(k-d)P_k\varphi(k-d)}\right], \qquad (5.37)$$

де $0 < \lambda_1(k) \le 1,\ 0 \le \lambda_2(k) < 2,\ P_0 > 0.$

Щоб зробити алгоритм реалізованим, $\varepsilon^*(k)$, збільшена похибка повинна

бути виражена через параметри, наближені до $k - 1$.

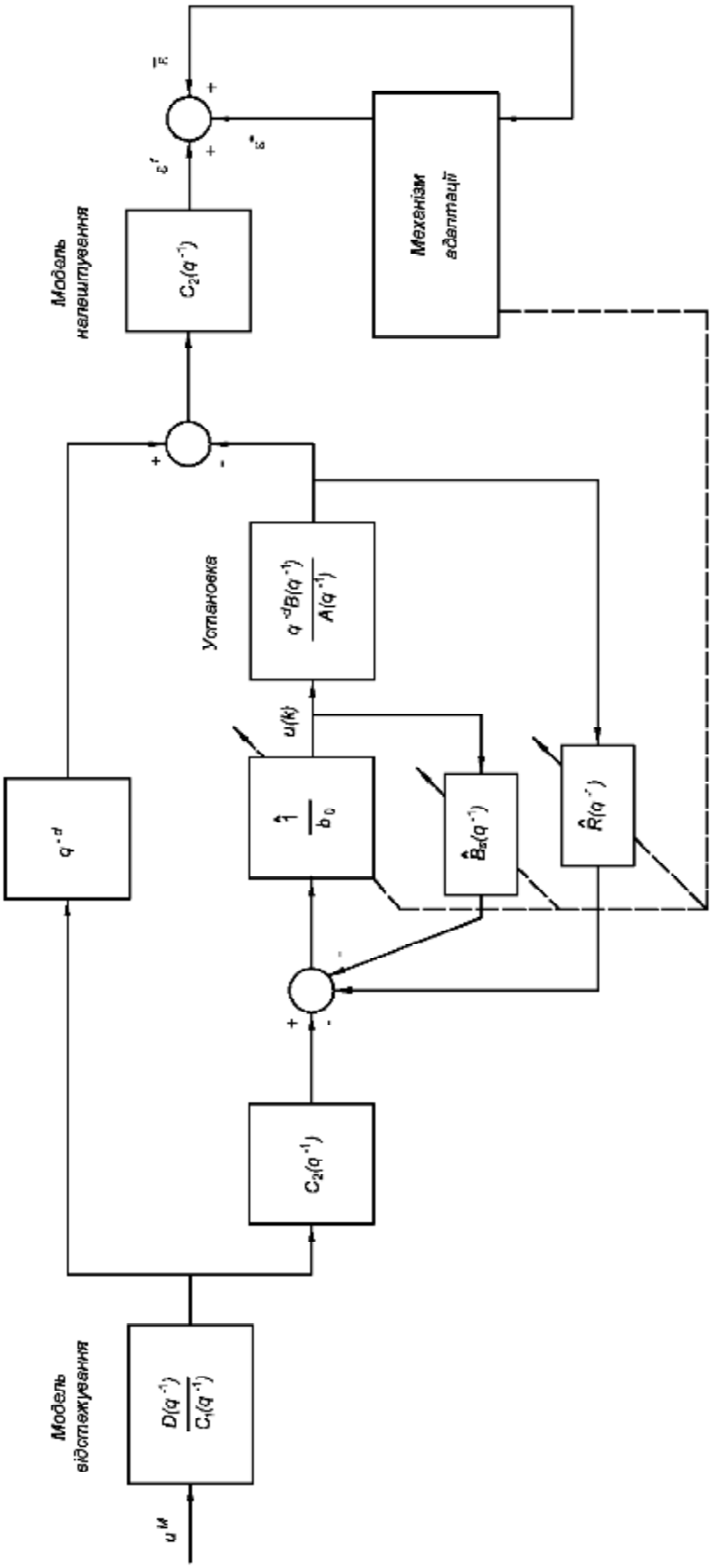


Рисунок 5.2 – Блок відстежування та налаштування адаптивного керування

$$\mathrm{e}^{*}(k)=\mathrm{e}^{f}(k)+\overline{\mathrm{e}}(k)=C_2\left(q^{-1}\right)\mathrm{e}^{k}+\hat{\mathrm{q}}^{T}(k-d)\mathrm{j}(k-d), \tag{5.38}$$

або

$$\begin{aligned}\mathrm{e}^{*}(k)&=C_2\left(q^{-1}\right)y(k)-\hat{\mathrm{q}}^{T}(k)\mathrm{j}(k-d)=\\&=C_2\left(q^{-1}\right)y(k)-\hat{\mathrm{q}}^{T}(k-1)\mathrm{j}(k-d)-\mathrm{j}^{T}(k-d)\mathrm{e}^{*}(k).\end{aligned} \tag{5.39}$$

В підсумку

$$\mathrm{e}^{*}(k)=\frac{C_2\left(q^{-1}\right)y(k)-\hat{\mathrm{q}}^{T}(k-1)\mathrm{j}(k-d)}{1+\mathrm{j}^{T}(k-d)P_k\mathrm{j}(k-d)}. \tag{5.40}$$

5.3 Застосування схеми адаптивного керування за еталонною моделлю для керування процесом фрезерування

Схема адаптивного керування по еталонній моделі була використана для керування процесом фрезерування. Установка в даному випадку це поєднання функції швидкості подачі сервоприводу та передавальної функція процесу різання.

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{K(0,99578086)b_0 z^{-2}\left(1+0,0020946z^{-1}\right)}{\left(1-\ 0,0461992z^{-1}\right)\left(1-\ a_1 z^{-1}.\right)} \tag{5.41}$$

Порівнюючи з рівнянням 5.1, отримуємо

$$n_A = 2,\ \ n_B = 1, d = 2. \tag{5.42}$$

Вибір динамік керування можна провести, використовуючи моделювання поліному другого порядку:

$$C_2(z^{-1}) = 1\ + C_1^{\ 2} z^{-1} + C_2^{\ 2} z^{-2} = 1-\ 0,44z^{-1} + 0,016z^{-2}. \tag{5.43}$$

Як наслідок, порядок поліномів $S\left(q^{-1}\right)$ і $R\left(q^{-1}\right)$, які задані рівнянням 5.18:

$$n_S = 1, n_R = 1. \tag{5.44}$$

Еталонну модель було обрано з такою ж структурою як і установка. Параметри процесу різання розраховані на основі середньої глибини різання у 5 мм і результуюча передавальна функція множиться на незмінну в часі передавальну функцію сервоприводу. Модель ще множиться на коефіцієнт підсилення 2,235 для отримання підсилення постійного струму, як у моделі.

$$\frac{y^M(k)}{u^M(k)} = \frac{D}{C_1} = \frac{2,235z^{-2}\left(0,3+0,00062838z^{-1}\right)}{\left(1-0,0461992z^{-1}\right)\left(1-0,3z^{-1}\right)}. \tag{5.45}$$

Вектори спостереження та параметрів

$$\varphi^T(k) = \left[u(k), u(k-1), u(k-2), y(k), y(k-1)\right]. \tag{5.46}$$

$$\hat{\theta}^T = \left[\hat{b}_0(k), \hat{b}_0(k)\hat{s}_1(k) + \hat{b}_1, \hat{b}_1\hat{s}_1, \hat{r}_0, \hat{r}_1\right]. \tag{5.47}$$

Псевдокод для схеми адаптивного керування за еталонною моделлю

1) Вибрати параметри динамік регулювання, C_2.

2) Вибрати параметри поліномів D, C_1, моделі, як рівняння 5.41.

3) Розрахувати порядок поліномів R і S з рівняння 5.44.

4) Налаштувати вектори спостереження та параметрів як рівняння 5.46, 5.47.

5) Задати початкові значення вектору параметрів та матриці коваріацій.

6) Виміряти пікову результуючу силу.

7) Обчислити розширену помилку з рівняння 5.40.

8) Обчислити новий вектор параметрів з рівняння 5.36.

9) Оновити матрицю коваріацій з рівняння 5.37.

10) Розрахувати ввідний сигнал керування з рівняння 5.26.

