

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва спеціальності)

освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

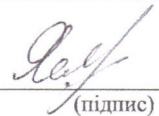
(назва освітньої програми)

на тему: Удосконалення системи керування фрезерного верстата
з пантографом

Виконав: студент групи 6371м

Ярошинський Олександр Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)



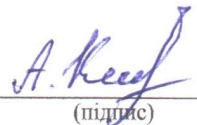
(підпис)

Керівник

асистент. каф. автоматики, к.т.н.,

Козлов А.Ю.

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



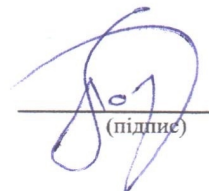
(підпис)

Рецензент

доцент кафедри СЕЕС,

к.т.н., доцент Новогрецький С.М.

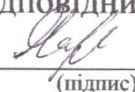
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент



(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

АНОТАЦІЯ

У даній дипломній роботі розглянуто питання удосконалення системи керування фрезерного верстата з пантографом на прикладі верстата 6E463. **Метою дипломної роботи** є модернізація штатної системи керування фрезерного верстату з пантографом використовуючи програмований логічний контролер.

У роботі проведено аналіз конструктивних і функціональних особливостей фрезерного верстата, принципу роботи копіювального механізму у трьох координатах та штатної електромеханічної системи керування. Визначено основні недоліки існуючої системи, серед яких низький рівень автоматизації, залежність точності обробки від кваліфікації оператора, відсутність зворотного зв'язку та обмежені можливості корекції похибок у процесі обробки.

Запропоновано удосконалення системи керування шляхом впровадження програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M221. Розроблено функціональну структуру модернізованої системи керування, алгоритми роботи електроприводів та логіку автоматизованого керування переміщеннями верстата. Очікуваними результатами впровадження є підвищення точності та повторюваності обробки, зниження впливу людського фактора, підвищення надійності та безпеки експлуатації верстата, а також можливість інтеграції у сучасні автоматизовані виробничі системи.

Результати роботи можуть бути використані під час модернізації фрезерних верстатів з пантографом на підприємствах машинобудівної галузі та в навчальному процесі при підготовці фахівців з автоматизації та комп'ютеризованих систем керування.

Об'єкт дослідження - процес керування фрезерним верстатом з пантографом у процесі механічної обробки деталей.

Предмет дослідження - система керування фрезерного верстата з пантографом 6E463, методи та засоби її удосконалення шляхом впровадження програмованого логічного контролера.

Ключові слова: фрезерний верстат, пантограф, система керування, копіювальний механізм, автоматизація, електропривод, програмований логічний контролер, модернізація, точність обробки.

ABSTRACT

In this diploma thesis, the issue of improving the control system of a pantograph milling machine is considered using the 6E463 machine as an example. The aim of the diploma thesis is to increase the accuracy, reliability, and efficiency of the milling process by modernizing the standard control system with the use of a programmable logic controller.

The work includes an analysis of the design and functional features of the milling machine, the operating principle of the three-axis copying mechanism, and the standard electromechanical control system. The main shortcomings of the existing system are identified, including a low level of automation, dependence of machining accuracy on the operator's qualifications, lack of feedback, and limited possibilities for error correction during the machining process.

An improvement of the control system is proposed through the implementation of the Schneider Electric Modicon M221 programmable logic controller. The functional structure of the modernized control system, electric drive operation algorithms, and the logic of automated control of the machine movements are developed. The expected results of the implementation include increased machining accuracy and repeatability, reduced human factor influence, improved operational reliability and safety of the machine, as well as the possibility of integration into modern automated manufacturing systems.

The results of the thesis can be used in the modernization of pantograph milling machines at mechanical engineering enterprises and in the educational process for training specialists in automation and computerized control systems.

Object of the study – the control process of a pantograph milling machine during the mechanical machining of parts.

Subject of the study – the control system of the 6E463 pantograph milling machine and the methods and means of its improvement through the implementation of a programmable logic controller.

Keywords: milling machine, pantograph, control system, copying mechanism, automation, electric drive, programmable logic controller, modernization, machining accuracy.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1_ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПИС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ	9
1.1 Огляд та аналіз літературних джерел за темою.....	9
1.2 Особливості конструкції та функціональних вузлів фрезерного верстата 6E463 з пантографом	13
1.3 Опис штатної системи керування	22
Висновки за розділом	27
РОЗДІЛ 2_МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	28
2.1 Побудова структурно-логічної схеми магістерського дослідження	28
2.2 Структурно-логічна схема магістерського дослідження.....	34
2.3 Вибір методу вирішення поставленої задачі дослідження.....	35
РОЗДІЛ 3_АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА	39
3.1 Аналіз архітектури та функцій ПЛК для задач верстатного керування	39
3.2 Обґрунтування вибору ПЛК Modicon M221 TM221CE24T та його технічні характеристики.....	48
3.3 Діагностика та налагодження ПЛК.....	55
Висновки за розділом	57
РОЗДІЛ 4_ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТОМ.....	59
4.1 Функціональна структура удосконаленої системи керування фрезерним верстатом	59
4.2 Розробка алгоритмів керування фрезерним верстатом з пантографом	63
4.3 Реалізація програмного коду керування.....	74
Висновки за розділом	88
РОЗДІЛ 5_ОХОРОНА ПРАЦІ	89
5.1 Вимоги охорони праці при роботі на фрезерному верстаті з пантографом ..	89
5.2. Безпека при виникненні небезпечних та аварійних ситуацій	91
Висновки за розділом	92
ВИСНОВОК.....	93
Список використаних джерел	94
ДОДАТОК А_МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ	96

ВСТУП

У сучасних умовах інтенсивного розвитку машинобудівної галузі зростає потреба в модернізації існуючого технологічного обладнання, зокрема фрезерних та копіювально-фрезерних верстатів. Значна частина такого обладнання, що використовується на підприємствах, була виготовлена у минулі десятиліття та має застарілі системи керування. Незважаючи на механічну надійність, подібні верстати не забезпечують достатньої точності, гнучкості, стабільності процесу обробки та інтеграції у сучасні виробничі системи.

Фрезерний верстат 6E463 з понтографом є типовим прикладом обладнання, яке має значний потенціал подальшої експлуатації, але потребує технічного оновлення. Його копіювальний механізм дозволяє виконувати складні контурні операції, проте точність та швидкодія значною мірою залежать від стану та можливостей електромеханічної системи керування. Штатна система керування таких верстатів є релейною або напівелектронною та не підтримує адаптивність, автоматичний контроль, програмування профілів руху чи синхронізоване керування приводами.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки сучасної автоматизованої системи керування на базі програмованого логічного контролера (ПЛК), яка забезпечить підвищення ефективності роботи верстата, розширення функціональності копіювального механізму, покращення точності та надійності технологічного процесу. Використання ПЛК Schneider Electric Modicon M221 дозволяє реалізувати програмно-орієнтоване управління електроприводами, забезпечити синхронізацію та стабільність рухів, автоматизувати контроль режимів обробки та інтегрувати верстат у сучасні системи виробництва.

Таким чином, модернізація системи керування верстата 6E463 є актуальним завданням, що спрямоване на продовження ресурсу обладнання та підвищення його продуктивності відповідно до сучасних вимог промислової автоматизації.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПИС ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ

1.1 Огляд та аналіз літературних джерел за темою

Фрезерні верстати — одне з ключових верстатних спрямувань у машинобудуванні, що забезпечують широкий спектр обробки поверхонь, пазів, канавок, профілів і складних контурів. Історично розвиток фрезерного обладнання тісно пов'язаний із потребою у точній обробці металевих деталей для промислових застосувань: від виготовлення інструментів та штампів до деталей рухомих механізмів і корпусних елементів. Перші фрезерні верстати з'явилися у другій половині XVIII — на початку XIX століття, і їхня еволюція відбувалася паралельно з розвитком приводної техніки, стандартизацією інструментів (шпиндельних конусів, різальних фрез) і матеріалознавством. По суті, фрезерний верстат — це механізм, що реалізує відносний рух між інструментом (фрезою) і заготівлею, зазвичай по кількох координатах, з метою зняття припуску у визначених точках та створення заданої форми поверхні.

Класичні фрезерні верстати мають декілька базових типів конструкцій: горизонтально-фрезерні, вертикально-фрезерні, консольні, безконсольні, а також спеціалізовані саме для певних операцій — наприклад, шпоночні, шліфувальні чи копіювальні. Горизонтальні верстати зазвичай використовувалися для важкої обробки корпусних деталей та довгих поверхонь, вертикальні — для фасонної обробки і менших площин, консольні — для універсальних робіт з різноманітними інструментами. Конструктивно будь-який верстат складається зі стійки або станини, столу (який може здійснювати переміщення по осі X і Y), супорта або шпиндельної бабки (виконує переміщення по осі Z), коробок подач, приводів і системи кріплення заготівки. Важливо зазначити, що саме механічна жорсткість конструкції, точність направляючих та якість шпиндельного вузла визначають базову жорсткість і можливості верстата по точності обробки.

Особливо цікавою і специфічною групою є копіювально-фрезерні верстати з пантографічними пристроями (далі — пантографи). Пантограф — механічний копіювальний пристрій, історично взятий із креслярства та гравіювання; з його допомогою можна масштабувати контур-зразок на деталь, зберігаючи геометричну подібність траєкторій. Ідея пантографа полягає в застосуванні шарнірно-зв'язаних важелів, що створюють геометричне перетворення руху точки-зразка у рух робочого інструмента. Таким чином, оператор вручну або механікою пересуває копіювальний елемент по контуру шаблону, а пантограф збільшує або зменшує амплітуду руху відповідно до заданого передавального відношення. У машинобудуванні це дало змогу виконувати точне копіювання складних профілів без складних розрахунків чи програмування: механічна передача «самостійно» відтворює контур на деталі.

Історично пантографні верстати мали широке застосування у виробництві форм, штампів, гравіюванні та копіюванні лекал. Винахід пантографа відноситься ще до кінця XVIII століття (перше письмове згадування належить до початкових років промислової революції для креслярських приладів), але його адаптація для фрезерних операцій набула поширення у XIX—XX століттях. У радянському та європейському виробництві пантографні агрегати встановлювалися як на окремих спеціалізованих верстатах, так і як приставні пристрої до універсальних фрезерів. Однією з причин популярності був простий технологічний ланцюг: наявність шаблону та пантографа дозволяла оперативно відтворити складну деталь без дорогих та тривалих інструментальних операцій [1-3].

Конструктивно пантограф як вбудований елемент верстата має декілька характерних частин: копіювальна голівка (ролик що обводить шаблон), шарнірно-зв'язана система важелів з регульованими точками сполучення (для встановлення коефіцієнта масштабування), зв'язок із шпиндельною головкою (через механічний передавач або проміжний механізм) і пристрої для фіксації масштабу і компенсації люфтів. Пантограф вимагає точних підшипників та мінімальних люфтів у вузлах, оскільки помилки в шарнірних з'єднаннях прямо перетворюються в похибки кінцевої траєкторії. У деяких конструкціях для підвищення точності

використовувалися підсилювачі жорсткості, втулки з прецизійною посадкою і механічні компенсаційні пристрої [8].

Принцип роботи копіювально-фрезерного верстата з пантографом простий в ідеї, але має свої нюанси при практичній імплементації. Оператор встановлює на столі заготовку і шаблон (зразок). Потім встановлюється режим масштабування (наприклад, 1:1 або інші співвідношення), фіксується пантограф у потрібному положенні та включається шпиндель. Оператор вручну або за допомогою механізму пересуває копіювальний елемент по поверхні шаблону — механічні важелі передають відхилення на інструмент. Якщо пантограф працює з електричним приводом подач, система може частково автоматизувати рух по одній або двом осям, але у базовому варіанті пантографні верстати залишалися ручними у плані подачі по шаблону. Важливим моментом є синхронна робота шпинделя та подачі: неправильно підібрана частота обертання чи подача призводить до вібрацій, припалів та зниження якості копіювання.

Технологічні можливості пантографа охоплюють як двовимірні перевідні операції (перепис контурів), так і створення рельєфних зображень шляхом регулювання глибини занурення інструмента. Для деяких застосувань застосовувалися спеціальні головки з можливістю перемикання масштабу в процесі роботи, що дозволяло отримувати деталі з різними ступенями збільшення з одного шаблону. Однак існували і обмеження: пантограф не давав тієї точності, що забезпечує сучасний цифровий контроль (ЧПК), і його ефективність зменшувалася при виконанні дуже дрібних або високошвидкісних операцій через механічні обмеження системи важелів.

Виготовлення пантографних верстатів потребує особливої уваги до точності елементів: напрямні повинні бути прецизійними, шарніри — з мінімальними люфтами, а передавальні відношення — жорстко фіксовані чи регульовані зі шкалою. У радянський період масове виробництво таких машин координувалося спеціалізованими верстатобудівними заводами, котрі мали технології лиття, штампування, механічної обробки і шліфування направляючих. Важливим технологічним етапом була обробка напрямних, їх хронометрична посадка у

станину та перевірка паралельності робочих площин столу. Залежно від серії та призначення, різні заводи пропонували варіації конструкції: моделі для гравіювально-копіювальних робіт, для обробки дерев'яних форм чи роботи з пластиком. В останньому випадку пантографи використовувалися також у меблевому виробництві для копіювання лекал.

З технічної точки зору, важливим аспектом є матеріали для виготовлення вузлів пантографа: для шарнірів і рукавів застосовувалися низьколеговані сталі з загартованими поверхнями, напрямні шліфувалися для зменшення зносу, а корпуси — відливалися з чавуну чи литого чавуну для досягнення необхідної маси і демпфувальних властивостей. Консервація та обслуговування таких машин вимагали регулярної мастильної обробки вузлів, контролю за люфтами і, в разі необхідності, регулювання шарнірних з'єднань.

Сфера застосування пантографних верстатів була досить широкою. У металообробці їх використовували для виготовлення форм штампів, матриць, шаблонів, що потребували точного повторення складного профілю. У ювелірній справі та гравіруванні пантографи дозволяли відтворювати орнаменти та рельєфи; у меблевому і корпусному виробництві — копіювати лекала для декоративної обробки; у авіації та автомобілебудуванні — виготовляти прототипи і матриці. Незважаючи на широку застосовність, із появою цифрових систем керування і CAD/CAM технологій, роль пантографів поступово змінювалася: вони стали менш ефективними для серійного виробництва складних об'ємних деталей, але зберегли місце у нішевих технологіях, де важлива швидка передача контурів з фізичного шаблону без цифрової підготовки [2].

З практичної перспективи, модернізація пантографних верстатів часто передбачає встановлення електричних приводів для подач, точних енкодерів для зворотного зв'язку та систем автоматичного керування, що забезпечують підвищену точність та повторюваність. Це дозволяє поєднати інтуїтивну простоту пантографа з електронною стабілізацією траєкторії, корекцією нелінійностей механізму і автоматичною компенсацією зносу. Проте ці модернізації вимагають детального аналізу динамічних властивостей механізму, оскільки додавання

електроніки може не тільки підвищити продуктивність, але й вимагати доопрацювання механічної частини для уникнення резонансів та підвищених вібрацій [6].

Окремо варто зазначити питання точності та відтворюваності. Пантографні верстати, навіть у найкращих конструкціях, мають систематичні та випадкові похибки: систематичні — через геометричні неточності і неточності установки важелів, випадкові — через люфти, знос та змінні зовнішні умови. Для їх зменшення застосовують механічні підлаштування, калібрування по еталонним шаблонам, використання прецизійних підшипників і регулярну діагностику стану. У промислових умовах також застосовують перевірку готових деталей контрольними шаблонами або координатними вимірювальними машинами [7].

Підсумовуючи, фрезерні верстати з пантографом — це унікальна комбінація механічної інженерії та технологічної простоти, що протягом століть виконувала важливу роль у відтворенні складних форм. Їхнє місце у сучасному виробництві змінюється під впливом цифрових технологій, але вони залишаються актуальними для низки специфічних задач. Розуміння історії, конструктивних особливостей та принципів роботи пантографів важливе не лише для збереження технічної спадщини, але й для грамотної модернізації та інтеграції старих верстатів у сучасні виробничі процеси.

1.2 Особливості конструкції та функціональних вузлів фрезерного верстата 6E463 з пантографом

Фрезерний станок 6E463 — це копірувально-фрезерний верстат з пантографічним механізмом, призначений для точного відтворення контурів шаблонів або лекал на оброблюваних деталях. (Рис 1.1) За своєю конструкцією він поєднує жорсткий корпус з чавунної станини, рухомі елементи столу, вертикальну консоль, механічний пантограф та шпіндельний вузол. Основна схема верстата забезпечує вертикальне компонування шпинделя, горизонтальні напрямні для

столів, а також шарнірне сполучення плечей пантографа, що гарантує стабільну та точну передачу руху копіювального щупа на інструмент.

Основу машини становить масивна станина, виготовлена з литого чавуну, яка служить жорсткою платформою для всіх інших вузлів. Станина прокреслена таким чином, щоб витримувати навантаження під час фрезерування і копіювання без значних деформацій. На ній розташовані вертикальні напрямні, по яких переміщується консоль. Вертикальні напрямні виконані з точністю та оснащені системою змащення для зменшення зносу й люфтів у ході тривалої експлуатації.



Рисунок 1.1 - Фрезерний верстат 6Е463 з пантографом

Консоль станка піднімається і опускається по направляючих станини, що забезпечує зміну положення шпиндельної головки по вертикальній осі. Разом із консоллю рухається супорт і механізми, що забезпечують вертикальне переміщення, що дає змогу точно задавати глибину обробки. Конструкція консолі така, що вона фіксується в потрібному положенні, забезпечуючи жорсткість під навантаженням.

Робочий стіл станка 6E463 має прямокутну форму і розміри 250×500 мм (для столу копіра) та 250×500 мм (для столу виробу) згідно з даними каталогу. На столі виробу можна закріплювати заготовки за допомогою лещат, спеціальних пристосувань або наклонно-поворотного столу. Переміщення столу відбувається вручну за допомогою маховиків, причому лімби дають точне відліку — наприклад, подовжній хід по осі X — 300 мм, поперечний хід Y — 200 мм, а вертикальний хід консолі (Z) — 300 мм. Столи забезпечені Т-пазами та призматичними напрямними, що дозволяє надійно кріпити шаблони, деталі та пристосування. (Рис. 1.2)

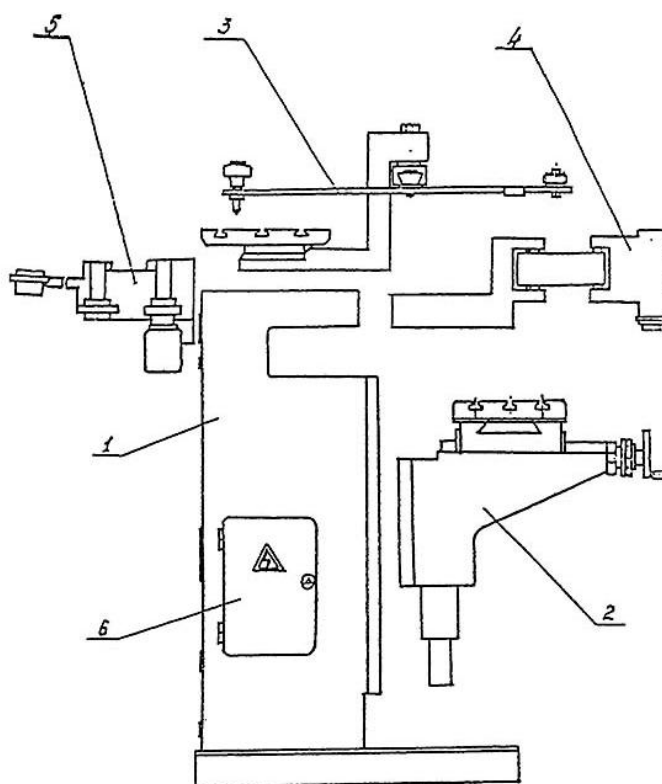


Рисунок 1.2 - Розташування складових частин гравіювального верстата 6E463

Окремий стіл — це стіл копіра, який служить для кріплення шаблону. Цей стіл змонтований на стійці пантографа і може обертатися навколо вертикальної осі — у верстаті 6Е463 поворот копіра становить $\pm 360^\circ$, що дає значну свободу в налаштуванні розміщення шаблону. Фіксація кута повороту здійснюється за допомогою рукояток, а саме встановлення кута здійснюється по шкалі. Стіл копіра також оснащений пазами «ластівчин хвіст» та Т-пазами для установки шаблонів, шрифтів або інших спеціальних пристосувань [3].

Ключовим вузлом, який надає станку 6Е463 його специфічні копіювальні властивості, є пантограф (рис.1.3). Це шарнірно-зв'язана система важелів, побудована за схемою паралелограма, яка дозволяє з великою точністю передавати рух щупа до шпинделя і фрези. За даними каталогу, плечі пантографа з'єднані шарнірами на прецизійних підшипниках, що мінімізує люфт і забезпечує плавність руху. Зміна коефіцієнта масштабування (передавального відношення) здійснюється переміщенням точок кріплення плечей пантографа (кареток) відносно їхньої стійки і подальшою фіксацією рукоятками. Це дає змогу змінювати масштаб копіювання, наприклад, від 1:1 до 1:100, відповідно до характеру шаблону й вимог до заготовки.

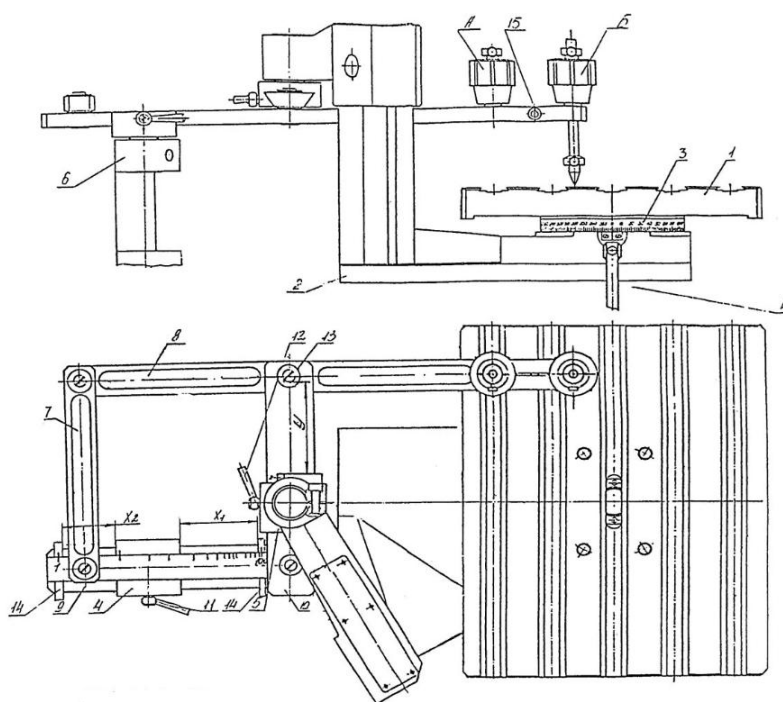


Рисунок 1.3 - Пантограф гравіювального верстата 6е463

Копіювальний щуп, що контактує із шаблоном, розміщується в цанговій втулці, яка дозволяє регулювати висоту щупа відносно плеча пантографа на діапазон до 15 мм. Завдяки пружині щуп постійно притискається до шаблону, забезпечуючи стабільний контакт, а максимальний хід щупа обмежено резиновим кільцем — він становить приблизно 4 мм. Після встановлення необхідного тиску щупа він фіксується гайкою, що дозволяє зменшити його коливання під час роботи.

Пантограф 6Е463 спроектований таким чином, щоб плечі важелів могли змінювати довжину або точку кріплення для встановлення різних масштабів копіювання. Каретки, що з'єднують плечі з корпусом шпинделя (або зі стійкою), можуть переміщуватися вздовж плечей та фіксуватися. Це дає операторам можливість гнучко налаштовувати масштаб, зберігаючи при цьому жорсткість конструкції і точність передачі руху. За допомогою такої конструкції можна отримати значну зону обслуговування навіть при не надто великих фізичних розмірах плечей пантографа.

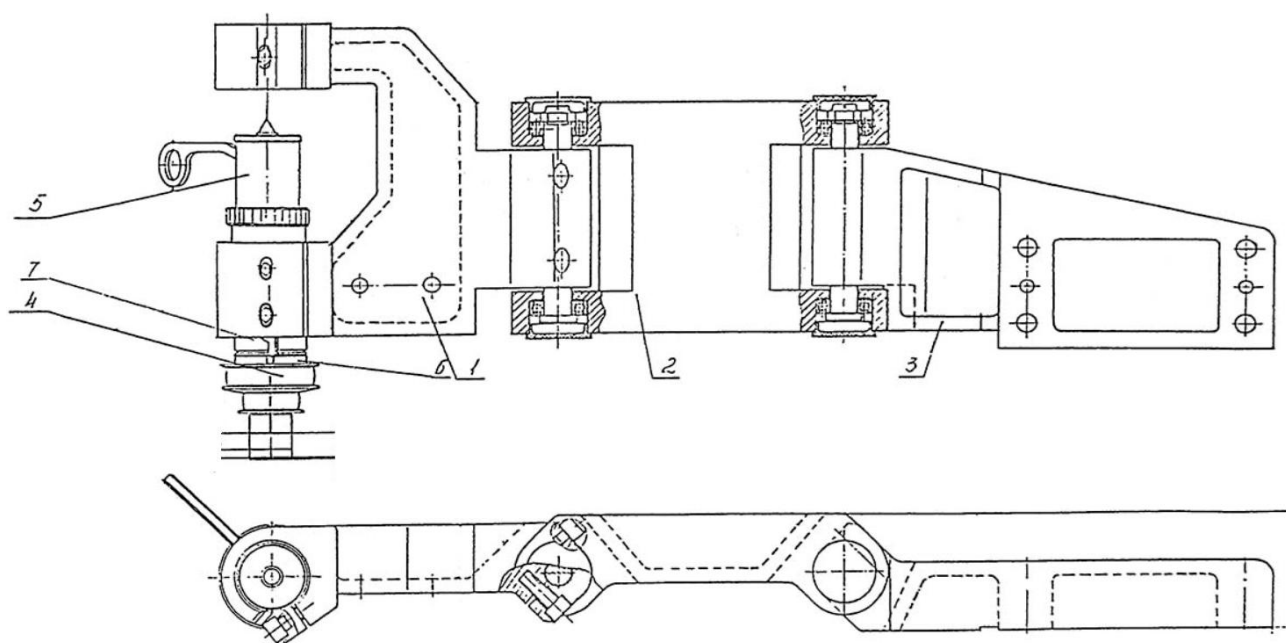


Рисунок 1.4 – Підвіс шпинделя

Пантограф також має з'єднання з корпусом шпинделя через високоточні підшипники, які мінімізують люфти при передачі руху. До того ж конструкція

передбачає шарнірне з'єднання через напрямні типу «ластівчин хвіст», що забезпечує необхідну точність і жорсткість, а також стабільність навіть за тривалого використання.

