

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
зі спеціальності
174 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

тема роботи:

***«Модернізація системи керування коробкою швидкостей карусельного
токарного верстата на базі програмованого логічного контролера»***

Виконав студент гр. АКІТР-23ск _____ Чигрин Д. Р.
Керівник _____ Курганов І. Д.
Нормоконтроль _____ Маринич І. А.
Завідувача кафедри _____ Рубан С. А.

Кривий Ріг-2026

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 28 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Чигрину Дмитру Романовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Модернізація системи керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата на базі програмованого логічного контролера»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2-3-4

Курганов І.Д.

Нормоконтроль

Маринич І. А.

5. «Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>05.04.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>18.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>02.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>23.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>10.06.26</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Курганов І.Д./

7. Запевнення: Я, Чигрин Дмитро Романович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомена.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Чигрин Д. Р./

АНОТАЦІЯ

Чигрин Д. Р. Модернізація системи керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата на базі програмованого логічного контролера.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр, за напрямом 174 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2026.

Робота складається з вступу, двох розділів, висновків, списку літератури з 30 позицій. Загальний обсяг роботи становить 76 сторінок, з яких основний зміст роботи викладено на 70 сторінках, робота включає 8 таблицю і 16 рисунків.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності, функціональності та рівня автоматизації металорізального обладнання, значна частина якого експлуатується на промислових підприємствах із використанням морально застарілих релейно-контакторних систем керування.

Об'єктом дослідження є процес керування швидкістю обертання планшайби карусельного токарного верстата.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого керування коробкою швидкостей із використанням програмованих логічних контролерів та електромагнітних муфт.

У роботі проведено аналіз конструкції карусельного токарного верстата, досліджено кінематичну схему приводу планшайби та принцип формування 18 швидкостей коробки передач. Розглянуто особливості роботи електромагнітних муфт та існуючої релейної системи керування, визначено її основні недоліки: низьку гнучкість, складність технічного обслуговування, значний знос контактних елементів, обмежені можливості реалізації блокувань і діагностики.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Чигрин Д.Р.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Курганов І.Д.								
Н. Контр.		Маринич І.А.						КНУ АКІТР-23ск		
Затвердив		Маринич І.А.								

У процесі виконання роботи розроблено структурну схему автоматизованої системи керування на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Zelio Logic. Сформовано інформаційну модель системи та таблиці вхідних і вихідних сигналів ПЛК. Розроблено алгоритм автоматичного перемикання швидкостей із урахуванням послідовності переходів, часових затримок, взаємного блокування муфт та контролю аварійних режимів. Алгоритм реалізовано у вигляді автомата станів GRAFCET та Ladder Diagram.

Ключові слова: КАРУСЕЛЬНИЙ ТОКАРНИЙ ВЕРСТАТ, КОРОБКА ШВИДКОСТЕЙ, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, ПЛК, ZELIO LOGIC, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА МУФТА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, LADDER DIAGRAM, GRAFCET, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, БЛОКУВАННЯ, ПЕРЕМІКАННЯ ШВИДКОСТЕЙ, АВТОМАТ СТАНІВ.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>АНОТАЦІЯ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Чигрин Д.Р.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Курганов І.Д.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затвердив</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТА	11
1.1 Призначення та технічні характеристики верстата 1512 (1516)	11
1.2 Кінематична схема приводу планшайби	12
1.3 Конструкція коробки швидкостей.....	16
1.4 Аналіз системи керування муфтами	19
1.5 Аналіз недоліків релейної системи керування та обґрунтування переходу на ПЛК.....	24
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2	
СИНТЕЗ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОРОБКОЮ ШВИДКОСТЕЙ НА БАЗІ ПЛК.....	29
2.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи керування.....	29
2.2 Формування інформаційної моделі та таблиці сигналів (I/O).....	33
2.3 Розробка алгоритму керування коробкою швидкостей	39
2.4 Обґрунтування вибору програмованого логічного контролера.....	50
Висновки по розділу 2	65
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	68
ДОДАТОК А.....	71
MATLAB-скрипт моделювання системи керування	71

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ЗМІСТ</i>		
Розроб.		Чигрин Д.Р.					
Перевір.		Курганов І.Д.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затвердив		Маринич І.А.			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудівної галузі характеризується широким впровадженням автоматизованих і комп'ютерно-інтегрованих технологій, що забезпечують підвищення ефективності виробництва, якості продукції та конкурентоспроможності підприємств. Одним із пріоритетних напрямів технічного переоснащення є модернізація існуючого парку металорізального обладнання, значна частина якого була введена в експлуатацію у другій половині XX століття.

До такого обладнання належать карусельні токарні верстати моделей 1512 та 1516, які широко застосовуються для обробки великогабаритних деталей у важкому машинобудуванні, енергетиці, транспортній галузі та гірничо-металургійному комплексі. Незважаючи на високу механічну надійність і значний запас міцності, дані верстати оснащені морально застарілими системами керування, побудованими на релейно-контакторній елементній базі.

Релейно-контакторні системи керування характеризуються обмеженою функціональністю, низькою гнучкістю, значною трудомісткістю обслуговування та налаштування, а також підвищеною ймовірністю відмов, зумовленою зношуванням контактних елементів. Крім того, такі системи не забезпечують необхідного рівня автоматизації та ускладнюють інтеграцію обладнання у сучасні автоматизовані виробничі системи.

Одним із ключових вузлів карусельного токарного верстата є система керування коробкою швидкостей головного приводу, яка визначає режими різання, продуктивність обробки та якість виготовлення деталей.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Чигрин Д.Р.			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Тиханський М.П.								
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск					
Затвердив		Маринич І.А.								

У традиційних системах перемикання швидкостей здійснюється за допомогою електромагнітних муфт, керування якими реалізується засобами релейної логіки.

Такий підхід не забезпечує достатнього рівня надійності, безпеки та ефективності керування, ускладнює реалізацію міжблокувань і не дозволяє оптимізувати режими роботи верстата.

У сучасних умовах актуальним є застосування програмованих логічних контролерів, які забезпечують реалізацію складних алгоритмів керування, підвищення точності та надійності функціонування систем, а також можливість їх гнучкого налаштування та подальшої модернізації. Використання ПЛК у системах керування коробками швидкостей дозволяє реалізувати автоматичний вибір режимів обробки, забезпечити коректну логіку перемикання передач, впровадити системи захисту та діагностики, а також зменшити динамічні навантаження на механічні вузли.

Актуальність теми роботи зумовлена необхідністю модернізації існуючих систем керування карусельних верстатів з метою підвищення їх техніко-економічних показників, надійності та безпеки експлуатації, а також адаптації до сучасних умов цифрового виробництва. Запропонований підхід дозволяє підвищити рівень автоматизації без повної заміни обладнання, що є економічно доцільним для промислових підприємств.

Модернізація системи керування коробкою швидкостей передбачає заміну релейно-контакторної логіки на мікропроцесорну систему на базі програмованого логічного контролера, яка реалізує алгоритми керування електромагнітними муфтами. Це дозволяє забезпечити оптимальну послідовність перемикання передач, виключити аварійні режими, реалізувати міжблокування, а також створити основу для інтеграції верстата в автоматизовані виробничі комплекси.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата моделей на

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

базі програмованого логічного контролера, що забезпечує підвищення ефективності, надійності та якості роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати конструкцію та кінематичну схему коробки швидкостей верстата;
- дослідити принцип роботи електромагнітних муфт і існуючої системи керування;
- визначити недоліки релейно-контакторної системи керування;
- розробити функціональну та структурну схеми автоматизованої системи;
- синтезувати алгоритм автоматичного перемикання швидкостей з урахуванням технологічних обмежень;
- обґрунтувати вибір програмованого логічного контролера та елементної бази;
- розробити програмне забезпечення системи керування;
- виконати моделювання та дослідження роботи системи.

Об'єктом дослідження є процес керування швидкістю обертання планшайби карусельного токарного верстата.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого керування коробкою швидкостей із використанням програмованих логічних контролерів та електромагнітних муфт.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості модернізації існуючих карусельних верстатів без значних капітальних витрат, що забезпечує підвищення їх технічного рівня, стабільності технологічних процесів та зниження витрат на обслуговування. Результати роботи можуть бути використані при розробці нових систем керування металорізальним обладнанням.

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата є актуальним науково-технічним

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності використання виробничого обладнання та розвитку сучасних технологій автоматизації.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТА

1.1 Призначення та технічні характеристики верстата 1512 (1516)

Карусельні токарні верстати моделей 1512 та 1516 призначені для обробки великогабаритних і важких деталей типу дисків, фланців, кілець і корпусних виробів. Такі верстати широко застосовуються у важкому машинобудуванні, енергетиці, транспортній та гірничо-металургійній галузях [3].

Основною особливістю карусельних верстатів є вертикальне розташування осі обертання заготовки, що забезпечує зручність встановлення масивних деталей і рівномірний розподіл навантаження [3], [4].

Верстати моделей 1512 та 1516 відрізняються між собою, в основному, максимальним діаметром оброблюваної деталі та потужністю приводу. Загальні технічні характеристики відповідають класу важких металорізальних верстатів із ступінчастим регулюванням швидкості [3].

Основні технічні характеристики:

- максимальний діаметр обробки:
для моделі 1512 – до 1250 мм;
для моделі 1516 – до 1600 мм;
- максимальна висота оброблюваної деталі – до 1000–1250 мм;
- маса оброблюваної заготовки – до 5–8 т;
- кількість ступенів швидкості обертання планшайби – 12–24;
- діапазон частот обертання – від 2 до 160 об/хв (орієнтовно);
- потужність головного приводу – 22–55 кВт;
- тип приводу – електромеханічний із коробкою швидкостей.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>РОЗДІЛ 1</i>		
Розроб.		Чигрин Д.Р.					
Перевір.		Курганов І.Д.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затверд.		Маринич І.А.			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		
					Літ.	Арк.	Аркушів
						8	15

Головний рух різання забезпечується обертанням планшайби, яке здійснюється через механічну коробку швидкостей.

Допоміжні рухи (подачі) реалізуються окремими приводами супортів. Такий підхід є типовим для обладнання з електромеханічним приводом [5].

1.2 Кінематична схема приводу планшайби

Кінематична схема приводу планшайби карусельного токарного верстата визначає структуру передачі обертального руху від електродвигуна головного приводу до робочого органу — планшайби. Вона є основою для формування режимів різання та забезпечує необхідний діапазон швидкостей обертання залежно від технологічних умов обробки [3], [5].

Привід планшайби реалізується через багатоступеневу механічну систему, до складу якої входять електродвигун, система валів, зубчасті передачі, електромагнітні муфти та планетарний редуктор. Така структура дозволяє отримувати широкий діапазон швидкостей при відносно компактних габаритах коробки швидкостей і високій надійності механічної частини [5].

Основні елементи кінематичної структури

Кінематична схема приводу планшайби включає такі основні елементи:

- електродвигун головного приводу;
- вхідний вал (I);
- проміжні вали (II, III, IV);
- вал планетарної передачі (V);
- вихідний вал (VI);
- систему зубчастих передач;
- електромагнітні муфти перемикання передач;
- планетарний редуктор.

Вхідний вал отримує крутний момент безпосередньо від електродвигуна і передає його через систему зубчастих передач на проміжні вали. Далі рух розподіляється між різними гілками кінематичного ланцюга залежно від

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

увімкнених муфт [3].

Структура передачі руху

Передача руху здійснюється за наступною послідовністю:

електродвигун → вхідний вал (I) → система зубчастих передач →
проміжні вали (II, III) → вал перемикання передач (IV) → планетарний
механізм (V) → вихідний вал (VI) → планшайба.

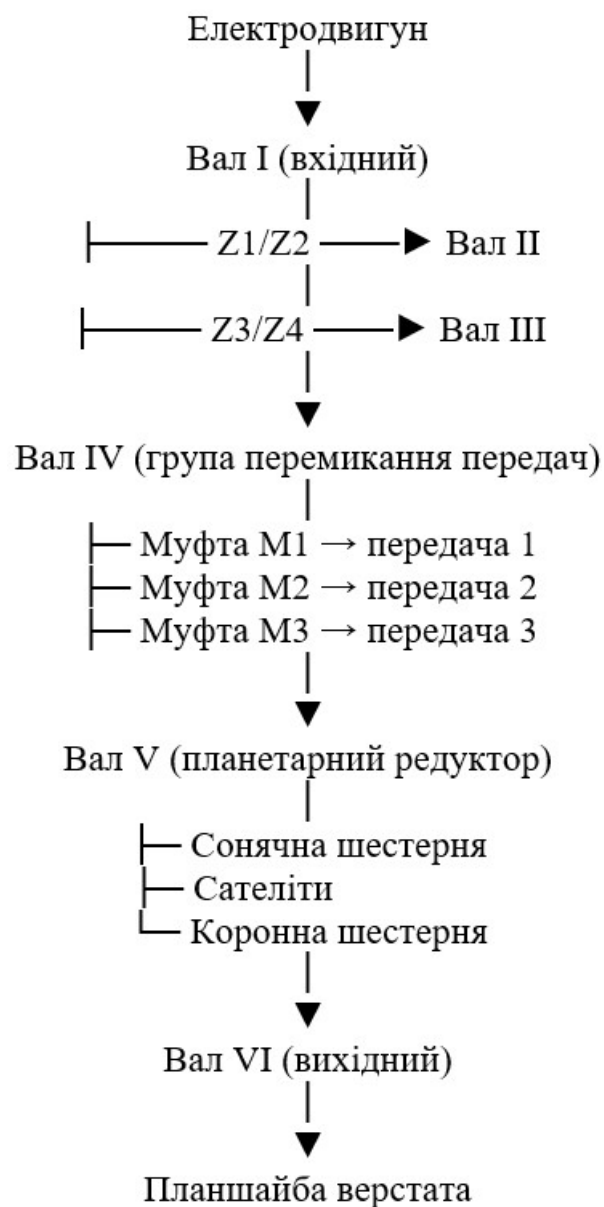


Рисунок 1.1- Схема передачі руху

На кожному етапі кінематичного ланцюга використовуються зубчасті пари з різними передаточними числами, що дозволяє формувати необхідні

швидкості обертання [4].

КІНЕМАТИЧНА СХЕМА КОРОБКИ ШВИДКОСТЕЙ ВЕРСТАТА 1512/1516

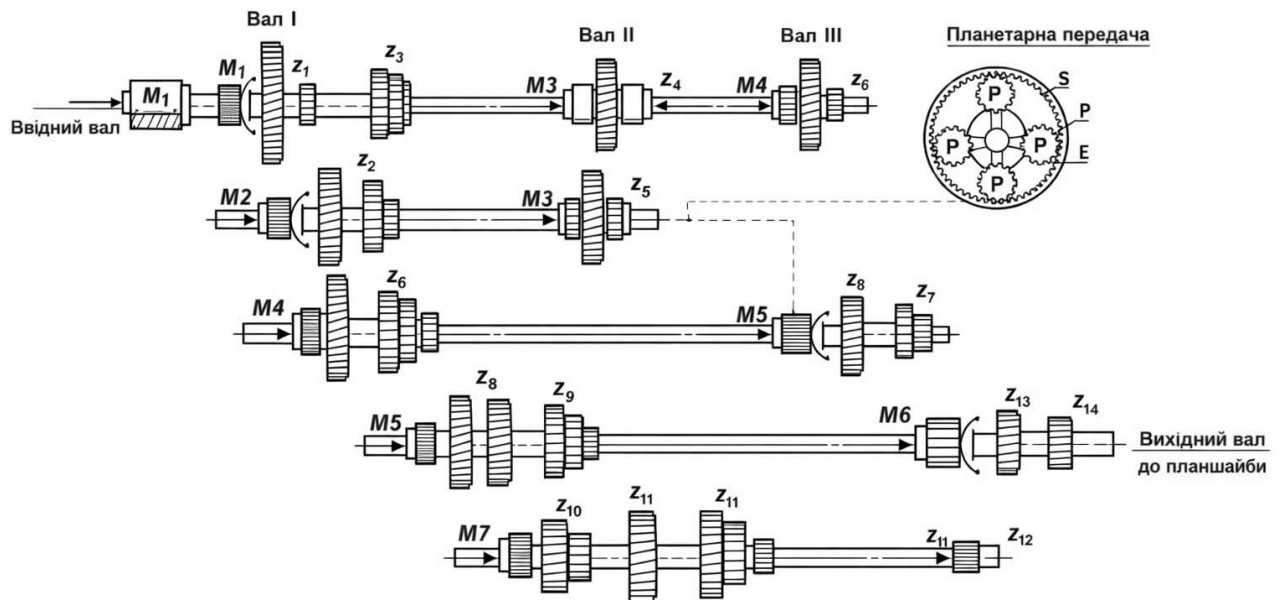


Рисунок 1.2- Кінематична схема коробки швидкостей

Типова схема розгалуження передач має вигляд:

- передача $Z1/Z2$ формує зв'язок між валами I і II;
- передача $Z3/Z4$ забезпечує передачу між валами I і III;
- далі рух надходить на вал IV, де відбувається вибір однієї з

передач за допомогою електромагнітних муфт.