11) Зачекати до наступного відбору проб, повернутися до кроку 7 та повторити.

5.4 Результати моделювання та експерименту

Алгоритм адаптивного керування по еталонній моделі був змодельований за тих самих умов що й пропорційно-інтегрально-диференціальний алгоритм та алгоритм розміщення числа пар полюсів. Результати пікової сили різання та вводу керування показані на рис. 4.33. Такий самий алгоритм був змодельований з присутністю вильоту і його результати показані на рисунку 4.34. Алгоритм, що має достатньо задовільну реакцію, показав певну нестабільність за присутності вильоту. Це суттєво на початку різання. Варто зазначити, що при адаптивному керуванні по еталонній моделі обчислюються п’ять параметрів.

Контролер адаптивного керування по еталонній моделі був встановлений на багатоцільовому верстаті з пристроєм числового програмного керування, з використанням тих самих умов що й пропорційно-інтегрально-диференціальна схема та схема розміщення числа пар полюсів. Виміряна сила різання, ввід керування, виміряна швидкість подачі сервоприводу та перший розрахунковий параметр b_0 зображені на рис. 5.3, 5.4, 5.5 та 5.6. Контролер суттєво коливається на початку, що впливає на виміряну силу. Хоча сила і відслідковує еталонний ввід, реакція не є ідеальною аж до кінця різання.

Варто зазначити, що розроблена вище схема управління підходить для різного еталонного введення, оскільки у фіксованому середовищі введення, вивід моделі через кілька ітерацій досягає кінцевого значення і залишається постійним. Цей підхід, який описується як «чисто адаптивний», може бути змінений шляхом введення контролера зворотного зв’язку навколо контролера адаптивного керування по еталонній моделі. Еталонним вводом в модель тепер є похибка між виміряною силою та ввідною еталонною силою. Для цього випадку, оскільки модель знаходиться в блоці із замкнутим циклом, компенсуючий коефіцієнт підсилення зміщення постійного струму видаляється і вводиться інтегральний контролер з коефіцієнтом підсилення 0,1. Цей інтегратор усуне помилку стаціонарного стану. Контролер встановлений на установці, а результати показані на рис. 5.8, 5.9 та 5.10. Хоча реакція на початку різання покращилась, контролер продовжує коливатись впродовж всього різання. Варто зазначити, що зменшення

коефіцієнту інтегрального підсилення не покращує реакції.

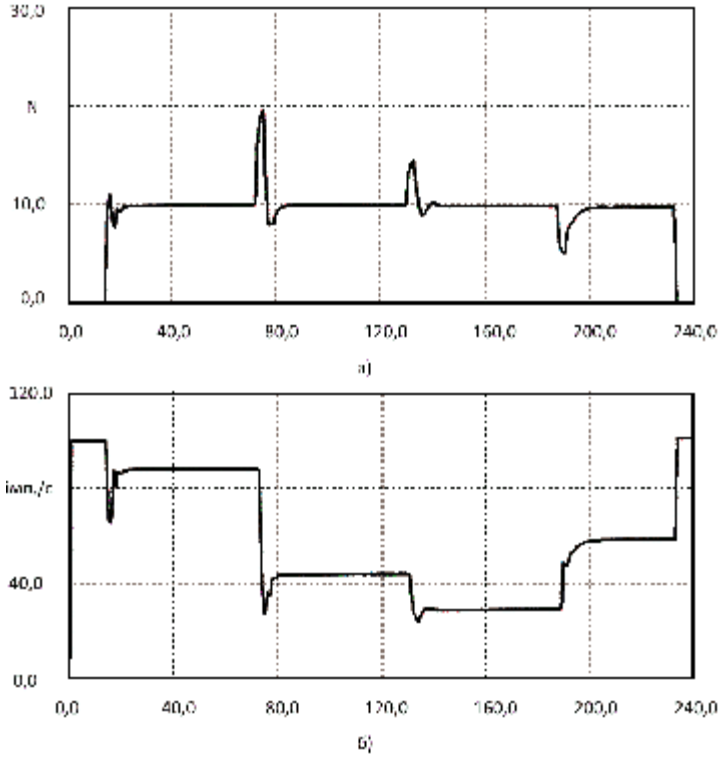


Рисунок 5.3 – Моделювання адаптивного керування за еталонною моделлю: а) реакція сили різання; б) ввід керування

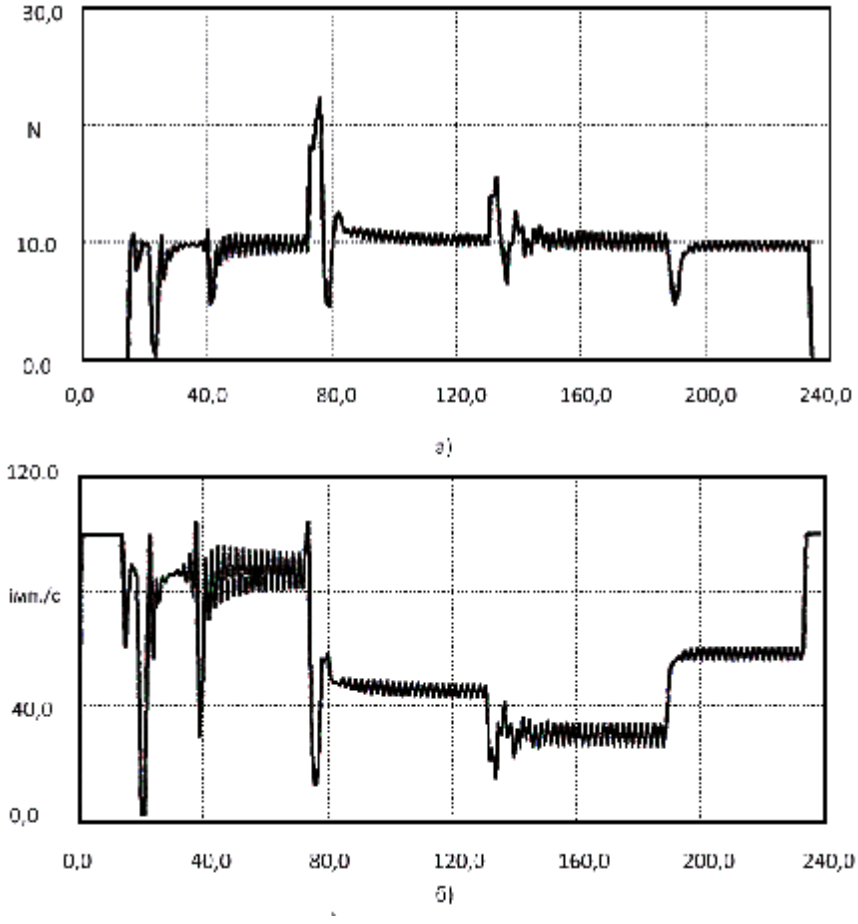


Рисунок 5.4 – Моделювання адаптивного керування за еталонною моделлю з вильотом: а) реакція сили різання; б) ввід керування