Шпиндельний підвіс 6E463 (рис1.4) також має складну шарнірну структуру. Він утворений трьома складовими: корпусом, важелем і кронштейном, які шарнірно з'єднані. У гільзі корпусу розміщено шпиндель, встановлений на радіально-упорних шарикопідшипниках, що дозволяє витримувати як радіальні, так і аксіальні навантаження. На нижній частині шпинделя знаходиться двоступенева шківова передача, яка приводиться в рух електродвигуном. Інструмент фіксується за допомогою цанги та гайки, а вгорі шпинделя є механізм зміни положення з лімбом глибини: оператор може швидко підвести або опустити інструмент за допомогою рукоятки, минаючи грубе позиціонування, а мікрометричне регулювання здійснюється поворотом іншої рукоятки. Нарешті, є конусний упор, ось якого збігається з віссю інструмента — це дає можливість працювати по контршаблону, що корисно для гравірування складних поверхонь, наприклад, циліндричних або сферичних.

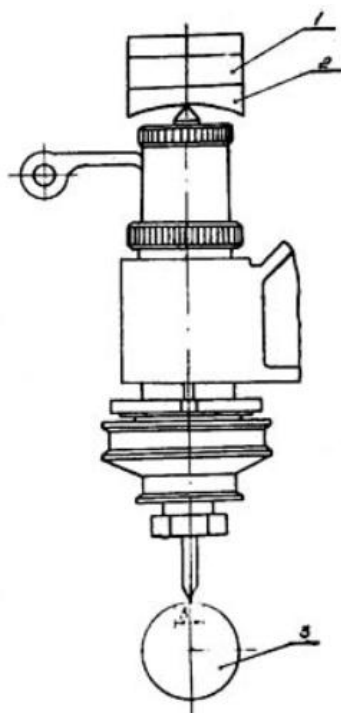


Рисунок 1.5 – Робота за контршаблоном

Особливою технологією є можливість обробки за контршаблоном (рис.1.5). Для цього над заготовкою встановлюється контршаблон, форма якого відповідає формі деталі — наприклад, сферичного або циліндричного поверхні. Контршаблон кріпиться до кронштейна підвіски шпинделя, а шаблон розміщується на столі копра. В результаті переміщення трейсеру по шаблону пантограф передає рух фрезі таким чином, що «трасуючий» інструмент повторює вигини контршаблону, дозволяючи гравірувати або фрезерувати контури на криволінійних поверхнях [5].

Рух шпинделя приводиться в дію електродвигуном, встановленим на кронштейні підвіски. Електродвигун передає обертання через багатоступінчастий шків, що дозволяє змінювати частоту обертання шпинделя відповідно до режиму обробки. За паспортом, частота обертання шпинделя у моделі 6E463 варіює в діапазоні від 1250 до 20000 об/хв при 13 швидкостях. Потужність приводу головного двигуна — приблизно 0,25 кВт.

Органи керування станком розташовані на передній панелі: маховики для переміщення столу в напрямках X, Y та Z, важелі фіксації консолі, регулювання масштабу пантографа, а також рукоятки, що відповідають за фіксацію кареток плечей пантографа. На панелі є кнопки «Пуск» і «Стоп», перемикач реверсу обертання шпинделя, вимикач місцевого освітлення та інші елементи безпеки. Також передбачена фіксація положень за допомогою ручних рукояток для кріплення столу копіра та столу виробу, зокрема через болти й затискні елементи.

При роботі зі складними лекалами або великими шаблонами оператор може вручну переводити каретку пантографа вздовж плечей для встановлення бажаного масштабу копіювання, після чого фіксувати конструкцію. Крім того, під час копіювальних або гравірувальних робіт оператор регулює положення трейсеру — висоту, силу натискання — щоб забезпечити стабільний контакт із шаблоном, з мінімізацією коливань або відскоків. Сам механічний обвід шаблону трейсером забезпечує форму обробки, а пантограф транслює це на інструмент без додаткового програмного або електронного втручання.

Масштаб копіювання в 6Е463 охоплює значний діапазон: від 1:1 — коли розміри копії повністю відповідають шаблону — до 1:100, що дозволяє значно зменшувати контур при копіюванні великих шаблонів на менші заготовки. Цей діапазон досягається за рахунок конструкції кареток пантографа та можливості їх фіксації в різних положеннях.

Щодо габаритів і маси верстата, згідно зі специфікаціями, довжина установки становить приблизно 1040 мм, ширина — 1000 мм, а висота — 1260 мм. Вага верстата — близько 250 кг, що відображає його компактність для копіювального гравірувального обладнання та одночасно солідну масу, достатню для забезпечення жорсткості.

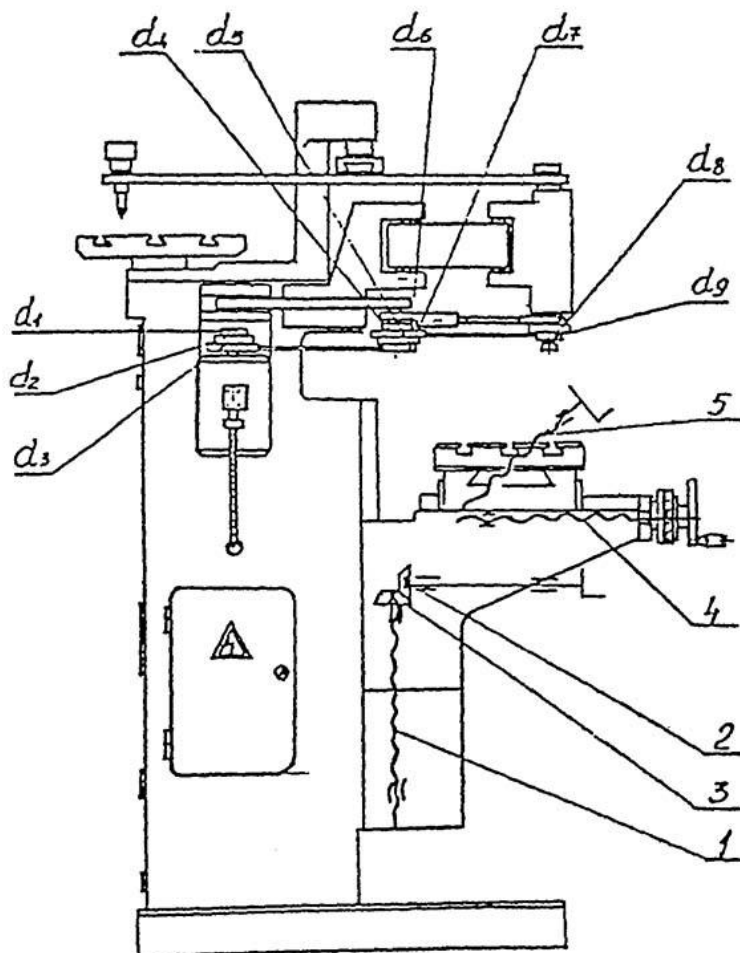


Рисунок 1.6 – Кінематична схема фрезерного верстату 6Е463

Кінематична схема 6Е463 (Рис1.6) побудована таким чином, що формотворчими рухами є не переміщення столів (X, Y, Z), а переміщення плечей

пантографа, тоді як пересування столу зазвичай використовується для налаштування вихідного положення заготовки або шаблону. Наприклад, оператор спочатку фіксує шаблон на столі копіра, потім виставляє масштаб, підлаштовує трейсер, підтягуючи або відпускаючи відповідні рукоятки, після чого починає копіювальну фазу: рух трейсеру по шаблону передає рух важелів, які переміщують фрезу по контуру заготовки [4].

Електрична схема верстату (рис. 1.7) також має свою специфіку: на верстаті передбачено введення трьох фаз живлення (наприклад, 380 В), система керування включає кнопкові пускачі, захист від перевантаження, а панель операторського управління оснащена вимикачами реверсу шпинделя, кнопками запуску і зупинки. Для регулювання швидкості шпинделя застосовується багатоступенева шківова передача, а також механічна зміна швидкостей через перемикання шківів — це дозволяє адаптувати частоту обертання до характеру оброблюваного матеріалу чи глибини фрезерування.

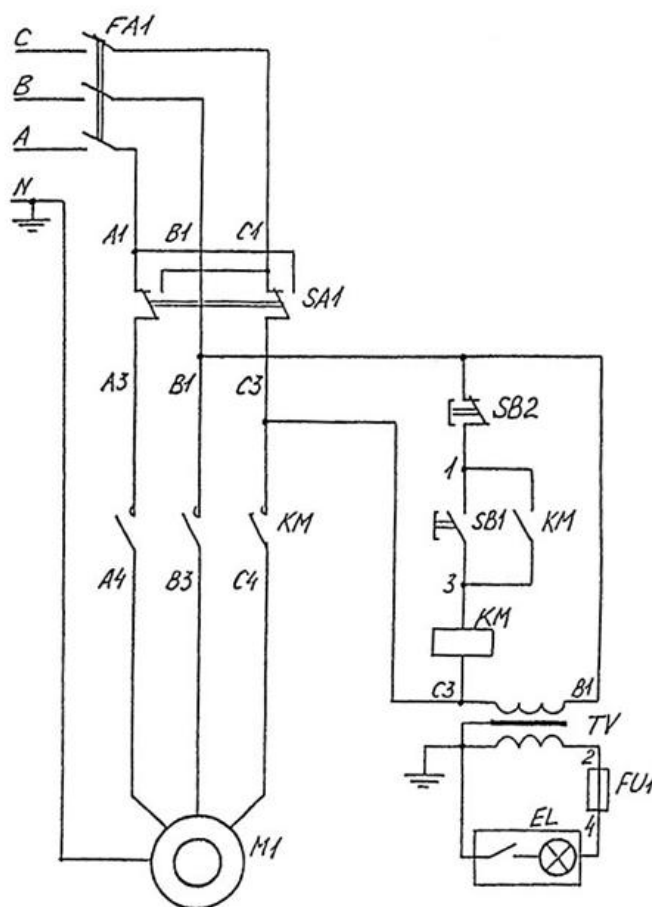


Рисунок 1.7 – Електрична схема фрезерного верстату 6Е463

Верстат 6E463 широко застосовується в копіювально-гравірувальних операціях: він ідеальний для нанесення надписів, малюнків або контурних форм по шаблонах (літери, шкали, панелі), а також для виготовлення невеликих прес-форм, матриць або лекал з пластику, гуми, металу. Завдяки конструкції, що допускає копіювання з дуже малим масштабом (до 1:100), він також підходить для гравірування дрібних контурів на мінімальних площах [5].

Недоліком такої конструкції є те, що весь рух копіювання залежить від кваліфікації оператора та стабільності контакту трейсеру із шаблоном — будь-яке неточне поводження або коливання можуть призвести до похибок у кінцевому контурі. Крім того, механічні шарніри пантографа, хоча і виконані з прецизійних підшипників, з часом піддаються зношенню, що може впливати на точність копіювання, особливо при використанні великих масштабів. Також великі значення масштабу (наприклад, 1:100) означають, що навіть незначні неточності встановлення кареток або щупа можуть сильно вплинути на результат.

Таким чином, верстат 6E463 є вдалим поєднанням механічної простоти, гнучкості в налаштуванні масштабів копіювання та конструктивної жорсткості. Саме ці особливості роблять його цінним у технологіях гравірування, лекалювання та контурного копіювання, а також мобільною платформою для подальшої модернізації: заміни механіки, впровадження автоматизованих приводів та систем керування, що може значно підвищити точність, стабільність і продуктивність цього класичного верстата.

1.3 Опис штатної системи керування

Фрезерний верстат 6E463 із пантографом у штатній конфігурації оснащений класичною електромеханічною системою керування, що забезпечує ручне управління основними рухами верстата, включаючи переміщення столу по осях X, Y, Z, обертання шпинделя та роботу копіювального механізму. Управління подачами здійснюється за допомогою маховиків, рукояток і кнопочних станцій, а

електроприводи активуються через магнітні пускачі та контактори. Така організація системи дозволяє оператору безпосередньо контролювати всі робочі вузли, забезпечуючи базову точність обробки, однак вимагає високої кваліфікації та постійної уваги для забезпечення стабільної роботи верстата.

Приводи верстата виконують критично важливу роль у забезпеченні синхронності рухів та точності позиціонування. Привід осі X відповідає за переміщення столу в горизонтальному напрямку та забезпечує рівномірну подачу заготовки під фрезу. Він включає асинхронний електродвигун, редуктор та механічну передачу, що передає обертальний рух на лінійний переміщувач столу. Привід осі Y переміщує стіл перпендикулярно осі X і побудований за схожим принципом із застосуванням окремого електродвигуна, редуктора та системи направляючих. Привід осі Z керує вертикальним переміщенням шпинделя або консолі, регулюючи глибину фрезерування. Його конструкція включає високоточний шарнірно-важільний механізм, що передає рух від електродвигуна на вертикальний вузол, забезпечуючи плавність переміщень і стабільність позиціонування [4-6].

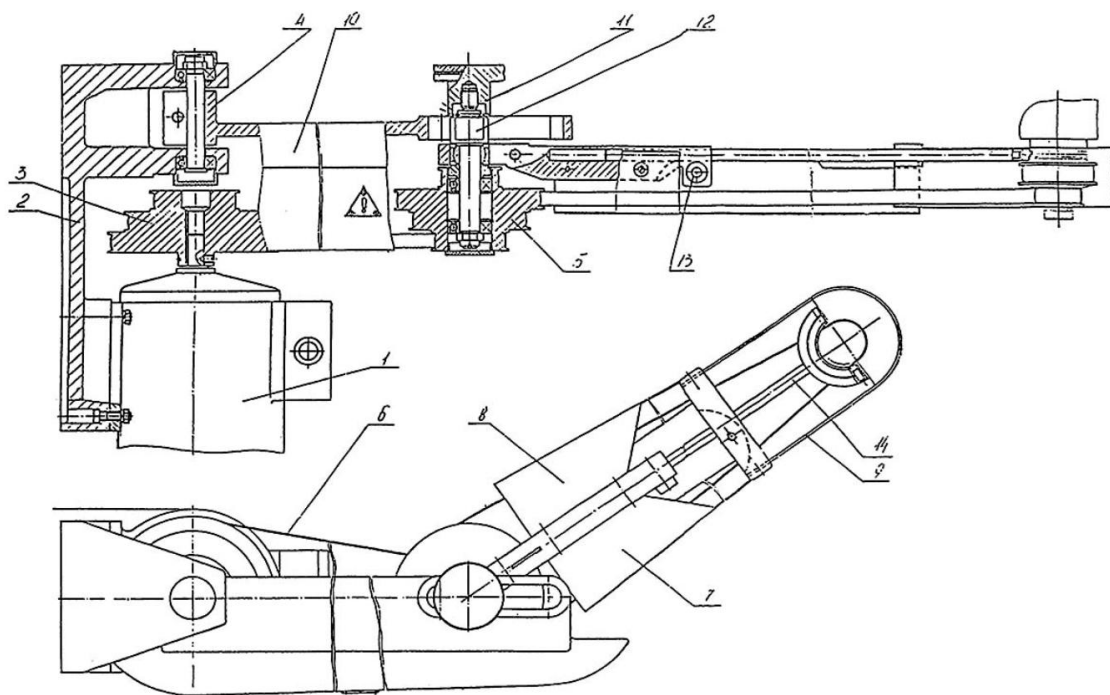


Рисунок 1.8 – Привод шпинделя

Шпиндель приводиться в рух окремим асинхронним електродвигуном (рис.1.8). Регулювання швидкості обертання здійснюється механічним способом через багатоступеневу коробку шківів або ремінну передачу. Ця система забезпечує кілька режимів обробки, дозволяючи адаптувати швидкість обертання фрези до властивостей оброблюваного матеріалу. Механічна зміна швидкостей, хоч і надійна, обмежує можливості оперативного переналаштування режимів обробки та автоматичного переходу між чорновими і чистовими проходами.

Копіювальний механізм верстата забезпечує перенесення профілю шаблону на оброблювану деталь у трьох координатах. Рух щупа по шаблону передається через систему важелів та шарнірів на фрезу, а масштаб копіювання регулюється вручну за допомогою рукояток і фіксуючих елементів. По осі X рух щупа передається через перший важіль на відповідний привід столу, забезпечуючи точне повторення горизонтальної траєкторії шаблону. По осі Y рух щупа передається через систему важелів, що змінюють напрямок подачі на стіл, дозволяючи виконувати складні криволінійні обробки. По осі Z рух щупа передається через вертикальний шарнір, регулюючи глибину фрезерування та забезпечуючи відповідність рельєфу заготовки формі шаблону.

Пантограф має комплексну шарнірно-важільну систему, де кожен рух у будь-якій площині впливає на переміщення інструмента. Точність передачі рухів забезпечується прецизійними підшипниками в кожному шарнірі та пружинними механізмами, що підтримують контакт щупа з шаблоном. Незважаючи на це, люфти у шарнірах, зношування підшипників і деформації важелів можуть викликати мікропохибки у передачі траєкторії, що особливо відчутно при дрібномасштабному копіюванні або при високих вимогах до точності.

Електрична схема штатної системи побудована на базових компонентах: магнітних пусках, контакторах, теплових реле та кнопочних панелях. Кожен привід має окрему лінію керування та захист від перевантаження, що забезпечує незалежність рухів і можливість зупинки в аварійних ситуаціях. Механічні і електричні блокування обмежують вихід вузлів за допустимі межі та захищають

оператора від небезпечних ситуацій. Проте такі засоби не дозволяють реалізувати автоматичний контроль точності або корекцію відхилень у реальному часі [2,7].

Недоліки штатної системи проявляються у кількох аспектах. По-перше, точність обробки значною мірою залежить від кваліфікації оператора та його здатності підтримувати стабільність руху щупа, правильно фіксувати масштаби та контролювати силу натиску. По-друге, механічне перемикання швидкостей шпинделя обмежує оперативність зміни режимів обробки та уповільнює технологічний процес. По-третє, відсутність зворотного зв'язку унеможливорює автоматичну корекцію рухів і повторення траєкторій, що обмежує стабільність обробки та її повторюваність у серійному виробництві.

Ручне керування не дозволяє автоматично змінювати масштаб копіювання під час роботи та адаптувати рухи до зношування інструменту або шаблону. Відсутність цифрового контролю ускладнює ведення технічної документації, аналіз похибок і інтеграцію верстата в сучасні виробничі процеси. Люфти у шарнірах і зношування механічних вузлів погіршують точність при високих навантаженнях або тривалому використанні, що вимагає постійної уваги та контролю з боку оператора.

Враховуючи всі ці обмеження, модернізація системи керування є необхідною. Впровадження програмованого логічного контролера дозволяє автоматизувати процеси зчитування положення вузлів, корекції рухів у реальному часі, електронного регулювання швидкості шпинделя, програмного задавання траєкторій копіювання та повторення операцій без участі оператора. Цифровий контроль забезпечує інтеграцію верстата у виробничі лінії, моніторинг стану вузлів, автоматичне документування траєкторій та підвищує якість обробки, усуваючи вплив людського фактора.

Штатна система керування верстатом 6E463 є надійною, проте застарілою. Вона добре підходить для виконання простих копіювальних операцій, проте не забезпечує високої точності, стабільності, автоматизації та інтеграції у сучасне виробництво. Модернізація через впровадження ПЛК є логічним та обґрунтованим кроком для підвищення продуктивності, точності та технологічного потенціалу

верстата, що дозволяє ефективно застосовувати його у сучасних умовах високоточного виробництва.

Фрезерний верстат 6E463, як і будь-який складний механічний агрегат, у процесі експлуатації стикається з низкою типових проблем, що виникають через зношування механічних вузлів та вплив зовнішніх факторів. Основними проблемами є поступове збільшення люфтів у шарнірах пантографа, стирання направляючих стола і консолі, а також ослаблення пружинних елементів, що підтримують контакт щупа з шаблоном. З часом це призводить до зниження точності передачі рухів і виникнення невеликих, але значущих відхилень у оброблюваній деталі.

Практичні приклади показують, що навіть незначні люфти в шарнірно-важільному механізмі пантографа можуть викликати похибки в межах 0,1–0,2 мм при дрібномасштабному копіюванні, що для точних деталей неприпустимо. Зношування направляючих столу і консолі призводить до нерівномірності подач, що може проявлятися у хвилястості поверхні або неузгодженості глибини фрезерування. При відсутності корекції таких похибок оператор змушений постійно компенсувати відхилення вручну, що підвищує час обробки і збільшує ризик дефектів.

Додатково важливим аспектом є безпека та наявність механічних обмежувачів руху. Верстат обладнаний кінцевими вимикачами, які зупиняють рух вузлів при досягненні критичних положень, а також механічними обмежувачами, що запобігають виходу столу чи консолі за допустимі межі. Ці засоби захисту зменшують ризик пошкодження деталі, інструмента та самого верстата, але не дозволяють автоматично контролювати точність обробки. Крім того, у разі швидкого переміщення вузлів або високого навантаження, зношування кінцевих вимикачів може призвести до запізнілої зупинки, що підкреслює необхідність регулярної діагностики та технічного обслуговування.

У підсумку, ці проблеми обґрунтовують потребу у модернізації системи керування. Автоматизація за допомогою ПЛК дозволяє не лише підвищити точність і повторюваність обробки, а й інтегрувати контроль стану вузлів у режимі

реального часу, виявляючи і коригуючи похибки, що виникають через зношування, а також забезпечує більш надійний і безпечний процес роботи верстата.

Висновки за розділом

У першому розділі було проведено детальне дослідження та аналіз технічних засобів керування фрезерними верстатами, зокрема верстатом 6E463 з пантографом. Було розглянуто історичний розвиток фрезерних верстатів із механічним копіювальним механізмом, особливості їх конструкції та принципи роботи основних вузлів. Зокрема, увага була зосереджена на структурі пантографа та його тривимірному копіювальному механізмі, електроприводах рухомих частин, механічних передачах та способах регулювання швидкостей.

Було встановлено, що штатна електромеханічна система керування забезпечує базову точність і функціональність верстата, проте має низку суттєвих обмежень. До основних недоліків належать залежність точності обробки від кваліфікації оператора, відсутність автоматичної корекції рухів, обмежена можливість оперативного регулювання швидкостей шпинделя та подач, вплив люфтів і зношування на повторюваність траєкторій, а також обмежена інтеграція верстата у сучасні автоматизовані виробничі процеси.

Аналіз типових проблем експлуатації показав, що без належної модернізації верстат не здатний забезпечити високу точність, стабільність і ефективність обробки серійних виробів. Виявлено, що зношування механічних вузлів, люфти в шарнірах пантографа та недосконалість кінцевих обмежувачів призводять до появи похибок у деталях і підвищення часу виробничого циклу.

Таким чином, проведене дослідження технічних характеристик верстата 6E463 та аналіз його штатної системи керування обґрунтовує необхідність удосконалення управління за допомогою сучасних цифрових засобів, таких як програмований логічний контролер. Впровадження ПЛК дозволить підвищити точність, стабільність і безпеку роботи верстата, автоматизувати процеси контролю положень вузлів і скоротити вплив людського фактору, що є критично важливим для сучасного високоточного виробництва.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Побудова структурно-логічної схеми магістерського дослідження

Метод (від грецького *methodos* – шлях до чого-небудь) – в найбільш загальному випадку означає засіб досягнення мети, спосіб дослідження явища, який визначає планомірний підхід до їх наукового пізнання та встановлення істини. Науковий метод – це спосіб пізнання явищ дійсності в їх взаємозв'язку та розвитку, спосіб досягнення поставленої мети і завдань дослідження і відповідає на запитання: «Як пізнавати?». Методика дослідження – це система правил використання методів, прийомів та способів для проведення будь-якого дослідження. Свідоме застосування науково обґрунтованих методів слід розглядати як найсуттєвішу умову отримання нових знань. Дослідник, який добре знає методи дослідження і можливості їх застосування, витрачає менше зусиль і працює успішніше, ніж той, хто у своєму дослідженні спирається лише на інтуїцію або діє за принципом «спроб і помилок». Звісно, що точні і правильні методи – не єдині компоненти, що забезпечують успішність наукового дослідження. Методи не можуть, наприклад, замінити творчу думку дослідника, його здібність аналізувати, робити висновки і передбачення. Але застосування правильних методів спрямовує хід думок дослідника, відкриває перед ним найкоротший шлях для досягнення мети і забезпечує таким чином можливість раціонально витрачати енергію і час науковця. Кожний метод наукового пізнання слід розглядати як систему регулятивних принципів практичної і теоретичної діяльності людини. Методів пізнання об'єктивної дійсності відомо дуже багато. Правильний вибір методів дослідження потребує знання їх класифікації.

Розрізняють методи теоретичних та емпіричних досліджень. Такий розподіл методів завжди умовний, оскільки з розвитком пізнання один науковий метод може переходити з однієї категорії в іншу.

