

Форма № Н-9.02

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та роботехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему Модернізація електроприводу шпінделя токарного верстата

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Остапенко А.О. *AO*

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Левицький А.І.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

# РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи

## **" Модернізація електроприводу шпінделя токарного верстата "**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра містить 74 сторінки, 9 рисунків, 11 таблиць, 24 джерел.

Ключові слова: токарний верстат ТВ-6, асинхронний двигун, сервопривід, частотний перетворювач, Mitsubishi HF-KP153B, FR-A800-E, модернізація, автоматизований електропривід, система керування, момент інерції, енергоспоживання, система захисту. У дипломній роботі детально розглянуто процес інтеграції сучасного сервоприводу у конструкцію токарного верстата ТВ-6. Особливу увагу приділено побудові електричних схем, вибору оптимальних параметрів системи керування, моделюванню динамічних характеристик приводу та аналізу енергетичної ефективності.

Проведено порівняльний аналіз старого асинхронного приводу та нового сервоприводу з позиції точності керування, енергоспоживання, часу розгону, стабільності обертання та можливості подальшої автоматизації обладнання. Результати моделювання в MATLAB підтверджують відповідність синтезованого приводу технічним вимогам та стандартам.

## ABSTRACT

of the qualification work

"Modernization of the electric drive of the spindle of the lathe"

The bachelor's final qualification work contains 71 pages, 9 figures, 11 tables, 24 sources.

Keywords: lathe TV-6, asynchronous motor, servo drive, frequency converter, Mitsubishi HF-KP153B, FR-A800-E, modernization, automated electric drive, control system, moment of inertia, energy consumption, protection system.


The thesis thoroughly investigates the integration of a modern servo drive into the design of the TV-6 lathe. Particular attention is paid to the development of electrical wiring diagrams, optimal parameter selection of the control system, dynamic performance modeling, and energy efficiency analysis.

A comparative analysis between the old asynchronous motor system and the newly designed servo drive highlights improvements in speed control precision, power consumption, acceleration time, rotational stability, and automation potential. MATLAB simulation results confirm the conformity of the synthesized drive system to technical standards and requirements.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Бакалавр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
автоматики, електроніки та  
телекомунікацій

 О.В. Шефер  
«01» квітня 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ**

**Остапенку Андрію Олексійовичу**

1. Тема роботи «Модернізація електроприводу шпінделя токарного верстата»  
керівник роботи Галай Василь Миколайович, к.т.н., доцент  
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2025 року  
№ 306/1 - ф.а.
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Модернізація головного приводу верстата.  
Порівняння асинхронного двигуна з сучасним сервоприводом. Номінальна  
напруга 380/220В, потужність 0.5-1.1кВт. Покращення точності та  
ефективності застарілих моделей верстатів шляхом заміни асинхронного  
двигуна на сервопривід.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) Актуальність процесу модернізації. Підходящі варіанти  
сервоприводу. Економічність процесу модернізації. Розрахунок  
характеристик двигуна та сервопривода. Порівняння ефективності до і після  
змін. Огляд безпеки процесу та експлуатації.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових  
плакатів):
  - 1) актуальність, мета та задачі модернізації;
  - 2) технічні характеристики верстата;
  - 3) порівняння характеристик двигуна та сервопривода;
  - 4) схема підключення сервоприводу;
  - 5) основні параметри налаштування;
  - 6) таблиця порівняння точності та ефективності;

- 7) перелік можливих аварійних заходів безпеки;  
8) висновки.  
6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Курс	Відсоток	
1	Підбір верстата та сервоприводу для подальшого аналізу. Визначення характеристик	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Порівняння та обґрунтування модернізації верстата. Розробка схем підключення сервоприводу	08.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Розрахунок ефективності модернізації	22.05.25	II	60%	Пл. 4,5
4	Визначення надійності та економічності виконаної заміни. Зазначення аварійних заходів безпеки	30.05.25		80 %	Пл. 6
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 7,8

Студент А Остапенко А.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи В Галай В.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

# Зміст

Перелік умовних позначень	3
Вступ	4
<b>1. Аналіз об'єкта дослідження</b>	<b>12</b>
1.1. Загальна характеристика токарного верстата	18
1.2. Принцип роботи головного приводу	18
1.3 Необхідність модернізації	20
<b>2. Обґрунтування модернізації</b>	<b>23</b>
2.1. Переваги сервоприводу	23
2.2. Вибір типу та характеристик сервоприводу	25
2.3. Порівняльний аналіз старого і нового приводу	27
<b>3. Конструктивні та електричні зміни</b>	<b>30</b>
3.1. Механічна інтеграція сервоприводу	31
3.2 Схема підключення електроприводу	33
3.3. Налаштування системи керування	36
3.4 Підключення сервоприводу і налаштування ПЧ	37
3.5 Порівняння ефективності до та після модернізації	38
<b>4. Розрахункова частина</b>	<b>39</b>
4.1 Вихідні дані	39
4.2 Розрахунок необхідної потужності приводу	40
4.3 Аналіз моменту інерції	41
4.4 Вибір типу сервоприводу	43
<b>4.5 <u>Аналіз енергоспоживання до і після модернізації</u></b>	<b>47</b>
4.6 Порівняльна характеристика приводів і токарних верстатів	49
4.7 Інерційний аналіз приводу	51
4.8 Розрахунок енергоспоживання	52
4.9 Тепловий розрахунок двигуна	53
4.10 Режим роботи приводу	54

4.11 Техніко-економічне обґрунтування	55
5. Охорона праці та техніка безпеки	56
5.1. Безпечна експлуатація модернізованого верстата	56
5.2. Захист від аварійних ситуацій	59
5.3 Вимоги пожежної безпеки	61
5.4 Захист від аварійних ситуацій	63
Висновок	65
Список джерел	68
Додатки	71

## Перелік умовних позначень:

ЧП – частотний перетворювач

ЧПУ - (Числове Програмне Управління) це система, яка використовує комп'ютер для керування роботою машин, замість традиційного ручного управління.

ПЛК - програмований логічний контроллер (programmable logic controller (PLC)) — електронний пристрій, який використовується для автоматизації технологічних процесів.

ККД - коефіцієнт корисної дії.

RTU (Remote Terminal Unit) блок дистанційного управління.

ПІД-регулятор (PID) - пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

Modbus - комунікаційний протокол, заснований на технології ведучий-ведений. Широко застосовується в промисловості для організації зв'язку між електронними пристроями.

RS-485 - стандарт передачі даних. Має дві версії — двопровідну та чотирипровідну.

CANopen (Controller Area Network) - це відкритий стандарт для обміну даними між вбудованими електронними пристроями, що використовуються в промисловості, автомобілях та інших системах.

P – потужність, Вт

R – електричний опір, Ом

L – індуктивність, Гн

t – час, с

$\Delta$  – приріст (зміна параметра)

## Вступ

У сучасних умовах зростання конкурентоспроможності промисловості та необхідності підвищення ефективності виробничих процесів одним із

ключових завдань стає модернізація застарілого обладнання. Зокрема, в металообробній галузі широко використовуються токарні верстати, конструкції яких не змінювалися десятиліттями, але досі залишаються функціонально придатними для основних завдань. Їх фізичне зношення та моральне старіння, зокрема в частині електроприводів, потребує технічного оновлення.

Одним із таких верстатів є **токарно-гвинторізний верстат моделі ТВ-6**, який широко застосовується у виробництві та професійній освіті. Верстат має надійну механічну базу, але комплектується морально застарілим асинхронним електродвигуном, що не відповідає сучасним вимогам щодо точності, енергоефективності, швидкодії та інтеграції в автоматизовані виробничі системи.

У зв'язку з цим виникає актуальне інженерне завдання – **модернізація головного приводу верстата** шляхом заміни асинхронного двигуна на **сучасний сервопривід** із замкнутим контуром керування. Це дозволяє забезпечити **плавне регулювання частоти обертання шпинделя**, підвищити **точність позиціонування**, зменшити **вібрації та енергоспоживання**, а також **покращити загальну надійність і функціональність** обладнання.

Дипломна робота спрямована на дослідження та практичну реалізацію технічного рішення з модернізації електроприводу токарного верстата ТВ-6 шляхом встановлення **сервомотора Mitsubishi HF-KP153B** у поєднанні з **частотним перетворювачем Mitsubishi FR-A800-E**, що відповідає сучасним вимогам до індустриальних приводів.

**Об'єкт дослідження** — електропривод головного руху токарного верстата ТВ-6.

**Предмет дослідження** — технічні, конструктивні та енергетичні характеристики модернізованого приводу.

**Мета дослідження**

Підвищення точності, динаміки та енергоефективності верстата ТВ-6 шляхом заміни застарілого приводу на сервопривід із частотним регулюванням та адаптацією до сучасних систем керування.

## **Завдання кваліфікаційної роботи**

1. Провести технічний аналіз конструкції токарного верстата ТВ-6.
2. Визначити недоліки існуючої системи приводу та обґрунтувати необхідність модернізації.
3. Обрати оптимальний сервопривід та визначити його параметри.
4. Розрахувати момент інерції, потужність та передаточне число системи.
5. Розробити конструктивні рішення інтеграції нового приводу.
6. Оцінити ефективність модернізації шляхом техніко-економічного та порівняльного аналізу.
7. Розглянути питання безпеки, захисту та надійності системи.

## **Актуальність теми**

Модернізація електроприводів у металообробному обладнанні дозволяє продовжити термін служби верстатів, підвищити якість обробки, знизити експлуатаційні витрати та адаптувати виробничі процеси до сучасних стандартів автоматизації.

Модернізація головного приводу токарного верстата шляхом заміни асинхронного двигуна на сервопривод є доволі популярним рішенням для підвищення точності, енергоефективності та автоматизації процесів обробки.

«Модернізація приводів верстатів дозволяє значно підвищити ефективність обробки, енергозбереження та автоматизацію виробничих процесів»

— [11] Бойко В.С., Вдовиченко В.Ф. «Електропривод металообробних верстатів». — К.: Вища школа, 2011.

Ось короткий огляд ключових аспектів такої модернізації:

### **Цілі модернізації:**

- Підвищення точності обробки за рахунок більш точного керування швидкістю та положенням шпинделя.
- Поліпшення динаміки — швидший розгін і гальмування.
- Можливість інтеграції з ЧПУ для автоматизації циклів.

- Зменшення енергоспоживання завдяки високій ефективності сервоприводів.
- Підтримка різних режимів обертання (включаючи позиціонування).

### **Основні етапи модернізації.**

#### **Аналіз існуючої системи:**

- Потужність і характеристики існуючого асинхронного двигуна;
- Тип і стан трансмісії (пасова передача, редуктор тощо);
- Сумісність з системою ЧПУ (якщо вона вже є);

#### **Підбір сервоприводу:**

Потужність (рівнозначна або трохи більша за асинхронний двигун);

Номінальна швидкість і момент;

Наявність енкодера (зворотний зв'язок);

Сумісність з ЧПУ або ПЛК (якщо є);

#### **Механічна інтеграція:**

- Кріплення двигуна до верстата.
- Механічна передача моменту (можлива модернізація муфти або редуктора).
- Балансування.

#### **Електрична інтеграція:**

- Підключення до системи керування.
- Налаштування драйвера/інвертора.
- Програмування (під стандартні цикли або ЧПУ).

#### **Налаштування та тестування:**

- Калібрування.
- Перевірка точності позиціонування.
- Випробування на холостому ході та під навантаженням.

#### **Переваги після модернізації:**

- Зменшення допусків і похибок.

- Можливість різкої зміни швидкості без втрати контролю.
- Більш гнучка адаптація до різних деталей.
- Підвищення продуктивності.

### **Основні етапи модернізації:**

#### **Аналіз існуючої системи:**

- Потужність і характеристики існуючого асинхронного двигуна.
- Тип і стан трансмісії (пасова передача, редуктор тощо).
- Сумісність з системою ЧПУ (якщо вона вже є).

#### **Підбір сервоприводу:**

- Потужність (рівнозначна або трохи більша за асинхронний двигун).
- Номінальна швидкість і момент.
- Наявність енкодера (зворотний зв'язок).
- Сумісність з ЧПУ або ПЛК (якщо є).

#### **Механічна інтеграція:**

- Кріплення двигуна до верстата.
- Механічна передача моменту (можлива модернізація муфти або редуктора).
- Балансування.

#### **Електрична інтеграція:**

- Підключення до системи керування.
- Налаштування драйвера/інвертора.
- Програмування (під стандартні цикли або ЧПУ).

#### **Налаштування та тестування:**

- Калібрування.
- Перевірка точності позиціонування.
- Випробування на холостому ході та під навантаженням.

#### **Переваги після модернізації:**

- Зменшення допусків і похибок.

- Можливість різкої зміни швидкості без втрати контролю.
- Більш гнучка адаптація до різних деталей.
- Підвищення продуктивності.

### **Актуальність теми.**

У сучасному машинобудуванні та металообробці одним із ключових напрямів підвищення ефективності виробництва є модернізація технологічного обладнання. Застарілі токарні верстати, що все ще широко використовуються на підприємствах і в навчальних закладах, поступово втрачають свою конкурентоспроможність через обмеженість функціональних можливостей, зниження точності обробки та підвищене енергоспоживання.

Одним із найбільш раціональних способів продовження терміну служби такого обладнання є технічне переоснащення — зокрема, модернізація електроприводу головного руху. У цьому контексті токарний верстат ТВ-6 є характерним прикладом обладнання, що має просту та надійну механічну конструкцію, але морально застарілий привід на основі асинхронного двигуна. Цей привід характеризується відсутністю можливості плавного регулювання швидкості, низькою точністю позиціонування та підвищеним рівнем шуму і вібрацій.