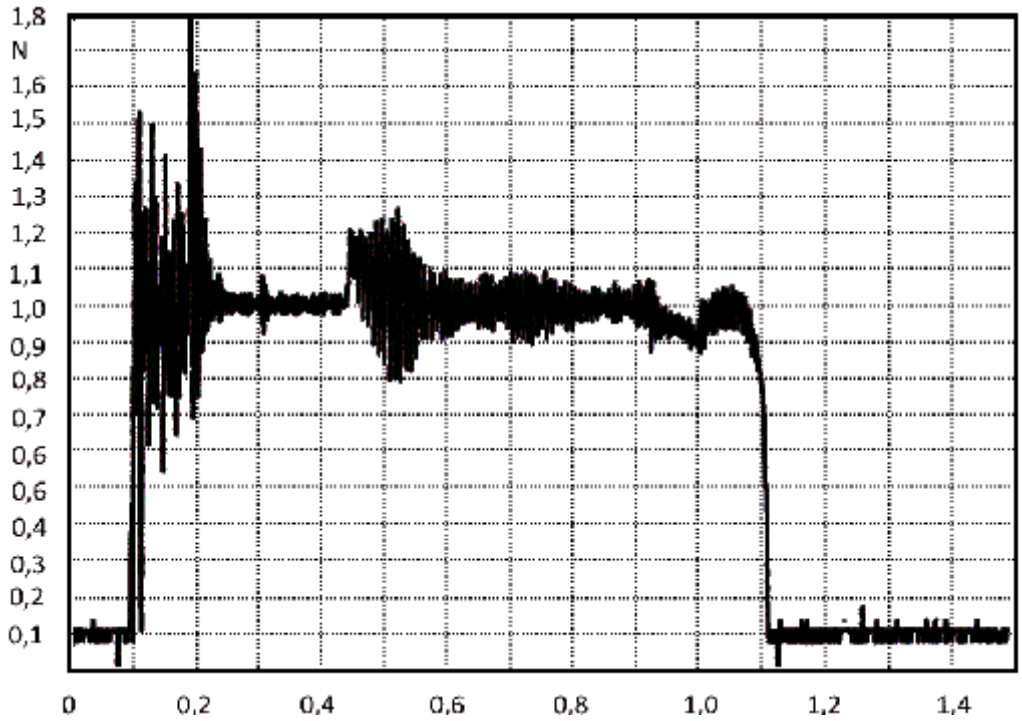


Рисунок 5.5 – Тестова механічна обробка з адаптивним керуванням за еталонною моделлю, виміряна максимальна сила різання

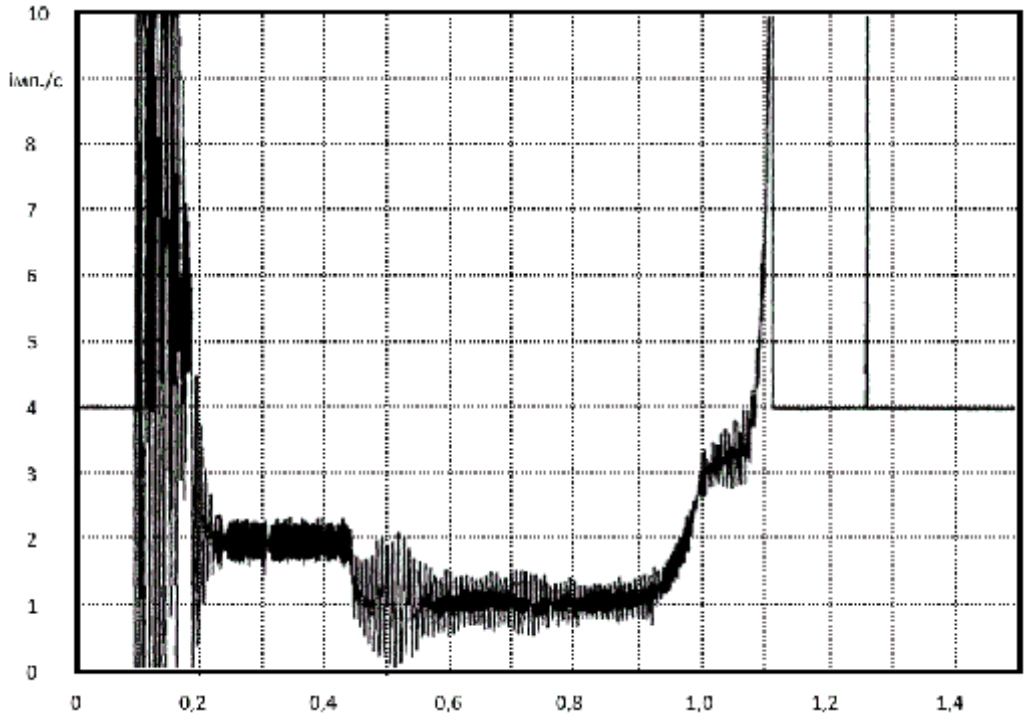


Рисунок 56 – Тестова механічна обробка з адаптивним керуванням по еталонній моделі, введення керування

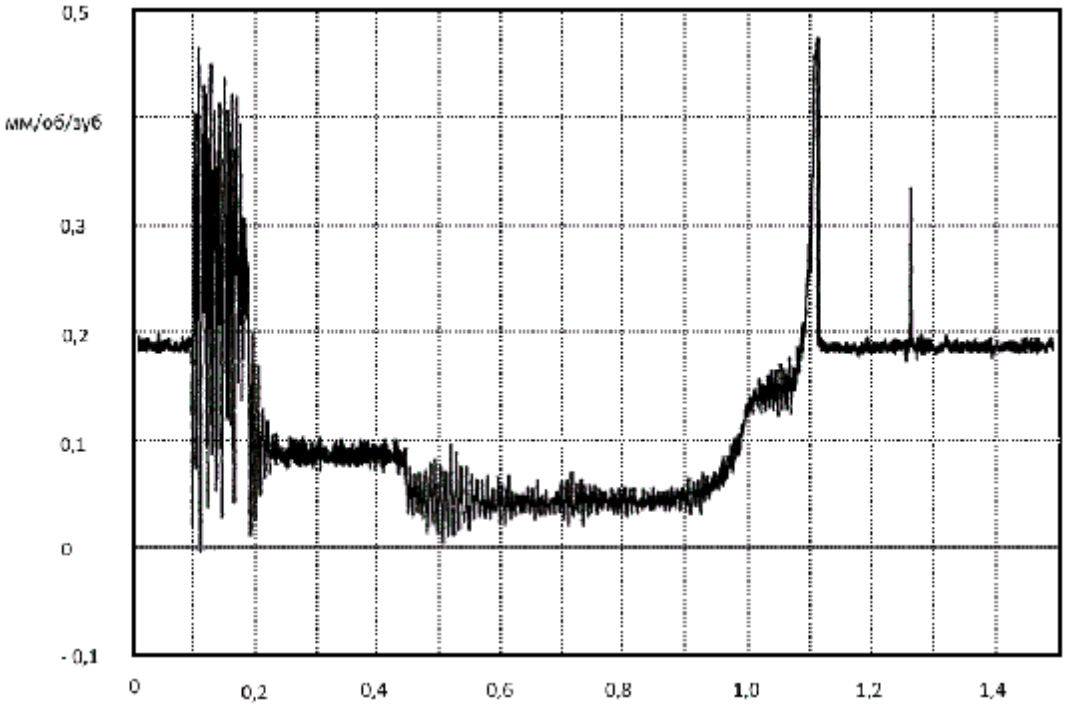


Рисунок 5.7 – Тестова механічна обробка з адаптивним керуванням по еталонній моделі, виміряна швидкість подачі

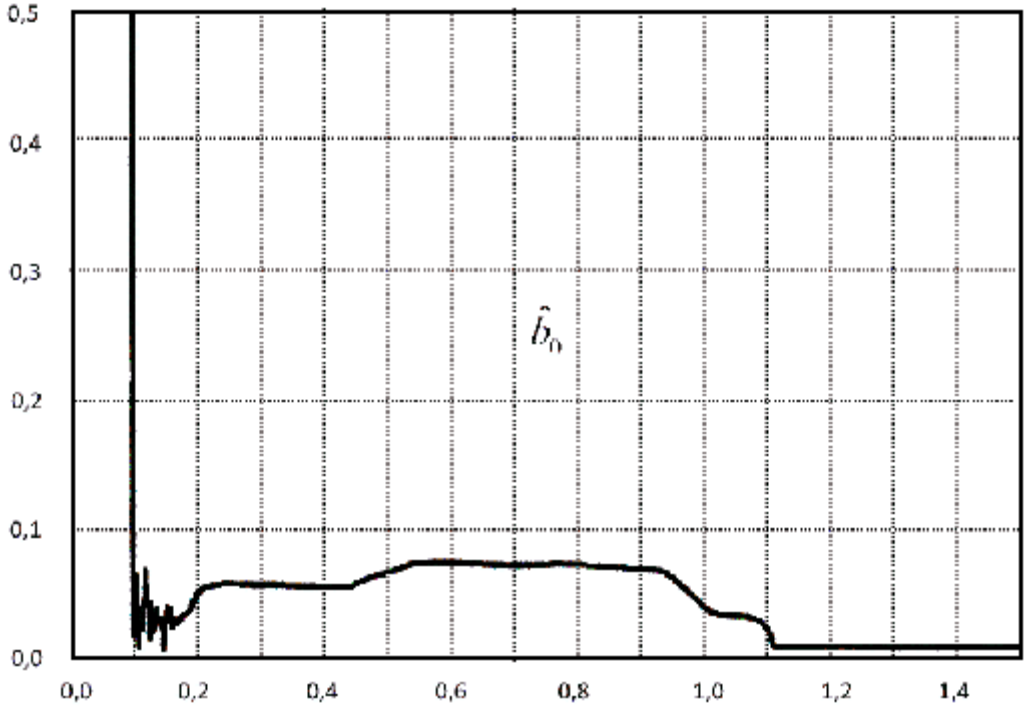


Рисунок 5.8 – Тестова механічна обробка з адаптивним керуванням за еталонною моделлю, розрахунковий параметр