На валу IV розташована група перемикання передач, яка реалізує вибір швидкості за допомогою муфт:

- муфта $M1$ — перша передача;
- муфта $M2$ — друга передача;
- муфта $M3$ — третя передача.

Увімкнення відповідної муфти визначає активну кінематичну гілку передачі руху.

Роль планетарного редуктора

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Після проходження ступенів коробки швидкостей крутний момент передається на вал планетарного механізму (V), який включає:

- сонячну шестерню;
- сателіти;
- коронну шестерню.

Планетарний редуктор виконує важливу функцію розширення діапазону швидкостей і підвищення крутного моменту на низьких обертах. Його використання дозволяє отримати додаткові режими роботи верстата без значного збільшення габаритів механізму [5].

Можливі режими роботи планетарної передачі:

- блокування планетарного ряду — реалізація прямої передачі;
- робота як редуктора — зменшення швидкості обертання та

збільшення крутного моменту.

Завдяки цьому планетарний механізм забезпечує додаткову гнучкість у формуванні швидкісних режимів і покращує енергетичні характеристики приводу.

Формування кількості швидкостей

Кількість можливих швидкостей обертання планшайби визначається комбінацією:

- трьох груп зубчастих передач;
- трьох ступенів першої групи;
- трьох ступенів другої групи;
- двох режимів роботи планетарного редуктора.

У загальному випадку кількість швидкостей визначається як:

$$3 \times 3 \times 2 = 18$$

де:

- перші два множники відповідають ступеням зубчастих передач;
- третій множник — режимам планетарного механізму.

Таким чином, коробка швидкостей забезпечує 18 дискретних швидкостей обертання планшайби, що є типовим рішенням для верстатів

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даного класу [3], [5].

Кінематичні вали коробки швидкостей

У складі кінематичного ланцюга виділяють наступні вали:

- Вал I — вхідний вал, який отримує рух від електродвигуна;
- Вал II — перша група передач;
- Вал III — друга група передач;
- Вал IV — вал перемикання швидкостей із групою муфт;
- Вал V — вал планетарного механізму;
- Вал VI — вихідний вал, що передає рух безпосередньо на

планшайбу.

Кожен із валів виконує свою функцію у загальному кінематичному ланцюзі та бере участь у формуванні кінцевого передавального відношення.

Кінематична схема приводу планшайби карусельного токарного верстата є складною багаторівневою системою, що поєднує зубчасті передачі, електромагнітні муфти та планетарний редуктор. Така структура забезпечує формування широкого діапазону швидкостей (18 ступенів), необхідних для ефективної обробки великогабаритних деталей.

Водночас складність кінематичного ланцюга обумовлює підвищені вимоги до системи керування, яка повинна забезпечувати коректне перемикання передач, реалізацію міжблокувань та узгоджену роботу всіх елементів приводу

1.3 Конструкція коробки швидкостей

Коробка швидкостей карусельного токарного верстата є складним механічним вузлом, призначеним для формування необхідних частот обертання планшайби шляхом ступінчастої зміни передавального відношення кінематичного ланцюга. Вона забезпечує передачу, перетворення та розподіл крутного моменту від електродвигуна до вихідного вала приводу планшайби [3], [5].

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструктивно коробка швидкостей верстатів моделей 1512 (1516) поєднує багатовалову систему, зубчасті передачі та електромагнітні муфти перемикавання, що дозволяє реалізувати дистанційне керування режимами роботи без зупинки головного приводу [4], [5].

Основні елементи коробки швидкостей

До складу коробки швидкостей входять: корпус коробки; система валів (вхідний, проміжні та вихідний); зубчасті передачі різних передавальних чисел; електромагнітні муфти; планетарний редуктор; підшипникові опори; система змащення.

Такі конструкції є типовими для металорізальних верстатів і забезпечують надійну передачу потужності та зміну швидкостей у широкому діапазоні [3], [4].

Кінематична структура коробки швидкостей. Кінематично коробка швидкостей представляє достатньо детально розглянута в попередньому підрозділі.

Роль електромагнітних муфт. Перемикавання передач у коробці швидкостей здійснюється за допомогою електромагнітних муфт, які забезпечують дистанційне керування включенням відповідних кінематичних гілок.

Електромагнітна муфта є електромеханічним пристроєм, що передає крутний момент під дією електромагнітного поля. При подачі напруги створюється магнітне поле, яке притягує фрикційні елементи муфти, забезпечуючи передачу моменту. При знятті живлення муфта розмикається [12].

Застосування електромагнітних муфт забезпечує швидке перемикавання передач, реалізує дистанційне керування, зменшує механічний знос елементів та підвищує точність позиціонування режимів роботи.

Роль планетарного редуктора. Планетарний редуктор є важливим елементом коробки швидкостей, який забезпечує додаткові ступені регулювання швидкості та підвищення крутного моменту.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Його конструкція включає: сонячну шестерню, сателіти, коронну шестерню, водило.

Планетарні передачі широко застосовуються у машинобудуванні завдяки своїй компактності, високій навантажувальній здатності та можливості реалізації різних передавальних відношень [12], [13].

У коробці швидкостей можливі такі режими роботи планетарного механізму:

- блокування одного з елементів — реалізація прямої передачі;
- робота як редуктора — зменшення швидкості та збільшення

крутного моменту.

Коробка швидкостей характеризується такими конструктивними особливостями:

- багатовальна структура;
- використання зубчастих передач постійного зачеплення;
- застосування електромагнітних муфт для дистанційного керування;
- інтеграція планетарного редуктора;
- наявність системи змащення для забезпечення довговічності.

Подібні технічні рішення є типовими для важких верстатів і розглядаються у сучасній літературі з автоматизації та електроприводів як ефективні механічні системи передачі енергії [3], [5], [14].

Коробка швидкостей карусельного токарного верстата є складною багатоступеневою механічною системою, яка забезпечує формування необхідного діапазону швидкостей обертання планшайби. Її конструкція базується на поєднанні зубчастих передач, багатовальної структури, електромагнітних муфт та планетарного редуктора.

Використання такої структури дозволяє реалізувати ступінчасте регулювання швидкості (до 18 режимів), однак водночас висуває підвищені вимоги до системи керування, що повинна забезпечувати коректну логіку перемикавання передач, блокування та синхронізацію роботи вузлів

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Аналіз системи керування муфтами

Система керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата базується на електромеханічному принципі, відповідно до якого перемикання передач здійснюється за допомогою електромагнітних муфт, керування якими реалізується через релейно-контакторну апаратуру або програмовані логічні контролери [12], [14]. Основною метою такої системи є забезпечення вибору необхідної швидкості обертання планшайби, включення відповідної комбінації муфт, виключення конфліктних режимів роботи та синхронізація процесу перемикання передач.

Загальна структура системи керування включає органи керування, такі як кнопки та перемикачі, релейно-контакторну логіку, кроковий шукач, електромагнітні муфти, а також допоміжні елементи блокування, захисту, джерела живлення та сигналізації. У сукупності ці компоненти забезпечують перетворення команди оператора у відповідну комбінацію сигналів керування виконавчими механізмами [12].

Електромагнітні муфти виконують функцію виконавчих елементів системи та безпосередньо впливають на кінематичний ланцюг коробки швидкостей. При подачі електричного сигналу збуджується котушка муфти, у результаті чого виникає магнітне поле, яке притягує фрикційні елементи і забезпечує передачу крутного моменту. При знятті живлення магнітне поле зникає, муфта розмикається, і передача моменту припиняється [12]. Таким чином, електромагнітні муфти виконують роль електрично керованих ключів у кінематичній системі.

Релейна система керування забезпечує логічну обробку команд і формування сигналів для муфт. Вона реалізує дешифрацію вибраної швидкості, формує сигнали керування відповідними виконавчими колами, а також забезпечує взаємне блокування муфт і захист від аварійних режимів. Релейна логіка побудована на використанні проміжних реле, контакторів, блокувальних

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контактів і, за необхідності, таймерів, що дозволяє реалізувати необхідну послідовність перемикачів та унеможливити некоректні стани системи.

Логічна структура керування може бути представлена як послідовність перетворення сигналу від органу керування через блок вибору швидкості до крокового шукача, який здійснює адресне позиціонування. Далі сигнал надходить до релейної логіки, де формуються сигнали для окремих муфт через відповідні реле, після чого система блокувань контролює коректність їх одночасного включення, а сформовані сигнали надходять безпосередньо до електромагнітних муфт.



Рисунок 1.3- Функціональна схема керування муфтами

Кроковий шукач є електромеханічним комутатором, який забезпечує дискретне позиціонування та вибір відповідної комбінації контактів залежно від команди керування.



Рисунок 1.4- Кроковий шукач ШИ-11

Його конструкція включає електромагнітний привід, контактне поле, рухомий контактний механізм та вузол фіксації положення. Принцип роботи полягає у тому, що при подачі імпульсу керування електромагніт приводить у рух механізм переміщення контактів, який переходить на наступну позицію та фіксується у ній. Кожна позиція відповідає певній комбінації вихідних контактів, що визначає конкретну швидкість коробки передач [12], [14].

У системі керування кроковий шукач виконує функцію селектора швидкостей та дешифратора команд оператора. Він забезпечує однозначне формування сигналів для релейної логіки, координує роботу комутаційних елементів та підвищує загальну надійність системи. У поєднанні з релейною логікою та блокувальними елементами він дозволяє уникнути одночасного включення взаємовиключних муфт і тим самим запобігає виникненню аварійних режимів.

Система блокувань у даній схемі реалізується як на електричному рівні, через нормально замкнуті контакти реле, так і на логічному рівні шляхом організації взаємозв'язків між сигналами керування. Додатково можуть застосовуватись механічні блокування, що підвищують безпеку роботи системи. Такі заходи виключають можливість одночасного включення несумісних передач і забезпечують стабільність роботи механізму [5].

Загальна структурна схема блокувань

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Команда оператора→Логічний блок керування→Електричні блокування
→Електромагнітні муфти→Кінематична система

1. Електричні блокування

Електричні блокування реалізуються за допомогою контактів реле та контакторів у колах керування муфтами. Основний принцип полягає у використанні нормально замкнутих (NC) контактів інших реле у колі живлення кожної муфти.

Наприклад:

- якщо увімкнена муфта M1, то її допоміжний контакт розмикає коло керування муфти M2;

- таким чином виключається одночасне включення взаємовиключних муфт.

Це забезпечує апаратну логічну взаємоблокування сигналів без участі оператора та без програмного керування. Такий підхід широко застосовується у релейно-контакторних системах керування [12].

2. Логічні блокування

Логічні блокування реалізуються на рівні алгоритму керування (релейного або програмного) і забезпечують правильну послідовність включення елементів.

Основні функції логічних блокувань:

- перевірка допустимості обраної комбінації швидкостей;
- заборона переходу у несумісні стани;
- формування послідовності включення муфт;
- контроль станів системи перед перемиканням.

У релейних схемах логічні блокування реалізуються через комбінації контактів реле, а в сучасних системах — через програмну логіку ПЛК [14].

Таким чином, логічний рівень відповідає за “інтелектуальну” частину керування, яка визначає, які саме муфти можуть бути активовані в даний момент.

3. Механічні блокування

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механічні блокування реалізуються конструктивно безпосередньо у вузлах коробки швидкостей і муфт.

Вони забезпечують:

- фізичне запобігання одночасному включенню несумісних передач;
- обмеження переміщення механічних елементів;
- синхронізацію роботи зубчастих зачеплень і муфт.

Наприклад, у конструкції можуть використовуватись:

- штифти блокування;
- направляючі пази;
- фіксатори положення;
- механічні замки між елементами муфт.

Такі блокування є незалежними від електричної системи і забезпечують додатковий рівень безпеки навіть у випадку відмови електричної частини [5].

Ієрархія системи блокувань

На практиці всі три рівні блокувань працюють спільно та утворюють багаторівневу систему захисту:

Механічні блокування→Електричні блокування→Логічні блокування→

Керування муфтами

Система блокувань коробки швидкостей є багаторівневою та включає електричний, логічний і механічний рівні. Електричні блокування реалізують апаратну взаємодію між реле, логічні — забезпечують алгоритмічну коректність перемикачів, а механічні — фізично унеможливають небезпечні комбінації роботи. Комплексне використання цих рівнів підвищує надійність, безпеку та довговічність роботи приводу планшайби.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема блокувань керування муфтами

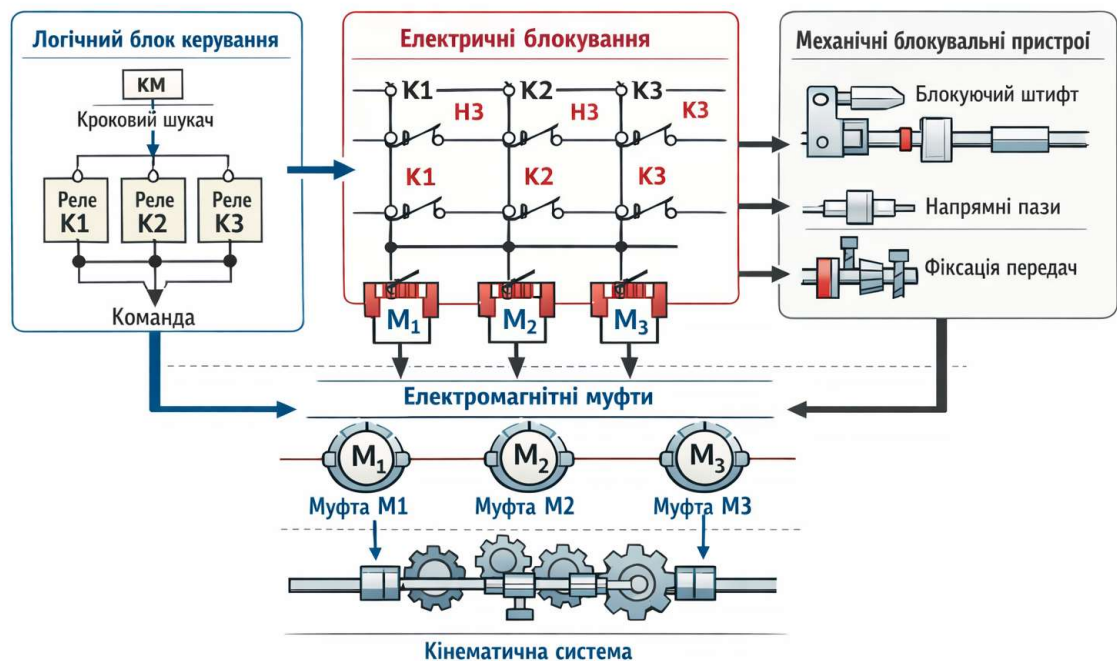


Рисунок 1.5- Схема блокувань керування муфтами

Застосування релейно-крокової системи керування має низку переваг, зокрема відносну простоту реалізації, високу надійність, наочність логічної структури та стійкість до зовнішніх завад. Водночас такі системи характеризуються обмеженою гнучкістю у порівнянні із сучасними цифровими системами керування, що обґрунтовує доцільність їх подальшої модернізації із використанням програмованих логічних контролерів [14].