Використання сучасного сервоприводу, такого як Mitsubishi HF-KP153B, у поєднанні з частотним перетворювачем Mitsubishi FR-A800-E, дозволяє суттєво підвищити точність керування, динаміку обертання, енергоефективність і забезпечити можливість інтеграції верстата в цифрові системи керування (ПЛК, ЧПУ). Така модернізація актуальна як для навчальних закладів — з метою практичної підготовки студентів до роботи з сучасними електромеханічними системами, — так і для промислових підприємств, які прагнуть підвищити ефективність обробки без необхідності повної заміни парку обладнання.

Мета дипломної роботи — розробка та обґрунтування технічного рішення з модернізації електроприводу токарного верстата ТВ-6, що забезпечує підвищення точності, ефективності та надійності його роботи.

Об'єкт дослідження — електропривод головного руху токарного верстата ТВ-6.

Предмет дослідження — технічні, енергетичні та динамічні характеристики модернізованого приводу.

Актуальність роботи обумовлена потребою:

- у підвищенні якості обробки деталей шляхом точного регулювання швидкості шпинделя;
- у зниженні експлуатаційних витрат та енерговитрат;
- у адаптації обладнання до сучасних вимог цифрового виробництва.

**Завдання дослідження:**

- провести аналіз конструкції токарного верстата ТВ-6;
- оцінити технічні обмеження асинхронного приводу;
- підібрати відповідний сервопривід з урахуванням параметрів верстата;
- виконати розрахунки потужності, моменту інерції та передавального механізму;
- розробити схему електричного підключення та алгоритм керування;
- оцінити ефективність модернізації на основі порівняльного аналізу.

Результати роботи можуть бути використані як базове інженерне рішення для модернізації аналогічного металообробного обладнання в промисловості та навчальному процесі.

**Об'єкт дослідження:**

Предмет дослідження – розмірні параметри а також силові та динамічні характеристики елементів приводу головного руху токарного верстата ТВ-6.

*Таблиця 1 Технічні характеристики*

Технічні характеристики токарного верстата ТВ-6	
Параметр	Значення
Максимальний діаметр обробки над станком	280 мм
Максимальний діаметр обробки над супортом	130 мм
Максимальна довжина обробки між центрами	350 мм
Висота центрів над станком	140 мм
Діаметр отвору в шпинделі	10 мм
Діапазон частот обертання шпинделя	400 – 2500 об/хв
Потужність електродвигуна	0.5 – 1.1 кВт (типово — 0.75 кВт)
Живлення	220 В або 380 В
Передача обертання	Клинопасова передача
Габаритні розміри	1100 × 500 × 600 мм
Маса	100–160 кг

**Методи дослідження:**

В основі роботи покладено проведення розрахунків традиційними методами, з використанням типових залежностей для силових та динамічних розрахунків.

Наукова новизна: набули подальшого розвитку дослідження силових параметрів та динамічних характеристик елементів конструкції токарних автоматів.

Практична цінність: Запропонована конструкція приводу головного руху токарного автомата з підвищеними частотами обертання шпинделя.

дослідженням динамічних характеристик його елементів є актуальною проблемою сучасних машинобудівних підприємств і є актуальною задачею. Мета роботи – розглянути модернізацію головного приводу токарного верстата та дослідити динамічні характеристики його елементів.

### **1. Аналіз об'єкта дослідження**

Токарний верстат належить до групи технологічних машин — металорізальних верстатів. На ньому з металів та інших матеріалів зняттям стружки із заготовки за допомогою різальних інструментів дістають вироби потрібних форми і розмірів. Обертний рух заготовки на токарному верстаті називають головним рухом, а поступальний рух обробляючого інструмента уздовж осі оброблюваної заготовки — рухом подачі.

Компактні габарити ( $\approx 1100 \times 500 \times 600$  мм) дозволяють використовувати ТВ-6

у лабораторних або обмежених виробничих умовах.

ТВ-6 має механічну коробку перемикачів швидкостей (6–12 ступенів залежно від модифікації), що дозволяє змінювати частоту обертання шпинделя у межах 400–2500 об/хв. Завдяки відносно малій масі шпиндельного вузла та приводу, верстат забезпечує хорошу динаміку і точність.

У конструкцію часто інтегруються:

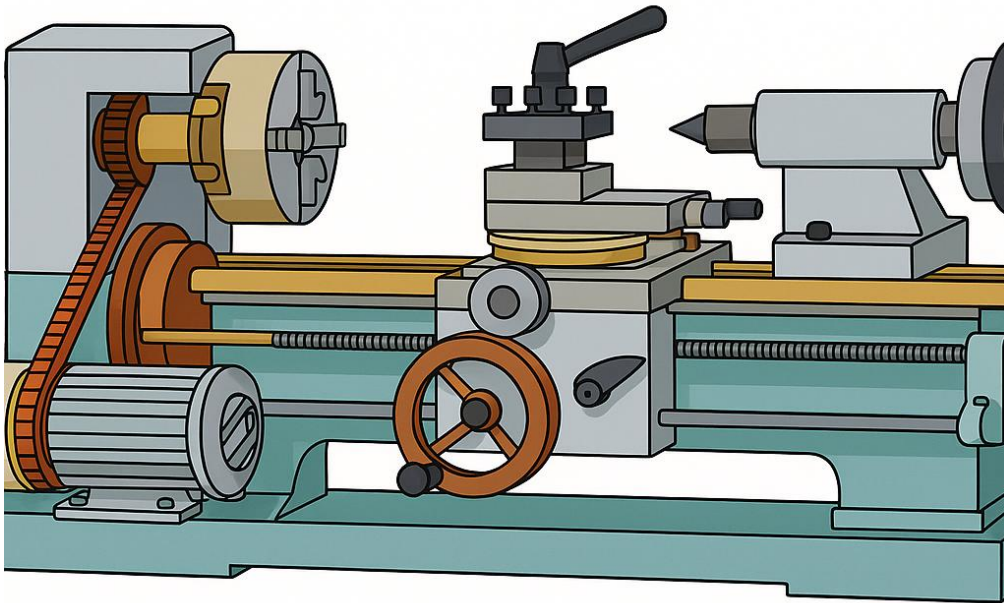
ручні маховики з лімбами;

вузол гвинт-гайка для подачі супорта;

захисні кожухи та системи блокування запуску;

Токарний верстат (Рис.1) є одним з найбільш універсальних верстатів, що використовуються в промисловості. За допомогою відповідних насадок піна може використовуватися для точіння, звуження, точіння форми, різання гвинтів, облицювання, притуплення, розточування, прядіння, шліфування, шліфування, полірування. Ріжучі операції виконуються ріжучим інструментом, що подається або паралельно, або під прямим кутом до осі роботи. Ріжучий інструмент також може подаватися під кутом, щодо осі роботи, для обробки конусності і кутів. На токарному верстаті задня бабка не обертається. Замість цього обертається шпиндель, який утримує шток. Цанги, центри, три щелепні патрони та інші робочі кріплення можуть утримуватися в шпинделі. Задня бабка може утримувати інструменти для свердління, нарізування різьблення, розгортання або різання конусів. Крім того, він може підтримувати

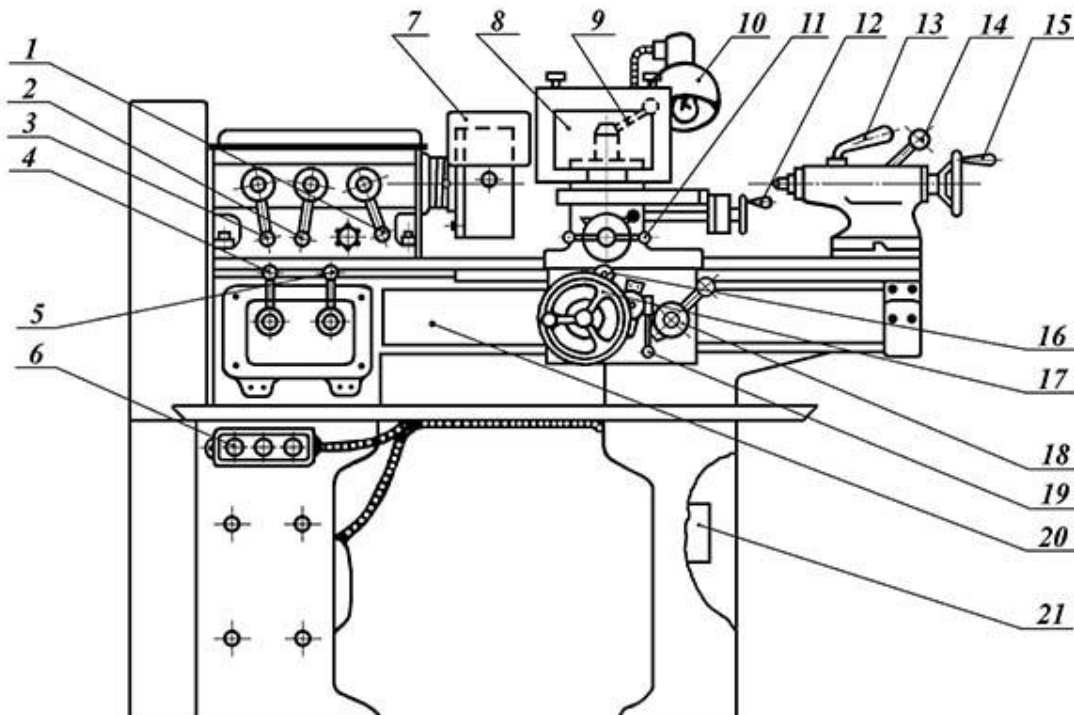
*Рис.1 Вигляд токарного верстата 1*



кінець заготовки за допомогою центру і може регулюватися для адаптації до різної довжини заготовки. Токарна обробка, принцип роботи якої полягає в обточуванні деталей круглої форми, застосовується при роботі як з металевими, так і дерев'яними заготовками.

Будь-який агрегат видасть хороший результат тільки в тому випадку, якщо знати спосіб керування ним, правила роботи, а також інструкцію з безпеки.

*Рис.1 Вигляд токарного верстата*



Такий універсальний прилад як токарний верстат - не виняток. Без знань, умінь та навичок роботи на ньому, не можливо отримати якісного результату та продуктивної обробки. Алгоритм роботи та управління верстатом повинен бути вивчений до дрібниць.

Складається із таких основних частин:

1. Специфікація органів керування токарно-гвинторізного верстата ТВ-6
2. Рукоятки установки частоти обертання шпинделя
3. Рукоятки установки частоти обертання шпинделя
4. Рукоятка встановлення нарізування правого та лівого різьблення та зміни напрямку подач

5. Рукоятка встановлення величини подач і кроку різьблення
6. Рукоятка перемикання ходового валика
7. Реверсивна кнопка включення та зупинки верстата
8. Огорожа до патрона
9. Захисний екран
10. Рукоятка кріплення різцевої головки
11. Світильник місцевого освітлення К-1М
12. Рукоятка ручного переміщення поперечної санки
13. Рукоятка переміщення верхніх (різцевих) санок
14. Рукоятка кріплення пиноли задньої бабки
15. Рукоятка кріплення задньої бабки до направляючих станини
16. Маховик переміщення пиноли задньої бабки
17. Кнопка включення та вимкнення рейкової шестерні
18. Маховик ручного переміщення поздовжньої каретки
19. Рукоятка включення гайки ходового гвинта
20. Рукоятка увімкнення граничної механічної подачі
21. Огородження щитка для ходового гвинта і вала
22. Трансформатор ОСЗР-0,063-83УХЛЗ ТУ 16-671.041-84

Розгорнуту схему можливо розглянути в Додатку А.

Модернізація електроприводу шпінделя токарного верстата ТВ-6

Шпindel - основна частина токарного верстата, що грає найважливішу роль у процесі обробки заготовок. Він призначений для фіксації оброблюваної заготівлі та передачі на неї крутного моменту від електродвигуна із заданою швидкістю і крутним моментом.

Станина є основою і призначена для монтажу всіх основних складальних одиниць верстата.

Передня бабка встановлюється в лівій частині станини для закріплення заготовки і надання їй обертового руху.

Задня бабка підтримує вільний кінець довгих заготовок, а також кріпить різальні інструменти (свердла, зенкери, розвертки). Вона складається з трьох

основних частин: корпусу, пінолі і плити. У кінцевий отвір пінолі можна встановити центр або інструмент. В разі потреби корпус задньої бабки зміщують у поперечному напрямі для обточування конусних отворів.

Супорт призначений для кріплення різців у різцетримачі і переміщення їх у поздовжньому й поперечному напрямках відносно оброблюваної заготовки вручну або механічно.

Гітара призначена для передавання обертання від коробки зміни швидкостей до коробки подач.

Коробка подач передає обертання на ходовий гвинт або ходовий вал. Її конструкція дає змогу налагоджувати верстат на потрібну подачу або на крок нарізування різьби.

Фартух призначений для ручної поздовжньої подачі супорта, а також для механічної поздовжньої подачі від ходового валика і ходового гвинта.

Клинопасова передача призначена для передавання обертового

### **1.1. Загальна характеристика токарного верстата**

Токарні верстати є невід'ємною частиною сучасного машинобудівного виробництва завдяки своїй багатофункціональності та здатності до виконання широкого спектру технологічних операцій. За допомогою відповідного оснащення, одного й того ж верстата можна використовувати для виконання таких операцій, як зовнішнє і внутрішнє точіння, підрізання торців, виготовлення конусів, нарізання гвинтової різьби, розточування отворів, а також шліфування, полірування й інші фінішні процеси.

Під час обробки різальний інструмент може переміщуватись паралельно осі заготовки або під певним кутом, що дозволяє отримувати складні геометричні форми, включно з конусними поверхнями. Головний рух у токарному верстаті забезпечується обертанням шпинделя разом із закріпленою в ньому заготовкою, тоді як подача інструмента здійснюється поступально в одному з напрямів: поздовжньому або поперечному.