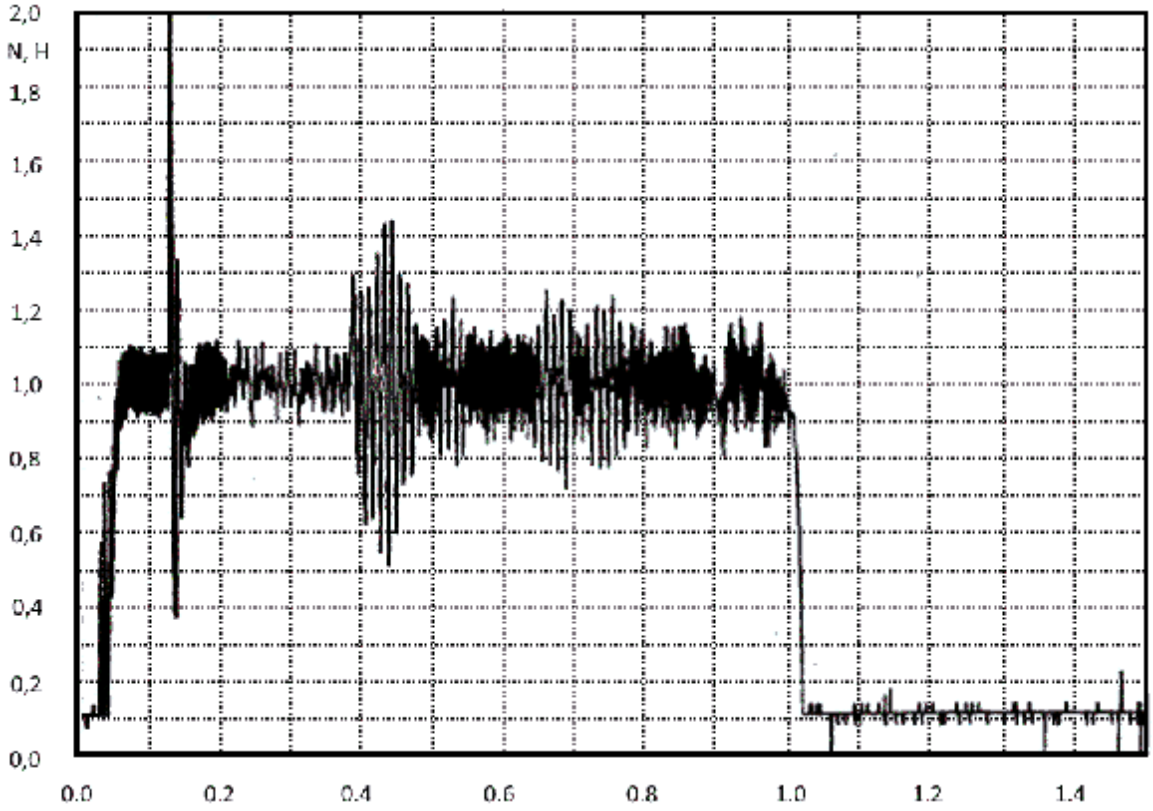


Рисунок 5.9 – Адаптивне керування за еталонною моделлю з інтегральною дією, виміряна гранична сила

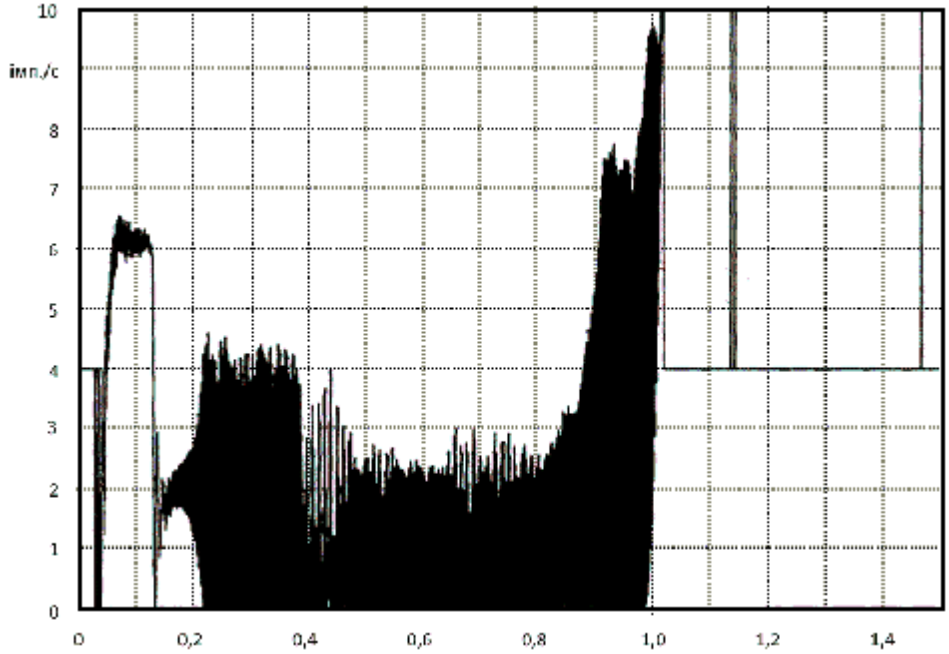


Рисунок 5.10 – Адаптивне керування за еталонною моделлю з інтегральною дією, ввід керування

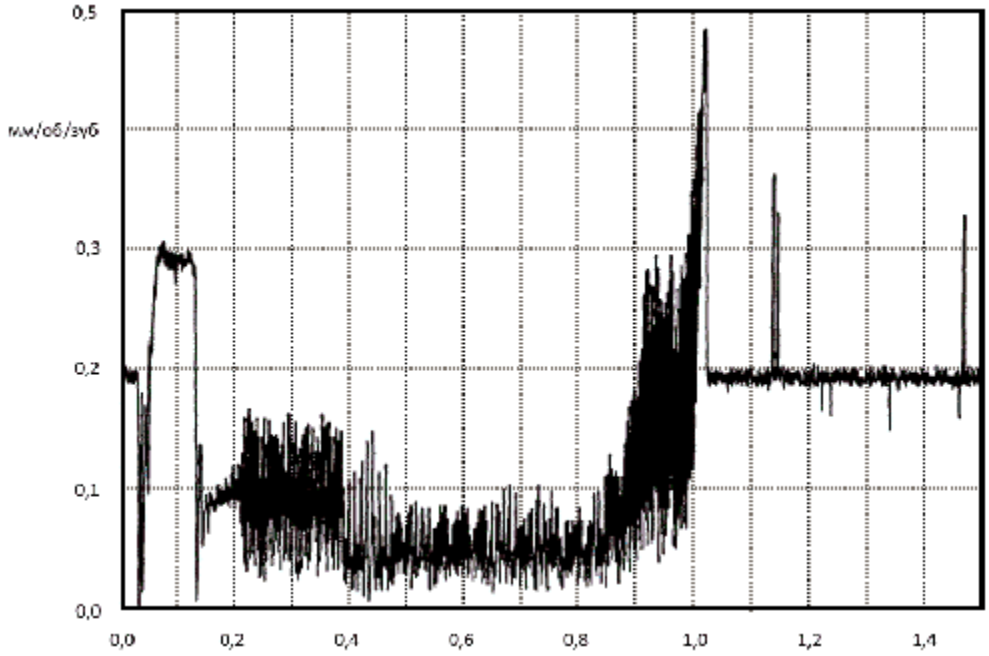


Рисунок 5.11 – Адаптивне керування за еталонною моделлю з інтегральною дією, виміряна швидкість подачі

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1.1 Розрахунок повітряного обміну в приміщенні

Виробничий процес на підприємствах часто передбачає виділення різних шкідливосте та неприємних за запахом речовин. Оскільки це небезпечно для життя робітників, ці речовини слід ліквідовувати. За ліквідацію цих речовин відповідає виробнича вентиляція, яка забезпечує необхідний мікроклімат у приміщенні та роботу виробничого.