Методи наукових досліджень теоретичного рівня. На теоретичному рівні дослідження одним з найпоширеніших наукових методів є абстрагування 26 (таблиця 2.1). В цілому дієслово «абстрагувати» означає відокремлювати в думках одні властивості, зв'язки та відношення явища або об'єкта від інших. Відповідно зміст даного методу полягає у відверненні від неістотних ознак предмета дослідження й одночасному виділенні тих, які мають найбільший інтерес. Використання методу абстрагування на початковому етапі дослідження дає змогу превентивно вирішити наукову проблему, акцентуючи увагу на її основних аспектах.

Таблиця 2.1 – Наукові методи теоретичних досліджень

Методи	Характеристики
Абстрагування	Уявне відвернення від неістотних, другорядних ознак явища або об'єкта, зв'язків і відношень між ними та виокремлення кількох сторін, які цікавлять дослідника
Аналіз	Метод пізнання, який дає змогу гіпотетично поділити явище або об'єкт на окремі складові частини та досліджувати їх відокремлено одна від одної
Синтез	Метод, який є результатом об'єднання окремих складових частин явища або об'єкта в єдине ціле, досліджуючи загальні ознаки і властивості
Моделювання	Опосередкований метод дослідження явища або об'єкта, який ґрунтується на застосуванні моделі як засобу дослідження, коли вивчити явище або об'єкт не можливо
Аксіоматичний метод	Метод побудови наукової теорії, за яким деякі твердження приймаються без доведень, а всі інші знання виводяться з них відповідно до певних логічних правил
Ідеалізація	Гіпотетичне конструювання явища або об'єкта, яких немає в дійсності або які за суб'єктивних причин практично нездійсненні

Методи	Характеристики
Формалізація	Метод вивчення явища або об'єкта через відображення їх структури в знаковій формі за допомогою штучних мов, наприклад, математики, фізики, хімії тощо
Дедукція	Умовивід, у якому висновок про той чи той елемент множини робиться на підставі знання про загальні властивості усієї множини
Індукція	Умовивід від часткового до загального, від окремих фактів до узагальнень, коли на основі знань про частини предметів певного класу робиться висновок про клас загалом

Вибір конкретних методів дослідження диктується характером фактичного матеріалу, умовами і метою конкретного дослідження.

В науковій сфері методи аналізу і синтезу зіставляються між собою.

Якщо вивчити явище або об'єкт складно та недоцільно, використовується метод моделювання. Незважаючи на те, що даний метод пов'язаний з ризиковістю, він дає змогу ґрунтовно дослідити закономірності виникнення й існування того чи іншого явища або об'єкта, реально оцінити їх взаємозалежність. При порівнянні альтернативних моделей кращою вважають ту з них, якій відповідає мінімальне значення середнього ризику. Величина похибки відображає залежність між предметом дослідження та впливом низки екзогенних чинників.

Емпіричні методи наукових досліджень

На емпіричному рівні використовується широкий спектр методів наукового дослідження, які можна об'єднати в наступну групу (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Емпіричні методи наукових досліджень

Методи	Характеристики
Вимірювання	Визначення кількісних характеристик явища або об'єкта за допомогою спеціальних технічних пристроїв та одиниць виміру

Методи	Характеристики
Порівняння	Процес зіставлення явища або об'єкта з метою з'ясування подібності та відмінності між ними, а також знаходження загального, що може бути властивим двом чи кільком явищам або об'єктам дослідження
Спостереження	Системне, цілеспрямоване, спеціально організоване візуальне сприймання явища або об'єкта, опосередковане раціональним знанням
Експеримент	Метод вивчення явища або об'єкта, коли дослідник активно та цілеспрямовано впливає на нього для створення штучних чи використання природних умов, необхідних для виявлення його ознак і властивостей

Найскладнішою є методика експериментальних досліджень, як лабораторних, так і польових.

Натомість на теоретичному рівні використовується пізнавальна діяльність, в якій структура реального експерименту відтворюється в уяві, тобто розумовий експеримент.

Модель (лат. *modus* — міра, франц. — *modele* — зразок) — штучно створений об'єкт у вигляді схеми, креслення, логіко-математичних знакових формул, фізичної конструкції й т.п., що аналогічний (подібний) досліджуваному об'єкту, процесу відображає й відтворює в більше простому, зменшеному виді структуру, властивості, взаємозв'язки й відносини між елементами досліджуваного об'єкта, процесу, безпосереднє вивчення якого зв'язано якими-небудь труднощами, більшими витратами коштів або просто недоступно, і тим самим полегшує процес одержання інформації про предмет, що цікавить нас, явищі, процеси

Пізніше були осмислені модельні властивості креслень, малюнків, карт — реальних об'єктів штучного походження, які дозволили втілити абстракцію більш високого рівня. Тобто наступний крок заключався в визнанні того, що моделями

можуть служити не тільки реальні об'єкти, а і абстрактні, ідеальні побудови, типовим прикладом яких є математичні моделі.

Коротко кажучи – Модель це системне відображення оригіналу.

Термін "модель" використовується в різних областях діяльності людини і як правило означає спрощену картину реальності або прообраз майбутнього.

У дослідженнях модель заміняє оригінал так, що її вивчення дає нові знання про об'єкт дослідження. Термін "модель" в науці являє собою штучно створену систему, яка відображає або здатна відтворити основні сторони реальної системи, яка називається оригіналом. Моделювання – це дослідження оригіналу не безпосередньо, а непрямим шляхом з допомогою штучно побудованої системи, яка називається моделлю. Моделювання включає процес побудови, вивчення та примінення моделей.

Виникає запитання : для чого необхідне моделювання , у яких випадках необхідно розробляти модель, а коли проводити пряме дослідження оригіналу? При цьому слід відмітити, що оригінал може бути недоступним для безпосереднього дослідження з причини відсутності часу і засобів, або відсутності самого оригіналу (розробка проекту, тощо). Крім того, модель завжди простіша оригіналу і дослідження на ній обходиться дешевше і потребує менше часу. Модель дозволяє оперативно міняти умови досліду (що не завжди можливо із оригіналом), дозволяє багаторазово повторити експеримент до пізнання суті.

При цьому не передбачається повна ідентичність оригіналу оскільки в такому разі втрачаються переваги моделі і всяка суть моделювання, та і вона перестає бути моделлю, а це вже буде копія-двійник, копія-дублер. Модель повинна замінити оригінал лише в принципі, по суті.

В моделі оригінал можна уявити в чистому вигляді без сторонніх впливів і непотрібних деталей.

Серед відомих методів дослідження складних електромеханічних систем можна виділити фізичне, імітаційне, аналогове та математичне моделювання.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, яка відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні та функціональні

характеристики та властивості оригіналу (але не обов'язково всі властивості) та має великі можливості з визначення різноманітних якостей електромеханічних систем ті їх елементів. Він базується на трьох теоремах аналізу подібності.

Практично необмежені можливості з виявлення ефективного функціонування складної електромеханічної системи має метод математичного моделювання. Він ґрунтується на здатності математично описувати рівняннями різні за природою явища (процеси) та виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

Аналогове моделювання базується на однаковому для моделі та натури математичному описі та використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи по її елементам. При цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає певний еквівалент. У якості моделей використовуються електричні кола, складені з пасивних та активних елементів.

Імітаційне моделювання використовується частіше за всього при дослідженні складних електромеханічних систем та представляють собою процес формування моделі реальної системи та проведення над нею численних експериментів з метою виявлення шляхів її створення, вдосконалення та (або) ефективного використання.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число факторів, завжди потребують деяких припущень та спрощень. Проте вони більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Статистичні моделі у порівнянні з аналітичними більш точні, але громіздкі та погано доступні для огляду.

При математичному моделюванні взаємозв'язки і закономірності оригіналу відображаються в математичній формі.

Моделювання починається із всестороннього вивчення об'єкту дослідження і постановки задач (проблеми). Проблема і задачі повинні бути чітко сформульовані. Далі слід знайти в реальній формі чи розробити модель оригіналу, яка б відображала чи могла відобразити основні сторони оригіналу.

По розробленій моделі проводять власне експеримент. Змінюють в певних межах вхідні параметри і досліджують вихідні. В результаті таких експериментів перевіряють модель на адекватність відображення оригіналу, отримують нові дані про оригінал, визначають числові параметри позитивних і негативних змін.

Комп'ютерна модель (або чисельна) – це комп'ютерна програма, яка реалізує абстрактну модель деякої системи. Комп'ютерні моделі використовуються для отримання нових знань про об'єкт, що моделюється або для приблизної оцінки поведінки математичних систем, які досить складні для аналітичного дослідження. Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіші та їх зручніше досліджувати в силу можливості проводити обчислювальні експерименти в тих випадках, коли реальні експерименти немає можливості проводити через фінансові труднощі або фізичні перешкоди. Для підтримки математичного моделювання розроблені системи комп'ютерної математики, наприклад, *Maple*, *Mathematica*, *Mathcad*, *MATLAB*, *VisSim* та інші. В даній роботі використовується програма *Simulink* пакету *MATLAB*.

2.2 Структурно-логічна схема магістерського дослідження

Методологія - це система базисних принципів, методів, методик, способів і засобів їх реалізації в організації та побудові науково-практичної діяльності. Вона включає в себе методи теоретичного та емпіричного пізнання і являє собою алгоритм пошуку і досягнення мети.

Основне призначення методики дослідження полягає у тому, щоб на основі відповідних принципів (вимог, умов, обмежень тощо) забезпечити успішне вирішення визначених мети і завдань наукового дослідження.

Структурно-логічна схема є однією з форм планування роботи і візуалізації процесу, яка дозволяє з одного боку описувати процедуру (алгоритм) дослідження і досягнення мети тобто сформулювати робочу гіпотезу дослідження, а з другого – установити логічну послідовність виконання структурних розділів і підрозділів магістерської роботи.

Спочатку вибирається тема дослідження та обґрунтовується її актуальність та складається індивідуальний календарний план роботи.

Ведеться пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії.

Розробляється перший варіант теоретичної частини:

- постановка мети і конкретних завдань дослідження;
- визначення об'єкту й предмета дослідження;
- вибір методів (методики) проведення дослідження.

Виконується опис процесу дослідження згідно з обраним методом. Моделювання процесів у електроприводі гвинтового конвеєра проводиться шляхом математичного моделювання з використанням пакету Simulink програми MATLAB.

Наводиться інтерпретація отриманих результатів дослідження.

На підставі виконаних розрахунків та отриманих характеристик проводиться узагальнення отриманих теоретичних результатів.

На заключному етапі роботи проводиться розробка заходів охорони праці, впровадження результатів магістерського дослідження у навчальний процес.

2.3 Вибір методу вирішення поставленої задачі дослідження

Дана магістерська робота не передбачає проведення експериментальних досліджень, має теоретичний характер, тому основним методом для відображення отриманих результатів є моделювання.

Моделювання як метод наукового пізнання виникло в зв'язку з необхідністю вирішення завдань, які з тих чи інших причин не можуть бути вирішені безпосередньо. Вони виникають у випадках, коли об'єкт або недосяжний для дослідника, або він ще не існує і потрібно обрати оптимальний варіант його створення, або дослідження реального об'єкта вимагає багато часу та економічно не вигідне тощо. При моделюванні використовується принцип аналогії, ґрунтуючись на якому в процесі наукового дослідження висуваються гіпотези, тобто передбачення, що будуються на невеликій кількості дослідних даних,

спостережень, інтуїтивних припущень, перевірка правильності яких здійснюється шляхом експерименту.

Модель будується для того, щоб відобразити характеристики об'єкта (елементи, взаємозв'язки, структурні та функціональні властивості), суттєві з точки зору мети дослідження. Отже, моделювання пов'язане зі спрощенням, огрубленням прототипу, абстрагуванням від ряду його властивостей, ознак, сторін.

Процес дослідження реальних систем, що охоплює побудову моделі, дослідження її властивостей і перенесення одержаних відомостей на реальну систему, називають моделюванням.

Моделі поділяються на такі види:

- інтуїтивні (виражені на папері);
- фізичні (макети, муляжі, що дозволяють наочно ілюструвати, саме ті процеси, які мають місце у природі. За допомогою таких моделей можна вивчати вплив окремих параметрів на певний фізичний процес);
- математичні (дозволяють кількісно досліджувати явища, які важко піддаються вивченню за допомогою фізичних моделей);
- знакові (вираженні мовою, алгоритмами, графічно, математично);
- функціональні (описують залежності між входом і виходом системи);
- структурні (описують оргструктури систем).

Послідовність робіт при моделюванні виробничої системи:

- дослідження модельованої системи і постановка задачі - вивчення літературних джерел, проведення досліджень, тощо;
- формалізація задачі - виявлення особливостей системи, виділення головного, основного. На цьому етапі визначають, які параметри системи, яку ми моделюємо необхідно відобразити в моделі;
- розробка математичної моделі задачі і її запис в структурній формі.

Розробити математичну модель задачі це означає побудувати спеціальну таблицю чи схему, у якій усі економічні, технологічні та інші виробничі умови і вимоги виражені у вигляді нерівностей і рівнянь і об'єднані цільовою функцією. Математична модель може бути подана у структурній, загальній символній чи

числовій формі. Послідовність розробки моделі може бути різною, але зручніше спочатку скласти систему змінних величин, записати систему обмежень, а потім цільову функцію. В моделі виділяють змінні величини, константи і коефіцієнти.

Змінні в моделі відображають невідомі величини:

- аналіз кількісних залежностей параметрів задачі;
- збір інформації і її обробка;
- побудова числової моделі;
- вибір математичного методу вирішення задачі;
- вирішення задачі на ЕОМ;
- аналіз результатів вирішення і коригування моделі;
- вирішення задачі на ЕОМ по скоригованій моделі.

Головними рівнями дослідження та моделювання систем є мікро- та макрорівень. Мікрорівневе моделювання системи пов'язане з детальним описом кожного компонента системи, дослідженням її структури, функцій, взаємозв'язків, тощо. Практична реалізація найважливішого етапу мікромоделювання – виявлення елементів системи та взаємозв'язків між ними – пов'язана з необхідністю подолання суперечності між бажанням повного дослідження кожної з підсистем та елементів системи, реальною можливістю дослідити при цьому структуру системи загалом і принципи її функціонування.

Макрорівневе моделювання полягає в ігноруванні детальної структури системи та вивченні лише загальної поведінки системи як єдиного цілого. У процесі дослідження реальних систем і побудови їх моделей використовуються різні методи моделювання, що залежать від характеристик об'єкта, рівня знань про нього, мети дослідження та вимог до моделі.

Аксіоматичне моделювання полягає у відповідній інтерпретації та переведенні змістовного опису системи на мову чітких математичних термінів і відношень, у процесі чого усуваються неясності, суперечності, неповнота або надлишковість, які властиві вербальному описові системи.

Емпірико-статистичне моделювання використовує широко відомий кібернетичний принцип “чорної скрині”, що не дозволяє отримати модуль

структури системи, причинно-наслідкових зв'язків і механізмів її функціонування. В результаті моделювання отримують моделі типу “вхід - вихід”, які базуються на теоретичних гіпотезах про форми взаємозв'язку між входами і виходами системи.

Оптимізаційне моделювання передбачає включення у модель як взаємозв'язків між змінними та параметрами, так і критерії якості функціонування системи. Імітаційні моделі складних систем надзвичайно поширені внаслідок своєї універсальності, можливості проведення чисельних експериментів, передбачення різноманітних змін.

За мірою повноти опису моделювання поділяють на повне, неповне та наближене. Повне моделювання передбачає побудову моделі, адекватної об'єкту дослідження у просторі та часі. Для неповного моделювання ця адекватність не зберігається. При наближеному моделюванні беруться до уваги лише найважливіші аспекти системи.

Дослідження математичної моделі дає змогу отримати характеристики реального об'єкта чи системи. Вигляд математичної моделі залежить як від природи системи, так і від завдань дослідження.

Математична модель системи містить, як правило, опис множини можливих станів системи та закон переходу з одного стану в інший. Математичне моделювання охоплює імітаційне, інформаційне, структурне, ситуаційне тощо.

Розрахунок задач магістерського дослідження проводиться за допомогою електронної обчислювальної техніки за допомогою програми Mathcad. На базі складених диференціальних рівнянь проводиться математичне моделювання системи керування електропривода. За допомогою програми Simulink досліджуються перехідні характеристики системи при зміні задаючих параметрів.

Слід зазначити, що метод моделювання – вивчення явищ за допомогою моделей – сьогодні має особливе значення для вирішення складних фізичних завдань, чому значною мірою сприяє зростанню продуктивності комп'ютерної техніки. Саме тому в цьому магістерському дослідженні як основа використаний метод моделювання.

РОЗДІЛ 3

АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА

3.1 Аналіз архітектури та функцій ПЛК для задач верстатного керування

Програмовані логічні контролери (рис. 3.1) на сьогодні є основною апаратною платформою для реалізації функцій керування промисловими технологічними процесами, у тому числі для забезпечення автоматичного керування металорізальними верстатами різних типів [9,10]. Їх поява стала важливим етапом розвитку автоматизації, оскільки дозволила відмовитися від жорстко запрограмованої релейно-контакторної логіки, яка була громіздкою, мало гнучкою й значно ускладнювала внесення будь-яких змін у структуру керування. Завдяки ПЛК стало можливим створення універсальних, програмно переналаштовуваних систем, здатних забезпечувати високу точність, швидкодію та надійність роботи обладнання. Саме тому контролери поступово витіснили традиційні схеми керування та стали промисловим стандартом у верстатобудуванні та машинобудуванні [15,16].



Рисунок 3.1 – Програмований логічний контролер

Архітектура програмованого логічного контролера (рис. 3.2) формувалася з урахуванням потреб промисловості, зокрема необхідності забезпечення стійкості до електромагнітних завад, здатності працювати в умовах підвищеної вібрації, змін температури та роботи у режимі реального часу [11]. Основою ПЛК є центральний процесорний модуль, який виконує програму користувача та координує роботу всіх підключених периферійних пристроїв. Процесорний модуль поєднує обчислювальні ресурси, оперативну пам'ять, в якій зберігається поточний стан системи, та постійну пам'ять, де міститься програма керування. Завдяки циклічному принципу роботи контролер постійно зчитує інформацію з входів, обробляє її відповідно до алгоритму керування і передає сформовані сигнали на виконавчі механізми. Такий підхід забезпечує передбачувану реакцію системи та дозволяє досягати синхронності в роботі різних технологічних вузлів верстата.

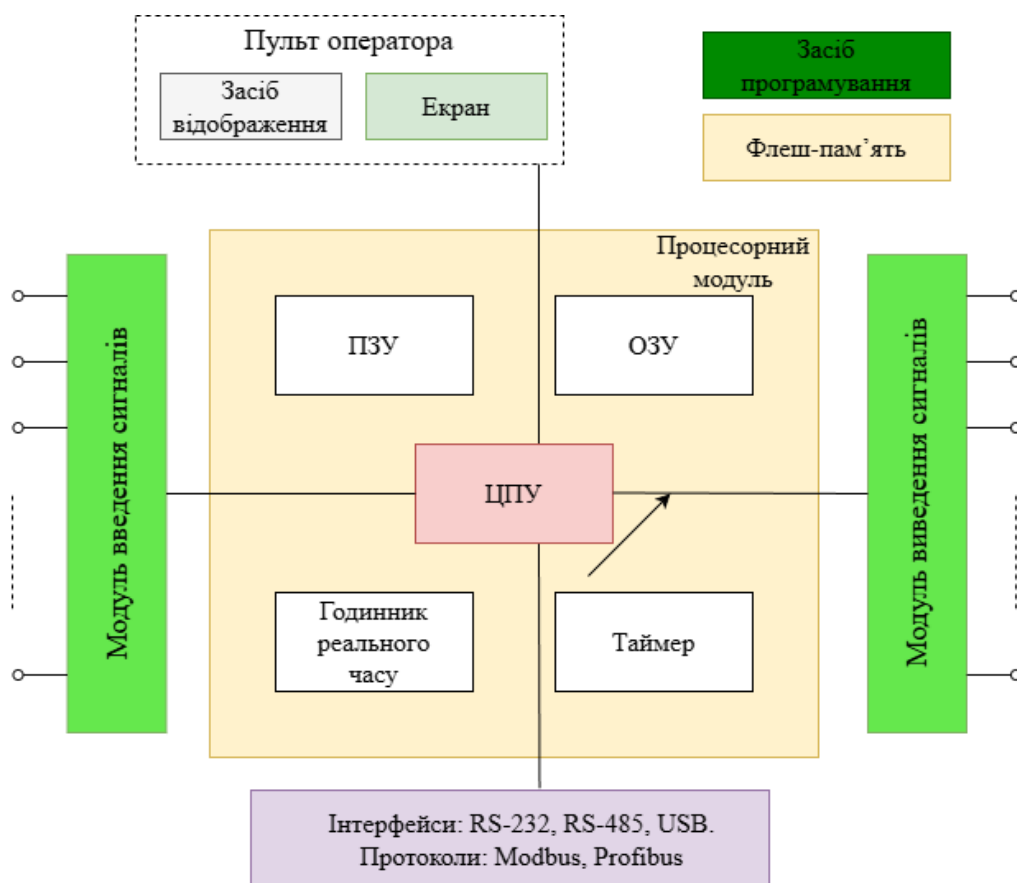


Рисунок 3.2 – Типова архітектура програмованого логічного контролера

Надзвичайно важливим елементом архітектури ПЛК є модулі введення та виведення сигналів, які забезпечують зв'язок між цифровим середовищем контролера та фізичними параметрами реального обладнання. Вхідні канали приймають інформацію від різноманітних датчиків, кінцевих вимикачів, індуктивних та оптичних сенсорів положення, а також від аналогових перетворювачів, що вимірюють температуру, тиск, струм, положення тощо. Вихідні канали, у свою чергу, формують сигнали керування електромагнітними клапанами, двигунами подачі, реле й пускачами, а також пристроями регулювання швидкості та положення. Залежно від застосування контролер може мати вбудовані входи-виходи, або ж система будується на модульному принципі, коли користувач самостійно добирає необхідну конфігурацію, додаючи або змінюючи модулі. Модульність є однією з ключових переваг ПЛК, оскільки дозволяє адаптувати його під специфічні потреби конкретного верстата, не змінюючи базову апаратну платформу [9,11].

Окрему роль у сучасних контролерах відіграють комунікаційні інтерфейси. Сучасне верстатне обладнання дедалі частіше включає у свою структуру частотні перетворювачі, серводрайвери, енкодери, панелі оператора та інші інтелектуальні пристрої, робота яких потребує швидкого та надійного обміну інформацією. Саме тому ПЛК підтримують широке коло промислових протоколів, таких як Modbus, CANopen, PROFINET, EtherCAT та інші [13,14]. Наявність комунікаційних функцій дає змогу інтегрувати ПЛК у складні виробничі комплекси, об'єднувати декілька контролерів у єдину систему, а також організовувати дистанційний моніторинг і діагностику стану обладнання. У верстатобудуванні це дозволяє забезпечити узгоджену роботу приводів подачі, шпиндельних вузлів, систем мастила, охолодження та безпеки.

Функціональні можливості сучасних ПЛК значно перевищують рівень класичних логічних пристроїв. Вони здатні обробляти як дискретні, так і аналогові сигнали, реалізовувати циклічні та послідовні алгоритми, виконувати операції математичної обробки та логічного аналізу. Особливо важливою у задачах верстатного керування є підтримка функцій високошвидкісного лічення імпульсів

та формування вихідних сигналів високої частоти, які застосовуються для роботи з енкадерами та точного позиціювання механізмів. Завдяки цьому ПЛК може керувати рухомими вузлами з високою точністю, забезпечуючи рівномірність подачі інструмента та відповідність заданим траєкторіям обробки.

Суттєвою характеристикою є наявність у багатьох контролерів вбудованих ПІД-регуляторів, що дозволяють здійснювати точне регулювання параметрів технологічного процесу. У верстатах такі регулятори застосовуються, наприклад, для стабілізації швидкості шпинделя, контролю температури мастильно-охолоджувальної рідини, підтримки рівномірності навантаження на двигун подачі або забезпечення точної роботи сервоприводів. Вбудовані алгоритми регулювання, які працюють у режимі реального часу, значно підвищують точність обробки та зменшують імовірність виникнення помилок або відхилень від технологічних параметрів.

Важливим аспектом, який робить ПЛК незамінними у керуванні верстатами, є їх здатність до діагностики та самоконтролю. Більшість контролерів оснащені системами моніторингу стану входів і виходів, контролю правильності підключення обладнання, виявлення обривів ланцюгів, коротких замикань або відмови датчиків. Це дозволяє вчасно фіксувати несправності, не допускаючи аварійних ситуацій, які можуть призвести до пошкодження механізмів або заготовки. Наявність журналів помилок і систем оповіщення оператора робить ПЛК важливим інструментом підвищення надійності роботи верстатів та полегшує процес технічного обслуговування [15].

Значну роль відіграє і те, що сучасні контролери підтримують різні мови програмування відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 61131-3 [12]. До таких мов належать релейні діаграми, функціональні блокові схеми, структурований текст, покрокові діаграми та інші. Гнучкість у програмуванні дозволяє адаптувати систему під специфіку конкретного технологічного процесу, а інженерам — обирати найбільш зручну форму представлення алгоритму. Для задач верстатного керування особливо зручно використовувати покрокові схеми, які дозволяють точно описати послідовність операцій, та функціональні блоки, що забезпечують

роботу з аналоговими сигналами або реалізацію складніших алгоритмів регулювання.

У контексті промислової автоматизації ПЛК також характеризуються високою надійністю та довговічністю. На відміну від персональних комп'ютерів або мікроконтролерних плат загального призначення, програмовані логічні контролери спеціально створювалися для роботи в умовах промислових підприємств, що передбачає здатність витримувати тривалі навантаження та роботу в агресивному середовищі. ПЛК мають захищені корпуси, фільтрацію живлення, апаратну стабілізацію роботи процесора та систему захисту від програмних збоїв. Усі ці характеристики є критично важливими у верстатобудуванні, де навіть короткочасна зупинка може призвести до втрати дорогої заготовки або пошкодження інструмента.

