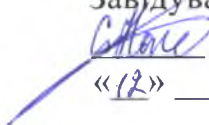


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

УДК 629.7.054

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувачка кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«12» 06 2026 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою
« Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні »
спеціальності 151 « Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології »
на тему: « Автоматизована система контролю та керування процесом
обробки деталей на верстатах ЧПК»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПБ-321

Степінчев Микита Олександрович

Керівник:

доцент, кандидат технічних наук, доцент

Терещенко Микола Федорович

Рецензент:

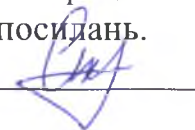
професор, доктор технічних наук, професор

Чиж І.Г.



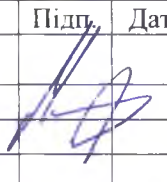
Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Степінчев М.О.



Київ – 2026

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломну роботу	2	
2	A4	ДРБ.ПБ-321.06.1720.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	117	Включає дода-тки Г, Д, Е, Ж
3	A1	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.000.ЗВ	Фрезерний верстат з ЧПК. Загальний вигляд	1	Креслення верстата
4	A2	ДРБ.ПБ-321.06.1720.02.000.СК	Шпиндельний вузол. Складальний кресленник	1	Вузол з датчиком DS18B20
5	A3	ДРБ.ПБ-321.06.1720.02.001	Корпус шпиндельного вузла	1	Деталювання
6	A3	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.001	Стіл робочий	1	Деталювання
7	A4	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.002	Гвинт КТП осі	1	Деталювання
8	A4	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.003	Кронштейн кріплення двигуна	1	Деталювання
9	A4	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.004	Гайка	1	Деталювання
10	A4	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.005	Опора	1	Деталювання
11	A4	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.006	Муфта	1	Деталювання
12	A2	ДРБ.ПБ-321.06.1720.03.000.СхФ	Структурно-функціональна схема системи керування	1	Схема автоматизації
13	A2	ДРБ.ПБ-321.06.1720.04.000.СхЕ	Схема електрична принципова підсистеми моніторингу	1	Підключення STM32
		ПБ	Підп.	Дата	ДРБ.ПБ-321.06.1720.00.000.ПЗ
Розробн.	Степінчев М.О.		Відомість дипломної роботи	Лист	Листів
Керівн.	Терещенко М. Ф.			2	116
Консульт.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП Гр. ПБ-321	
Н/контр.					
Зав.каф.	Стельмах Н.В.				

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

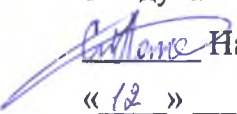
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

 **Наталія СТЕЛЬМАХ**

« 12 » 06 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студента

Степівчева Микити Олександровича

1. Тема роботи **«Автоматизована система контролю та керування процесом обробки деталей на верстатах ЧПК»**, керівник роботи Терещенко Микола Федорович, доцент, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від « 25 » 06 2026 р. № 1888-с _____

2. Подання студентом роботи 01 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення системи 220 В. Кількість координат керування – 3. Діапазон регулювання частоти обертання шпинделя 500–6000 об/хв. Максимальна потужність приводу шпинделя 12 кВт. Точність позиціонування $\pm 0,01$ мм. Система повинна забезпечувати автоматичне керування режимами різання, контроль параметрів обробки та моніторинг стану обладнання у режимі реального часу. Передбачається використання мікропроцесорного контролера та цифрових датчиків контролю.

4. Зміст пояснювальної записки

Конструкторська частина: Аналіз сучасних фрезерних верстатів з ЧПК та їх класифікація. Дослідження принципів автоматизованого керування технологічними процесами. Аналіз параметрів режимів різання та їх впливу на ефективність обробки.

Розробка функціонально-структурної схеми системи автоматизованого керування. Вибір мікропроцесорних засобів автоматизації, датчиків та виконавчих механізмів. Розрахунок режимів різання, параметрів електроприводів та системи керування. Розробка алгоритму автоматичного регулювання технологічного процесу.

Технологічна частина: Розрахунок технологічності конструкції системи. Розробка структурної схеми складання модуля керування. Технологічна карта складання системи. Аналіз ремонтпридатності та можливостей модернізації обладнання. Оцінка ефективності автоматизованого керування та енергоспоживання системи. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: Класифікація фрезерних верстатів з ЧПК. Функціонально-структурна схема автоматизованої системи керування. Структурна схема системи ЧПК. Алгоритм автоматичного керування режимами різання. Схема підключення датчиків та виконавчих механізмів. Принципова електрична схема системи керування. Графіки зміни параметрів режимів різання. Складальне креслення модуля керування. 3D-модель системи. Технологічна схема складання.

6. Дата видачі завдання «01» березня 2026 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних фрезерних верстатів з ЧПК та постановка задачі	01 березня – 05 березня 2026 р.	Виконано
2	Аналіз джерел та патентний пошук	06 – 12 березня 2026 р.	Виконано
3	Аналіз систем автоматизованого керування	13 – 18 березня 2026 р.	Виконано
4	Розробка функціонально-структурної схеми системи	19 березня – 24 березня 2026 р.	Виконано
5	Вибір контролера, датчиків та виконавчих механізмів	25 березня – 30 березня 2026 р.	Виконано
6	Розрахунок режимів різання	01 – 05 квітня 2026 р.	Виконано
7	Розрахунок параметрів електроприводів	06 – 11 квітня 2026 р.	Виконано
8	Розробка алгоритму автоматичного керування	12 – 18 квітня 2026 р.	Виконано
9	Розробка електричної схеми системи	19 – 25 квітня 2026 р.	Виконано
10	Проведення технологічних розрахунків	26 – 02 травня 2026 р.	Виконано
11	Розробка технологічної схеми складання	03 – 10 травня 2026 р.	Виконано
12	Оформлення пояснювальної записки та підготовка до захисту	11 – 01 червня 2026 р.	Виконано

Студент
Керівник




Микита СТЕПІЧЕВ
Микола ТЕРЕЩЕНКО

Дипломна робота присвячена розробці автоматизованої системи контролю та керування фрезерним верстатом з числовим програмним керуванням (ЧПК).

У роботі проведено аналіз сучасних фрезерних верстатів з ЧПК та існуючих систем автоматизованого контролю і керування технологічними процесами. Розглянуто принципи функціонування систем моніторингу, методи збору та обробки даних, а також особливості автоматичного регулювання режимів різання.

Розроблено структурну схему автоматизованої системи контролю та керування фрезерним верстатом з ЧПК, систему моніторингу технологічних параметрів та алгоритми аналізу режимів різання. Виконано математичне та імітаційне моделювання роботи системи, що дозволило оцінити її ефективність та точність функціонування.

У технологічній частині проведено розрахунок розмірного ланцюга, розроблено технологічну та структурну схеми складання фрезерного верстата з ЧПК, маршрутні карти складання основних вузлів.

Результати проведених досліджень підтвердили ефективність запропонованої системи та доцільність її використання для підвищення точності, продуктивності та надійності роботи фрезерного обладнання з ЧПК.

Ключові слова: фрезерний верстат з ЧПК, автоматизована система керування, система моніторингу, технологічний процес, режими різання, мікропроцесорний контролер, автоматизація виробництва, позиціонування, моделювання, система контролю.

ANNOTATION

The diploma project is devoted to the development of an automated monitoring and control system for a CNC milling machine.

The project includes an analysis of modern CNC milling machines and existing automated process control systems. The principles of monitoring systems operation, data acquisition and processing methods, as well as automatic control of cutting parameters are considered.

A structural diagram of the automated control system, a technological parameter monitoring system, and algorithms for analyzing cutting conditions have been developed. Mathematical and simulation models of the system were created to evaluate its performance, efficiency, and operational accuracy.

In the technological part of the project, a dimensional chain calculation was performed, technological and structural assembly schemes of the CNC milling machine were developed, assembly route cards for the main units were prepared, and occupational safety issues were analyzed with corresponding safety measures developed and proposed.

The obtained results confirm the efficiency of the proposed system and demonstrate the feasibility of its implementation for improving the accuracy, productivity, and reliability of CNC milling equipment.

Keywords: CNC milling machine, automated control system, monitoring system, technological process, cutting parameters, microprocessor controller, industrial automation, positioning, simulation, control system.

3MICT

ANNOTATION	6
3MICT	7

ВСТУП	9
I. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ В ВЕРСТАТАХ З ЧПУ	12
1.1 Огляд сучасних фрезерних верстатів з ЧПК та їх класифікація	12
1.2. Принципи автоматизованого керування технологічними процесами	15
1.3. Основні параметри режимів різання (швидкість, подача, глибина різання).....	17
1.4. Аналіз існуючих систем контролю та моніторингу, їх переваг і недоліків	22
1.5. Обґрунтування розробки, вибір системи контролю та керування та постановка задачі проектування	26
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ	29
2.1. Розробка загальної структури системи автоматизованого керування	29
2.2. Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення системи.....	31
2.3. Розробка функціональної схеми системи	32
2.4. Розробка алгоритму роботи системи керування	34
2.5. Проєктування структурної та принципової схем мікропроцесорної системи	36
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	38
3.1. Методи збору та обробки даних.....	38
3.2. Моніторинг параметрів роботи верстата в реальному часі	41
3.3. Алгоритми аналізу параметрів режимів різання.....	43
3.4. Програмна реалізація системи.....	46
3.5. Розробка інтерфейсу користувача.....	49
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ	51
4.1. Розгляд математичної моделі процесу різання	51
4.2. Імітаційне моделювання роботи системи.....	54
4.3. Оцінка ефективності та точності системи	56
4.4. Порівняльний аналіз із існуючими аналогами.....	58
ВИСНОВКИ ДО КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ЧАСТИНИ	59
II. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	61
РОЗДІЛ II. 2.1 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА СКЛАДАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ.....	62
2.1.1 Оцінка технологічності конструкції	62
2.1.2 Розробка технологічної оснастки.....	64
2.1.3. Розрахунок розмірного ланцюга	69

2.1.4 Розробка технологічної схеми складання.....	72
2.1.5 Розробка структурної схеми складання.....	74
2.1.6. Розробка маршрутних карт складання.....	76
ВИСНОВКИ ДО ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЧАСТИНИ	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
ДОДАТКИ	86
ДОДАТОК А	87
ДОДАТОК Б.....	88
ДОДАТОК В	89
ДОДАТОК Г	91
ДОДАТОК Ґ	92
ДОДАТОК Д	93
ДОДАТОК Е.....	94
ДОДАТОК Є.....	95
ДОДАТОК Ж.....	96
ДОДАТОК З	97
ДОДАТОК И	98
ДОДАТОК І.....	99
ДОДАТОК Ї.....	100
ДОДАТОК Й.....	101
ДОДАТОК К	102
ДОДАТОК Л	108
ДОДАТОК М.....	111

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку машинобудування та приладобудування особливого значення набуває автоматизація виробничих процесів, спрямована на підвищення продуктивності праці, покращення якості продукції та зниження

виробничих витрат. Одним із найбільш ефективних засобів реалізації автоматизованого виробництва є використання верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), які забезпечують високу точність обробки деталей, стабільність технологічного процесу та можливість швидкого переналагодження обладнання для виготовлення виробів різної складності.

Фрезерні верстати з ЧПК широко застосовуються в машинобудуванні, приладобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловості, оскільки дозволяють виконувати складні технологічні операції з високою точністю та продуктивністю. Проте ефективність роботи такого обладнання значною мірою залежить від якості системи контролю та керування, яка повинна забезпечувати своєчасне отримання інформації про стан технологічного процесу, аналіз параметрів роботи обладнання та автоматичне коригування режимів обробки.

Сучасні тенденції розвитку автоматизованих систем керування пов'язані з використанням цифрових технологій, мікропроцесорних засобів, промислових мереж передачі даних, систем моніторингу в реальному часі та технологій Індустрії 4.0. Впровадження таких рішень дозволяє підвищити надійність роботи обладнання, зменшити вплив людського фактора, забезпечити прогнозування технічного стану вузлів та оптимізувати режими роботи верстатів.

Актуальність теми дипломної роботи обумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування фрезерних верстатів з ЧПК шляхом впровадження сучасних автоматизованих систем контролю та керування, які забезпечують безперервний моніторинг технологічних параметрів, аналіз стану обладнання та автоматичне регулювання режимів різання.

Метою дипломної роботи є розробка автоматизованої системи контролю та керування фрезерним верстатом з числовим програмним керуванням, що забезпечує підвищення точності обробки, продуктивності обладнання та надійності технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- Провести огляд та аналіз конструкцій та принципів роботи сучасних фрезерних верстатів з ЧПК;
- дослідити існуючі системи автоматизованого контролю та керування технологічними процесами;
- розробити структурну схему автоматизованої системи контролю та керування;
- виконати розрахунок основних параметрів режимів різання;

- розробити систему моніторингу технологічних параметрів верстата;
- розглянути математичну та імітаційну моделі роботи системи;
- виконати розрахунок розмірного ланцюга складального вузла;
- розробити технологічну та структурну схеми складання;
- оцінити ефективність запропонованої системи контролю та керування.

Структурно дипломна робота складається зі пояснювальної записки : вступу, конструкторської та технологічної частин, висновків, списку використаних джерел та креслень і додатків.

I. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ В ВЕРСТАТАХ З ЧПУ

1.1 Огляд сучасних фрезерних верстатів з ЧПК та їх класифікація

Фрезерні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) є одним із найбільш технологічно розвинених видів металорізального обладнання для механічної обробки деталей складної геометричної форми [1]. Використання

верстатів з ЧПК забезпечує високу точність виготовлення, автоматизацію процесів та можливість інтеграції у гнучкі виробничі системи [2].

Основною особливістю цього обладнання є автоматичне керування переміщенням робочих органів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке формує траєкторію руху інструменту відповідно до заданої керуючої програми [3]. Це мінімізує вплив людського фактора та стабілізує параметри технологічного процесу [4].

Сучасні фрезерні верстати з ЧПК забезпечують:

- високу точність позиціонування інструменту;
- автоматичну зміну інструменту та заготовок;
- багатокоординатну (включаючи 3-, 4- та 5-осьову) обробку;
- можливість адаптивного керування та інтеграцію у CAD/CAM/CAE-системи;
- дистанційний моніторинг і технічну діагностику [5].



Рис. 1.1.1– Загальний вигляд фрезерного верстата з ЧПК[1]

За конструктивними особливостями фрезерні верстати з ЧПК класифікують на: вертикально-фрезерні, горизонтально-фрезерні, універсальні, порталні та багатокоординатні оброблювальні центри [6].



Рис. 1.1.2– Класифікація фрезерних верстатів з ЧПК

Вертикально-фрезерні верстати мають вертикальне розташуванням шпинделя і застосовуються для обробки площин, пазів та складних контурів. Горизонтально-фрезерні верстати завдяки підвищеній жорсткості конструкції використовуються для обробки масивних деталей [7]. Особливого поширення набули багатокоординатні верстати (оброблювальні центри), які дозволяють виконувати комплексну просторову обробку складних деталей без повторного базування заготовки.

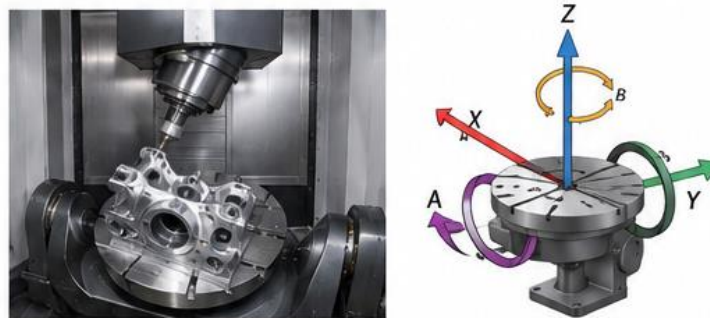


Рис. 1.1.3– 5-осьовий обробний центр з ЧПК[8]



Рис. 1.1.4– Сучасний автоматизований фрезерний верстат з ЧПК[9]

1.2. Принципи автоматизованого керування технологічними процесами

Автоматизоване керування технологічними процесами є основою функціонування сучасних верстатів з числовим програмним керуванням та забезпечує точне виконання операцій механічної обробки з мінімальним втручанням оператора. Використання автоматизованих систем керування дозволяє підтримувати задані параметри технологічного процесу, підвищувати точність обробки деталей, зменшувати вплив людського фактора та забезпечувати стабільність виробництва [2].

Принципи автоматизованого керування визначають основні закономірності функціонування систем автоматизації та забезпечують узгоджену роботу всіх елементів технологічного обладнання. Реалізація цих принципів дає можливість ефективно контролювати параметри процесу обробки та оперативно реагувати на зміни режимів роботи обладнання [13].

До основних принципів автоматизованого керування технологічними процесами належать:

1. Принцип програмного керування — виконання процесу відповідно до заздалегідь сформованої керуючої програми (координати руху, швидкість подачі, частота обертання шпинделя тощо).
2. Принцип зворотного зв'язку — постійне отримання інформації про фактичний стан об'єкта від датчиків (положення, швидкості, температури) та порівняння її із заданими параметрами для корекції помилок.

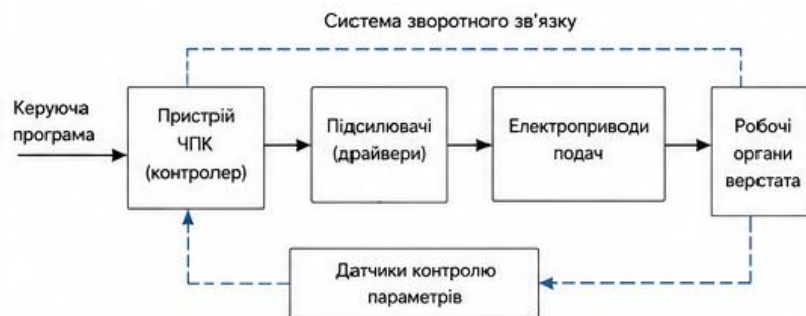


Рис. 1.2.1 – Структурна схема автоматизованої системи керування верстатом з ЧПК

3. Принцип автоматичного регулювання — підтримання заданих параметрів шляхом автоматичного усунення відхилень, що виникають через зміну навантаження або зношування інструменту.

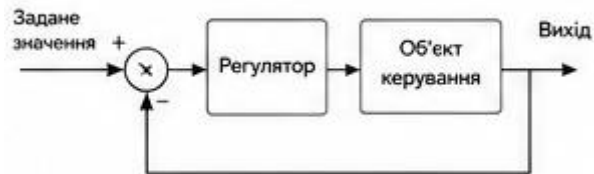


Рис. 1.2.2 – Замкнена система автоматичного регулювання із зворотним зв'язком

4. Принцип адаптивності — здатність системи самостійно змінювати режими роботи (наприклад, подачу) залежно від умов обробки в реальному часі.

5. Принцип безперервного контролю — постійний моніторинг стану обладнання для запобігання аварійним ситуаціям.

Структурно робота замкненої системи автоматичного регулювання здійснюється за таким алгоритмом: введення програми → обробка команд контролером → формування керуючих сигналів → виконання операції приводами → контроль параметрів датчиками зворотного зв'язку → аналіз відхилень та їх автоматичне коригування [17].



Рис. 1.2.3 – Алгоритм роботи системи автоматизованого керування

Для оцінки динамічних характеристик та аналізу стабільності систем автоматичного керування використовується передатна функція аперіодичної ланки першого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1.1)$$

де K — коефіцієнт підсилення; T — стала часу системи; s — оператор Лапласа.

Одним із головних показників ефективності системи є похибка позиціонування, яка визначається як:

$$\Delta X = X_z - X_f \quad (1.2)$$

де ΔX — похибка позиціонування; X_z — задане положення; X_f — фактичне положення.

Проведений аналіз показав, що ефективність автоматизованого керування технологічними процесами забезпечується реалізацією принципів програмного керування, зворотного зв'язку, автоматичного регулювання, безперервного контролю та адаптивності. Використання замкнених систем автоматичного керування дозволяє забезпечити високу точність позиціонування, стабільність технологічного процесу, ефективне використання обладнання та підвищення продуктивності фрезерних верстатів з ЧПК [2]. Отримані результати підтверджують доцільність застосування сучасних автоматизованих систем керування під час розроблення систем

1.3. Основні параметри режимів різання (швидкість, подача, глибина різання)

Ефективність механічної обробки деталей значною мірою визначається правильним вибором режимів різання, які включають швидкість різання, подачу та глибину різання. Проведений аналіз технологічних процесів механічної обробки показав, що зазначені параметри безпосередньо впливають на продуктивність обробки, точність виготовлення деталей, якість обробленої поверхні та ресурс ріжучого інструмента.

Режими різання підбираються з урахуванням: матеріалу заготовки; типу ріжучого інструмента; виду механічної обробки; конструктивних особливостей верстата; потужності приводу шпинделя; жорсткості технологічної системи [34].

До основних параметрів режимів різання належать: швидкість різання; частота обертання шпинделя; подача; глибина різання; продуктивність обробки [12].

Швидкість різання (V)

Швидкість різання характеризує інтенсивність відносного руху різальної кромки інструмента відносно поверхні заготовки. Вона безпосередньо впливає на температуру в зоні різання, зношування інструмента та якість обробленої поверхні.

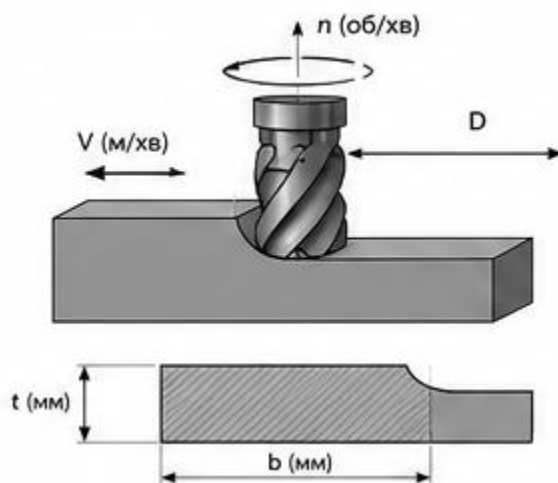


Рис. 1.3.1– Схема визначення швидкості різання при фрезеруванні[11]

Для фрезерної обробки швидкість різання визначається за формулою:

$$V = \frac{(\pi \cdot D \cdot n)}{1000} \quad (1.3)$$

де: V – швидкість різання, м/хв; D – діаметр інструмента, мм; n – частота обертання шпинделя, об/хв.

2. Подача (S)

Подача визначає швидкість переміщення інструмента відносно заготовки під час механічної обробки. Величина подачі впливає на продуктивність процесу, навантаження на привід шпинделя та якість поверхні деталі .

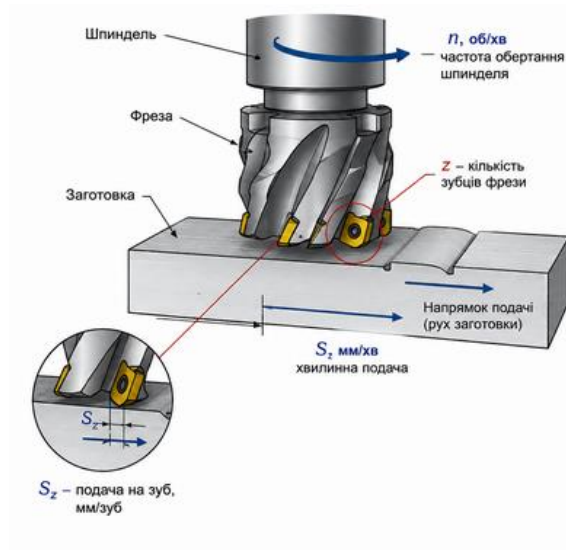


Рис. 1.3.2– Схема визначення подачі при фрезеруванні[12]

Хвилинна подача визначається за формулою :

$$S = S_z \cdot z \cdot n \quad (1.4)$$

де: S – хвилинна подача, мм/хв; S_z – подача на зуб, мм/зуб; z – кількість зубів фрези; n – частота обертання шпинделя, об/хв. [11].

3. Глибина різання (t)

Глибина різання характеризує товщину шару матеріалу, який видаляється за один прохід інструмента. Даний параметр безпосередньо впливає на продуктивність процесу, силу різання та навантаження на шпиндельний вузол.

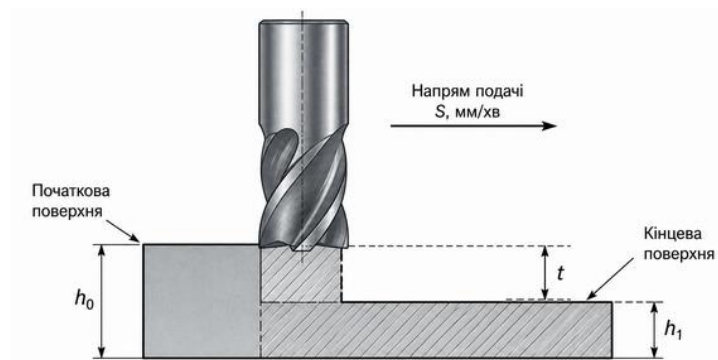


Рис. 1.3.3– Схема визначення глибини різання [11].

Глибина різання визначається за формулою:

$$t = \frac{(D - d)}{2} \quad (1.5)$$

де: t – глибина різання, мм; D – початковий розмір заготовки; d – кінцевий розмір після обробки [12].

4. Продуктивність процесу фрезерування

Продуктивність процесу фрезерування визначається об'ємом матеріалу, що видаляється за одиницю часу.

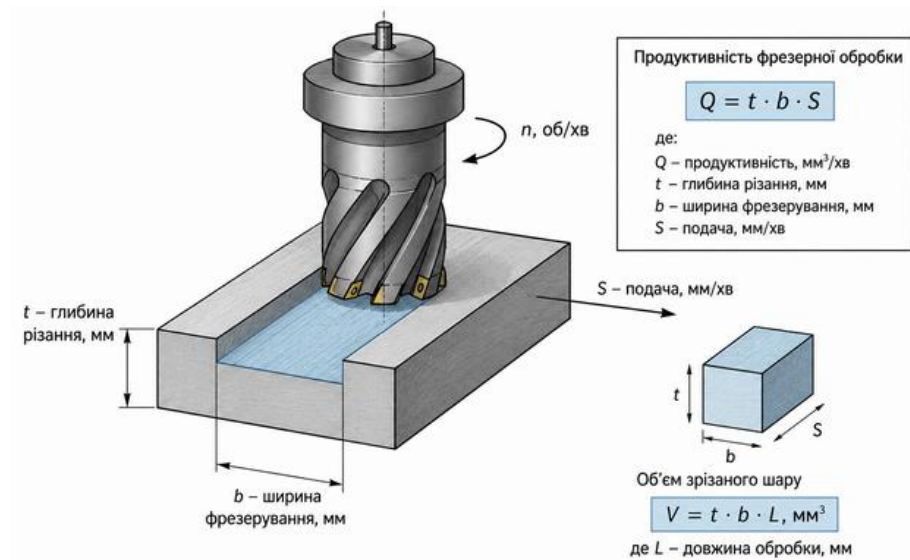


Рис. 1.3.4– Схема визначення продуктивності фрезерної обробки[15]

Продуктивність визначається за формулою:

$$Q = t \cdot b \cdot S \quad (1.6)$$

де: Q — продуктивність обробки, $\text{мм}^3/\text{хв}$; t — глибина різання, мм; b — ширина фрезерування, мм; S — подача, $\text{мм}/\text{хв}$ [15].

5. Потужність різання

Для оцінки навантаження на привід шпинделя визначають потужність різання.

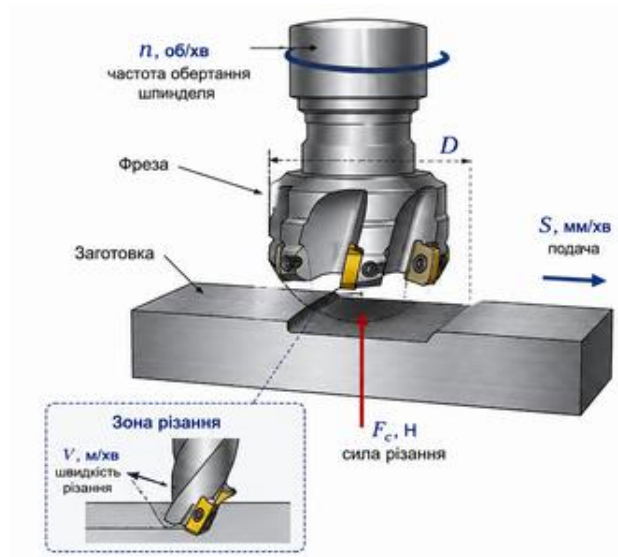


Рис. 1.3.5– Схема визначення потужності різання[16]

Потужність різання визначається за формулою:

$$N = \frac{F_c \cdot V}{60000} \quad (1.7)$$

де: N — потужність різання, кВт; F_c — сила різання, Н; V — швидкість різання, м/хв [16].

Продуктивність автоматизованої системи :

$$Q_{\text{сист}} = \frac{60}{t_o + t_d} \quad (1.8)$$

де t_o — основний технологічний час обробки (хв); t_d — допоміжний час (хв) [34].

Оптимальний вибір зазначених параметрів дозволяє максимізувати об'єм знятого матеріалу за одиницю часу при дотриманні обмежень щодо потужності приводу верстата та стійкості інструменту. Нормативні орієнтири для обробки типових матеріалів наведено в таблицях 1.3.1 та 1.3.2.

Табл. 1.3.1 – Режими різання при фрезеруванні сталі Ст45 (твердосплавний інструмент)

Вид обробки	Швидкість різання V (м/хв)	Подача S (мм/хв)	Глибина різання t (мм)
Чорнова	80 – 120	400 – 800	1.5 – 3.0
Напівчистова	120 – 160	250 – 500	0.8 – 1.5

Чистова	160 – 220	100 – 300	0.2 – 0.8
---------	-----------	-----------	-----------

Табл. 1.3.2 – Режими різання при обробці алюмінію (Al 6061)

Вид обробки	V (м/хв)	S (мм/хв)	t (мм)
Чорнова	200 – 400	600 – 1500	2 – 4
Чистова	400– 800	300– 800	0.2– 1

У результаті встановлено, що режими різання є одним із ключових факторів ефективності механічної обробки деталей на верстатах з ЧПК. Проведені розрахунки показали, що правильний вибір швидкості різання, подачі та глибини різання забезпечує підвищення продуктивності обробки, стабільність технологічного процесу та зменшення зношування ріжучого інструмента. Отримані результати свідчать про доцільність використання автоматизованих систем контролю та керування для оптимізації режимів різання та підвищення ефективності сучасного машинобудівного виробництва.

1.4. Аналіз існуючих систем контролю та моніторингу, їх переваг і недоліків

Сучасні системи контролю та моніторингу технологічних процесів широко застосовуються в промисловості для забезпечення контролю параметрів обладнання, підвищення точності керування та зменшення впливу людського фактора. У контексті автоматизованих систем керування, зокрема верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), моніторинг відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності роботи обладнання, підвищенні продуктивності виробництва та забезпеченні високої якості готової продукції [2].

Сьогодні можна виділити кілька основних типів систем контролю та моніторингу, кожен з яких має власні переваги та недоліки залежно від сфери застосування, складності виробничого процесу та вимог до функціональності системи.

1. Апаратні (вбудовані) системи моніторингу

Вбудовані системи реалізуються безпосередньо в складі обладнання та є невід'ємною частиною системи керування верстатом. Для контролю технологічних параметрів використовуються датчики температури, вібрації, струму, швидкості обертання, положення робочих органів та інші вимірювальні пристрої. Отримані дані обробляються контролером у режимі реального часу, що забезпечує оперативне реагування на зміну режимів роботи обладнання [4].

Переваги: висока швидкодія та оперативність обробки інформації; надійність функціонування; незалежність від зовнішніх мереж зв'язку; можливість роботи в режимі реального часу.

Недоліки: обмежені можливості аналітичної обробки даних; складність модернізації; обмежені можливості інтеграції з іншими інформаційними системами.



Рис. 1.4.1– Апаратна (вбудована) система контролю та моніторингу ЧПК-обладнання[4]

2. Програмні SCADA-системи

SCADA-системи (Supervisory Control And Data Acquisition) призначені для централізованого збору, обробки та відображення інформації про стан виробничих процесів. Такі системи забезпечують диспетчерський контроль, архівування технологічних даних, формування звітів та відображення параметрів у вигляді графіків, таблиць і мнемосхем.

До найбільш поширених SCADA-систем належать WinCC, Wonderware InTouch, TRACE MODE та інші.