Вентиляція виробничих приміщень повинна забезпечити видалення відпрацьованих мас повітря (витяжна вентиляція), та обмін його на свіже очищене повітря (припливна вентиляція).

Вихідні дані: розміри дільниці – 42х24 м, висота 10 м, сумарні теплові поступлення від технологічного обладнання – $\mathrm{å}\, Q_{\grave{o}\,\hat{a}}$ = 174000 Вт, теплота, яка вноситься сонячною радіацією – $Q_{ср}$ = 29000 Вт, втрати тепла через огороджуючі конструкції в холодну пору року – $Q_{тп}$ = 290000 Вт, об’єм повітря, яке видаляється місцевою витяжною вентиляцією – $L_{мо}$ = 15000 м^3/год.

Оскільки в приміщенні є установки місцевої вентиляції, розрахункову зовнішню температуру для холодної пори року по клімату Б, тобто – $t_н^Б = -18°C$, для теплого періоду – $t_н^А = +25°C$.

Теплий період року. Визначаємо теплову напруженість цеху, виходячи з умовного об’єму приміщення:

$$q = \frac{\mathrm{å}\, Q_{тв} + Q_{ср}}{V} = \frac{174000 + 29000}{6000} = 33.8\,\text{Вт/м}^3. \qquad (6.1)$$

Знаходимо температуру повітря в робочій зоні. Згідно рекомендацій при q>23 Вт/м^3, $t_{рз} = t_н^А + (5 - 2) = 25 + 3 = 28°$C.

Визначаємо температуру повітря, яке видаляється з верхньої зони приміщення:

$$t_{ух} = t_{пр} + \frac{t_{рз} - t_{пр}}{m} = 25 + \frac{28 - 25}{0.4} = 32.5°\text{C}. \qquad (6.2)$$

де m = 0.4 [5], $t_{пр} = t_н^А = 25°\text{C}$, оскільки з метою економії електроенергії повітря подається природнім шляхом.

При знайдених значеннях $t_{пр}, t_{рз}, t_{ух}$ розхід повітря для асиміляції надлишкової теплоти:

$$G_я = L_{мо} \times r_{рз} + \frac{3.6\left(å\, Q_{тв} + Q_{ср}\right) - L_{мо} r_{рз} c\left(t_{рз} - t_{пр}\right)}{c\left(t_{ух} - t_{пр}\right)} =$$

$$= 15000 \times 1.172 + \frac{3.6\left(174000 + 29000\right) - 15000 \times 1.172 \times 1.005\left(28 - 25\right)}{1.005\left(32.5 - 25\right)} = \qquad (6.3)$$

$$= 107500 \text{ кг/год.}$$

Приточне повітря $G_{пр} = G_{мо} + G_я = 15000 \times 1.172 + 107500 = 125100$ кг/год. подається в цех природнім шляхом через нижні приточні отвори.

Видалення повітря з приміщення здійснюється місцевою витяжною вентиляцією і природнім шляхом через ліхтар, завдяки чому забезпечується вентиляція верхньої зони приміщення. Необхідна площа приточних і витяжних отворів визначається при розрахунку аерації.

Перехідні умови. Температура зовнішнього повітря $t_ç = 8°C$, робочої зони $t_{дç} = 15°C$. Втрати тепла:

$$Q_{тп}^п = Q_{тп} \frac{t_{рз} - t_з}{t_{ра} - t_н^Б} = 290000 \frac{15 - 8}{15 - \left(-18\right)} » 61500 \text{ Вт}. \qquad (6.4)$$

Тепловиділення $å\, Q_{тв} = 174000$ Вт, теплота сонячної радіації $Q_{ср} = 29000$ В.

Окільки поступлення тепла перевищують втрати теплоти, шуканою величиною є необхідна кількість повітря для асиміляції надлишків теплоти. Температура повітря, яке виходить:

$$t_{вих} = t_{пр} + \frac{t_{рз} - t_{пр}}{m} = 8 + \frac{15 - 8}{0.40} = 25.5°\text{C}. \qquad (6.5)$$

Розхід повітря для асиміляції надлишків тепла:

$$G_я = 15000 \times 1.247 + \frac{3.6(174000 + 29000 - 61500) - 15000 \times 1.225 \times 1.005(15 - 8)}{1.005(25.5 - 8)} \approx 40300 \text{ кг/год.} \qquad (6.6)$$

Приточне повітря, поскільки воно не потребує нагрівання, подається природнім шляхом на висоті не нижче 4 м від рівня підлоги в кількості $G_{пр} = G_{мо} + G_я = 15000 \times 1.247 + 40300 = 59000$ кг/год., видалення здійснюється місцевою витяжною вентиляцією 18700 кг/год. і через ліхтар (59000 кг/год.).

Площа приточних і витяжних отворів визначається розрахунком аерації на перехідні умови.

Холодний період року. Температура повітря в робочій зоні $t_{рз} = 15°\text{C}$. Оскільки сумарні втрати теплоти перевищують поступлення тепла, шуканою величиною буде температура причточного повітря.

Додатково до місцевої витяжної вентиляції передбачається вентиляція верхньої зони в мінімальному об’ємі з розрахунку 6 м^3/год. на 1 м^2 площі підлоги приміщення: $L_{вз} = 42 \times 24 \times 6 \approx 6000$ м^3/год. Температуру повітря, яке видаляється, приймаємо на 3°С вищою $t_{рз}$, так як $t_{ух} = 15 + 3 = 18°\text{C}$, $\rho_{ух} = 1.213$ кг/м^3.

Розв’язавши рівняння балансу відносно $t_{пр}$ та прийнявши $\rho_{пр} \approx 1.2$ êã/ì ^{3}, отримаємо

$$t_{пр} = \frac{1452660 - 624000}{21100 \times 1.2} = 32.7°\text{C}. \qquad (6.6)$$

Рівняння теплоповітряного балансу

Теплові надлишки тепла в приточному повітрі, кДж/год.	Теплові недостачі у вмісті теплоти в витяжному повітрі, кДж/год.
$\sum Q_{тв} = 174000 \times 3.6 = 626400.$ $Q_{пр} = (L_{мо} + L_{вз})c\rho_{пр}t_{пр} =$ $= (15000 + 6000)1.005\rho_{пр}t_{пр} =$ $21100\rho_{пр}t_{пр}.$	$Q_{тп} = 3.6 \times 290000 = 1044000.$ $Q_{мо} = L_{мо}c\rho_{рз}t_{рз} =$ $15000 \times 1.005 \times 1.225 \times 15 = 277000.$ $Q_{вз} = L_{вз}c\rho_{ух}t_{ух} =$ $= 6000 \times 1.005 \times 1.213 \times 18 = 131660.$
Всього: $624000 + 2110\rho_{пр}t_{пр}.$	1452660

Приточне повітря подається механічним шляхом з підігрівом до 32.7°С. Продуктивність установки прийнята рівною $L_{ïó} = L_{ìî} + L_{âç} = 15000 + 6000 = 21000$ м^2/год. Видалення повітря здійснюється витяжною вентиляцією і природнім шляхом через ліхтар завдяки підпору, який створюється приточною установкою.

6.1.2 Розрахунок штучного освітлення люмінесцентними лампами

Раціональне освітлення приміщень – один із найбільш важливих факторів, від яких залежить ефективність трудової діяльності людини.

Добре освітлення необхідне для виконання більшості виробничих задач. Для того, щоб спланувати раціональну систему освітлення, враховується специфіка робочого завдання, для якого створюється система освітлення, швидкість і точність, із яким це робоче завдання повинне виконуватися, тривалість його виконання і різні зміни в умовах виконання робочих операцій.