1.5 Аналіз недоліків релейної системи керування та обґрунтування переходу на ПЛК

Релейно-контакторні системи керування, що традиційно застосовуються в коробках швидкостей карусельних токарних верстатів, забезпечують достатній рівень надійності та простоти реалізації. Водночас вони мають низку суттєвих недоліків, які обмежують їх використання в сучасних автоматизованих системах керування та ускладнюють подальшу модернізацію обладнання [12], [14].

Одним із головних недоліків релейних систем є їх конструктивна складність при збільшенні кількості керованих елементів. У міру зростання числа електромагнітних муфт і варіантів швидкостей значно ускладнюється електрична схема керування, оскільки для реалізації логічних функцій необхідно використовувати велику кількість реле, допоміжних контактів та міжз'єднань. Це призводить до збільшення габаритів електрошафи, ускладнення монтажу та підвищення ймовірності відмов через велику кількість електричних з'єднань [12].

Крім того, релейні системи характеризуються обмеженою гнучкістю. Будь-які зміни алгоритму роботи, додавання нових режимів або модернізація системи потребують фізичної переробки електричної схеми, що включає зміну з'єднань, переналаштування реле або навіть часткову реконструкцію системи керування. Це значно ускладнює адаптацію обладнання до нових технологічних вимог і збільшує час модернізації [14].

Суттєвим недоліком є також наявність механічного зносу контактів реле і контакторів. У процесі роботи відбувається багаторазове комутування електричних кіл, що супроводжується іскрінням і ерозією контактних поверхонь. Це призводить до погіршення електричних характеристик, підвищення перехідного опору та можливих збоїв у роботі системи [12].

Релейні системи також мають обмежену швидкодію. Час спрацювання електромеханічних елементів є відносно великим у порівнянні з сучасними електронними засобами керування, що може впливати на швидкість перемикання передач та динаміку роботи приводу планшайби [14].

Окремо слід відзначити складність інтеграції релейних систем у сучасні автоматизовані комплекси. Вони не забезпечують прямого зв'язку із системами верхнього рівня, такими як SCADA або MES, що обмежує можливості моніторингу, діагностики та централізованого керування технологічними процесами [14].

Таким чином, релейно-контакторні системи, незважаючи на їх поширеність і надійність, мають суттєві обмеження, пов'язані з

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

масштабованістю, гнучкістю, зносом елементів та рівнем інтеграції.

З урахуванням зазначених недоліків доцільним є перехід до використання програмованих логічних контролерів (ПЛК), які є сучасною альтернативою релейним системам керування. ПЛК являють собою спеціалізовані мікропроцесорні пристрої, призначені для реалізації логічних і алгоритмічних функцій керування в реальному часі [12].

Однією з ключових переваг ПЛК є висока гнучкість системи керування. Зміна алгоритму роботи коробки швидкостей або додавання нових режимів здійснюється шляхом корекції програмного забезпечення без необхідності внесення змін у апаратну частину. Це значно спрощує модернізацію системи та скорочує час її впровадження [14].

ПЛК також забезпечують підвищену надійність роботи завдяки відсутності великої кількості механічних контактів. Це зменшує ймовірність відмов, пов'язаних із зносом, іскрінням та окисненням контактів. Додатково сучасні контролери оснащуються вбудованими засобами діагностики, що дозволяє контролювати стан системи та оперативно виявляти несправності [12].

Ще однією важливою перевагою є висока швидкодія обробки сигналів. Мікропроцесорна реалізація логіки забезпечує виконання операцій за значно менший час у порівнянні з електромеханічними реле, що позитивно впливає на точність і швидкість перемикання електромагнітних муфт [14].

Крім того, ПЛК забезпечують можливість інтеграції в сучасні автоматизовані системи керування виробництвом. Завдяки підтримці стандартних протоколів обміну даними вони можуть взаємодіяти із системами SCADA, MES та іншими рівнями управління, що дозволяє реалізувати централізований моніторинг, архівацію даних та оптимізацію технологічних процесів [14].

Таким чином, перехід від релейно-контакторної системи до системи керування на базі ПЛК є технічно обґрунтованим рішенням, яке дозволяє підвищити надійність, гнучкість, швидкодію та рівень автоматизації системи керування коробкою швидкостей. Це створює передумови для реалізації більш

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складних алгоритмів керування електромагнітними муфтами та інтеграції верстата у сучасні цифрові виробничі середовища.

Висновки до розділу:

На основі проведеного аналізу конструкції коробки швидкостей, кінематичної структури приводу планшайби, а також особливостей системи керування електромагнітними муфтами встановлено, що існуюча релейно-контакторна система має низку обмежень, пов'язаних із складністю реалізації, обмеженою гнучкістю та недостатнім рівнем інтеграції з сучасними засобами автоматизації. У зв'язку з цим виникає задача модернізації системи керування з переходом до програмованого логічного контролера (ПЛК), що дозволяє реалізувати більш ефективні алгоритми керування та підвищити надійність роботи приводу планшайби.

Метою автоматизації є створення сучасної системи керування коробкою швидкостей, яка забезпечує формування заданих швидкісних режимів планшайби шляхом керування електромагнітними муфтами з урахуванням логічних, електричних та механічних обмежень, а також забезпечує безпечну та безперебійну роботу приводу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі автоматизації:

перш за все, необхідно розробити структурну модель системи керування коробкою швидкостей на базі ПЛК із визначенням складу вхідних і вихідних сигналів, що включають сигнали від органів керування, датчиків стану та сигнали керування електромагнітними муфтами. Це передбачає формування інформаційної структури системи та визначення каналів взаємодії між її елементами.

Другою задачею є розробка алгоритму керування, який забезпечує вибір необхідної швидкості обертання планшайби, формування відповідної комбінації включення муфт та контроль коректності перемикання передач. Алгоритм повинен враховувати послідовність перемикань, виключення

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

конфліктних станів та реалізацію системи блокувань.

Наступною задачею є реалізація системи блокувань на програмному рівні ПЛК. Необхідно забезпечити логічну взаємодію між сигналами керування таким чином, щоб унеможливити одночасне включення взаємовиключних муфт, а також запобігти виникненню аварійних режимів роботи. При цьому система повинна дублювати основні функції електричних і механічних блокувань.

Також необхідно розробити структуру програмного забезпечення ПЛК, яка включає організацію програмних блоків, обробку вхідних сигналів, формування вихідних сигналів та реалізацію алгоритмів перемикання швидкостей. Програмна реалізація повинна забезпечувати надійність, швидкодію та зручність подальшої модернізації.

Окремою задачею є забезпечення взаємодії системи керування з органами операторського управління та можливість інтеграції з вищими рівнями автоматизації, зокрема системами моніторингу та диспетчеризації. Це передбачає можливість візуалізації стану системи, діагностики та архівування даних.

Крім того, необхідно передбачити реалізацію захисних функцій, які забезпечують аварійне відключення системи у випадку перевантаження, некоректного перемикання або інших нештатних ситуацій. Такі функції повинні діяти незалежно від основного алгоритму керування та гарантувати безпеку роботи обладнання.

Таким чином, постановка задач автоматизації полягає у переході від релейно-контакторної системи до програмованої системи керування на базі ПЛК із реалізацією алгоритмів вибору швидкостей, керування електромагнітними муфтами, системи блокувань та захистів, що забезпечує підвищення надійності, гнучкості та функціональних можливостей приводу планшайби карусельного токарного верстата.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОРОБКОЮ ШВИДКОСТЕЙ НА БАЗІ ПЛК

2.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи керування

На основі проведеного аналізу конструкції коробки швидкостей карусельного токарного верстата та існуючої системи керування розроблено структурну схему автоматизованої системи керування на базі програмованого логічного контролера. Основною метою розробки є створення функціонально завершеної архітектури, яка забезпечує автоматичний вибір та реалізацію режимів обертання планшайби шляхом керування електромагнітними муфтами.

Структурна схема відображає взаємозв'язок між елементами системи, включаючи органи керування, програмований логічний контролер, виконавчі механізми та допоміжні підсистеми. Загальна архітектура системи побудована за ієрархічним принципом і включає рівень введення інформації, рівень обробки сигналів та рівень виконавчих пристроїв.

Узагальнена структура системи керування має вигляд:

органи керування → вхідні сигнали → ПЛК → вихідні сигнали → виконавчі механізми → об'єкт керування

Структурна схема, наведена на рисунку 2.1, відображає взаємодію основних функціональних блоків автоматизованої системи керування. Сигнали від органів керування та блоку датчиків надходять до програмованого логічного контролера, який здійснює їх обробку відповідно до заданого алгоритму. На основі обробленої інформації ПЛК формує керуючі сигнали, що через блок формування передаються до електромагнітних муфт.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РОЗДІЛ 2</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Чигрин Д.Р.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Курганов І.Д.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затвердив</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		
						<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>
							<i>Архувів</i>

Муфти змінюють стан коробки швидкостей, забезпечуючи необхідну частоту обертання планшайби. Сигнали зворотного зв'язку повертаються до контролера, забезпечуючи замкнений контур керування. Додатково ПЛК передає інформацію до блоку індикації та діагностики.

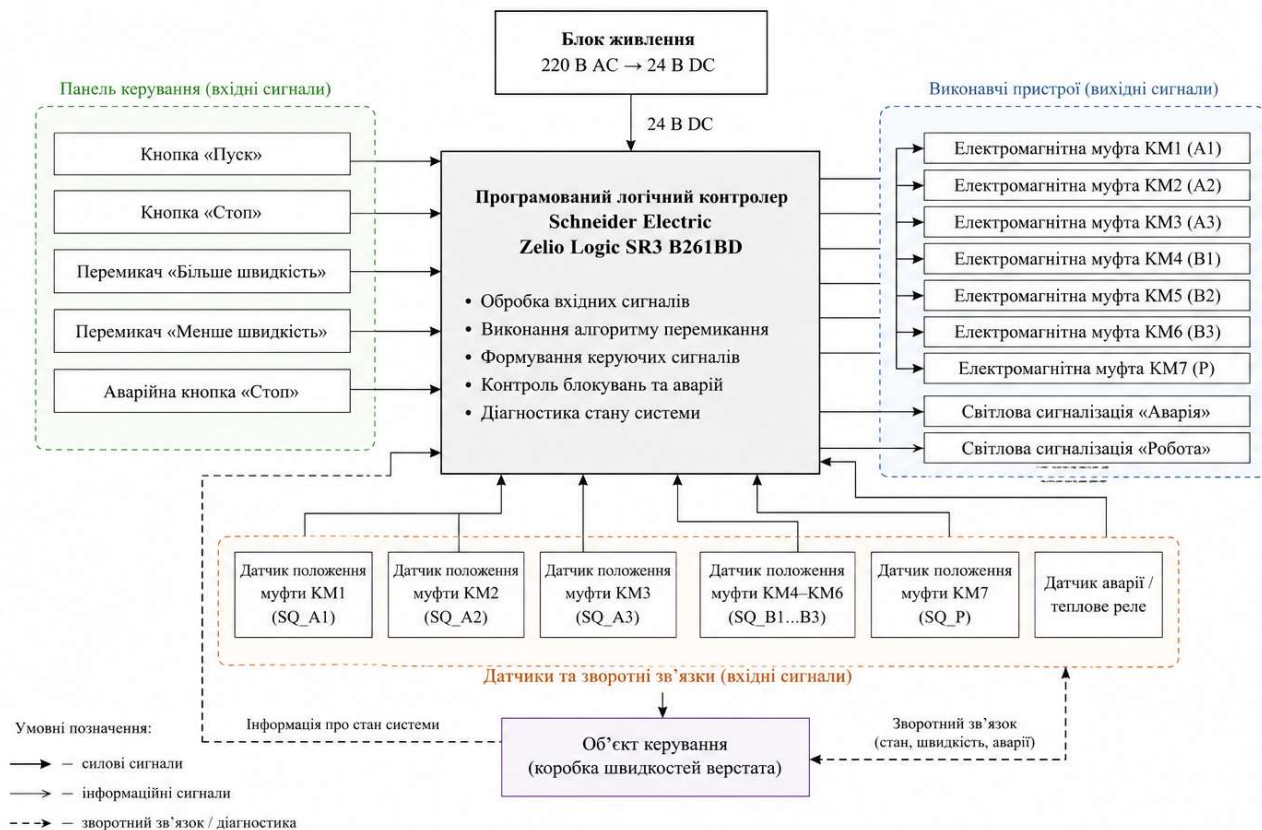


Рисунок 2.1 – Структурна схема автоматизованої системи керування коробкою швидкостей

Загальна архітектура системи

Розроблена система керування включає такі функціональні блоки:

- блок введення керуючих сигналів;
- блок датчиків та зворотного зв'язку;
- програмований логічний контролер;
- блок формування керуючих впливів;
- виконавчі механізми (електромагнітні муфти);
- об'єкт керування (коробка швидкостей і привід планшайби);
- блок індикації та діагностики.

Усі блоки взаємодіють між собою через інформаційні та енергетичні зв'язки, що забезпечують замкнений цикл керування.

Блок введення керуючих сигналів призначений для формування команд оператора та передачі їх до системи керування. До складу блоку входять кнопки пуску та зупинки, перемикачі швидкостей, а також інші органи керування, що визначають режим роботи верстата.

Сигнали з цього блоку мають дискретний характер і подаються на входи ПЛК у вигляді логічних рівнів. Формування коректних команд на цьому рівні є необхідною умовою стабільної роботи всієї системи.

Блок датчиків та зворотного зв'язку забезпечує контроль поточного стану системи та формування сигналів зворотного зв'язку. До нього входять датчики положення муфт, кінцеві вимикачі, а також сигнали, що характеризують стан приводу.

Інформація від датчиків використовується для:

- підтвердження виконання команд;
- реалізації логічних блокувань;
- запобігання аварійним режимам;
- синхронізації перемикання передач.

Таким чином, блок зворотного зв'язку забезпечує адаптивність і надійність роботи системи керування.

Програмований логічний контролер (ПЛК). Центральним елементом системи є програмований логічний контролер, який виконує функції обробки вхідної інформації, реалізації алгоритму керування та формування вихідних сигналів.

ПЛК здійснює: обробку сигналів від органів керування та датчиків; реалізацію алгоритму вибору швидкості; формування команд на включення електромагнітних муфт; контроль правильності перемикання; реалізацію логічних блокувань і захистів.

Алгоритм роботи контролера базується на дискретній логіці, що враховує комбінації станів вхідних сигналів і забезпечує формування відповідних

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керуючих впливів. Використання ПЛК дозволяє реалізувати складні алгоритми керування та забезпечити високу гнучкість системи.

Блок формування керуючих впливів виконує функцію узгодження вихідних сигналів ПЛК із виконавчими механізмами. Він включає проміжні реле або силові ключі, які забезпечують комутацію струмів, необхідних для керування електромагнітними муфтами.

Даний блок виконує підсилення сигналів керування, електричну ізоляцію ПЛК від силових кіл, забезпечення надійного включення муфт.

Виконавчими механізмами системи є електромагнітні муфти, які забезпечують включення відповідних кінематичних гілок коробки швидкостей. Кожна муфта відповідає певному передавальному відношенню і включається за сигналом від ПЛК.