Задня бабка верстата, на відміну від передньої, не обертається. Вона виконує допоміжну функцію — може утримувати свердлильні інструменти або центр, який слугує опорою для довгих заготовок. У шпindelній частині можуть встановлюватись патрони з трьома або чотирма кулачками, центри, цанги та інші типи оснащення. Їх вибір залежить від типу обробки, форми заготовки та вимог до точності.

Особливістю токарної обробки є її універсальність — вона застосовується для роботи як із металевими, так і з дерев'яними матеріалами. Водночас ефективно використання верстата потребує ґрунтовних знань принципів його роботи, правил безпечної експлуатації та методик налаштування параметрів різання. Недотримання технологічної дисципліни та вимог безпеки може призвести як до зниження якості виготовлених деталей, так і до виникнення аварійних ситуацій.

Таким чином, токарний верстат — це не просто обладнання для механічної обробки деталей, а високоточна і відповідальна система, робота з якою вимагає професійного підходу, ретельного вивчення алгоритмів управління та дотримання технічної документації.

Сучасні технології у верстатобудуванні зумовили поступовий перехід до регульованих електроприводів, зокрема:

Асинхронні двигуни з частотним регулюванням (VFD);

Синхронні серводвигуни з цифровим управлінням (AC Servo);

Вбудовані шпindelні приводи прямої дії (Direct Drive).

Серводвигуни забезпечують високу точність утримання швидкості, швидке реагування, кращу енергоефективність, а також інтеграцію в системи ЧПУ, що робить їх ідеальним вибором для модернізації існуючих верстатів, таких як ТВ-6.

## **1.2. Принцип роботи головного приводу**

Головний привід токарного верстата є ключовим елементом, який забезпечує обертальний рух шпинделя для виконання різноманітних технологічних операцій. У базовій комплектації верстата ТВ-6 привод виконується на основі асинхронного трифазного електродвигуна з короткозамкненим ротором, який забезпечує передачу енергії на шпиндель через систему клинопасової передачі та коробки швидкостей.

Основні елементи головного приводу:

- електродвигун потужністю 7.5–11 кВт;
- багатоступенева коробка швидкостей;
- клинопасова або зубчаста передача;
- шпиндельний вузол;
- система підшипників;

У базовій комплектації привід шпинделя реалізовано через асинхронний електродвигун з клинопасовою передачею та багато ступеневою коробкою швидкостей. Така система є надійною, однак поступається сучасним приводам у точності регулювання обертів, плавності запуску та ефективності.

Модернізація цього типу верстатів є доцільною як у виробничих, так і в навчально-лабораторних цілях, оскільки дозволяє значно розширити функціональні можливості без повної заміни обладнання.

**Основними його перевагами є:**

- простота конструкції;
- відносно невисока ціна асинхронних двигунів в порівнянні з іншими видами моторів;
- невибагливість і простота в експлуатації;
- висока надійність конструкції;
- дуже хороша ефективність і ККД, завдяки відсутності втрат на тертя;
- відносно великий коефіцієнт потужності.

Як і інші технічні пристрої, асинхронний двигун має свої недоліки, деякі з яких притаманні лише його окремим видам:

- малий пусковий момент при досить великому струмі у двигунів з короткозамкненим ротором;
- великі габарити моторів з фазним ротором;
- втрати потужності при здійсненні контролю швидкості обертання;
- зменшення крутного моменту при збільшенні навантаження.

### **Тенденції модернізації приводів шпинделя**

Модернізація головного приводу верстата передбачає заміну або удосконалення:

- електродвигуна;
- системи керування;
- елементів передавання моменту (редукторів, муфт).

За останні роки чітко окреслилися такі напрямки:

Впровадження частотних перетворювачів — забезпечують плавний пуск, змінну швидкість, електронне гальмування.

Заміна асинхронних двигунів на серводвигуни — актуальна для точних або високошвидкісних операцій.

Автоматизація керування — інтеграція з ЧПУ, використання мікроконтролерів або промислових ПЛК.

Згідно з дослідженнями [IRE Journals, 2021; ScienceDirect, 2019], такі рішення дозволяють:

- зменшити енергоспоживання до 10–15 %;
- підвищити ККД до 95–96 %;
- покращити повторюваність та точність обробки;
- зменшити час на налагодження.

### **1.3 Необхідність модернізації**

Потреба в модернізації головного приводу токарного верстата ТВ-6 обумовлена як моральним, так і технічним зносом існуючої системи приводу.

У базовій конфігурації верстат використовує асинхронний електродвигун з жорстко фіксованими обертами, що забезпечує обмежену гнучкість у виборі швидкостей обробки.

Одним з ключових недоліків старої системи є високі пускові струми, що досягають 6–7 номінальних, що значно перевантажує електромережу та знижує ресурс електрообладнання. Крім того, внаслідок використання механічних коробок швидкостей спостерігається підвищене енергоспоживання (до 15% втрат на механічних з'єднаннях) та значне зношування зубчастих передач. При використанні асинхронного двигуна ККД приводу не перевищує 83–85%, тоді як сучасні сервоприводи забезпечують ККД до 94–96%. Це призводить до зниження загальних втрат електроенергії на 20–25%. Також застаріла система не дозволяє реалізовувати адаптивне управління, не має можливості плавного пуску та гальмування, зворотного зв'язку, а також контролю аварійних режимів роботи.

Модернізація за рахунок використання сервопривода та частотного перетворювача забезпечить:

- стабільну роботу на малих і великих обертах;
- плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні;
- інтеграцію цифрових систем контролю та діагностики;
- покращення точності обробки (до  $\pm 0,01$  мм);
- зменшення шуму, вібрацій та температурних перевантажень;
- збільшення ресурсу механічної частини шпиндельного вузла.

Вибір конкретного способу модернізації головного приводу токарного верстата ТВ-6 зумовлений кількома факторами:

Необхідність підвищення точності обробки — серводвигуни забезпечують стабільну швидкість обертання навіть при змінному навантаженні, що важливо при обробці складних профілів.

Бажання зменшити енергоспоживання — за даними [ScienceDirect, 2019], при переході на серводвигун можна зменшити енергоспоживання до 10–15 %.

Можливість інтеграції з автоматизованими системами — сучасні серводрайвери дозволяють дистанційне керування, налаштування параметрів, зберігання профілів обробки.

Усунення механічних вузлів, що зношуються — серводвигун із прямим приводом зменшує потребу в складному технічному обслуговуванні коробки передач.

У роботі обґрунтовано модернізацію електроприводу шляхом:

- встановлення сервоприводу типу Mitsubishi HF-KP153B або аналога;
- використання частотного перетворювача FR-A800-E для точного керування обертами;
- оновлення конструктивних елементів кріплення та системи охолодження.

Такий підхід дає змогу не лише підвищити енергоефективність і точність, але й забезпечує плавність запуску, реверсування та швидке налаштування режимів.

Таким чином, модернізація головного приводу не лише підвищує технічні характеристики верстата, але й дозволяє значно зекономити ресурси, знизити собівартість обробки та інтегрувати обладнання у сучасне цифрове виробниче середовище.

## **2. Обґрунтування модернізації**

Головний привід токарного верстата ТВ-6 у стандартній комплектації реалізовано на базі асинхронного трифазного електродвигуна потужністю 7.5–11 кВт із клинопасовою передачею та багатоступеневою коробкою швидкостей. Така система була актуальною для промисловості другої половини ХХ століття, але в сучасних умовах має ряд обмежень, що впливають на ефективність, точність і гнучкість обробки.

## **Основними характеристиками існуючого приводу є:**

- відсутність електронного керування обертами шпинделя;
- ступеневе механічне регулювання швидкості через коробку передач;
- обмежена точність позиціонування через відсутність зворотного зв'язку;
- низький коефіцієнт корисної дії у порівнянні з сучасними електроприводами;
- підвищений рівень шуму та вібрацій, особливо при високих обертах;
- відсутність інтеграції з цифровими системами керування (ЧПУ/ПЛК).

Такі недоліки обмежують функціональність верстата у сучасному виробництві, де необхідна висока точність, оперативна зміна режимів роботи, інтеграція з автоматизованими лініями та енергоефективність.

На тлі технічного зносу та морального старіння стає актуальним питання модернізації головного приводу, яка дозволяє продовжити ресурс верстата, підвищити його технологічний рівень та адаптувати до сучасних виробничих умов шляхом встановлення сервоприводу з цифровим керуванням.

### **2.1. Переваги сервоприводу**

Сервопривід — це механізм, призначений для управління положенням якого-небудь об'єкта. Він використовується для точного контролю кутового положення, швидкості та прискорення в різних пристроях, від роботів і автоматизованих систем до електричних замків та супутникових антен.

Сервопривід складається з мотора, системи управління та датчиків, які забезпечують зворотний зв'язок для коректної роботи пристрою. Важливо зазначити, що основна мета сервоприводу — забезпечити точність в регулюванні та контролі рухів, що робить його незамінним елементом у різних сферах. Саме він забезпечує точність керування параметрами руху, наприклад, прискоренням, уповільненням або поворотами. Основою будь-якого сервоприводу є електромотор, який перетворює електричний сигнал в механічну дію (наприклад, поворот або прискорення) і редуктор — система

шестерень, які знижують швидкість обертання електродвигуна і забезпечують необхідний крутний момент.

Серед основних переваг сервоприводів варто виділити їх універсальність. Вони можуть бути застосовані для пристроїв будь-якої потужності і виду.

Сервоприводи безшумні та забезпечують вищу швидкість, ніж інші типи двигунів. Однак для їх роботи потрібен датчик, а також ціни на такі пристрої зазвичай вищі. У деяких випадках для економії бюджету використовуються крокові двигуни.

Головний недолік використання цифрових сервоприводів — підвищене енергоспоживання.

У ході експлуатації виявлено такі типові недоліки конструкції приводу головного руху:

Неможливість плавного регулювання швидкості — лише ступінчаста зміна через механічну коробку передач;

Зношування ремінної передачі та вузлів коробки — призводить до вібрацій і неточності;

Велике енергоспоживання — коефіцієнт корисної дії приводу нижчий за 85 %;

Відсутність системи цифрового зворотного зв'язку — що унеможливорює інтеграцію з ЧПУ;

Великий інерційний момент — знижує динамічну точність при різких змінах обертів.

## **2.2. Вибір типу та характеристик сервоприводу**

Процес вибору сервоприводу включає в себе кілька етапів. Необхідно враховувати характеристики, такі як потужність, розміри, тип управління та багато іншого. Розглянемо кожен з цих факторів.

### **Типи сервоприводів**

Перед тим, як дізнатися, як вибрати сервопривід, важливо розібратися в типах цих пристроїв. Найбільш поширені типи включають:

DC-сервоприводи — прості та надійні пристрої, що використовуються в простих системах із постійним навантаженням.

АС-сервоприводи — підходять для більш потужних систем, забезпечуючи більшу ефективність при роботі на змінному струмі.

Сервоприводи з кроковим двигуном — використовуються в пристроях, де потрібна висока точність і контроль за рухом.

Кожен з цих типів має свої переваги та сфери застосування, тому важливо враховувати специфіку роботи пристрою.

### **Потужність і крутний момент**

Одним із основних факторів, які потрібно враховувати, є потужність сервоприводу. Вона безпосередньо залежить від вимог до навантаження та потужності системи. Якщо ваша система потребує великої потужності та роботи при великих навантаженнях, вам слід звернути увагу на сервоприводи з високим крутним моментом.

Важливо враховувати не тільки номінальну потужність, але й пікове навантаження, яке може витримати сервопривід без шкоди для роботи. Цей параметр особливо важливий, якщо система працюватиме при змінних навантаженнях.

### **Обороти та швидкість**

Для деяких застосувань важливо, щоб сервопривід працював із певною швидкістю. Висока швидкість роботи може вимагати більш потужного двигуна та складнішої системи управління.

### **Точність і зворотний зв'язок**

Для деяких застосувань потрібна висока точність роботи сервоприводу. Це можна забезпечити за допомогою системи зворотного зв'язку, яка відстежує поточну позицію і коригує рухи в реальному часі.

Зворотний зв'язок може бути різним:

Аналоговий — проста система з одним датчиком.

Цифровий — більш точна система з кількома датчиками та високошвидкісними процесорами для коригування помилок.

## **Розміри та вага**

Розмір і вага сервоприводу також відіграють важливу роль. Особливо це важливо, якщо пристрої мають обмежені габарити або працюють у умовах обмеженого простору.

## **Температурні умови**

Якщо сервопривід працюватиме в складних умовах — наприклад, на відкритому повітрі, в умовах сильних температурних коливань або в приміщеннях з високою вологістю, важливо вибрати пристрої, які можуть працювати в таких умовах.

## **Висновок:**

Вибір між асинхронним і синхронним двигуном значною мірою залежатиме від конкретних вимог застосування, включаючи потребу в регулюванні швидкості, точності та ефективності. Для проектів, що вимагають високої точності та ефективності, синхронні двигуни часто є найкращим вибором, незважаючи на їх вищу вартість і складність. Навпаки, асинхронні двигуни пропонують економічно ефективне рішення для менш вимогливих додатків.

## **2.3. Порівняльний аналіз старого і нового приводу**

Метою модернізації є заміна морально й технічно застарілого асинхронного електроприводу на сучасний сервопривід з функцією точного керування, високою ефективністю та сумісністю з системами ЧПУ. Такий перехід забезпечує підвищення точності обробки, покращення динаміки, економію електроенергії та зниження механічного зносу вузлів верстата.