Опис приміщення, у якому розташовується робоче місце

Приміщення, у якому знаходиться дільниця, має такі характеристики:

- довжина приміщення 16 м;
- ширина приміщення 6 м;
- висота 4 м;

- число вікон 3;
- кількість робочих місць 3;
- забарвлення інтер’єру: біла стеля, блідо-зелені стіни, темна підлога.

Розрахунок освітлення робочого місця.

У приміщенні, яке проектується, використовується змішане освітлення, тобто сполучення природного і штучного освітлення. У якості природного – бічне освітлення через вікна. Штучне освітлення використовується при недостатньому природному освітленні. У даному приміщенні використовується загальне штучне освітлення. Розрахунок його здійснюється за методом світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі.

Нормами для даних робіт установлена необхідна освітленість робочого місця $E_н$=300 лк (середня точність роботи для розрізнення деталей розміром від 1 до 10 мм).

Загальний світловий потік визначають за формулою:

$$F_{заг} = \frac{E_H \times S \times z_1 \times z_2}{V}; \qquad (6.7)$$

де $E_н$ – нормована освітленість ($E_н$ =300лк);

S – площа приміщення;

z_1 – коефіцієнт, що враховує старіння ламп і забруднення світильників (z_1=1.5);

z_2 – коефіцієнт, що враховує нерівномірність освітлення приміщення (z_2=1.1);

V – коефіцієнт використання світлового потоку; визначається в залежності від коефіцієнтів відбиття від стін, стелі, робочих поверхонь, типів світильників і геометрії приміщення.

Площа приміщення:

$$S = A \times B = 16 \times 6 = 96 \text{ м}^2.$$

Виберемо коефіцієнт використання світлового потоку за такими даними:

- коефіцієнт відбиття побіленої стелі R_c=70%;
- коефіцієнт відбиття від стін, пофарбованих у світлий колір $R_{ст}$=50%;
- коефіцієнт відбиття від підлоги темного кольору R_p =10%;
- індекс приміщення:

$$i = \frac{A' \ B}{h(A+B)} = \frac{16' \ 6}{4(16+6)} = 1.1. \qquad (6.8)$$

Знайдений коефіцієнт V=0.34.

Визначаємо загальний світловий потік:

$$F_{заг} = \frac{300 \times 96 \times 1,1 \times 1,5}{0,34} = 139764 \text{ (лм)}. \qquad (6.9)$$

Для організації загального штучного освітлення виберемо лампи типу ЛБ40.

Люмінесцентні лампи мають ряд переваг перед лампами розжарювання: їх спектр ближче до природного; вони мають більшу світловіддачу, економічніші, а термін служби більший в 10…12 разів. Поряд із цим є і недоліки: робота супроводжується іноді шумом; гірше працюють при низьких температурах; такі лампи не можна застосовувати у вибухонебезпечних приміщеннях; мають малу інерційність.

Для нашого приміщення люмінесцентні лампи підходять.

Світловий потік однієї лампи ЛБ40 складає не менш $F_л$=2810 лм.

Число N ламп, необхідних для організації загального освітлення, визначається за формулою:

$$N = \frac{F_{заг}}{F_л} = \frac{139764}{2810} = 50. \qquad (6.10)$$

Світильники вибираємо типу ПВЛ-1, 2х40 Вт. Таким чином, щоб

забезпечити світловий потік $F_{заг}$=139764 лм, потрібно використовувати 25 світильників по 2 лампи ЛБ40 у кожному. Електрична потужність однієї лампи ЛБ40 $W_л$ = 40 Вт. Потужність всієї освітлювальної системи:

$$W_{заг} = W_л \times N = 40 \times 50 = 2000 \text{ (Вт)}.$$

6.1.3 Планування робіт з охорони праці

Основною функцією управління охороною праці є планування організаційно-технічних заходів по охороні праці. На кожному підприємстві розробляються перспективні, річні і оперативні плани по охороні праці.

Перспективний комплексний план розробляється на основі плану розвитку підприємства з врахуванням зростання об’ємів виробництва і підвищення продуктивності праці. Основу плану становлять заходи по скороченню рівня важкої фізичної праці, вивільненню працюючих, зайнятих на роботах з шкідливими умовами, покращенню санітарно-гігієнічних і санітарно-побутових умов.

Річний план складається на основі номенклатурних заходів по охороні праці, які включають в комплексний договір з урахуванням даних комплексного плану покращення умов, охорони праці і санітарно-оздоровчих заходів, паспорта санітарно-гігієнічного стану цехів і виробничих дільниць, аналіз причин виробничого травматизму і захворюваності, пропозицій робітників, службовців, органів державного нагляду і технічної інспекції праці.

Оперативне планування (квартальні, місячні, декадні плани) здійснює начальник цеху і старший інспектор по охороні праці і узгоджує з службою по охороні праці.

Важливою правовою формою планування заходів по охороні праці на підприємствах є колективні договори і угоди по охороні праці.

Колективний договір укладається профспілковим комітетом від імені трудового колективу з адміністрацією в особі керівника після обговорення і прийняття по ньому рішення трудовим колективом.

В угодах з охорони праці конкретизуються, уточнюються і доповнюються заходи по охороні праці з розбиттям по дільницях, цехах, агрегатах, з встановленням термінів проведення кожного заходу, переліком осіб, відповідальних за їх проведення, і коштів, які необхідні для проведення кожного заходу.

Заходи по охороні праці повинні бути забезпечені проектно-кошторисною, конструкторською та іншою технічною документацією, фінансуванням і матеріальними ресурсами.

Ці заходи фінансуються за рахунок засобів цехових і загальновиробничих (експлуатаційних) витрат, якщо заходи носять некапітальний характер; кошторису витрат бюджетних організацій і установ, якщо заходи носять некапітальний характер; передбачених в планових калькуляціях затрат, необхідних для створення безпечних умов праці на виконання госпдоговірних і науково-дослідних робіт; амортизаційного фонду, призначеного на капітальний ремонт, якщо заходи проводяться одночасно з капітальним ремонтом основних засобів; банківського кредиту, якщо заходи входять в комплекс затрат по впровадженню нової техніки або розширенню виробництва, які кредитуються банком; державних капітальних вкладень, включаючи фонд розвитку виробництва, якщо заходи є капітальними.

На проведення заходів по охороні праці в масштабі галузі, включаючи проведення науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт, розробку типових інструкцій, галузевих стандартів, правил, створення фільмів, пропаганду по охороні праці, підприємства щорічно перераховують в фонд міністерств не менше 5% вартості заходів по охороні праці, які фінансуються за рахунок експлуатаційних витрат. Грошові і матеріальні ресурси, призначені для виконання конкретних заходів по охороні праці забороняється використовувати в інших цілях.

6.1.4 Контроль за станом охорони праці

Важливою гарантією забезпечення охорони праці робітників і службовців є

неухильне дотримання працівниками і адміністрацією вимог і норм трудового законодавства.

Результати роботи в області охорони праці і техніки безпеки визначаються щоденним кваліфікованим наглядом і контролем.

Державний контроль за безпекою праці здійснюють профспілки, а також технічна і правова інспекція праці.

Технічні інспектори праці здійснюють контроль і нагляд за дотриманням законодавства про працю, правил і норм охорони праці, і в першу чергу за відповідністю технологічних процесів, виробничих приміщень, обладнання, транспортних засобів вимогам техніки безпеки і виробничої санітарії.

Правова інспекція праці контролює дотримання законодавства про прийом на роботу, переводи і звільнення, ведення трудових книжок, режими робочого часу і відпочинку, про оплату праці, гарантії і компенсації, трудову дисципліну і матеріальну відповідальність робітників і службовців.

Триступінчастий контроль в системі управління безпекою праці проводиться на дільниці цеху – перша ступінь, в цеху – друга, на підприємстві в цілому – третя.

Перший ступінь контролю здійснюється керівником відповідної дільниці (майстром, начальником дільниці, начальником зміни) і інспектором щоденно на початку робочого дня (зміни), а при необхідності і на протязі всього робочого дня (зміни).