Керування муфтами здійснюється у відповідності до алгоритму, який визначає необхідну комбінацію для реалізації заданої швидкості обертання планшайби.

Об'єктом керування є коробка швидкостей разом із механічним приводом планшайби. У цьому блоці відбувається перетворення електричних сигналів керування у механічний рух.

Зміна стану муфт призводить до зміни кінематичної структури передач, що визначає частоту обертання планшайби. Таким чином, об'єкт керування реалізує фізичний процес, який контролюється автоматизованою системою.

Блок індикації та діагностики призначений для відображення поточного стану системи керування. Він може включати світлові індикатори, сигнальні лампи або панелі оператора.

Даний блок забезпечує індикацію вибраної швидкості, відображення стану муфт, сигналізацію аварійних режимів, візуальний контроль роботи системи.

Наявність діагностичних функцій дозволяє підвищити зручність експлуатації та скоротити час виявлення несправностей.

Узгоджена робота всіх блоків забезпечує замкнений цикл керування.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Команда оператора надходить до ПЛК, де обробляється з урахуванням сигналів зворотного зв'язку. На основі цього формується керуючий вплив на електромагнітні муфти, які змінюють стан коробки швидкостей. Датчики фіксують новий стан системи і передають інформацію назад до ПЛК, що забезпечує контроль виконання команди.

Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивну систему керування з високим рівнем надійності та точності.

Розроблена структурна схема автоматизованої системи керування відображає функціональну організацію взаємодії між її основними елементами та забезпечує реалізацію алгоритму керування коробкою швидкостей на базі ПЛК. Запропонована архітектура дозволяє забезпечити ефективне керування електромагнітними муфтами, реалізацію системи блокувань і захистів, а також створює основу для подальшої розробки алгоритмів та програмного забезпечення системи.

2.2 Формування інформаційної моделі та таблиці сигналів (I/O)

Ефективна реалізація автоматизованої системи керування на базі програмованого логічного контролера потребує формування чіткої інформаційної моделі, яка визначає склад вхідних та вихідних сигналів, їх функціональне призначення та відповідність апаратним ресурсам ПЛК. Інформаційна модель забезпечує зв'язок між фізичними елементами системи та програмною логікою керування, що є необхідною умовою коректної роботи всієї системи.

Формування інформаційної моделі здійснюється на основі аналізу структурної схеми системи керування та передбачає ідентифікацію всіх сигналів, що надходять до ПЛК, а також сигналів, які формуються контролером для керування виконавчими механізмами. Усі сигнали поділяються на вхідні та вихідні.

До вхідних сигналів належать сигнали від органів керування та датчиків

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стану системи. Зокрема, це кнопки пуску та зупинки, перемикачі вибору швидкостей, кінцеві вимикачі, а також датчики, що фіксують стан електромагнітних муфт. Ці сигнали мають дискретний характер і подаються на відповідні входи ПЛК у вигляді логічних рівнів.

Таблиця 2.1 - Вхідні сигнали ПЛК

Позначення	Адреса	Найменування сигналу	Тип сигналу	Призначення
SB1	I0.0	Кнопка «Пуск»	Дискретний	Запуск системи
SB2	I0.1	Кнопка «Стоп»	Дискретний	Зупинка системи
SA1	I0.2	Вибір швидкості (біт 0)	Дискретний	Формування Speed target
SA2	I0.3	Вибір швидкості (біт 1)	Дискретний	Формування Speed target
SA3	I0.4	Вибір швидкості (біт 2)	Дискретний	Формування Speed target
SA4	I0.5	Вибір швидкості (біт 3)	Дискретний	Формування Speed target
SA5	I0.6	Вибір швидкості (біт 4)	Дискретний	Формування Speed target (до 18)
SQ1	I1.0	Датчик стану муфти M1	Дискретний	Контроль включення КМ1
SQ2	I1.1	Датчик стану муфти M2	Дискретний	Контроль включення КМ2
SQ3	I1.2	Датчик стану муфти M3	Дискретний	Контроль включення КМ3
SQ4	I1.3	Датчик стану муфти M4	Дискретний	Контроль включення КМ4
SQ5	I1.4	Датчик стану муфти M5	Дискретний	Контроль включення КМ5
SQ6	I1.5	Датчик стану муфти M6	Дискретний	Контроль включення КМ6
SQ7	I1.6	Датчик стану муфти M7 (планетарна)	Дискретний	Контроль включення КМ7
SB3	I1.7	Кнопка «Скидання аварії»	Дискретний	Вихід з аварійного стану
FAULT	I2.0	Сигнал аварії (захист)	Дискретний	Загальна аварія

Вихідні сигнали формуються ПЛК на основі реалізованого алгоритму керування та призначені для впливу на виконавчі механізми. До них належать сигнали керування електромагнітними муфтами, сигнали індикації режимів

роботи та аварійні сигнали. Вихідні сигнали забезпечують безпосередню реалізацію процесу перемикання швидкостей і контроль стану системи.

Для забезпечення зручності програмування та подальшої експлуатації системи кожному сигналу присвоюється унікальна адреса відповідно до структури входів і виходів ПЛК. У даній роботі використано умовну адресацію типу I0.x для входів та Q0.x для виходів.

Вхідні сигнали формують:

- команду запуску/зупинки;
- код вибору швидкості (5-біт → до 32 значень, використовується 18);
- зворотний зв'язок від муфт;
- аварійні сигнали.

Таблиця 2.2 - Вихідні сигнали ПЛК

Позначення	Адреса	Найменування сигналу	Тип сигналу	Призначення
KM1	Q0.0	Керування муфтою M1	Дискретний	Група А (передача 1)
KM2	Q0.1	Керування муфтою M2	Дискретний	Група А (передача 2)
KM3	Q0.2	Керування муфтою M3	Дискретний	Група А (передача 3)
KM4	Q0.3	Керування муфтою M4	Дискретний	Група В (передача 1)
KM5	Q0.4	Керування муфтою M5	Дискретний	Група В (передача 2)
KM6	Q0.5	Керування муфтою M6	Дискретний	Група В (передача 3)
KM7	Q0.6	Керування муфтою M7 (планетарна)	Дискретний	Режим редуктора
HL1	Q0.7	Індикація «Робота»	Дискретний	Система активна
HL2	Q0.8	Індикація «Аварія»	Дискретний	Аварійний стан
HA1	Q0.9	Звукова сигналізація	Дискретний	Попередження аварії

Вихідні сигнали забезпечують:

- керування 7 електромагнітними муфтами;
- індикацію станів системи;

- аварійну сигналізацію.

Сформована інформаційна модель забезпечує повне відображення станів системи керування та можливість реалізації алгоритму перемикання швидкостей. Вхідні сигнали дозволяють визначити дії оператора та поточний стан виконавчих механізмів, тоді як вихідні сигнали забезпечують керуючий вплив на електромагнітні муфти та засоби індикації.

Прийнята структура адресації є зручною для реалізації у програмному середовищі ПЛК та дозволяє легко масштабувати систему у разі додавання нових функцій або сигналів. Важливою особливістю є наявність сигналів зворотного зв'язку, що забезпечують контроль виконання команд та підвищують надійність системи.

У підрозділі сформовано інформаційну модель автоматизованої системи керування коробкою швидкостей та визначено склад вхідних і вихідних сигналів ПЛК. Розроблено таблиці сигналів із прив'язкою до адрес, що є основою для подальшої розробки алгоритму керування та програмного забезпечення контролера.

Сформована інформаційна модель автоматизованої системи керування визначає склад вхідних і вихідних сигналів, однак для реалізації керування необхідно встановити логічні залежності між ними. Саме ці залежності визначають правила формування керуючих впливів і є основою для подальшої розробки алгоритму керування коробкою швидкостей.

Логічні зв'язки між сигналами формуються на основі технологічних вимог до роботи верстата, кінематичної структури коробки швидкостей та умов безпечної експлуатації. Вони визначають, які комбінації вхідних сигналів призводять до формування відповідних вихідних керуючих впливів.

Формування логічних залежностей базується на таких принципах:

- відповідність вибраної швидкості певній комбінації електромагнітних муфт;
- взаємне блокування несумісних режимів роботи;
- підтвердження виконання команд за сигналами зворотного зв'язку;

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- пріоритет аварійних сигналів над усіма іншими режимами;
- забезпечення безпечної послідовності перемикання передач.

Ці принципи забезпечують коректну та надійну роботу системи керування.

Логіка обробки вхідних сигналів керування. Основними керуючими сигналами є кнопки «Пуск» (I0.0) та «Стоп» (I0.1), а також перемикачі вибору швидкостей (I0.2–I0.4). Сигнал «Пуск» ініціює роботу системи, тоді як сигнал «Стоп» має вищий пріоритет і призводить до негайного відключення всіх виконавчих механізмів.

Вибір швидкості здійснюється шляхом встановлення відповідної комбінації сигналів на входах перемикачів. Кожній швидкості відповідає унікальна комбінація станів, яка визначає набір муфт, що повинні бути включені.

Формування керуючих сигналів муфт. Вихідні сигнали Q0.0–Q0.3 формуються ПЛК на основі обраної швидкості та поточного стану системи. Кожна електромагнітна муфта включається лише за умови виконання таких вимог:

- наявність команди на відповідну швидкість;
- відсутність сигналу аварії;
- відсутність конфліктних станів інших муфт;
- підтвердження можливості включення за сигналами датчиків.

Таким чином, логіка керування муфтами має вигляд умовного включення з урахуванням блокувань.

Реалізація логічних блокувань. Система блокувань є важливим елементом логічної структури керування. Вона забезпечує виключення одночасного включення несумісних муфт і запобігає виникненню аварійних режимів.

Логічні блокування реалізуються шляхом введення умов заборони, при яких включення певної муфти стає неможливим. Наприклад, включення муфти M1 (Q0.0) забороняється при активному стані муфт M2 або M3. Аналогічно, кожна муфта має власний набір умов блокування.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, блокування враховують сигнали кінцевих вимикачів, що підтверджують фізичний стан муфт. Це дозволяє уникнути помилкового включення та забезпечити синхронізацію роботи системи.

Логіка обробки сигналів зворотного зв'язку. Сигнали зворотного зв'язку (I0.5–I1.0) використовуються для контролю виконання команд. Вони дозволяють визначити, чи була фактично включена відповідна муфта та чи відповідає стан системи заданому режиму.

У випадку невідповідності між командою та фактичним станом формується сигнал помилки, який може призвести до аварійного відключення або блокування подальших дій.

Таким чином, зворотний зв'язок забезпечує замкнений цикл керування та підвищує надійність системи.

Обробка аварійних сигналів. Сигнал аварії (I1.1) має найвищий пріоритет у системі керування. При його появі всі вихідні сигнали керування муфтами скидаються, що призводить до зупинки приводу.

Одночасно формується сигнал аварійної індикації (Q0.5) та, за необхідності, звуковий сигнал (Q0.7). Повторний запуск системи можливий лише після усунення причини аварії та повторної активації команди «Пуск».

Логічна структура формування виходів. Узагальнено логічні залежності між входами та виходами можуть бути представлені у вигляді функцій логічного типу:

- кожен вихідний сигнал є функцією стану входів;
- функції включають операції «І», «АБО», «НЕ»;
- додатково враховуються умови блокування та дозволу.

Такий підхід дозволяє формалізувати процес керування та реалізувати його у вигляді програмного алгоритму в ПЛК.

У підрозділі визначено логічні зв'язки між вхідними та вихідними сигналами автоматизованої системи керування коробкою швидкостей. Сформульовано основні принципи побудови логіки керування, включаючи умови включення муфт, систему блокувань, обробку сигналів зворотного

зв'язку та аварійні режими.

Отримані залежності є основою для формалізації алгоритму керування та його подальшої реалізації у вигляді програмного забезпечення ПЛК, що буде розглянуто у наступному підрозділі.

2.3 Розробка алгоритму керування коробкою швидкостей

Розробка алгоритму керування є ключовим етапом синтезу автоматизованої системи, оскільки саме алгоритм визначає послідовність дій програмованого логічного контролера при формуванні режимів роботи коробки швидкостей. Алгоритм базується на сформованій інформаційній моделі та встановлених логічних зв'язках між вхідними і вихідними сигналами.

Основною функцією алгоритму є забезпечення автоматичного вибору та реалізації заданої швидкості обертання планшайби шляхом формування відповідної комбінації включення електромагнітних муфт із урахуванням блокувань та умов безпечного перемикавання.

Алгоритм керування коробкою швидкостей розробляється з урахуванням кінематичної структури приводу, яка передбачає формування швидкостей шляхом комбінації включення електромагнітних муфт груп передач та планетарного механізму. Основною задачею алгоритму є забезпечення коректного, безпечного та динамічно оптимального перемикавання швидкостей як у напрямку збільшення, так і зменшення частоти обертання планшайби.

Принцип формування швидкостей. Як було встановлено раніше, формування швидкостей здійснюється на основі комбінації включення електромагнітних муфт, що відповідають різним кінематичним гілкам коробки швидкостей. Кожній швидкості відповідає унікальна комбінація станів муфт:

- муфти групи передач (M1, M2, M3);
- режим планетарного механізму (M4).

Таким чином, алгоритм повинен забезпечити:

- однозначність вибору швидкості;

- формування допустимої комбінації муфт;
- виключення конфліктних режимів.

Формування швидкостей (прив'язка до кінематики)

Згідно з кінематичною схемою, швидкість визначається комбінацією:

- муфт групи I: M1, M2, M3
- муфти планетарного редуктора: M7

Прийmemo узагальнену таблицю 2.1 (фрагмент). Реально — до 18 швидкостей, але для алгоритму використовується узагальнена логіка.

Таблиця 2.1 – Комбінації визначення швидкостей

Швидкість	M1	M2	M3	M7(редуктор)
n1	1	0	0	1
n2	0	1	0	1
n3	0	0	1	1
n4	1	0	0	0
n5	0	1	0	0
n6	0	0	1	0

Формування 18 швидкостей коробки передач згідно з кінематичною схемою, коробка швидкостей формує:

$$3 \times 3 \times 2 = 18 \text{ швидкостей}$$

де:

- Група А (вал II) → 3 передачі (G1, G2, G3)
- Група В (вал III) → 3 передачі (G4, G5, G6)
- Планетарний редуктор → 2 режими (P0, P1)

1. Структура формування швидкостей

Група А (перша ступінь)

- M1 → передача A1
- M2 → передача A2
- M3 → передача A3

Група В (друга ступінь)

- M4 → передача B1
- M5 → передача B2
- M6 → передача B3

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Планетарний механізм

- $M7 = 1 \rightarrow$ редуктор (низькі швидкості)
- $M7 = 0 \rightarrow$ пряма передача.

Таблиця 2.2 - Таблиця всіх 18 швидкостей

№	A (M1–M3)	B (M4–M6)	Планетарка M7	Комбінація
n1	M1	M4	1	низька
n2	M2	M4	1	
n3	M3	M4	1	
n4	M1	M5	1	
n5	M2	M5	1	
n6	M3	M5	1	
n7	M1	M6	1	
n8	M2	M6	1	
n9	M3	M6	1	
n10	M1	M4	0	середня
n11	M2	M4	0	
n12	M3	M4	0	
n13	M1	M5	0	
n14	M2	M5	0	
n15	M3	M5	0	
n16	M1	M6	0	висока
n17	M2	M6	0	
n18	M3	M6	0	максимальна

2. Як додається наступна група швидкостей

Етап 1 — базові 3 швидкості

A1, A2, A3

Етап 2 — друга група

$(A1, A2, A3) \times B1 \rightarrow 3$ швидкості

$(A1, A2, A3) \times B2 \rightarrow 3$ швидкості

$(A1, A2, A3) \times B3 \rightarrow 3$ швидкості

$\rightarrow 9$ швидкостей

Етап 3 — планетарка

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$9 \times 2 = 18 \text{ швидкостей}$$

Принцип формування швидкостей. Як було встановлено раніше, формування швидкостей здійснюється на основі комбінації включення електромагнітних муфт, що відповідають різним кінематичним гілкам коробки швидкостей. Кожній швидкості відповідає унікальна комбінація станів муфт:

- муфти групи передач (M1, M2, M3), (M4, M5, M6);
- режим планетарного механізму (M7).