Суттєвою перевагою ПЛК є їх масштабованість та універсальність. Завдяки широкому спектру доступних моделей — від компактних контролерів для простих систем до потужних модульних рішень для складних технологічних комплексів — інженер може підібрати оптимальний варіант під конкретне завдання. При цьому структура керування залишається зрозумілою, а програма може бути перенесена з одного контролера на інший із мінімальними змінами. Для верстатів це означає можливість модернізації застарілого обладнання без повного переобладнання системи керування.

Окрему увагу слід приділити специфічним вимогам, які висуваються до ПЛК у задачах верстатного керування. Серед них — необхідність забезпечення високої точності позиціювання, синхронізації кількох приводів, швидкої реакції на виникнення аварійних ситуацій, стабільності виконання циклів обробки та можливості роботи у режимі реального часу. Контролери повинні мати достатню кількість високошвидкісних входів і виходів, підтримувати роботу з імпульсними датчиками та забезпечувати мінімальний час виконання програми. Усі ці вимоги визначають набір функцій, які ПЛК мають реалізовувати, і пояснюють, чому такі пристрої стали стандартом при модернізації металорізальних верстатів.

Таким чином, програмовані логічні контролери є комплексними системами, які поєднують апаратну надійність, функціональну гнучкість і високий рівень адаптивності до різних технологічних процесів. Їх архітектура дозволяє реалізувати широкий спектр задач — від простого дискретного керування до координації складних мультиосьових систем. Саме завдяки цьому ПЛК стали універсальним інструментом для створення сучасних систем керування верстатним обладнанням, що потребує поєднання точності, продуктивності та високого рівня безпеки.

Важливою рисою розвитку ПЛК у контексті верстатного керування є еволюція їх продуктивності та інтелектуальних можливостей. За останні десятиліття контролери пройшли шлях від простих пристроїв, що виконували обмежений набір логічних операцій, до високопродуктивних систем, здатних працювати із багатовимірними даними, підтримувати алгоритми предиктивного керування та взаємодіяти з мережевими сервісами верхнього рівня. Збільшення обчислювальної потужності та використання швидкісних шин даних дозволили суттєво розширити сферу застосування ПЛК, зробивши їх придатними для керування складними верстатами, які вимагають точного синхронізованого руху декількох приводів одночасно [14].

Поступова інтеграція ПЛК у концепцію «цифрового виробництва» також вплинула на функціональність сучасних контролерів. Завдяки наявності вбудованих інтерфейсів Ethernet та підтримці протоколів обміну у реальному часі контролери здатні здійснювати обмін даними не лише з локальними пристроями, але й із серверними системами, програмами моніторингу та діагностики, а також із хмарними платформами. У верстатобудуванні це означає можливість ведення статистики роботи обладнання, аналізу навантаження на вузли та прогнозування можливих відмов на основі накопиченої інформації. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність планового технічного обслуговування, зменшити кількість аварійних зупинок та оптимізувати виробничі процеси.

Особливу увагу слід приділити роботі ПЛК із приводами, оскільки саме керування рухом є ключовим елементом функціонування більшості верстатів. Для

досягнення високої точності позиціювання сучасні контролери використовують спеціалізовані функціональні блоки, які забезпечують формування траєкторій руху, плавний розгін і гальмування, компенсацію люфтів механічних вузлів та утримання заданої швидкості або прискорення. У низці моделей передбачені апаратні інтерфейси для підключення серводрайверів і можливість прямої роботи з енкодерами, що дозволяє реалізувати замкнені системи керування рухом без залучення зовнішніх контролерів. Інтеграція функцій motion control у ПЛК значно спростила побудову систем керування верстатами та підвищила їх точність.

У різних галузях промисловості ПЛК використовують різні алгоритми сканування програми, проте для верстатного обладнання критично важливою є здатність виконувати обчислення з мінімально можливою затримкою. Час одного циклу повинен бути стабільним і передбачуваним, оскільки будь-яка нерівномірність може викликати похибки у роботі приводу або порушення технологічного процесу. У відповідь на ці вимоги виробники контролерів впровадили різні механізми оптимізації виконання коду, включаючи пріоритетні переривання, виділені високошвидкісні канали обробки сигналів та паралельні процесорні ядра. Для верстатів ці особливості є надзвичайно важливими, оскільки дозволяють забезпечити стабільність траєкторій різання та точність виготовлення деталей.

Ще одним напрямом розвитку ПЛК стало вдосконалення засобів програмування. Якщо раніше контролери мали обмежений набір інструментів для створення алгоритмів, то сьогодні програмні середовища дозволяють інженерам розробляти складні структури керування, моделювати їх роботу, проводити тестування без реального підключення до обладнання та завантажувати програму дистанційно. Можливість симуляції роботи верстата у програмному середовищі значно спрощує процес налагодження, оскільки дозволяє виявити помилки ще до запуску обладнання. Крім того, програмна діагностика дає змогу аналізувати часові діаграми роботи, виявляти затримки у виконанні програми та оптимізувати алгоритм керування під специфіку конкретного обладнання [13].

Надійність ПЛК у промислових умовах також забезпечується наявністю спеціальних механізмів захисту. Контролери мають апаратні засоби запобігання некоректній роботі, такі як системи контролю живлення, елементи захисту від електромагнітних імпульсів, схеми запобігання зависанню процесора, а також резервні елементи для збереження критичних даних. Такі особливості є важливими у конструкції верстатів, оскільки обладнання часто працює у середовищі, де присутні значні струмові навантаження, електричні завади від частотних перетворювачів або електродвигунів великої потужності. Використання ПЛК дозволяє забезпечити стабільність функціонування системи незалежно від умов експлуатації.

Сучасні контролери також дозволяють інтегрувати функції безпеки, такі як контроль зупинки приводу, моніторинг стану огорожень, контроль аварійних кнопок, перевірка замків та блокувань. У більшості моделей реалізована підтримка спеціальних стандартів безпеки, що дозволяє вбудовувати їх у системи, де необхідний високий рівень надійності. Для верстатів ці функції є критично важливими, оскільки забезпечують захист оператора, зменшують імовірність пошкодження обладнання та гарантують безпечне виконання технологічних операцій.

Окремо варто відзначити можливість використання ПЛК у поєднанні з панелями оператора (HMI). Така інтеграція дозволяє створити зручний інтерфейс, за допомогою якого оператор може змінювати параметри роботи верстата, запускати та зупиняти цикл обробки, переглядати повідомлення про помилки, контролювати стан системи та виконувати калібрування обладнання. Панелі оператора значно спрощують експлуатацію верстатів, оскільки дозволяють використовувати наочні графічні елементи для відображення даних, діагностичних повідомлень та налаштувань. У поєднанні з ПЛК це створює повноцінну систему керування, що відповідає сучасним вимогам інтерфейсу людина–машина.

Додатковою перевагою програмованих логічних контролерів є можливість масштабування системи в процесі експлуатації. Завдяки модульному принципу побудови ПЛК дозволяє розширювати кількість входів і виходів, додавати нові

модулі зв'язку, виконувати модернізацію алгоритму або замінювати окремі компоненти без необхідності повної реконструкції системи керування. Це дає змогу підприємству поступово оновлювати парк обладнання, адаптувати його під нові технологічні процеси та зменшувати витрати на модернізацію. У випадку з верстатами така гнучкість особливо цінна, оскільки дозволяє інтегрувати нові механізми, змінювати структуру подачі або додавати функції автоматичного контролю якості обробки.

Ще однією важливою властивістю ПЛК є їх універсальність щодо інтеграції з різними типами виконавчих механізмів. Контролери можуть працювати із гідравлічними, пневматичними та електромеханічними системами, що дозволяє використовувати їх у широкому спектрі верстатного обладнання. Залежно від вимог технологічного процесу ПЛК може забезпечувати як просте ввімкнення або вимкнення механізмів, так і керування складними приводами із закритим контуром регулювання. У верстатних системах це забезпечує можливість точного керування рухом столу, шпинделя, подач, інструментальних механізмів та інших вузлів, що визначають якість виготовленої продукції [10].

Плазма розвитку цифрових технологій призвела до того, що контролери усе частіше використовуються як елемент інтегрованих виробничих систем. Завдяки підтримці обміну даними з серверними платформами, базами даних та системами автоматизованого управління виробництвом ПЛК стали невід'ємною частиною концепції «розумної фабрики». У таких умовах верстат не є автономним робочим місцем, а стає елементом єдиного інформаційного середовища, де всі пристрої взаємодіють між собою та приймають оптимальні рішення на основі даних. Це суттєво підвищує ефективність виробництва, скорочує час простою обладнання та забезпечує точне дотримання технологічних режимів.

У підсумку можна зазначити, що розглянуті особливості архітектури та функціональних можливостей програмованих логічних контролерів визначають їхню ключову роль у сучасних системах керування верстатами. Поєднання високої продуктивності, гнучкості налаштування, надійності та здатності працювати у реальному часі робить ПЛК універсальним рішенням для модернізації та

автоматизації верстатного обладнання. Завдяки широкому спектру підтримуваних функцій контролери дають змогу реалізувати складні алгоритми керування, забезпечити точність обробки та стабільність роботи технологічного обладнання, що є необхідною умовою для підвищення продуктивності та якості виробничих процесів.

3.2 Обґрунтування вибору ПЛК Modicon M221 TM221CE24T та його технічні характеристики.

Для модернізації системи керування фрезерним верстатом з понтграфом важливо обрати контролер, який забезпечить високу точність обробки сигналів, стабільність циклу виконання програми та можливість інтеграції з приводами та датчиками різного типу. Програмований логічний контролер Modicon M221, зокрема модель TM221CE24T (рис. 3.3), повністю відповідає цим вимогам завдяки сучасній апаратній архітектурі, широкому набору функціональних можливостей та високій швидкодії. Саме ця модифікація була обрана для реалізації даного дослідження, оскільки оптимально підходить для керування обладнанням з імпульсними датчиками, електроприводами та периферією, що працює від 24 V DC.

Контролер належить до компактних ПЛК, призначених для малих та середніх систем автоматизації, де важливими є не лише базові логічні функції, але й здатність обробляти високошвидкісні сигнали, синхронізувати рухові осі та підтримувати стабільну роботу в умовах промислового середовища. За рахунок високопродуктивного процесора контролер забезпечує швидкий цикл виконання програми, що дає змогу застосовувати його у системах, де точність керування рухом і оперативність реакції є критично важливими.



Рисунок 3.3 - ПЛК Modicon M221 TM221CE24

Контролер належить до компактних ПЛК, призначених для малих та середніх систем автоматизації, де важливими є не лише базові логічні функції, але й здатність обробляти високошвидкісні сигнали, синхронізувати рухові осі та підтримувати стабільну роботу в умовах промислового середовища. За рахунок високопродуктивного процесора контролер забезпечує швидкий цикл виконання програми, що дає змогу застосовувати його у системах, де точність керування рухом і оперативність реакції є критично важливими.

Обрана модель TM221CE24T працює від номінальної напруги 24 V DC, що є стандартом для більшості елементів верстатної автоматики. Така сумісність спрощує інтеграцію контролера з наявними сенсорами та виконавчими механізмами. Максимальна споживана потужність становить 17.2 W, що відповідає струму приблизно 0.72 A. Це дозволяє застосовувати стандартні промислові блоки живлення на 24 V із відповідним запасом потужності (не менше 20–25 W).

Наведені характеристики у таблиці 3.1 демонструють можливість застосування контролера у системах з високими вимогами до точності. Високошвидкісні входи дозволяють під'єднувати інкрементальні енкодери для контролю положення, що є важливим у роботі фрезерного верстата, особливо при автоматизації процесів, пов'язаних із переміщенням столу, інструменту або копіювальних механізмів.

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики Modicon M221
TM221CE24T

Характеристика	Значення
Тип контролера	<i>Kompakt / Book</i>
Час виконання інструкції	0,2 мкс
Пам'ять програми	256 Кб
Пам'ять даних	64 Кб
Дискретні входи	24
Дискретні виходи	14 (транзисторні)
Швидкісні входи	до 100 кГц
Напруга живлення	24 В DC
Максимальна потужність	17,2 Вт
Максимальний струм	0.72 А

Ще однією суттєвою перевагою є комунікаційні можливості контролера (табл. 3.2). Модель TM221CE24T оснащена Ethernet-портом, що дозволяє виконувати мережеве програмування, підключати пристрій до SCADA, взаємодіяти з панелями оператора та реалізовувати віддалений моніторинг. Компактність та універсальність інтерфейсів забезпечують зручність інтеграції контролера у склад обладнання

Таблиця 3.2 – Вбудовані інтерфейси та комунікації

Інтерфейс/Функція	Наявність
USB-порт	+
Ethernet	+
RS-232	+
RS-485	+
Modbus RTU	Підтримується
Modbus TCP	Підтримується

CANopen	Підтримується через модуль
Веб-сервер	+

Підтримка кількох комунікаційних стандартів дозволяє контролеру взаємодіяти з широким спектром обладнання: приводами, панелями оператора, модулями введення-виведення та діагностичними пристроями. Це особливо важливо при модернізації верстатів, де необхідна інтеграція як старих, так і нових компонентів системи.

Окремої уваги заслуговують електричні та експлуатаційні характеристики, що визначають надійність роботи контролера у промислових умовах. Вони наведені в таблиці 3.

Таблиця 3.3 – Електричні та експлуатаційні характеристики ПЛК Modicon M221

Параметр	Значення
Номінальна напруга живлення	24В DC
Допустимі коливання напруги	±10 %
Максимальна потужність	17,2 Вт
Робочий температурний діапазон	–20...+55 °C
Допустима вологість	5–95 % без конденсації
Стійкість до вібрації	до 3g
Стійкість до ударів	15g
Електромагнітна сумісність	Відповідає промисловим нормам EMC
Ступінь захисту	IP20

Експлуатаційні параметри підтверджують придатність контролера для роботи на верстаті, де присутні вібрації, температурні коливання та електромагнітні завади. Контролер зберігає стабільність виконання програми у

різних умовах, що мінімізує імовірність зупинки обладнання та забезпечує безпеку процесу.

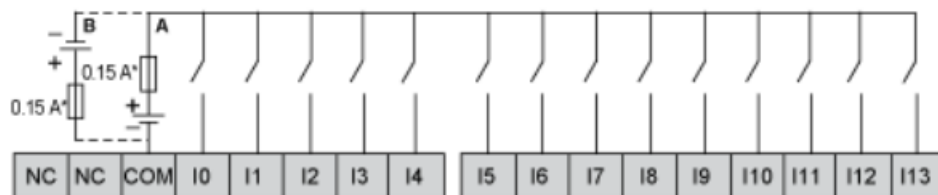


Рисунок 3.4 – Цифрові входи Modicon M221 TM221CE24T

Особливо цінним для фрезерного обладнання є поєднання транзисторних виходів (рис.3.5) та високошвидкісних входів (рис. 3.4). Така конфігурація дозволяє одночасно виконувати точне позиціонування, керувати швидкодіючими приводами та гарантувати стабільний контроль руху навіть за складних режимів роботи. Універсальність системи доповнюється можливістю підключення модулів розширення, що робить контролер гнучким щодо подальших модернізацій та збільшення кількості периферії.

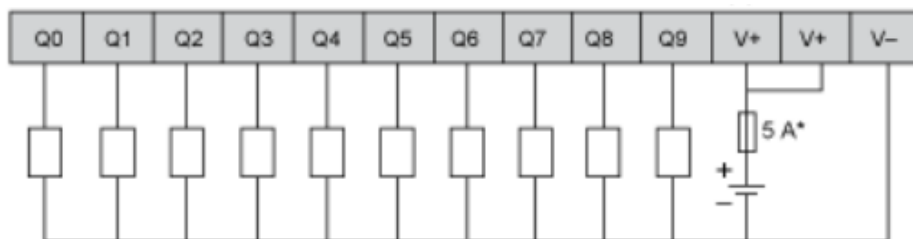


Рисунок 3.5 – Транзисторні виходи Modicon M221 TM221CE24T

Однією з важливих переваг контролера TM221CE24T є його зручність конфігурації та адаптації під різні задачі автоматизації. Контролер підтримує широкий набір функціональних блоків, що дозволяє створювати складні алгоритми керування без потреби у написанні великої кількості низькорівневих команд. Завдяки цьому програмування стає більш наочним і структурованим, що особливо корисно при розробці алгоритмів керування рухом, типових для фрезерних верстатів та обладнання копіювального типу.

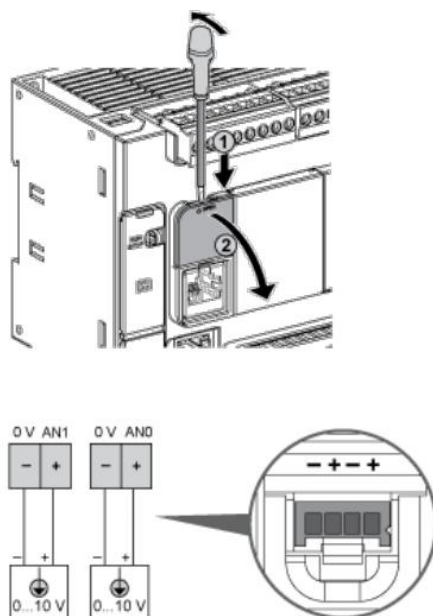


Рисунок 3.6 – Аналогові входи ПЛК Modicon M221 TM221CE24T

Важливо відзначити також модульність системи на базі M221. Контролер підтримує підключення модулів розширення серії TM3, що дозволяє збільшувати кількість входів, виходів або додавати спеціалізовані функції, такі як аналогові входи (рис. 3.6), термопарні входи, релейні модулі або додаткові комунікаційні інтерфейси. Така модульність істотно розширює можливості системи, даючи змогу масштабувати її у разі модернізації верстата або застосування додаткових датчиків. Це робить контролер раціональним вибором для проекту, де можливе подальше розширення системи керування.

Окрім цього, велике значення має висока надійність апаратної платформи, притаманна контролерам серії Modicon M221. Вони розроблені відповідно до сучасних міжнародних стандартів промислової автоматики, що гарантує тривалу безаварійну роботу в умовах підвищених навантажень. Такі контролери проходять випробування на стійкість до стрибків напруги, електромагнітних завад, механічних навантажень та температурних змін. Для промислового верстата, де присутні вібрації шпинделя, коливання температури та електричні імпульсні завади, ці властивості є критично важливими.

Контролер також забезпечує високий рівень безпеки завдяки підтримці схем аварійної зупинки, контролю станів входів та можливості реалізації алгоритмів, що

мінімізують ризики некоректної роботи обладнання. Вбудовані діагностичні функції спрощують виявлення несправностей, дозволяють швидко визначити помилки у роботі периферії або порушення в електричних колах. Завдяки цьому зменшується час простою обладнання та підвищується загальна ефективність роботи верстатного комплексу.

У конструкції контролера також передбачено можливість простого монтажу і підключення. Корпус розроблено таким чином, щоб забезпечити швидке встановлення на DIN-рейку та зручний доступ до клемних колодок. Підписані клеми та логічне групування входів і виходів полегшують процес монтажу і скорочують час на проведення електромонтажних робіт. Це важливо при модернізації верстату, де може виникати потреба у швидкій заміні елементів або адаптації вже існуючої схеми.

Ще однією важливою характеристикою є можливість дистанційного керування та обслуговування. Наявність Ethernet та підтримка веб-сервера дають змогу отримувати доступ до контролера безпосередньо через локальну мережу, здійснювати контроль параметрів, оновлення програми або діагностику без необхідності фізичного доступу до обладнання. Це суттєво полегшує роботу інженера з технічного обслуговування та прискорює реагування на можливі позаштатні ситуації.

Функціональність контролера доповнюється можливістю роботи з різними типами сигналів – дискретними, аналоговими, імпульсними та комунікаційними. Це дозволяє інтегрувати його у гетерогенні системи, де застосовуються різні типи датчиків, приводів та виконавчих механізмів. Завдяки транзисторним виходам забезпечується швидке перемикання сигналів, що необхідно при керуванні серводвигунами або іншими елементами, де важлива швидкодія.

Важливою особливістю контролера є можливість реалізації алгоритмів позиціонування та контролю руху, які широко застосовуються у фрезерних верстатах. Високошвидкісні виходи та входи дозволяють точно керувати переміщенням робочих органів, синхронізувати рух осей та забезпечувати точність при копіюванні контурів. Це відкриває можливість створення програм керування,

що успішно замінюють механічні копіювальні системи або суттєво підвищують їх точність і повторюваність.

У підсумку, ПЛК Modicon M221 TM221CE24T є технічно обґрунтованим вибором для автоматизації фрезерного верстата з понтографом. Він забезпечує необхідний запас продуктивності, має широкий набір комунікаційних засобів, підтримує роботу з імпульсними сигналами та гарантує стабільність функціонування у промислових умовах. Сукупність цих характеристик дозволяє застосовувати його як основний елемент системи керування у межах цього дипломного проєкту.

3.3 Діагностика та налагодження ПЛК

Діагностика та налагодження програмованого логічного контролера Modicon M221 TM221CE24T є ключовими етапами підготовки системи керування фрезерним верстатом до введення в експлуатацію. Від якості виконання цих процедур залежить стабільність роботи обладнання, точність технологічних операцій та надійність усієї автоматизованої системи. Оскільки контролер TM221CE24T поєднує високопродуктивну апаратну основу, розвинуті інтерфейси та можливості роботи з високошвидкісними сигналами, процес діагностики охоплює перевірку його електричної, комунікаційної та програмної частини.

Першим етапом діагностики є перевірка правильності електричних підключень контролера. TM221CE24T працює від напруги 24 V DC, тому особлива увага приділяється відповідності фактичної напруги номінальному значенню, правильності полярності підключення та якості заземлення. Живлення повинно подаватися через стабілізований промисловий блок з фільтрацією та захистом від перенапруги. Аналізується правильність підключення дискретних входів та виходів, їх відповідність типу периферійних пристроїв та відповідність схем підтягувальних резисторів вимогам контролера. Також перевіряються канали високошвидкісних входів і виходів, що використовуються для роботи з енкодерами

і приводами, оскільки помилки у їх підключенні можуть спричинити спотворення імпульсної інформації та некоректну роботу алгоритмів позиціонування.

Після візуального та електричного контролю виконується первинна діагностика стану контролера через вбудовані індикатори та програмне середовище EcoStruxure Machine Expert — Basic. Індикатори на передній панелі дозволяють оцінити подачу живлення, стан роботи ПЛК, активність комунікаційних портів та наявність можливих помилок. У середовищі програмування здійснюється перевірка системних журналів, службових реєстрів та відсутності критичних повідомлень, які могли б свідчити про помилки у внутрішніх процесах контролера.

Одним із наступних етапів є тестування дискретних входів. Через функції онлайн-моніторингу перевіряється надходження сигналів від кінцевих вимикачів, датчиків, кнопок та інших елементів системи керування. Аналізується коректність зміни станів входів, відсутність паразитних спрацювань та достатня швидкість реакції. У разі необхідності застосовуються засоби фільтрації сигналів, зміна логічної інверсії або корекція схем підключення для досягнення оптимальної роботи.

Наступним етапом є діагностика дискретних виходів. Оскільки у моделі TM221CE24T використовуються транзисторні виходи, перевіряється коректність формування керуючих сигналів, відповідність струмового навантаження допустимим параметрам та стабільність роботи силових ланцюгів. Важливим є тестування виходів у режимі програмного керування, що дозволяє оцінити логіку перемикавання, відсутність затримок та стійкість роботи під час подання швидких або частих команд. Перевіряється також відсутність надмірного нагріву вихідних ключів та відповідність фактичної роботи виконавчих механізмів заданим алгоритмам.

Окремо здійснюється діагностика високошвидкісних каналів. Для TM221CE24T важливо перевірити коректність обробки імпульсів на входах, особливо у разі використання інкрементальних енкодерів. Аналізується стабільність частоти вхідних імпульсів, точність визначення положення та

відсутність пропусків сигналів. Для виходів виконується тестування генерації імпульсів PTO/PWM, оцінюється точність їх формування при різних частотах та навантаженнях. Це є критичним у системах, де необхідно забезпечити точне керування переміщенням та синхронізацію руху виконавчих вузлів.

Суттєвим етапом є перевірка роботи комунікаційних інтерфейсів. Модель TM221CE24T оснащена Ethernet, USB, RS-232 та RS-485, що забезпечує широкі можливості обміну даними. У процесі діагностики виконується тестування Modbus TCP та Modbus RTU, перевіряється якість зв'язку, правильність формування кадрів, стабільність обміну під навантаженням та синхронізація з іншими елементами системи. Перевіряється також доступ до вбудованого веб-сервера контролера, що дозволяє здійснювати базовий моніторинг параметрів безпосередньо через браузер.

Обов'язковою частиною налагодження є тестування роботи програми керування. Аналізується стабільність циклу виконання, затримки між функціональними блоками, використання ресурсів пам'яті та коректність обробки подій у реальному часі. Важливо переконатися, що сформований цикл ПЛК має достатній резерв часу для обробки всіх сигналів, а логічні переходи між станами виконуються відповідно до алгоритму. У разі потреби проводиться оптимізація структури програми, зменшення кількості одночасно активних процедур або перерозподіл логічних операцій.

Завершальним етапом діагностики є перевірка реакції системи на аварійні ситуації. Симулюються обриви сигналів, некоректні стани датчиків, перевищення межових значень та інші позаштатні обставини. Контролюється коректність формування аварійних повідомлень та правильність переходу системи у безпечний стан. Цей етап дозволяє впевнитися, що контролер забезпечить належний рівень безпеки та не допустить неконтрольованих дій обладнання.

Висновки за розділом

В даному розділі було проведено аналіз архітектури сучасних ПЛК, визначено їх основні функціональні можливості та технічні особливості, що формують основу для створення систем автоматизованого керування верстатним

обладнанням. Розгляд типових структур, принципів роботи та характеристик контролерів дозволив систематизувати вимоги до вибору апаратної платформи.