На першому ступені рекомендується перевіряти виконання заходів з усунення порушень, виявлених попередньою перевіркою; стан і правильність організації робочих місць; стан проходів, переходів, проїздів; безпеку технологічного обладнання, вантажопідйомних і транспортних засобів; дотримання працюючими правил електробезпеки при роботі на електроустановках і з електроінструментом. Контроль на першому ступені передбачає також перевірку дотримання правил складування заготовок і готової продукції; справності вентиляції; дотримання правил безпеки при роботі з шкідливими і вибухонебезпечними речовинами; наявності і дотримання працюючими інструкцій по охороні праці; наявності і правильності використання

працюючими засобів індивідуального захисту.

Усунення виявлених порушень, як правило, повинно проводитися відразу під безпосереднім наглядом керівника дільниці. При неможливості усунути виявлені недоліки власними силами керівник дільниці повинен після закінчення огляду доповісти про це вищим інстанціям для прийняття відповідних заходів.

У випадку грубого порушення правил і норм охорони праці, яке може нанести шкоду здоров'ю працюючих або привести до аварії, робота припиняється до усунення порушення.

Результати перевірки записуються в журнал першого ступеня контролю, який зберігається в начальника дільниці.

Другий ступінь триступінчастого контролю проводиться комісією, яку очолює начальник цеху і старший інспектор по охороні праці, не рідше двох разів в місяць. В склад комісії входять також представники технічних служб цеху, інженер відділу охорони праці підприємства і медичний працівник, закріплені за цехом.

На другому ступені контролю рекомендується перевіряти організацію і результати роботи першої ступені контролю; виконання розпоряджень і наказів керівника підприємства, начальника цеху; вивчення розслідування нещасних випадків; справність виробничого обладнання, транспортних засобів і відповідність технологічних процесів вимогам стандартів техніки безпеки праці та іншої нормативно-технічної документації по охороні праці. Другий ступінь передбачає також контроль дотримання працюючими правил електробезпеки; графіків планово-попереджувальних ремонтів; наявності і стану захисних, сигнальних і протипожежних засобів і пристроїв, контрольно-вимірювальних приладів; дотримання правил безпеки з шкідливими і пожежновибухонебезпечними речовинами; стану санітарно-побутових приміщень і пристроїв; забезпечення працюючих лікувально-профілактичним харчуванням; дотримання встановленого режиму роботи і відпочинку, трудової дисципліни. Результати перевірки записуються в журналі другого ступеня контролю.

Третій ступінь контролю проводиться комісією, яку очолює керівник або

головний інженер підприємства не рідше одного разу в квартал. В склад комісії входять заступник головного інженера по охороні праці, голова комісії охорони праці профспілок; керівник технагляду за будівлями і спорудами; керівники пожежної, газорятівної, медичної служби; а також позаштатні технічні інспектори по охороні праці. Крупні підприємства перевіряються по окремих цехах (об’єктах) по річному графіку.

На третьому ступені перевіряють ті ж позиції, що і на другому, але, крім того, додатково перевіряють організацію і результати роботи першого і другого ступеня; виконання заходів, запланованих в результаті виконання третього ступеня; виконання наказів і розпоряджень вищих інстанцій; виконання заходів, передбачених колективними договорами; виконання заходів по матеріалах розслідування нещасних випадків; наявність і правильність ведення документації; організацію впровадження стандартів по техніці безпеки; стан кабінетів по охороні праці; організацію і якість проведення навчання і інструктажів працюючих по безпеці праці. Результати перевірки оформляються актом і в тижневий термін обговорюються на нараді в керівника підприємства.

Матеріали наради оформляються протоколом з вказуванням заходів по усуненню виявлених недоліків і порушень, термінів виконання і відповідальних осіб. У випадку необхідності керівником підприємства видається відповідний наказ.

6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.2.1 Поняття та види надзвичайних ситуацій. Правові основи забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях

Територія України, її населення, як і території та населення інших країн світу, на жаль, не убезпечені від ризику надзвичайних ситуацій природного й техногенного характеру, які можуть зумовити людські втрати й заподіяти значної матеріальної шкоди.

У законодавстві України надзвичайною ситуацією (НС) вважають порушення нормальних умов життя й діяльності людей на об'єкті або території,

спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат.

Відповідно до причин походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайної ситуації на території України, розрізняють надзвичайні ситуації:

- техногенного характеру – транспортні аварії (катастрофи), пожежі, неспровоковані вибухи чи їх загроза, аварії з викидом (загрозою викиду) небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, раптове руйнування споруд і будівель, аварії на інженерних мережах і спорудах життєзабезпечення, гідродинамічні аварії на греблях, дамбах тощо;
- природного характеру – небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні, морські та прісноводні явища, деградація ґрунтів чи надр, природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність людей, сільськогосподарських тварин, масове ураження сільськогосподарських рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів і біосфери тощо;
- соціально-політичного характеру – пов’язані з протиправними діями терористичного й антиконституційного спрямування: здійснення або реальна загроза терористичного акту (збройний напад, захоплення й утримання важливих об’єктів, ядерних установок і матеріалів, систем зв’язку й телекомунікацій, напад чи замах на екіпаж повітряного або морського судна), викрадення (спроба викрадення) чи знищення суден, захоплення заручників, встановлення вибухових пристроїв у громадських місцях, викрадення або захоплення зброї, виявлення застарілих боєприпасів тощо;
- воєнного характеру – пов’язані з наслідками застосування зброї масового ураження, під час яких виникають вторинні фактори ураження населення внаслідок зруйнування атомних і гідроелектростанцій, складів і сховищ радіоактивних та токсичних речовин і відходів, нафтопродуктів, вибухівки, транспортних та інженерних комунікацій тощо.

Відповідно до територіального поширення обсягів заподіяних або очікуваних економічних збитків, кількості людей, які загинули, за кваліфікаційними ознаками визначають чотири рівні надзвичайних ситуацій – загальнодержавний, регіональний, місцевий та об'єктовий.

Правове регулювання забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях має комплексний характер і поєднує норми різних галузей права (конституційного, адміністративного, кримінального, господарчого, фінансового тощо). Але відносини, які виникають під час здійснення виконавчо-розпорядчої та іншої діяльності щодо забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій здебільшого регулюються адміністративно-правовими нормами.

Правову основу забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій складають Конституція України, Закони України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи», «Про правовий режим надзвичайного стану», «Про зону надзвичайної екологічної ситуації» від 17 грудня 1993 р., «Про пожежну безпеку» від 18 січня 2001 р., «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 28 жовтня 1996 р., Положення «Про Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи», Програма запобігання та реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру на 2000-2005 роки, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 22 серпня 2000 р. тощо.

6.2.2 Оцінка інженерної і пожежної обстановки у надзвичайних ситуаціях

Під інженерною обстановкою розуміють сукупність наслідків дій стихійних лих, аварій (катастроф), а також первинних і вторинних вражаючих факторів ядерної зброї, інших сучасних засобів ураження, в результаті яких має місце руйнування будинків, обладнання, комунально-енергетичних об’єктів, засобів зв’язку і транспорту, мостів, гребель, аеродромів та ін.

Під пожежною обстановкою розуміють сукупність наслідків стихійних лих, аварій (катастроф), а також первинних і вторинних вражаючих факторів ядерної

зброї, інших сучасних засобів ураження і перш за все запалювальних засобів, в результаті яких виникають пожежі, які впливають на стійкість роботи об’єктів народного господарства і життєдіяльності населення.

Що таке оцінка інженерної обстановки?

Оцінка інженерної обстановки перебачає:

1) визначення масштабів і ступені руйнувань елементів об’єкту в цілому, ступені руйнувань будинків, об’єктів та ін., в тому числі захисних споруд для укриття працюючих і службовців, розміри зон завалів, об’єму інженерних робіт, можливості об’єктових і приданих формувань по проведенню (РіНР) рятувальних робіт та інших невідкладних робіт;
2) аналіз їх впливу на стійкість роботи окремих елементів і об’єкта в цілому, а також життєдіяльність населення;
3) висновки про стійкість окремих елементів і об’єкту в цілому до дії уражаючих факторів і рекомендацій по її підвищенню, пропозиції по здійсненню РіНР.