Таким чином, алгоритм повинен забезпечити: однозначність вибору швидкості; формування допустимої комбінації муфт; виключення конфліктних режимів.

Особливості перемикання швидкостей.

Алгоритм враховує:

1. Перехід на більшу швидкість (розгін)
 - обов'язкове роз'єднання муфт;
 - витримка часу t_1 (розвантаження передач);
 - включення нової комбінації;
 - витримка t_2 (стабілізація).
2. Перехід на меншу швидкість (гальмування)
 - збільшена затримка ($t_3 > t_1$);
 - контроль повної зупинки передач;
 - плавне включення муфт.

Введення часових затримок

У алгоритмі використовуються таймери: T1 (0.5–1 с) — вимкнення муфт; T2 (0.5 с) — пауза перед включенням; T3 (1–2 с) — для переходу на нижчу швидкість.

У системі керування коробкою швидкостей перемикання повинно бути послідовним (ступінчастим) через проміжні швидкості з витримкою часу. Послідовне перемикання швидкостей забезпечує відсутність ударних навантажень, коректну роботу зубчастих передач, синхронізацію електромагнітних муфт та як результат підвищення ресурсу коробки

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкостей.

Запропонований алгоритм реалізує дискретно-крокове керування, що повністю відповідає вимогам до промислових систем керування металорізальним обладнанням.

Загальна структура алгоритму

Алгоритм керування реалізується у вигляді послідовності логічних етапів:

1. Ініціалізація системи;
2. Обробка команд оператора;
3. Визначення необхідної швидкості;
4. Перевірка умов перемикавання;
5. Вимкнення попереднього режиму;
6. Формування нової комбінації муфт;
7. Контроль виконання;
8. Перехід у режим очікування.

Опис етапів роботи алгоритму

На початковому етапі виконується ініціалізація системи, при якій усі вихідні сигнали встановлюються в нульовий стан, що відповідає вимкненню всіх муфт. Система переходить у режим очікування команди «Пуск».

Після надходження сигналу «Пуск» здійснюється зчитування стану перемикачів швидкості. На основі комбінації вхідних сигналів визначається номер обраної швидкості, яка відповідає певній конфігурації муфт.

Далі виконується перевірка умов перемикавання, що включає:

- відсутність аварійного сигналу;
- коректність обраної швидкості;
- відсутність конфліктних станів;
- готовність системи до перемикавання.

У випадку невиконання хоча б однієї з умов алгоритм повертається в режим очікування або формує сигнал аварії.

Перед включенням нової швидкості виконується відключення всіх

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

активних муфт. Це необхідно для запобігання ударним навантаженням та механічним пошкодженням. Після паузи, достатньої для роз'єднання передач, здійснюється включення нової комбінації муфт.

Включення муфт відбувається відповідно до заданої послідовності, що визначається кінематичною структурою коробки швидкостей. При цьому кожен етап супроводжується контролем стану за сигналами кінцевих вимикачів.

Після завершення перемикання виконується перевірка відповідності фактичного стану системи заданому режиму. У разі успішного перемикання система переходить у робочий режим. Якщо виникає невідповідність, формується сигнал аварії.

Алгоритм передбачає реалізацію системи блокувань, яка виключає:

- одночасне включення несумісних муфт;
- перемикання під навантаженням;
- включення передач при активному аварійному сигналі.

Блокування реалізуються у вигляді логічних умов, які перевіряються перед кожною операцією включення муфт.

Формалізований опис алгоритму

У формалізованому вигляді алгоритм керування може бути представлений як система логічних функцій:

виходи керування муфтами є функцією:

$$Q = f(I, S)$$

де: I — вхідні сигнали; S — поточний стан системи.

Кожен вихід формується за умов: наявності команди; відсутності блокувань; відповідності алгоритму перемикання.

Алгоритм у вигляді автомата станів

Для підвищення наочності та формалізації алгоритм може бути представлений як дискретний автомат станів із такими основними станами:

S0 – Очікування

S1 – Визначення напрямку

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

S2 – Вимкнення муфт

S3 – Затримка T1

S4 – Затримка T2/T3

S5 – Включення муфт

S6 – Контроль

S7 – Оновлення швидкості

S8 – Перевірка завершення

S9 – Робота

S10 – Аварія

Перехід між станами здійснюється залежно від вхідних сигналів та результатів перевірок.

Запропонований GRAFCET описує алгоритм послідовного перемикавання швидкостей коробки передач із урахуванням кінематичних обмежень та необхідних часових затримок.

Початковий стан S0 відповідає режиму очікування, у якому система перебуває до надходження команди «Пуск» та зміни заданої швидкості. Після цього виконується визначення напрямку перемикавання (стан S1), що дозволяє розрізняти режими розгону та гальмування.

У стані S2 здійснюється вимкнення всіх електромагнітних муфт, після чого система переходить у стан S3, де реалізується затримка часу.

При цьому тривалість затримки залежить від напрямку перемикавання: для збільшення швидкості використовується менша затримка, тоді як для зменшення швидкості передбачено збільшений час для гальмування механічної системи.

У стані S4 формується нова комбінація муфт відповідно до наступного значення швидкості. Стан S5 забезпечує контроль виконання команди за сигналами датчиків зворотного зв'язку. У випадку невідповідності система переходить у аварійний стан S10.

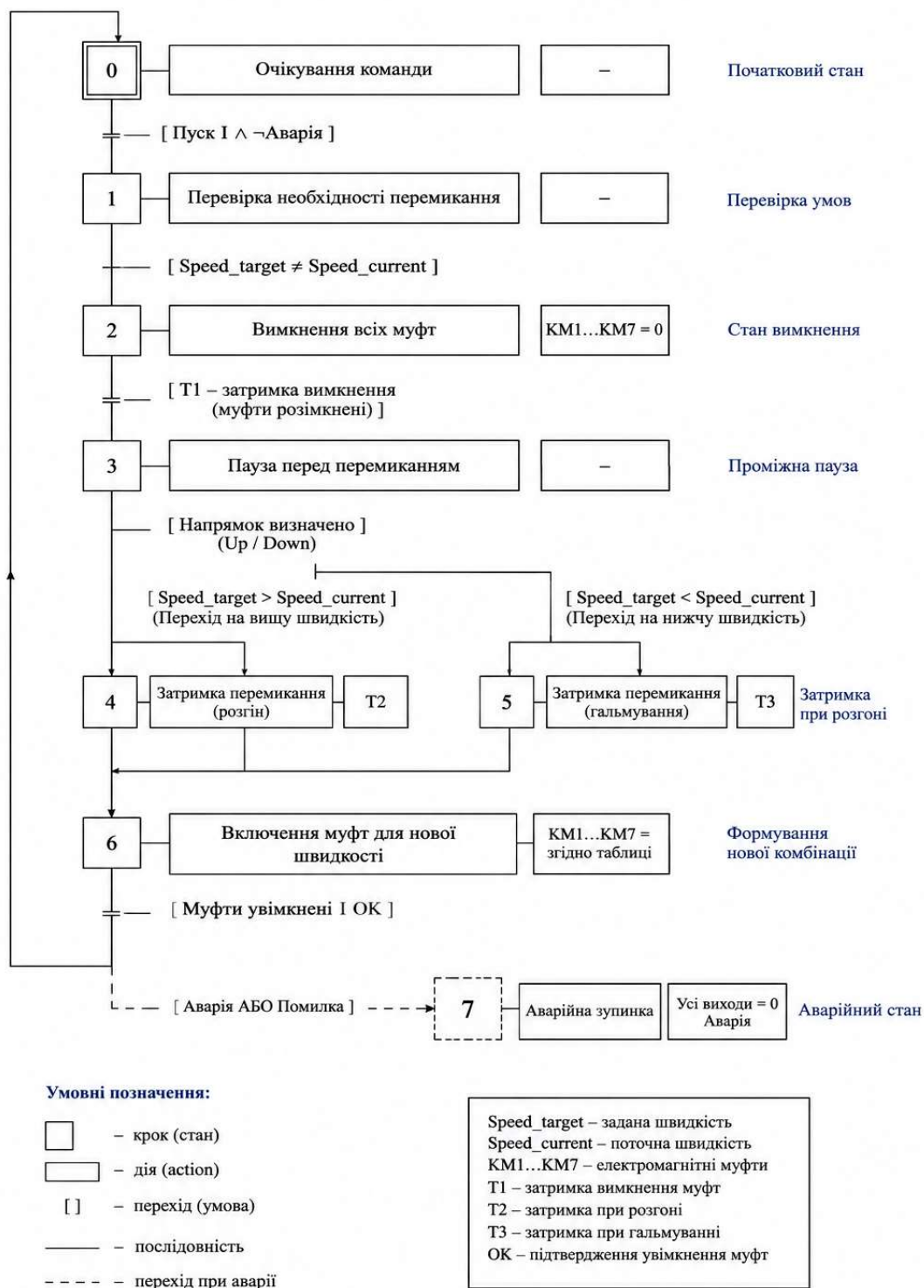


Рисунок 2.3 – GRAFCET алгоритму перемикання швидкостей коробки передач

Після успішного перемикання (S6) відбувається оновлення поточного значення швидкості. У стані S7 перевіряється досягнення заданої швидкості. Якщо ціль досягнута, система переходить у робочий режим (S8), інакше цикл перемикання повторюється.

Таблиця 2.3 - Таблиця переходів GRAFCET алгоритму перемикання швидкостей

№ переходу	Поточний стан	Умова переходу	Наступний стан	Дія (Action)
T1	S0 – Очікування	Пуск $\wedge$ (Speed_target $\neq$ Speed_current)	S1	Ініціація алгоритму
T2	S1 – Визначення напрямку	Завжди	S2	Speed_step = sign(S_target – S_current)
T3	S2 – Вимкнення муфт	T1 завершено	S3	KM1–KM7 = 0
T4	S3 – Затримка	Speed_step = +1 $\wedge$ T2 завершено	S4	Режим розгону
T5	S3 – Затримка	Speed_step = –1 $\wedge$ T3 завершено	S4	Режим гальмування
T6	S4 – Включення муфт	Завжди	S5	KM = f(Speed_next)
T7	S5 – Контроль	SQ = OK	S6	Підтвердження включення
T8	S5 – Контроль	SQ $\neq$ OK	S10	Аварійний перехід
T9	S6 – Оновлення швидкості	Завжди	S7	Speed_current = Speed_current + Speed_step
T10	S7 – Перевірка	Speed_current = Speed_target	S8	Досягнуто режим
T11	S7 – Перевірка	Speed_current $\neq$ Speed_target	S2	Продовження циклу
T12	S8 – Робота	Зміна Speed_target	S1	Нове перемикання
T13	S8 – Робота	Стоп	S0	Зупинка системи
T14	S10 – Аварія	Скидання (Reset)	S0	Вихід з аварії

Таблиця переходів відображає формалізований опис функціонування алгоритму керування у вигляді автомата станів відповідно до стандарту GRAFCET. Кожен перехід визначається поточним станом системи, логічною умовою його виконання та відповідним наступним станом.

Особливістю розробленої таблиці є врахування напрямку перемикання швидкостей. Зокрема, переходи T4 та T5 забезпечують вибір різних часових затримок залежно від того, чи відбувається збільшення або зменшення швидкості. Це дозволяє врахувати динамічні властивості механічної системи та забезпечити плавність роботи приводу.

Також важливою є наявність переходу T8, який реалізує контроль стану муфти за сигналами зворотного зв'язку. У випадку невідповідності система переходить у аварійний стан, що підвищує надійність та безпечність роботи.

Циклічність процесу перемикання реалізується через перехід T11, який забезпечує послідовний перехід між швидкостями до досягнення заданого значення. Таким чином, алгоритм реалізує покрокове (дискретне) керування швидкістю обертання планшайби.

Запропонована таблиця переходів разом із GRAFCET-діаграмою забезпечує повну формалізацію алгоритму керування коробкою швидкостей і створює основу для його безпосередньої реалізації у програмному середовищі ПЛК.

Таблиця дій визначає набір активних керуючих сигналів для кожного стану алгоритму, що дозволяє формалізувати процес керування та забезпечити його однозначну реалізацію у програмному середовищі ПЛК.

Особливістю таблиці є чітке розмежування між станами, у яких формуються керуючі сигнали (S2, S5, S8), та станами, у яких виконуються обчислювальні або контрольні операції (S1, S6, S7). Це відповідає принципам побудови дискретних систем керування та спрощує програмну реалізацію алгоритму.

Таблиця 2.4 – Таблиця дій алгоритму керування

Стан	Назва стану	Активні дії (виходи)	Опис дій
S0	Очікування	Усі $Q = 0$	Система знеструмлена, муфти вимкнені
S1	Визначення напрямку	—	Обчислення $Speed_step$
S2	Вимкнення муфт	$KM1-KM7 = 0$	Повне роз'єднання передач
S3	Затримка після вимкнення	$T1 = ON$	Час на розчеплення механіки
S4	Додаткова затримка	$T2$ або $T3 = ON$	Залежить від напрямку (розгін/гальмування)
S5	Включення муфт	$KM1-KM7 = f(Speed_next)$	Формування нової комбінації
S6	Контроль	—	Аналіз сигналів $SQ1-SQ7$
S7	Оновлення швидкості	—	$Speed_current = Speed_next$
S8	Робота	$KM = f(Speed_current), HL1=1$	Підтримка режиму
S10	Аварія	$KM1-KM7 = 0, HL2=1, HA1=1$	Аварійне відключення

Стан S5 є ключовим, оскільки саме в ньому формується комбінація включення електромагнітних муфт відповідно до обраної швидкості. При цьому використовується функціональна залежність, що базується на кінематичній структурі коробки передач.

Стан S10 реалізує аварійний режим, у якому всі виконавчі механізми відключаються, а система переходить у безпечний стан.

Сукупність GRAFCET-діаграми, таблиці переходів та таблиці дій забезпечує повну формалізацію алгоритму керування коробкою швидкостей. Такий підхід дозволяє безпосередньо перейти до програмної реалізації в ПЛК та гарантує коректність і надійність функціонування системи.

Алгоритм реалізовано у вигляді GRAFCET, який безпосередньо трансформовано у Ladder Diagram. Кожен стан відповідає внутрішньому біту, а переходи — логічним умовам і таймерам.