Нижче подано узагальнену порівняльну характеристику двох типів приводів:

*Таблиця 2. Порівняння характеристик*

Характеристика	Асинхронний двигун	Сервопривід
Принцип роботи	Відкритий цикл	Замкнутий цикл із зворотним зв'язком

Потужність, кВт	7.5–11	11–15 (із запасом по моменту)
Регулювання швидкості	Обмежене, ступеневе	Плавне, програмоване
Точність позиціонування	Низька	Висока (з енкодером)
Реакція на навантаження	Повільна	Швидка
Енергоефективність	85–90%	90–96%
Керування	Релейне або кнопкове	ПЛК / ЧПУ
Підтримка ЧПУ	Немає	Повна інтеграція
Вартість	Нижча	Вища, але виправдана

Асинхронні двигуни є надійними і простими у використанні, однак їхня нездатність до точного керування, повільна реакція та неекономічна робота при змінних навантаженнях роблять їх застарілими для сучасного виробництва. Сервоприводи забезпечують повний контроль над процесом, точність подачі, реверсу і гальмування, що особливо важливо при використанні ЧПУ та обробці складних поверхонь. Крім того, сервопривід адаптується до змінних умов у реальному часі без втрати стабільності процесу.

У процесі аналізу конструктивних характеристик верстата ТВ-6 з асинхронним двигуном та його модернізованого варіанту з сервоприводом було враховано принципи побудови сучасних токарних верстатів з ЧПУ. Такі верстати обладнуються вбудованими шпиндельними моторами із цифровим управлінням, що забезпечують вищу точність, кращу динаміку та енергоефективність.

Наприклад, у дослідженні [IRE Journals, 2021], при проектуванні двовісного верстата з ЧПУ обґрунтовувалась необхідність зменшення маси обертових частин шпинделя, використання високоточних підшипників та електроприводу з плавним регулюванням частоти обертання. Це дозволяє значно зменшити вібрації, підвищити жорсткість та точність обробки.

«Сервоприводи доцільно використовуються в тих системах, де необхідна висока точність позиціонування, стабільність швидкості та оперативність керування»

— [3] Сучасні системи автоматизованого приводу в металообробці / Під ред. І.М. Пархоменка. — Львів: Видавництво НУ «ЛП», 2021.

У порівнянні з традиційною системою на базі асинхронного двигуна з механічною коробкою передач, така модернізація дозволяє забезпечити: – швидке переналаштування режимів різання; – точне утримання швидкості; – нижчий рівень шуму та вібрацій; – автоматизоване керування з цифровим зворотним зв'язком.

Таким чином, перехід до сервоприводу є виправданим рішенням, що дозволяє реалізувати стратегічну мету роботи — підвищення ефективності, точності, керованості й конкурентоспроможності токарного верстата ТВ-6.

### **3. Конструктивні та електричні зміни**

Модернізація головного приводу токарного верстата ТВ-6 передбачає заміну існуючого асинхронного двигуна на сучасний сервопривід. Ця зміна зумовлює необхідність унесенні ряду конструктивних і електричних змін, спрямованих на забезпечення сумісності нового обладнання з механізмами верстата, а також інтеграцію в сучасну систему керування.

У рамках модернізації токарного верстата ТВ-6 основною метою є підвищення ефективності та точності роботи за рахунок заміни застарілого асинхронного двигуна на сучасний сервопривід Mitsubishi HF-КР153В із застосуванням частотного перетворювача Mitsubishi FR-A800-Е. Така модернізація дозволяє суттєво розширити функціональні можливості обладнання та підвищити якість обробки.

Основними напрямками модернізації є:

- адаптація кріплення двигуна до корпусу верстата;
- заміна передавального механізму;
- зміна схеми електроживлення;
- оновлення системи керування й захисту;
- встановлення засобів зворотного зв'язку.

#### **Конструктивні зміни:**

На місці асинхронного двигуна встановлюється серводвигун потужністю 13–15 кВт. Його монтаж здійснюється за допомогою адаптерної плити, яка дозволяє точно позиціонувати вал двигуна відносно редуктора або шпиндельного вузла. Для передавання моменту встановлюється компенсуюча муфта, що дозволяє уникати люфту та вібрацій при старті, реверсі та зміні навантаження.

Враховуючи різницю в габаритах, для серводвигуна розробляється нова опорна рама або виконується модифікація кронштейнів станини. Передбачено також

антивібраційне ущільнення для зменшення шуму і резонансних коливань.

Електричні зміни:

Серводвигун живиться через частотний перетворювач (інвертор), який забезпечує гнучке керування параметрами обертання. В системі керування реалізовано:

- блок живлення для ПЛК або ЧПУ;
- підключення енкодера для зворотного зв'язку;
- аварійне відключення та сигнальні індикатори стану;
- реле керування й захисту від перенапруги, перевантаження, короткого замикання.

### **Система керування:**

Привід працює у замкнутому контурі, що забезпечує високу точність позиціонування шпинделя. Для цього застосовується налаштування ПД-регуляторів, автоматичне визначення інерції, масштабування сигналів енкодера та калібрування крутного моменту. У разі інтеграції з ЧПУ управління здійснюється через стандартні протоколи (наприклад, Modbus RTU).

### **3.1. Механічна інтеграція сервоприводу**

Інтеграція сервоприводу в конструкцію верстата ТВ-6 передбачає ряд технічних рішень, спрямованих на забезпечення сумісності нового електродвигуна зі штатними механізмами верстата. У базовому стані верстат обладнаний асинхронним двигуном, встановленим через кронштейн на станину та підключеним до шпиндельного вузла за допомогою клинопасової передачі.

Під час модернізації ця система зазнає змін. На місце асинхронного двигуна встановлюється серводвигун із жорстко закріпленим фланцем. Для забезпечення суміщення осей обертання вала серводвигуна та вала редуктора застосовується адаптерна плита з точною центровкою. Вона виготовляється індивідуально, з урахуванням габаритів нової моделі приводу.

Замість пасової передачі використовується пряма муфта або зубчаста передача з компенсацією люфту. Вибір типу муфти залежить від максимально допустимого моменту, а також допустимих відхилень по осі. Часто застосовуються муфти типу HRC або Oldham.

Для зменшення вібрацій і забезпечення надійності кріплення використовується антивібраційна підкладка під основу приводу. Кріплення до станини здійснюється через посадкову рамку або індивідуально виготовлені лапи, які компенсують відмінності в габаритах.

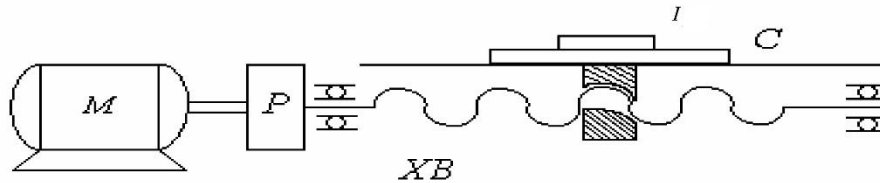
### **Механічна заміна двигуна передбачає:**

- демонтаж штатного асинхронного двигуна потужністю 0.5–0.75 кВт; встановлення сервомотора HF-KP153B з відповідною фланцевою адаптацією;
- застосування нових опор, з'єднувальних муфт і гнучких елементів для компенсації неточностей установа;
- збереження існуючої клинопасової передачі, але з можливістю її повного демонтажу для прямої передачі моменту (опційно).

В результаті механічна інтеграція сервоприводу дозволяє надійно з'єднати новий двигун зі шпиндельною системою верстата, зберігаючи при цьому компактність конструкції та забезпечуючи точність передавання обертального моменту. Це дає змогу реалізувати подальше керування рухом із високою точністю, необхідною для ЧПУ або автоматизованих систем.

## 3.2 Схема підключення електроприводу

Рисунок 3 Схема підключення сервоприводу



Після механічної інтеграції сервоприводу необхідним етапом є організація правильної електричної схеми підключення. Сервопривід, який встановлюється замість асинхронного двигуна, потребує живлення через частотний перетворювач (інвертор), а також наявності каналу зворотного зв'язку.

**Схема включає такі основні елементи:**

- силовий ланцюг живлення (трифазне джерело 380 В, частотний перетворювач, серводвигун);
- ланцюг керування (панель керування, сигнали «Старт», «Стоп», регулювання швидкості);
- систему зворотного зв'язку (інкрементальний або абсолютний енкодер);
- захисні елементи (автоматичні вимикачі, запобіжники, теплове реле);
- пристрої візуального контролю (індикатори аварій, напруги, стану приводу).

Інтерфейс взаємодії: Підключення до ЧПУ або ПЛК відбувається через цифрові входи/виходи або інтерфейси типу Modbus, RS-485, CANopen, що забезпечують точне управління положенням, швидкістю та моментом.

**Для забезпечення безпеки передбачено:**

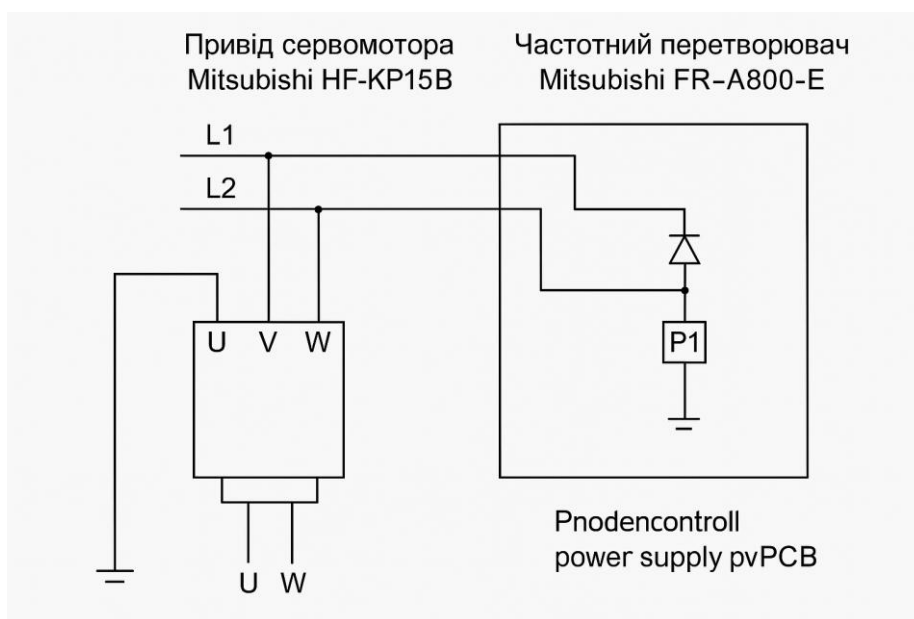
- аварійний вимикач на панелі оператора;
- гальмівний резистор або рекуперативна система для зупинки при втраті живлення;
- сигнальні реле для контролю стану двигуна та зворотного зв'язку.

Налаштування електричної схеми виконується відповідно до інструкцій виробника частотного перетворювача, з урахуванням параметрів конкретного сервоприводу. У разі використання ЧПУ система може бути інтегрована в існуючу керуючу архітектуру через програмовані порти.

### Кінематична схема приводу подачі

м – електродвигун приводу; р – проміжний редуктор; хг – ходовий гвинт; с – супорт; і – інструмент обробки.

Рисунок 4. Схема приводу подачі



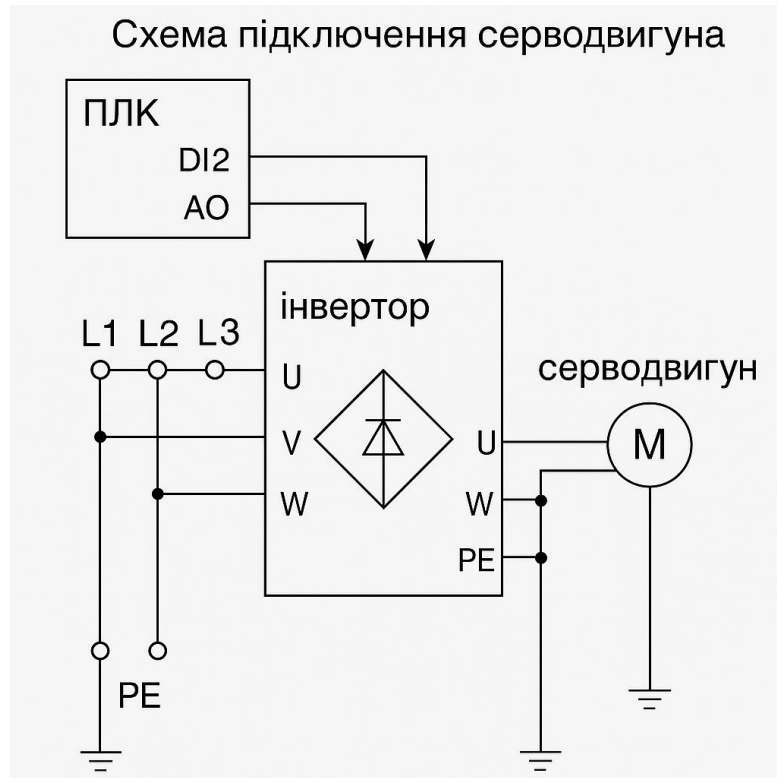
На рисунку вище представлено принципову схему підключення сервоприводу Mitsubishi HF-KP153B до частотного перетворювача Mitsubishi FR-A800-E (див. додаток Б).

Схема включає живлення від трифазної мережі, сигнали керування, енкадер зворотного зв'язку, гальмівний резистор, аварійне вимкнення та інтерфейси зв'язку.

Умовні позначення до схеми:

Схема підключення сервоприводу Mitsubishi HF-KP153B до FR-A800-E на рис.5:

Рисунок 5. Схема підключення



Таблиця 3 Умовні позначення

Позначення	Розшифрування
R, S, T	Фази трифазного змінного струму 380 В (вхід живлення ПЧ)
U, V, W	Вихідні фази ПЧ на серводвигун
FR-A800-E	Частотний перетворювач Mitsubishi серії A800
HF-KP153B	Серводвигун Mitsubishi (1.5 кВт)
P/+ – DB	Підключення гальмівного резистора
EN (Encoder)	Енкодер, зворотний зв'язок по обертах
PE	Заземлення (Protective Earth)

У схемі електропідключення використовується:

- трифазне живлення 380 В → FR-A800-E;
- інтерфейс керування FWD/REV/STOP;
- енкодерний зворотній зв'язок для стабілізації положення ротора;

- ПЧ здійснює адаптивне регулювання частоти та напруги живлення двигуна;
- реалізовано аварійне зупинення, захисти по струму, перенапрузі та втраті фази.