На основі порівняльного аналізу було обґрунтовано вибір ПЛК Modicon M221 TM221CE24T як оптимального рішення для модернізації фрезерного верстата з понтोगрафом. Обраний контролер забезпечує необхідну швидкодію, підтримку високошвидкісних сигналів, гнучкі комунікаційні можливості, транзисторні виходи та сумісність із промисловою периферією, що дозволяє ефективно реалізувати алгоритми керування рухом та технологічний процес.

Також у розділі наведено особливості діагностики та налагодження контролера, що включають перевірку правильності електричних підключень, тестування дискретних і високошвидкісних каналів, оцінку стану комунікацій та аналіз стабільності виконання програми. Ці процедури визначають необхідні умови для подальшого впровадження системи керування та гарантують коректність роботи контролера у складі верстатного обладнання.

РОЗДІЛ 4

ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТОМ

4.1 Функціональна структура удосконаленої системи керування фрезерним верстатом

Розроблена функціональна схема керування фрезерним верстатом з пантографом (рис. 4.1) базується на структурі, яка забезпечує підвищену точність, надійність та гнучкість керування технологічним процесом. Її центральним елементом виступає програмований логічний контролер Modicon M221 TM221CE24T, що відповідає за приймання сигналів від датчиків, формування керуючих впливів, координацію роботи приводів і забезпечення взаємодії між оператором та обладнанням. Розроблена архітектура охоплює комплекс взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких виконує свою функцію та забезпечує цілісність автоматизованого керування.

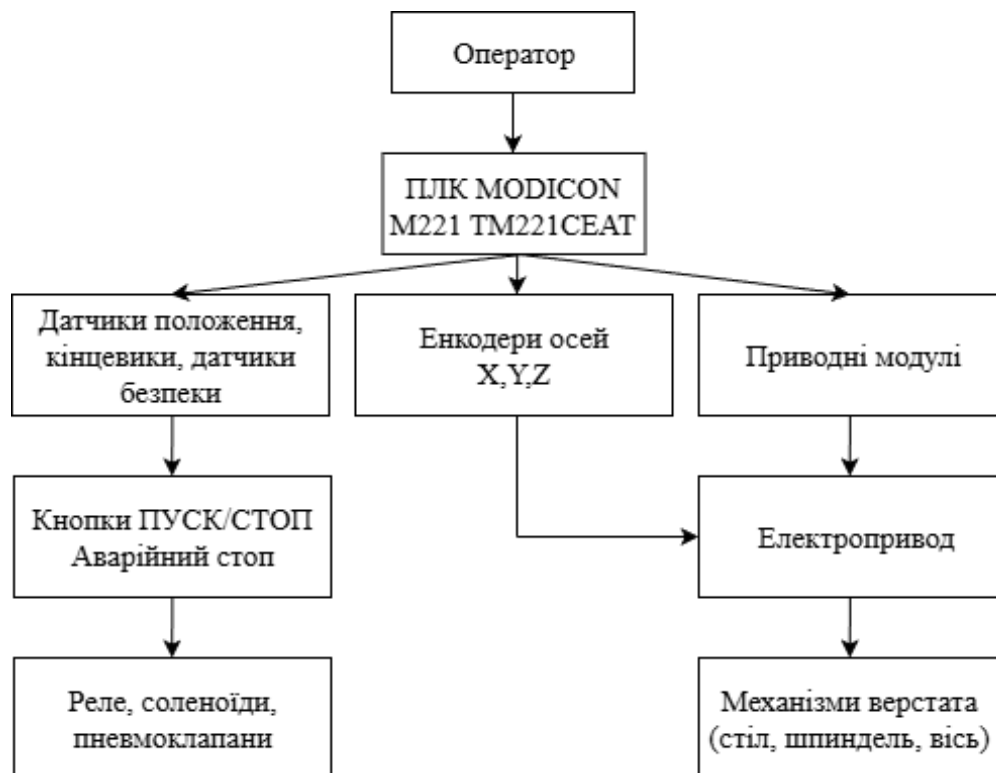


Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи керування верстатом

Схема системи демонструє типову для сучасних верстатних комплексів побудову, де інформаційні та силові потоки з'єднані через центральний контролер, який координує роботу всієї системи.

У наведеній структурі операторський інтерфейс взаємодіє з контролером через мережеві або USB-інтерфейси, забезпечуючи доступ до параметрів керування, станів вузлів та режимів роботи. Далі всі дискретні та високошвидкісні сигнали передаються до ПЛК, де вони обробляються відповідно до алгоритмів, що реалізовані у програмному забезпеченні. Після цього контролер формує вихідні керуючі впливи, які надходять до виконавчих пристроїв — приводів, реле та електромеханічних механізмів, що безпосередньо здійснюють рух або технологічні дії у межах верстата.

Контролер TM221CE24T відіграє ключову роль у функціональній структурі системи. Він здійснює збір даних, виконує логічну обробку інформації та видає керуючі сигнали в режимі реального часу. Його апаратні ресурси — дискретні входи, транзисторні виходи та високошвидкісні канали — дають змогу організувати точну та стабільну взаємодію між електронними та механічними компонентами системи. Завдяки підтримці Ethernet зв'язку контролер також інтегрується з операторськими станціями, що дозволяє виконувати візуалізацію процесів та діагностику у зручній формі.

Високошвидкісні входи ПЛК використовуються для роботи з енкодерами, що забезпечують точне вимірювання переміщення та швидкості руху осей верстата. Контролер аналізує імпульсні сигнали, визначає напрям руху, позицію робочих органів та передає ці дані до алгоритмів, які відповідають за синхронізацію руху, позиціонування та контроль точності. Наявність таких можливостей суттєво розширює функціональні характеристики модернізованого верстата, забезпечуючи плавність та повторюваність технологічних операцій.

Підсистема взаємодії з оператором організована таким чином, щоб забезпечити простоту та інформативність управління верстатом. Через НМІ або персональний комп'ютер оператор отримує доступ до параметрів роботи, може змінювати режими керування, запускати чи зупиняти цикл, а також переглядати

діагностичну інформацію. Вбудований веб-сервер контролера дає можливість виконувати моніторинг через браузер, що спрощує первинне налаштування та подальше обслуговування системи. Присутність мережевого інтерфейсу також дозволяє використовувати SCADA-системи для розширеної візуалізації та архівування параметрів.

Функціональна структура передбачає наявність широкої підсистеми збору даних, яка охоплює всі датчики, розташовані на верстаті. Їхня робота спрямована на надання контролеру точної та своєчасної інформації щодо позиції, стану та режимів роботи механічних вузлів. Датчики кінцевих положень визначають межі руху столу чи супортів, запобігаючи зіткненням або перевантаженням. Індуктивні та механічні датчики фіксують проходження контрольних точок, положення заготовки або стан захисних елементів. Усі ці сигнали надходять на відповідні дискретні входи ПЛК, де вони проходять фільтрацію, обробляються програмною логікою та використовуються для забезпечення правильного алгоритмічного реагування.

Особливо важливе місце у системі займають енкодери, які передають інформацію про переміщення робочих органів у вигляді імпульсної послідовності. Підключення до високошвидкісних входів TM221CE24T забезпечує точний облік як малих, так і великих переміщень, дозволяючи організувати досить точні режими копіювання, врізання або повторюваних рухів. Висока швидкість обробки сигналів забезпечує відсутність затримок та пропусків, що критично для фрезерної обробки.

Формування керуючих сигналів здійснюється через транзисторні виходи ПЛК, які забезпечують швидке та чітке перемикання. Ці сигнали подаються на контактори приводу шпинделя, соленоїди пневматичних вузлів або релейні модулі, що керують допоміжними механізмами верстата. Залежно від принципу роботи окремих пристроїв контролер може формувати як статичні дискретні сигнали, так і швидкі імпульсні сигнали, які визначають інтенсивність або довжину переміщення.

Під час роботи верстата контролер отримує сигнали від датчиків і формує відповідні реакції, забезпечуючи плавну зміну швидкості, точне зупинення, рух у

потрібному напрямку та виконання заданої траєкторії. Виконавчі елементи працюють у тісній взаємодії з механічною частиною верстата — столом, супортами, шпиндельним вузлом — завдяки чому забезпечується узгоджена та контрольована взаємодія всіх механізмів.

Безпека є невід’ємним компонентом функціональної структури. Захисні механізми контролюють стан аварійної кнопки стоп, перемикачів захисних кожухів, датчиків перегріву та інших елементів. При спрацюванні будь-якого з цих елементів система повинна негайно зупинити рухові механізми та перевести обладнання в безпечний стан. Контролер TM221CE24T забезпечує постійний моніторинг цих сигналів та їх пріоритетну обробку у межах програмної логіки. Це дозволяє уникнути небезпечних ситуацій і забезпечити відповідність вимогам техніки безпеки.

Важливим елементом структури є блок живлення на 24 V DC, який забезпечує стабільну роботу контролера та підключених датчиків і виконавчих механізмів. Стабільність напруги, наявність фільтрації та захист від перенапруги є обов’язковими умовами для забезпечення коректності функціонування всіх електронних компонентів системи. Живлення виконавчих пристроїв, таких як контактори чи соленоїди, може здійснюватися як від того самого джерела, так і від окремої лінії, що підвищує надійність роботи та спрощує технічне обслуговування.

Функціональна структура удосконаленої системи побудована таким чином, щоб забезпечити максимально ефективну взаємодію між усіма її складовими. Дані від датчиків безперервно передаються до контролера, який аналізує їх і формує керуючі впливи відповідно до заданої логіки. У свою чергу, виконавчі механізми забезпечують переміщення, обробку або інші технологічні дії, які відображаються в системі датчиків у вигляді нових значень, формуючи таким чином замкнений контур керування. Така організація забезпечує високу точність, оперативність реагування та повторюваність технологічних операцій.

4.2 Розробка алгоритмів керування фрезерним верстатом з пантографом

Розробка алгоритмів керування є ключовим етапом автоматизації фрезерного верстата з пантографом, оскільки саме програмна логіка визначає взаємодію між електронними та механічними компонентами системи, забезпечує реалізацію режимів роботи, контроль переміщення та дотримання вимог безпеки. Для удосконаленої системи керування, побудованої на основі ПЛК Modicon M221 моделі TM221CE24T, була розроблена структурована програмна архітектура, що складається з окремих функціональних підпрограм, кожна з яких відповідає за певний етап або сценарій роботи верстата.

Загальна логіка роботи програмного забезпечення базується на основному алгоритмі програми (рис. 4.2), який виконується циклічно та координує послідовність дій усіх підсистем. Основний алгоритм є центральною частиною програмної структури та забезпечує керування робочим процесом, перемикання між режимами та реагування на зовнішні події. Для підвищення надійності та логічної впорядкованості всі функції було поділено на чотири окремі підпрограми, що дозволило зробити систему більш гнучкою, масштабованою та зручною для подальшого технічного обслуговування.

До складу програмної структури входять такі підпрограми:

- Підпрограма ініціалізації, яка відповідає за налаштування системи після ввімкнення живлення, скидання аварійних станів та перевірку коректності підключених датчиків і виконавчих механізмів.
- Підпрограма калібрування та виходу у нульову точку, що забезпечує визначення базових координат верстата та приведення робочих механізмів у початковий стан перед стартом обробки.
- Підпрограма основного робочого циклу, яка реалізує алгоритми переміщення, обробки та копіювання, використовуючи сигнали з енкодерів, датчиків та команд оператора.

- Підпрограма обробки аварій, що відповідає за контроль безпечного стану обладнання, реагування на відхилення та переведення системи в захищений режим у випадку небезпечних ситуацій.

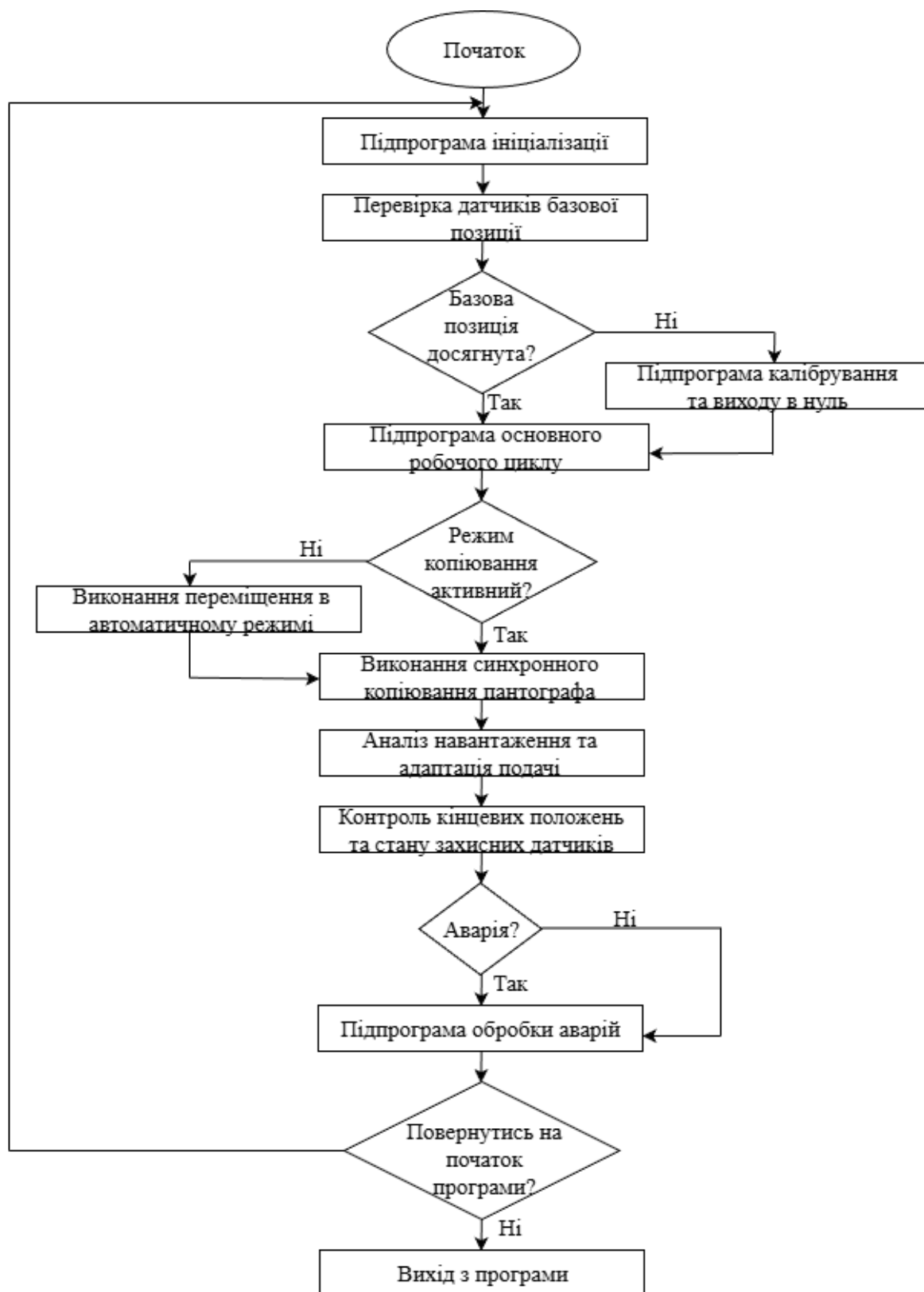


Рисунок 4.2 – Основний алгоритм програми

Усі ці підпрограми взаємодіють між собою через основний алгоритм програми, який визначає послідовність їх виклику. Саме він вирішує, коли виконувати ініціалізацію, коли переходити до калібрування, коли запускати робочий цикл та в яких випадках активувати аварійну підпрограму. Така структура дозволяє побудувати нелінійну систему керування, у якій хід програми залежить не тільки від часу виконання, але й від поточного стану механізмів, режиму роботи та станів датчиків. Це забезпечує максимально гнучку та адаптивну модель поведінки верстата, що відповідає особливостям роботи з пантографом.

Підпрограма ініціалізації (рис.4.3) є першою функціональною частиною основного алгоритму керування фрезерним верстатом з пантографом і виконується автоматично після запуску програмованого логічного контролера. Її завдання полягає у підготовці всіх апаратних і програмних компонентів системи до подальшої роботи, забезпеченні коректного початкового стану обладнання та перевірці технічних умов для переходу до наступних етапів керування.

На початку виконання підпрограма ініціалізації здійснює зчитування станів дискретних і системних входів, що дозволяє визначити, чи немає на момент запуску активних аварійних сигналів, порушення цілісності кабельних ліній, вимкнених захисних елементів або некоректного положення робочих механізмів. Якщо такі сигнали виявляються, контролер блокує подальший запуск системи та переходить у режим очікування безпечного стану. Це забезпечує захист обладнання та оператора від неконтрольованого початку руху.

Після перевірки аварійних станів програма переходить до тестування доступності та працездатності каналів введення-виведення. Зокрема, контролер перевіряє активність датчиків, цілісність ліній зв'язку з енкодерами та стан транзисторних виходів. Такий етап дозволяє впевнитися в тому, що система може коректно зчитувати інформацію та формувати керуючі сигнали. У разі виявлення порушень у роботі периферійних елементів система фіксує помилку та не допускає подальшого виконання основного робочого циклу.



Рисунок 4.3 – Алгоритм підпрограми ініціалізації

Важливою частиною підпрограми ініціалізації є приведення логічних змінних, таймерів і лічильників у початковий стан. Це гарантує, що у програмі не залишиться залишкових значень, які могли зберегтися після попереднього вимкнення або аварійної зупинки. Таким чином забезпечується повторюваність і передбачуваність роботи всієї системи.

Окрім того, підпрограма проводить перевірку стану кнопок і перемикачів операторського інтерфейсу. Такий підхід виключає можливість ситуації, коли оператор випадково залишив активованою кнопку «Пуск» або перемикач режиму,

що могло б спричинити небажаний запуск системи. Лише після підтвердження того, що всі елементи керування знаходяться у пасивному стані, дозволяється виконання наступних алгоритмів.

Завершальним етапом підпрограми ініціалізації є формування команди переходу до підпрограми калібрування та виходу у нульову точку. Якщо всі умови коректного запуску дотримані, контролер передає керування наступному етапу. Якщо ж хоч одна з умов виявляється невиконаною, система повертається до початку підпрограми ініціалізації, формуючи замкнений цикл очікування усунення порушень. Така логіка забезпечує надійність та безпечність усієї автоматизованої системи керування верстатом.

Підпрограма калібрування та виходу у нульову точку (рис. 4.4) є одним із ключових елементів алгоритмічної структури удосконаленої системи керування фрезерним верстатом з пантографом. Її основним завданням є встановлення всіх рухомих вузлів обладнання у строго визначені базові положення, що забезпечує точність подальшої роботи всіх алгоритмів позиціонування та копіювання контурів. Правильне виконання цієї підпрограми визначає узгодженість дій виконавчих механізмів і достовірність сигналів зворотного зв'язку, що надходять від кінцевих вимикачів, енкодерів та датчиків безпеки.

Процес калібрування починається після завершення етапу ініціалізації системи, коли контролер уже виконав первинну перевірку входів та виходів і готовий перейти до точного позиціонування механічних вузлів. У межах підпрограми контролер послідовно аналізує стан кінцевих датчиків, визначаючи, чи перебувають осі у своїх нульових точках. Якщо одна або кілька осей не знаходяться у базовій позиції, система подає відповідний керуючий сигнал на виконавчий привод і починає рух у напрямку нульової координати. Цей рух здійснюється з обмеженою швидкістю, що забезпечує безпечне наближення до кінцевого вимикача та мінімізує ризик ударних навантажень на механіку.

Після спрацювання кінцевого датчика контролер переходить у режим уточнення нульової точки. На цьому етапі здійснюється відхід осі на невелику

відстань, після чого вона знову переміщується у напрямку кінцевого вимикача, але з меншою швидкістю.

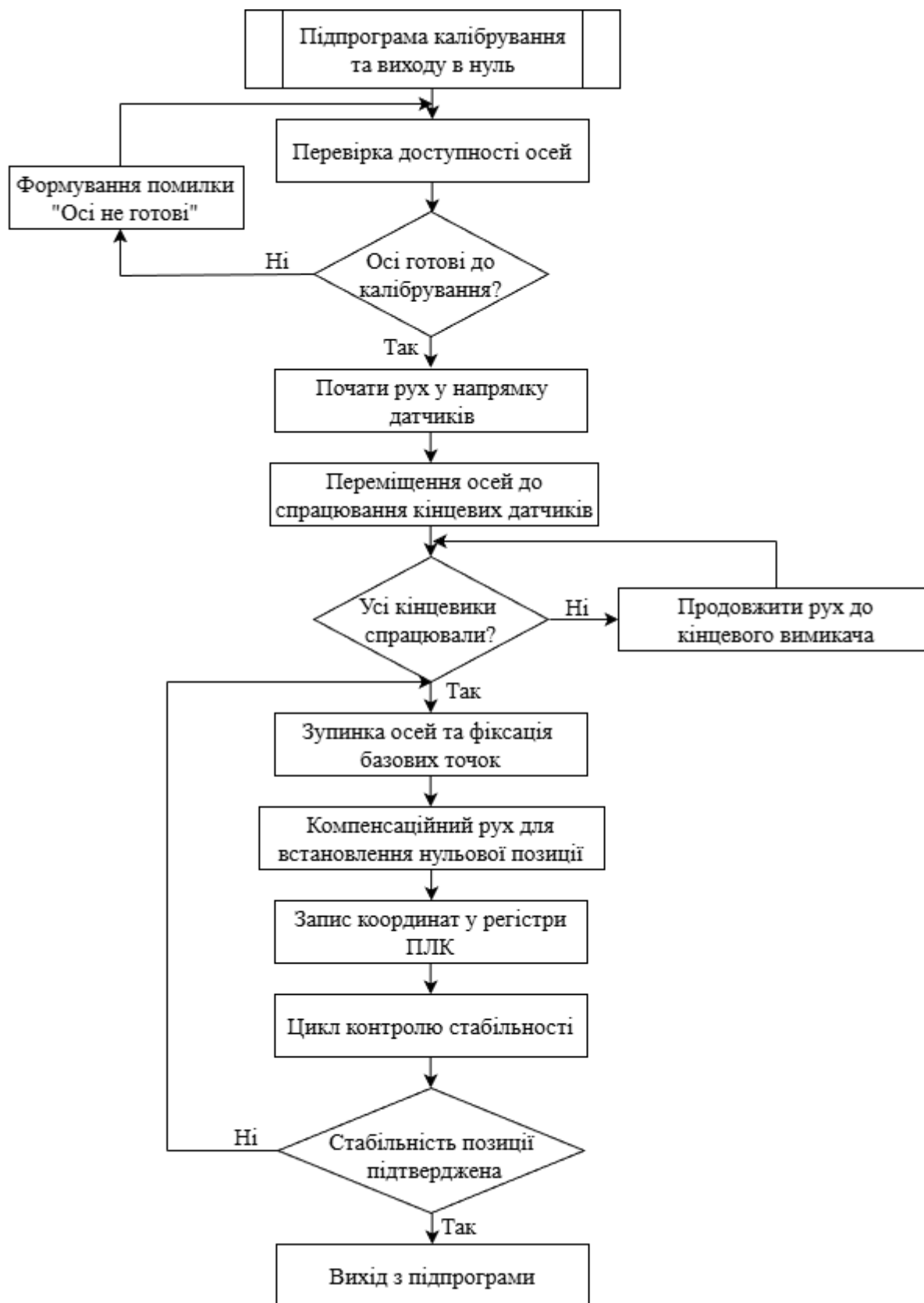


Рисунок 4.4 – Алгоритм підпрограми калібрування та виходу в нуль

Після спрацювання кінцевого датчика контролер переходить у режим уточнення нульової точки. На цьому етапі здійснюється відхід осі на невелику відстань, після чого вона знову переміщується у напрямку кінцевого вимикача, але з меншою швидкістю. Такий підхід дозволяє усунути похибку, пов'язану з механічними люфтами та інерційністю, і забезпечити більш точне визначення реальної нульової позиції. Зафіксувавши цю точку, контролер обнуляє програмний лічильник імпульсів відповідної осі, тим самим синхронізуючи фізичне та логічне положення механізму.

Важливим аспектом підпрограми є безперервний контроль стану аварійних сигналів і датчиків безпеки. Якщо під час калібрування відбувається відкриття захисного кожуха, натискання аварійної кнопки або виявляється некоректний стан одного з каналів системи, підпрограма негайно переривається, і контролер ініціює перехід до підпрограми обробки аварій. Такий підхід гарантує, що жоден рух механізмів не буде виконаний у небезпечних для оператора або обладнання умовах.

Після завершення калібрування однієї осі система переходить до калібрування наступної, дотримуючись наперед визначеної послідовності. Такий порядок забезпечує коректний розподіл навантажень на механічні вузли та знижує ймовірність перекосів або заклинювань. У кінці процедури, коли всі осі пройшли калібрування і синхронізацію, система переводиться у стан готовності до виконання основного робочого циклу. У цей момент операторський інтерфейс отримує повідомлення про успішне завершення калібрування, а контролер переходить до виконання наступної підпрограми відповідно до основного алгоритму.

Таким чином, підпрограма калібрування (рис. 4.4) та виходу у нульову точку є невід'ємним етапом підготовки верстата до роботи. Вона формує базу для точності всієї системи керування, забезпечує стабільність подальших переміщень та виключає накопичення позиційних помилок протягом робочого процесу. Її правильна реалізація гарантує, що всі алгоритми подальшої обробки — від

автоматичного позиціонування до копіювання за пантографом — виконуватимуться відповідно до технологічних вимог.

Підпрограма основного робочого циклу (рис. 4.5) є ключовим елементом алгоритмічної структури удосконаленої системи керування фрезерним верстатом з пантографом. Її функціональне призначення полягає в безперервному виконанні команд, що забезпечують обробку заготовки відповідно до заданих параметрів, режиму роботи та стану механічних вузлів верстата. На відміну від підпрограм ініціалізації та калібрування, які виконуються одноразово або за необхідності, основний робочий цикл функціонує постійно протягом усього періоду активної обробки.