Вихідними даними для оцінки інженерної обстановки є дані про найбільш вірогідні стихійні лиха, аварії (катастрофи), про противника, його намірах і можливостях використання ЗМУ та інших сучасних засобів ураження, їх характеристик, а також характеристик захисних споруд для укриття особового складу.

Оцінка пожежної обстановки включає:

1) визначення масштабу і характеру (виду) пожежі, швидкості і напрямку пожежі, площі зон задимлення і час зберігання диму;
2) аналіз їх впливу на стійкість роботи окремих елементів і об’єкту в цілому, а також життєдіяльність населення;
3) висновки про на стійкість окремих елементів і об’єкту в цілому до загорання і рекомендації по її підвищенню, пропозиції по вибору найбільш доцільних дій пожежних підрозділів і формувань ЦО по локалізації її і припиненню пожежі, евакуації при необхідності людей із зони пожежі.

Вихідними даними для прогнозування пожежної обстановки є відомості про

найбільш можливі стихійні лиха, аварії (катастрофи), дані про пожежо- і вибухонебезпечність об’єкту і його елементів, навколишнього середовища, особливо лісів, населених пунктів, метеоумови, рельєф місцевості, наявність різних перешкод, вододжерел тощо.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЩОДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Метою цієї кваліфікаційної роботи було дослідження особливостей використання алгоритму адаптивного керування для процесу чистового фрезерування.

Роботу можна підсумувати таким чином.

Для процесу фрезерування була розроблена модель першого порядку. Лише в особливих випадках ця модель може бути зведена до простого підсилення. Для швидкості подачі сервоприводу була виведена модель другого порядку, яка була достатньо точною для використання в конструкції контролера.

Робота пропорційно-інтегрально-диференціального контролера була визнана задовільною. Одним недоліком цього типу контролера є те, що для стабільності регулювання підсилення необхідні глибокі знання про установку.

Контролер розміщення числа пар полюсів мав задовільну реакцію. Вибір полюсів дає перевагу цій конструкції. Ефективність як пропорційно-інтегрально-диференціального контролера так і контролера розміщення числа пар полюсів залежить від коректності процесу моделювання та швидкого сходження оператора.

Реакція схеми адаптивного контролю по еталонній моделі була коливальною та гіршою у порівнянні з іншими схемами самоналаштування.

Результати цієї кваліфікаційної роботи потребують подальшого дослідження в кількох напрямках. Майбутня робота може бути сформульована таким чином.

1. Моделювання процесу фрезерування потрібно вдосконалити. Додаткова робота має бути пророблена для включення ефекту граничних зусиль.

2. Ефект не модельованих динамік (завади вимірювання та виліт) потребують дослідження і при потребі включені в модель.

3. Метод ідентифікації потрібно вдосконалити для забезпечення правильного і швидкого сходження.

4. Необхідно додатково вивчити ефект не модельованих динамік схеми

адаптивного керування по еталонній моделі.

5. Сила різання використовувалася як обмеження для запобігання поломки інструменту. Потрібна додаткова робота, щоб знайти найкращі обмеження для оптимізації якісних та економічних факторів одночасно.

6. Алгоритми не можуть бути використані для запобігання поломки інструменту через значне перевищення сили під час перехідних процесів, і їх слід поєднувати з іншими механізмами вимірювання.

7. Алгоритми потрібно випробувати для складнішої геометрії деталей. Робота також може бути розширена для інших типів верстатів.

8. Датчик, що був використаний в дослідженнях, не є практичним на виробництві. Потрібно ґрунтовніше дослідження для заміни цього датчика іншими, чи шпинделем з датчиками, чи ходовим гвинтом, або використати інші сигнали для вимірювання сили, наприклад струм.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бабіченко А.К. Промислові засоби автоматизації. Ч. 1. «Вимірювальні пристрої» / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, М.О. Подустов та ін. Х.: НТУ «ХПІ», 2001. 470 с.
2. Бабіченко А.К. Промислові засоби автоматизації, Ч. 2. «Регулювальні і виконавчі пристрої» / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін. Х.: НТУ «ХПІ», 2003. 658 с.
3. Босинзон М. А., Черпаков Б.И. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация. М.: Академия. 2006. 192 с.
4. Бунаков, П.Ю., Широких Э. В. Станок с ЧПУ. От модели до образца. Москва. ДМК Пресс, 2012. 120 с.
5. Гаврилюк Д.В., Моліцький В.В. Дослідження адаптивних систем контролю процесу фрезерування. Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів 25-26 листопада 2020 року. Т1. Тернопіль. 2020. С. 48.
6. Гайченко В.А., Коваль Г.М. Основи безпеки життєдіяльності людини: Навчальний посібник. К.: МАУП, 2002. 226 с.
7. Гжиров Р. И., Серебреницкий П. П. Программирование обработки на станках с ЧПУ. Л.: Машиностроение, 1990. 588 с.
8. Гусев И.Т. и др. Устройства числового программного управления. М.: - Высшая школа, 1986. 296 с.
9. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. структура та правила оформлення. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2017. 26 с. (Інформація та документація).
10. ДСТУ 8302:2015. «Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання». [Чинний від 2016-03-04]. Вид. офіц. Київ, 2016. 16 с. (Інформація та документація).
11. Жолобов О.О., Кирилович В.А. Технологія автоматизованого виробництва. Житомир: ЖДТУ, 2008. 1014 с.
12. Законодавство України про охорону праці. Збірник нормативних

документів. В 4 т. Київ: 1995. 1997.

13. Кряжев Д.Ю. Фрезерная обработка на станках с ЧПУ, Ирлен Инжиниринг, 2005. 40 с.
14. Ловыгин А. А., Теверовский Л. В..Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. [3-е полноцв. изд.]. Москва : ДМК Пресс, 2012. 278 с.
15. Марущак П.О., Ю.Б. Капаціла, Р.І. Михайлишин. Методичні вказівки з виконання курсової роботи з дисципліни «Основи наукових досліджень» для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль: ТНТУ, 2018. 32 с.
16. Марущак П.О., Савків В.Б., Коноваленко І.В., Шкодзінський О.К. Методичний посібник з дипломного проектування за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр» для студентів спеціальності 151 «Автоматизоване управління технологічними процесами. Тернопіль : ТНТУ. 66 с.
17. Онофрейчук Н. Основи обробки та програмування на верстатах з числовим програмним керуванням. Світ. 2017. 368 с.
18. Соломенцев Ю.М., Медведев В.А. Технологические основы гибких производственных систем. 2-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2000. 255 с.
19. Соломенцев Ю.М. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии. М.: Наука, 2003, 292 с.
20. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Программирование систем числового программного управления. Изд. Логос, Университетская книга, 2008. 344 с.
21. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. /Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд. М.: Машиностроение. Т.1 2001. 912 с., Т.2 2001. 994 с.
22. Рачков, М.Ю. Оборудование и основы построения ГАП. М.: Высш. шк., 1991. 166 с.
23. Пальчевський Б.О. Технологічні основи гнучкого автоматизованого виробництва:Навч.посібник. Львів: Світ, 1994. 208 с.
24. Koren Y. Computer Control of Manufacturing Systems. McGraw-Hill,New York,

(1983).

25. Groover,M.P., Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing, Prentice-Hall,(1987).
26. Astrom,K.J., «Theory and Applications of Adaptive Control- A Survey». Automatica ,Vol.l9,pp. 471-486,(1983).
27. Seborg, D.E.,Edgar,T.F. and Shah,S.L. «Adaptive Control Strategies for Process control: A Survey». AIChE Journal,Vo\. 32, No.6, pp.881-913,(1986).
28. Yen, D.W.and Wright,P.K., «Adaptive Control in Machining- A New Approach Based on the Physical Constraint of Tool Wear Mechanisms», ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.105, No.l,pp. 31-38,(1983).
29. Elbestawi,M.A. and Sagherian,R., «Parameter Adaptive Control in Peripheral MUling». International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol.27, No.3, pp.399-414 (1987).
30. Altintas, Y., Instrumentation of a Research Machine Tool with a Modular Computer Numerical Controller (CNC). submitted to Trans of the Institute of Measurement and Control, (1988).
31. Lauderbaugh,L.K., «Implementation of Model Reference Adaptive Force Control in Milling». P.hD. Thesis, University of Michigan,(1985).