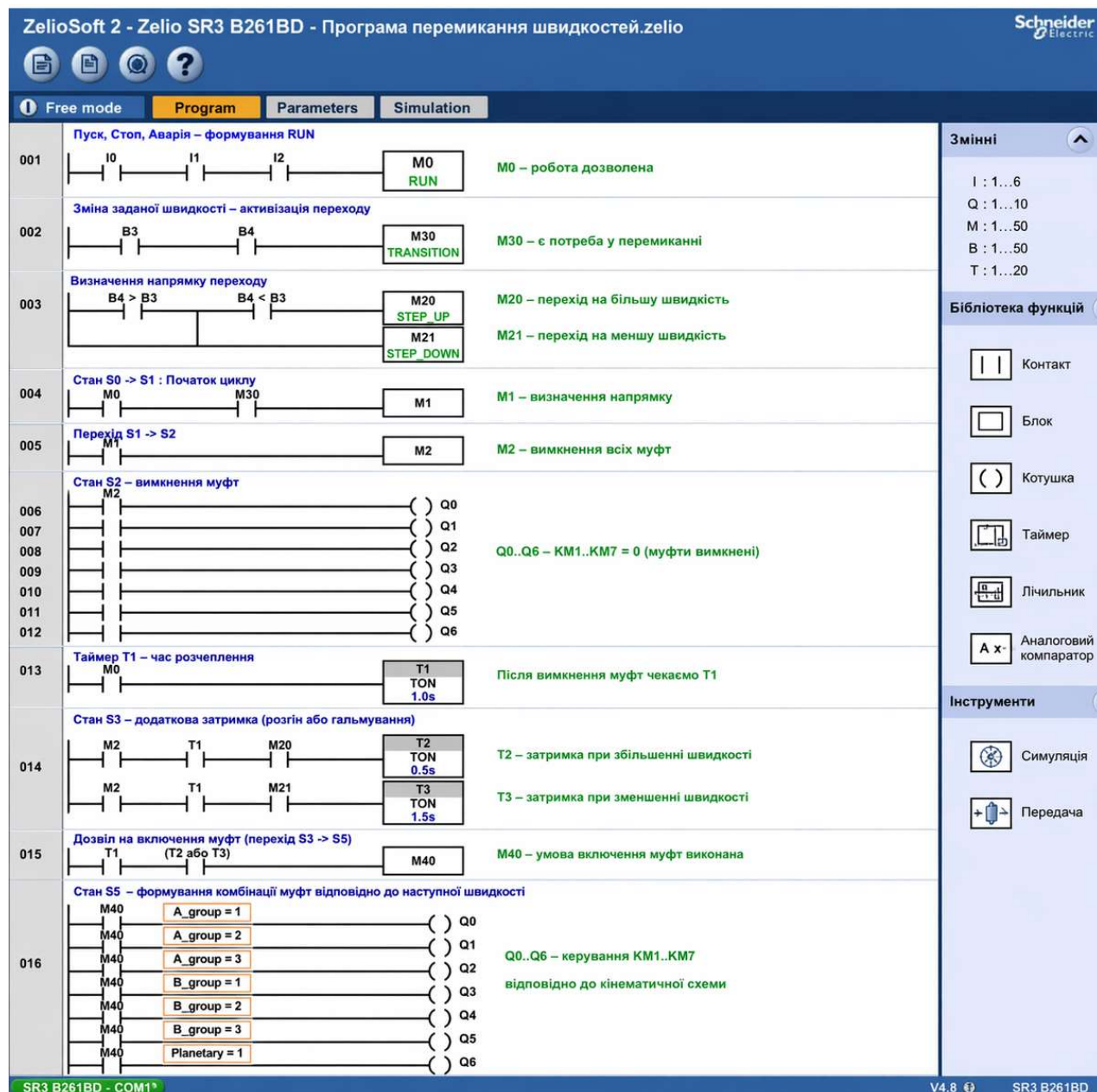


Рисунок 2.4 – Програмна реалізація алгоритму перемикання швидкостей у середовищі Zelio Soft (Ladder Diagram)

2.4 Обґрунтування вибору програмованого логічного контролера

Для реалізації автоматизованої системи керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата доцільним є використання компактного

програмованого логічного контролера класу «реле логіки». У даній роботі обрано контролер Zelio Logic SR3 B261BD, який оптимально відповідає вимогам поставленої задачі.

Аналіз функціональних вимог до системи керування дозволяє сформулювати основні критерії вибору ПЛК:

- кількість дискретних входів/виходів для підключення кнопок, датчиків та муфт;
- підтримка реалізації логічних алгоритмів (GRAFCET / Ladder);
- наявність таймерів для забезпечення затримок перемикавання;
- висока надійність роботи в промислових умовах;
- простота програмування та обслуговування;
- економічна доцільність впровадження.

Враховуючи, що система не потребує складної аналогової обробки сигналів або високошвидкісних обчислень, застосування повноцінного промислового контролера середнього класу є надлишковим.

Основні характеристики контролера Zelio Logic SR3 B261BD наведено у таблиці.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики контролера

Параметр	Значення
Тип контролера	Мікро-ПЛК (логічне реле)
Кількість входів	12
Кількість виходів	8
Тип виходів	Релейні
Напруга живлення	24 В DC
Мови програмування	Ladder Diagram (LD), FBD
Таймери	Вбудовані
Лічильники	Вбудовані
Пам'ять	Достатня для алгоритмів середньої складності
Робоча температура	Промисловий діапазон
Інтерфейс програмування	Zelio Soft

Розроблена система керування потребує: вхідних сигналів: $\approx 14-16$

(кнопки, вибір швидкості, датчики); вихідних сигналів: 7 (муфти) + 2–3 (індикація).

Контролер забезпечує:

12 входів → достатньо для основних сигналів

8 виходів → достатньо для 7 муфт + індикація

У разі необхідності можливе використання мультиплексування або оптимізації сигналів.

Переваги використання Zelio Logic

1. Простота реалізації алгоритму

Контролер підтримує мову Ladder Diagram, що дозволяє безпосередньо реалізувати: GRAFCET-алгоритм; логічні блокування; таймери перемикання.

2. Наявність вбудованих таймерів

Забезпечується реалізація: T1 – затримка вимкнення; T2 – розгін; T3 – гальмування, без використання додаткових модулів.

3. Надійність. Контролери Schneider Electric характеризуються: високою заводостійкістю; стійкістю до промислових умов; тривалим ресурсом роботи.

4. Економічна ефективність. Використання Zelio Logic дозволяє: зменшити витрати на модернізацію; уникнути складних систем ЧПК; скоротити час впровадження.

5. Простота обслуговування

- інтуїтивне середовище Zelio Soft;
- швидка діагностика;
- можливість модифікації алгоритму без апаратних змін.
- Необхідно зазначити, що контролер має певні обмеження:
- відсутність розширених комунікацій (Ethernet, Profinet);
- обмежена пам'ять;
- невисока швидкодія порівняно з промисловими ПЛК (наприклад Siemens S7).

Однак для задачі дискретного керування коробкою швидкостей ці обмеження не є критичними.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.6- Порівняння з альтернативами

Контролер	Переваги	Недоліки
Zelio Logic	Простота, дешевизна	Обмежений функціонал
Siemens S7-1200	Потужність, комунікації	Висока вартість
OMRON CP1E	Надійність	Складніше програмування

Обраний контролер Zelio Logic SR3 B261BD повністю відповідає вимогам системи керування коробкою швидкостей карусельного верстата, забезпечуючи:

- реалізацію алгоритму перемикання швидкостей;
- підтримку логічних блокувань;
- необхідну кількість входів/виходів;
- високу надійність та економічну ефективність.

Таким чином, використання даного ПЛК є технічно обґрунтованим і доцільним для модернізації системи керування.

У попередньому аналізі встановлено, що для реалізації системи керування необхідно до 16 дискретних входних сигналів, тоді як обраний контролер Zelio Logic SR3 B261BD має лише 12 дискретних входів.

На перший погляд це створює невідповідність, однак детальний інженерний аналіз показує, що дана задача може бути коректно реалізована без відмови від обраного контролера.

Оптимізація структури входних сигналів

Частина сигналів не потребує одночасного незалежного контролю і може бути оптимізована.

Групування сигналів вибору швидкості. Вибір 18 швидкостей реалізується через 5-бітний код:

$2^5 = 32$ комбінації $\rightarrow$ використовується лише 18

Аналіз датчиків муфт. Первинно передбачено 7 сигналів:

SQ1–SQ7 (по одному на кожну муфту)

Однак у системі: одночасно активна лише одна муфта з групи А; одна муфта з групи В; та одна з планетарного механізму.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому можливе логічне скорочення сигналів контролю:

Варіант оптимізації це - контроль не кожної муфти окремо, а контроль групи передач.

Замість: SQ1, SQ2, SQ3 → 3 входи можна SQ_A (підтвердження групи A) → 1 вхід. Аналогічно: SQ_B → 1 вхід; SQ_P → 1 вхід

Разом: 3 входи замість 7.

Таблиця 2.7- Перерахунок необхідних входів

Група сигналів	Кількість
Пуск/Стоп/Аварія	3
Вибір швидкості	5
Контроль муфт (оптимізований)	3
Скидання аварії	1
Разом	12 входів

Вибір контролера на 12 входів є обґрунтованим, оскільки сигнали можуть бути оптимізовані без втрати функціональності; без погіршення безпеки.

Алгоритм є послідовним (GRAFCET). Контроль потрібен лише для поточного стану.

Відсутність паралельних процесів. Система не потребує одночасного аналізу всіх сигналів та працює в дискретному режимі.

Економічна доцільність полягає в тому що використання більш потужного ПЛК призведе до збільшення вартості, ускладнення системи надлишковості функцій, що є в нашому проекті недоцільним.

Незважаючи на те, що початкова оцінка кількості вхідних сигналів перевищує можливості контролера, застосування структурної та алгоритмічної оптимізації дозволяє реалізувати систему керування на базі контролера Zelio Logic SR3 B261BD без втрати функціональності та надійності.

В результаті зазначеної оптимізації перероблені таблиці сигналів ПЛК з урахуванням оптимізації під 12 дискретних входів контролера Zelio Logic SR3 B261BD.

Оптимізація виконана за рахунок:

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- групового контролю муфт (замість 7 → 3 входи);
- збереження 5-бітного вибору швидкості;
- мінімізації допоміжних сигналів.

Таблиця 2.8 – Вхідні сигнали ПЛК (оптимізований варіант)

Позначення	Адреса	Найменування сигналу	Тип	Призначення
SB1	I0.0	Кнопка «Пуск»	Дискретний	Запуск системи
SB2	I0.1	Кнопка «Стоп»	Дискретний	Зупинка системи
SA1	I0.2	Вибір швидкості (біт 0)	Дискретний	Код Speed_target
SA2	I0.3	Вибір швидкості (біт 1)	Дискретний	Код Speed_target
SA3	I0.4	Вибір швидкості (біт 2)	Дискретний	Код Speed_target
SA4	I0.5	Вибір швидкості (біт 3)	Дискретний	Код Speed_target
SA5	I0.6	Вибір швидкості (біт 4)	Дискретний	Код Speed_target (до 18 швидкостей)
SQ_A	I0.7	Датчик групи А (M1–M3)	Дискретний	Підтвердження включення однієї муфти групи А
SQ_B	I1.0	Датчик групи В (M4–M6)	Дискретний	Підтвердження включення однієї муфти групи В
SQ_P	I1.1	Датчик планетарної муфти M7	Дискретний	Контроль режиму редуктора
SB3	I1.2	Кнопка «Скидання аварії»	Дискретний	Вихід з аварійного стану
FAULT	I1.3	Загальний сигнал аварії	Дискретний	Захист системи

Групування муфт. Замість: SQ1–SQ7 (7 входів)

Використано: SQ_A – група А (M1–M3); SQ_B – група В (M4–M6); SQ_P – планетарна муфта. Це можливо, оскільки одночасно працює лише одна муфта в групі; алгоритм є послідовним (GRAFCET).

Кодування швидкості 5 біт → 32 комбінації → використовується 18.

Таблиця 2.9 – Вихідні сигнали ПЛК

Позначення	Адреса	Найменування сигналу	Тип	Призначення
KM1	Q0.0	Муфта M1	Дискретний	Група А
KM2	Q0.1	Муфта M2	Дискретний	Група А
KM3	Q0.2	Муфта M3	Дискретний	Група А
KM4	Q0.3	Муфта M4	Дискретний	Група В
KM5	Q0.4	Муфта M5	Дискретний	Група В
KM6	Q0.5	Муфта M6	Дискретний	Група В
KM7	Q0.6	Муфта M7 (планетарна)	Дискретний	Режим редуктора
HL1	Q0.7	«Робота»	Дискретний	Індикація
HL2	Q0.8	«Аварія»	Дискретний	Індикація
HA1	Q0.9	Сигналізація	Дискретний	Аварійний сигнал

Оптимізація структури вхідних сигналів дозволила зменшити їх кількість з 16 до 12 без втрати функціональності та надійності системи. Це забезпечило можливість використання контролера Zelio Logic SR3 B261BD без застосування додаткових модулів розширення, що підвищує економічну ефективність і спрощує реалізацію системи керування.

Покрокова інструкція реалізації алгоритму в середовищі Zelio Soft в додатку А.

На рисунку 2.5 представлено Ladder-діаграму алгоритму керування коробкою швидкостей, реалізовану в середовищі Zelio Soft. Особливістю даної реалізації є використання оптимізованої структури вхідних сигналів, при якій контроль стану муфт здійснюється за груповим принципом. Це дозволило зменшити кількість дискретних входів без зміни логіки керування та забезпечити відповідність можливостям обраного програмованого контролера.

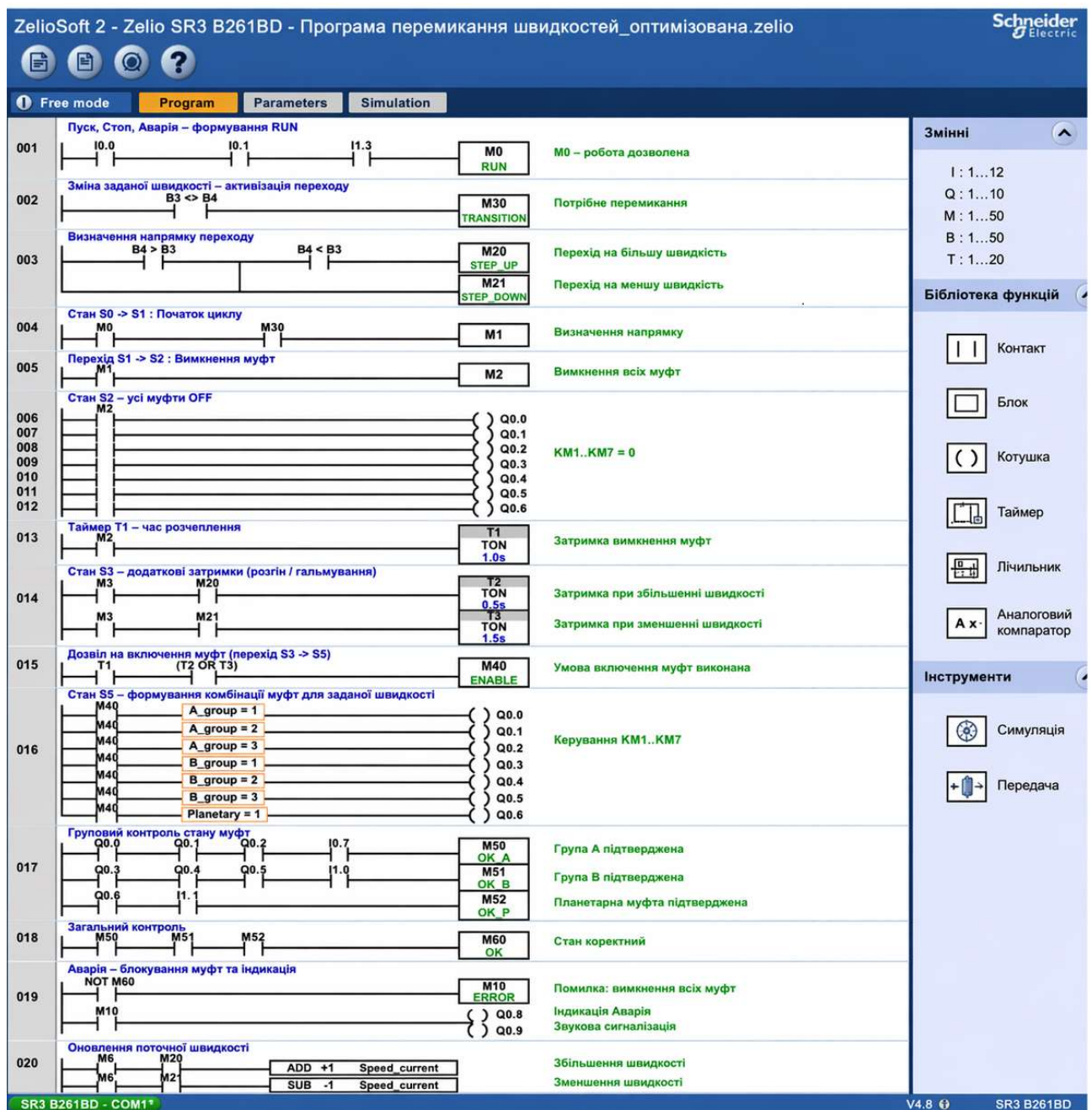


Рисунок 2.5 – Програмна реалізація алгоритму перемикання швидкостей у середовищі Zelio Soft (Ladder Diagram) оптимізований варіант

Для перевірки працездатності алгоритму було розроблено програму у середовищі Zelio Soft та проведено її імітаційне моделювання. Результати симуляції підтвердили коректність роботи алгоритму перемикання швидкостей, включаючи логіку блокувань, часові затримки та контроль стану муфт.