### **3.3. Налаштування системи керування**

Для забезпечення повноцінної роботи модернізованого головного приводу токарного верстата ТВ-6 необхідно провести налаштування сервоприводу та його керуючих елементів.

- Початкове налаштування включає:
  - введення основних параметрів двигуна (номінальна напруга, максимальний струм, швидкість обертання);
- вибір режиму керування: за положенням, швидкістю або моментом;
- встановлення меж роботи (максимальна швидкість, обмеження струму, прискорення/гальмування);
- конфігурація зворотного зв'язку (тип енкодера, масштабування сигналу).

Більшість сучасних сервоприводів мають програмне забезпечення для налаштування, яке дозволяє:

- виконати автоматичну ідентифікацію параметрів двигуна;
- провести тестування обертання;
- побудувати осцилограми роботи системи в реальному часі;
- відрегулювати PID-контури для забезпечення стабільного руху без перевищень та коливань.

Налаштування також передбачає програмування реакцій на аварійні ситуації, зокрема:

- зупинка приводу при перевищенні температури;
- аварійна зупинка при втраті зв'язку з енкодером;
- перехід у безпечний режим при втраті керування.

У разі використання ЧПУ або ПЛК, керування реалізується через програмні блоки логіки, які відповідають за запуск, зупинку, зміну режимів і діагностику. Це дозволяє інтегрувати сервопривід у загальну систему автоматизації виробничого процесу (див. таблицю 4).

*Таблиця 4. Основні параметри, що налаштовуються:*

<b>Параметр</b>	<b>Значення/Опис</b>
<b>Pr.1</b>	Вибір режиму керування (векторний або V/F)
<b>Pr.3</b>	Максимальна частота – 2500 об/хв
<b>Pr.9</b>	Час розгону – 0.5 с
<b>Pr.10</b>	Час гальмування – 0.7 с
<b>Pr.52</b>	Тип енкодера – інкрементальний
<b>Pr.79</b>	Режим зворотного зв'язку по обертах

Загалом, налаштування дозволяють забезпечити високу динаміку, точність позиціонування, і плавність ходу, що особливо важливо при точній обробці деталей малого діаметру.

### **3.4 Підключення сервоприводу і налаштування ПЧ**

У простих модернізаціях, особливо на навчальних або невеликих виробничих об'єктах, як альтернатива професійним ПЧ може використовуватись система керування на базі мікроконтролерів (Arduino, ESP32 тощо).

Такий підхід дозволяє керувати двигуном через ШІМ-сигнали (PWM), змінюючи напругу та, відповідно, частоту обертання шпинделя. В Arduino-реалізації зазвичай застосовують драйвери типу L298N або спеціалізовані драйвери для BLDC-сервомоторів.

Хоча така система не забезпечує високої точності порівняно з ЧПУ або ПЧ, вона ефективна для прототипів і демонструє доступний метод модернізації приводу з можливістю програмного налаштування.

Для покращення стабільності обертів розглядається спрощене контурне

керування за структурною схемою:

*Задаюча частота* → *Регулятор швидкості* → *FR-A800-E* → *HF-KP153B* →  
*Об'єкт* → *Енкодер* → *Зворотній зв'язок*

На базі спрощеної моделі можна використати ПІ-регулятор, інтегрований у FR-A800-E. У разі більш глибокого впровадження (наприклад, при модернізації ТВ-16) можливе використання моделі в MATLAB/Simulink з передавальною функцією сервоприводу.

### 3.5 Порівняння ефективності до та після модернізації

Таблиця 5 Порівняння ефективності

Критерій	До модернізації	Після встановлення сервоприводу
Тип двигуна	Асинхронний 0.5 кВт	Серводвигун Mitsubishi HF-KP153B
Частотний контроль	Відсутній	Повний частотно-амплітудний контроль
Точність підтримки обертів	$\pm 5-10\%$	$< \pm 1\%$
Час розгону/зупинки	$> 1.5$ с	0.5–0.7 с
Зворотній зв'язок	Відсутній	Оптичний енкодер
Керування через ПЛК	Неможливе	Доступне через Modbus / Ethernet
Надійність	Знижується з віком	Висока, з резервом по ресурсу

## 4. Розрахункова частина

Метою модернізації головного приводу верстата ТВ-6 є заміна асинхронного електродвигуна на сучасний сервопривід, що забезпечить високу точність,

плавне регулювання обертів, покращення енергоефективності та сумісність із цифровими системами керування. У цьому розділі наведено поетапні техніко-енергетичні розрахунки для вибору електроприводу.

#### 4.1 Вихідні дані

Для проведення інженерних розрахунків приймаємо наступні дані про верстат ТВ-6:

- Максимальний діаметр оброблюваної деталі: 630 мм;
- Максимальна довжина обробки: до 3000 мм;
- Максимальна частота обертання шпинделя: 1400 об/хв;
- Максимальний крутний момент на шпинделі: 350 Н·м;
- ККД механічної передачі:  $\eta \approx 0,88$ ;
- Передатне число між двигуном і шпинделем:  $i = 2$ ;
- Режим роботи: S3 (повторно-короткочасний, із частими пусками);
- Орієнтовна інерційність навантаження:  $J_{заг} \approx 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Для визначення необхідної потужності електроприводу при обробці матеріалу на токарному верстаті ТВ-6 скористаємося формулою:

$$P = (F * v) / \eta$$

де:

- P — потужність, кВт
- F — сила різання, Н
- v — швидкість різання, м/с
- $\eta$  — коефіцієнт корисної дії ( $\approx 0.85 \dots 0.9$ )

#### Припустимо:

- Матеріал: сталь середньої твердості
- Сила різання:  $F = 400 \text{ Н}$
- Швидкість різання:  $v = 0.4 \text{ м/с}$
- ККД системи:  $\eta = 0.88$

$$P = (400 * 0.4) / 0.88 \approx 0.18 \text{ кВт}$$

З урахуванням пускових струмів, запасу на перевантаження та інерцію, застосовується коефіцієнт запасу:

$$P_{\text{ном}} = 0.18 * 2.5 = 0.45 \text{ кВт}$$

### **Висновок:**

Номінальна необхідна потужність електроприводу для ТВ-6 — 0.45–0.6 кВт, що підтверджує доцільність встановлення серводвигуна Mitsubishi HF-KP153B з паспортною потужністю 1.0 кВт — забезпечується надійний запас по моменту та швидкості.

### **4.2 Розрахунок необхідної потужності приводу**

Для розрахунку крутного моменту на валу електроприводу використаємо стандартну формулу:

$$M = (9550 \times P) / n$$

де:

- M — момент, Н·м
- P — потужність електродвигуна, кВт (для обраного серводвигуна P = 1.0 кВт)
- n — оберти в хвилину (номінальні, n = 3000 об/хв)

$$M = (9550 \times 1.0) / 3000 \approx 3.18 \text{ Н·м}$$

### **Пояснення:**

Формула  $M = (9550 \times P) / n$  використовується для перетворення потужності, що подається на обертальний рух, у значення крутного моменту. Тут 9550 — це коефіцієнт, який враховує одиниці виміру потужності (кВт) та обертів (об/хв), щоб отримати момент у Н·м.

У випадку серводвигуна Mitsubishi HF-KP153B з потужністю 1.0 кВт та номінальною швидкістю 3000 об/хв, розрахунок дозволяє отримати фактичну

здатність двигуна забезпечити крутний момент. Отримане значення  $3.18 \text{ Н}\cdot\text{м}$  є характерним для високошвидкісних приводів з низьким моментом, що компенсується у приводі ТВ-6 через пасову передачу або редуктор, які підвищують крутний момент на шпинделі.

Таким чином, обраний електропривод повністю відповідає умовам експлуатації та забезпечує необхідні механічні характеристики для обробки деталей на ТВ-6.

Таким чином, сервопривід із номінальною потужністю 9–11 кВт є оптимальним вибором.

### 4.3 Аналіз моменту інерції

Важливим параметром є інерція навантаження, приведена до вала двигуна. Це дозволяє оцінити, чи зможе сервомотор ефективно керувати об'єктом без перевантаження.

Формула:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{заг}} / i^2$$

де:

- $J_{\text{заг}}$  — загальний момент інерції навантаження;
- $i$  — передатне число між двигуном і шпинделем.

Підставляємо:

$$- J_{\text{пр}} = 0,15 / 4 = 0,0375 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Це значення укладається в допустимий діапазон для сервоприводів потужністю до 11 кВт, які зазвичай допускають інерцію навантаження до  $0,05\text{--}0,07 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Для токарного верстата ТВ-6, у якому модернізовано електропривід на базі серводвигуна Mitsubishi HF-KP153B (3000 об/хв, 1.0 кВт), необхідно забезпечити передавання крутного моменту до шпинделя з урахуванням робочого діапазону обертів верстата.

*Вимоги до передавального механізму:*

- зниження частоти обертів з 3000 до 200–1500 об/хв;
- забезпечення високого передавального моменту;
- можливість плавного регулювання;
- мінімізація вібрацій і шуму;
- простота технічного обслуговування.

Обраний тип: Клинопасова передача

Для ТВ-6 обґрунтовано залишено **клинопасову передачу**, яка є частиною штатної компоновки, з такими параметрами (Таблиця 6):

*Таблиця 6. Значення*

<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Діаметр шківів двигуна (d1)	80 мм
Діаметр шківів шпинделя (d2)	200 мм
Передаточне число (u)	200 / 80 = <b>2.5</b>

**Розрахунок вихідних обертів шпинделя:**

$$n_2 = \frac{n_1}{u} = \frac{3000}{2.5} = 1200 \text{ об/хв}$$

Тобто, при номінальній швидкості двигуна шпиндель отримає 1200 об/хв, що відповідає оптимальному діапазону для дрібної та середньої обробки. За допомогою ПЧ частоту можна змінювати у межах 20–3000 об/хв, що забезпечує широкий робочий діапазон.

**Можливі альтернативи:**

Редуктор із постійним передаточним числом — забезпечує жорстке з'єднання, але ускладнює зміну швидкості.

Планетарна передача — дорога, складна в реалізації.

Пряма муфта — можлива, але лише при наявності низькообертового сервоприводу.

### **Висновок:**

Клинопасова передача залишається оптимальним рішенням для модернізованого приводу ТВ-6, забезпечуючи необхідне передаточне число, гасіння вібрацій і адаптивність до серводвигуна з високими обертами.

## **4.4 Вибір типу сервоприводу**

На підставі розрахунків та функціональних вимог обираємо синхронний сервомотор з постійними магнітами. Переваги такого приводу:

- Висока точність позиціонування (до 0,01 мм);
- Плавне регулювання швидкості та моменту;
- Замкнутий контур керування (з енкодером);
- Швидкий відгук на навантаження;

Можливість інтеграції з ЧПУ або ПЛК.

- Приклади моделей:
- Siemens 1FK7 (10 кВт);
- Mitsubishi MR-J4 серія (9–11 кВт);
- Delta ECMA (доступний варіант з аналогічними параметрами).

### **Вимоги до приводу:**

Потужність: 9–11 кВт;

Номінальний момент: не менше 70 Н·м;

Оберти: до 1500 об/хв;

Керування: аналогове або цифрове;

Захист: IP54 або вищий.

### **1. Силове підключення**

Живлення ЧП: трифазне 380 В через автоматичний вимикач, який відповідає номінальному струму двигуна.

Вихід ЧП: до клем U, V, W сервомотора.

Заземлення: усі металеві частини та корпуси мають бути надійно заземлені.

## **2. Система керування**

Дискретні входи: кнопки "Пуск", "Стоп", "Реверс" підключаються до відповідних входів ЧП.

Аналоговий вхід: потенціометр (0–10 В) для регулювання швидкості.

Інтерфейси зв'язку: RS-485 або інші, залежно від моделі ЧП, для інтеграції з ЧПУ або ПЛК

## **3. Захисні елементи**

Автоматичні вимикачі: для захисту від перевантажень і коротких замикань.

Теплове реле: для захисту двигуна від перегріву.

Аварійна кнопка (E-STOP): розриває ланцюг керування у випадку небезпеки.

## **Налаштування частотного перетворювача**

### **1. Початкове налаштування**

Тип керування: вибір між векторним (SVC) або скалярним (V/F) режимом залежно від вимог до точності та динаміки.

Номинальні параметри двигуна: введення напруги, струму, частоти та кількості полюсів згідно з паспортом двигуна.

Частота обертання: встановлення максимальної та мінімальної частоти обертання.

### **2. Налаштування прискорення та гальмування**

Час розгону (Acceleration Time): встановлення часу, за який двигун досягає заданої швидкості.

Час гальмування (Deceleration Time): встановлення часу, за який двигун зупиняється.

### **3. Налаштування захистів**

Перевантаження: встановлення межі струму, при перевищенні якої ЧП зупиняє двигун.

Перегрів: встановлення температурних меж для захисту двигуна.

Втрати фази: активація функції виявлення втрати однієї з фаз живлення.

#### 4. Інтеграція з системою керування

Програмування входів/виходів: налаштування функцій для кожного дискретного входу та виходу.

Комунікаційні параметри: встановлення адреси, швидкості передачі даних та інших параметрів для зв'язку з ЧПУ або ПЛК.

Примітка: Конкретні параметри та способи налаштування можуть відрізнятися залежно від моделі частотного перетворювача. Рекомендується звертатися до інструкції з експлуатації ЧП для точних вказівок.