Переваги: централізований контроль за технологічними процесами; наочна візуалізація даних; зберігання історії подій та параметрів; підтримка формування звітної документації.

Недоліки: висока вартість впровадження та обслуговування; значні вимоги до апаратних ресурсів; необхідність спеціальної підготовки персоналу.



Рис. 1.4.2– SCADA-система контролю та моніторингу виробничих процесів[2]

3. IoT-системи моніторингу (Industrial Internet of Things)

Промислові IoT-системи базуються на використанні мережевих технологій для передачі та обробки даних. Інформація від датчиків надходить через мережу до локальних серверів або хмарних платформ, де здійснюється її аналіз та зберігання. Користувач може отримувати доступ до інформації з будь-якого пристрою, підключеного до мережі Інтернет .

Переваги: можливість віддаленого моніторингу; висока масштабованість системи; інтеграція з хмарними сервісами; підтримка прогнозової аналітики та елементів штучного інтелекту.

Недоліки: залежність від якості мережевого з'єднання; ризики кібербезпеки; додаткові витрати на мережеву інфраструктуру; необхідність захисту конфіденційних даних.

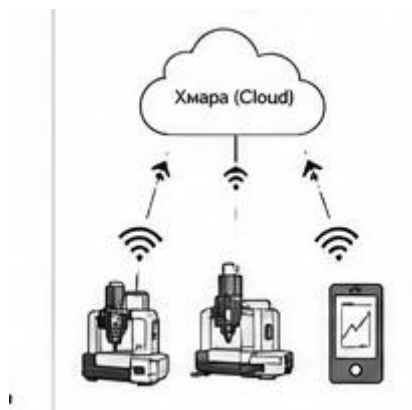


Рис. 1.4.3– IoT-система промислового контролю та моніторингу[10]

4. Гібридні системи контролю та моніторингу

Гібридні системи поєднують переваги локального керування та хмарної обробки даних. Первинна обробка інформації здійснюється безпосередньо на виробничому обладнанні, а результати передаються до центральних серверів або хмарних платформ для подальшого аналізу та зберігання. Такі рішення широко використовуються в концепції Smart Factory та Industry 4.0.

Переваги: поєднання високої швидкодії та масштабованості; можливість резервування даних; гнучкість налаштування; підтримка сучасних цифрових технологій.

Недоліки: складність проектування та налаштування; висока вартість впровадження; необхідність забезпечення сумісності різних програмно-апаратних компонентів.

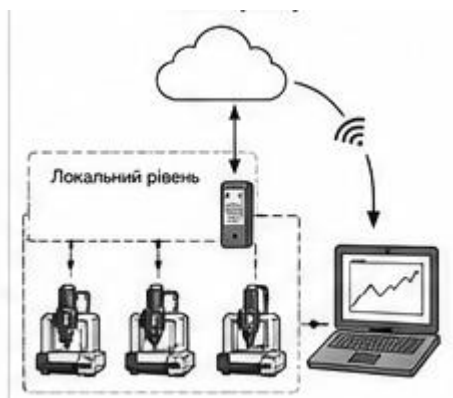


Рис. 1.4.4 – Гібридна система контролю та моніторингу технологічних процесів [32]

Таблиця 1.4.1 – Порівняльний аналіз систем контролю та моніторингу

Тип системи	Переваги	Недоліки
Вбудовані системи	Максимальна швидкодія, автономність, надійність, робота в реальному часі.	Обмежені аналітичні можливості, складність модернізації та масштабування.
SCADA-системи	Централізоване диспетчерське керування, наочна візуалізація, архівування даних.	Висока вартість ліцензій, значні вимоги до ПК, складність налаштування.
ІоТ-системи	Віддалений доступ із будь-якої точки, масштабованість, хмарна аналітика.	Залежність від каналів зв'язку, підвищені ризики кібербезпеки.

Гібридні системи	Поєднання локальної швидкодії та глибини хмарного аналізу, гнучкість.	Найвища складність проектування та узгодження протоколів обміну даних.
------------------	---	--

Таким чином, вибір конкретної системи контролю та моніторингу залежить від особливостей виробничого процесу, вимог до функціональності, рівня автоматизації підприємства та економічної доцільності впровадження. Для автоматизованої системи керування фрезерним верстатом з ЧПК доцільним є використання комбінованого підходу, який забезпечує оперативний контроль параметрів роботи обладнання, можливість накопичення та аналізу даних, а також достатню гнучкість для подальшої модернізації системи [32].

1.5. Обґрунтування розробки, вибір системи контролю та керування та постановка задачі проектування

Сучасний розвиток машинобудівного виробництва вимагає постійного підвищення точності, продуктивності та надійності роботи технологічного обладнання при одночасному зниженні витрат на його експлуатацію та обслуговування [1,2]. Фрезерні верстати з ЧПК є складними високотехнологічними системами, ефективність яких критично залежить від стабільності параметрів процесу різання.

Неузгодженість або неправильний вибір швидкості різання, подачі та глибини обробки призводять до виникнення вібрацій, перегріву інструменту, погіршення якості поверхні деталей або до аварійних режимів роботи обладнання [11].

Аналіз існуючих промислових рішень (SCADA, IoT та гібридних систем) показав, що вони мають високу вартість впровадження, закриту архітектуру та підвищені вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу. Більшість із них реалізують лише пасивний моніторинг, без можливості прямого впливу на технологічний процес у реальному часі [2].

Для вирішення цих проблем найбільш ефективним є використання інтелектуальної автоматизованої системи контролю та керування із замкненим контуром регулювання та функціями адаптивної оптимізації режимів різання.

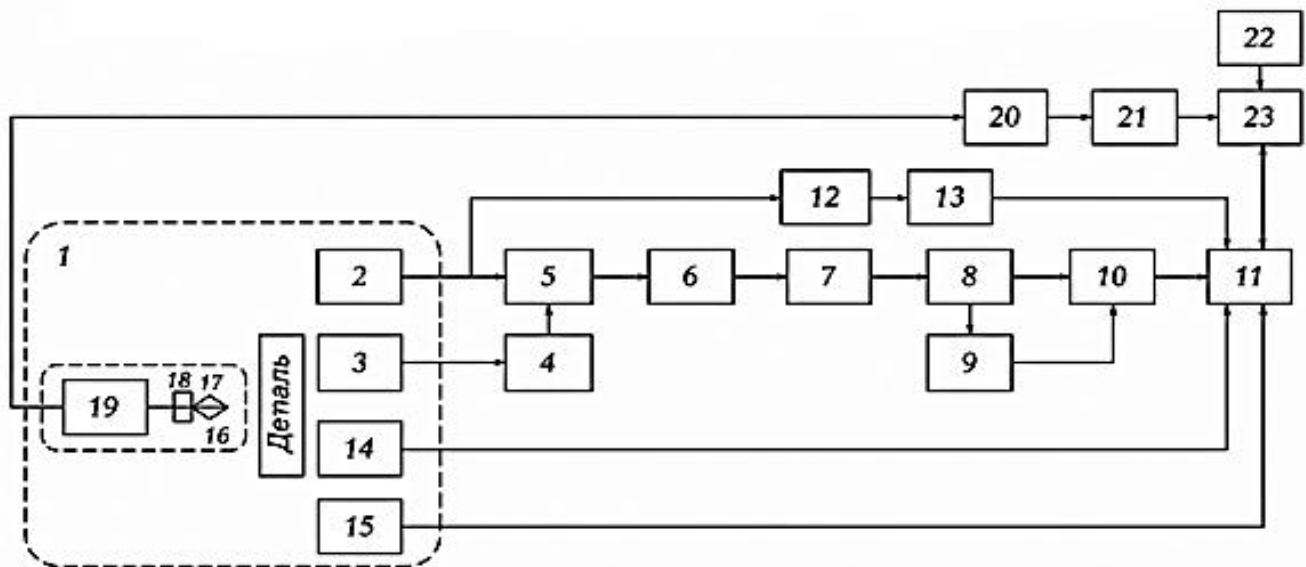


Рис. 1.5.1– Структурна схема автоматизованої системи контролю та керування фрезерним верстатом з ЧПК [26]

Експлікація структурної схеми САК: 1 — Кінцева твердосплавна фреза; 2 — Заготовка (об'єкт обробки); 3 — Шпиндельний вузол верстата; 4 — Цифровий датчик температури підшипникових вузлів DS18B20; 5 — Тривісний акселерометр вібраційного моніторингу MPU6050; 6 — Асинхронний двигун головного руху; 7 — Частотний інвертор керування шпинделем; 8 — Аналоговий датчик струму навантаження ACS712; 9 — Серводвигун координатної осі X; 10 — Серводвигун координатної осі Y; 11 — Серводвигун координатної осі Z; 12 — Оптичний енкодер зворотного зв'язку; 13 — Цифровий серводрайвер підсилення потужності; 14 — Керуючий мікроконтролер ядра САК (STM32); 15 — Вбудований модуль аналогово-цифрового перетворювача (ADC); 16 — Апаратний периферійний інтерфейс SPI^2C ; 17 — Блок дискретного введення-виведення сигналів керування (DI/DO); 18 — Обчислювальний контур формування коефіцієнта Override; 19 — Стабілізований блок живлення ліній зв'язку 24V DC; 20 — Промислова комунікаційна шина RS-485; 21 — Сенсорна HMI-панель оператора верстата; 22 — Ланцюг аварійного захисту та блокування (Emergency Stop); 23 — Захищена електротехнічна шафа обладнання.

Основні технічні особливості запропонованої системи

1. Замкнений контур керування: Використання зворотного зв'язку для безперервного контролю фактичного положення виконавчих механізмів та автоматичної компенсації похибок позиціонування.

2. Моніторинг у реальному часі: Оцифрування та аналіз сигналів від датчиків температури шпинделя, навантаження приводів, рівня вібрацій та стану інструменту.

3. Адаптивне регулювання: Автоматичне коригування швидкості подачі та частоти обертання шпинделя залежно від поточних умов обробки (зміна припуску, коливання твердості матеріалу заготовки).

4. Модульна архітектура: Забезпечує високу масштабованість, простоту інтеграції нових первинних перетворювачів та ремонтпридатність системи.

Для обґрунтування структури проєктованої системи проведено класифікацію існуючих систем керування за ключовими конструктивно-технологічними ознаками (Рис. 1.5.2).



Рис. 1.5.2 – Класифікація систем контролю та керування верстатами з ЧПК

На основі виконаного аналізу встановлено, що найбільш перспективним напрямом для реалізації є адаптивна система із замкненим контуром, яка інтегрує функції локального моніторингу та динамічної оптимізації .

Постановка задачі проєктування

Метою дипломної роботи є розробка автоматизованої системи контролю та керування фрезерним верстатом з функціями моніторингу та адаптивної оптимізації режимів різання, що дозволить підвищити точність обробки,

стабільність технологічного процесу та загальну ефективність використання обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-технічні задачі:

1. Розробити функціональну та структурну схеми автоматизованої системи керування із замкненим контуром.
2. Виконати техніко-економічне обґрунтування та вибір апаратних засобів системи (мікроконтролера, датчиків струму, температури та вібрації).
3. Розробити схемотехнічні рішення для модулів збору, первинної фільтрації та обробки даних від сенсорів.
4. Розглянути математичну модель об'єкта керування та алгоритм адаптивного регулювання швидкості подачі.
5. Розробити програмне забезпечення мікроконтролера та інтерфейс користувача (HMI) для візуалізації параметрів роботи обладнання в реальному часі.
6. Провести дослідження розробленої системи на стійкість та оцінити її загальну технічну ефективність.

Проведений аналіз підтверджує доцільність використання адаптивної системи керування із замкненим контуром регулювання та функціями моніторингу технологічних параметрів у режимі реального часу. Розробка такої системи є актуальною інженерно-технічною задачею, вирішення якої дозволить підвищити продуктивність, точність і надійність сучасного машинобудівного та приладобудівного виробництва.

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

2.1. Розробка загальної структури системи автоматизованого керування

Створення сучасних систем керування технологічними процесами передбачає забезпечення високої точності обробки, адаптивності до зміни зовнішніх чинників та безперервного моніторингу вузлів обладнання. Запропонована структура автоматизованої системи керування фрезерним верстатом з ЧПК інтегрує функції класичного контуру контурного керування та адаптивної оптимізації режимів різання в реальному часі.

На відміну від традиційних систем, які відпрацьовують лише задану траєкторію інструмента (G-код), проєктована архітектура реалізує динамічний аналіз навантаження на привод шпинделя, температурного тренду, спектра вібрацій та поточного зносу інструмента.

Структурно система розділена на такі взаємопов'язані модулі:

- Модуль інтерпретатора ЧПК: дешифрація керуючої програми та генерація первинної траєкторії.
- Мікропроцесорний блок керування: центральний контролер обробки алгоритмів адаптації.
- Система збору даних (DAQ): блок первинного кондиціювання та оцифрування аналогових сигналів.
- Сервоприводи координатних осей (X,Y,Z) та привод шпинделя.
- Операторська панель (HMI) та комунікаційний IoT-модуль для віддаленого моніторингу.

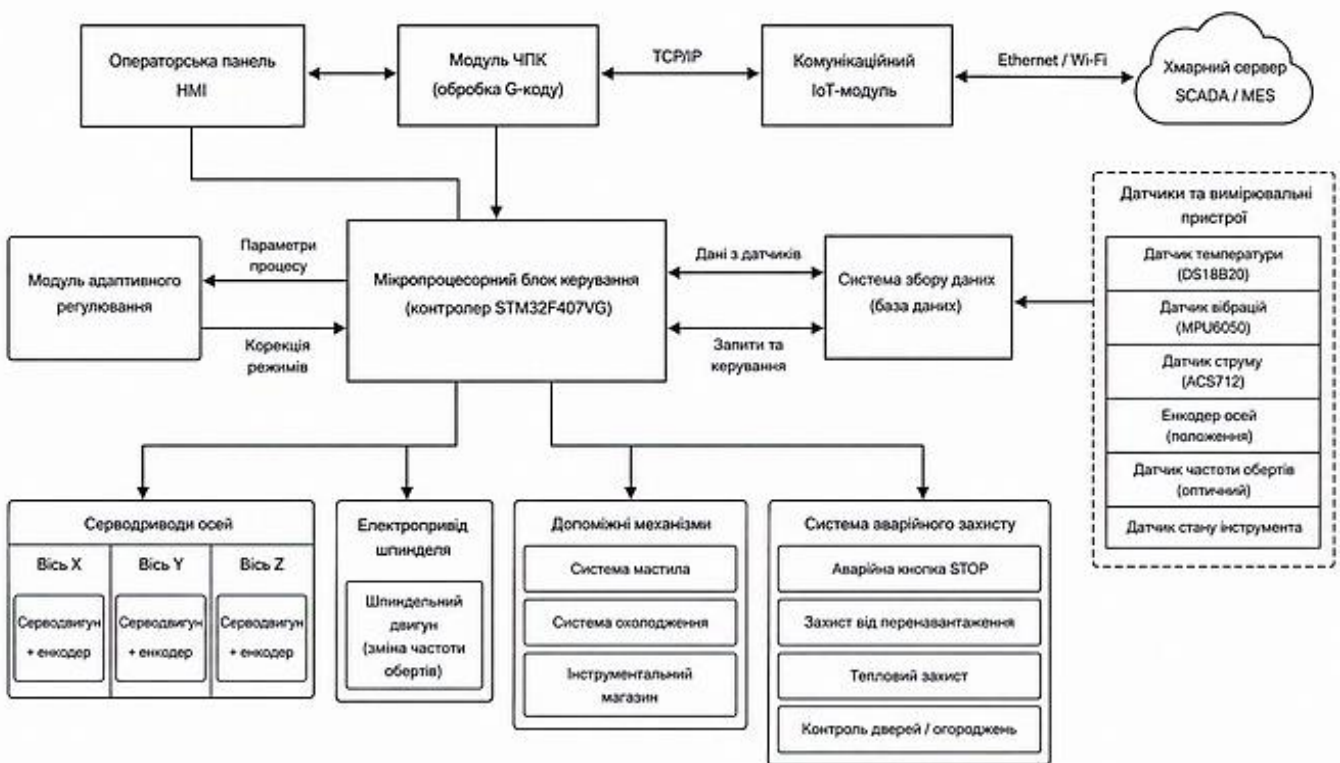


Рис. 2.1.1 – Структурна схема розробленої автоматизованої системи керування

Алгоритм функціонування структури полягає у порівнянні фактичних параметрів процесу з гранично допустимими технологічними межами. Контур зворотного зв'язку за положенням мінімізує динамічну похибку позиціонування:

$$\Delta X = X_z - X_f \quad (2.1)$$

де X_z — задана координата за програмою, X_f — фактична координата, отримана від цифрового енкодера. При виникненні неузгодженості або технологічного перевантаження мікропроцесорний контролер динамічно знижує контурну швидкість подачі, стабілізуючи систему [18].

Таким чином, розроблена структура автоматизованої системи керування дозволяє забезпечити ефективну, стабільну та безпечну роботу фрезерного верстата з ЧПК у сучасних умовах автоматизованого виробництва.

2.2. Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення системи

Апаратний комплекс системи проектування повинен задовольняти вимогам швидкодії контурів регулювання (не менше 1 кГц), завадостійкості в умовах роботи потужних приводів та мати достатній периферійний ресурс.

Основним обчислювальним ядром системи обрано 32-бітний мікроконтролер STM32F407VG на базі архітектури ARM Cortex-M4 із тактовою частотою 168 МГц та апаратним модулем обчислень із плаваючою комою (FPU) [24]. Вибір обґрунтований наявністю:

- апаратних таймерів із підтримкою генерації ШІМ (PWM) та декодування сигналів інкрементних енкодерів (Encoder Mode);
- розвинених комунікаційних інтерфейсів (чипи розширення CAN, SPI, I2C, UART, Ethernet);
- високошвидкісних багатоканальних АЦП для паралельного опитування датчиків.

Для забезпечення динамічних характеристик координатних осей обрано синхронні сервоприводи змінного струму потужністю 1.5 кВт, оснащені оптичними інкрементними енкодерами зворотного зв'язку. Специфікація первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків) системи наведена в таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1 – Специфікація датчиків системи моніторингу верстата з ЧПК

Контрольований параметр	Тип датчика	Інтерфейс / Тип сигналу	Технологічне призначення
Температура шпинделя	DS18B20	1-Wire (Цифровий)	Запобігання тепловому заклинюванню підшипників
Вібрації та прискорення	MPU6050	I2C (Цифровий)	Виявлення резонансів та автоколивань при різанні
Струм навантаження	ACS712	Аналоговий (0–5 В)	Визначення крутного моменту та перевантаження
Положення осей	Енкодер	Квадратурний (А, В, Z)	Замикання контуру позиціонування
Частота обертання	Оптичний тахометр	Імпульсний (Переривання)	Контроль просідання обертів шпинделя

Для забезпечення розрахункових режимів завантаження шпинделя, контроль потужності різання (N , кВт) здійснюється контролером непрямым методом через силу різання P_z (Н) та швидкість різання V (м/хв):

$$N = \frac{P_z \cdot V}{60000} \quad (2.2)$$

Для візуалізації та локального налаштування параметрів підключається сенсорна НМІ-панель. Додатково в апаратний комплекс інтегровано бездротовий модуль ESP32 (через SPI-інтерфейс до головного контролера), який виконує роль шлюзу для передачі телеметрії в хмарні системи промислового інтернету речей (IoT) за протоколом MQTT [10].

2.3. Розробка функціональної схеми системи

Функціональна схема автоматизованої системи керування визначає взаємозв'язок між основними елементами системи, послідовність передачі сигналів та принцип реалізації керування технологічним процесом фрезерної обробки на верстаті з ЧПК.

У межах дипломного проєкту розроблено власну функціональну схему автоматизованої системи керування фрезерним верстатом з ЧПК із функціями: моніторингу технологічних параметрів; адаптивного регулювання режимів різання; автоматичного контролю стану обладнання; аналізу аварійних ситуацій; візуалізації параметрів у режимі реального часу.

Функціональна схема системи наведена на рис. 2.3.1.

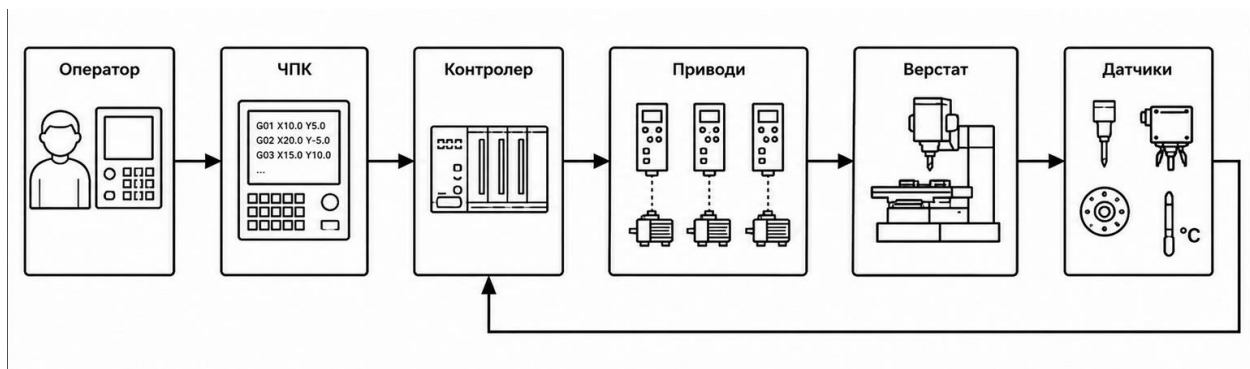


Рис. 2.3.1 – Функціональна схема автоматизованої системи керування

Основними функціональними елементами системи є: система ЧПК; мікропроцесорний контролер; модуль збору та обробки даних; модуль адаптивного регулювання; сервоприводи координатних осей; привід шпинделя; система датчиків; операторська панель; система аварійного захисту.

Принцип роботи функціональної схеми полягає у такому. Оператор за допомогою НМІ-панелі або САМ-системи завантажує керуючу програму у систему ЧПК. Після обробки G-коду контролер формує сигнали керування для: сервоприводів осей X, Y, Z; електропривода шпинделя; допоміжних механізмів.

Паралельно система збору даних виконує безперервне опитування датчиків: температури; вібрацій; струму навантаження; положення осей; швидкості обертання шпинделя.

Отримані сигнали передаються до мікропроцесорного контролера, де здійснюється: аналіз параметрів; порівняння з допустимими значеннями; визначення відхилень; автоматичне коригування режимів роботи.

Особливістю розробленої системи є наявність модуля адаптивного регулювання, який забезпечує автоматичну зміну параметрів різання залежно від: навантаження шпинделя; температури інструмента; рівня вібрацій; стабільності процесу обробки.

Для визначення швидкості різання використовується залежність

$$V = \frac{\pi D n}{1000} \quad (2.3)$$

де: V — швидкість різання, м/хв; D — діаметр фрези, мм; n — частота обертання шпинделя, об/хв.

При перевищенні допустимого моменту навантаження або рівня вібрацій система автоматично вмикає алгоритм обмеження: знижує контурну подачу, оптимізує оберти шпинделя та активує попередження на НМІ-панелі, мінімізуючи ризик поломки фрези.

2.4. Розробка алгоритму роботи системи керування

Алгоритм роботи автоматизованої системи керування визначає послідовність виконання операцій, необхідних для забезпечення стабільної та безпечної роботи фрезерного верстата з ЧПК. Логіка функціонування керуючої програми мікроконтролера STM32 представлена у вигляді узагальненого алгоритму циклічного опитування та переривань.

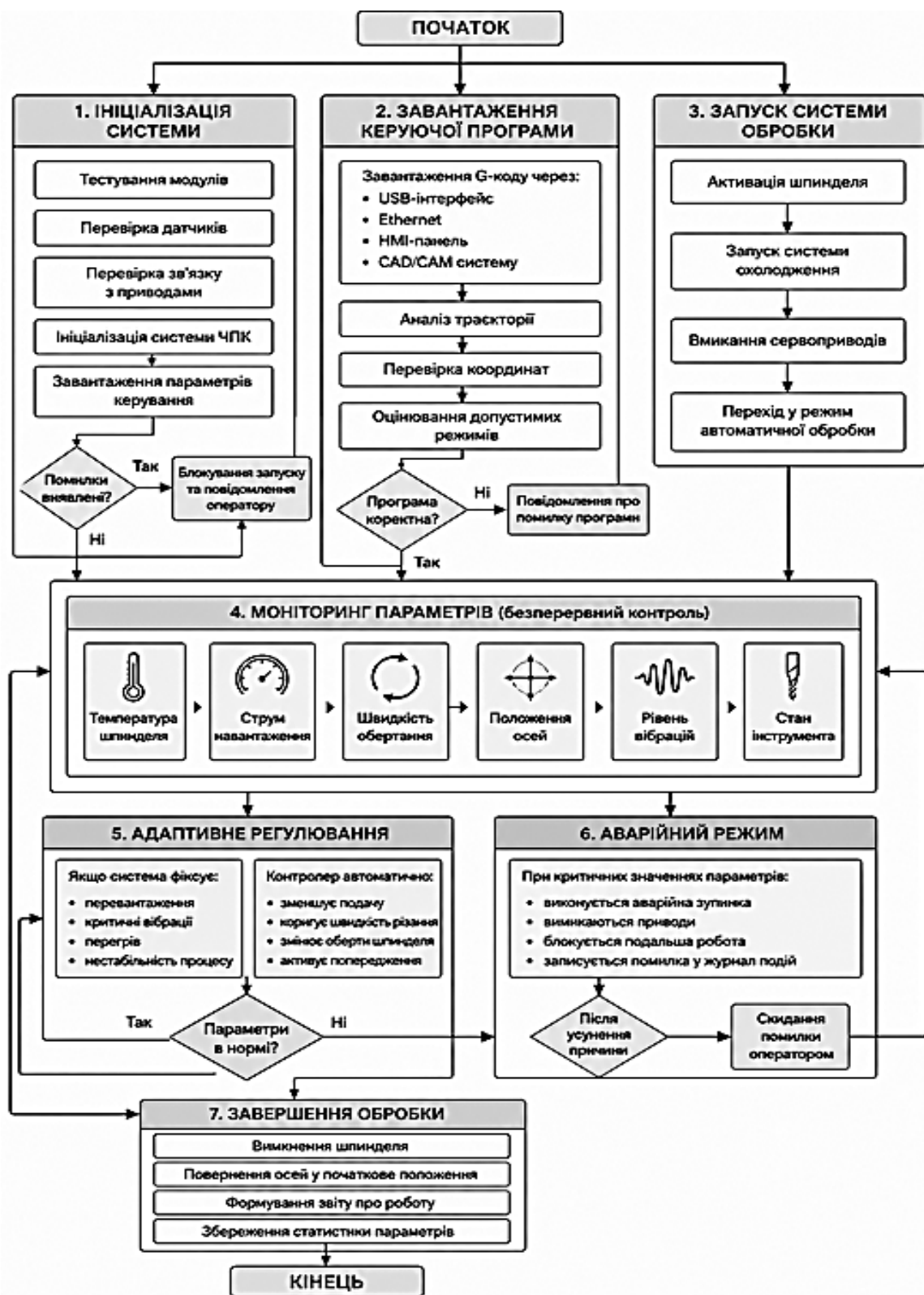


Рис. 2.4.1 – Алгоритм роботи автоматизованої системи керування

Послідовність виконання операцій включає такі етапи:

1. Ініціалізація: Тестування периферії контролера (навколоосевих датчиків, конфігурація ШІМ, перевірка шин зв'язку). При виявленні критичної помилки — апаратне блокування запусків приводів.
2. Дешифрація кадру: Читання чергового кадру G-коду, розрахунок траєкторії та базової хвилинної подачі (S , мм/хв):

$$S = S_z \cdot z \cdot n \quad (2.4)$$

де S_z — подача на один зуб, z — кількість зубів інструмента.

3. Виробничий цикл та моніторинг: Запуск приводів із паралельним високошвидкісним опитуванням сенсорів у перериваннях таймера.
4. Адаптивне розгалуження: Перевірка умов безпеки. Якщо усереднені значення параметрів перевищують критичні межі ($I > I_{\max}$ або $Temp > Temp_{\max}$), алгоритм примусово переходить на підпрограму зниження подачі або екстреної зупинки (Emergency Stop).
5. Завершення обробки: Зупинка шпинделя, виведення робочих органів у нульову точку (Home), передача фінального технологічного звіту через ESP32 в базу даних.

2.5. Проектування структурної та принципової схем мікропроцесорної системи

Мікропроцесорна система є центральною складовою автоматизованої системи керування та забезпечує обробку інформації, керування приводами, моніторинг параметрів і реалізацію алгоритмів адаптивного регулювання [14].

До складу системи входять: центральний мікроконтролер; модулі введення/виведення; драйвери сервоприводів; модуль ШІМ-керування; інтерфейси зв'язку; модуль збору даних; система живлення; захисні модулі.

Мікроконтролер виконує: обробку сигналів; формування керуючих імпульсів; роботу із датчиками; обмін даними із НМІ; реалізацію алгоритмів керування. Для зв'язку між модулями використовуються: UART; SPI; CAN; I2C; Ethernet.

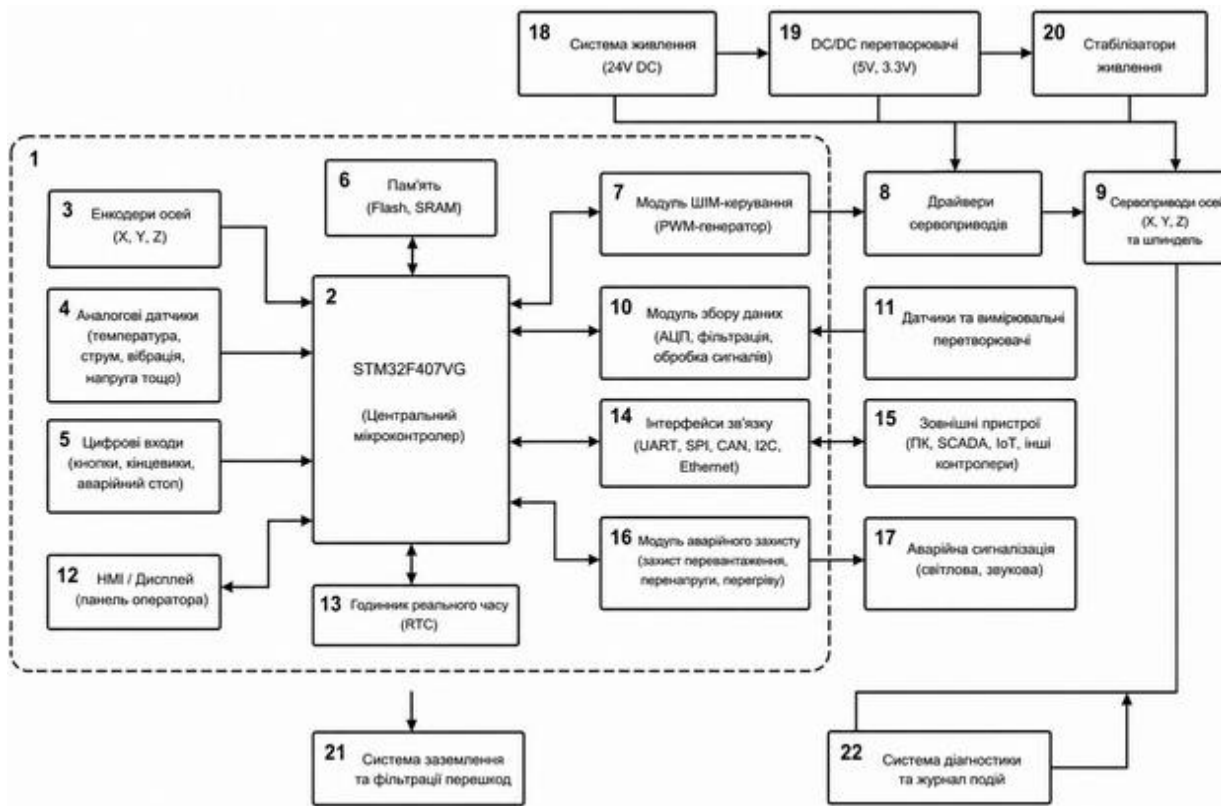


Рис. 2.5.1 – Структурна схема мікропроцесорної системи керування

У розробленій системі передбачено: цифрові входи для енкодерів; аналогові входи для датчиків; PWM-виходи для приводів; інтерфейс аварійного захисту.

Принципова схема системи включає: схему підключення сервоприводів; підключення енкодерів; схему живлення; модуль збору аналогових сигналів; систему захисту.

Для оцінювання динаміки системи використовується передатна функція:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (2.5)$$

де: K — коефіцієнт підсилення; T — стала часу; s — оператор Лапласа.

Електрична принципова схема розробляється з урахуванням обов'язкової гальванічної розв'язки за допомогою швидкісних оптопар (типу 6N137) між слабкострумовою логічною частиною мікроконтролера STM32 та силовими

шинами живлення серводрайверів [24]. Це повністю мінімізує вплив зворотних комутаційних завад та струмів заземлення на обчислювальний процес мікроконтролера.

Таким чином, спроектована мікропроцесорна система відповідає вимогам до сучасних систем ЧПК та забезпечує надійну роботу алгоритмів адаптивної оптимізації.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1. Методи збору та обробки даних

Система моніторингу технологічних параметрів фрезерного верстата з ЧПК забезпечує безперервний збір, обробку та аналіз інформації про стан обладнання й параметри технологічного процесу в реальному часі. Ефективність функціонування контуру адаптації безпосередньо залежить від швидкодії та завадостійкості підсистеми збору даних (DAQ) [10].

Структурно підсистема збору даних складається з первинних датчиків, модулів аналого-цифрового перетворення (АЦП мікроконтролера STM32), цифрових фільтрів та комунікаційних інтерфейсів для передачі інформації на верхній рівень керування [24].

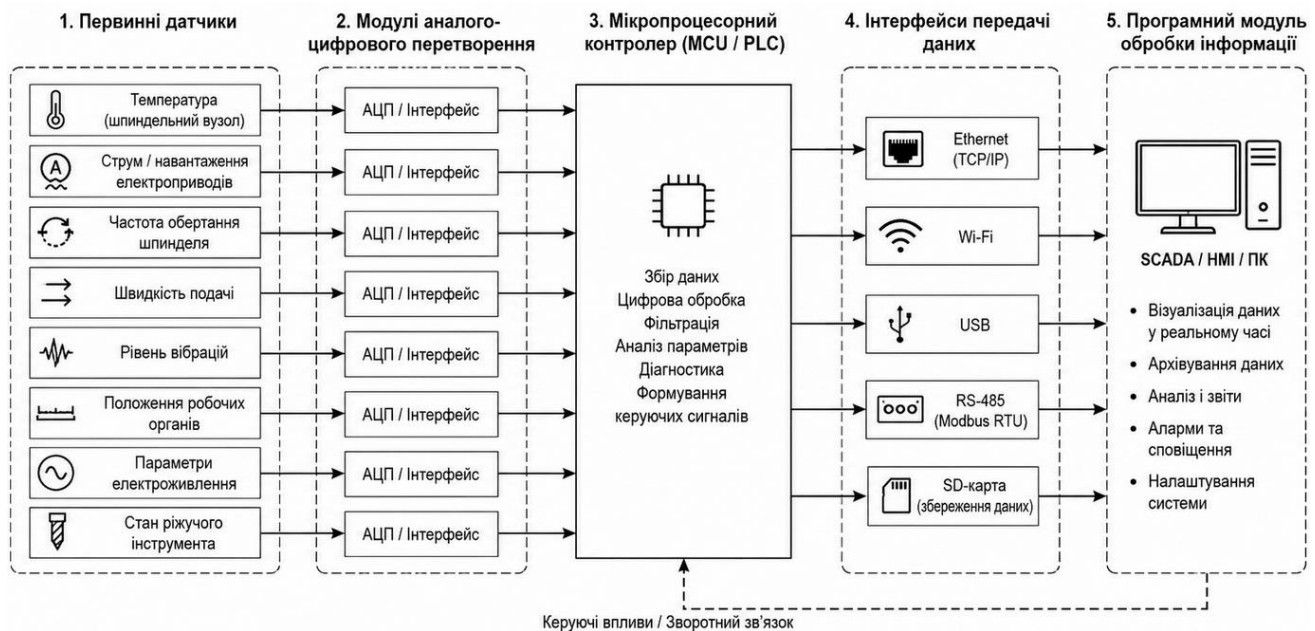


Рис. 3.1.1 – Структурна схема системи збору та обробки даних

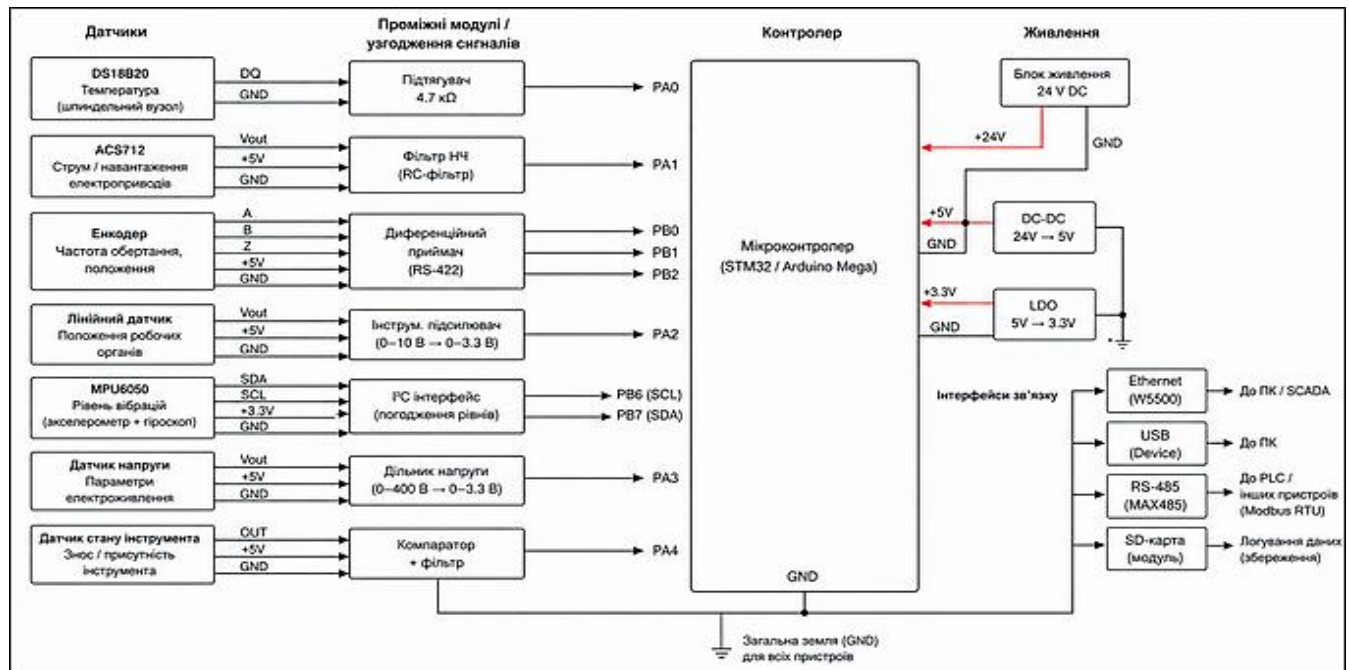


Рис. 3.1.2– Схема підключення датчиків до контролера

У системі застосовується апаратне таймерне опитування вимірювальних каналів. Частота дискретизації сигналів (f_d , Гц) розраховується за формулою:

$$f_d = \frac{1}{T_s} \quad (3.1)$$

де T_s — період квантування (с). Для забезпечення реєстрації високочастотних вібраційних процесів і динамічних стрибків струму період опитування встановлено на рівні $T_s = 0.001$ с, що забезпечує частоту дискретизації $f_d = 1000$ Гц.

Після оцифрування виконується первинна цифрова обробка даних. Для зменшення впливу випадкових завад та високочастотних шумів у каналах аналогових датчиків (зокрема датчика струму ACS712) реалізовано алгоритм фільтрації методом ковзного середнього (Moving Average):

$$x_k^- = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{k-i} \quad (3.2)$$

де x_k^- — відфільтроване значення параметра на поточним кроці, x_{k-i} — попередні виміряні значення сигналів, n — розмір вікна фільтрації.

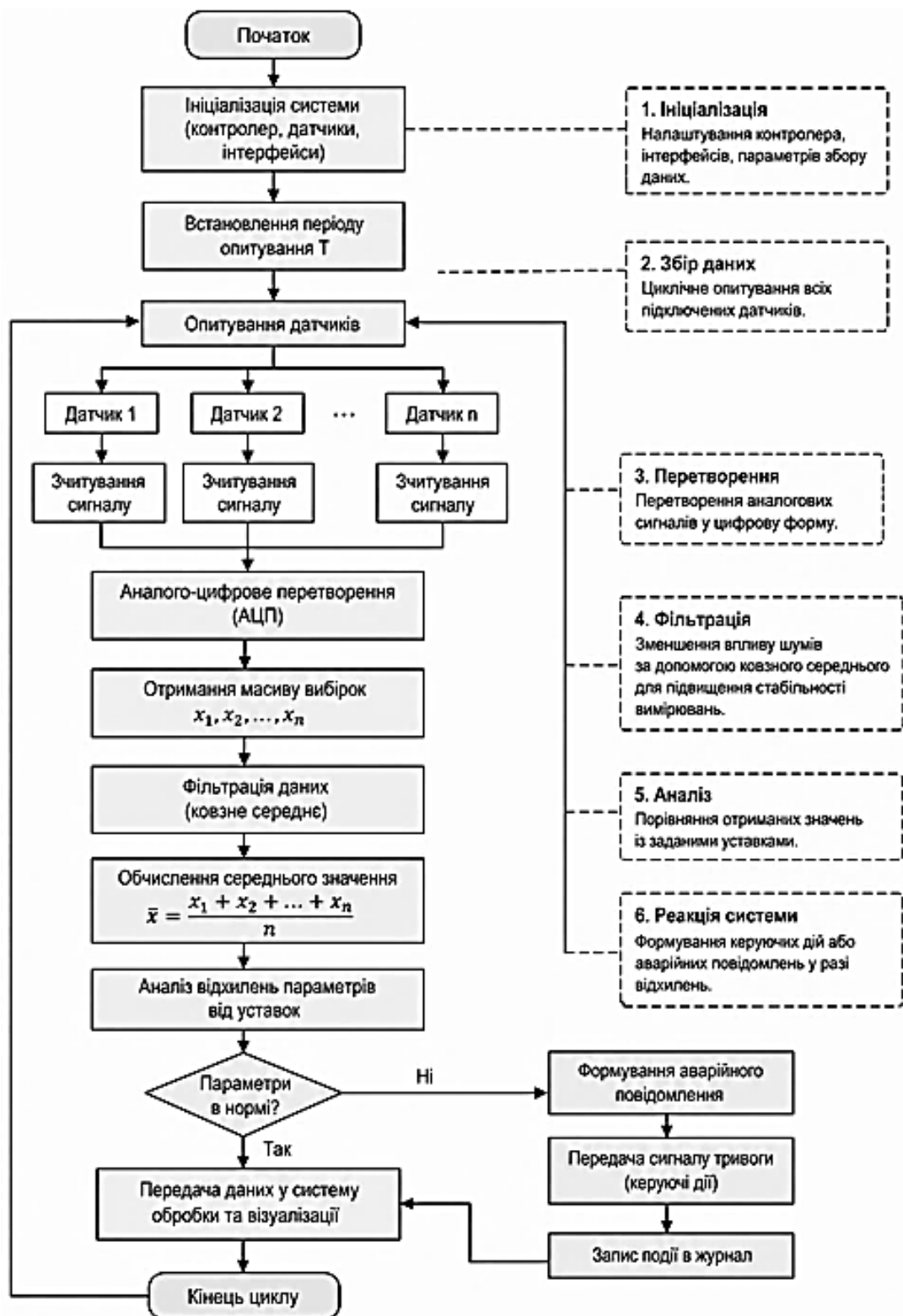


Рис. 3.1.3 – Алгоритм збору та фільтрації даних

Таблиця 3.1.1 – Характеристики датчиків системи моніторингу

Датчик	Контрольований параметр	Діапазон вимірювання	Тип вихідного сигналу
DS18B20	Температура підшипників шпинделя	-55...+125 °C	Цифровий, протокол 1-Wire
ACS712	Струм навантаження приводів	0...30 A	Аналоговий, 0...5 V
MPU6050	Вібраційне прискорення осей	±16 g	Цифровий, шина I2C
Енкодер	Кутове положення вала двигуна	0...360°	Квадратурний імпульсний

Система збору та обробки даних забезпечує безперервний контроль технологічних параметрів, своєчасне виявлення відхилень та стабільну роботу автоматизованої системи контролю та керування фрезерним верстатом з ЧПК.

3.2. Моніторинг параметрів роботи верстата в реальному часі

Моніторинг параметрів роботи верстата в реальному часі є одним із найважливіших елементів автоматизованої системи контролю та керування. Його основним призначенням є забезпечення постійного контролю технічного стану обладнання та своєчасне виявлення відхилень технологічних параметрів від допустимих значень [2].

Постійний моніторинг параметрів у реальному часі дозволяє мінімізувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій та стабілізувати якість обробки деталей.

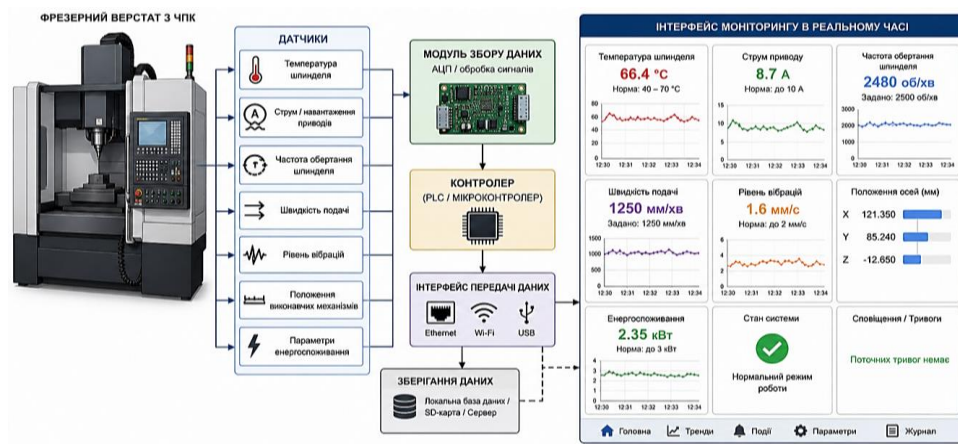


Рис. 3.2.1– Система моніторингу параметрів верстата в реальному часі [2]

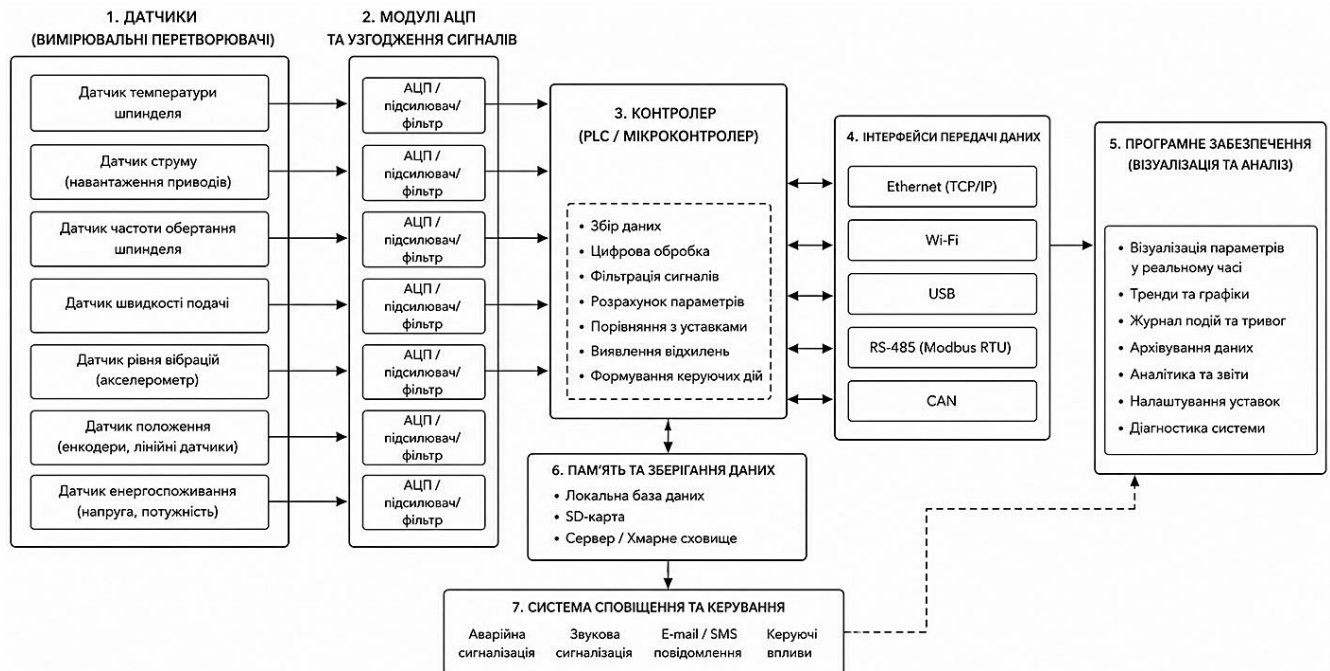


Рис. 3.2.2 – Структурна схема моніторингу технологічних параметрів

Особлива увага приділяється тепловому стану шпиндельного вузла. Похибка контролю температури (ΔT) обчислюється як різниця між поточним вимірним значенням та встановленою технологічною межею:

$$\Delta T = T_z - T_f \quad (3.3)$$

де T_z — задана гранична температура, T_f — фактична температура за даними датчика DS18B20. Граничні уставки та режими роботи системи моніторингу зведено в таблицю 3.2.1.

Таблиця 3.2.1 – Контрольовані параметри та рівні уставки системи

Технологічний параметр	Номінальний діапазон	Критичне значення (Уставка)	Дія системи при перевищенні
Температура шпинделя	40...70 °C	>80 °C	Зниження обертів / Охолодження
Рівень вібрацій	до 2 мм/с	>5 мм/с	Зменшення подачі (Override)
Струм приводу	до 10 А	>15 А	Аварійна зупинка (E-Stop)

Навантаження шпинделя	до 80 %	>95 %	Динамічне коригування G-коду
-----------------------	---------	-------	------------------------------

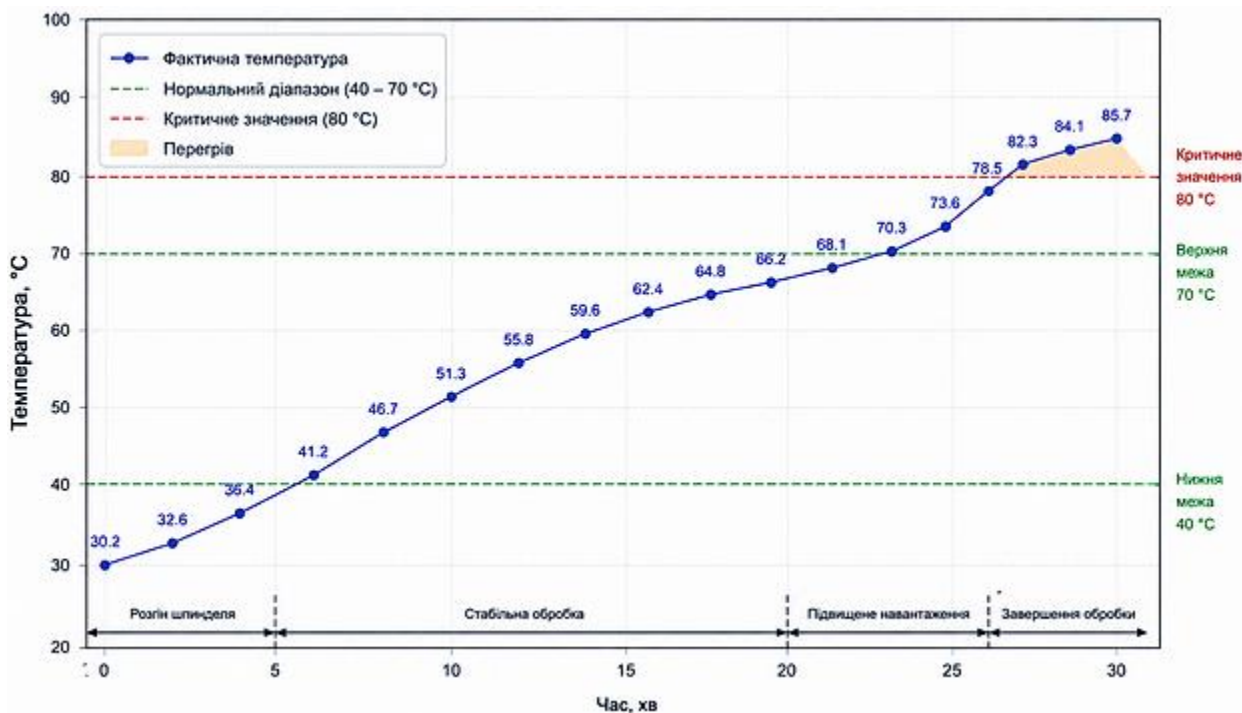


Рис. 3.2.3 – Графік зміни температури шпинделя під час обробки

Система моніторингу забезпечує ефективний контроль стану фрезерного верстата з ЧПК та підвищує надійність автоматизованої системи контролю та керування.

3.3. Алгоритми аналізу параметрів режимів різання

Алгоритми аналізу параметрів режимів різання призначені для автоматичної оцінки стану технологічного процесу та визначення оптимальних режимів роботи обладнання. Під час роботи системи контролер постійно аналізує отримані дані та визначає можливі відхилення параметрів від встановлених значень. Вони призначені для логічної оцінки поточного стану процесу обробки та формування коригуючих коефіцієнтів для ЧПК нижнього рівня.

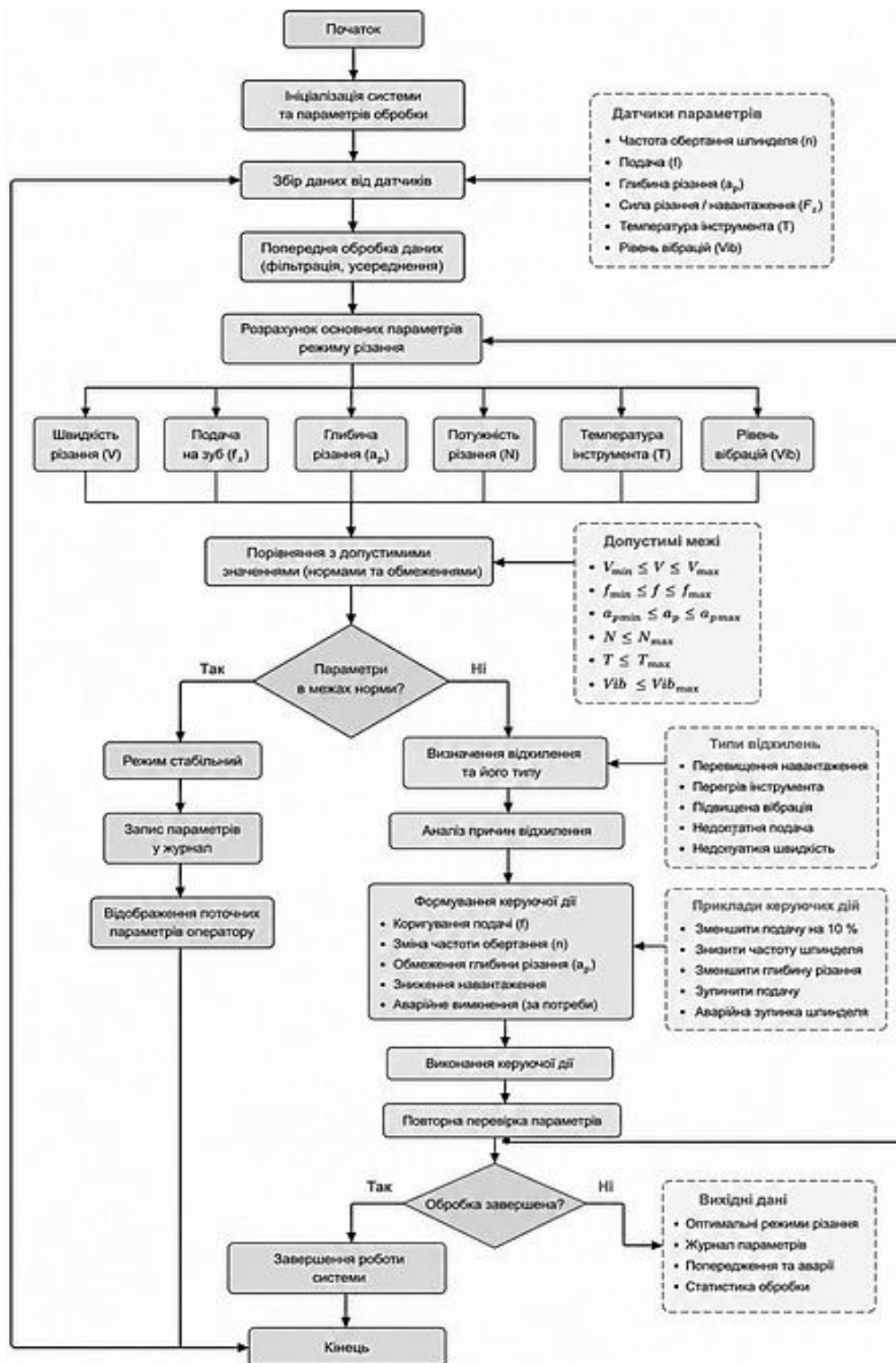


Рис. 3.3.1– Алгоритм аналізу режимів різання

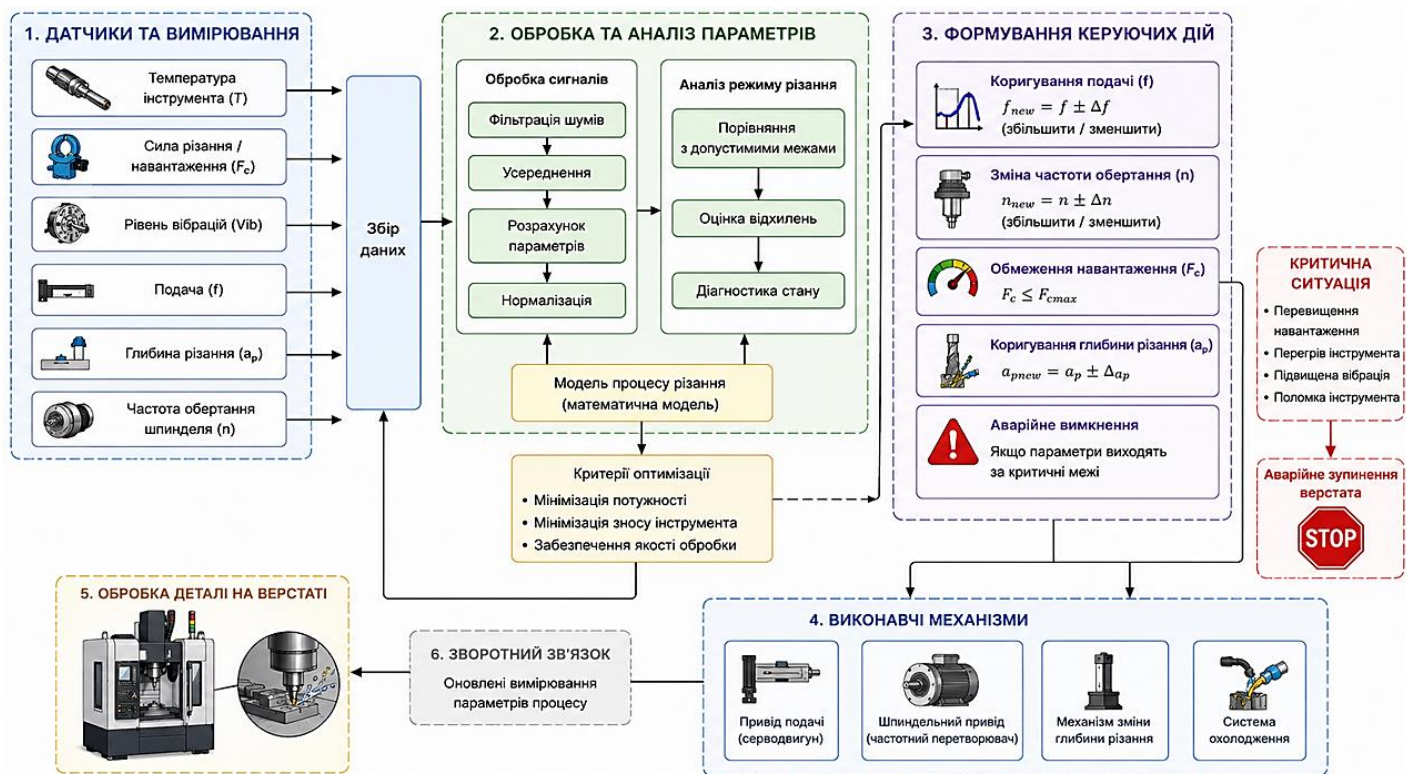


Рис. 3.3.2– Схема адаптивного керування режимами різання [18]

Обчислювальний модуль порівнює тренд зміни амплітуди вібрацій та потужності. Якщо швидкість наростання амплітуди сигналів перевищує допустиму, алгоритм ідентифікує критичний знос або поломку зуба фрези [11]. На основі аналізу система автоматично виконує динамічне гальмування привода подачі або корекцію частоти обертання.

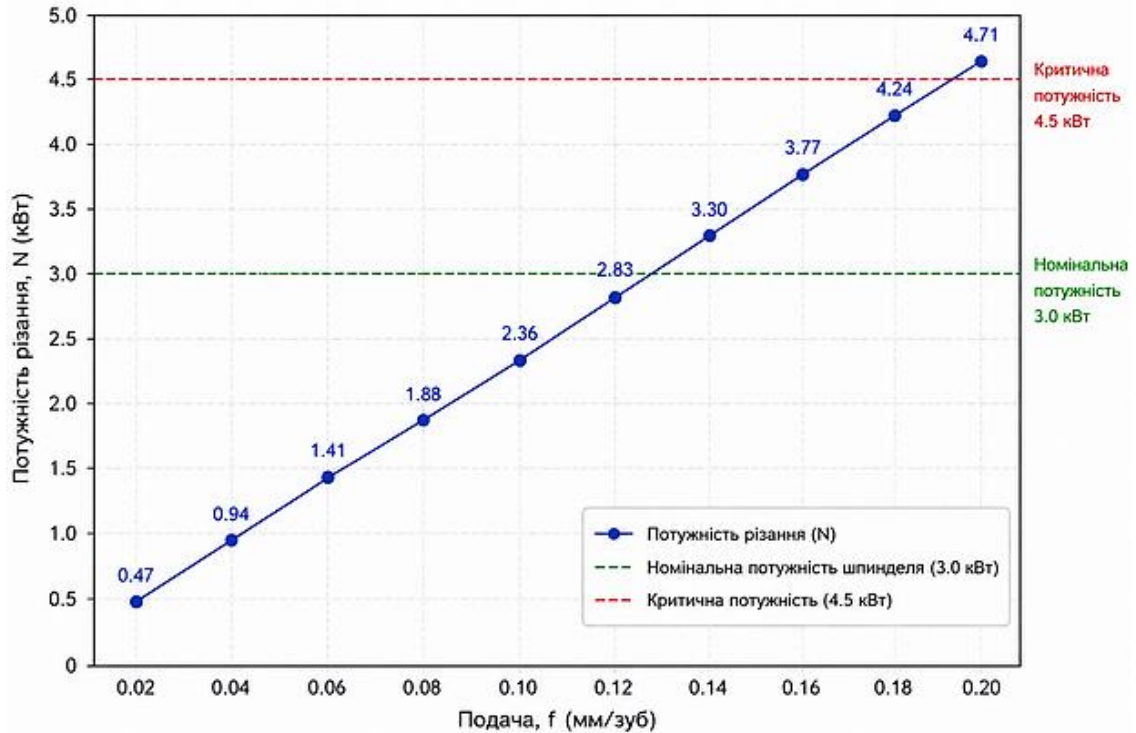


Рис. 3.3.3– Графік залежності потужності різання від подачі

На основі отриманих результатів система автоматично виконує: коригування швидкості подачі; зміну частоти обертання; обмеження навантаження; аварійне вимкнення системи.

Алгоритми аналізу параметрів режимів різання забезпечують адаптивне керування технологічним процесом та підвищення ефективності роботи обладнання.

3.4. Програмна реалізація системи

Програмне забезпечення системи моніторингу побудоване за модульним принципом, що забезпечує гнучкість налаштування та простоту масштабування архітектури при підключенні додаткових сенсорів [24].