2.5 Моделювання роботи розробленої системи керування в середовищі MATLAB

Для перевірки працездатності розробленої системи керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата було виконано імітаційне моделювання в середовищі MATLAB. Метою моделювання є дослідження процесу перемикання швидкостей, аналіз роботи електромагнітних муфт та перевірка коректності алгоритму керування при переході між режимами роботи.

Модель реалізує логіку автоматичного перемикання 18 швидкостей коробки передач із урахуванням часових затримок, системи блокувань та послідовності включення електромагнітних муфт. У моделі враховано динаміку включення муфт, затримки при розгоні та гальмуванні, а також контроль конфліктних режимів.

Структура моделі включає блок завдання швидкості, алгоритм керування, блок формування керуючих сигналів муфт, модель електромагнітних муфт та систему контролю станів. Перемикання швидкостей реалізується відповідно до кінематичної структури коробки передач, де кожна швидкість формується комбінацією трьох груп передач та планетарного механізму.

Для реалізації моделі було розроблено MATLAB-скрипт, який формує часові діаграми роботи системи керування. У програмі використано таблицю відповідності швидкостей та комбінацій муфт, що визначає структуру включення передач.

Кожна швидкість описується комбінацією сигналів керування:

A1–A3 — перша група передач;

B1–B3 — друга група передач;

P — планетарний механізм.

Алгоритм моделювання передбачає послідовний перехід між швидкостями. При отриманні нового значення швидкості система спочатку вимикає активні муфти, після чого формується пауза перемикання. Далі

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснюється включення нової комбінації муфт відповідно до таблиці передач. Для процесу розгону використовується менша затримка перемикавання, а для зниження швидкості — збільшена затримка, що забезпечує зменшення динамічних навантажень у механічній системі.

Математично робота муфт описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$\tau \frac{dM(t)}{dt} + M(t) = K \cdot U(t),$$

де: $M(t)$ — стан муфти; $U(t)$ — керуючий сигнал;

τ — постійна часу муфти;

K — коефіцієнт передач.

Швидкість обертання планшайби визначається як функція активних передач коробки швидкостей:

$$n(t) = f(A_{group}, B_{group}, Planetary)$$

$$n = n_0 \cdot i_A \cdot i_B \cdot i_P,$$

де: n_0 — швидкість електродвигуна; i_A, i_B — передаточні числа груп передач;

i_P — коефіцієнт планетарного механізму.

Було проведено моделювання переходу між швидкостями:

Випадок 1: Розгін ($1 \rightarrow 6$)

Послідовність:

$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$

На кожному кроці:

- вимкнення муфт;
- затримка T_1 ;
- затримка T_2 ;
- включення нової комбінації.

Випадок 2: Гальмування ($6 \rightarrow 2$)

Послідовність:

$6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2$

Використовується більша затримка:

$T_3 > T_2$

Для дослідження роботи автоматизованої системи керування коробкою

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкостей було розроблено MATLAB-скрипт, який реалізує імітаційне моделювання процесу перемикання передач. У моделі враховано формування 18 швидкостей коробки передач, часові затримки перемикання та логіку роботи електромагнітних муфт.

На початку скрипта задаються основні параметри системи: кількість швидкостей, часові затримки вимкнення муфт, затримки при розгоні та гальмуванні, а також параметри дискретизації моделі. Далі формуються початкові умови моделювання, зокрема поточна та задана швидкість, а також масиви для збереження результатів роботи системи.

Основою алгоритму є таблиця передач, яка визначає комбінації включення груп передач та планетарного механізму для кожної з 18 швидкостей. Для формування сигналів керування використовується функція активації муфт, яка перетворює комбінацію передач у набір логічних сигналів керування електромагнітними муфтами.

У процесі моделювання система визначає напрямок перемикання швидкості. При збільшенні швидкості використовується менша затримка перемикання, а при зниженні — збільшена, що відповідає умовам безпечної роботи механічної системи. Алгоритм перемикання включає чотири основні етапи: вимкнення активних муфт, витримку часової паузи, зміну номера передачі та включення нової комбінації муфт.

Після завершення моделювання виконується побудова графіків роботи системи. Перший графік відображає зміну швидкості в часі та дозволяє оцінити послідовність переходів між передачами. Другий графік формує часову діаграму роботи електромагнітних муфт, що дає можливість перевірити правильність алгоритму перемикання та відсутність конфліктних режимів. Третій графік відображає сумарну кількість активних муфт у кожний момент часу та використовується для контролю коректності роботи системи блокувань.

Отримані результати підтверджують працездатність алгоритму керування, правильність послідовності перемикання передач та ефективність реалізованих часових затримок і логічних блокувань.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Скрипт моделі перемикання швидкостей розташований в додатку А.

У процесі моделювання було досліджено перехід системи зі швидкості 1 на швидкість 6. Алгоритм реалізував послідовне перемикання:

$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$

На кожному етапі відбувалося вимкнення поточних муфт, витримка часової паузи та включення нової комбінації передач. Отриманий графік зміни швидкості має ступінчастий характер і підтверджує коректність роботи алгоритму.

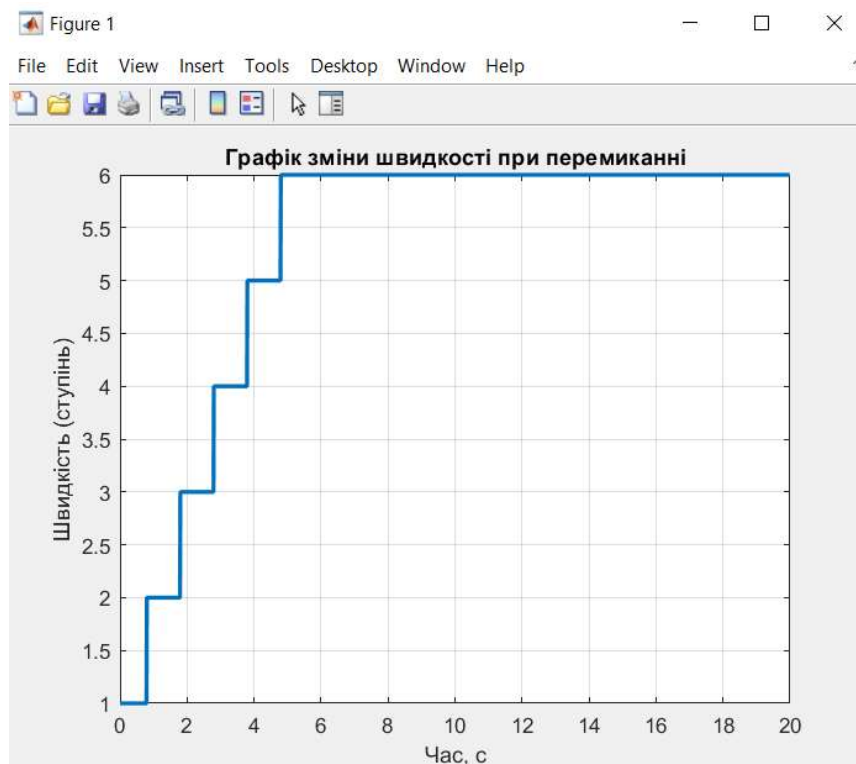


Рисунок 2.6 – Зміна швидкості при перемиканні передач

З графіка видно, що система здійснює послідовний перехід між передачами без пропуску проміжних станів. Наявність часових інтервалів між перемиканнями забезпечує стабільність роботи механічної системи та виключає ударні навантаження.

Додатково було досліджено роботу електромагнітних муфт. Часова діаграма підтверджує, що одночасне включення конфліктних муфт відсутнє, а сигнали керування формуються послідовно.

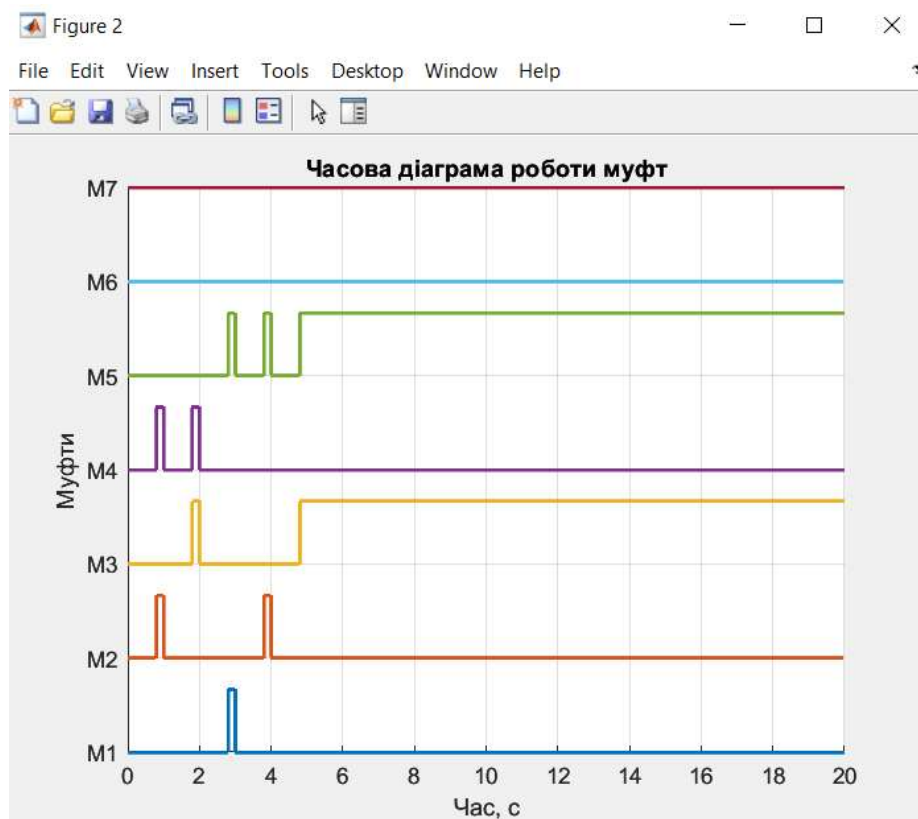


Рисунок 2.7 – Часова діаграма роботи муфт

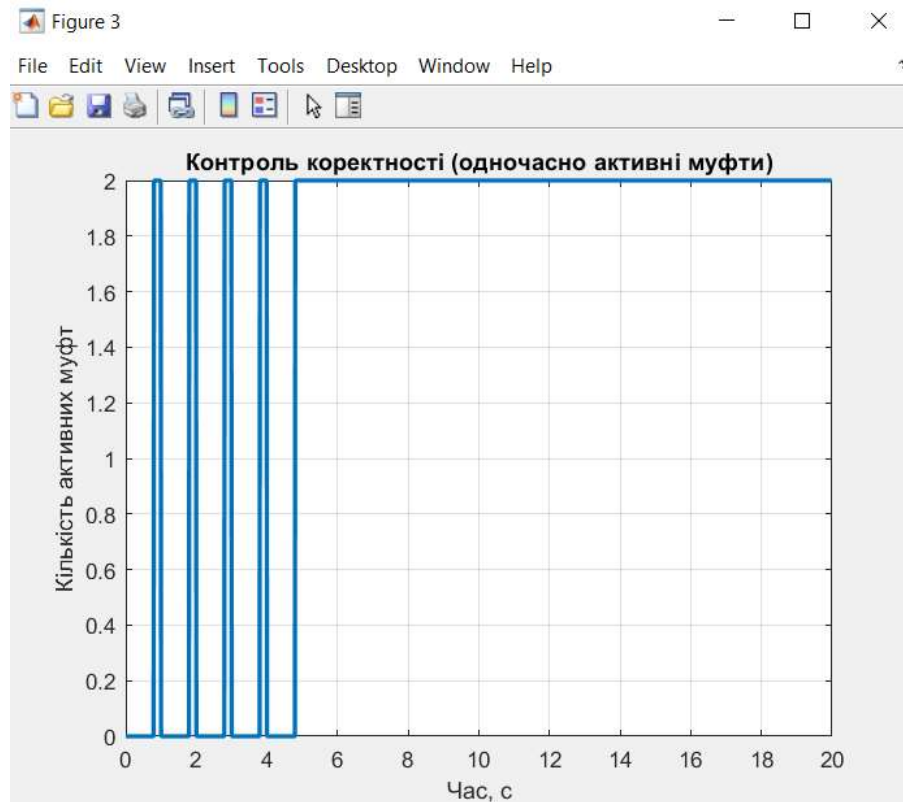


Рисунок 2.8 – Контроль коректності (одночасно активні муфти)

Отримані результати свідчать про правильність реалізації системи блокувань та алгоритму перемикання передач. У процесі моделювання не було зафіксовано конфліктних режимів або одночасного включення взаємовиключних муфт.

Для перевірки роботи алгоритму при зниженні швидкості було виконано додаткове моделювання переходу системи з шостої швидкості на другу. Такий режим є характерним для технологічних процесів, у яких необхідно швидко зменшити частоту обертання планшайби при переході до іншого режиму різання.

У процесі моделювання алгоритм реалізує послідовне перемикання передач:

$$6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2$$

Перехід виконується поетапно з обов'язковим проходженням усіх проміжних швидкостей. На кожному етапі система: вимикає активні муфти; виконує часову затримку гальмування; формує нову комбінацію передач; вмикає необхідні електромагнітні муфти.

Для режиму зниження швидкості використовується збільшена затримка:

$$T_3=0.7 \text{ с,}$$

що забезпечує зменшення динамічних навантажень на зубчасті передачі та електромагнітні муфти.

Зміна параметрів у MATLAB-скрипті (Додаток А).

Для реалізації даного режиму у скрипті змінюються початкові умови:

`speed_current = 6; speed_target = 2;`

Інша структура алгоритму залишається без змін.

У результаті моделювання було отримано часову діаграму зміни швидкості, яка підтверджує послідовний характер перемикання передач.