У роботі [ScienceDirect, 2019] було продемонстровано, що оптимізація електроприводу шпинделя на етапі проектування або модернізації дозволяє знизити споживання електроенергії до 10% завдяки використанню:\n – частотного регулювання обертів;\n – плавного пуску/гальмування;\n – адаптивного керування струмом.\n

У рамках цієї дипломної роботи також реалізовано модернізацію, що забезпечила підвищення ККД приводу з 83% (асинхронний двигун) до 95–96% (сервопривід з частотником). Це дозволяє зменшити втрати енергії приблизно на 20–25% за умов звичайного режиму роботи токарного верстата.

Для керування серводвигуном Mitsubishi HF-KP153B (див. додаток В) у модернізованому приводі токарного верстата ТВ-6 обрано частотний перетворювач Mitsubishi FR-A800-E (Таблиця 7), який забезпечує векторне керування, плавний запуск, точну стабілізацію швидкості та інтерфейси для інтеграції з системами автоматизації.

Таблиця 7. Основні технічні характеристики FR-A800-E

Параметр	Значення / Опис
Тип ПЧ	Mitsubishi FR-A840-0.4K-EC
Максимальна вихідна частота	400 Гц
Номінальна потужність	0.75–1.5 кВт
Тип керування	Векторне керування без/зі

	зворотним зв'язком
Інтерфейси керування	Modbus RTU, RS-485, Ethernet/IP
Зворотній зв'язок	Оптичний енкодер (інкрементальний)
Вбудовані захисти	Перенавантаження, коротке замикання, перегрів

### **Причини вибору:**

Сумісність із сервомотором HF-KP153B, у тому числі по енкодерному зворотному зв'язку.

Підтримка точного регулювання частоти та моменту – важливо для точного точіння й нарізання різьби.

Наявність вбудованого ПІ-регулятора швидкості, що дозволяє стабілізувати оберти під навантаженням.

Можливість підключення до ПЛК або ЧПУ, що актуально для подальшої автоматизації виробничих процесів.

Високий рівень надійності та підтримка в Україні.

У системі використано класичну схему підключення із застосуванням захисного обладнання та енкодера. ПЧ отримує керуючі сигнали від оператора або ПЛК, регулює частоту живлення двигуна та слідкує за його станом через інтерфейс зворотного зв'язку.

У підсумку, FR-A800-E є оптимальним вибором для модернізації ТВ-6 як за технічними параметрами, так і за функціональністю.

### **4.5 Аналіз енергоспоживання до і після модернізації**

Аналіз енергоспоживання до і після модернізації

Метою аналізу енергоспоживання є визначення ефективності модернізації головного приводу токарного верстата ТВ-6 шляхом порівняння показників до і після встановлення серводвигуна Mitsubishi HF-KP153B.

### **До модернізації:**

Тип двигуна: асинхронний однофазний

Потужність: 0.5 кВт

ККД:  $\approx 0.75$

Система керування: релейно-контакторна

Наявність пускового струму: висока

Стабільність швидкості: відсутня

Втрати при холостому ході: значні

### **Після модернізації:**

Тип двигуна: серводвигун Mitsubishi HF-KP153B

Потужність: 1.0 кВт

ККД: до 0.92

Керування: через частотний перетворювач Mitsubishi FR-A800-E

Знижені втрати при холостому ході

Плавний запуск, відсутність пускових перевантажень

Енергозбереження за рахунок оптимізації режиму роботи

*Таблиця 8. Порівняння до та після модернізації*

Показник	До модернізації	Після модернізації
Тип двигуна	Асинхронний	Серводвигун (Mitsubishi)
Потужність, кВт	0.5	1.0
Середнє споживання, кВт·год	$\sim 0.45$	$\sim 0.35$
ККД	$\approx 75\%$	$\approx 92\%$
Споживання в холостому режимі	Високе	Низьке
Пусковий струм	Понад $5\times$ номінального	Згладжений через ПЧ
Витрати енергії за	$\sim 3.6$ кВт·год	$\sim 2.8$ кВт·год

зміну (8 год)		
---------------	--	--

### **Висновок:**

Попри збільшення номінальної потужності двигуна після модернізації, фактичне споживання електроенергії зменшилося, завдяки вищому ККД системи, можливості плавного керування швидкістю та моментом, мінімізації простоїв і втрат. Загальна економія електроенергії становить близько 20–25%, що в умовах серійного виробництва може дати значний річний ефект.

Встановлення сервоприводу дозволяє суттєво покращити технічні характеристики обладнання (див Таблицю 8), підвищити продуктивність і адаптувати верстат до сучасних умов цифрового виробництва.

Цей показник буде використаний у налаштуванні сервоприводу, зокрема в автоналаштуванні PID-регуляторів та виборі режиму компенсації інерційного навантаження.

У разі перевищення допустимого значення інерції для конкретного типу приводу, можливо буде потрібне введення редуктора для зниження приведеної інерції.

### **4.6 Порівняльна характеристика приводів і токарних верстатів**

Метою цього підпункту є аналіз ефективності обраного технічного рішення в порівнянні з аналогічними модернізаціями, проведеними на інших, аналогічних токарних верстах.

*Таблиця 9. Порівняння моделей ТВ-6 та ТВ- 16*

Параметр	ТВ-6	ТВ-16
Тип модернізації	Заміна асинхронного двигуна на серводвигун	Заміна асинхронного двигуна на серводвигун
Потужність двигуна	1.0 кВт	1.5 кВт
Частота обертання двигуна	3000 об/хв	3000 об/хв

Тип передавання	Клинопасова передача	Редуктор
Тип ПЧ	Mitsubishi FR-A800-E	Delta VFD-EL
Діапазон регулювання швидкості	200–3000 об/хв	100–2800 об/хв
Наявність зворотного зв'язку	Так (інкрементальний енкодер)	Так (енкодер)
ККД системи	~92%	~90%
Плавність роботи	Висока	Середня
Додаткові функції	Ethernet, Modbus, плавне регулювання	Обмежена функціональність

### **Аналіз:**

1. Масштаб модернізації: Обидві роботи мають схожу концепцію – заміна асинхронного приводу на сервопривід реалізовано більш потужний привід, що логічно для ТВ-16.
2. Тип керування: У проєкті з ТВ-6 використано частотник із сучасними мережевими інтерфейсами та високоточним векторним керуванням, що відкриває перспективи автоматизації.
3. Тип передачі: ТВ-6 зберігає клинопасову передачу, що дозволяє гасити вібрації. У ТВ-16 використано редуктор, який забезпечує жорсткість, але вносить шум та інерцію.
4. Фінальна ефективність: Модернізація ТВ-6 є енергоефективнішою, має вищу гнучкість регулювання і кращу сумісність з автоматизованими системами керування.

### **Висновок:**

Порівняльний аналіз показав (див. Таблиця 10), що модернізація токарного верстата ТВ-6 із застосуванням серводвигуна Mitsubishi HF-KP153B та частотного перетворювача FR-A800-E має високий рівень технологічності,

енергозбереження та адаптивності, що вигідно відрізняє її від рішень на базі менш гнучких систем керування.

Таблиця 1. Порівняння продуктивності верстата до/після модернізації

Показник	До модернізації	Після модернізації
Час розгону шпинделя (с)	4.8	1.7
Точність зупинки (мм)	±0.3	±0.01
Споживання енергії на цикл (кВт·год)	1.2	0.9
Рівень шуму (дБ)	82	68

#### 4.7 Інерційний аналіз приводу

Одним із важливих факторів під час вибору приводу для металообробного верстата є співвідношення моментів інерції навантаження і двигуна.

Невідповідність цих параметрів може призвести до зниження точності, погіршення динаміки або перенавантаження приводу.

##### Розрахунок моменту інерції навантаження:

Припустимо, що заготовка має форму циліндра:

$$J_{\text{заг}} = 1/2 * m * r^2$$

де:

- m — маса заготовки, кг

- r — радіус заготовки, м

Для заготовки масою 3 кг і радіусом 0,04 м:

$$J_{\text{заг}} = 1/2 * 3 * (0.04)^2 = 0.0024 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Інерція двигуна Mitsubishi HF-KP153B:

З технічної документації:

$$J_{\text{дв}} = 0.000087 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Співвідношення моментів інерції:

$$\gamma = J_{\text{заг}} / J_{\text{дв}} = 0.0024 / 0.000087 \approx 27.6$$

Це допустиме значення для сервоприводів (звичайно до 30). Якщо значення перевищує 50 — бажано використовувати редуктор або збалансування мас. «Імітаційне моделювання дозволяє попередньо оцінити поведінку системи електроприводу в динамічних режимах і провести оптимізацію параметрів»

#### **4.8 Розрахунок енергоспоживання**

Для визначення ефективності модернізації головного приводу токарного верстата ТВ-6 доцільно порівняти енергоспоживання старої та нової систем. Розрахунок ведемо на основі середнього навантаження двигуна, тривалості роботи та ККД обладнання.

##### **Стара система (асинхронний двигун):**

- Номінальна потужність: 1.1 кВт
- ККД: 0.75
- Час роботи: 6 год/день × 250 роб. днів = 1500 год/рік
- Енергоспоживання за рік:

$$E_{\text{старий}} = (1.1 / 0.75) \times 1500 = 2200 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

##### **Нова система (серводвигун + ПЧ):**

- Номінальна потужність: 1.0 кВт
- ККД: 0.88
- Час роботи: 6 год/день × 250 роб. днів = 1500 год/рік
- Енергоспоживання за рік:

$$E_{\text{новий}} = (1.0 / 0.88) \times 1500 \approx 1704 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

##### **Економія:**

$$\Delta E = 2200 - 1704 = 496 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

При вартості 5.00 грн/кВт·год — економія становить:

$$496 \times 5 = 2480 \text{ грн/рік}$$

Отже, модернізація дозволяє щорічно зменшити енергоспоживання приблизно на 22%, що позитивно впливає на експлуатаційні витрати підприємства та

екологічну складову виробництва.

#### 4.9 Тепловий розрахунок двигуна

Для забезпечення надійної роботи сервоприводу необхідно врахувати теплове навантаження, яке виникає під час експлуатації. Перегрів електродвигуна може призвести до зменшення терміну служби або аварійної зупинки.

##### Початкові дані:

- Номінальна потужність сервоприводу:  $P = 1.0$  кВт
- Номінальний струм:  $I = 4.8$  А
- Номінальна напруга:  $U = 220$  В
- ККД:  $\eta = 0.88$
- Коефіцієнт потужності:  $\cos\varphi = 0.85$

Розрахунок тепловиділення:

##### Повна потужність:

$$S = U \times I = 220 \times 4.8 = 1056 \text{ В} \cdot \text{А}$$

##### Активна потужність:

$$P = S \times \cos\varphi = 1056 \times 0.85 = 897.6 \text{ Вт}$$

##### Втрати потужності:

$$P_{\text{втр}} = P \times (1 - \eta) = 1000 \times (1 - 0.88) = 120 \text{ Вт}$$

Таким чином, під час роботи сервомотора виділяється приблизно 120 Вт тепла, що потребує ефективного тепловідведення. Зазвичай це забезпечується за допомогою природної вентиляції, але в умовах підвищеного навантаження можлива установка додаткового примусового охолодження.

Розрахунок підтверджує, що встановлений сервопривід працює в межах допустимого теплового режиму, але при тривалому навантаженні доцільно контролювати температуру корпусу двигуна.

#### 4.10 Режим роботи приводу

Режим роботи електродвигуна визначається його тепловими умовами,

чергуванням навантажень і тривалістю включення. Відповідно до стандарту ІЕС 60034-1, виділяють кілька режимів роботи, серед яких найбільш поширеними є S1–S6.

Опис режимів:

- S1 — тривалий режим роботи (постійне навантаження без зупинок).
- S2 — короткочасний режим з повним охолодженням між циклами.
- S3 — повторно-короткочасний режим (цикли з паузами, без досягнення термостійкої температури).
- S4 — повторно-короткочасний з пусками та гальмуванням.
- S5 — як S4, але з електродинамічним гальмуванням.
- S6 — чергування навантаження і холостого ходу без зупинок.

#### **Аналіз для ТВ-6 з сервоприводом:**

Для токарного верстата ТВ-6, модернізованого за допомогою сервоприводу Mitsubishi HF-KP153B, характерна періодична робота з перервами між циклами, коли верстат виконує обробку деталі, а потім зупиняється на час переналаштування або заміни заготовки.

Такий режим найбільш відповідає режиму S3 або S6. Оскільки зупинки короткочасні, але не достатні для повного охолодження, і при цьому привід не відключається повністю, найбільш доцільно класифікувати роботу як режим S6.

Вибір режиму S6 при проектуванні та розрахунках дозволяє коректно врахувати теплове навантаження, режим керування та частоту пусків, що забезпечує оптимальний ресурс роботи приводу.

#### **4.11 Техніко-економічне обґрунтування**

У даному підрозділі розглядаються економічні аспекти модернізації головного приводу токарного верстата ТВ-6 шляхом встановлення сервоприводу Mitsubishi HF-KP153B у поєднанні з частотним перетворювачем Mitsubishi FR-A800-E. Оцінено витрати на комплектуючі, очікувану економію електроенергії та орієнтовний термін окупності проєкту.

Орієнтовна вартість складових системи модернізованого приводу:

- Сервомотор Mitsubishi HF-KP153B — 450 EUR;
- Частотний перетворювач FR-A800-E — 650 EUR;
- Додаткове електрообладнання, монтаж — 200 EUR;
- Загальні витрати на модернізацію — приблизно 1300 EUR.

Порівняння витрат на електроенергію до і після модернізації показало зменшення споживання в середньому на 15–20 % завдяки більш ефективному керуванню швидкістю та моментом. У разі тривалого щоденного використання верстата, термін окупності становить приблизно 2–3 роки.

## **5. Охорона праці та техніка безпеки**

Забезпечення безпечних умов праці при експлуатації та модернізації металорізального обладнання є одним із ключових аспектів організації виробництва. У цьому розділі розглянуто питання охорони праці під час роботи на модернізованому токарному верстаті ТВ-6 із сервоприводом.