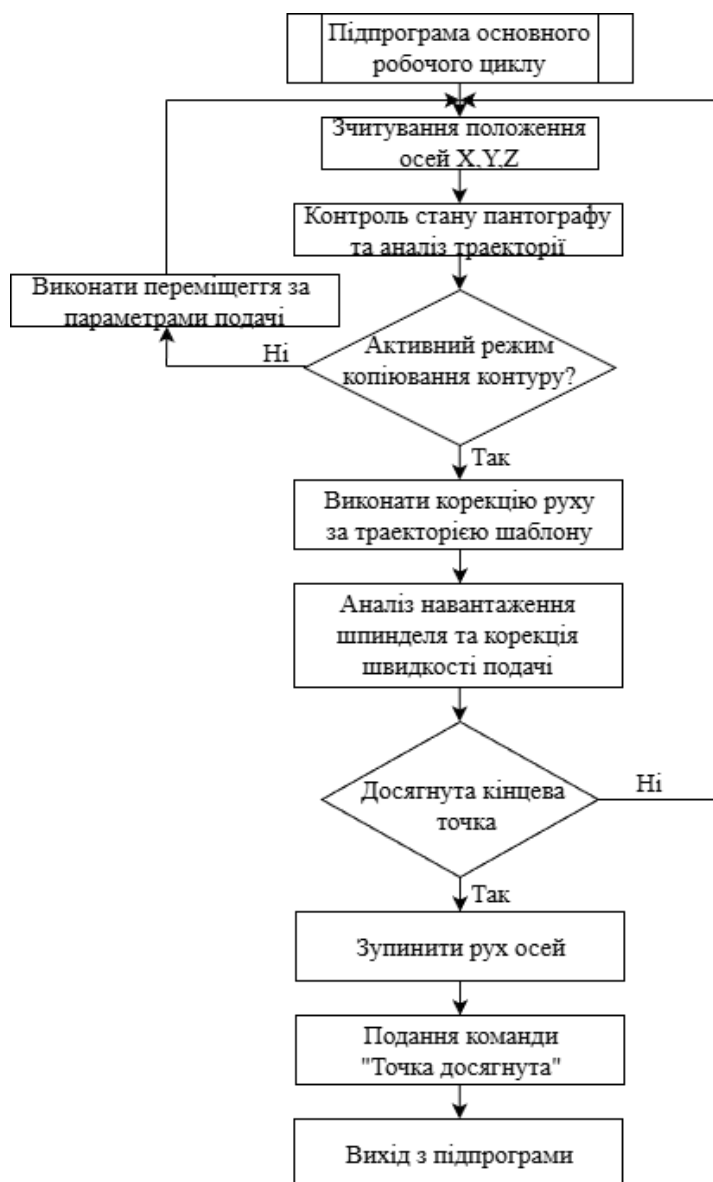


Рисунок 4.5 – Алгоритм підпрограми основного робочого циклу

Після виклику підпрограми система переходить до циклічного зчитування поточного положення осей та параметрів пантографа за допомогою високошвидкісних входів контролера. Отримані значення аналізуються програмною логікою, що визначає, у якому режимі має працювати система — у звичайному автоматичному режимі або в режимі копіювання контуру. На основі цього контролер формує необхідні керуючі імпульси для приводів, коригуючи швидкість та напрям руху з урахуванням поточного стану вузлів.

Важливим аспектом підпрограми є підтримка нелінійної реакції системи. Зміна положення осей або навантаження на шпindel може призводити до різних керуючих дій залежно від поєднання параметрів. Наприклад, у режимі копіювання навіть невеликі коливання положення пантографа викликають корекцію траєкторії, тоді як у звичайному автоматичному режимі такі коливання можуть ігноруватися в межах допустимого допуску. Це забезпечує точність обробки та стабільність руху.

У межах основного циклу постійно контролюється стан кінцевих вимикачів, захисних датчиків та логічних умов, які стосуються безпечної роботи верстата. У разі виявлення порушення система не завершує цикл самостійно, а формує запит до підпрограми обробки аварій. Таким чином, цикл виступає центральною ланкою між нормальним режимом роботи та аварійним реагуванням.

Така структура забезпечує безперервність управління, рівномірність обробки та гарантує, що система адаптується до змін умов у реальному часі. Завдяки своїй компактності та логічній завершеності підпрограма основного робочого циклу органічно інтегрується в загальну алгоритмічну структуру проєкту.

Підпрограма обробки аварій (рис. 4.6) виконує функцію негайного переведення верстата у безпечний стан у разі виникнення будь-якої нештатної ситуації. Вона активується автоматично при спрацюванні аварійних датчиків, перевищенні допустимих параметрів роботи, натисканні кнопки аварійної зупинки або виявленні критичних помилок у роботі виконавчих механізмів. Активування цієї підпрограми має найвищий пріоритет у системі, оскільки її виконання спрямоване на захист оператора, обладнання та деталей, що обробляються.

Після входу в підпрограму контролер негайно припиняє всі активні процеси, формує команду на зупинку приводів, вимикає шпиндель та блокує подачу рухів по всіх координатах. Ці дії виконуються негайно, без будь-яких затримок або додаткових перевірок, оскільки затримка в реагуванні може спричинити серйозні пошкодження. Одночасно контролер зберігає інформацію про тип аварії, стан осей та значення параметрів, за якими було виявлено небезпеку. Це дозволяє уникнути повторного виникнення помилки та спрощує подальшу діагностику.



Рисунок 4.6 – Алгоритм підпрограми обробки аварій

Після припинення всіх рухів підпрограма переходить у режим фіксації аварійного стану. На операторський інтерфейс виводиться повідомлення з описом аварії, номером помилки та рекомендаціями щодо можливих дій. Система блокує запуск робочого циклу до моменту, коли оператор підтвердить, що умови для відновлення роботи виконані. Така логіка дозволяє уникнути ситуацій, у яких аварія повторюється відразу після зупинки, наприклад, через несправний датчик або невірно встановлену заготовку.

Далі підпрограма виконує перевірку стану аварійних входів. Якщо оператор усунув причину аварії та всі критичні датчики повернулись у нормальний стан, система пропонує виконати скидання аварії. Після підтвердження підпрограма здійснює перевірку живлення, положення осей та стану механізмів, і лише у випадку повної відповідності нормам дозволяє перейти до початкових етапів роботи програми. Якщо ж хоча б один параметр все ще не відповідає допустимим значенням, система не дозволяє запуск, а підпрограма продовжує перебувати у стані блокування, очікуючи усунення проблеми.

Після успішного скидання аварії управління повертається до алгоритму ініціалізації, що забезпечує коректне відновлення роботи верстата. Такий підхід дозволяє не лише забезпечити безпеку, але й максимально швидко відновити роботу системи без порушення послідовності алгоритмів керування.

У межах підрозділу було розроблено повний комплекс алгоритмів, що формують логічну структуру удосконаленої системи керування фрезерним верстатом з пантографом. На основі основного алгоритму програми були визначені й формалізовані чотири ключові підпрограми – ініціалізації, калібрування та виходу у нульову точку, основного робочого циклу та обробки аварій, які забезпечують узгоджену, безпечну та адаптивну роботу обладнання. Кожен з алгоритмів структуровано описує послідовність дій та умови переходів, що дає змогу реалізувати нелінійну логіку й гнучке реагування системи на зміну технологічних і аварійних станів. Розроблена алгоритмічна база створює фундамент для подальшої реалізації програмного коду, підвищуючи надійність та точність керування фрезерним верстатом у різних режимах роботи.

4.3 Реалізація програмного коду керування

В межах попередніх підрозділів було розроблено повну функціональну структуру удосконаленої системи керування фрезерним верстатом 6E463 з понтографом, визначено архітектуру апаратної частини, виконано аналіз технічних характеристик ПЛК Modicon M221 TM221CE24T та сформовано алгоритми основної програми й допоміжних підпрограм. На основі цих матеріалів у даному підрозділі здійснюється безпосередня розробка програмного забезпечення для контролера, яке забезпечує коректну, стабільну та безпечну роботу верстата в автоматичному та ручному режимах.

Програмний код реалізовано у вигляді структурованої логічної схеми (LD), що відображає послідовність виконання алгоритмів ініціалізації, калібрування, робочого циклу та обробки аварійних ситуацій. Логіка побудована відповідно до вимог безперервного циклічного виконання, характерного для ПЛК, та враховує нелінійну поведінку системи завдяки використанню умовних переходів, пріоритетів сигналів і взаємопов'язаних підпрограм.

У подальшій частині наведено повний програмний код керування, створений з урахуванням розроблених схем, технологічних особливостей фрезерного верстата та вимог до його безпечної експлуатації. Кожен логічний блок супроводжується коментарями українською мовою, що пояснюють призначення окремих команд і допомагають забезпечити прозорість та зрозумілість виконуваних операцій.

Код програми:

// Блок 1: Ініціалізація системи

```
|----[ NO ] Power_OK -----( SET ) Power_OK_Flag  
|----[ NO ] System_Reset -----( RST ) All_Flags  
|----[ NO ] Power_OK_Flag -----( OUT ) System_Enabled  
|----[ NO ] System_Enabled -----( SET ) Init_Request  
|----[ NO ] Init_Request -----( CALL ) INIT_SUB  
|----[ NO ] INIT_DONE -----( RST ) Init_Request  
|----[ NO ] Init_Request -----( OUT ) LEDs_Init
```

|----[NO] CPUs_Ready -----(SET) CPU_Ready_Flag
 |----[NO] CPU_Ready_Flag -----(OUT) Watchdog_Enable
 |----[NO] Watchdog_Enable -----(SET) Watchdog_Running
 |----[NO] Config_Loaded -----(SET) Config_OK
 |----[NO] Config_OK -----(OUT) Parameters_Loaded
 |----[NO] Parameters_Loaded -----(SET) Safety_Check_Request
 |----[NO] Safety_Check_Request -----(CALL) SAFETY_SELFTEST
 |----[NO] SAFETY_OK -----(SET) Safety_Good
 |----[NO] Safety_Good -----(OUT) Init_Done
 |----[NO] Init_Done -----(RST) Init_Request

// Блок 2: Команди HMI та оператора

|----[NO] Mode_Auto -----(SET) Mode_Automatic
 |----[NO] Mode_Manual -----(SET) Mode_Manual
 |----[AND] Mode_Manual -----(SET) Manual_Enable
 |----[AND] Manual_Enable -----(OUT) Manual_Control_Loop
 |----[NO] Emergency_Stop -----(SET) Alarm_Triggered
 |----[NO] Show_Logs -----(SET) Display_Logs
 |----[NO] Reset_Counters -----(RST) Operation_Counter
 |----[NO] Start_Cycle -----(SET) Cycle_Request
 |----[NO] Stop_Cycle -----(RST) Cycle_Request
 |----[NO] Pause_Cycle ----- (SET) Pause_Request
 |----[NO] Resume_Cycle -----(RST) Pause_Request
 |----[NO] Zero_Position -----(SET) Zero_Request
 |----[NO] Zero_Request -----(CALL) CALIB_SUB
 |----[NO] Force_Hold -----(SET) Hold_Request
 |----[NO] Hold_Request -----(OUT) Hold_State
 |----[NO] Operator_ACK -----(SET) ACK_Flag
 |----[NO] ACK_Flag -----(RST) Operator_ACK

// Блок 3: Режими роботи та логіка переходів

|----[NO] Mode_Automatic ----- (SET) Auto_Enable

|----[NO] Mode_Manual -----(RST) Auto_Enable
 |----[AND] Auto_Enable -----(SET) Auto_Control_Loop
 |----[AND] Auto_Control_Loop -----(OUT) Cycle_Manager
 |----[NO] Manual_Enable -----(RST) Auto_Control_Loop
 |----[NO] Safety_Good -----(SET) Ready_To_Run
 |----[NO] Ready_To_Run -----(OUT) Enable_Start
 |----[NO] Cycle_Request -----(AND) Enable_Start
 |----[AND] Cycle_Request Enable_Start -----(SET) Cycle_Active
 |----[NO] Cycle_Active -----(OUT) Start_Timer
 |----[NO] Pause_Request -----(SET) Cycle_Paused
 |----[AND] Cycle_Paused -----(OUT) Hold_All_Motors
 |----[NO] Cycle_Active -----(RST) Pause_Request
 |----[NO] Stop_Cycle ----- (RST) Cycle_Active
 |----[NO] Emergency_Stop ----- (SET) Emergency_Mode
 |----[AND] Emergency_Mode ----- (OUT) Disable_Outputs
 |----[NO] Emergency_Mode -----(RST) Cycle_Active

// Блок 4: Захист та аварійні умови

|----[NO] Alarm_Triggered -----(SET) Fault_Latched
 |----[NO] Fault_Latched -----(OUT) Alarm_Display
 |----[NO] Temperature_Too_High -----(SET) OverTemp_Flag
 |----[NO] OverTemp_Flag -----(OUT) Cooldown_Command
 |----[NO] Encoder_Error -----(SET) Encoder_Fault
 |----[NO] Encoder_Fault -----(OUT) Stop_Axes
 |----[NO] Limit_Switch_Trip -----(SET) Limit_Trip
 |----[NO] Limit_Trip ----- (OUT) Retract_Motion
 |----[NO] Power_Fail -----(SET) Power_Fail_Latch
 |----[NO] Power_Fail_Latch -----(OUT) Safe_Stop
 |----[NO] Watchdog_Running -----(AND) System_Health_OK
 |----[NO] System_Health_OK -----(OUT) Health_LED
 |----[NO] Fault_Latched -----(CALL) ALARM_SUB

|----[NO] ALARM_CLEARED -----(RST) Fault_Latched
 |----[NO] Reset_alarms -----(RST) Alarm_Triggered
 |----[NO] Reset_alarms -----(RST) OverTemp_Flag
 |----[NO] Reset_alarms -----(RST) Encoder_Fault

// Блок 5: Підпрограма калібрування та вихід у нульову точку (CALIB_SUB)

|----[NO] CALIB_REQ -----(SET) CALIB_ACTIVE
 |----[NO] CALIB_ACTIVE -----(OUT) Motor_Homing_Start
 |----[NO] Motor_Homing_Start -----(TON) T_Home 0.5s
 |----[NO] T_Home -----(SET) Home_Pulse
 |----[NO] Home_Pulse -----(OUT) Axis_Move_Home
 |----[NO] Axis_At_Home -----(SET) Home_OK
 |----[NO] Home_OK -----(RST) Motor_Homing_Start
 |----[NO] Home_OK -----(OUT) Zero_Position_Set
 |----[NO] Zero_Position_Set -----(RST) CALIB_ACTIVE
 |----[NO] Zero_Position_Set -----(RST) CALIB_REQ
 |----[NO] CALIB_ACTIVE -----(OUT) Display_Status
 |----[NO] Home_Error -----(SET) CALIB_Error
 |----[NO] CALIB_Error -----(OUT) Alarm_Triggered
 |----[NO] CALIB_Error -----(RST) CALIB_ACTIVE
 |----[NO] Zero_Position_Set -----(CALL) SAVE_ZERO
 |----[NO] SAVE_ZERO_DONE -----(RST) Zero_Position_Set
 |----[NO] CALIB_DONE -----(OUT) HMI_Update

// Блок 6: Підпрограма ініціалізації

|----[NO] Init_Request -----(SET) Init_Active
 |----[NO] Init_Active -----(OUT) Clear_Errors
 |----[NO] Clear_Errors -----(RST) Fault_Latched
 |----[NO] Init_Active -----(OUT) Check_IO
 |----[NO] IO_OK -----(SET) IO_Ready
 |----[NO] IO_Ready -----(OUT) Sensors_Power
 |----[NO] Sensors_Power -----(TON) T_Power 0.2s

```

|----[ NO ] T_Power ----- ( SET ) Power_Stable
|----[ NO ] Power_Stable -----( OUT ) INIT_STATUS_LED
|----[ NO ] Init_Active -----( OUT ) Load_Defaults
|----[ NO ] Defaults_Loaded -----( SET ) Init_OK
|----[ NO ] Init_OK -----( RST ) Init_Active
|----[ NO ] Init_OK -----( OUT ) Init_Complete
|----[ NO ] Init_Complete -----( RST ) Init_Request
|----[ NO ] Init_Complete -----( CALL ) LOG_EVENT
|----[ NO ] LOG_DONE -----( RST ) Init_Complete
|----[ NO ] INIT_COMPLETE -----( OUT ) System_Ready
    // Блок 7: Основний алгоритм програми - початок циклу
|----[ NO ] System_Ready -----( SET ) Ready_Flag
|----[ NO ] Ready_Flag ----- ( OUT ) Enable_HMI
|----[ NO ] Enable_HMI ----- ( OUT ) HMI_Ready
|----[ NO ] Start_Timer ----- ( TON ) T_Start 1s
|----[ NO ] T_Start ----- ( SET ) Preload_Done
|----[ NO ] Preload_Done ----- ( OUT ) Load_Profile
|----[ NO ] Profile_Loaded ----- ( SET ) Profile_OK
|----[ NO ] Profile_OK ----- ( OUT ) Ready_To_Run
|----[ NO ] Ready_To_Run ----- ( SET ) Main_Cycle_Enable
|----[ NO ] Main_Cycle_Enable -----( OUT ) Enter_Main_Loop
|----[ NO ] Enter_Main_Loop -----( CALL ) MAIN_LOOP_SUB
|----[ NO ] MAIN_LOOP_DONE -----( RST ) Main_Cycle_Enable
|----[ NO ] MAIN_LOOP_DONE -----( CALL ) SAVE_LOG
|----[ NO ] Save_Log_Complete -----( RST ) MAIN_LOOP_DONE
|----[ NO ] Main_Cycle_Enable -----( OUT ) Status_Running
|----[ NO ] Emergency_Stop -----( SET ) Abort_Flag
|----[ NO ] Abort_Flag -----( CALL ) EMERGENCY_SUB

```

*// Блок 8: Підпрограма основного робочого циклу (MAIN_LOOP_SUB) -
частина 1*

```
|----[ NO ] MAIN_LOOP_START -----( SET ) MAIN_ACTIVE  
|----[ NO ] MAIN_ACTIVE -----( OUT ) Read_Axes  
|----[ NO ] Read_Axes ----- ( MOV ) Axes_Pos -> AXIS_REG  
|----[ NO ] Axes_Pos -----( SET ) Pos_Updated  
|----[ NO ] Pos_Updated -----( OUT ) Compute_Trajectory  
|----[ NO ] Compute_Trajectory -----( CALL ) TRAJ_CALC  
|----[ NO ] TRAJ_CALC_DONE -----( SET ) Traj_OK  
|----[ NO ] Traj_OK -----( OUT ) Execute_Motion  
|----[ NO ] Execute_Motion -----( OUT ) Feed_Control  
|----[ NO ] Feed_Control -----( CALL ) FEED_PID  
|----[ NO ] FEED_PID_DONE ----- ( SET ) Feed_OK  
|----[ NO ] Feed_OK ----- ( OUT ) Motion_Start  
|----[ NO ] Motion_Start ----- ( TON ) T_Move 0.1s  
|----[ NO ] T_Move -----( SET ) Move_Pulse  
|----[ NO ] Move_Pulse -----( OUT ) Axis_Step
```

*// Блок 9: Підпрограма основного робочого циклу (MAIN_LOOP_SUB) -
частина 2*

```
|----[ NO ] Axis_Step ----- ( CALL ) STEP_GENERATOR  
|----[ NO ] STEP_DONE ----- ( SET ) Step_OK  
|----[ NO ] Step_OK ----- ( OUT ) Update_Position  
|----[ NO ] Update_Position ----- ( MOV ) AXIS_REG -> Actual_Pos  
|----[ NO ] Actual_Pos ----- ( SET ) New_Pos  
|----[ NO ] New_Pos ----- ( CALL ) POSITION_CTRL  
|----[ NO ] POSITION_CTRL_DONE -----( SET ) Pos_Ctrl_OK  
|----[ NO ] Pos_Ctrl_OK ----- ( OUT ) Check_Limits  
|----[ NO ] Check_Limits ----- ( CALL ) LIMITS_CHECK  
|----[ NO ] LIMITS_OK -----( SET ) Limits_OK  
|----[ NO ] Limits_OK ----- ( OUT ) Continue_Cycle
```

```

|----[ NO ] Continue_Cycle ----- ( AND ) NOT Abort_Flag
|----[ NO ] Abort_Flag -----( RST ) Continue_Cycle
|----[ NO ] Continue_Cycle -----( RST ) MAIN_ACTIVE
|----[ NO ] MAIN_LOOP_SUB -----( RST ) MAIN_LOOP_START
|----[ NO ] MAIN_LOOP_SUB -----( OUT ) MAIN_LOOP_DONE
|----[ NO ] MAIN_LOOP_DONE -----( CALL ) LOG_EVENT
|----[ NO ] LOG_EVENT_DONE -----( RST ) MAIN_LOOP_DONE
|----[ NO ] MAIN_LOOP_COMPLETE -----( OUT ) Cycle_Complete

```

// Блок 10: Управління шпинделем та швидкістю

```

|----[ NO ] Spindle_Start ----- ( SET ) Spindle_On
|----[ NO ] Spindle_On ----- ( OUT ) Relay_Spindle
|----[ NO ] Spindle_On ----- ( TON ) T_Spinup 2s
|----[ NO ] T_Spinup ----- ( SET ) Spindle_Ready
|----[ NO ] Spindle_Ready ----- ( OUT ) Enable_Cutting
|----[ NO ] Speed_Sensor ----- ( MOV ) RPM -> RPM_Reg
|----[ NO ] RPM_Reg ----- ( CALL ) RPM_FILTER
|----[ NO ] RPM_OK ----- ( SET ) Speed_OK
|----[ NO ] Speed_OK ----- ( OUT ) Spindle_PID
|----[ NO ] Spindle_PID ----- ( CALL ) PID_SPEED
|----[ NO ] PID_SPEED_DONE -----( SET ) Speed_Control_OK
|----[ NO ] Speed_Control_OK -----( OUT ) Allow_Material_Cut
|----[ NO ] Overload_Detected -----( SET ) Spindle_Overload
|----[ NO ] Spindle_Overload -----( OUT ) Stop_Spindle
|----[ NO ] Stop_Spindle -----( RST ) Spindle_On
|----[ NO ] Stop_Spindle -----( CALL ) LOG_ERROR
|----[ NO ] LOG_ERROR_DONE -----( RST ) Stop_Spindle

```

// Блок 11: Контроль подач та ПІД-регулювання (FEED_PID)

```

|----[ NO ] Feed_PID ----- ( SET ) PID_Active
|----[ NO ] PID_Active ----- ( MOV ) SetFeed -> Feed_Set
|----[ NO ] Feed_Set ----- ( CALL ) PID_CALC

```

```

|----[ NO ] PID_CALC_DONE ----- ( SET ) PID_OK
|----[ NO ] PID_OK ----- ( OUT ) Analog_Out
|----[ NO ] Analog_Out ----- ( MOV ) PID_Out -> Vout
|----[ NO ] Vout -----( CALL ) DAC_WRITE
|----[ NO ] DAC_DONE ----- ( SET ) Output_Stable
|----[ NO ] Output_Stable ----- ( RST ) PID_Active
|----[ NO ] PID_Error ----- ( SET ) PID_Fault
|----[ NO ] PID_Fault ----- ( OUT ) Alarm_Triggered
|----[ NO ] PID_Fault ----- ( CALL ) PID_RESET
|----[ NO ] PID_RESET_DONE ----- ( RST ) PID_Fault
|----[ NO ] Feed_PID -----( RST ) PID_Active
|----[ NO ] Feed_PID_COMPLETE -----( OUT ) Feed_Ready
|----[ NO ] Feed_Ready ----- ( CALL ) LOG_EVENT
|----[ NO ] LOG_EVENT_DONE -----( RST ) Feed_Ready

```

// Блок 12: Обробка енкодерів та позиціонування

```

|----[ NO ] Encoder_X -----( MOV ) EncX -> EncRegX
|----[ NO ] Encoder_Y -----( MOV ) EncY -> EncRegY
|----[ NO ] Encoder_Z -----( MOV ) EncZ -> EncRegZ
|----[ NO ] EncRegX ----- ( CALL ) ENC_FILTER
|----[ NO ] EncRegY ----- ( CALL ) ENC_FILTER
|----[ NO ] EncRegZ ----- ( CALL ) ENC_FILTER
|----[ NO ] ENC_FILTER_DONE -----( SET ) Enc_OK
|----[ NO ] Enc_OK -----( OUT ) Position_Update
|----[ NO ] Position_Update -----( MOV ) EncRegX -> AxisX_Pos
|----[ NO ] Position_Update -----( MOV ) EncRegY -> AxisY_Pos
|----[ NO ] Position_Update -----( MOV ) EncRegZ -> AxisZ_Pos
|----[ NO ] AxisX_Pos -----( CALL ) POS_COMP
|----[ NO ] AxisY_Pos -----( CALL ) POS_COMP
|----[ NO ] AxisZ_Pos -----( CALL ) POS_COMP
|----[ NO ] POS_COMP_DONE -----( SET ) Pos_Valid

```

```

|----[ NO ] Pos_Valid ----- ( OUT ) Traj_Input
|----[ NO ] Pos_Valid -----( RST ) Enc_OK
    // Блок 13: Перевірка меж та безпечних зон
|----[ NO ] Traj_Input -----( CALL ) SAFE_ZONE_CHECK
|----[ NO ] SAFE_ZONE_OK -----( SET ) Zone_OK
|----[ NO ] Zone_OK -----( OUT ) Continue_Motion
|----[ NO ] SAFE_ZONE_VIOLATION -----( SET ) Zone_Violation
|----[ NO ] Zone_Violation -----( OUT ) Retract_Sequence
|----[ NO ] Retract_Sequence -----( CALL ) RETRACT_SUB
|----[ NO ] RETRACT_DONE ----- ( SET ) Retract_OK
|----[ NO ] Retract_OK ----- ( OUT ) Log_Event
|----[ NO ] Log_Event ----- ( CALL ) LOG_EVENT
|----[ NO ] LOG_EVENT_DONE ----- ( RST ) Log_Event
|----[ NO ] Zone_Violation ----- ( CALL ) ALARM_SUB
|----[ NO ] Zone_Violation ----- ( RST ) Zone_Violation
|----[ NO ] Continue_Motion ----- ( AND ) NOT Zone_Violation
|----[ NO ] Continue_Motion ----- ( OUT ) Resume_Move
|----[ NO ] Resume_Move ----- ( RST ) Retract_OK
|----[ NO ] Continue_Motion ----- ( RST ) SAFE_ZONE_OK
|----[ NO ] SAFE_ZONE_OK ----- ( RST ) Traj_Input

```

// Блок 14: Службова діагностика та логи

```

|----[ NO ] Display_Logs ----- ( CALL ) SHOW_LOGS
|----[ NO ] SHOW_LOGS_DONE ----- ( RST ) Display_Logs
|----[ NO ] LOG_EVENT ----- ( CALL ) SAVE_LOG
|----[ NO ] SAVE_LOG_DONE ----- ( RST ) LOG_EVENT
|----[ NO ] SelfTest_Request ----- ( CALL ) SELF_TEST
|----[ NO ] SELF_TEST_OK ----- ( SET ) SelfTest_Pass
|----[ NO ] SelfTest_Pass ----- ( OUT ) System_OK_LED
|----[ NO ] Diagnostic_Flag ----- ( CALL ) DIAG_ROUTINE
|----[ NO ] DIAG_DONE ----- ( RST ) Diagnostic_Flag

```

```

|----[ NO ] Error_Count ----- ( MOV ) 0 -> Error_Count
|----[ NO ] Error_Count ----- ( RST ) Error_Count
|----[ NO ] LOG_LEVEL ----- ( MOV ) 1 -> Verbosity
|----[ NO ] Verbosity ----- ( OUT ) Debug_Mode
|----[ NO ] Debug_Mode ----- ( CALL ) TRACE_ROUTINE
|----[ NO ] TRACE_DONE ----- ( RST ) Debug_Mode
|----[ NO ] System_OK_LED ----- ( RST ) Fault_Latched
|----[ NO ] System_OK_LED ----- ( OUT ) Ready_Display

    // Блок 15: Обробка аварій (EMERGENCY_SUB)
|----[ NO ] Emergency_Mode ----- ( SET ) EMG_ACTIVE
|----[ NO ] EMG_ACTIVE ----- ( OUT ) Cut_Power
|----[ NO ] Cut_Power ----- ( RST ) Relay_Spindle
|----[ NO ] Cut_Power ----- ( RST ) Axis_Drives
|----[ NO ] EMG_ACTIVE ----- ( OUT ) Sound_Alarm
|----[ NO ] Sound_Alarm ----- ( CALL ) SIREN_ON
|----[ NO ] SIREN_ON_DONE ----- ( RST ) Sound_Alarm
|----[ NO ] EMG_ACTIVE ----- ( CALL ) SAFE_STOP
|----[ NO ] SAFE_STOP_DONE ----- ( RST ) EMG_ACTIVE
|----[ NO ] EMG_ACTIVE ----- ( OUT ) HMI_Alert
|----[ NO ] Reset_Emergency ----- ( RST ) Emergency_Mode
|----[ NO ] Reset_Emergency ----- ( CALL ) RESET_SEQ
|----[ NO ] RESET_SEQ_DONE ----- ( RST ) Reset_Emergency
|----[ NO ] Alarm_Triggered ----- ( CALL ) LOG_ERROR
|----[ NO ] LOG_ERROR_DONE ----- ( RST ) Alarm_Triggered
|----[ NO ] EMG_ACTIVE ----- ( RST ) Abort_Flag
|----[ NO ] Abort_Flag ----- ( OUT ) System_Halted

    // Блок 16: Таймери та лічильники
|----[ NO ] Start_Timer ----- ( TON ) T_Start 1s
|----[ NO ] Cycle_Timer ----- ( TON ) T_Cycle 1s
|----[ NO ] Move_Timer ----- ( TON ) T_Move 100ms

```

```

|----[ NO ] Home_Timer ----- ( TON ) T_Home 500ms
|----[ NO ] Log_Timer ----- ( TON ) T_Log 5s
|----[ NO ] Retry_Timer ----- ( TON ) T_Retry 2s
|----[ NO ] Alarm_Timer ----- ( TON ) T_Alarm 0.5s
|----[ NO ] Counter_Op ----- ( CTU ) Op_Counter
|----[ NO ] Op_Counter ----- ( MOV ) Op_Counter -> Display
|----[ NO ] Reset_Counters ----- ( RST ) Op_Counter
|----[ NO ] T_Cycle ----- ( SET ) Cycle_Tick
|----[ NO ] Cycle_Tick ----- ( OUT ) Heartbeat
|----[ NO ] T_Log ----- ( SET ) TimeToLog
|----[ NO ] TimeToLog ----- ( CALL ) SAVE_LOG
|----[ NO ] Retry_Timer ----- ( RST ) Retry_Flag
|----[ NO ] Retry_Flag ----- ( OUT ) Retry_Action
|----[ NO ] T_Alarm ----- ( RST ) Alarm_Beep

```

// Блок 17: Збереження параметрів та резервне копіювання

```

|----[ NO ] SAVE_REQ ----- ( CALL ) SAVE_PARAMS
|----[ NO ] SAVE_PARAMS_DONE ----- ( RST ) SAVE_REQ
|----[ NO ] BACKUP_REQ ----- ( CALL ) BACKUP_CFG
|----[ NO ] BACKUP_CFG_DONE ----- ( RST ) BACKUP_REQ
|----[ NO ] SAVE_PARAMS ----- ( MOV ) Params -> NV_Mem
|----[ NO ] NV_Mem_Write ----- ( SET ) NV_OK
|----[ NO ] NV_OK ----- ( RST ) SAVE_REQ
|----[ NO ] NV_OK ----- ( OUT ) Config_OK
|----[ NO ] Config_OK ----- ( CALL ) LOG_EVENT
|----[ NO ] LOG_DONE ----- ( RST ) Config_OK
|----[ NO ] BACKUP_CFG ----- ( MOV ) NV_Mem -> Backup
|----[ NO ] Backup ----- ( SET ) Backup_OK
|----[ NO ] Backup_OK ----- ( RST ) BACKUP_REQ
|----[ NO ] Backup_OK ----- ( OUT ) Backup_LED
|----[ NO ] System_Ready ----- ( OUT ) Auto_Backup

```

```

|----[ NO ] Auto_Backup ----- ( CALL ) BACKUP_CFG
|----[ NO ] BACKUP_DONE ----- ( RST ) Auto_Backup
      // Блок 18: Завершальні служби та вихід
|----[ NO ] Cycle_Complete ----- ( SET ) Complete_Flag
|----[ NO ] Complete_Flag ----- ( OUT ) Finish_LED
|----[ NO ] Finish_LED ----- ( CALL ) DISPLAY_MSG
|----[ NO ] DISPLAY_MSG_DONE ----- ( RST ) Complete_Flag
|----[ NO ] System_Halted ----- ( SET ) Safe_State
|----[ NO ] Safe_State ----- ( OUT ) Power_Down
|----[ NO ] Power_Down ----- ( RST ) System_Enabled
|----[ NO ] Power_Down ----- ( CALL ) SHUTDOWN_SEQ
|----[ NO ] SHUTDOWN_DONE ----- ( RST ) Power_Down
|----[ NO ] SHUTDOWN_DONE ----- ( CALL ) LOG_EVENT
|----[ NO ] LOG_EVENT_DONE ----- ( RST ) SHUTDOWN_DONE
|----[ NO ] Exit_Command ----- ( SET ) Exit_Flag
|----[ NO ] Exit_Flag ----- ( CALL ) EXIT_PROC
|----[ NO ] EXIT_PROC_DONE ----- ( RST ) Exit_Flag
|----[ NO ] EXIT_PROC_DONE ----- ( OUT ) Program_Ended
|----[ NO ] Program_Ended ----- ( RST ) System_Enabled
|----[ NO ] Program_Ended ----- ( OUT ) End_Display

```

Розроблений програмний код забезпечує повну реалізацію алгоритмів керування фрезерним верстатом 6E463 з пантографом на основі ПЛК Modicon M221 TM221CE24T. Застосована структура програми включає окремі логічні підпрограми для ініціалізації, калібрування, виходу у нульову точку, виконання основного робочого циклу та обробки аварійних ситуацій, що дозволяє підвищити зрозумілість, надійність та гнучкість системи керування. Всі функції реалізовано із врахуванням специфічних характеристик верстата та вимог до точного позиціонування та безпечної роботи обладнання.

Застосування мови LD (Ladder Diagram) у поєднанні зі структурованою логікою дозволило побудувати програму, максимально наближену до апаратного принципу роботи релейно-контакторних схем, що значно полегшує супровід та подальшу модернізацію системи. Кожна ділянка коду має чітке функціональне призначення, а детальні коментарі українською мовою спрощують читання та адаптацію програми для майбутніх користувачів та інженерів.

Функціонування автоматизованої системи керування фрезерним верстатом 6E463 з пантографом базується на послідовній роботі виконавчих механізмів, сенсорних елементів та допоміжних вузлів, які взаємодіють відповідно до заданої логіки програмного алгоритму. Для наочного представлення цієї взаємодії отримана циклограма, що відображає часові інтервали активації осей руху, механізмів затискання, шпиндельного вузла, револьверної головки та пантографного копіюючого механізму. Вона дозволяє побачити узгодженість роботи окремих підсистем та оцінити коректність побудови алгоритмів керування.

Отримана циклограма побудована на основі розробленого програмного коду ПЛК та відображає фактичну послідовність дій, які забезпечують виконання операції копіювально-фрезерної обробки. У ній наведено основні сигнали, що генеруються контролером Modicon M221, включно з командами запуску, фіксації заготовки, запуску шпинделя, роботи осей X, Y, Z, синхронізації пантографа та виклику зміни інструменту. Чітка структуризація сигналів дозволяє оцінити перехідні процеси, взаємозв'язок між подіями та забезпечує можливість аналізу правильності реалізації режимоутворюючих алгоритмів.

Наведена циклограма підтверджує правильність взаємодії між модулем керування та механічними вузлами верстата, демонструючи, що запуск основних приводів, переміщення осей, синхронізація пантографа та дії допоміжних механізмів виконуються у суворо визначеній послідовності.

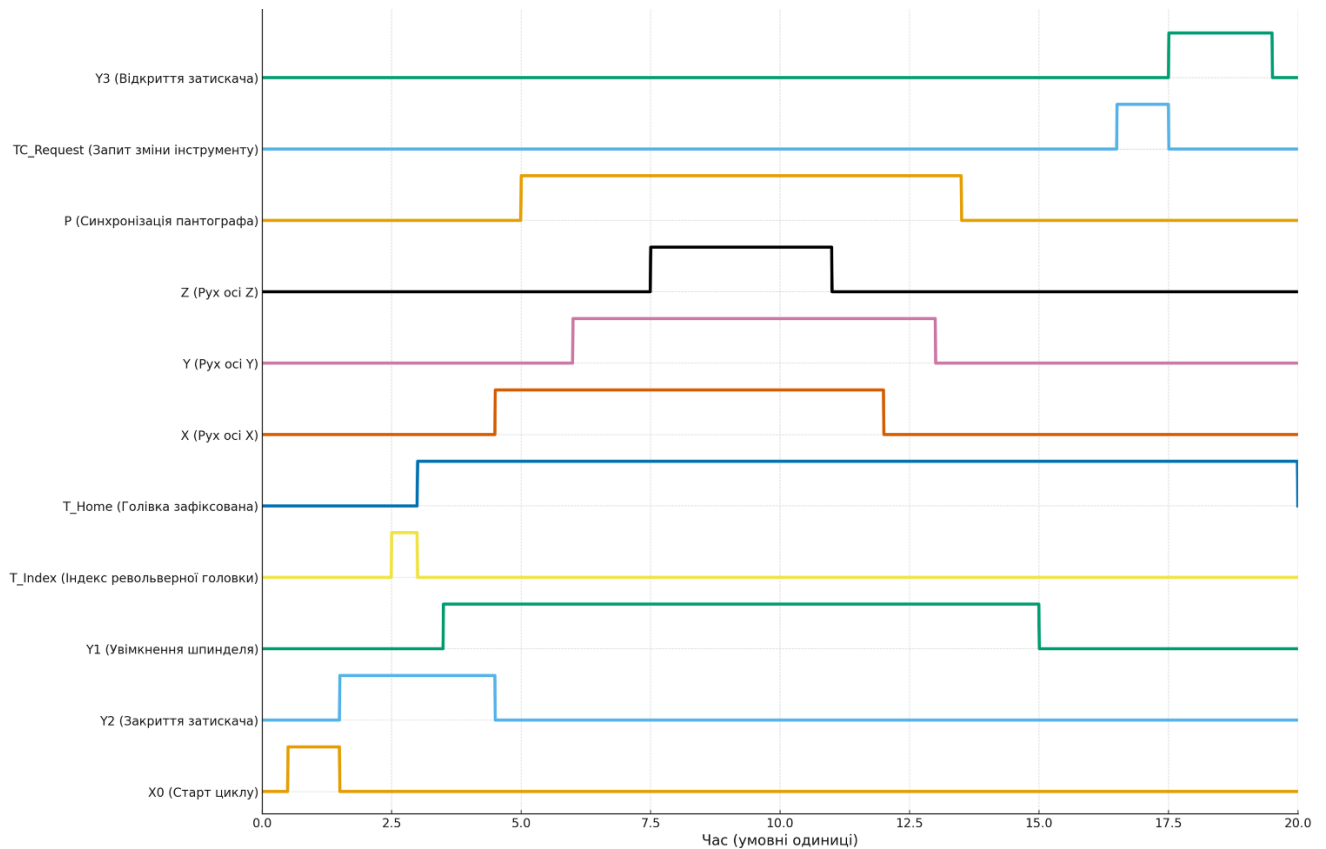


Рисунок 4.7 – Циклограма роботи фрезерного верстата з пантографом 6E463

Такий підхід гарантує стабільність процесу фрезерування, підтримує необхідний технологічний ритм та виключає можливість конфліктів між різними елементами системи. Завдяки цьому забезпечується як підвищена точність копіювання контуру, так і надійність роботи верстата у різних виробничих умовах.

Циклограма є невід’ємною частиною перевірки коректності алгоритмів керування перед розгортанням системи на реальному обладнанні. На основі її аналізу може бути проведене тонке налагодження програмної логіки, коригування затримок, оптимізація параметрів руху та удосконалення роботи механізмів відповідно до технологічних вимог.

Висновки за розділом

В даному розділі було розроблено та представлено удосконалену архітектуру системи керування фрезерним верстатом 6E463 з пантографом, що включає детальне моделювання структури, логічних зв'язків та послідовностей взаємодії між електронними, механічними та операторськими підсистемами. Створена функціональна схема дала змогу комплексно відобразити роботу всіх основних елементів системи, серед яких ПЛК Modicon M221 TM221CE24T, датчики положення, високошвидкісні канали для енкoderів, приводи лінійних осей та вузли пантографа. Такий підхід дозволив сформувати цілісне уявлення про взаємодію апаратних і програмних компонентів удосконаленої системи керування.

Особливу увагу у розділі приділено розробці алгоритмів керування, що стали основою програмної реалізації роботи верстата. Були структуровано виділені чотири ключові підпрограми: ініціалізації, калібрування та виходу у нульову точку, основного робочого циклу та обробки аварійних ситуацій. Для кожної з них створено блок-схеми та детальні текстові описи, що забезпечують прозорість логіки та можливість її практичної реалізації у мовах програмування PLC. Важливо, що алгоритми мають нелінійну структуру, містять умови, цикли та взаємозалежні переходи, що дозволяє забезпечити точність руху, синхронізацію механізмів та високий рівень безпеки.

Результатом роботи став повний програмний код для ПЛК, структурований відповідно до промислових стандартів та побудований на основі розроблених алгоритмів. Окрім цього, циклограма даної системи відображає послідовність і тривалість активації всіх основних сигналів, включно з рухами осей X, Y, Z, синхронізацією пантографа, роботою шпинделя та затискача. Це забезпечує можливість візуального контролю логіки роботи системи та підтверджує коректність програмної реалізації. Таким чином, у даному розділі повністю завершено розробку логічної та програмної частини системи керування, що створює основу для її подальшої реалізації та впровадження на практиці.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Вимоги охорони праці при роботі на фрезерному верстаті з пантографом

Вимоги охорони праці при роботі на автоматизованих фрезерних верстатах спрямовані на забезпечення безпечних умов праці, попередження травм та аварій, а також на підтримання надійної та стабільної роботи обладнання. У випадку фрезерного верстата 6E463 з пантографом, модернізованого шляхом впровадження програмованого логічного контролера Modicon M221, до загальних вимог додаються вимоги, пов'язані з роботою автоматизованих систем, електронних модулів керування, датчиків, виконавчих механізмів та програмного забезпечення. Всі працівники, допущені до роботи на верстаті, повинні пройти навчання, інструктаж з охорони праці та бути ознайомленими з правилами поведінки з автоматизованими системами керування [20].

До роботи допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд і володіють знаннями про правила експлуатації верстатів з числовим та комбінованим програмним керуванням. Оператор має працювати лише з технічно справним обладнанням і використовувати верстат та приладдя за призначенням. Робоче місце повинно бути чистим, без сторонніх предметів, а доступ до датчиків, щитів керування та виконавчих механізмів має залишатися вільним для обслуговування.

Особливу увагу необхідно приділяти стану електрообладнання, оскільки автоматизована система керування ПЛК Modicon M221 працює від джерела живлення 24 V DC. Забороняється працювати зі зруйнованими кабелями, оголеними провідниками, відсутнім або несправним заземленням, пошкодженими сигнальними лініями датчиків. Некоректна робота інтерфейсів зв'язку, таких як Ethernet чи RS-485, може спричинити неконтрольовані рухи виконавчих механізмів, тому їх справність необхідно перевіряти перед кожним запуском.

Усі блокувальні пристрої, кінцеві вимикачі, індуктивні датчики положення осей X, Y, Z та датчики пантографа повинні працювати в штатному режимі. Заборонено знімати будь-які огороження або механізми безпеки, оскільки модернізований верстат має як механічні, так і електронні засоби захисту. Відкриті кінематичні вузли, шпиндель, пантографічна система та точки передавання руху повинні бути надійно огорожені прозорими захисними екранами з ударостійкого матеріалу, що забезпечує хороший огляд робочої зони та захист від стружки [21].

Оператор повинен дотримуватися правил безпечного поводження з інструментом, пристосуваннями та системою кріплення заготовки. Особлива увага приділяється правильній установці фрез, контролю кріплення інструмента у шпинделі та відповідності інструменту режимам обробки. У разі модернізованого верстата система керування автоматично блокує запуск шпинделя, якщо фіксація інструмента недостатньо надійна або датчик не підтверджує коректне затискання. Цей механізм сприяє запобіганню аваріям та поломкам інструмента.

Перед початком роботи необхідно провести огляд верстата, перевірити стан мастильно-охолоджувальної системи, освітлення, надійність кріплення захисних кожухів, цілісність проводки та силових кабелів. Оператор має підготувати інструменти та засоби для очищення стружки, які використовуються лише після повної зупинки шпинделя. Необхідно перевірити роботу всіх елементів керування на холостому ході: коректність роботи органів керування, відсутність заїдань, справність приводів подач та точність реакції осей під час перемещень без навантаження.

Під час виконання робіт на автоматизованому верстаті слід уникати різких рухів, надмірних зусиль або втручання у роботу механізмів вручну. Підходити до верстата з увімкненим шпинделем заборонено. Переглядати якість поверхні деталі або проводити вимірювання можна лише після повної зупинки шпинделя та відведення інструмента у безпечну зону. Заборонено самотійно вносити зміни у програмне забезпечення контролера або відключати логічні блокування.

Після завершення роботи необхідно вимкнути живлення, зачекати на повну зупинку механізмів, виконати прибирання робочої зони, очистити верстат від

стружки та продуктів різання, вимкнути освітлення та повідомити керівника про можливі зауваження щодо роботи обладнання. Усі інструменти повинні бути складені у відведені місця, а засоби індивідуального захисту очищені та збережені належним чином.

5.2. Безпека при виникненні небезпечних та аварійних ситуацій

Особливість роботи автоматизованого фрезерного верстата 6E463 полягає у поєднанні мехатронних систем, ПЛК-керування та датчиків, які працюють у реальному часі. Це створює додаткові ризики, пов'язані з несправністю електронних компонентів або збоями у програмі керування. До основних небезпечних чинників належать: можливість ураження електричним струмом, рухомі частини верстата та ПЧ-приводів, висока температура інструмента, велика кількість стружки, шум, вібрації, а також неправильна робота датчиків або алгоритмів ПЛК [22].

Кожен оператор повинен розуміти принципи роботи автоматизованої системи та вміти розпізнавати проблемні стани верстата. Заборонено працювати у рукавицях або з вільним одягом, який може бути захоплений рухомими частинами. Наближення рук до обертального інструмента забороняється навіть у стані низьких обертів. Забороняється залишати увімкнений верстат без нагляду, оскільки система автоматизації може переходити між режимами роботи залежно від сигналів від датчиків.

У разі появи сторонніх шумів, вібрацій, запаху гару або диму необхідно негайно зупинити верстат через аварійну кнопку та відключити електроживлення. Будь-яка підозра на некоректну роботу ПЛК, датчиків або виконавчих механізмів також є підставою для миттєвого зупинення технологічного процесу. Система автоматизації може подавати сигнали про помилки на індикатори чи НМІ-панель, і ці повідомлення повинні бути проаналізовані перед повторним запуском обладнання.

У разі виникнення пожежі, короткого замикання, викиду стружки або розриву інструмента оператор має відключити живлення, відійти на безпечну відстань та повідомити керівництво. Використання води для гасіння електрообладнання категорично заборонено. У випадку займання магнієвих або алюмінієвих сплавів допустимо використовувати пісок або порошкові вогнегасники.

Під час раптового знеструмлення верстата необхідно залишатися на місці та не наближатися до рухомої частини до повної зупинки всіх механізмів. При виявленні проблем зі здоров'ям, подразнення очей або дихальних шляхів через стружку або аерозолі охолоджуючої рідини оператор повинен негайно припинити роботу та звернутися до медичного пункту.

Загалом дотримання вимог безпеки, уважність та коректне використання автоматизації значно знижують ризики під час роботи на модернізованому верстаті.

Висновки за розділом

У розділі було розглянуто комплекс вимог охорони праці, що стосуються модернізованого фрезерного верстата 6E463 з пантографом, обладнаного системою автоматизації на базі ПЛК Modicon M221. Особлива увага приділена питанням безпеки при роботі з електронними компонентами, сенсорами та виконавчими механізмами, що формують розширену систему керування. Наведені рекомендації та обмеження враховують як традиційні ризики роботи на фрезерних верстатах, так і специфічні небезпеки, пов'язані з впровадженням автоматизованих технологій.

Додатково було описано порядок дій у аварійних ситуаціях, що забезпечує безпечне обслуговування обладнання, мінімізацію ризиків для оператора та збереження працездатності системи. Дотримання вимог охорони праці є обов'язковою умовою стабільної роботи модернізованого верстата та гарантує максимальну ефективність застосування автоматизованої системи керування.

ВИСНОВОК

У ході виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження, спрямоване на модернізацію системи керування горизонтального копіювально-фрезерного верстата 6E463 з пантографом шляхом впровадження програмованого логічного контролера Modicon M221 TM221CE24T. На основі аналізу технічної документації, конструктивних особливостей верстата та сучасних підходів до автоматизації було сформовано вимоги до нової системи керування, визначено її ключові функціональні елементи та побудовано структурно-логічну схему дослідження. Проведений огляд ПЛК дав змогу порівняти їхні можливості та обґрунтувати вибір Modicon M221 як оптимального рішення для модернізації обладнання.

У практичній частині роботи розроблено повноцінну архітектуру оновленої системи керування, що включає інтеграцію ПЛК із датчиками положення, виконавчими механізмами, пантографом, приводами осей та системою безпеки. Створено набір алгоритмів: основний цикл обробки, підпрограма ініціалізації, підпрограма калібрування, алгоритм основного робочого циклу та підпрограма обробки аварій. Реалізовано структурований програмний код у вигляді LD-діаграм, що відповідає промисловим стандартам Schneider Electric та логіці роботи Modicon M221. Отримано циклограму, яка відображає динаміку процесу обробки, узгоджену з написаною програмою, реальними рухами осей та синхронізацією пантографа.

У результаті виконання роботи було створено повноцінний технічний проєкт автоматизованої системи керування, що дозволяє суттєво підвищити точність, безпеку та ефективність роботи фрезерного верстата 6E463. Модернізація, запропонована в дипломі, забезпечує можливість подальшого розширення функціоналу верстата та адаптації до сучасних вимог виробництва. Отримані результати демонструють практичну цінність застосування сучасних ПЛК у реконструкції застарілого обладнання та підтверджують ефективність використаного підходу до автоматизації.

Список використаних джерел

1. Кузнецов, А. В. Довідник фрезерних верстатів. Машинобудування. 1980.
2. Коцаренко, В. М. Металорізальні верстати. Київ: Вища школа. 1991.
3. Зайцев, В. А., Левченко, В. П. Копіювально-фрезерні верстати. Машинобудування. 1976.
4. Бондаренко, І. С. Кінематичні та електричні схеми металорізальних верстатів. Харків: НТУ «ХПІ». 1998.
5. Паспорт та технічний опис фрезерного верстата з пантографом 6Е463. Завод-виробник. 1985.
6. Митрофанов, С. П. Довідник верстатника. Машинобудування. 1985.
7. Коваленко, Ю. М. Технологія машинобудування (Т. 1–2). Київ: Техніка. 1998.
8. Копіювальні та гравірувальні верстати: конструкції та принципи роботи. У: Технічний довідник машинобудування. 1982.
9. Bolton W. Programmable Logic Controllers (6th ed.). Oxford: Newnes. 2015.
10. Petruzella F. D. Programmable Logic Controllers (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education. 2016.
11. Jack H. Automating Manufacturing Systems with PLCs. Retrieved from <https://engineeronadisk.com> 2017
12. International Electrotechnical Commission. IEC 61131-3: Programmable controllers – Part 3: Programming languages. Geneva: IEC. 2013.
13. Siemens AG. SIMATIC programmable controllers: System overview. Munich: Siemens. 2018.
14. Schneider Electric. PLCs and PACs: Technical guide. Rueil-Malmaison: Schneider Electric. 2019.
15. Резнік, Ю. М., Мельник, О. Г. Автоматизація технологічних процесів і виробництв. Київ: Ліра-К. 2018.
16. Глушков, В. М., Цигилик, О. В. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка». 2016.

17. Schneider Electric. Modicon M221 logic controller: Hardware guide. Rueil-Malmaison: Schneider Electric. 2019.
18. ДСТУ EN ISO 23125:2019. Верстати металорізальні. Безпечність. Верстати токарні. Вимоги. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2019
19. Журналов, В. М. Охорона праці. Київ: Кондор. 2017
20. Гнатюк, В. В. Безпека праці у машинобудуванні. Львів: Новий Світ – 2000.

ДОДАТОК А
МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота для здобуття
ступеню магістр на тему:

**«Удосконалення системи керування
фрезерного верстату з пантографом»**

Виконав: студент групи 6371м
Ярошинський Олександр Віталійович
Керівник: PhD, Козлов А.Ю.

Слайд 1 – Титульний слайд

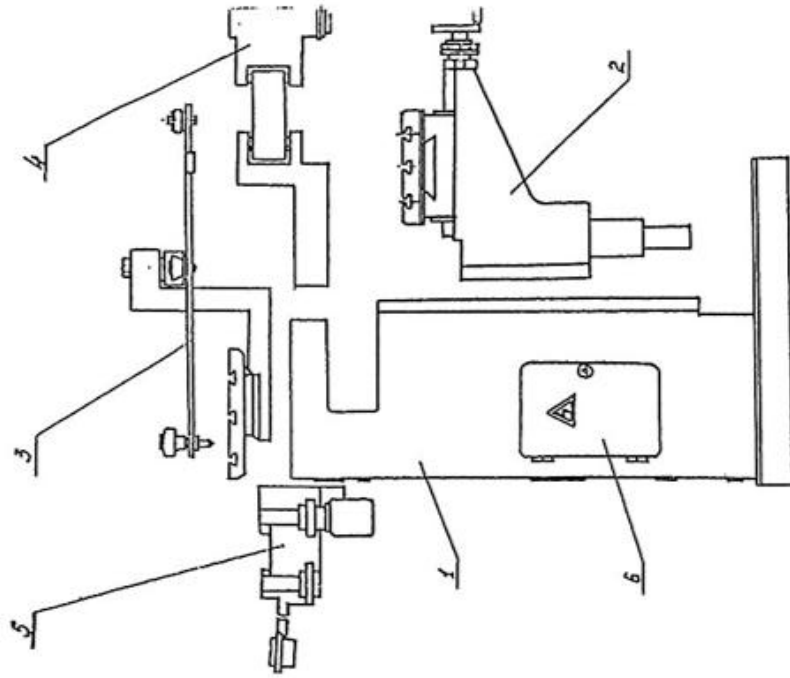
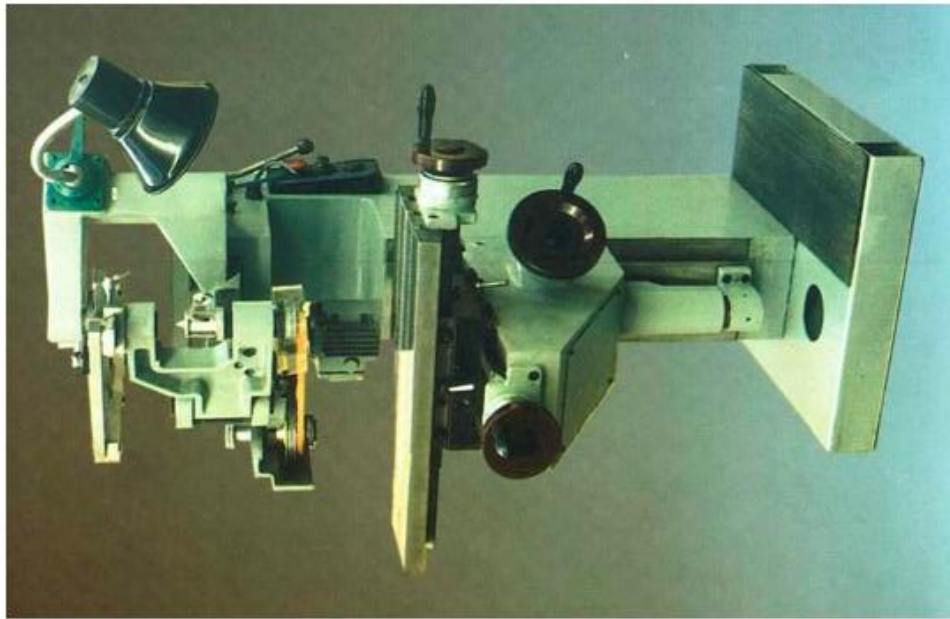
Мета роботи: підвищення точності, надійності та ефективності процесу фрезерування шляхом модернізації штатної системи керування з використанням програмованого логічного контролера.

Об’єкт дослідження: процес керування фрезерним верстатом з пантографом у процесі механічної обробки деталей.

Предмет дослідження: система керування фрезерного верстата з пантографом 6E463, методи та засоби її удосконалення шляхом впровадження програмованого логічного контролера.

Слайд 2 – Мета роботи, об’єкт дослідження та предмет дослідження

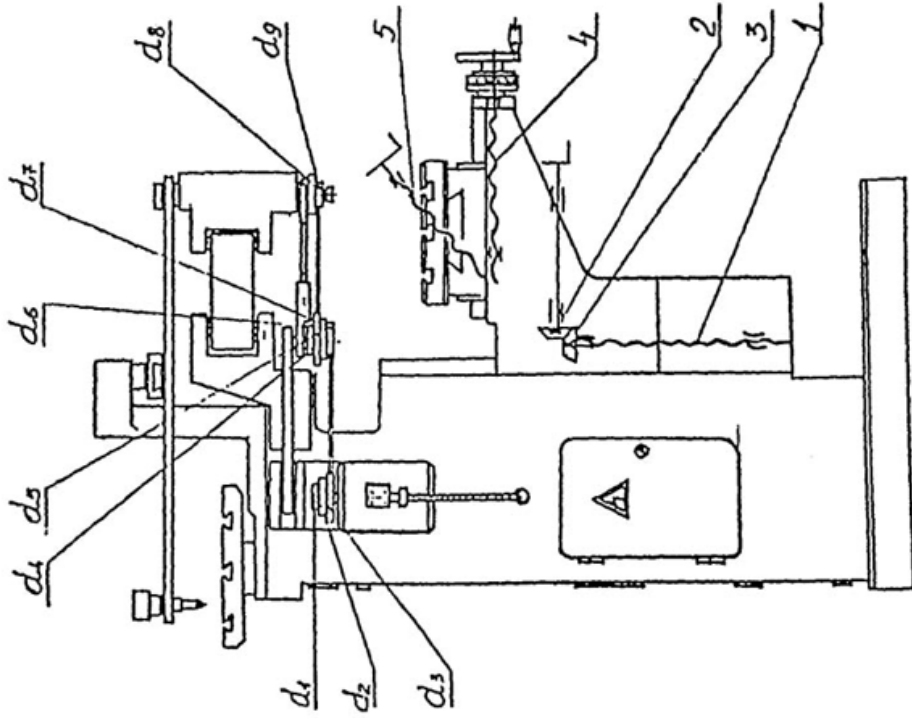
Фрезерний верстат 6Е463 з пантографом



Позначення: 1 – Станина; 2- Стіл; 3 – Пантограф;
4 – Підвіс шпинделя; 5 – Привод шпинделя;
6 – Розташування електрообладнання на верстаті

Слайд 3 – Фрезерний верстат 6Е463 з пантографом

Кінематична схема фрезерного верстату 6Е463



Позначення: d_1 — гвинт подачі вертикального переміщення супорта; d_2 — гайка гвинтової пари вертикальної подачі; d_3 — передавальний механізм приводу вертикального переміщення; d_4 — шупл копіювального механізму; d_5 — важіль або передавальна ланка пантографа; d_6 — шарнірний вузол пантографа; d_7 — направляюча горизонтального переміщення каретки; d_8 — гвинт горизонтальної подачі; d_9 — підшипниковий вузол гвинта подачі; 1 — станина верстата; 2 — робочий стіл; 3 — напрямні столу; 4 — шпиндельний вузол; 5 — затискний або копіювальний пристрій.

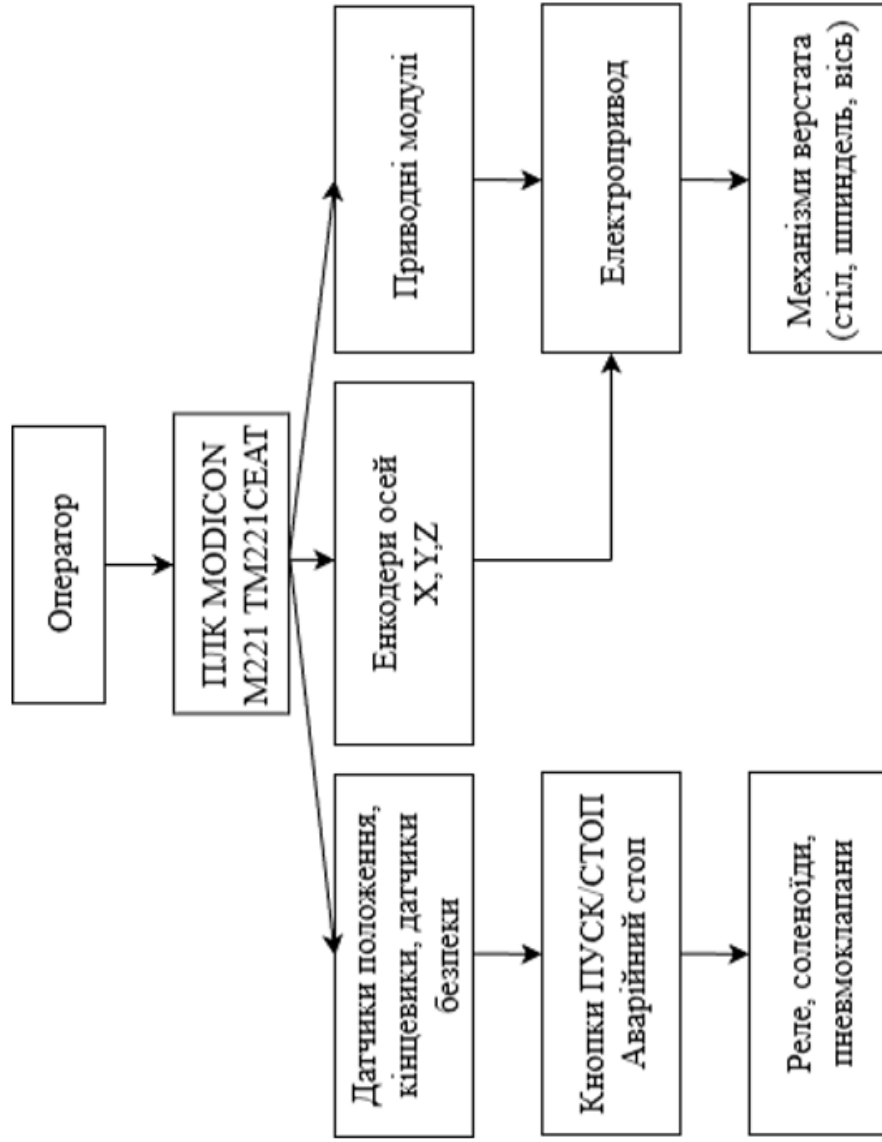
Слайд 4 — Кінематична схема фрезерного верстату 6Е463

Програмований логічний контролер Modicon M221 TM221CE24T



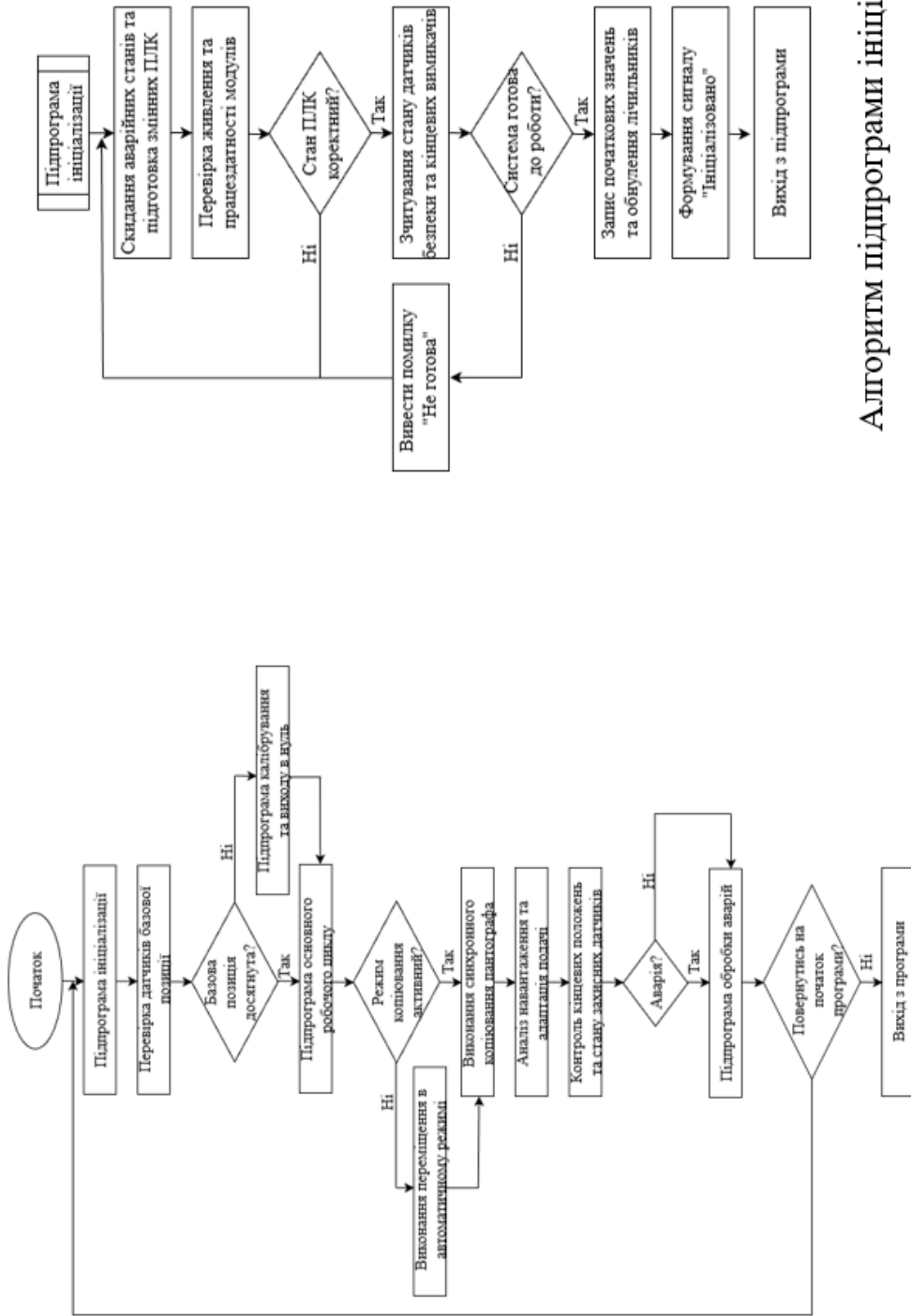
Слайд 5 – Програмований логічний контролер Modicon M221 TM221CE24T

Функціональна схема системи керування верстатом



Слайд 6 – Функціональна схема системи керування верстатом

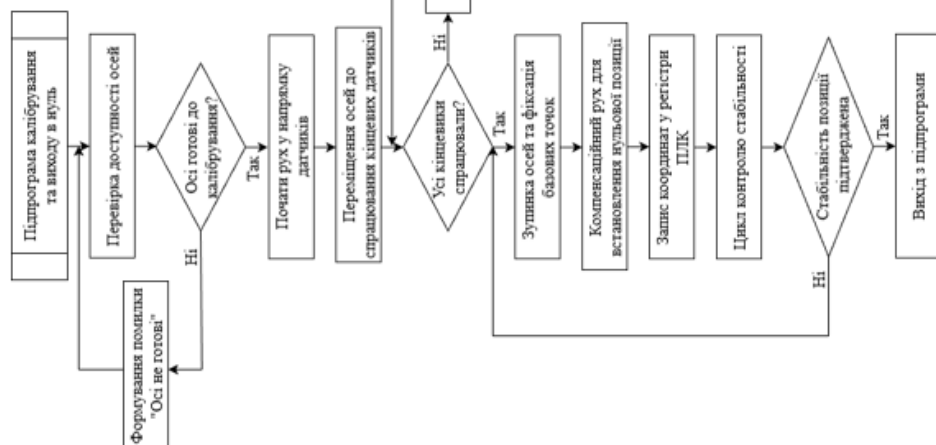
Основний алгоритм програми та алгоритм підпрограми



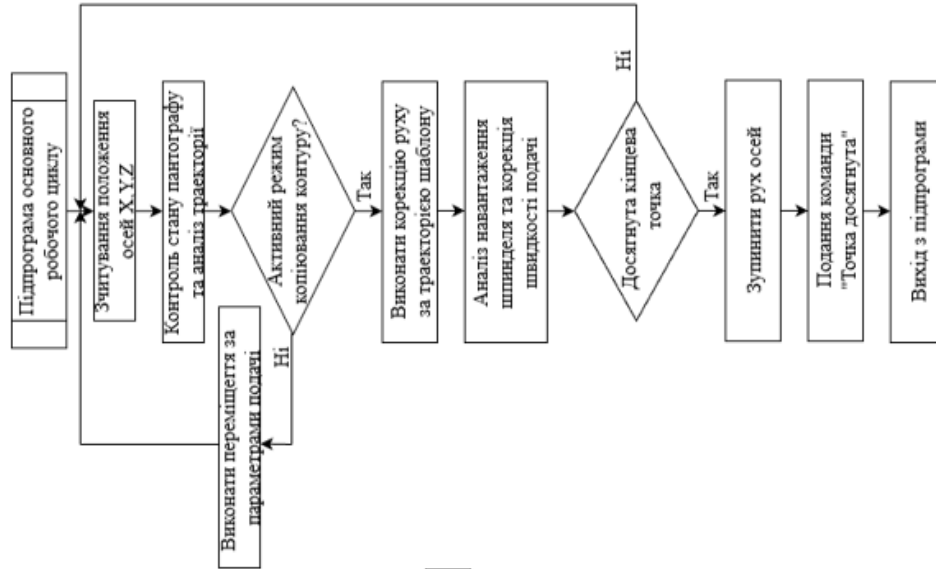
Алгоритм підпрограми ініціалізації

Слайд 7 – Основний алгоритм програми та алгоритм підпрограми

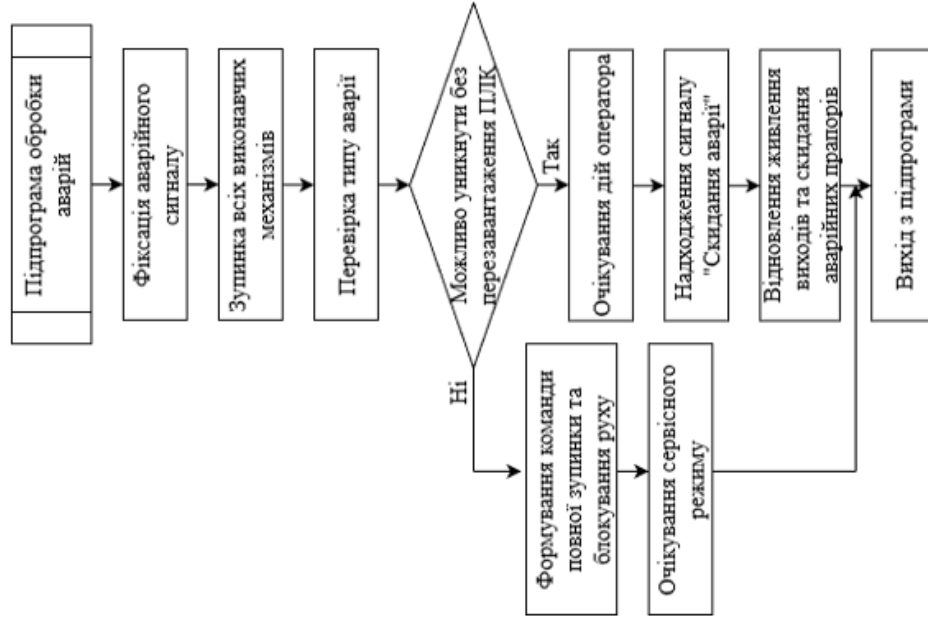
Алгоритми підпрограми



Алгоритм підпрограми калібрування та виходу в нуль

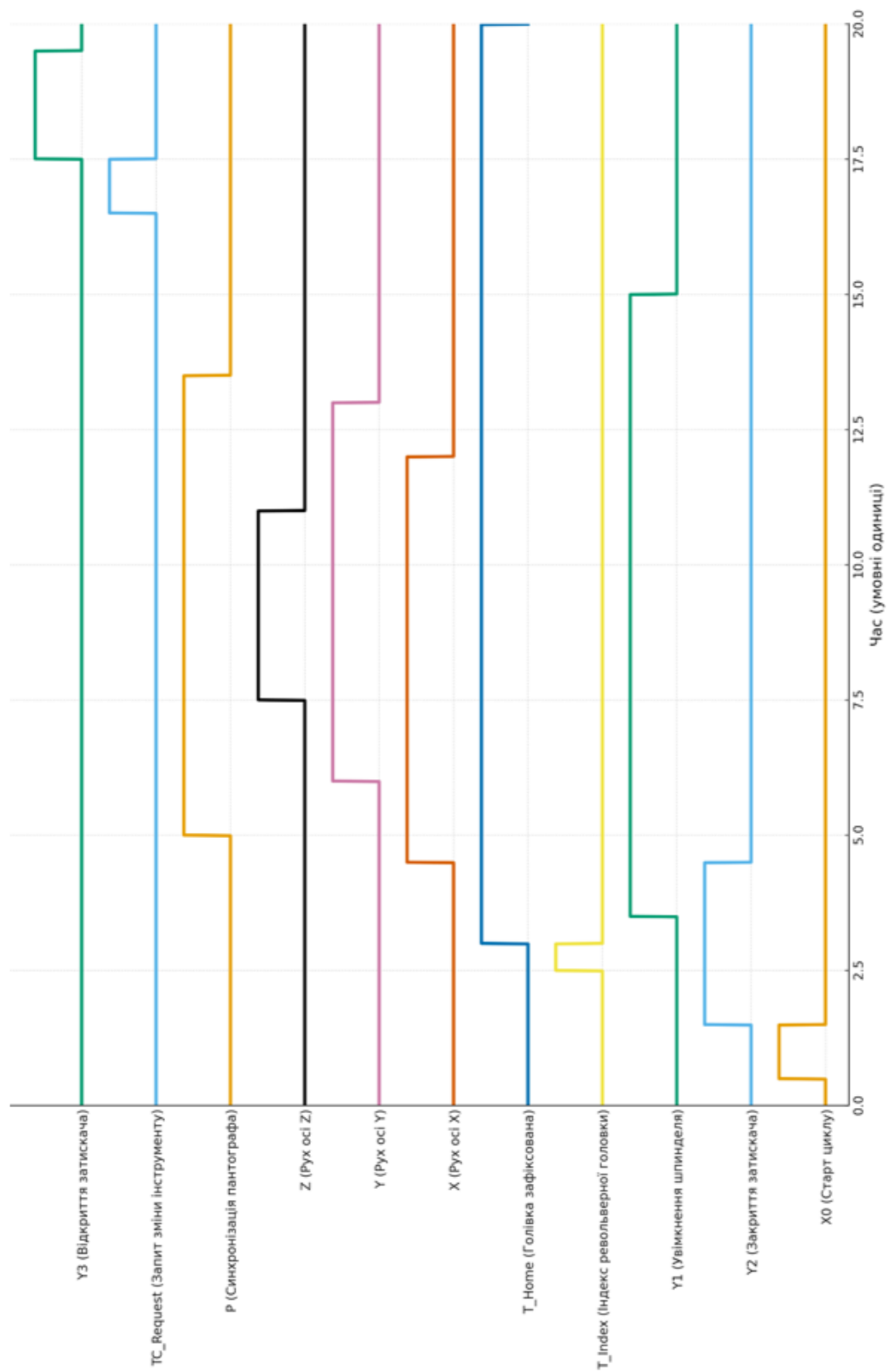


Алгоритм підпрограми основного робочого циклу



Алгоритм підпрограми обробки аварій

Циклограма роботи фрезерного верстата з пантографом 6E463



Слайд 9 – Циклограма роботи фрезерного верстата з пантографом 6E463

Висновки

- Проведено аналіз конструкції та штатної системи керування горизонтального копіювально-фрезерного верстата 6E463 з пантографом.
- Обґрунтовано доцільність використання програмованого логічного контролера Modicon M221 TM221CE24T як основи оновленої системи керування.
- Розроблено функціональну структуру автоматизованої системи керування з інтеграцією датчиків, приводів осей, пантографа та системи безпеки.
- Створено алгоритми роботи верстата та реалізовано програмний код у середовищі ПЛК з використанням LD-діаграм і циклограм роботи.