З графіка видно, що система не виконує прямого переходу між швидкостями, а проходить усі проміжні стани відповідно до алгоритму автомата станів. Це забезпечує безпечну роботу коробки швидкостей та виключає перевантаження механічної частини приводу.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

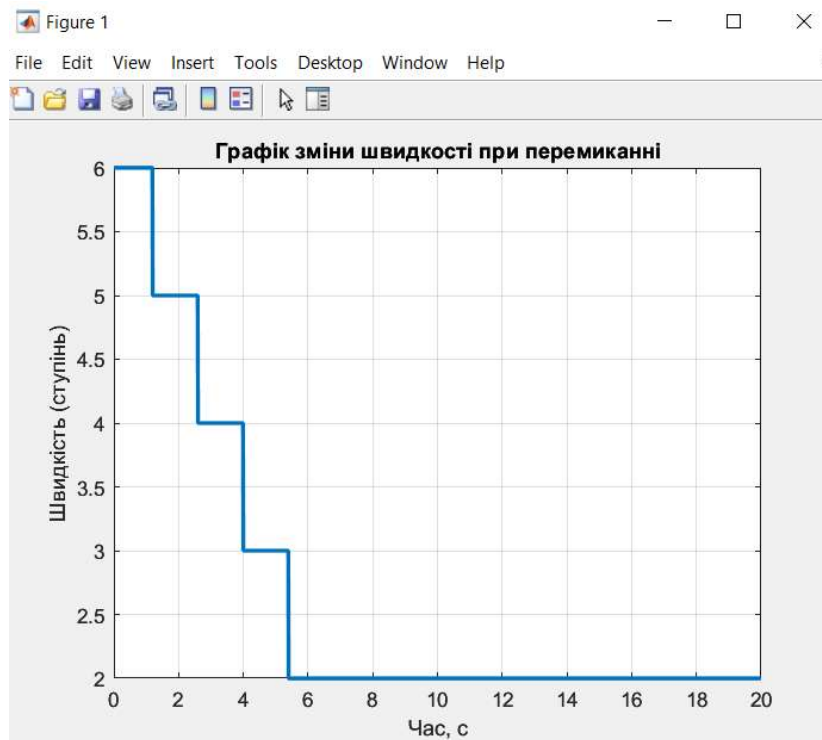


Рисунок 2.9 – Графік переходу зі швидкості 6 на швидкість 2

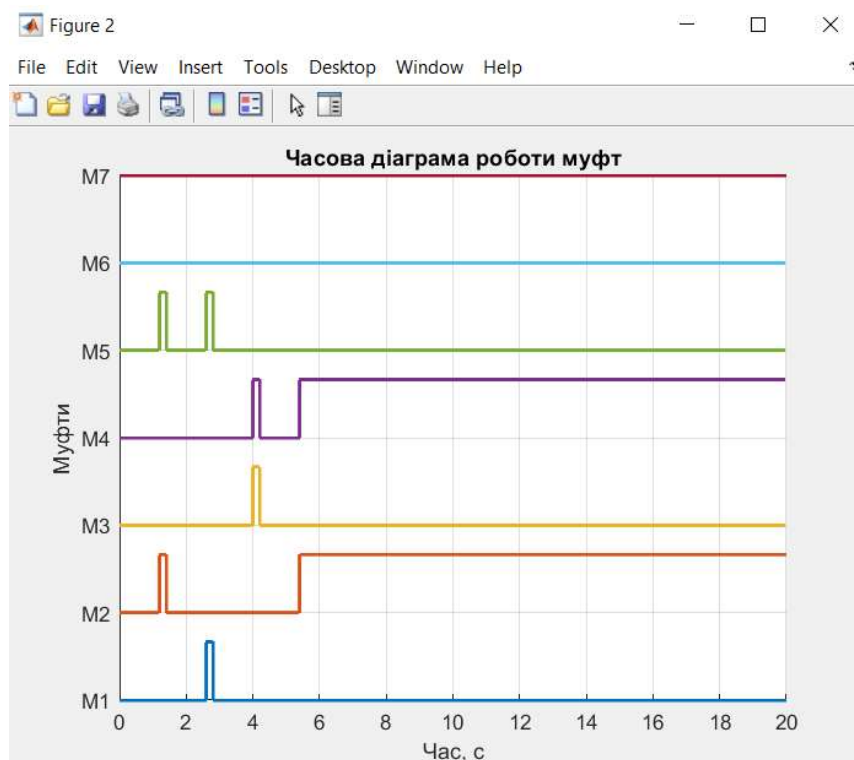


Рисунок 2.10 – Часова діаграма роботи муфт при переході 6 → 2

Часова діаграма роботи муфт підтверджує коректність реалізації системи блокувань.

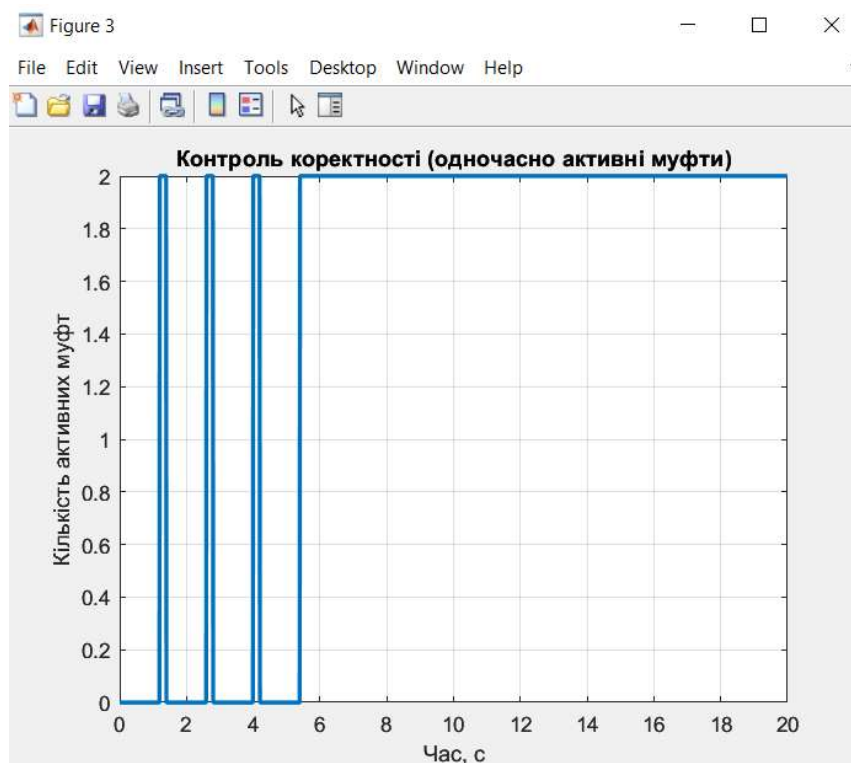


Рисунок 2.11 – Контроль коректності (одночасно активні муфти)

Отримані результати підтверджують, що алгоритм забезпечує плавне та послідовне зниження швидкості із дотриманням часових затримок і логіки взаємного блокування муфт.

Моделювання режиму переходу зі швидкості 6 на швидкість 2 підтвердило працездатність алгоритму керування при гальмуванні системи.

Висновки по розділу:

У другому розділі роботи розроблено автоматизовану систему керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата моделей 1512 (1516) на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Zelio Logic. Сформовано структурну схему системи керування, інформаційну модель та таблиці вхідних і вихідних сигналів ПЛК. Виконано оптимізацію структури сигналів, що дозволило реалізувати систему керування в межах апаратних можливостей обраного контролера.

Розроблено алгоритм автоматичного перемикання 18 швидкостей коробки передач із урахуванням кінематичної структури приводу, часових

затримок, послідовності переходів та взаємного блокування електромагнітних муфт. Алгоритм реалізовано у вигляді автомата станів GRAFCET та Ladder Diagram, що забезпечує наочність логіки роботи системи та можливість її практичної реалізації в середовищі програмування ПЛК.

Обґрунтовано вибір контролера Zelio Logic за критеріями кількості входів і виходів, швидкодії, надійності та економічної доцільності. Розроблено структуру програмного забезпечення та сформовано фрагменти Ladder-програми для реалізації алгоритму керування.

Виконано моделювання розробленої системи керування в середовищі MATLAB. Побудована математична модель дозволила дослідити процес перемикання швидкостей, роботу електромагнітних муфт та часові характеристики системи. У процесі моделювання перевірено режими розгону та гальмування системи, а також виконано аналіз послідовності перемикання передач із урахуванням часових затримок.

Результати моделювання підтвердили працездатність розробленого алгоритму керування, коректність роботи системи блокувань та відсутність конфліктних режимів перемикання. Проведене дослідження підтвердило можливість практичного впровадження модернізованої системи керування коробкою швидкостей на базі програмованого логічного контролера.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання модернізації системи керування коробкою швидкостей карусельного токарного верстата моделей 1512 (1516) шляхом переходу від релейно-контакторної системи до мікропроцесорного керування на базі програмованого логічного контролера.

У роботі розроблено структурну схему автоматизованої системи керування коробкою швидкостей, сформовано інформаційну модель та визначено склад вхідних і вихідних сигналів програмованого логічного контролера. Розроблений алгоритм автоматичного перемикання 18 швидкостей враховує кінематичну структуру коробки передач, послідовність перемикання, часові затримки, а також систему взаємного блокування електромагнітних муфт. Реалізація алгоритму у вигляді GRAFCET та Ladder Diagram забезпечила формалізований опис логіки керування та можливість її практичного впровадження.

Обґрунтовано вибір програмованого логічного контролера Schneider Electric Zelio Logic, який забезпечує необхідні функціональні можливості для реалізації системи керування при мінімальних витратах на модернізацію.

Для перевірки працездатності системи виконано моделювання у середовищі MATLAB. Розроблена математична модель дозволила дослідити процес перемикання швидкостей, роботу електромагнітних муфт та часові характеристики системи керування.

Практичне значення роботи полягає у можливості модернізації існуючих карусельних токарних верстатів без значних капітальних витрат із підвищенням рівня автоматизації, надійності та безпеки експлуатації обладнання.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ			
Розроб.		Чигрин Д.Р.						
Перевір.		Курганов І.Д.						
Н. Контр.		Маринич І.А.						
Затвердив		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск			

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Огарков В. Ф. Автоматизація технологічних процесів. Київ : Вища школа, 2010. 287 с.
2. Кузнецов Ю. М. Основи автоматизації виробництва. Київ : Техніка, 2012. 312 с.
3. Коваленко І. Г. Технологічне обладнання машинобудування. Київ : Каравела, 2015. 368 с.
4. Шишкін О. В. Автоматизація верстатів і виробничих процесів. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. 356 с.
5. Сандлер А. С. Автоматизація електроприводів. Київ : Техніка, 2011. 296 с.
6. Bolton W. Programmable Logic Controllers. 6th ed. Oxford : Newnes, 2015. 720 p.
7. Petruzella F. D. Programmable Logic Controllers. 5th ed. New York : McGraw-Hill, 2011. 432 p.
8. Parr E. A. Industrial Control Handbook. Oxford : Newnes, 2013. 656 p.
9. Lewis R. W. Programming Industrial Control Systems. London : IET, 2012. 392 p.
10. Hanssen S. PLC Controls with Structured Text. ISA, 2015. 300 p.
11. International Electrotechnical Commission. IEC 61131-3: Programmable controllers – Part 3. Geneva : IEC, 2020.
12. Bolton W. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical Engineering. 7th ed. Pearson, 2021. 648 p.
13. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. 5th ed. Oxford : Elsevier, 2019. 456 p.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Чигрин Д.Р.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Курганов І.Д.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затвердив</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		

14. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th ed. Pearson, 2017. 816 p.
15. Nise N. S. Control Systems Engineering. 8th ed. Wiley, 2020. 944 p.
16. Thramboulidis K. Cyber-physical systems in industrial automation // Journal of Industrial Information Integration. 2020. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.jii.2019.100104.
17. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0 // Manufacturing Letters. 2020. Vol. 3. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
18. Monostori L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges // Procedia CIRP. 2020. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
19. Wang S., Wan J., Li D., Zhang C. Implementing smart factory of Industry 4.0 // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2020. DOI: 10.1155/2016/3159805.
20. Qin J., Liu Y., Grosvenor R. A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 // Procedia CIRP. 2021. Vol. 52. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.005.
21. Colombo A. W., Karnouskos S., Kaynak O. Industrial cyberphysical systems // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2021. DOI: 10.1109/MIE.2017.2648857.
22. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. The industrial internet of things (IIoT) // Computer. 2020. Vol. 51. DOI: 10.1109/MC.2018.2551118.
23. Gilchrist A. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Berkeley : Apress, 2020. 250 p.
24. Ferreira P., et al. PLC-based automation in industrial systems // IEEE Access. 2022. Vol. 10. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3145678.
25. Kumar R., Singh R. Optimization of industrial control systems using PLC // Sensors. 2023. Vol. 23. DOI: 10.3390/s23010456.
26. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

27. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

28. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

29. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

30. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MATLAB-скрипт моделювання системи керування

```
clc; clear; close all;
```

```
%% Параметри системи
```

```
n_steps = 18;      % кількість швидкостей
```

```
T1 = 0.5;          % затримка вимкнення (с)
```

```
T2 = 0.3;          % затримка розгону (с)
```

```
T3 = 0.7;          % затримка гальмування (с)
```

```
dt = 0.01;
```

```
t_total = 20;
```

```
t = 0:dt:t_total;
```

```
%% Початкові значення
```

```
speed_current = 1;
```

```
speed_target = 6; % тест: перехід 1 → 6
```

```
speed = zeros(size(t));
```

```
% Муфти (7 штук)
```

```
M = zeros(7, length(t));
```

```
%% Таблиця передач (18 швидкостей)
```

```
% [A B P]
```

```
gear_table = [
```

```
1 1 0;
```

```
2 1 0;
```

```
3 1 0;
```

```

1 2 0;
2 2 0;
3 2 0;
1 3 0;
2 3 0;
3 3 0;
1 1 1;
2 1 1;
3 1 1;
1 2 1;
2 2 1;
3 2 1;
1 3 1;
2 3 1;
3 3 1;
];

```

```

%% Функція активації муфт
activate_clutches = @(A,B,P) [
    (A==1); (A==2); (A==3); ...
    (B==1); (B==2); (B==3); ...
    P
];

```

```

%% Моделювання
time_index = 1;
t_curr = 0;

```

```

while t_curr < t_total && time_index < length(t)

```

```

% Поточна швидкість
speed(time_index) = speed_current;

% Визначення напрямку
if speed_target > speed_current
    direction = 1;
    T_switch = T2;
elseif speed_target < speed_current
    direction = -1;
    T_switch = T3;
else
    direction = 0;
end

% Якщо досягли — тримаємо
if direction == 0
    M(:, time_index) = activate_clutches( ...
        gear_table(speed_current,1), ...
        gear_table(speed_current,2), ...
        gear_table(speed_current,3));

    time_index = time_index + 1;
    t_curr = t_curr + dt;
    continue;
end

%% 1. Вимкнення муфт
for k = 1:round(T1/dt)
    if time_index > length(t), break; end
    speed(time_index) = speed_current;

```

```

M(:, time_index) = 0;
time_index = time_index + 1;
t_curr = t_curr + dt;
end

%%% 2. Затримка перемикання
for k = 1:round(T_switch/dt)
    if time_index > length(t), break; end
    speed(time_index) = speed_current;
    M(:, time_index) = 0;
    time_index = time_index + 1;
    t_curr = t_curr + dt;
end

%%% 3. Перехід на наступну швидкість
speed_current = speed_current + direction;

%%% 4. Включення муфт
clutch_state = activate_clutches( ...
    gear_table(speed_current,1), ...
    gear_table(speed_current,2), ...
    gear_table(speed_current,3));

for k = 1:round(0.2/dt)
    if time_index > length(t), break; end
    speed(time_index) = speed_current;
    M(:, time_index) = clutch_state;
    time_index = time_index + 1;
    t_curr = t_curr + dt;
end

```

```

end

%% Обрізка масивів
t = t(1:time_index-1);
speed = speed(1:time_index-1);
M = M(:,1:time_index-1);

%%  Графік 1 — Швидкість
figure;
plot(t, speed, 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Швидкість (ступінь)');
title('Графік зміни швидкості при перемиканні');

%%  Графік 2 — Муфти
figure;
hold on;
for i = 1:7
    stairs(t, M(i,:) + (i-1)*1.5, 'LineWidth', 1.5);
end
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Муфти');
title('Часова діаграма роботи муфт');
yticks(0:1.5:10);
yticklabels({'M1','M2','M3','M4','M5','M6','M7'});

%%  Графік 3 — Сумарний стан системи

```

```

figure;
plot(t, sum(M), 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Кількість активних муфт');
title('Контроль коректності (одночасно активні муфти)')

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		