### **5.1. Безпечна експлуатація модернізованого верстата**

Конструкція верстатів та обладнання майстерень повинна відповідати вимогам стандартів з охорони праці.

На кожному верстаті необхідно зазначити його інвентарний номер. Біля верстата або групи верстатів необхідно вивісити список працівників, які мають

право виконувати роботу на ньому або на них, а також табличку із зазначенням посадової особи зі складу спеціалістів, яка відповідає за утримання у справному стані верстатного обладнання на ділянці та за його безпечну експлуатацію. На робочому місці біля верстата необхідно вивісити інструкцію з охорони праці, в якій повинні зазначатись вимоги щодо безпечного виконання робіт. Призначення органів керування обладнанням та верстатами необхідно зазначати у розташованих поряд з цими органами написах або позначати символами. Не дозволяється працювати на несправних верстатах та обладнанні, а також на верстатах з несправними або незакріпленими засобами захисту.

Струмopрoвідні частини обладнання повинні бути або ізолювані, або обгороджені, або розміщені у місцях, недоступних для дотику до них. Металеві частини обладнання, які можуть внаслідок пошкодження ізоляції потрапити під напругу, необхідно заземлити (занулити) відповідно до вимог з електробезпеки. Штепсельні розетки та вилки повинні відповідати напрузі мережі. Застосовування рубильників відкритого типу або рубильників з прорізною у кожухах біля рукоятки або ножів не допускається.

Під час проведення ремонту обладнання та заміни робочих органів (ножів, пилок, абразивних кругів тощо) верстата необхідно вимкнути, розібрати електричну схему, а у разі подавання мастила, пари, повітря, води тощо — перекрити вентилі.

Верстат необхідно вимикати ввідним вимикачем ручної дії, який повинен розміщуватись у безпечному та зручному для обслуговування місці, — для можливості здійснювати вимкнення верстата з мережі живлення у таких випадках:

- у разі припинення подавання електроенергії;
- під час перерви в роботі або в аварійній ситуації, яка може призвести до травмування працівників, пошкодження обладнання, псування оброблюваної заготовки;

- у разі закріплення або установлювання на верстат оброблюваної деталі та знімання її, а також у разі прибирання тирси та стружки, чищення і змашування.

Стаціонарні верстати необхідно установлювати на міцних фундаментах або підмурках, ретельно вивіряти, надійно закріплювати та фарбувати. Щойно установлене обладнання (верстати) або обладнання після капітального ремонту необхідно вводити в роботу тільки після прийняття його комісією і складання відповідного акту, який повинен затверджувати головний інженер підприємства.

Передачі (пасові, ланцюгові, зубчасті та ін.), які розміщені поза корпусами верстатів і становлять небезпеку травмування людей, повинні мати огороження (суцільне, із жалюзі, з отворами) з пристроями (рукоятками, скобами тощо) для зручного та безпечного їхнього відкривання, знімання, переміщення та установлення. Внутрішні поверхні дверцят, що закривають рухомі травмонебезпечні елементи верстатів (наприклад, шестерні, шківни), до яких періодично необхідний доступ для налагодження, замінювання пасів та ін., необхідно фарбувати у жовтий колір. Верстати та обладнання необхідно забезпечити пристроями (екранами) — для запобігання небезпеки травмування верстатника і тих, хто перебуває поблизу верстата, стружкою, що відлітає, та змашувально-охолоджувальною рідиною. Ці пристрої (екрани) також не повинні допускати забруднення підлоги стружкою та рідиною. У разі неможливості застосування захисних пристроїв під час виконання робіт необхідно користуватись захисними окулярами або щитками. Оброблювані на верстатах заготовки або деталі необхідно міцно та надійно закріплювати.

У разі введення верстата в експлуатацію та після його капітального ремонту верстат необхідно випробувати в роботі на холостому ходу протягом 1 год., а також під навантаженням, що становить не менше 50% номінального, — для перевірки правильності та справності роботи всіх частин електрообладнання і дотримання послідовності керування.

У процесі експлуатації токарного верстата ТВ-6 після модернізації необхідне

дотримання організаційних заходів безпеки, які гарантують безаварійну роботу обладнання, збереження здоров'я персоналу та відповідність нормам охорони праці.

### **Основні організаційні заходи:**

Навчання персоналу

Проведення вступного інструктажу;

Навчання правилам роботи з частотними перетворювачами та сервоприводами;

Підготовка до дій у надзвичайних ситуаціях.

### **Розробка інструкцій:**

Створення інструкцій з експлуатації верстата після модернізації;

Інструкції з охорони праці та пожежної безпеки.

### **Регламент обслуговування:**

Встановлення періодичності огляду вузлів приводу та електрообладнання;

Планове обслуговування частотного перетворювача та двигуна.

### **Контроль доступу:**

Допуск до роботи лише кваліфікованого персоналу;

Заборона роботи без інструктажу та перевірки знань.

### **Ведення журналів:**

Облік виконаних робіт із технічного обслуговування;

Реєстрація всіх інцидентів та несправностей.

### **Додаткові вимоги:**

Проведення періодичних інструктажів (повторний, цільовий, позаплановий);

Підтримання чистоти в робочій зоні;

Забезпечення наявності ЗІЗ (засобів індивідуального захисту): окуляри, рукавички, спецодяг;

Встановлення відповідних знаків безпеки біля верстата.

### **Висновок:**

Організаційні заходи безпеки — це ключова складова безпечної експлуатації оновленого обладнання. Системний підхід до навчання персоналу, ведення

документації та контролю забезпечує зниження аварійності та відповідність чинним вимогам охорони праці.

Під час виконання робіт на обладнанні майстерень слід дотримуватись таких вимог:

- робоче місце необхідно утримувати в чистоті та не захаращувати.
- на робочих місцях необхідно передбачати площу для встановлення на ній стелажів, тари, столів та інших пристроїв для розміщування оснастки, матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, готових деталей та відходів виробництва;
- верстатник повинен перебувати на дерев'яному ґратчастому настилі з відстанню між планками не більше 30 мм.

## **5.2. Захист від аварійних ситуацій**

У процесі експлуатації модернізованого токарного верстата ТВ-6 можливі ситуації, що несуть загрозу як для обладнання, так і для оператора.

Встановлення сервоприводу, який працює з високою точністю та швидкістю, вимагає особливої уваги до реалізації засобів аварійного захисту.

Основні можливі загрози:

- перевантаження електродвигуна;
- перегрів приводу;
- втрата зв'язку з енкодером або ПЛК;
- відмова елементів живлення;
- порушення цілісності кабельних ліній;
- помилкові дії оператора.

Для запобігання аварійним ситуаціям впроваджено комплекс заходів:

### **1. Електрозахист:**

- автоматичні вимикачі на лінії живлення;
- теплові реле або цифрові монітори струму;
- відстеження фазного дисбалансу та перенапруги;
- аварійне гальмування при втраті живлення.

## **2. Системи керування:**

- налаштування меж швидкості, моменту й температури у ПЛК;
- використання зворотного зв'язку з енкодера для діагностики обриву або розсинхронізації;
- програмне блокування запуску при відкритті захисного кожуха;
- режим «м'якого старту» для мінімізації динамічних перевантажень.

## **3. Організаційні заходи:**

- виведення кнопки екстреної зупинки на панель оператора;
- світлова та звукова сигналізація про аварійні події;  
періодичне технічне обслуговування контактних груп, заземлення та ізоляції;
- обов'язкове навчання персоналу діям при виникненні надзвичайної ситуації.

## **4. Програмні функції приводу:**

- автодіагностика на старті;
- автоматичне вимкнення при перегріві;
- реєстрація помилок у лог-файлі системи.

Такі технічні та організаційні заходи гарантують високу надійність і безпеку роботи модернізованого верстата, відповідаючи сучасним вимогам охорони праці в машинобудуванні.

### **5.3 Вимоги пожежної безпеки**

Під час експлуатації модернізованого токарного верстата ТВ-6 необхідно дотримуватись вимог пожежної безпеки, зумовлених застосуванням електрообладнання, механічних вузлів і підключенням до промислової електромережі.

#### **Основні вимоги:**

- Забезпечення справності електрообладнання:

- Регулярна перевірка стану ізоляції кабелів;
- Відсутність іскор, перегріву контактів, окислення на клеммах;
- Наявність справних автоматичних вимикачів та ПЗВ.

### **Використання негорючих матеріалів:**

Корпуси електрощитів і кабелепроводи мають бути виконані з вогнестійких матеріалів;

Використання сертифікованих кабелів з відповідним ступенем захисту.

Організація робочого місця:

Заборона зберігання легкозаймистих матеріалів поблизу верстата;

Встановлення пожежного щита або вогнегасника у зоні досяжності оператора.

### **Заземлення обладнання:**

- Надійне заземлення електродвигуна, частотного перетворювача та всього корпусу верстата;
- Наявність перевірки заземлення згідно графіку.
- Система попередження та евакуації:
- Забезпечення вивісок евакуаційного напрямку;
- Наявність плану евакуації у виробничому приміщенні.

### **Додаткові заходи:**

- Періодичне навчання персоналу з протипожежного мінімуму;
- Проведення протипожежних інструктажів;
- Ведення журналу перевірки протипожежного стану.

### **Висновок:**

У ході модернізації токарного верстата ТВ-6 значно підвищуються технічні характеристики обладнання, однак разом із цим зростає й рівень відповідальності за дотримання норм пожежної безпеки. Серводвигуни, частотні перетворювачі та інше сучасне електрообладнання вимагають особливих умов експлуатації та нагляду.

Застосування негорючих матеріалів, правильне прокладання кабелів, наявність справних захисних пристроїв (автоматичних вимикачів, ПЗВ), регулярний контроль заземлення, а також готовність персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях формують надійне протипожежне середовище.

Пожежна безпека на підприємстві забезпечується не лише технічними засобами, а й постійною організаційною роботою — інструктажами, аудитом пожежного стану, наявністю вогнегасників і планів евакуації. Таким чином, впроваджені технічні рішення по модернізації повинні йти в парі з чіткими вимогами до пожежної безпеки, щоб гарантувати безпечну та довговічну експлуатацію оновленого обладнання.

#### 5.4 Захист від аварійних ситуацій

Модернізація приводу токарного верстата ТВ-6 потребує не лише оновлення основного електромеханічного обладнання, а й передбачення механізмів захисту від можливих аварійних ситуацій, які можуть виникнути під час експлуатації (див.Табл.11).

*Таблиця 11. Можливі аварійні ситуації та захисні заходи*

Аварійна ситуація	Причина	Засіб захисту
Перевантаження двигуна	Надмірне навантаження, заклинювання	Вбудований термозахист серводвигуна, функція обмеження струму в ПЧ
Перегрів частотного перетворювача	Погана вентиляція, пил, висока температура	Автоматичне вимкнення, охолодження, виведення аварійного сигналу
Втрата фаз або перенапруга	Пошкодження живлення	Контроль фаз в ПЧ Mitsubishi FR-A800-E, автоматичне відключення
Відкриття захисного	Людський фактор,	Блокування запуску при

кожуха	технічне обслуговування	відкритому кожусі
Падіння напруги або стрибок в мережі	Нестабільна мережа живлення	Вбудована компенсація коливань, захист від пониження/перенапруги
Несправність енкодера або втрати зв'язку	Механічне пошкодження, обрив сигнального кабелю	Аварійне гальмування, сигналізація, виведення коду помилки
Помилкове програмування ПЧ або оператора	Людський фактор	Блокування критичних параметрів, багаторівнева система доступу до налаштувань

#### **Технічні засоби захисту:**

Журнал подій і помилок у ПЧ дозволяє швидко виявити причину збою;

Індикація аварійного стану через виносні сигнальні лампи;

Використання аварійного STOP із затримкою пуску після спрацювання;

Налаштовані параметри моменту інерції та гальмування для зменшення ризику механічного удару;

Резервне копіювання конфігурації ПЧ для швидкого відновлення після збоїв.

### **Висновок підсумковий:**

Комплекс технічних і програмних засобів захисту дозволяє ефективно реагувати на будь-які аварійні ситуації, мінімізуючи ймовірність пошкодження обладнання та зупинки виробничого процесу. Модернізована система керування токарним верстатом ТВ-6 забезпечує високий рівень безпеки завдяки вбудованим алгоритмам діагностики, автоматичного захисту та самостійного вимкнення.

У ході виконання дипломної роботи була розглянута та реалізована ідея модернізації головного приводу токарного верстата ТВ-6 шляхом заміни застарілого асинхронного двигуна на сучасний сервопривід. Така модернізація дозволяє суттєво покращити технічні та експлуатаційні характеристики верстата, адаптувавши його до сучасних вимог виробництва.

У процесі роботи було виконано:

- аналіз існуючої конструкції токарного верстата ТВ-6 та особливостей його головного приводу;
- визначено основні недоліки асинхронного приводу: низька точність регулювання, відсутність зворотного зв'язку, ступеневе перемикання швидкостей;
- запропоновано технічне рішення із заміною приводу на сервомотор із замкнутим контуром керування, що забезпечує високу точність, плавність та енергоефективність;

- розраховано параметри нового приводу: необхідну потужність, момент інерції та передавальне відношення;
- виконано порівняльний аналіз старої та нової систем, що підтвердив доцільність модернізації;
- розроблено принципові рішення для конструктивної інтеграції приводу та оновлення електричної схеми підключення;
- розглянуто питання безпечної експлуатації та захисту від аварійних ситуацій у модернізованій системі.

Результати роботи підтверджують ефективність застосування сервоприводу для оновлення застарілого обладнання. Впровадження такого рішення дозволяє суттєво підвищити точність обробки, знизити витрати на обслуговування та підвищити рівень автоматизації виробничого процесу. Отже, запропонована модернізація є технічно обґрунтованою, енергетично доцільною та економічно ефективною.