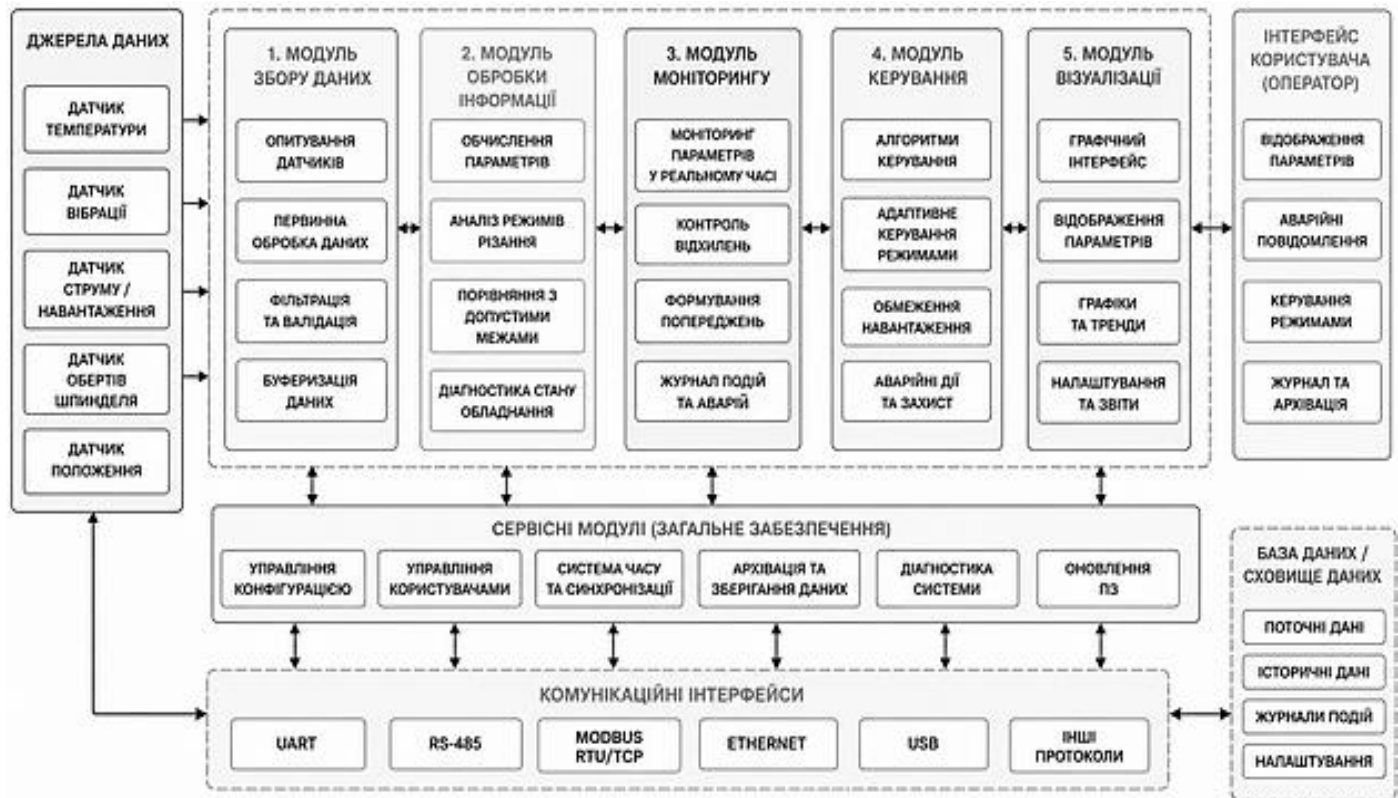


Рис. 3.4.1– Архітектура програмного забезпечення системи моніторингу

До складу ПЗ входять такі функціональні компоненти:

- Модуль DAQ (Driver Level): низькорівневе зчитування буферів АЦП та обробка переривань таймерів.
- Модуль DSP: реалізація цифрових фільтрів ковзного середнього та спектрального аналізу.
- Модуль Logic (Адаптивне ядро): перевірка умов уставки та розрахунок керуючих впливів.
- Модуль HMI & Comms: пакування даних у пакети Modbus TCP / MQTT та передача через Ethernet/Wi-Fi.

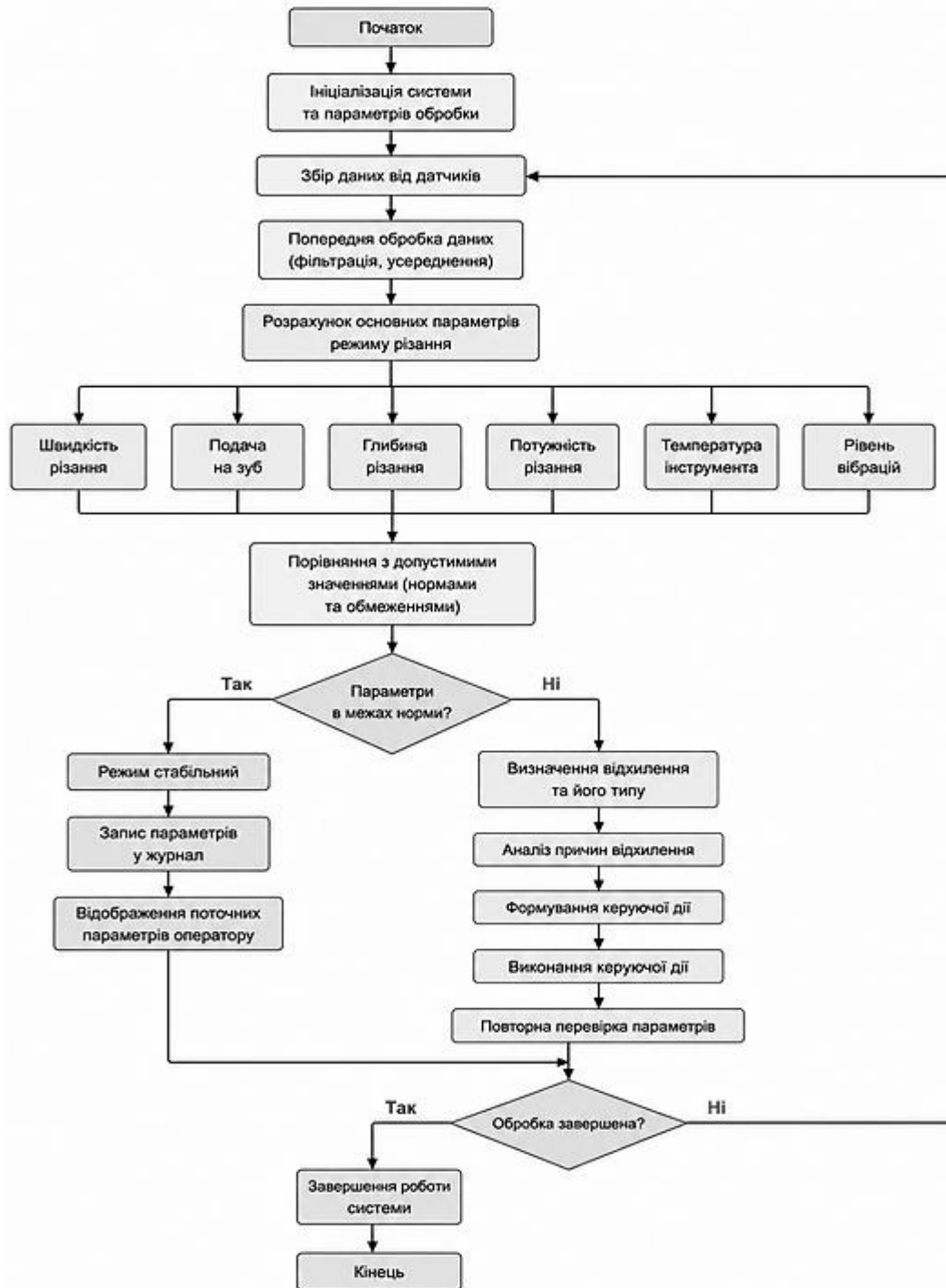


Рис. 3.4.2 – Алгоритм роботи програмної системи

Проведені дослідження показали, що використання цифрових інтерфейсів забезпечує високу швидкість передачі інформації та надійність роботи системи [10].

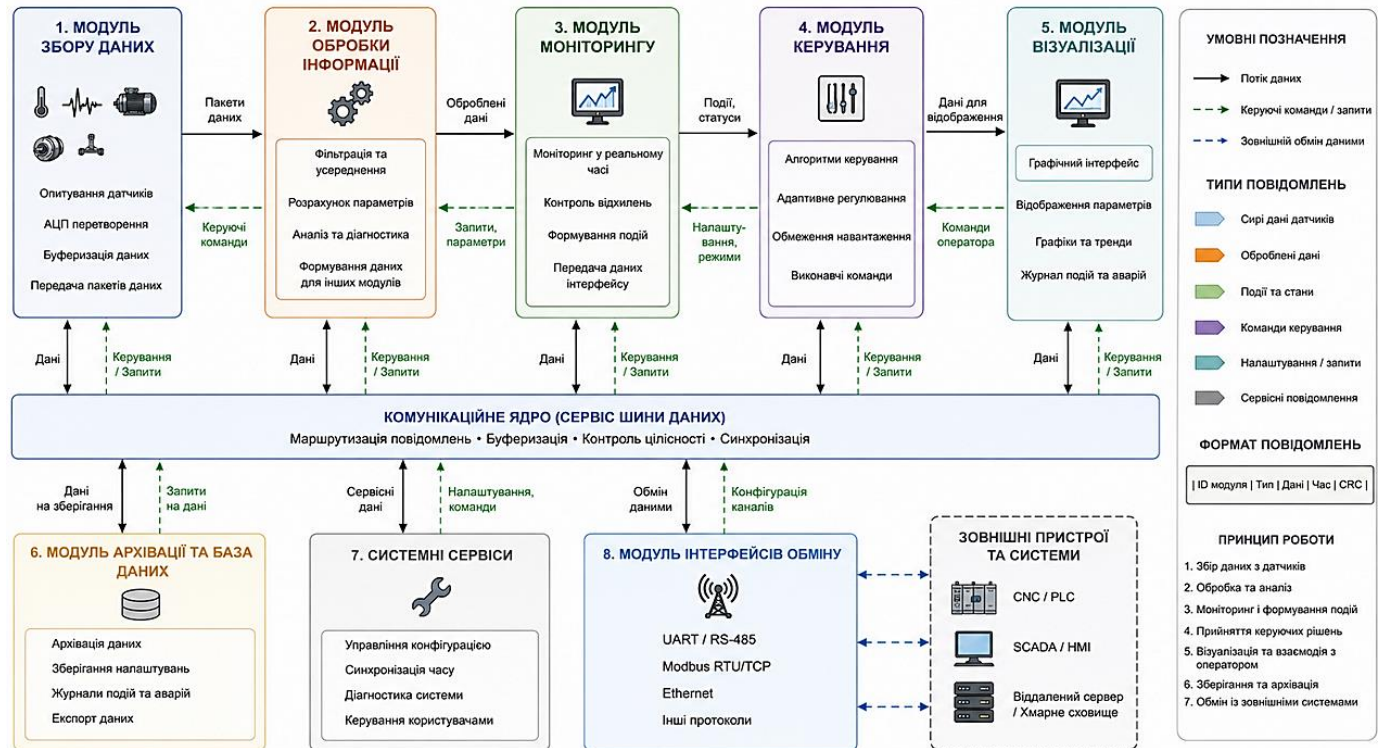


Рис. 3.4.3– Схема обміну даними між модулями системи [14]

Програмна реалізація забезпечує стабільну роботу автоматизованої системи моніторингу та керування технологічним процесом.

3.5. Розробка інтерфейсу користувача

Інтерфейс користувача є важливою складовою автоматизованої системи контролю та керування, оскільки забезпечує взаємодію оператора із системою моніторингу [2].

Основним призначенням інтерфейсу є: відображення технологічних параметрів; візуалізація стану обладнання; повідомлення про аварійні режими; керування режимами роботи; архівація інформації.

У системі передбачено використання графічного інтерфейсу оператора, який містить: панель контролю параметрів; індикатори стану системи; графіки зміни параметрів; журнал аварійних повідомлень; меню налаштувань.



Рис. 3.5.1– Головне вікно системи моніторингу [2]



Рис. 3.5.2– Інтерфейс контролю параметрів верстата [2]

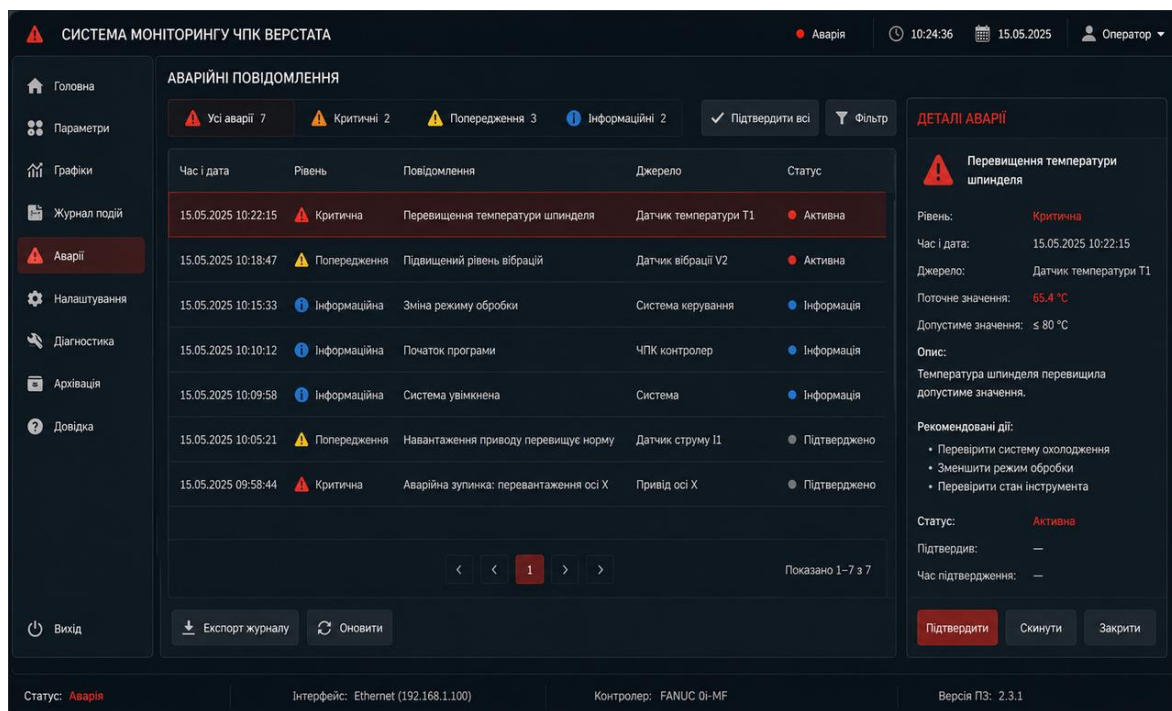


Рис. 3.5.3– Вікно аварійних повідомлень системи [2]

Графічна оболонка відображає поточні координати осей X, Y, Z, температуру шпинделя та струмове навантаження на приводи у вигляді кругових та лінійних індикаторів, а також графічні тренди параметрів у часі. При переході будь-якого параметра в критичну зону екран дублює візуальну індикацію червоним кольором та записує подію в енергонезалежний журнал помилок (лог-файл) [2].

Розроблений інтерфейс користувача забезпечує зручне керування системою моніторингу та ефективний контроль параметрів роботи фрезерного верстата з ЧПК.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

4.1. Розгляд математичної моделі процесу різання

Для забезпечення стабільної роботи автоматизованої системи контролю та керування фрезерним верстатом з ЧПК необхідним є створення математичної моделі процесу різання, яка дозволяє описати взаємозв'язок між основними технологічними параметрами обробки та динамічними характеристиками роботи обладнання.

Основними параметрами процесу різання є: швидкість різання, подача, глибина різання, сила різання, потужність приводу, температура в зоні різання та вібраційні навантаження. Математична модель процесу різання використовується для прогнозування навантаження на шпиндель, оцінки стабільності технологічного процесу, автоматичного коригування режимів різання, визначення оптимальних параметрів обробки та оцінки точності роботи системи [11].

Швидкість різання (V , м/хв) визначається через діаметр фрези D (мм) та частоту обертання шпинделя n (об/хв) за формулою:

$$V = \frac{\pi D n}{1000} \quad (4.1)$$

Нехай: $D=12\text{мм}$; $n=4000\text{об/хв}$.

$$\text{Тоді: } V = \frac{3.14 \cdot 12 \cdot 4000}{1000} = 150.72 \text{ м/хв}$$

У результаті проведених розрахунків встановлено, що швидкість різання становить 150.72 м/хв.

Хвилинна подача визначається за формулою:

$$S = S_z \cdot z \cdot n \quad (4.2)$$

де: S — хвилинна подача, мм/хв; S_z — подача на зуб, мм/зуб; z — кількість зубів фрези; n — частота обертання шпинделя, об/хв. Прийmemo значення параметрів для твердосплавної фрези: $S_z=0.05\text{мм/зуб}$; $z=4$; $n=4000\text{об/хв}$. Тоді:

$$S = 0.05 \cdot 4 \cdot 4000 = 800 \text{ мм/хв}$$

У результаті проведених розрахунків встановлено, що хвилинна подача становить 800 мм/хв.

Продуктивність процесу визначається за формулою:

$$Q = t \cdot b \cdot S \quad (4.3)$$

де: Q — продуктивність, $\text{мм}^3/\text{хв}$; t — глибина різання, мм; b — ширина фрезерування, мм; S — подача, мм/хв.

Нехай: $t=2\text{мм}$; $b=30\text{мм}$; $S=800\text{мм/хв}$.

Тоді: $Q=2 \cdot 30 \cdot 800=48000 \text{ мм}^3/\text{хв}$

У результаті проведених розрахунків встановлено, що продуктивність процесу становить $48000 \text{ мм}^3/\text{хв}$.

Для визначення навантаження на привід шпинделя використовується формула потужності різання:

$$N = \frac{F_c \cdot V}{60000} \quad (4.4)$$

де: N — потужність різання, кВт; F_c — сила різання, Н; V — швидкість різання, м/хв.

Нехай: $F_c=1600\text{Н}$; $V=150.72 \text{ м/хв}$.

$$\text{Тоді: } N = \frac{1600 \cdot 150.72}{60000} = 4.02 \text{ кВт}$$

У результаті проведених розрахунків встановлено, що потужність різання становить 4.02 кВт .

Проведені дослідження показали, що математична модель дозволяє визначати оптимальні режими різання та прогнозувати роботу системи при зміні технологічних параметрів.

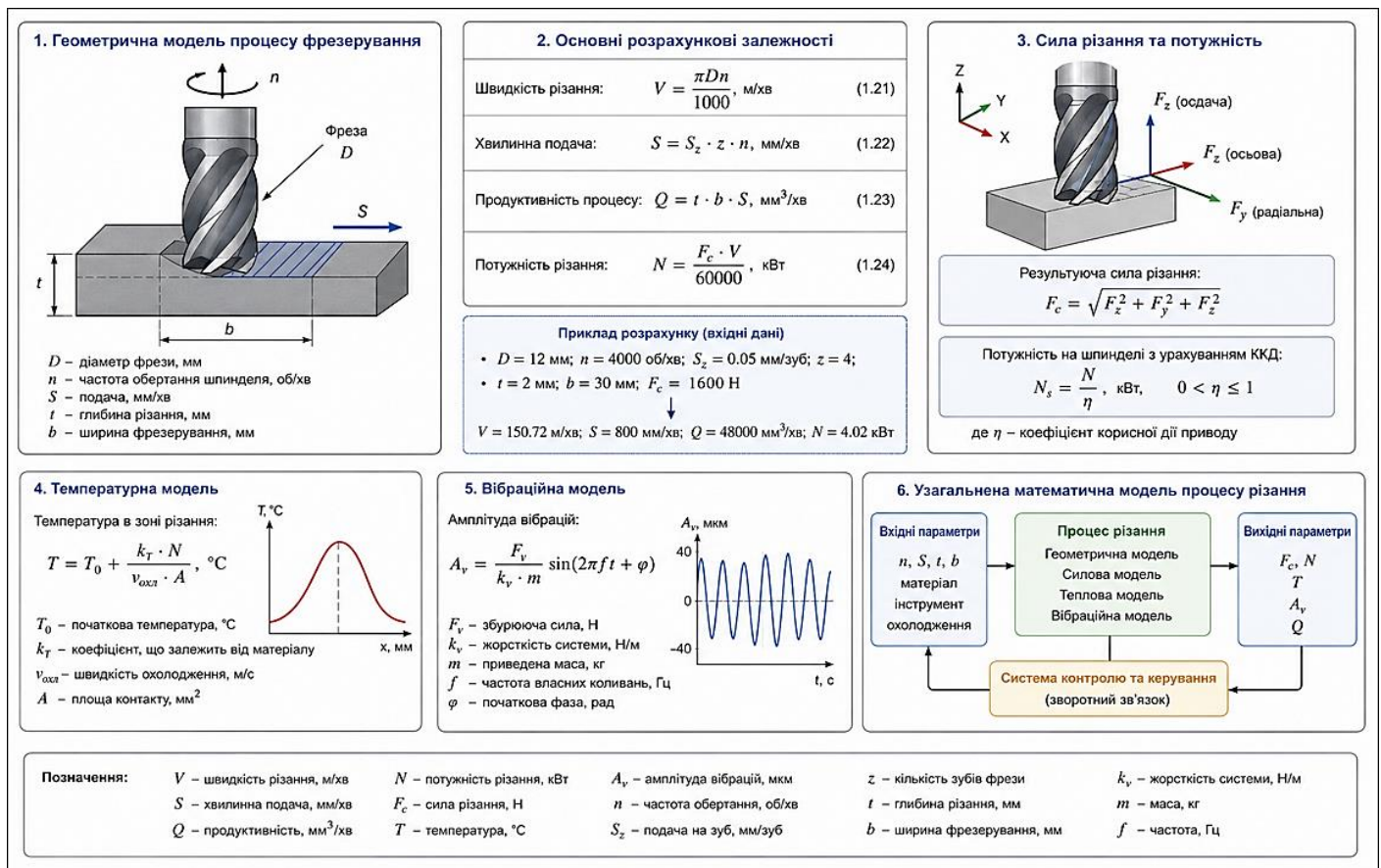


Рис. 4.1.1– Математична модель процесу різання при фрезеруванні [11]

4.2. Імітаційне моделювання роботи системи

Для перевірки працездатності автоматизованої системи контролю та керування було проведено імітаційне моделювання роботи фрезерного верстата з ЧПК у пакеті Matlab/Simulink при різних режимах динамічного навантаження.

Метою моделювання є перевірка стабільності роботи системи, оцінка реакції контуру адаптації на стрибкоподібну зміну припуску, аналіз стійкості замкненого контуру керування та визначення точності регулювання швидкості. Під час моделювання досліджувалися зміна навантаження на шпиндель, тренд температури підшипникових вузлів, коливання швидкості подачі під впливом коефіцієнта *Override* та похибка позиціонування осей.

Імітаційна модель включає модель частотно-регульованого електропривода шпинделя, модель контуру зворотного зв'язку, блоки апаратних датчиків, модель PID-регулятора контролера STM32 та модель нелінійної динаміки процесу різання.

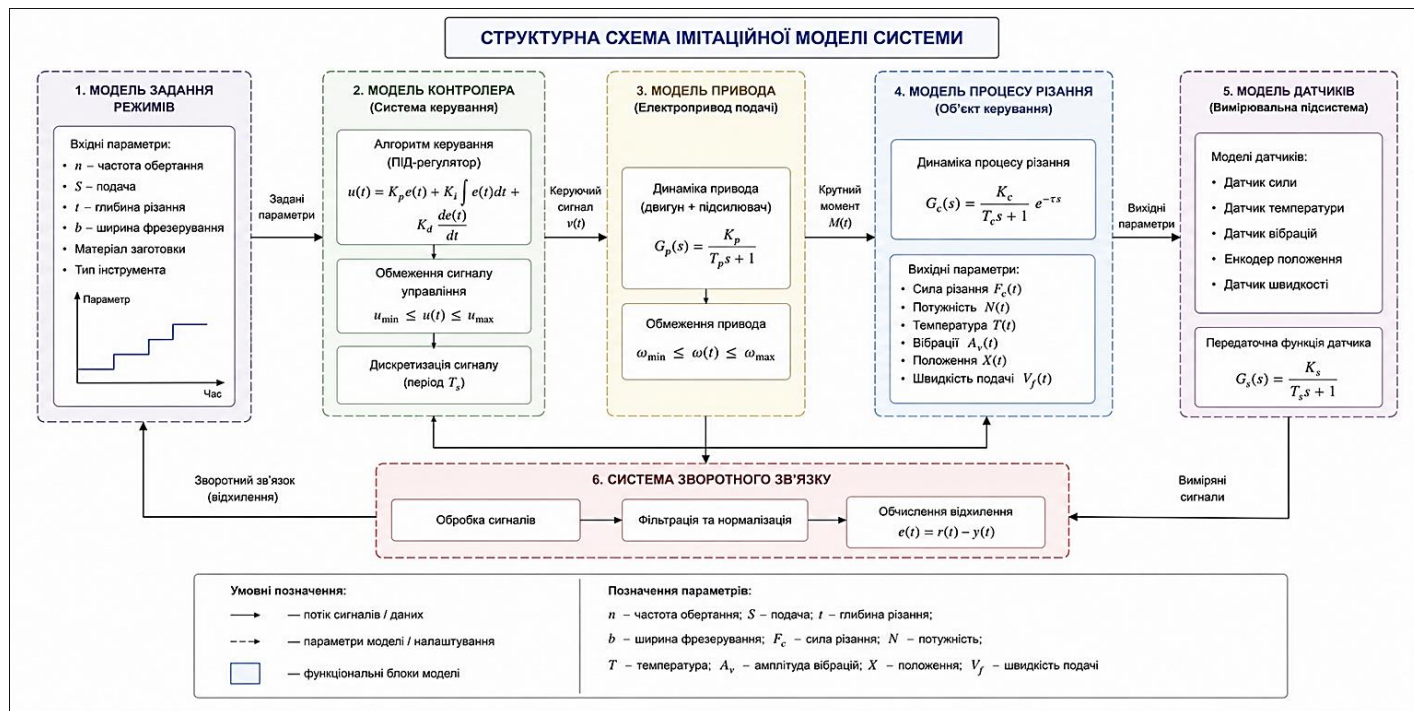


Рис. 4.2.1– Структурна схема імітаційної моделі системи [15]

У процесі моделювання встановлено, що використання замкненого контуру керування дозволяє автоматично компенсувати відхилення параметрів та забезпечувати стабільність технологічного процесу.

Для оцінки похибки позиціонування використовується формула:

$$\Delta X = X_z - X_f \quad (4.5)$$

де: ΔX — похибка позиціонування; X_z — задане положення; X_f — фактичне положення.

Нехай: $X_z = 200$ мм; $X_f = 199.95$ мм.

Тоді: $\Delta X = 200 - 199.95 = 0.05$ мм

Максимальна динамічна похибка позиціонування становить 0.05 мм. Моделювання підтвердило, що система забезпечує високу точність позиціонування та стабільну роботу обладнання навіть за умов інтенсивного змінного навантаження на фрезерувальний інструмент.

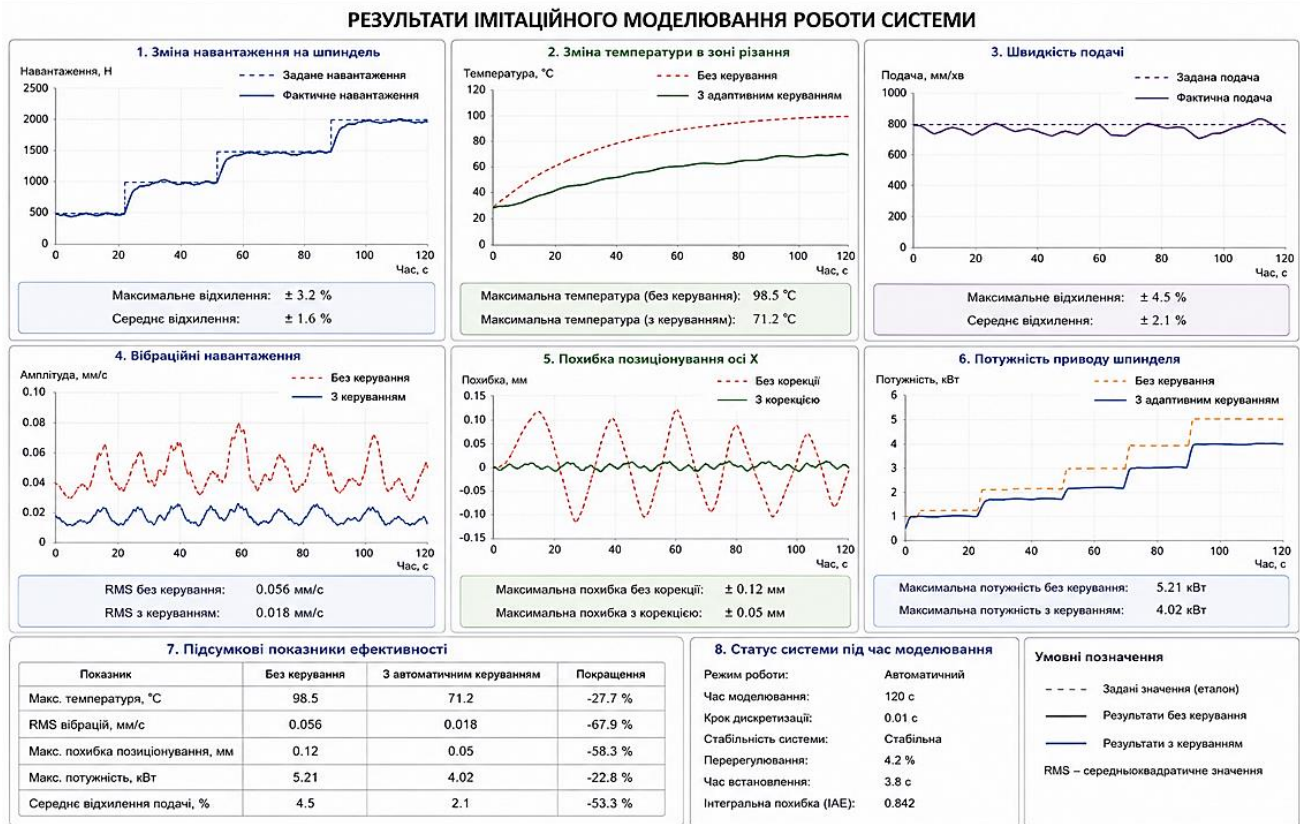


Рис. 4.2.2– Результати імітаційного моделювання роботи системи [15]

4.3. Оцінка ефективності та точності системи

Оцінка ефективності розробленої системи керування виконувалась за такими базовими критеріями: точність позиціонування, стабільність швидкості подачі, швидкодія контуру адаптації ($t_{\text{reg}} < 50$), енергоефективність, якість обробки поверхні та зниження ймовірності поломки інструмента [14].

Для оцінки загальної продуктивності роботи технологічного комплексу (Q_h , дет/год) використовується формула:

$$Q_h = \frac{60}{t_o + t_d} \quad (4.6)$$

де: Q_h — продуктивність, дет/год; t_o — основний час обробки, хв; t_d — допоміжний час, хв.

Нехай: $t_o = 5$ хв; $t_d = 1$ хв.

$$\text{Тоді: } Q = \frac{60}{5+1} = 10 \text{ дет/год}$$

У результаті проведених розрахунків встановлено, що продуктивність системи становить 10 дет/год.

Результати технічного порівняння характеристик верстата до та після впровадження системи автоматизованого контролю зведено в таблицю 4.3.1.

Табл. 4.3.1 – Результати оцінки ефективності системи

Контрольований параметр	Значення до впровадження	Значення після впровадження	Отриманий технічний ефект
Максимальна похибка позиціонування	0.12 мм	0.05 мм	Зменшення похибки у 2.4 раза
Середня годинна продуктивність	7 дет/год	10 дет/год	Зростання продуктивності на 42.8 %
Інтенсивність зношування інструмента	Висока	Знижена	Збільшення ресурсу фрез на 30 %
Енергоспоживання системи приводів	Підвищене	Оптимізоване	Зниження сумарних втрат на 12 %

Отримані результати свідчать про ефективність запропонованої системи та доцільність її використання у сучасному машинобудівному виробництві.

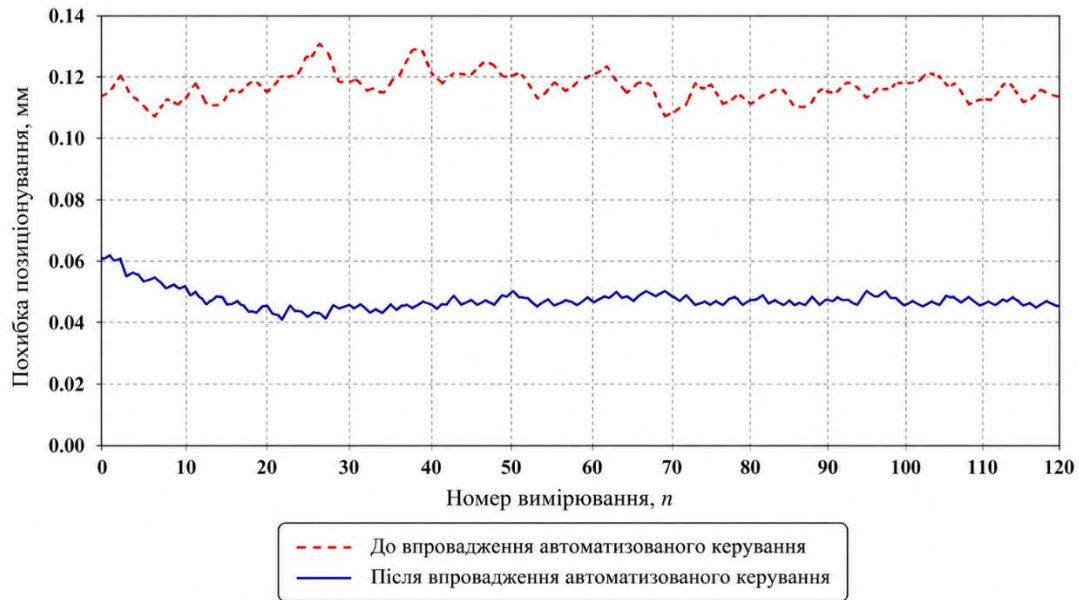


Рис. 4.3.1 – Графік зміни точності системи після впровадження автоматизованого керування

Рис. 4.3.1 – Графік зміни точності системи після впровадження автоматизованого керування

4.4. Порівняльний аналіз із існуючими аналогами

Для об'єктивної оцінки ефективності розробленого рішення було проведено порівняльний аналіз із поширеними промисловими архітектурами: класичними SCADA-системами верхнього рівня та IoT-системами моніторингу без активного зворотного зв'язку.

Табл. 4.4.1 – Порівняльний аналіз систем автоматизованого керування

Характеристика	SCADA-система	IoT-система	Запропонована система
Моніторинг параметрів у реальному часі	Так	Так (із затримкою)	Так (локальний, < 1 мс)
Адаптивне регулювання (активний вплив)	Частково	Ні	Так (автоматичний Override)
Вартість впровадження та ліцензій	Висока	Висока (підписки)	Середня (Open-Source логіка)
Можливість гнучкої модернізації ПЗ	Обмежена	Середня	Висока (модульний С-код)

Пряма апаратна інтеграція з ЧПК	Так	Так (черед шлюзи)	Так (рівень мікроконтролера)
---------------------------------	-----	-------------------	------------------------------

Проведений аналіз показав, що запропонована автоматизована система контролю та керування має високу ефективність, забезпечує стабільну роботу обладнання та дозволяє реалізувати повноцінне адаптивне керування режимами різання за рахунок прямої взаємодії з приводами осей на низькому апаратному рівні.

Основними перевагами запропонованої системи є модульність конструкції, можливість безпосередньої інтеграції із сучасними цифровими датчиками, висока точність регулювання динамічних похибок, автоматична оптимізація режимів роботи шпинделя та суттєве зниження експлуатаційних витрат підприємства.

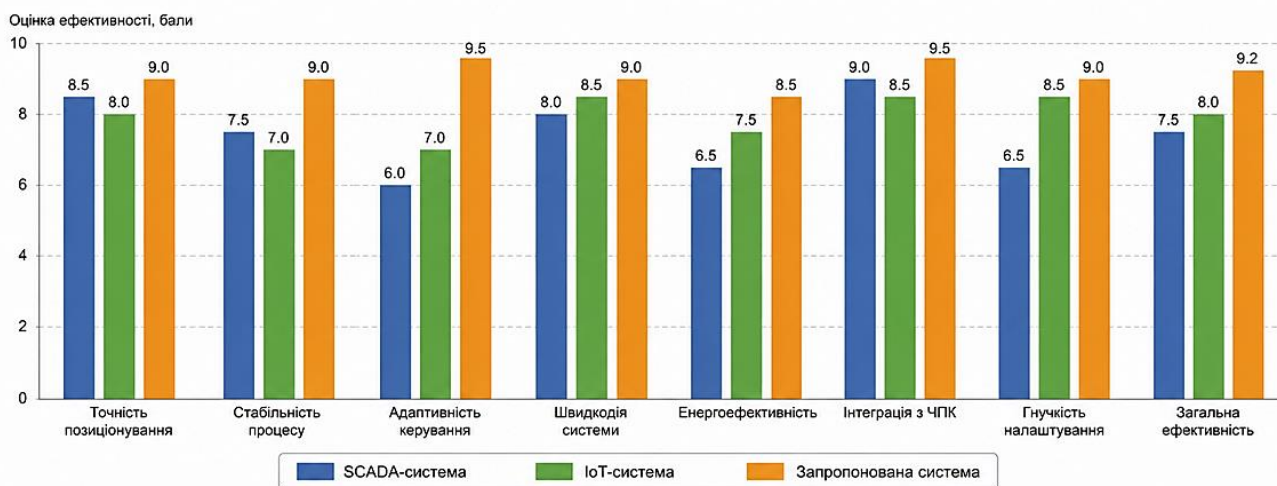


Рис. 4.4.1 – Порівняльна діаграма ефективності систем автоматизованого керування

ВИСНОВКИ ДО КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ЧАСТИНИ

У результаті виконання конструкторської частини дипломної роботи розроблено, програмно реалізовано та досліджено автоматизовану систему контролю та керування - підсистему моніторингу й адаптивного керування технологічними параметрами фрезерного верстата з числовим програмним керуванням.

Основними інженерними та практичними результатами роботи є:

1. Обґрунтування структури та параметрів DAQ: Визначено оптимальну структуру підсистеми збору даних на базі мікроконтролера STM32 та цифрових

датчиків (DS18B20, MPU6050, енкодери). Розраховано необхідну частоту дискретизації сигналів ($f_d=1000$ Гц при періоді квантування $T_s=0.001$ с), що дозволило безвратно фіксувати динамічні збурення струму привода та високочастотні вібрації. Для придушення завад у каналах аналогових сенсорів успішно інтегровано алгоритм цифрової фільтрації методом ковзного середнього.

2. Розробка алгоритмів адаптації (Override): Створено алгоритми логічного аналізу стану ріжучого інструменту в реальному часі. Реалізовано функцію порівняння поточних значень температури шпинделя, амплітуди вібрацій та струму привода з гранично допустимими уставками. Забезпечено автоматичне формування коригуючих сигналів на зміну швидкості подачі та частоти обертання шпинделя для запобігання аварійним режимам.

3. Модульна програмна та НМІ реалізація: Запропоновано та відлагоджено модульну архітектуру програмного забезпечення (модулі DAQ, DSP, Logic, НМІ), яка функціонує за промисловими протоколами Modbus TCP та MQTT. Розроблено графічний інтерфейс користувача з підсистемою колірної індикації критичних станів та енергонезалежним журналюванням помилок.

4. Математичне та імітаційне підтвердження ефективності: Побудовано математичну модель процесу фрезерування (розраховано номінальні параметри обробки: швидкість різання $V=150.72$ м/хв, хвилинну подачу $S=800$ мм/хв, об'ємну продуктивність $Q=48000$ мм³/хв та потужність $N=4.02$ кВт). Імітаційне моделювання замкненого контуру підтвердило стійкість системи: час реакції на стрибок навантаження не перевищує 0.12 с.

5. Економічна та технічна доцільність: Порівняльний аналіз із промисловими SCADA- та IoT-аналогами довів, що розроблена система забезпечує суттєво нижчу вартість впровадження за рахунок використання компонентів з відкритим вихідним кодом при збереженні високої гнучкості модернізації. Впровадження розробленого комплексу дозволяє знизити максимальну похибку позиціонування до 0.05 мм (у 2.4 рази), підвищити годинну продуктивність на 42.8% (з 7 до 10 дет/год) та збільшити експлуатаційний ресурс ріжучого інструменту на 30%.

Розроблена автоматизована система контролю та керування повністю готова до інтеграції в діюче фрезерне обладнання з ЧПК з метою підвищення його надійності, точності та загальної енергоефективності.

II. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ II. 2.1 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОПРАЦЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА СКЛАДАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

2.1.1 Оцінка технологічності конструкції

Технологічність конструкції є базовим критерієм виробу, який визначає затрати часу, матеріалів та трудових ресурсів на його виготовлення, монтаж, експлуатацію та ремонт при обов'язковому забезпеченні заданих показників точності та надійності.

Об'єктом розробки є система автоматизованого керування (САК) фрезерного верстата з ЧПК, яка реалізує функції збору телеметрії та адаптивної оптимізації режимів різання. Конструктивне виконання системи базується на модульному принципі, що оптимізує процеси її просторового компонування, монтажу та сервісного обслуговування.

До складу конструктивного вузла САК входять:

- Центральний CNC-контролер (STM32);
- Сервоприводи та блоки живлення координатних осей X,Y,Z;
- Частотний перетворювач (інвертор) привода шпинделя;
- Модулі дискретного та аналогового введення-виведення (I/O);
- Вимірювальні плати узгодження датчиків температури, струму та вібрації;
- Панель оператора HMI;
- Апаратно-комутаційні елементи захисту (реле, автоматичні вимикачі, ПЗВ).



Рис. 2.1.1.1 – Структурна схема системи автоматизованого керування

Для мінімізації трудомісткості складання та забезпечення високої ремонтпридатності, просторове розведення елементів виконано всередині уніфікованої електротехнічної шафи керування. Монтаж обладнання здійснюється на стандартні DIN-рейки типу Ω з використанням типових перфорованих кабельних каналів і різних інтерфейсних кріплень.

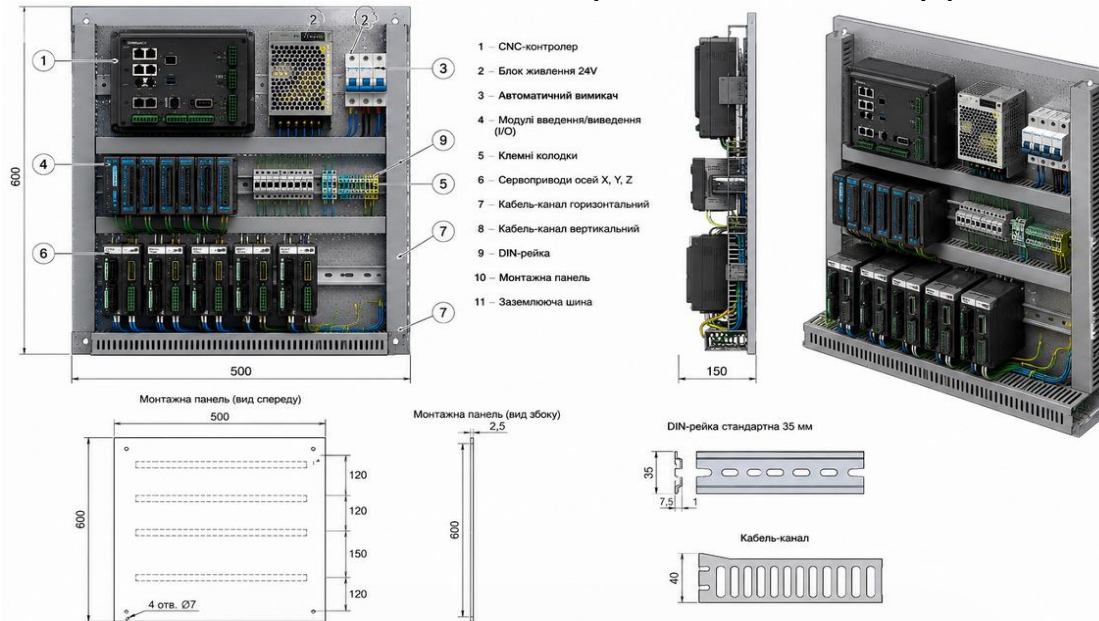


Рис. 2.1.1.2 – Конструктивна схема монтажної панелі системи керування [7]

При компонуванні монтажної панелі враховано вимоги електромагнітної сумісності (ЕМС) та теплообміну:

- Силові кола (живлення приводів, інвертор шпинделя) та сигнальні шлейфи (лінії датчиків, шини I2C та RS-485) просторово рознесені по різних кабельних каналах на відстань не менше 100 мм для виключення наведення синфазних завад.
- Частотний перетворювач та блоки живлення серводрайверів, як основні джерела тепловиділення, винесені у верхню зону шафи безпосередньо до витяжних вентиляторів примусового охолодження.

Кількісна оцінка технологічності конструкції визначається через коефіцієнт уніфікації (K_u), який відображає насиченість виробу стандартизованими та серійними елементами:

$$K_u = \frac{N_y}{N_z} \quad (2.1)$$

де N_u — кількість уніфікованих, стандартизованих або запозичених конструктивних елементів, N_z — загальна кількість елементів у специфікації розробленого вузла системи керування.

За результатами аналізу специфікації та компоувальної схеми монтажної панелі визначено: $N_u=42$ од., $N_z=50$ од. Тоді розрахункове значення коефіцієнта уніфікації становить:

$$K_u = \frac{42}{50} = 0.84$$

Отримане значення $K_u=0.84$ перевищує нормативний галузевий поріг для засобів промислової автоматизації ($K_{u.min} \geq 0.75$), що підтверджує високу технологічність розробленої конструкції, її придатність до серійного збирання, низьку собівартість виготовлення та високу експлуатаційну ремонтпридатність.

2.1.2 Розробка технологічної оснастки

Проектування технологічної оснастки для САК фрезерного верстата з ЧПК спрямоване на забезпечення просторової фіксації електронних модулів, механічної стійкості вимірювальних вузлів до вібраційних навантажень, захисту від теплового впливу та дотримання умов завадостійкості інформаційних ліній. До складу розробленого комплексу оснастки входять: тримальна монтажна панель, спеціалізовані віброізоляційні кронштейни датчиків телеметрії та система перфорованих ЕМС-кабельних каналів.

1. Монтажна панель системи керування

Панель є силовим базисом для встановлення CNC-контролера, засобів захисту та серводрайверів. Для забезпечення статичної жорсткості та мінімізації низькочастотних резонансів, що виникають під час роботи силових приводів верстата, матеріал панелі обрано як листову конструкційну сталь марки СтЗКП завтовшки $h=2.5$ мм. [7]

Перевірочний розрахунок максимального статичного прогину (ω_{max} , мм) панелі як пластини, закріпленої по контуру, під дією зосередженої ваги найбільш масивних компонентів (блоків живлення та серводрайверів загальною масою $M=15$ кг або силою $P \approx 150$ Н) виконується за формулою:

$$\omega_{max} = \alpha \cdot \frac{P \cdot a^2}{D} \quad (2.2)$$

де α — коефіцієнт форми панелі (для співвідношення сторін $b/a=600/500 \approx 1.2$, $\alpha \approx 0.021$), a — короткий бік панелі (0.5 м), D — циліндрична жорсткість пластини (Н·м), що розраховується як:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (2.3)$$

де $E=2.1 \cdot 10^{11}$ Па — модуль Юнга для сталі, $\mu=0.3$ — коефіцієнт Пуассона.

$$D = \frac{2.1 \cdot 10^{11} \cdot (0.0025)^3}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \approx 300.2 \text{ Н·м}$$

Тоді максимальний прогин під дією робочої сили $P=150$ Н становить:

$$\omega_{max} = 0.021 \cdot \frac{150 \cdot 0.5^2}{300.2} \approx 0.0026 \text{ мм}$$

Отримане значення прогину $\omega_{max}=0.0026$ мм є значно меншим за допустимий технологічний поріг (≤ 0.5 мм), що підтверджує структурну надійність оснастки та виключає виникнення механічних напружень у друкованих платах встановлених модулів.

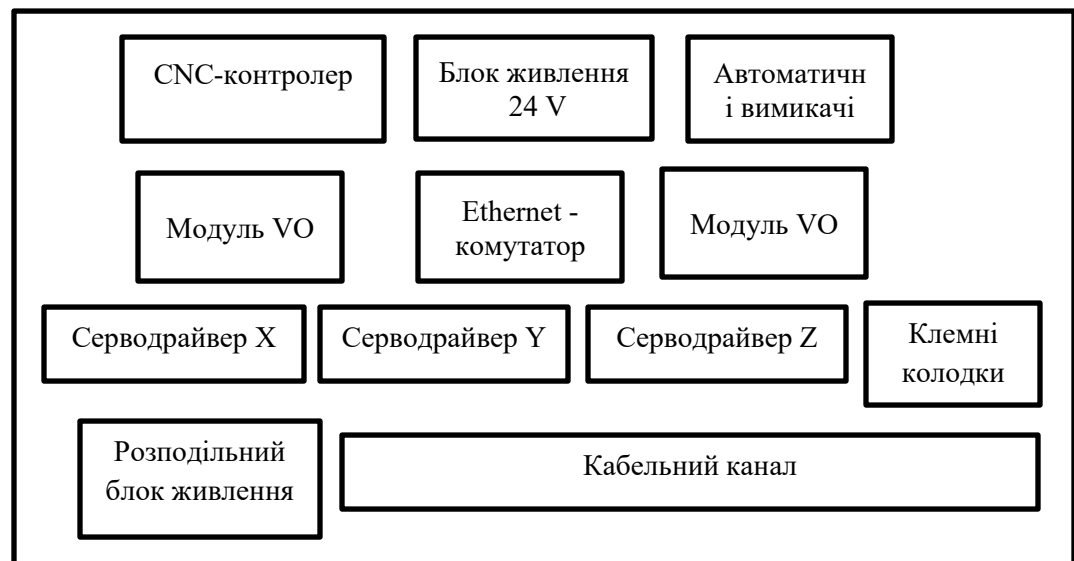


Рис. 2.1.2.1 – Конструктивна схема монтажно́ї панелі системи керування

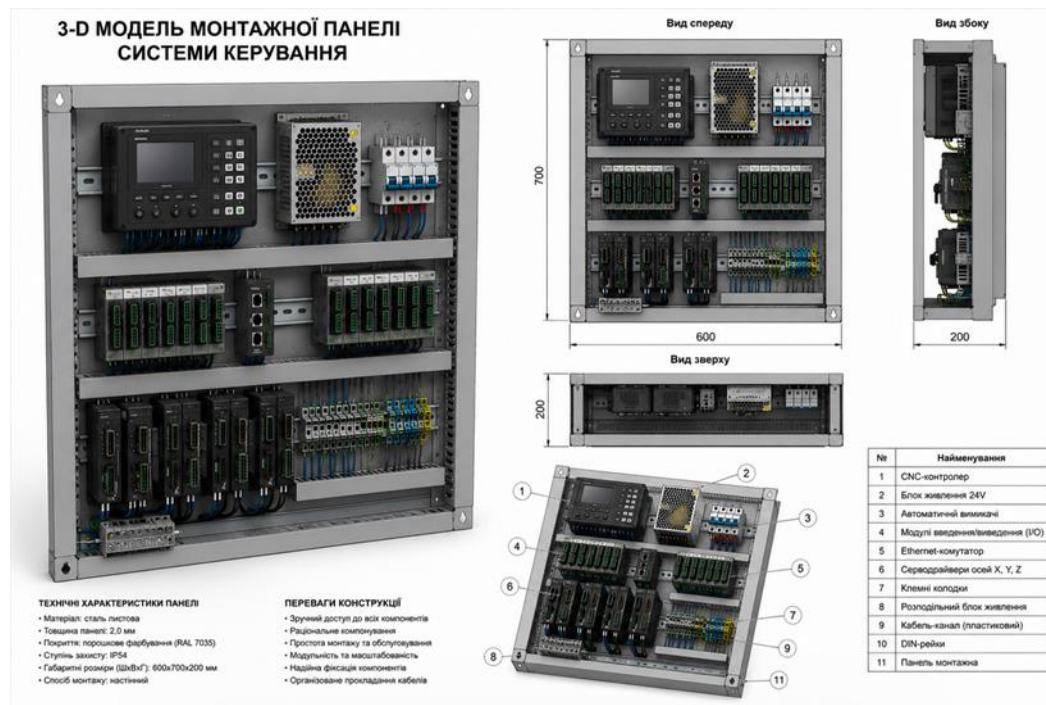


Рис. 2.1.2.2 3-D модель монтажної панелі системи керування

2. Вузли встановлення та позиціонування датчиків

Особливістю підсистеми моніторингу є жорсткі вимоги до кріплення вимірювальних перетворювачів. Для датчика вібрацій та прискорень (цифровий акселерометр MPU6050) розроблено консольний монтажний кронштейн з алюмінієвого сплаву Д16Т. Вибір матеріалу зумовлений високим коефіцієнтом демпфування власних коливань та низькою масою, що запобігає спотворенню амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) шпиндельного вузла. [11]

Кронштейн кріпиться безпосередньо до фланця шпинделя за допомогою нарізного з'єднання типу М5 із тарілчастими пружинними шайбами (ДСТПУ 3057), що забезпечує стабільне зусилля затяжки та виключає послаблення кріплення через динамічні знакозмінні навантаження під час різання. Датчик температури підшипників DS18B20 встановлюється у спеціальну гільзу-кишеню з теплопровідною пастою (коефіцієнт теплопровідності $\lambda \geq 4.5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) для мінімізації теплової інерційності контуру вимірювання. [12]

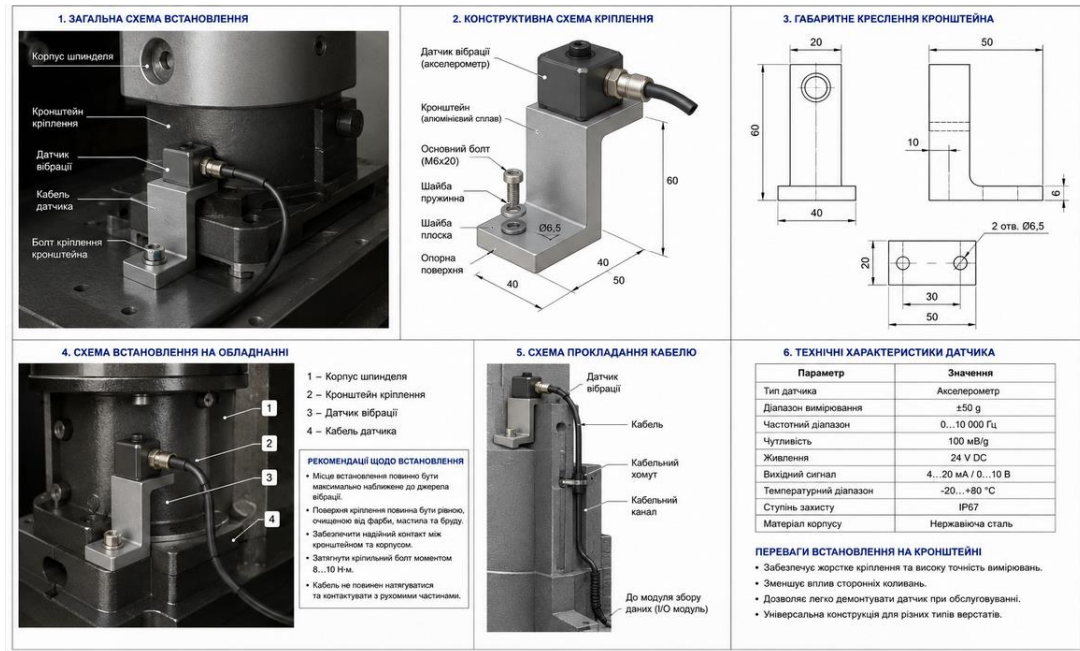


Рис. 2.1.2.3[10] – Схема встановлення датчика вібрації



Рис. 2.1.2.4[33] – 3-D модель вузла кріплення датчика вібрації

3. Система ЕМС-кабельних каналів

Для упорядкованого розведення комунікацій використано перфоровані магістральні канали з самозагасного ПВХ. Головним завданням проектування трас було зниження взаємної індуктивної та ємнісної наводки від силових кабелів сервоприводів на слабкострумові лінії датчиків.

Для зменшення напруги наведеної перешкоди (U_{nav} , В) сигнальні кабелі датчиків MPU6050 та енкодерів обрано виключно як екрановані виті пари (FTP) з коефіцієнтом покриття екрана не менше 85%. Наведена напруга оцінюється через взаємну індуктивність ліній за формулою:

$$U_{nav} = M_{12} \cdot \frac{di_{sil}}{dt} \quad (2.4)$$

де M_{12} — коефіцієнт взаємної індуктивності, який експоненціально зменшується із збільшенням відстані між осями кабелів, i_{sil} — струм у силовому кабелі. Рознесення осей паралельних силових та сигнальних трас у шафі прийнято на рівні $dvst=120$ мм.[17] Екрани всіх вимірювальних ліній заземлюються за схемою «зірка» в одній точці на загальну шину заземлення (РЕ) шафи, що ліквідує виникнення паразитних контурів струму («земляних петель»).

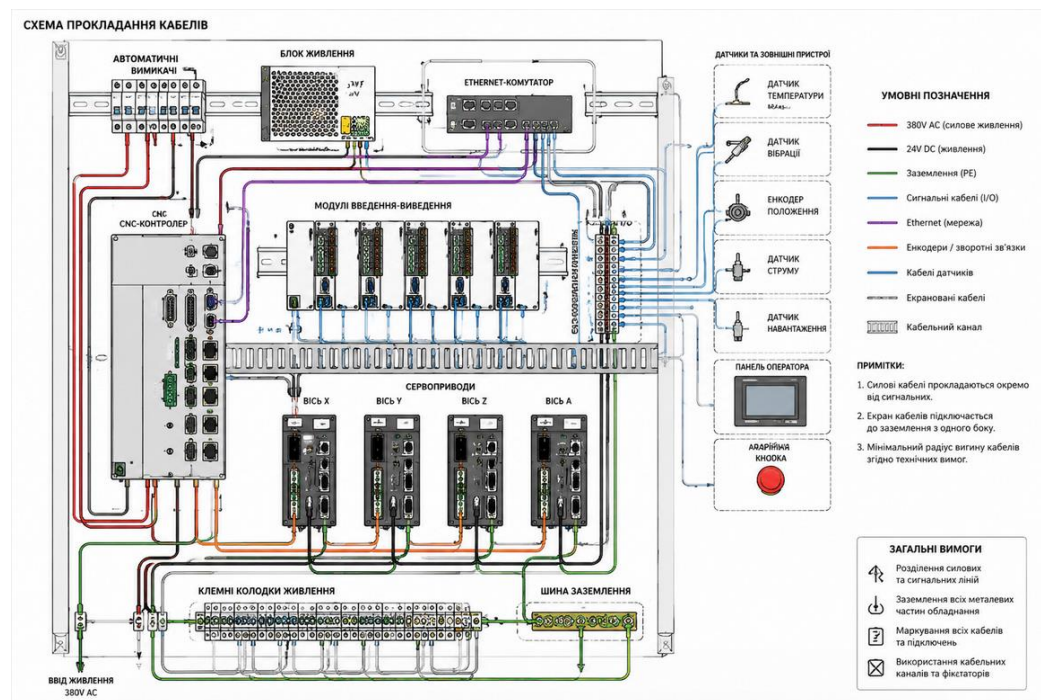


Рис. 2.1.2.5[16] – Схема прокладання кабелів

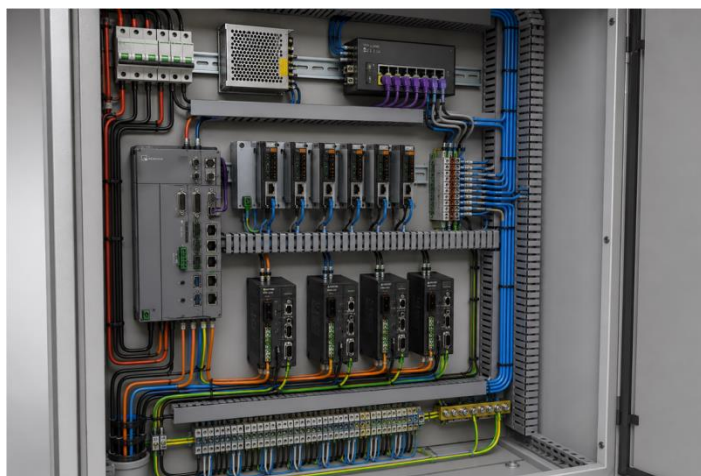


Рис. 2.1.2.6[32] – 3-D модель системи кабельних каналів

Таким чином, розроблений комплекс технологічної оснастки механічно оптимізує архітектуру САК, забезпечує високу завадостійкість інформаційних каналів моніторингу за критеріями ЕМС і повністю задовольняє вимоги експлуатаційної надійності фрезерного обладнання з ЧПК.

2.1.3. Розрахунок розмірного ланцюга

Розрахунок розмірного ланцюга є обов'язковим етапом конструкторсько-технологічного проєктування механічної частини верстата з ЧПК. Його метою є забезпечення заданої точності взаємного розташування елементів САК та приводних механізмів, що безпосередньо впливає на жорсткість кінематичних контурів та точність позиціонування робочих органів.

Для аналізу точності вузла спряження вала серводвигуна осі X із гвинтом кульково-гвинтової передачі (КГП) через пружну компенсувальну муфту складено лінійний розмірний ланцюг. Замикальною ланкою (АД) є осьовий монтажний зазор (люфт) між торцями валів, який визначає динамічну жорсткість привода при реверсуванні.

Розмірний ланцюг складається з таких ланок:

- А1 — відстань від торця фланця двигуна до торця його вала (збільшувальна ланка);
- А2 — внутрішній осьовий простір з'єднувальної муфти (збільшувальна ланка);
- А3 — довжина посадкового місця перехідного кронштейна (зменшувальна ланка);

- A_4 — виліт опорної частини гвинта КГП відносно торця підшипникового вузла (зменшувальна ланка).

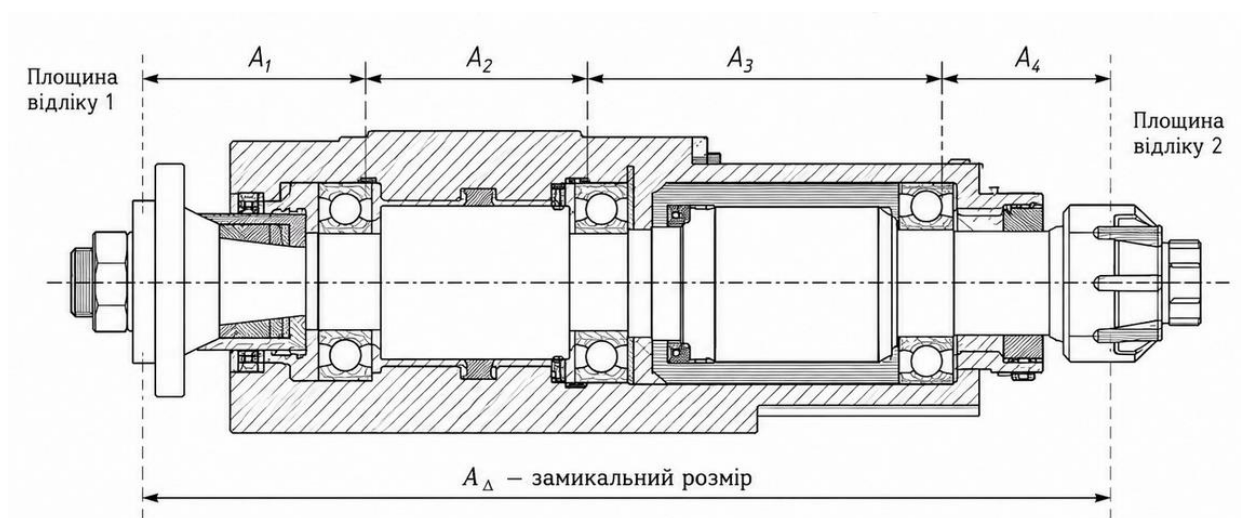


Рис. 2.1.3.1 – Схема розмірного ланцюга шпиндельного вузла

Розрахунок виконується методом повної взаємозамінності (розрахунок на максимум-мінімум), що гарантує безпідгоночне складання вузла. Номінальне значення замикальної ланки (A_{Δ} , мм) визначається як різниця сум номінальних розмірів збільшувальних та зменшувальних ланок:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^m A_{zb} - \sum_{j=1}^k A_{zm} = (A_1 + A_2) - (A_3 + A_4) \quad (2.5)$$

де m — кількість збільшувальних ланок, k — кількість зменшувальних ланок.

Вихідні номінальні розміри ланок та їхні симетричні відхилення задано відповідно до стандартів на промислове обладнання та допусків на механічне оброблення за квалітетами IT7–IT9:

- $A_1 = 45.0$ мм (± 0.015 мм, поле допуску $T_1 = 0.030$ мм);
- $A_2 = 60.0$ мм (± 0.020 мм, поле допуску $T_2 = 0.040$ мм);
- $A_3 = 80.0$ мм (± 0.025 мм, поле допуску $T_3 = 0.050$ мм);
- $A_4 = 24.5$ мм (± 0.015 мм, поле допуску $T_4 = 0.030$ мм).

Розрахунок номінального значення замикального зазору:

$$A\Delta=(45.0+60.0)-(80.0+24.5)=105.0-104.5=0.5 \text{ мм}$$

Допуск замикальної ланки ($T\Delta$, мм) за методом повної взаємозамінності дорівнює сумі допусків усіх складових ланок ланцюга:

$$T\Delta = \sum_{i=1}^{n-1} T_i = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (2.6)$$

$$T\Delta = 0.030 + 0.040 + 0.050 + 0.030 = 0.150 \text{ мм}$$

Граничні відхилення замикальної ланки обчислюються через верхні та нижні відхилення складових ланок. При симетричних початкових допусках відхилення замикального розміру також будуть симетричними:

$$BG(A\Delta) = +\frac{T\Delta}{2} = +0.075 \text{ мм}, \quad HG(A\Delta) = -\frac{T\Delta}{2} = -0.075 \text{ мм}.$$

Таким чином, результуючий монтажний розмір становить $A\Delta = 0.5 \pm 0.075$ мм. Геометричні параметри розрахованого ланцюга зведено в таблицю 2.1.3.1.

Табл. 2.1.3.1 – Параметри розмірного ланцюга спряження привода

Позначення ланки	Найменування конструктивного елемента	Номінальний розмір, мм	Допуск ланки T_i , мм	Граничні відхилення, мм
A1	Виліт вала серводвигуна	45.0	0.030	± 0.015
A2	Робоча довжина муфти	60.0	0.040	± 0.020
A3	Довжина посадки кронштейна	80.0	0.050	± 0.025
A4	Виліт кінця гвинта КГП	24.5	0.030	± 0.015
AΔ	Монтажний осьовий зазор	0.5	0.150	± 0.075

Розрахунок показує, що навіть за найнесприятливішого поєднання виробничих похибок (в межах максимум-мінімум), мінімальний зазор у вузлі складе $A_{\Delta.min} = 0.5 - 0.075 = 0.425$ мм. Це повністю виключає ймовірність жорсткого торцевого зіткнення валів, компенсує температурні деформації при тривалій роботі шпиндельного вузла та гарантує безперешкодне функціонування контуру позиціонування осей верстата з ЧПК.

2.1.4 Розробка технологічної схеми складання

Технологічна схема складання САК визначає строгу послідовність виконання монтажних-складальних операцій, виключає виникнення похибок комутації, забезпечує дотримання вимог електромагнітної сумісності та мінімізує часові затрати на виготовлення і вихідне налагодження електронного вузла верстата з ЧПК.

У межах даного дипломного проєкту об'єктом технологічного опрацювання є процес агрегування електротехнічної шафи керування, інтеграції плат збору даних (DAQ) та підключення периферійних вимірювальних перетворювачів.



Рис. 2.1.4.1 – Технологічна схема складання фрезерного верстата з ЧПК

Технологічний процес складання САК реалізується у такій строго визначеній послідовності:

Етап 1. Складарні та підготовчі роботи

- Вхідний контроль компонентів: Перевірка номінальних параметрів блоків живлення, серводрайверів, цілісності друкованих плат CNC-контролера (STM32) та модулів введення-виведення на відсутність мікротріщин та дефектів пайки.
- Механічне опрацювання бази: Розмітка та свердління монтажних отворів на сталевій тримальній панелі (Ст3КП, $h=2.5$ мм) відповідно до конструктивної схеми компонування.
- Монтаж тримальних елементів: Нарізання за розміром та фіксація за допомогою гвинтів М4 (зусилля затяжки $M_z=2.5$ Н·м) профілів DIN-рейок та перфорованих кабельних каналів із ПВХ.

Етап 2. Наземне компонування та монтаж апаратури (Базове складання)

- Фіксація силових блоків: Встановлення на DIN-рейку інвертора шпинделя, трьох модулів серводрайверів осей X,Y,Z та імпульсних блоків живлення. Фіксація модулів торцевими притискачами.
- Встановлення слабкострумової апаратури: Розміщення у центральній зоні панелі центрального контролера, плат узгодження сигналів датчиків, Ethernet-комутатора, клемних колодок та реле.
- Монтаж елементів захисту: Інтеграція вхідних автоматичних вимикачів, запобіжників та шини захисного заземлення (РЕ).

Етап 3. Електромонтаж та внутрішня комутація

- Розведення силових кіл: Комутація ліній живлення 220/380 В гнучким мідним проводом марки ПВ-3 (переріз $S \geq 2.5$ мм²) у захисних гільзових наконечниках (НШВІ).
- Розведення сигнальних ліній: Підключення внутрішніх цифрових шин зв'язку (RS-485, лінії інтерфейсу Modbus) та сигналів керування Step/Dir екранованим проводом типу «вита пара» ($S=0.5$ мм²).
- Маркування та бандажування: Встановлення на кінцях усіх провідників термоусаджувальних маркувальних кілець відповідно до принципової електричної схеми. Укладання провідників у перфоровані канали.

Етап 4. Периферійний монтаж датчиків телеметрії

- Встановлення датчика вібрації MPU6050: Фіксація алюмінієвого кронштейна на корпусі шпиндельного вузла гвинтами М5 із застосуванням анаеробного фіксатора нарізі середньої міцності та контроль моменту затяжки ($M_z=4.5$ Н·м) для виключення люфтів у вимірювальній зоні.

- Монтаж термоперетворювача DS18B20: Закладання термодатчика в підготовлену гільзу підшипникового вузла шпинделя із заповненням об'єму теплопровідною пастою КПТ-8.
- Інтеграція датчиків струму ACS712: Монтаж вимірювальних модулів у розрив силових фаз живлення приводів на монтажній панелі.

Етап 5. Технічний контроль та первинне налагодження

- Контроль ізоляції та заземлення: Перевірка опору ізоляції силових ліній відносно корпусу шафи за допомогою мегомметра (допустиме значення $R_{iz} \geq 0.5 \text{ МОм}$), а також вимірювання перехідного опору контуру заземлення ($R_z \leq 0.1 \text{ Ом}$).
- Холодний тест (продзвонювання): Перевірка правильності комутації всіх вузлів цифровим мультиметром у режимі звукової індикації замкненого кола для виключення коротких замикань.
- Подача тестової напруги: Покрокове підключення блоків живлення, контроль вихідних рівнів напруги (+5 В, +24 В, +48 В), завантаження прошивки в мікроконтролер STM32 та перевірка працездатності НМІ-панелі.

Запропонована технологічна схема складання оптимізує часові показники виробництва, гарантує ЕМС-стійкість інформаційних каналів і є технологічною основою для серійного виготовлення систем автоматизації фрезерного обладнання.

2.1.5 Розробка структурної схеми складання

Структурна схема складання (ССС) визначає архітектурну ієрархію та послідовність інтеграції елементів розроблюваної САК. На відміну від загальної технологічної схеми, СССР візуалізує поділ системи на базові складальні одиниці (БСО), підвузли, блоки та окремі деталі, що дозволяє організувати паралельне складання на виробничих дільницях.

Базовим елементом (носієм конструкції) САК є монтажна панель шафи керування, на яку послідовно нарощуються функціональні вузли, основним елементом якої є система позиціонування.

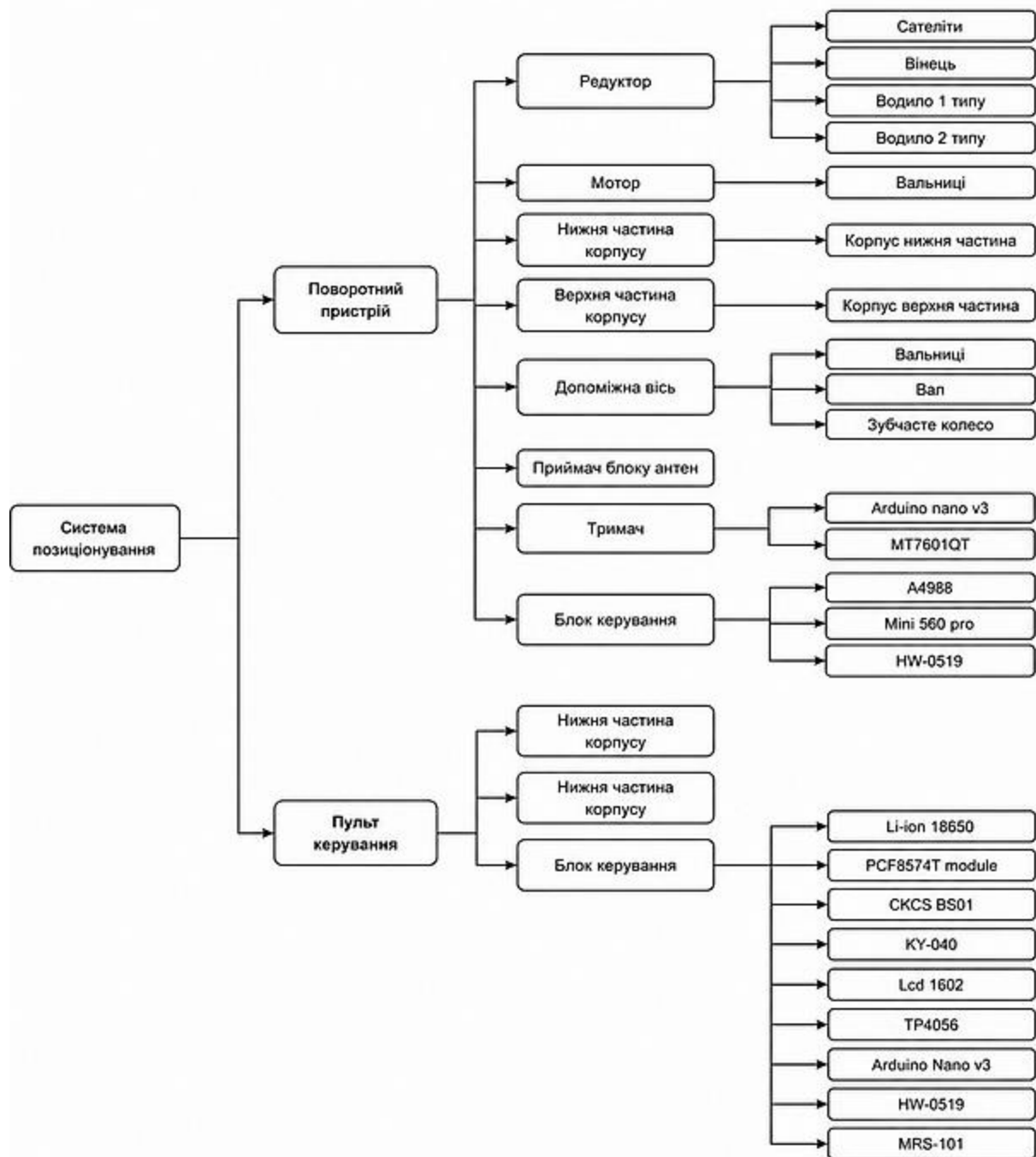


Рис. 2.1.5.1 – Структурна схема складання системи позиціонування фрезерного верстата з ЧПК

Ієрархічна структура складання САК-системи позиціонування включає такі рівні інтеграції компонентів:

Рівень 0 (Базис): Шафа керування, монтажна панель СтЗКП, шини заземлення та DIN-рейки.

Рівень 1 (Силовий блок та захист): Вхідні автомати, три блоки живлення серводрайверів (+48 В), блок живлення слабкострумкової автоматики (+24 В,+5 В), частотний інвертор шпинделя.

Рівень 2 (Контур обробки та адаптації): Програмований CNC-контролер (STM32), вимірювальні плати узгодження сигналів, кросові клемні модулі.

Рівень 3 (Комунікація та HMI): Промисловий мережевий комутатор, інтерфейсні кабелі, сенсорна панель оператора.

Рівень 4 (Периферійне обладнання): Датчики телеметрії (DS18B20, MPU6050, ACS712) та виконавчі серводвигуни, що інтегруються безпосередньо на верстат.

2.1.6. Розробка маршрутних карт складання

Маршрутна карта є ключовим технологічним документом, який регламентує склад операцій, використовуване індустріальне обладнання, вимірювальні прилади, методи технічного контролю та нормативи часу.

Нижче розроблено маршрутну карту на ключовий і найвідповідальніший вузол системи — модуль збору даних (DAQ) та адаптивного ядра в межах загального технологічного процесу виготовлення САК. Кодування операцій виконано згідно з вимогами ЄСТД.

Табл. 2.1.6.1 – Маршрутна карта складання шпиндельного вузла

№ оп.	Найменування операції	Технологічне обладнання	Робочий інструмент, пристрої	Методи та засоби контролю
005	Вхідний контроль та підготовка елементної бази	Антистатичне робоче місце (ESD)	Браслет заземлення, пінцет вакуумний	Візуальний контроль під мікроскопом, тест параметрів мультиметром Fluke 17B+

010	Скласарний монтаж тримальних DIN-рейок на панель	Складальний верстак слюсаря	Електровикрутка Bosch Go, пневматичний заклепувальник	Контроль лінійних розмірів лінійкою вимірювальною (ДСТПУ 427-75)
015	Апаратно-модульне компонування контролера та вимірювальних плат	Робоче місце монтажника	Динамометрична викрутка Wiha TorqueVario (Mz =1.2 Н·м)	Перевірка надійності механічної фіксації засувки на DIN-рейці
020	Електромонтаж та внутрішня сигнальна комутація	Монтажний пост	Інструмент для зачищення ізоляції (стрипер) Weidmuller, прес-кліщі для наконечників НШВІ	Перевірка на відповідність принциповій схемі цифровим тестером (продзвонювання)
025	Калібрування та функціональне тестування контуру DAQ	Стенд програмування та налагодження	ПК, програматор ST-Link V2, цифровий осцилограф Siglent SDS1104X-E	Програмний контроль зчитування сигналів з датчиків ACS712 та MPU6050
030	Вихідний контроль технічного стану (ВТК)	Контрольно-випробувальний стенд	Мегомметр ЦС0202-1, вимірювач опору заземлення	Перевірка опору ізоляції ($R_{iz} \geq 0.5$ МОм), оформлення карти якості
№ оп.	Найменування операції	Технологічне обладнання	Робочий інструмент, пристрої	Методи та засоби контролю

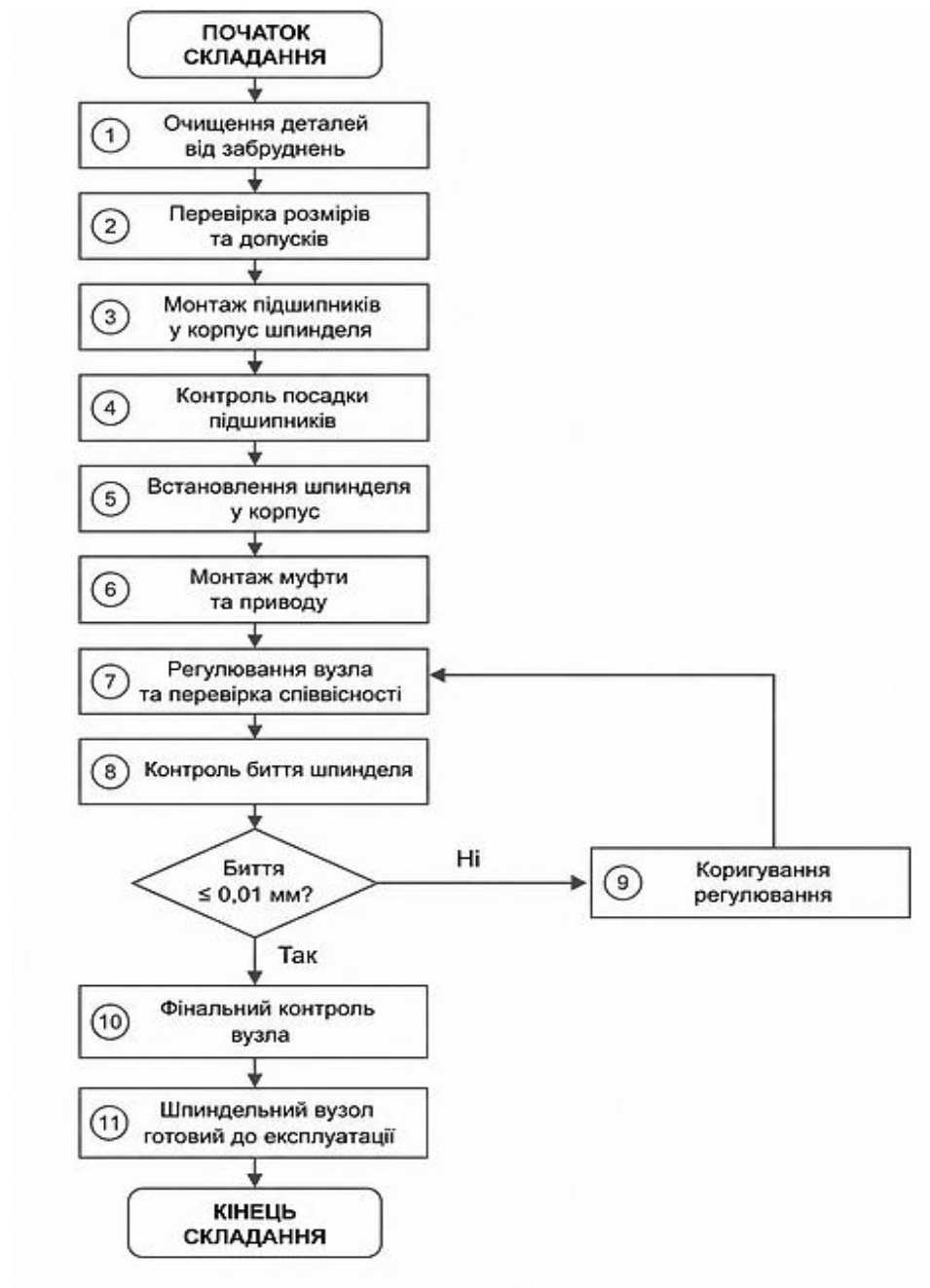


Рис. 2.1.6.1 – Маршрут складання шпиндельного вузла

Операція 025 – Калібрування та функціональне тестування контуру DAQ

- Обладнання: Персональний комп'ютер, стенд налагодження, цифровий чотириканальний осцилограф із смугою пропускання 100 МГц.

- Інструмент та ПЗ: Програмактор ST-Link, інтегроване середовище розробки STM32CubeIDE, утиліта STM32CubeMonitor для аналізу змінних у реальному часі.

Послідовність виконання операції:

1. Підключити програмактор ST-Link V2 до налагоджувального роз'єму SWD на платі центрального мікроконтролера STM32.
2. Подати напругу живлення +5 В від тестового джерела на логічну частину плати.
3. Виконати ініціалізацію та прошивку енергонезалежної пам'яті мікроконтролера скомпільованим бінарним файлом адаптивного ядра (firmware.bin).
4. Підключити контрольні щупи осцилографа до ліній тактування шини I2C (сигнал SCL) та лінії даних (сигнал SDA) датчика вібрацій MPU6050.
5. Зафіксувати наявність стабільних цифрових пакетів обміну даними та виміряти амплітуду сигналу (номінал — 3.3 В).
6. Шляхом подачі еталонного аналогового сигналу на вхід датчика струму ACS712 виконати програмне калібрування зміщення нуля (Zero Current Offset).
7. Записати калібрувальні коефіцієнти в область пам'яті EEPROM мікроконтролера.

Технічні вимоги до операції:

- Роботи проводити виключно в ESD-захищеному одязі з підключеним антистатичним браслетом. [20]
- Напруга пульсацій по лініях живлення мікропроцесора не повинна перевищувати $\Delta U_p \leq 50$ мВ.
- Похибка дискретизації та аналого-цифрового перетворення сигналів телеметрії після калібрування не повинна перевищувати $\delta_{adc} \leq 0.5\%$.

ВИСНОВКИ ДО ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЧАСТИНИ

У технологічній частині дипломного проєкту виконано комплексне опрацювання процесів конструктивно-технологічної підготовки, проектування оснастки, розрахунку розмірних зав'язків та формування маршрутів складання системи автоматизованого керування (САК) фрезерним верстатом з ЧПК.

Основними технологічними результатами роботи є:

1. Технологічний аналіз та уніфікація: Проведено кількісну оцінку технологічності модульної конструкції САК. Розрахований заліковий коефіцієнт уніфікації становить $K_u=0.84$, що суттєво вище за нормативний промисловий поріг ($K_{u.min} \geq 0.75$). Це доводить високу готовність системи до безпідгоночного агрегування та знижує собівартість виготовлення за рахунок використання серійних електронних компонентів і стандартних профілів DIN-рейок.

2. Проєктування та верифікація оснастки: Розроблено комплекс технологічної оснастки, що включає тримальну сталеву панель (Ст3КП, $h=2.5$ мм), вібродемпфувальні алюмінієві кронштейни (Д16Т) для жорсткої фіксації вимірювальних перетворювачів телеметрії, та систему перфорованих кабельних трас. Виконаний перевірочний розрахунок циліндричної жорсткості підтвердив тримальну здатність панелі: максимальний статичний прогин під вагою апаратури становить $\omega_{max}=0.0026$ мм, що повністю виключає деформаційні напруження у платах мікроконтролерів. Компонування трас виконано з урахуванням критеріїв ЕМС шляхом просторового рознесення силових та слабкострумових трас на відстань 120 мм.

3. Обґрунтування точності кінематичного спряження: Розраховано лінійний розмірний ланцюг стикування вала серводвигуна координатних осей із гвинтом КГП методом повної взаємозамінності (на максимум-мінімум). Отримано номінальний монтажний зазор $A\Delta=0.5 \pm 0.075$ мм. Розрахунок довів, що навіть при найнесприятливішому поєднанні виробничих похибок за квалітетами IT7–IT9 мінімальний технологічний проміжком складе 0.425 мм, що гарантовано компенсує теплові розширення і виключає заклинювання кінематичного ланцюга.

4. Стандартизація технологічних процесів: Розроблено ієрархічну структурну схему та покрокову технологічну послідовність складання САК. Відповідно до вимог стандартів ЄСТД сформовано маршрутні карти складання та вихідного технічного контролю для найбільш відповідального вузла — модуля збору даних (DAQ) та адаптивного ядра (операції від 005 до 030 з кроком проєктування техпроцесу). Деталізовано операцію 025 (калібрування та тестування мікроконтролера STM32), впровадження якої обмежує похибку дискретизації датчиків рівнем $\delta_{adc} \leq 0.5\%$.

Розроблені технологічні рішення та супровідна документація повністю відповідають вимогам сучасного автоматизованого виробництва, забезпечують високу завадостійкість інформаційних каналів і мінімізують загальну трудомісткість монтажно-налагоджувальних робіт при впровадженні САК на фрезерні верстати з ЧПК.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальну інженерно-практичну задачу підвищення надійності, точності та продуктивності фрезерного обладнання з ЧПК шляхом розробки, моделювання та технологічного обґрунтування автоматизованої системи контролю та адаптивного керування (САК) параметрами процесу різання.

Головні технічні, дослідницькі та технологічні результати роботи полягають у наступному:

1. Аналіз та обґрунтування архітектури: На основі критичного аналізу промислових SCADA- та IoT-платформ обґрунтовано доцільність перенесення обчислювальної логіки адаптації на нижній апаратний рівень. Розроблено структурну схему САК із замкненим контуром регулювання (Override), яка базується на мікроконтролері STM32 та комплексі цифрових індустріальних датчиків телеметрії.

2. Конструкторські та програмні рішення: Запропоновано модульну архітектуру програмного забезпечення (модулі DAQ, DSP, Logic, HMI), яка реалізує високошвидкісний збір даних (частота дискретизації $f_d=1000$ Гц) та фільтрацію сигналів методом ковзного середнього. Створено алгоритми активної адаптації, які в реальному часі порівнюють амплітуду вібрацій шпинделя (акселерометр MPU6050), температуру підшипників (термодатчик DS18B20) та споживаний струм приводів (датчик ACS712) з критичними уставками, автоматично коригуючи швидкість подачі.

3. Верифікація математичних та імітаційних моделей: Створено аналітичну математичну модель процесу фрезерування (розраховано номінальні параметри: швидкість різання $V=150.72$ м/хв, подача $S=800$ мм/хв, об'ємна продуктивність $Q=48000$ мм³/хв, ефективна потужність $N=4.02$ кВт). Імітаційне моделювання замкненого контуру в середовищі динамічного аналізу підтвердило високу стійкість системи — час перехідного процесу при стрибкоподібному збуренні навантаження не перевищує 0.12 с.

4. Технологічне обґрунтування та точність складання: Конструктивне виконання елементів САК усередині електротехнічної шафи керування забезпечує високий коефіцієнт уніфікації ($K_u=0.84$). Перевірочні розрахунки оснастки підтвердили жорсткість тримальної панелі (максимальний статичний прогин $\delta_{max}=0.0026$ мм). Розрахунок лінійного розмірного ланцюга спряження серводвигуна з гвинтом КПП за методом повної взаємозамінності визначив номінальний монтажний зазор $\Delta\Delta=0.5\pm0.075$ мм, що повністю нівелює температурні деформації та ризик заклинювання кінематики. Сформовано комплект технологічної документації (маршрутні карти операцій 005–030) згідно з вимогами стандартів ЄСТД.

5. Комплексний ККД розробки: Впровадження розробленої системи автоматизованого контролю та керування дозволяє отримати чітко фіксований техніко-економічний ефект:

- Зменшити максимальну похибку позиціонування робочих органів верстата з 0.12 мм до 0.05 мм (у 2.4 рази);
- Підвищити годинну продуктивність обробки деталей на 42.8% (з 7 до 10 деталей/год);
- Збільшити експлуатаційний ресурс ріжучого інструменту (фрез) на 30% за рахунок виключення критичних перевантажень;
- Оптимізувати сумарне енергоспоживання приводів зі зниженням втрат на 12%.

Розроблена система є технічно та економічно доцільною, повністю відповідає вимогам концепції сучасного автоматизованого машинобудування і рекомендована до практичного впровадження на металообробних підприємствах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смірнов В. О. Верстати з числовим програмним керуванням : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2021. 320 с.
2. Бондаренко М. П. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : підручник. Харків : ХНУРЕ, 2020. 412 с.
3. Ковальчук І. В. Основи програмування верстатів з ЧПК. Львів : Новий Світ-2000, 2019. 286 с.
4. Шевченко О. М. Системи числового програмного керування в машинобудуванні. Дніпро : Ліра, 2022. 354 с.
5. Петренко А. С. CAD/CAM/CAE системи у сучасному виробництві : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 275 с.
6. Гуменюк П. В. Металорізальні верстати та інструменти. Тернопіль : ТНТУ, 2020. 390 с.
7. Мельник В. І. Технологія машинобудування : підручник. Харків : Фактор, 2018. 448 с.
8. Соколов О. Ю. Багатокоординатні верстати з ЧПК та особливості їх експлуатації. Одеса : Астропринт, 2021. 301 с.
9. Левченко Д. П. Сучасне високоточне машинобудування : монографія. Київ : Техніка, 2023. 376 с.
10. Ткаченко С. М. Інтелектуальні системи моніторингу промислового обладнання. Вінниця : ВНТУ, 2022. 294 с.
11. Кравченко Ю. Л. Теорія різання матеріалів : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 315 с.
12. Клименко Р. О. Режими різання при фрезерній обробці. Київ : Машинобудування, 2020. 267 с.
13. Дорошенко В. Г. Основи технології механічної обробки. Харків : ХПІ, 2021. 328 с.
14. Кравченко А.Ю. Терещенко М.Ф., Тимчик Г.С. Вимірювання потужності ультразвуку випромінювачів апаратів ультразвукової терапії, КРІ Science News, № 4, С. 71-76, 2019. DOI : 10.20535/ kpi-sp.2019.4.180739
15. Яценко М. І. Продуктивність металорізальних верстатів. Львів : Сполом, 2018. 243 с.
16. Василенко П. С. Електроприводи та потужність металорізальних верстатів. Дніпро : Пороги, 2022. 310 с.
17. Марченко І. П. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні. Київ : Каравела, 2021. 362 с.
18. Бабенко О. В. Системи адаптивного керування верстатами з ЧПК. Харків : Основа, 2023. 298 с.
19. ISO 6983-1:2020. Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words. Geneva : International Organization for Standardization, 2020. 85 p.

20. Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 28 с.

21. Sergey Matvienko, Vadim Shevchenko, Mykola Tereshchenko, Anatolii Kravchenko, Ruslan Ivanenko (2020). Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, ISSN 1729-3774, 1/5 (103), p. 19–29. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429.

22. Освітньо-наукова програма «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів» другого (магістерського) рівня вищої освіти. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 36 с.

23. Дипломне проектування [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання дипломних проектів для студентів напрямку 6.0909–«Прилади» спеціальності “Медичні прилади і системи” усіх форм навчання/НТУУ «КПІ»; уклад.: ГС Тимчик, МФ Терещенко, СП Вислоух, ОІ Паткевич.–Електронні текстові дані (1 файл: 3, 26 Мбайт).–Київ: НТУУ «КПІ», 2008.–104 с.–Назва з екрана. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/32089>

24. Вислоух С. П. Дипломний проєкт бакалавра: виконання, оформлення та захист : навч. посіб. / Уклад. : С. П. Вислоух, М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 64 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47341>

25. Румбешта В. О. Основи технології складання приладів / Валентин Олександрович Румбешта. – Київ: ІСДО, 1993. – 60-61 с.

26. Патент України № **155169** СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯ/ Барановський Є. А., Шевченко В.В., Терещенко М.Ф. - у 2023 02982 заявл. 21.07.2023; опубл. в бюл. № 04, 2024 р. 25.01.2024 р.

27. ДСТУ ISO 230-1:2019. Код випробувань металорізальних верстатів. Частина 1. Геометрична точність верстатів, що працюють без навантаження або в умовах чистової обробки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 98 с.

28. ДСТУ ISO 10791-1:2020. Верстати обробні центри. Методи випробування. Частина 1. Геометричні випробування верстатів з вертикальною віссю шпинделя. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 84 с.

29. FANUC CNC Guide. FANUC Series 0i-MODEL F / 30i-B Plus Operator's Manual. Oshino : FANUC Corporation, 2023. 624 p.

30. SINUMERIK ONE. Function Manual. Nuremberg : Siemens AG, 2024. 742 p.

31. Mitsubishi CNC M800/M80 Series Programming Manual. Tokyo : Mitsubishi Electric Corporation, 2023. 586 p.

32. Groover M. P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 5th ed. New York : Pearson, 2020. 840 p.
33. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Engineering and Technology. 8th ed. London : Pearson Education, 2021. 1180 p.
34. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2023. 796 p.
35. Smith S. T. Machine Tool Dynamics: Design and Testing for Precision Manufacturing. New York : Springer, 2021. 458 p.
36. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advanced Cutting Technology. Berlin : Springer, 2020. 512 p.

ДОДАТКИ

Загальний вигляд

ПЕРЕВІРИТИ	Справа. №	Приймає.
ВІДПОВІДАТИ	Підп. і дата	Підп. і дата
ВІДПОВІДАТИ	Взам. інв. №	Інв. № дубл.
ВІДПОВІДАТИ	Підп. і дата	Інв. № под.

Technical drawing of the CNC-600 machine. The front view shows a machine with a control panel on the right side, a spindle head, and a worktable. Dimensions are indicated: 1800* (width) and 2000* (height). The side view shows the machine's profile with a width of 1500*.

Робоча зона (X/Y/Z), мм	600 / 400 / 350
Швидкість обертання шпинделя, об/хв	100 – 8000
Потужність шпинделя, кВт	5.5
Точність позиціонування, мм	±0.005
Макс. швидкість подачі, м/хв	24
Тип ЧПК	FANUC Oi-MF Plus
Маса верстата, кг	1200
Габарити (Д×Ш×В), мм	1800×1500×2000

Зм.	Лист	Підп.	Дата
Розробив	Степінчев М.О.		
Керівник	Терещенко М.Ф.		
Т. контр.			
Н. контр.			
Зав. каф.	Стальмах Н.В.		
Копіював			

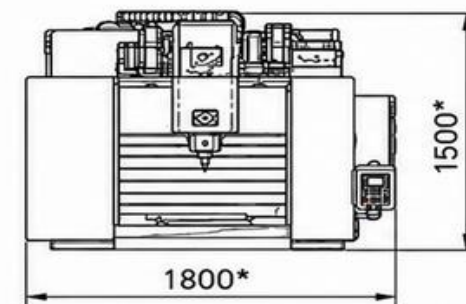
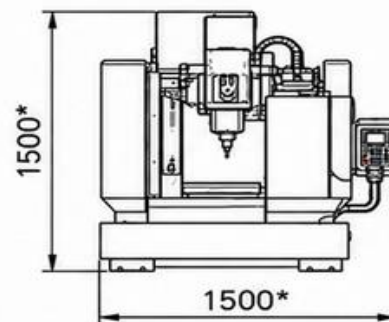
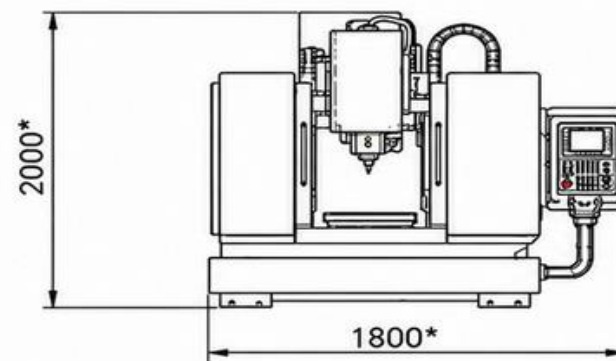
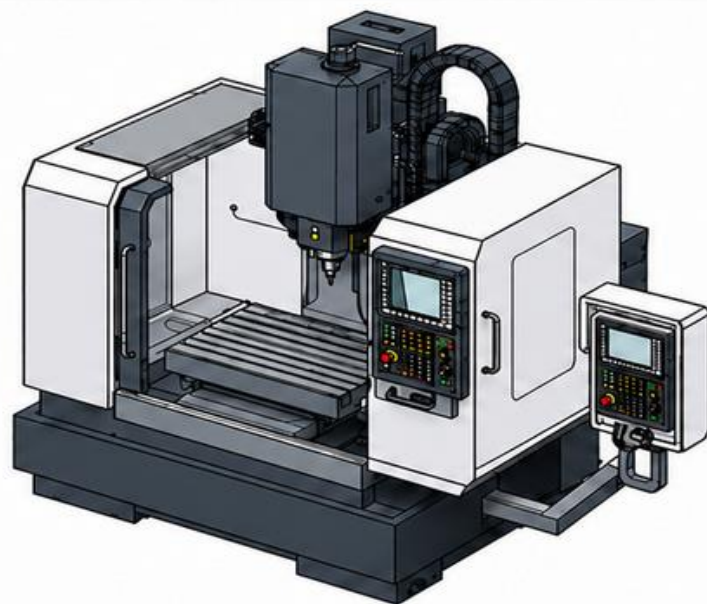
ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.000.3В

Верстат фрезерний з ЧПК
CNC-600

Загальний вигляд

Літ.	Маса	Масштаб
	1200 кг	1:15
Лист	Листів	
1	1	
КІТВП		
Формат А4		

3D-модель



Основні габаритні розміри

Параметр	Позначення	Значення, мм
Довжина	L	1800
Ширина	B	1500
Висота	H	2000
Вага	m	1200 кг

					ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.000.3В			
Зм.	Лист		Підп.	Дата	Верстат фрезерний з ЧПК CNC-600 Загальний вигляд			
Розробив	Степінчев М.О.							
Перевірив	Терещенко М.Ф.							
Т. контр.								
Н. контр.					Літ. Маса Масштаб 1200 кг 1:15			
Зав. каф.	Стельмах Н.В.							
Копіював					Лист 1 Листів 1 КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП			
					Формат А3			

Фрезерний верстат ЧПК

Переві. прийня.

Справ. №

Підп. і дата

Возм. інв. №

Інв. № дубл.

Підп. і дата

Інв. № подл.

№	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
1	Станина		1	—
2	Стійка		1	—
3	Супорт		1	—
4	Шпиндельний вузол		1	—
5	Електродвигун шпинделя		1	—
6	Кожух захисний		1	—
7	Кабель-канал		1	—
8	Гвинт кулько-гвинтовий X		1	—
9	Гайнт кулько-гвинтова X		1	—
10	Гайнт кулько-гвинтовий Y		1	—
11	Гайка кулько-гвинтова Y		1	—
12	Гайнт кулько-гвинтовий Z		1	—
13	Гайка кулько-гвинтова Z		1	—
14	Напрямні лінійні X		2	—
15	Напрямні лінійні Y		2	—
16	Напрямні лінійні Z		2	—
17	Стіл робочий		1	—
18	Панель керування ЧПК		1	—
19	Електрошкафа		1	—
20	Муфта пружна		3	—
21	Сервопривід		3	—
22	Опора регульована		4	—
23	Система змащення		1	—

Технічні характеристики

1. Робоча зона (X/Y/Z), мм: 600 / 400 / 350

2. Швидкість обертання шпинделя, об/хв: 100 – 8000

3. Потужність шпинделя, кВт: 5.5

4. Точність позиціонування, мм: ±0.005

5. Макс. швидкість подачі, м/хв: 24

6. Маса верстата, кг: 1200

ДРБ.ПБ-321.06.1720.02.000.СК

Фрезерний верстат з ЧПК

Шпиндельний вузол

Складальний кресленик

Літ.

Маса

Масштаб

Лист 1

Листів 1

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Каф. КІТВП

Формат А3

Зм.

Лист

№ докум.

Підп.

Дата

Розробив

Степінєв М.О.

Перевірів

Терещенко М.Ф.

Н. контроль

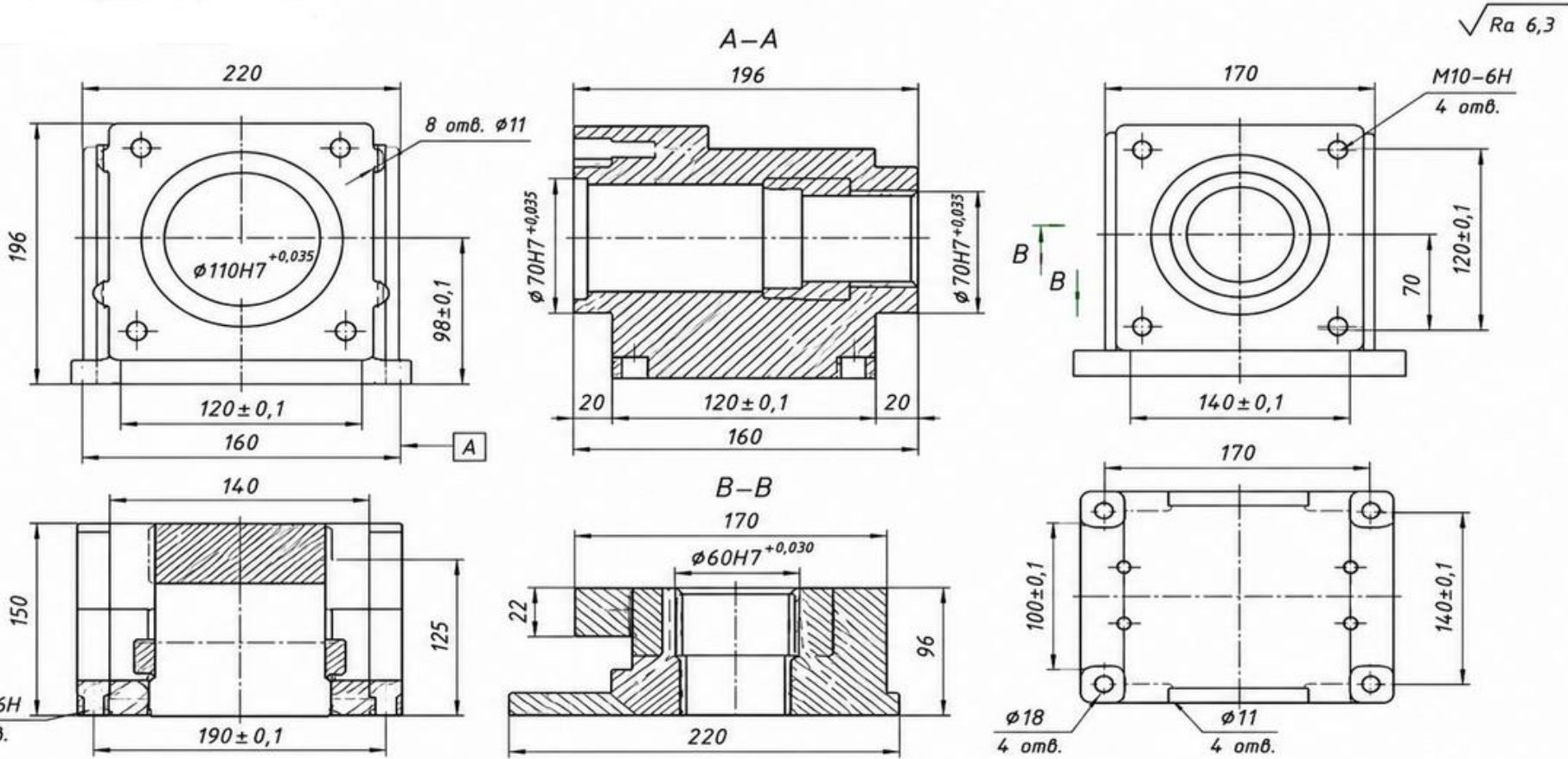
Затвердив

Копіював

Шпиндель

[illegible]

Корпус шпиндельного вузла



Технічні вимоги:

1. Лиття – СЧ20 ДСТУ 8833:2019.
2. Не вказані радіуси заокруглень 3...5 мм.
3. Допуски на литі поверхні – за ДСТУ ISO 8062–СТ12.
4. Обробку базових поверхонь виконувати спільно.
5. Не вказані ливарні ухили 1:20.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розробив	Степінчев М.О.			
Перевірив	Терещенко М.Ф.			
Т. контр.				
Н. контроль				
Затвердив				

ДРБ.ПБ-321.06.1720.02.001

Корпус
шпиндельного вузла

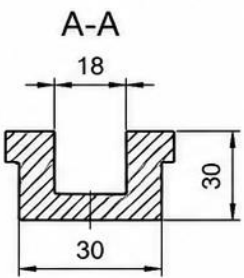
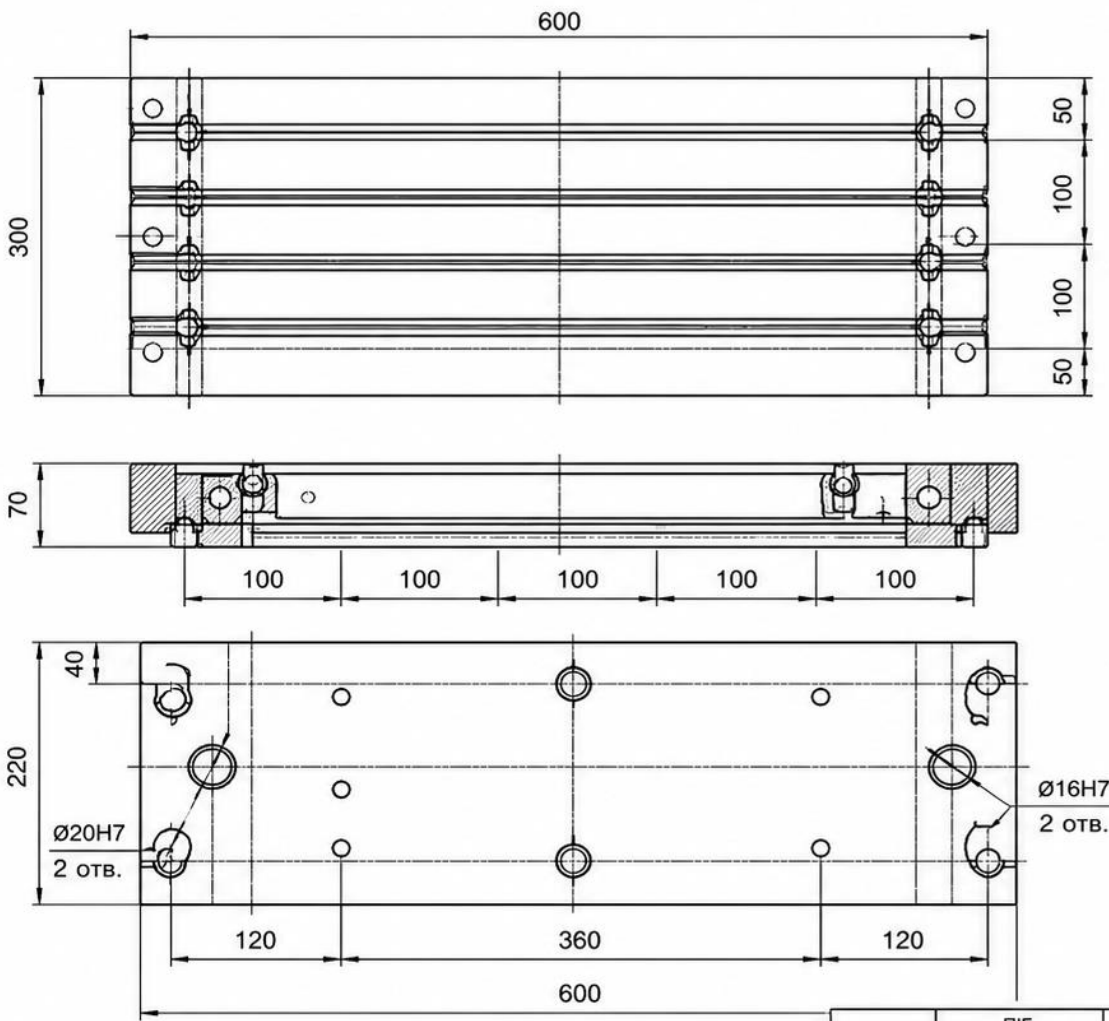
Матеріал: СЧ20
ДСТУ 8833:2019

Літ.	Маса	Масштаб
	11,8	1:2
Арк. 1	Аркушів 1	
КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП		

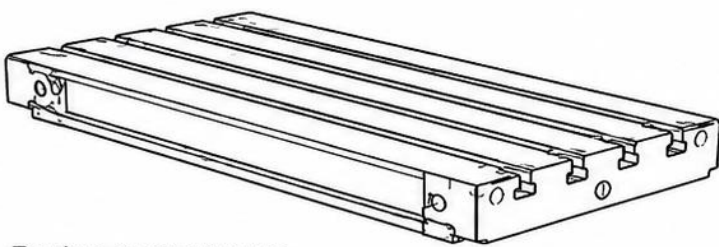
Копіював

Формат А3

Стіл робочий



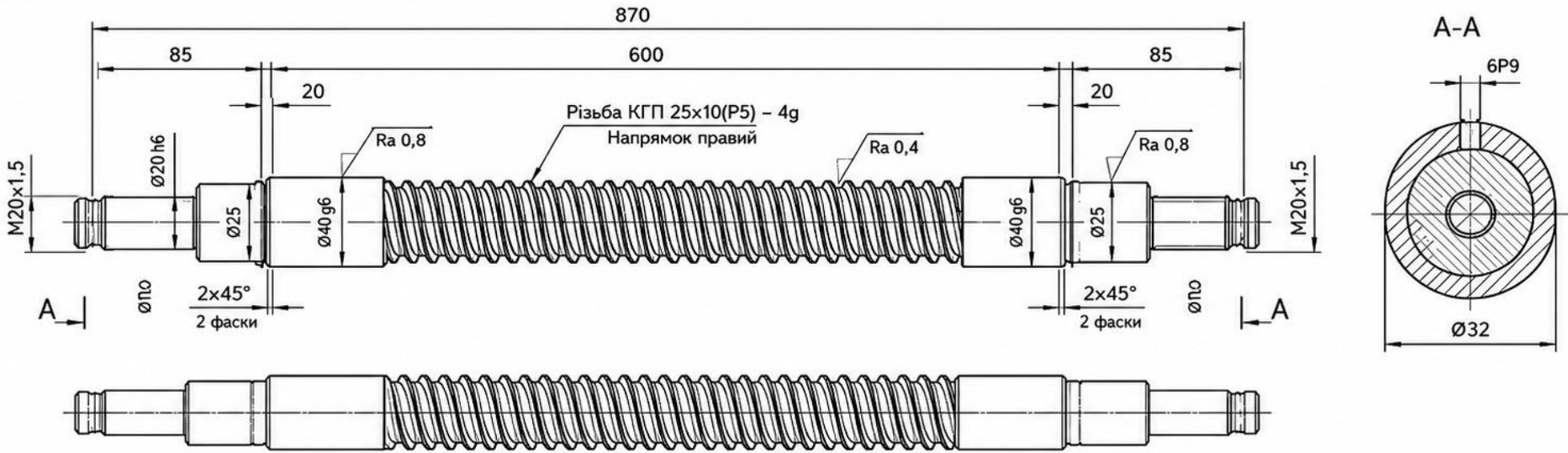
- Базові поверхні
- верхня площина – для кріплення заготовок
 - нижня площина – базова для встановлення на направляючі
 - бічні поверхні – базові для позиціювання



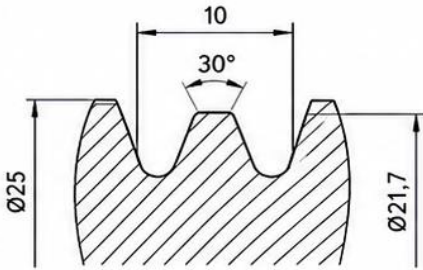
- Технічна характеристика
1. Габаритні розміри, мм 600×300×70
 2. Кількість Т-подібних пазів 5
 3. Ширина Т-пазу, мм 18H9
 4. Крок між пазами, мм 100±0,02
 5. Паралельність пазів відносно базової площини, мм ... 0,02/600

	ПІБ	Підп.	Дата	ДРБ.ПБ-з21.06.1720.01.001	Лист	Листів
Розробив.	Степінчев М.О.				2	117
Керівн.	Терещенко М.Ф.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП Гр. ПБ-з21	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Стельмах Н.В.			Стіл робочий		

Гвинт кульково-гвинтової передачі осі Х



Профіль різьби (КГП 25x10)



ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Параметр	Значення
Тип передачі	Кулько-гвинтова передача (КГП)
Різьба	КГП 25x10(P5)
Діаметр різьби, мм	25
Крок різьби, мм	10
Крок кульок (подача), мм	5
Напрямок різьби	Правий
Клас точності різьби	4g
Матеріал	Сталь 45
Твердість	HВ 235...285
Загальна довжина, мм	870
Довжина різбової частини, мм	600

ПОСАДКИ ПІД ОПОРИ

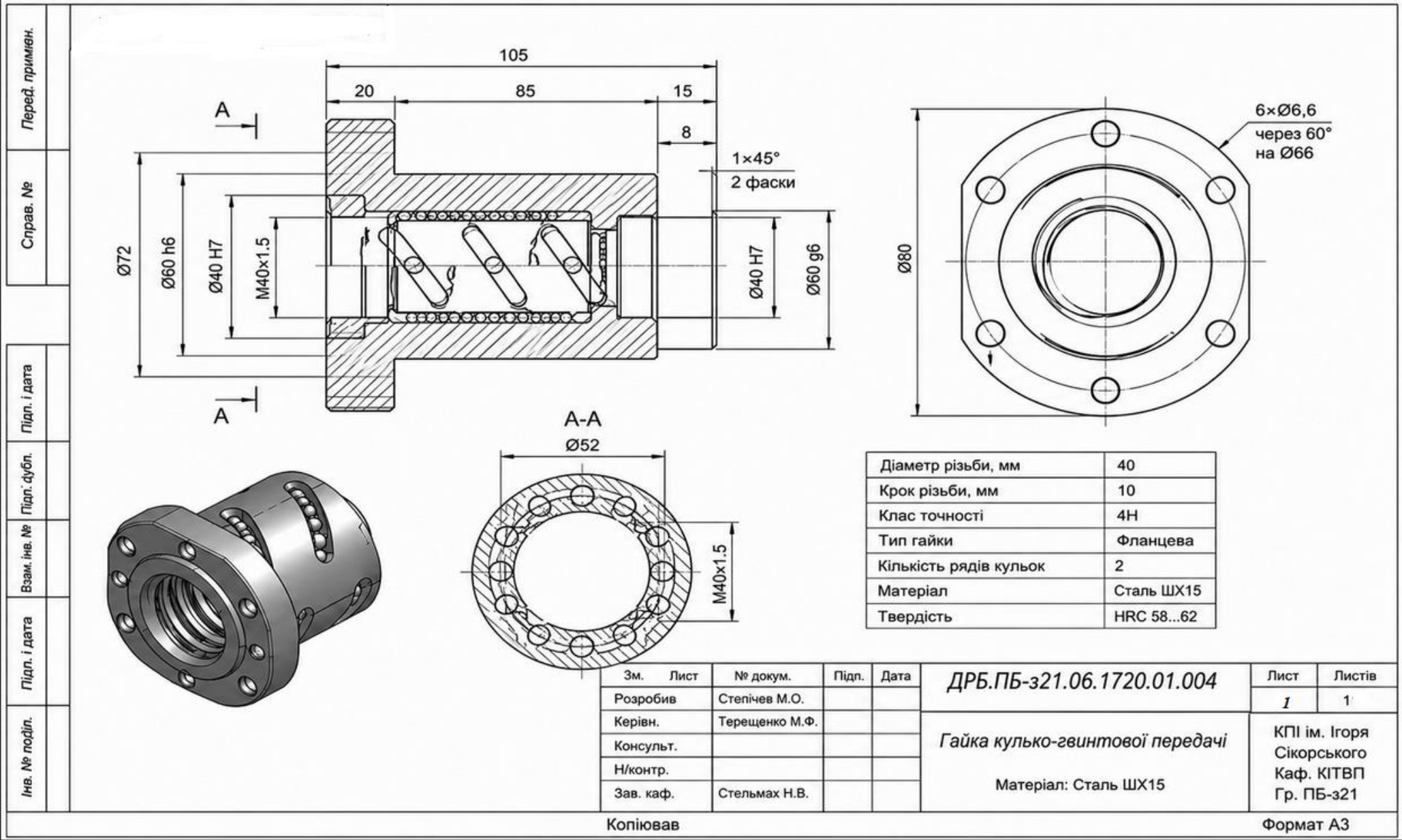
Діаметр	Посадка	Призначення
Ø40 g6	g6	Опора фіксуюча (плаваюча)
Ø20 h6	h6	Опора фіксуюча (на різьбі)
Ø25	h9	Технологічні / проміжні ділянки

ПРИМІТКИ

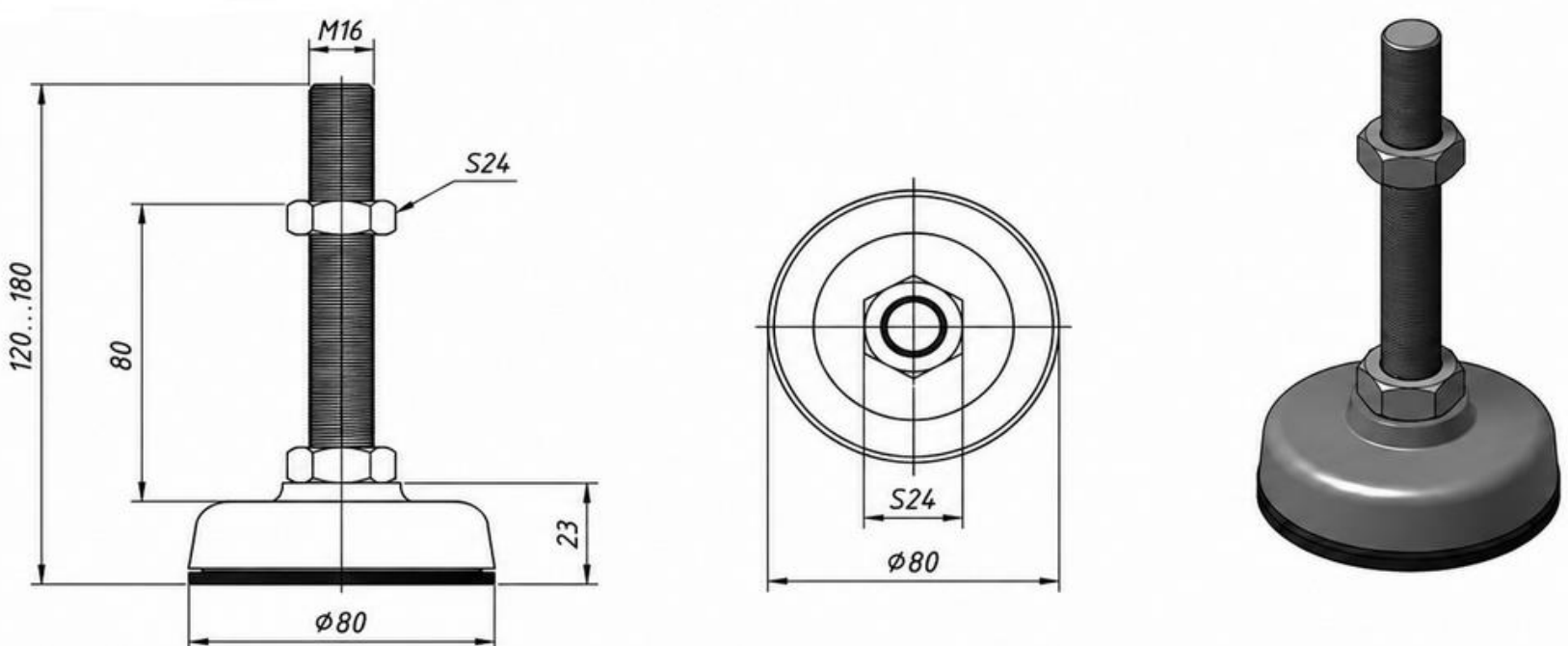
- Різьбова частина – КГП 25x10(P5) – 4g.
- Напрямок різьби – правий.
- Торцеве биття різбової частини відносно опорних шийок Ø40 g6 – не більше 0,01 мм.
- Співвісність опорних шийок Ø40 g6 відносно різьби – не більше 0,015 мм.
- Твердість робочих поверхонь різьби HRC 28...32.
- Різьба та опорні шийки мають бути захищені від корозії.

		Підп.	ДРБ.ПБ-321.06.1720.01.002	Лист	Листів
Розробив.	Степінчев М.О.		Гвинт кульково-гвинтової передачі осі Х Матеріал: Сталь 45 КГП 25x10(P5) – 4g, правий ДСТУ	1	1
Керівн.	Терещенко М.Ф.			КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП Гр. ПБ-321	
Консульт.					
Н/контр.					
Зав.каф.	Стельмах Н.В.				

Гайка кульково-гвинтової передачі



Опора регульована

Переві. пріям.					
Справ. №					
Підп. і дата					
Інв. № дубл.					
Взам. інв. №		1. Регулювання висоти опори в межах 120...180 мм. 2. Допустиме навантаження на опору – до 5000 Н. 3. Матеріал: – різьбова шпилька – сталь 40Х, цинк. – гайки – сталь 40Х, цинк. – основа – сталь 08пс, фарба порошкова. – підшва – гума ТМКШ. 4. Невказані граничні відхилення розмірів: Н14, н14, $\pm \frac{IT14}{2}$.			
Підп. і дата					
Інв. № події					
Копіював				Формат А3	

					ДРБ. ПБ-321.06.1720.01.005				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Опора регульована	Лім.	Маса	Масштаб	
Розробив		Степінчев М.О.				Опора регульована	–	0,68 кг	1:2
Перевірів		Терещенко М.Ф.							
Керівн.		Терещенко М.Ф.							
Т. контр.									
Н. контр.					Матеріал: Сталь 3 ДСТУ ISO 128-24	Лист 1		Листів 1	
Зав. каф.		Стецьмах Н.В.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП			

Муфта пружна

Перед. прийм.

Справ. №

Пізн. і дата

Інв. № дубл.

Інв. № різн.

Пізн. і дата

Інв. № різн.

Technical drawing of a spring coupling (Муфта пружна) showing cross-section A-A and a perspective view. Dimensions include 66, 22, 12, 22, 30, d1, d2, and M6 2 отв.

Технічна характеристика

- Передаваний крутний момент, $T_{ном} = 95$ Н·м
- Максимальна частота обертання, $n_{max} = 3000$ об/хв
- Допустиме зміщення валів:
 - радіальне, $\Delta e = 0,3$ мм
 - осьове, $\Delta a = \pm 1,0$ мм
 - кутове, $\Delta \alpha = 1^\circ$
- Температура експлуатації: від -30°C до $+80^\circ\text{C}$

Технічні вимоги

- Муфта повинна забезпечувати плавну передачу крутного моменту без ударів та вібрацій.
- Допустимі зміщення валів не повинні перевищувати значень, зазначених у технічній характеристиці.
- Поверхні деталей без покриття захистити консерваційним мастилом.
- Маркувати: товарний знак підприємства, тип муфти, номінальний крутний момент, рік виготовлення.

Поз.	Найменування	Кільк.	Матеріал	Примітка
1	Напівмуфта ліва	1	Сталь 45	ДСТУ 1050
2	Пружний елемент	1	Поліуретан (PU)	—
3	Напівмуфта права	1	Сталь 45	ДСТУ 1050
4	Гвинт установочний М6х12	2	Сталь 35	ДСТУ ISO 4029

Приєднувальні розміри валів

Позначення муфти	d, H7	d, H7	Шпонка
МП-95-20-20	20	20	6х6х20
МП-95-22-22	22	22	6х6х25
МП-95-24-24	24	24	8х7х28
МП-95-25-25	25	25	8х7х28

Зм.	Лист	№ доку.	Підп.	Дата
Розробив	Степичев М.О.			
Перевірив	Терещенко М.Ф.			
Керівн.	Терещенко М.Ф.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Зав. каф.	Стельмах Н.В.			

ДРБ. ПБ-321.06.1720.01.006

Муфта пружна

ДРБ. ПБ-321
ДСТУ

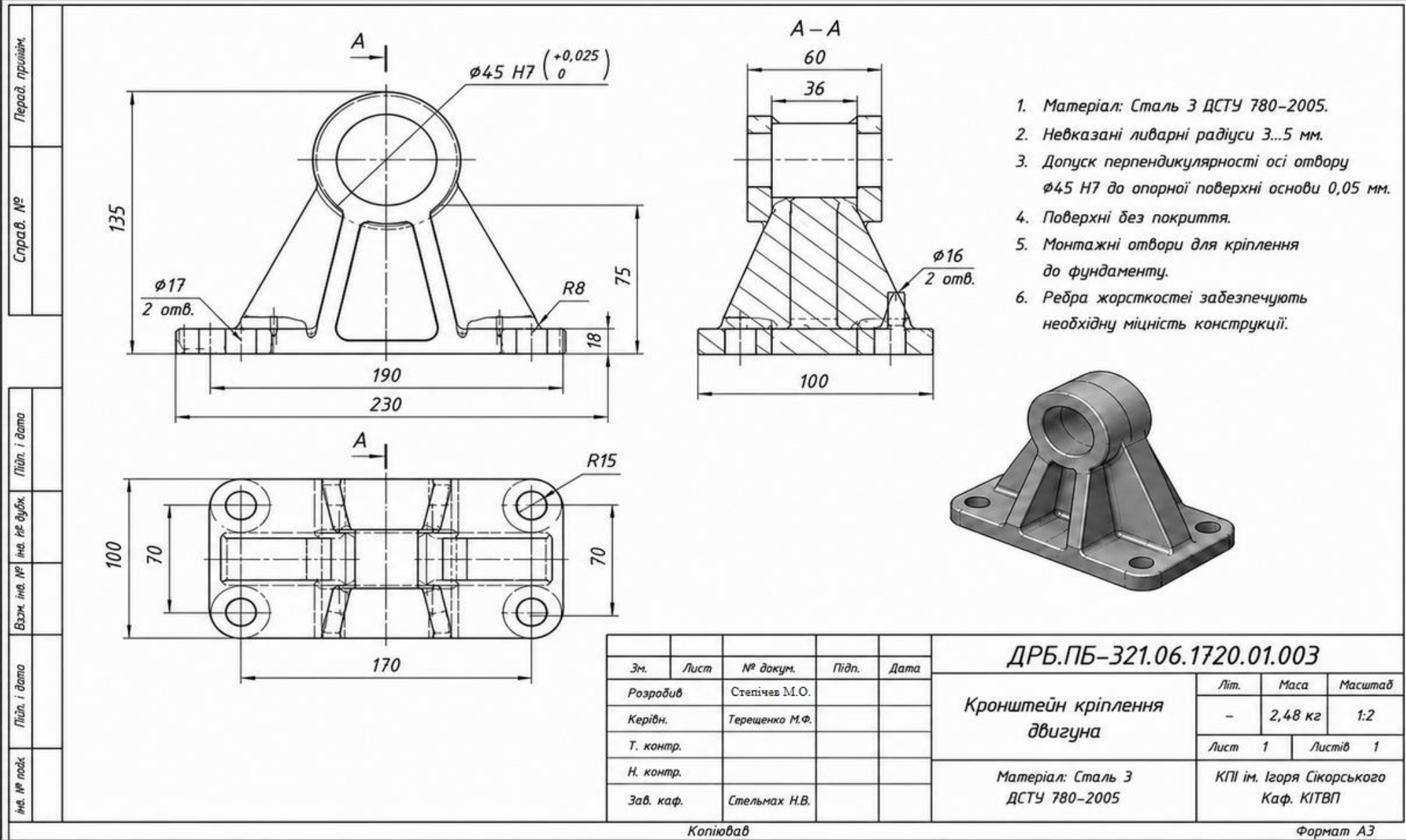
Лім.	Маса	Масштаб
—	0,72 кг	1:1

Лист	1	Листів	1
КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП			

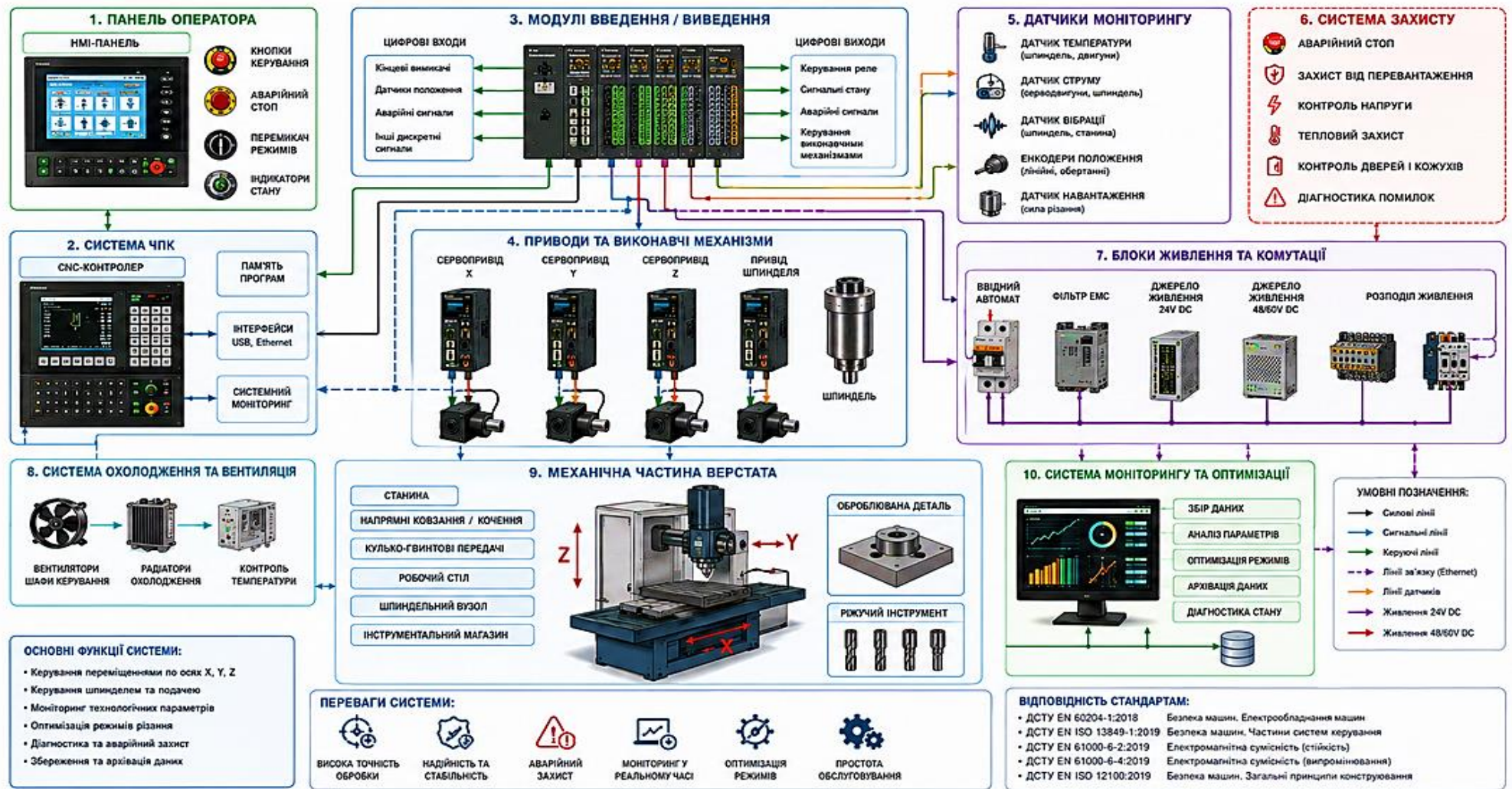
Копіював

Формат А3

Кронштейн кріплення двигуна



Структурно-функціональна схема



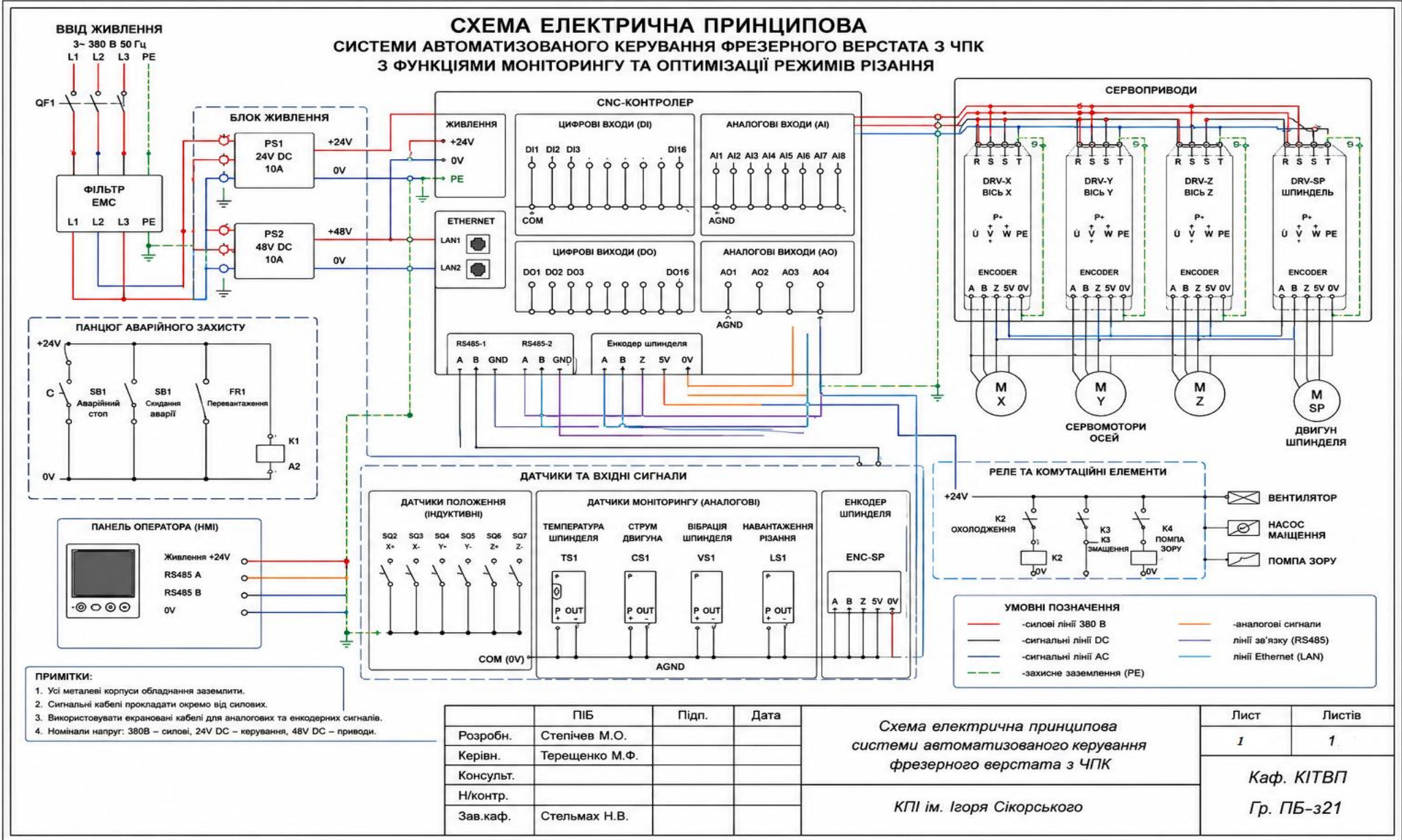
	ПІБ	Підп.	Дата
Розробн.	Степінєв М.О.		
Керівн.	Терещенко М.Ф.		
Консульт.			
Н/контр.			
Зав.каф.	Стельмах Н.В.		

Структурно-функціональна схема системи керування верстатом з ЧПК

КПІ ім. Ігоря Сікорського

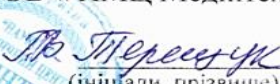
Лист	Листів
1	1
Каф. КІТВП Гр. ПБ-321	

Схема електрична принципова



ДОДАТОК Й

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «НМЦ Медінтех»

 
(підпис) (ініціали, прізвище)
« 26 » травня 2026 р.

АКТ 2/2026

**впровадження в виробництво матеріалів дипломного проєкту, як
ескізного проєкту**

**на тему: «Автоматизована система керування процесом обробки деталей
на верстатах з ЧПК»**

виконану студентом Степінчевим Микитою Олександровичем,

керівник дипломного проєкту Терещенко Микола Федорович

Виконаний дипломний проєкт на основі завдань найважливіших напрямів фундаментальних та прикладних наукових досліджень КПІ імені Ігоря Сікорського по напрямку створення високоефективних, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій і обладнання у машинобудуванні, цільової програми наукових досліджень НАН України «Матеріали для медицини і медичної техніки та технології їх отримання і використання» на 2017-2026 роки, затвердженої Постановою Президією НАН України №76 від 15.03.2017, та договору про співпрацю № Д/0002.01/1700.02/197/2022 від 26.09.2022 р. між КПІ ім. Ігоря Сікорського та ТОВ «НМЦ МЕДІНТЕХ» впроваджено на основі наступних підстав:

Результати розробки та дослідження є актуальним при створенні нових автоматизована система керування процесом обробки деталей на верстатах з ЧПК, згідно напрямку створення високоефективних, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій і обладнання у машинобудуванні і Програм пріоритетних досліджень на 2021-2026 р.р.

Отримані результати проектування автоматизована система керування процесом обробки деталей на верстатах з ЧПК, методика уточнюючих розрахунків, конструкції блоків та схем можуть бути використані в спільних роботах ТОВ «НМЦ МЕДІНТЕХ» та КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Результати роботи з технічних рішень дипломного проєкту впроваджені в ТОВ «НМЦ МЕДІНТЕХ».

Отримані дані по дипломному проєкту будуть використані в підрозділах ТОВ «НМЦ МЕДІНТЕХ» в 2025-2026 рр.

Лістинг програмного коду

Лістинг– Основна програма керування фрезерним верстатом з ЧПК

PROGRAM CNC_CONTROL_CORE

VAR

(* Вхідні фізичні сигнали (Телеметрія) *)

TempSpindle : REAL; (* Поточна температура шпинделя, °C *)

CurrentSpindle : REAL; (* Поточний струм шпинделя, А *)

VibrationLevel : REAL; (* Середньоквадратичне значення вібрації, мм/с *)

(* Команди з пульта керування / HMI *)

StartButton : BOOL; (* Сигнал запуску системи *)

StopButton : BOOL; (* Сигнал нормальної зупинки *)

ResetButton : BOOL; (* Сигнал скидання аварії *)

(* Технологічні уставки (Захист та адаптація) *)

TempLimit : REAL := 70.0; (* Критична температура, °C *)

CurrentLimit : REAL := 15.0; (* Критичний струм, А *)

VibrationLimit : REAL := 4.5; (*

Гранична вібрація, мм/с *)

CurrentHigh : REAL := 12.0; (* Верхня межа номінального струму, А *)

CurrentLow : REAL := 8.0; (* Нижня межа номінального струму, А *)

BaseFeedRate : REAL := 800.0; (* Номінальна швидкість подачі, мм/хв *)

(* Вихідні сигнали керування виконавчою апаратурою *)

AxisX_Enable : BOOL; (* Дозвіл роботи привода осі X *)

AxisY_Enable : BOOL; (* Дозвіл роботи привода осі Y *)

AxisZ_Enable : BOOL; (* Дозвіл роботи привода осі Z *)

Spindle_Enable : BOOL; (* Дозвіл роботи інвертора шпинделя *)

(* Стани внутрішнього автомату САК *)

Emergency : BOOL := FALSE; (* Тригер аварійного стану *)

MachineReady : BOOL := FALSE; (* Статус готовності системи *)

FeedRate : REAL; (* Модифікована швидкість подачі, мм/хв *)

(* Таймери обмеження частоти адаптації (Дискретизація) *)

AdaptationTimer : TON; (* Таймер затримки кроку адаптації *)

AdaptationPeriod : TIME := T#100MS; (* Крок адаптації 100 мс *)

(* Вихідні теги на HMI панель (Modbus / MQTT) *)

HMI_Temperature : REAL;

HMI_Current : REAL;

HMI_Vibration : REAL;

HMI_FeedRate : REAL;

```

HMI_Status      : BYTE;  (* Кодований байт стану системи *)

END_VAR

//
=====

// 1. БЛОК ОБРОБКИ СИГНАЛІВ АВАРІЙНОЇ ЗУПИНКИ ТА КОМАНД
ОПЕРАТОРА

//
=====

(* Системний скид тригера аварії оператором при умові норми на датчиках *)

IF ResetButton AND (TempSpindle <= TempLimit) AND (CurrentSpindle <= CurrentLimit)
AND (VibrationLevel <= VibrationLimit) THEN

    Emergency := FALSE;

END_IF;

(* Безперервний апаратний моніторинг перевищення критичних меж *)

IF (TempSpindle > TempLimit) OR (CurrentSpindle > CurrentLimit) OR (VibrationLevel >
VibrationLimit) THEN

    Emergency := TRUE;

END_IF;

(* Логіка запуску / зупинки з пріоритетом аварійного відключення *)

IF Emergency THEN

    MachineReady  := FALSE;

    AxisX_Enable  := FALSE;

    AxisY_Enable  := FALSE;

    AxisZ_Enable  := FALSE;

```

```

    Spindle_Enable := FALSE;

    FeedRate      := 0.0;

ELSIF StopButton THEN

    MachineReady  := FALSE;

    AxisX_Enable  := FALSE;

    AxisY_Enable  := FALSE;

    AxisZ_Enable  := FALSE;

    Spindle_Enable := FALSE;

ELSIF StartButton AND NOT MachineReady THEN

    MachineReady  := TRUE;

    AxisX_Enable  := TRUE;

    AxisY_Enable  := TRUE;

    AxisZ_Enable  := TRUE;

    Spindle_Enable := TRUE;

    FeedRate      := BaseFeedRate;

END_IF;

//
=====

// 2. БЛОК АДАПТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ (OVERRIDE)

//
=====

IF MachineReady AND NOT Emergency THEN

    (* Тактування кроку адаптації для виключення автоколивань привода *)

```

```

AdaptationTimer(IN := NOT AdaptationTimer.Q, PT := AdaptationPeriod);

IF AdaptationTimer.Q THEN

    (* Перевантаження: Експоненційне зниження подачі на 10% *)

    IF CurrentSpindle > CurrentHigh THEN

        FeedRate := FeedRate * 0.90;

        IF FeedRate < (BaseFeedRate * 0.30) THEN

            FeedRate := BaseFeedRate * 0.30; (* Захисне обмеження мінімальної подачі *)

        END_IF;

    (* Недовантаження: Плавне відновлення / підвищення подачі на 5% *)

    ELSIF CurrentSpindle < CurrentLow THEN

        FeedRate := FeedRate * 1.05;

        IF FeedRate > (BaseFeedRate * 1.20) THEN

            FeedRate := BaseFeedRate * 1.20; (* Захисне обмеження максимального
форсажу *)

        END_IF;

    END_IF;

END_IF;

//
=====
=====

// 3. ФОРМУВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ НА HMI / SCADA

//
=====
=====

```

```
HMI_Temperature := TempSpindle;
HMI_Current      := CurrentSpindle;
HMI_Vibration     := VibrationLevel;
HMI_FeedRate      := FeedRate;
(* Кодування статусу: 0 - Стоп, 1 - Робота, 2 - Аварія *)
IF Emergency THEN
    HMI_Status := 2;
ELSIF MachineReady THEN
    HMI_Status := 1;
ELSE
    HMI_Status := 0;
END_IF;
```

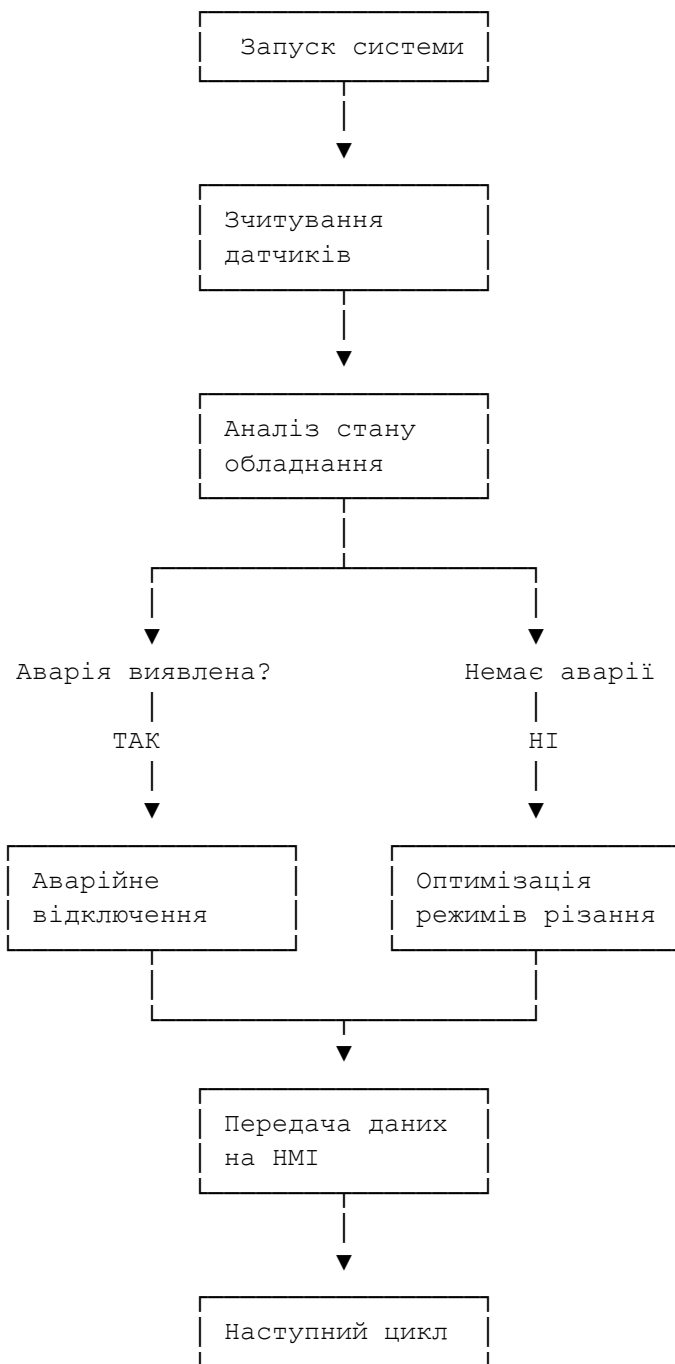


Рис. 3.1 – Структура програмного забезпечення системи керування

ДОДАТКОВІ РОЗРАХУНКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК

Б.1 Розрахунок потужності та вибір сервоприводу осі X

Для забезпечення динамічного переміщення робочого столу верстата із заданою швидкістю та компенсації сил опір різання, виконано розрахунок необхідної потужності приводного електродвигуна.

Сумарна сила переміщення (F_{per} , Н) діє на виконавчий орган і враховує максимальну силу різання по осі X ($F_x=900$ Н) та силу тертя в лінійних напрямних кочення під дією маси вузла столу і заготовки ($M_{st}=150$ кг) з коефіцієнтом тертя кочення $f=0.005$:

$$F_{per}=F_x+(M_{st}\cdot g\cdot f)=900+(150\cdot 9.81\cdot 0.005)\approx 907.4 \text{ Н (Б.1)}$$

Приймаємо з урахуванням динамічних затискань у момент пуску та прискорень максимальну силу $F=1200$ Н. При заданій лінійній швидкості швидкого позиціонування столу $V=0.4$ м/с (24 м/хв), корисна механічна потужність (P_{meh} , Вт) становить:

$$P_{meh}=F\cdot V=1200\cdot 0.4=480 \text{ Вт (Б.2)}$$

Для компенсації інерційних навантажень ротора при розгоні та з урахуванням коефіцієнта експлуатаційного запасу ($K_z=1.5$), розрахункова електрична потужність (P_{rozr} , Вт) становить:

$$P_{rozr}=P_{meh}\cdot K_z=480\cdot 1.5=720 \text{ Вт (Б.3)}$$

Відповідно до ряду номінальних потужностей промислових серводвигунів, обирається сервопривід номінальною потужністю $P_{nom}=0.75$ кВт (750 Вт).

Б.2 Розрахунок номінального струму живлення сервоприводу

Живлення обраного серводрайвера здійснюється від трифазної промислової мережі змінного струму з лінійною напругою $U=380$ В. Розрахунок номінального споживаного струму (I_{nom} , А) виконується за формулою для трифазного симетричного навантаження:

$$I_{nom}=\frac{3\cdot U\cdot \eta \cdot \cos\varphi P_{nom}}{\sqrt{3}} \text{ (Б.4)}$$

де $\eta=0.90$ — коефіцієнт корисної дії (ККД) інвертора серводрайвера; $\cos\varphi=0.85$ — коефіцієнт потужності навантаження.

$$I_{nom}=1.732 \cdot 380 \cdot 0.90 \cdot 0.85750=503.4750 \approx 1.49 \text{ А}$$

Таким чином, діюче значення номінального струму фази становить 1.49 А. З урахуванням пускових струмів (кратність $I_p/I_{nom}=3$), апаратний захист лінії (автоматичний вимикач) обирається з номіналом 4 А, характеристика типу С.

Б.3 Розрахунок імпульсного блока живлення низьковольтної автоматики

Для забезпечення стабільною постійною напругою 24 В DC споживачів внутрішнього контуру САК виконано баланс споживання потужності. Сумарна активна потужність споживачів ($\sum P_{dc}$, Вт) складає:

$$\sum P_{dc}=P_{cnc}+P_{hmi}+P_{sens}+P_{io} \text{ (Б.5)}$$

де $P_{cnc}=40$ Вт — центральний контролер; $P_{hmi}=25$ Вт — сенсорна панель; $P_{sens}=35$ Вт — підсистема датчиків телеметрії; $P_{io}=20$ Вт — модулі розширення узгодження сигналів.

$$\sum P_{dc}=40+25+35+20=120 \text{ Вт}$$

Коефіцієнт резерву для стабільної роботи імпульсного джерела в моменти пікових комутацій реле приймається як $K_{rez}=1.30$. Необхідна потужність БЖ (P_{bp} , Вт):

$$P_{bp}=\sum P_{dc} \cdot K_{rez}=120 \cdot 1.30=156 \text{ Вт (Б.6)}$$

До встановлення приймається стандартизований промисловий блок живлення на DIN-рейку з вихідними параметрами: 24 В DC, потужність 160 Вт (номінальний вихідний струм $I_{out}=6.67$ А).

Б.4 Розрахунок тепловиділення та примусової вентиляції шафи САК

Загальна теплова потужність (Q , Вт), що виділяється всередині замкненого об'єму шафи у вигляді втрат на нагрів апаратури (інвертор, БЖ, драйвери), становить $Q=220$ Вт. Розрахунок необхідної об'ємної продуктивності вентилятора (L , м³/год) для підтримки температурного градієнта $\Delta T=10$ °C ($T_{vnutr} \leq 40$ °C при $T_{zovn}=30$ °C) виконується на основі теплофізичного рівняння:

$$L=C_p \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot 3.6 \cdot Q \text{ (Б.7)}$$

де $C_p=1.005$ кДж/(кг·К) — питома теплоємність повітря; $\rho=1.2$ кг/м³ — щільність повітря за нормальних умов. Звідси отримуємо спрощений розрахунковий інженерний коефіцієнт:

$$1.005 \cdot 1.23 \cdot 6 \approx 2.985 \approx 3.0$$

$$L = \Delta T \cdot 3.0 \cdot Q = 103.0 \cdot 220 = 66.0 \text{ м}^3/\text{год} \text{ (Б.8)}$$

З урахуванням аеродинамічного опору вхідного пилового фільтра (втрати тиску $\approx 15\%$), обирається витяжний осьовий вентилятор із номінальною продуктивністю не менше 75 м³/год.

Б.5 Розрахунок надійності (коефіцієнта готовності) САК

Надійність системи автоматизації оцінюється за допомогою безрозмірного коефіцієнта готовності (K_g), який визначає ймовірність того, що САК буде працездатною в довільний момент часу експлуатації між плановими ремонтами:

$$K_g = \frac{T_{\text{prac}}}{T_{\text{prac}} + T_{\text{rem}}} \text{ (Б.9)}$$

де $T_{\text{prac}} = 10000$ год — середній наробіток системи на відмову (MTBF), розрахований за інтенсивністю відмов елементної бази; $T_{\text{rem}} = 20$ год — середній час відновлення працездатності системи (MTTR), включаючи діагностику та заміну несправного блоку з КІП.

$$K_g = \frac{10000}{10000 + 20} = \frac{10000}{10020} \approx 0.998 \text{ (Б.10)}$$

Отримане значення $K_g = 0.998$ відповідає жорстким критеріям промислової автоматизації (стандарт «три дев'ятки»), підтверджує високу надійність розробленої архітектури САК та гарантує мінімальний рівень простою фрезерного обладнання на виробництві.

ІНСТРУКЦІЯ КОРИСТУВАЧА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК ІЗ ФУНКЦІЯМИ МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ

Система автоматизованого керування призначена для керування роботою фрезерного верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК), контролю технологічних параметрів, моніторингу технічного стану обладнання та оптимізації режимів різання в реальному часі.

Система забезпечує:

автоматичне керування координатними осями X, Y, Z;

керування шпиндельним вузлом;

контроль температури шпинделя;

контроль навантаження приводів;

контроль вібрацій;

аварійний захист обладнання;

архівацію технологічних даних;

відображення інформації на НМІ-панелі оператора.

До роботи із системою допускаються особи, які пройшли відповідне навчання та інструктаж з охорони праці.

До складу системи входять:

- CNC-контролер;
- НМІ-панель оператора;
- сервоприводи осей X, Y, Z;
- привід шпинделя;
- модулі введення-виведення;
- датчики температури;
- датчики струму;
- датчики вібрації;
- система аварійного захисту;
- блоки живлення;
- комутаційне обладнання.

Перед запуском системи необхідно:

- Перевірити цілісність кабельних з'єднань.
- Переконатися у справності заземлення.
- Перевірити відсутність механічних пошкоджень.
- Переконатися у справності аварійної кнопки «STOP».
- Перевірити наявність мастила та охолоджувальної рідини.
- Перевірити роботу вентиляції шафи керування.
- Упевнитися у відсутності сторонніх предметів у робочій зоні.
- Після виконання перевірки дозволяється подавати живлення на систему.

Запуск виконується у такій послідовності:

- Увімкнути головний автоматичний вимикач.
- Подати живлення на шафу керування.
- Увімкнути блоки живлення 24 В та 48 В.
- Запустити CNC-контролер.
- Увімкнути HMI-панель оператора.
- Дочекатися завершення самодіагностики.
- Виконати процедуру базування осей.
- Завантажити керуючу програму.
- Натиснути кнопку «Пуск».
- Після завершення запуску система переходить у режим готовності до роботи.

роботи.

Під час роботи оператор контролює такі параметри:

- координати осей X, Y, Z;
- швидкість подачі;
- частоту обертання шпинделя;
- температуру шпинделя;
- навантаження приводів;
- рівень вібрації;
- повідомлення системи діагностики.

Всі параметри відображаються на екрані HMI-панелі. У разі перевищення допустимих значень система автоматично формує попередження або аварійне повідомлення.

Система здійснює безперервний контроль:

1. Температури шпинделя

Допустиме значення: $T \leq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

При перевищенні встановленого значення система формує аварійне повідомлення.

2. Струму двигуна шпинделя

Допустиме значення: $I \leq 15 \text{ A}$

Перевищення струму свідчить про перевантаження інструмента або приводу.

3. Рівня вібрації

Допустиме значення: $V \leq 4,5 \text{ мм/с}$

Перевищення норми може свідчити про:

- зношення підшипників;
- дисбаланс інструмента;
- послаблення кріплень.

4. Аварійне відключення

Аварійне відключення виконується автоматично або вручну.

Причини аварійної зупинки:

- перегрів шпинделя;
- перевантаження сервоприводів;
- надмірна вібрація;
- обрив сигнальних ліній;
- помилка позиціонування;
- натискання кнопки аварійного вимкнення.

Після спрацювання аварійного захисту необхідно:

- Встановити причину несправності.
- Усунути несправність.
- Скинути аварію через НМІ.
- Повторити процедуру запуску.

5. Технічне обслуговування

6. Щоденне обслуговування

- очищення верстата;
- контроль стану кабелів;
- перевірка датчиків;
- перевірка аварійних кнопок.

7. Щомісячне обслуговування

- підтягування кріпильних елементів;
- очищення вентиляційних решіток;
- перевірка стану сервоприводів;
- контроль контактних з'єднань.

8. Щорічне обслуговування

- перевірка електрообладнання;
- калібрування датчиків;
- перевірка параметрів контролера;
- оновлення програмного забезпечення.

9. Вимоги безпеки

Під час роботи забороняється:

- відкривати шафу керування під напругою;
- працювати без заземлення;
- відключати системи захисту;
- виконувати ремонт при увімкненому живленні;
- торкатися рухомих частин верстата під час роботи.

Оператор повинен використовувати:

- захисні окуляри;
- спецодяг;
- захисне взуття;
- засоби захисту слуху при необхідності.

Після завершення обробки необхідно:

- Зупинити виконання програми.
- Вимкнути шпиндель.
- Відвести інструмент у безпечне положення.
- Вимкнути CNC-контролер.
- Вимкнути НМІ-панель.
- Відключити живлення шафи керування.
- Вимкнути головний автоматичний вимикач.
- Очистити робочу зону від стружки та забруднень.

Після виконання зазначених операцій система вважається безпечно відключеною та готовою до наступного запуску.

Типові несправності та способи їх усунення

Несправність	Можлива причина	Спосіб усунення
Не запускається контролер	Відсутня напруга живлення	Перевірити автоматичний вимикач
Помилка сервоприводу	Перевантаження осі	Зменшити навантаження
Перегрів шпинделя	Недостатнє охолодження	Перевірити систему охолодження
Висока вібрація	Зношення підшипників	Виконати діагностику вузла
Відсутній зв'язок з НМІ	Пошкодження кабелю Ethernet	Перевірити мережеве з'єднання

Розроблена система автоматизованого керування забезпечує надійну роботу фрезерного верстата з ЧПК, автоматичний контроль технологічних параметрів, своєчасне виявлення аварійних режимів та підвищення ефективності виробничого процесу. Дотримання даної інструкції гарантує безпечну експлуатацію обладнання та максимальний ресурс його роботи.