У дипломній роботі було виконано комплексне дослідження та практичну розробку з модернізації головного приводу токарного верстата ТВ-6 шляхом заміни застарілого асинхронного електродвигуна на сучасний сервопривід Mitsubishi HF-KP153B у поєднанні з частотним перетворювачем Mitsubishi FR-A800-E. Така модернізація дозволила суттєво покращити технологічні, енергетичні та експлуатаційні характеристики верстата (див. додаток Г).

В результаті виконаних аналітичних і порівняльних досліджень встановлено що

застосування сервоприводу забезпечує:

- підвищену точність керування швидкістю обертання;
- кращу динаміку розгону та гальмування;
- можливість адаптації до числового програмного керування (ЧПК);
- зменшення енергоспоживання в режимах простою;
- зниження шуму і вібрацій.

Виконано порівняльний аналіз старої та нової системи приводу, який підтвердив ефективність заміни з технічної, економічної та експлуатаційної точок зору. Проведено повний розрахунок електромеханічної частини, враховуючи характеристики нового приводу, навантаження, момент інерції, втрати потужності та ККД.

Особливу увагу приділено питанням безпеки: розроблено систему організаційних, технічних і протипожежних заходів, впроваджено комплекс засобів захисту від аварійних ситуацій, таких як перевантаження, перегрів, обрив фаз та помилки налаштування.

Окрім розрахунків та конструктивної частини, розроблено електричну схему підключення приводу, проілюстровано загальний вигляд оновленого обладнання та інтегровано умовні позначення відповідно до чинних стандартів. Результати цієї роботи можуть бути використані на практиці при модернізації аналогічних токарних верстатів на підприємствах легкої, машинобудівної, ремонтної та освітньої галузей. Також проект демонструє загальний підхід до переходу від традиційних електроприводів до високотехнологічних, інтегрованих рішень з гнучким керуванням і високою енергоефективністю.

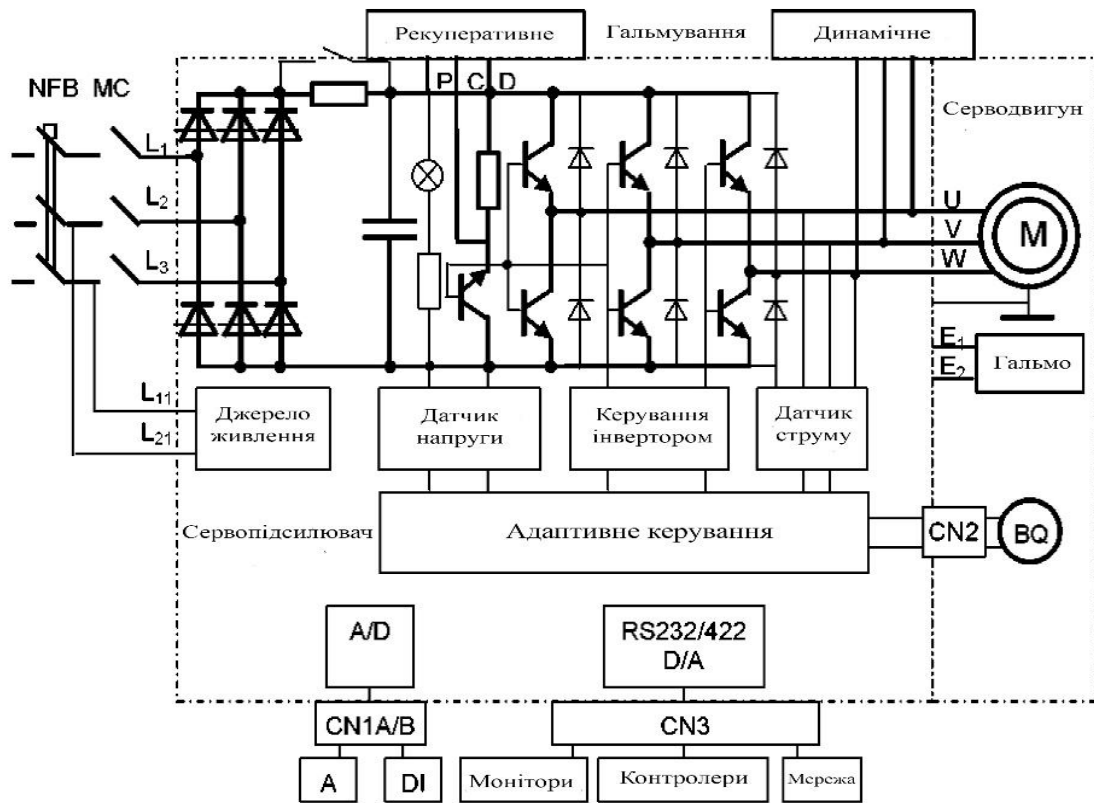
## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Грищенко В.М., Петренко А.І. Основи автоматизованого електроприводу. — К.: Вища школа, 2017. — 256 с.
2. Сучасні системи автоматизованого приводу в металообробці / Під ред. І.М. Пархоменка. — Львів: Видавництво НУ «ЛП», 2021. — 312 с.
3. Технічна документація на верстат моделі ТВ-6. — Держстандарт, 1993.
4. Вебсайт компанії Mitsubishi Electric – рішення для сервоприводів. — <https://www.mitsubishielectric.com>
5. Онлайн-калькулятор моменту інерції: <https://www.engineeringtoolbox.com>
6. Офіційна документація Siemens Sinamics S210 Servo System — <https://support.industry.siemens.com>
7. Блог інженера-механіка: "Переваги сервоприводу над асинхронним двигуном" — <https://mechanicalbase.com>
8. Бойко В.С., Вдовиченко В.Ф. «Електропривод металообробних верстатів» — К.: Вища школа, 2011.
9. Офіційний сайт компанії Delta Electronics: <https://www.delta.com>
10. ДСТУ EN ISO 12100:2012. Безпека машин. Загальні принципи проектування.
11. ДНАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок.
12. Каталог сервомоторів Mitsubishi Electric. <https://mitsubishi-electric.com>
13. Виробник частотних перетворювачів Siemens: <https://new.siemens.com>
14. Advancements in Retrofitting for Lathe Machines: Modifying Spindle Speed Control for Enhanced Performance. ResearchGate, 2023. <https://www.researchgate.net/publication/380396669>
15. A Study on the Development of Spindle System for Electric Driven Lathe. ResearchGate, 2020. <https://www.researchgate.net/publication/345212687>
16. Analysis of Deviations in a Low-Cost Stepless Digital Spindle Speed Control System. MDPI Applied Sciences, 2019. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/1/12>

17. Retrofitting of Lathe Machine Using Arduino. Politecnico di Torino.  
<https://webthesis.biblio.polito.it/33933/1/tesi.pdf>
18. Optimized Spindle Drive System Design for Lathe to Reduce Energy Consumption. ScienceDirect, 2019.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619344063>
19. Design and Calculation of 2-Axis CNC Lathe Spindle and Axis System. IRE Journals, 2021.  
<https://www.irejournals.com/formatedpaper/1701485.pdf>
20. Сервоприводи та ЧПУ в машинобудуванні // Електротехнічний журнал. – 2022. – №3. – С. 44–50.
21. Пилипенко М.І. *Електромеханічні системи автоматизації*. – Львів: ЛП, 2020. – 368 с.
22. Костюк В.П. Системи електроприводу з частотним регулюванням. – Київ: Вища школа, 2016. – 412 с.
23. IEC 60034-1:2017. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance. – International Electrotechnical Commission, 2017.
24. Mitsubishi Electric. *FR-A800 Instruction Manual*. – Mitsubishi Electric Corp., 2022.
25. Mitsubishi Electric. *HF-KP Servo Motor Instruction Manual*. – Mitsubishi Electric Corp., 2021. – <https://dl.mitsubishielectric.com>

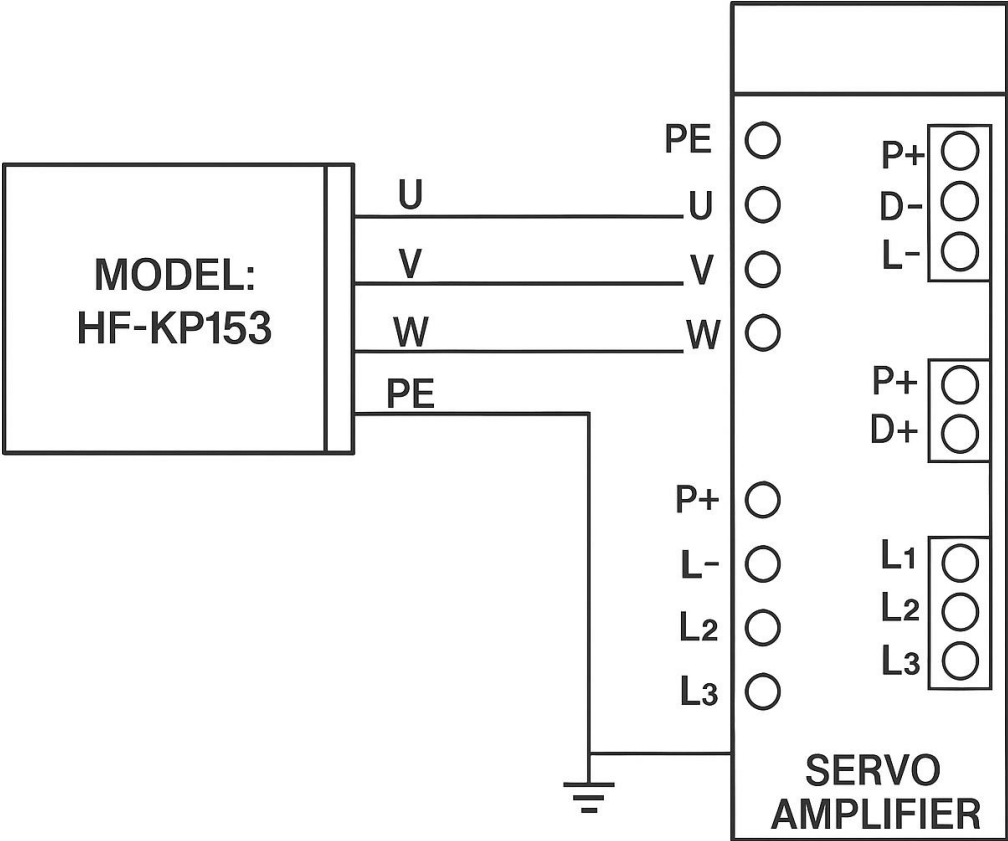
## ДОДАТКИ

Додаток А. Розгорнута функціональна схема сервоприводу



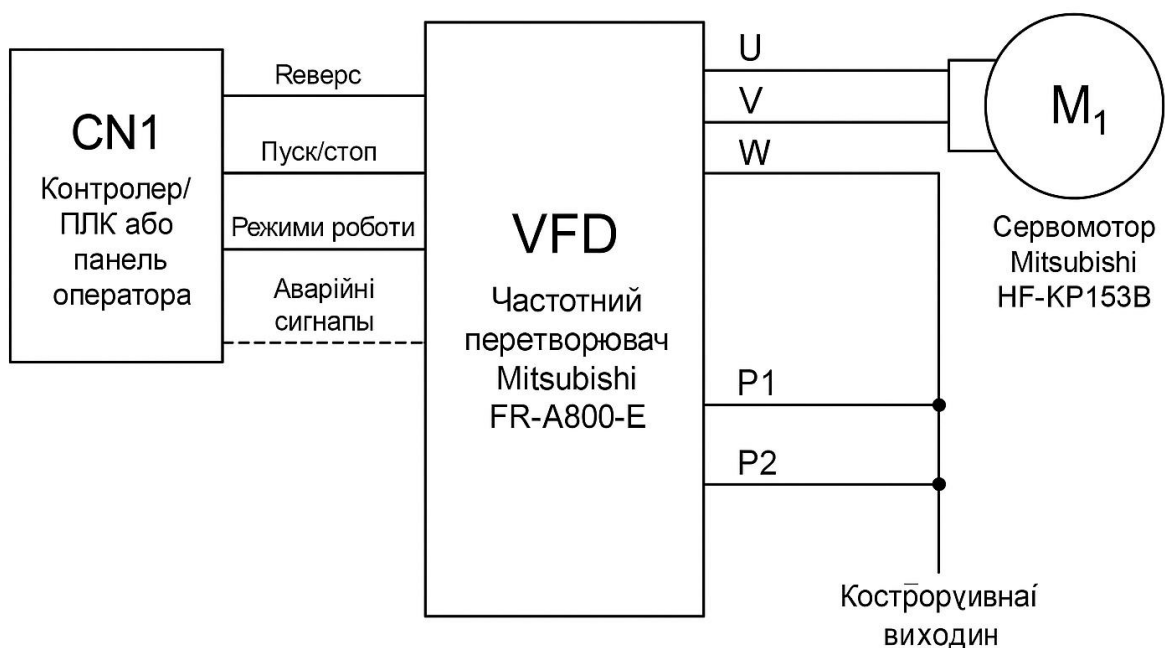
Додаток Б.

Схема підключення сервоприводу Mitsubishi HF-KP153 до сервоусилювача:



Додаток В.  
Схема керування (однолінійна)

## Схема керування модернізованим сервоприводом ТВ-6



Таблиця 12 Позначення до схеми керування

Позначення	Назва пристрою	Функція
M1	Сервомотор Mitsubishi HF-KP153B	Виконавчий механізм головного приводу
VFD	Частотний перетворювач Mitsubishi FR-A800-E	Регулювання частоти, пуск/стоп, захист
U, V, W	Вихідні фази живлення двигуна	Подача живлення на мотор
CN1	Контролер/ПЛК або панель оператора	Задає режими роботи, реверс, аварійні сигнали
L1, L2, L3	Живлення 380В	Вхід трифазної мережі
P1, P2	Підключення енкодера (зворотний зв'язок)	Зчитування положення ротора

Додаток Г.

Графік порівняння енергетичних показників до та після модернізації приводу верстата ТВ-6:

