

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут  
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації  
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерні технології та робототехніка»  
Форма навчання Денна

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Лебедя Олега Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація металургійного виробництва. Модернізація системи  
керування карусельним верстатом 1Л532 в умовах електроремонтного цеху  
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

(повна назва теми)

за матеріалами з електроремонтного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

ДОЦЕНТ, К.П.Н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Модло Є.О.

(прізвище, ініціали)

**Робота допущена до захисту в ЕК**

Протокол засідання кафедри

від 15.01. 2026 р. № 6

Завідувач кафедри

(підпис)

ДОЦЕНТ, К.П.Н.

Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло

Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерні технології та  
робототехніка»

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 року

## ЗАВДАННЯ

### НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Лебедю Олегу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи Автоматизація металургійного  
виробництва. Модернізація системи керування карусельним верстатом 1Л532 в  
умовах електроремонтного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»  
керівник випускної роботи Модлю Євгеній Олександрович, доцент, к.п.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» жовтня 2025 року  
№ 727-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи  
12.01.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи: Об'єкт автоматизації -  
головний привод токарно-карусельного верстата 1Л532 в електроремонтному  
цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Технічні параметри: потужність  
двигуна - 55 кВт, номінальна швидкість - 1460 об/хв, діапазон регулювання  
швидкості - 30:1, похибка підтримки швидкості -  $\leq \pm 2\%$ , умови експлуатації - від  
+5 до +40 °С. Вимоги: усунути зношену механічну коробку передач, забезпечити  
безступінчасте регулювання швидкості, мінімізувати капітальні витрати,  
підвищити надійність і точність  
керування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити 4.1. Аналітична частина: Аналіз існуючої системи керування  
головним приводом із зношеною коробкою передач. Обґрунтування вимог до  
нового приводу. Розробка та порівняння трьох технічних варіантів модернізації.  
4.2. Основна частина: Вибір компонентів системи керування (двигун Д-810,  
ТСУ-2, енкодер, датчик струму, ПЛК, НМІ). Розрахунок періоду опитування  
датчиків та допустимої похибки. Розробка алгоритму керування з ПІ-

регулятором. Економічне обґрунтування ефективності модернізації. Оцінка заходів з охорони праці, пожежної та екологічної безпеки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
 ВРМ.174.727-ст.06.Е0.1 – Технічні параметри запропонованих варіантів;  
 ВРМ.174.727-ст.06.Е2 – Функціональна схема головного привода; ВРМ.174.727-ст.06.Е1 – Структурна схема головного привода; ВРМ.174.727-ст.06.Е5 – Схема підключення апаратних засобів; ВРМ.174.727-ст.06.Е0 – Алгоритм роботи контролера;  
 ВРМ.174.727-ст.06.Е0 – Техніко-економічні показники

#### 6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                    |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Аналітична частина | Модло Є.О.                                | 20.10.2025     | 20.10.2025       |
| Основна частина    | Модло Є.О.                                | 20.10.2025     | 20.10.2025       |
|                    |                                           |                |                  |
|                    |                                           |                |                  |
|                    |                                           |                |                  |
|                    |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання 20.10.2025

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів випускної роботи    | Строк виконання етапів випускної роботи | Примітка |
|-------|----------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 1.    | Аналітична частина               | 28.11.2025                              |          |
| 2.    | Основна частина                  | 25.12.2025                              |          |
| 3.    | Оформлення пояснювальної записки | 29.12.2025                              |          |
| 4.    | Виконання графічної частини      | 05.01.2026                              |          |
| 5.    | Подання роботи до кафедри        | 12.01.2026                              |          |
| 6.    | Захист роботи в ЕК               | 21.01.2026                              |          |

Студент

( підпис )

Лебідь О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

( підпис )

ініціали)

Модло Є.О.

(прізвище та

| № рядка         | Формат      | Позначення                    | Назва                | Кіл. листів | № екз.                                                                                                                                                                                                         | Прим. |
|-----------------|-------------|-------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1               | A3          | <i>BPM.174.727-см.06.E0.1</i> | Технічні параметри   | 1           |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 2               |             |                               | запропонованих       |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 3               |             |                               | варіантів            |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 4               |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 5               | A3          | <i>BPM.174.727-см.06.E2</i>   | Функціональна схема  | 1           |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 6               |             |                               | головного            |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 7               |             |                               | привода              |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 8               |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 9               | A3          | <i>BPM.174.727-см.06.E1</i>   | Структурна схема     | 1           |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 10              |             |                               | головного привода    |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 11              |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 12              | A3          | <i>BPM.174.727-см.06.E5</i>   | Схема підключення    | 1           |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 13              |             |                               | апаратних засобів    |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 14              |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 15              | A3          | <i>BPM.174.727-см.06.E0</i>   | Алгоритм роботи      | 1           |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 16              |             |                               | контролера           |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 17              |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 18              | A3          | <i>BPM.174.727-см.06.ТЕП</i>  | Техніко-економічні   | 1           |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 19              |             |                               | показники            |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 20              |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 21              | A4          | <i>BPM.174.727-см.06.ПЗ</i>   | Пояснювальна записка | 62          |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 22              |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| 23              |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
|                 |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
|                 |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
|                 |             |                               |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| <i>Зм.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ документа</i>            | <i>Підпис</i>        | <i>Дата</i> | <b><i>BPM.174.727-см.06.ВР</i></b><br><br>Автоматизація металургійного виробництва. Модернізація системи керування карусельним верстатом 1Л532 в умовах електроремонтного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». |       |
| <i>Розроб.</i>  |             | <i>Лебідь О. С.</i>           |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| <i>Пров.</i>    |             | <i>Модло Є.О.</i>             |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| <i>Н.контр.</i> |             | <i>Модло Є.О.</i>             |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
| <i>Затв.</i>    |             | <i>Модло Є.О.</i>             |                      |             |                                                                                                                                                                                                                |       |
|                 |             |                               |                      |             | <i>Літера</i><br>4                                                                                                                                                                                             |       |
|                 |             |                               |                      |             | <i>Аркуш</i><br>1                                                                                                                                                                                              |       |
|                 |             |                               |                      |             | <i>Аркушів</i><br>1                                                                                                                                                                                            |       |
|                 |             |                               |                      |             | <b><i>Відомість роботи</i></b>                                                                                                                                                                                 |       |
|                 |             |                               |                      |             | ННТІ ДУЕТ<br>Каф.ЕІА<br>гр. АВ-24м                                                                                                                                                                             |       |

## РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота магістра: 62 с., 12 рис., 15 табл., 23 джерела.

Метою роботи є модернізація головного приводу токарно-карусельного верстата моделі 1Л532, що експлуатується в електроремонтному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», з метою усунення зношеної механічної коробки передач і забезпечення безступінчастого регулювання швидкості обертання планшайби. Розглянуто три технічні варіанти реалізації регульованого електроприводу: на основі асинхронного двигуна з частотним перетворювачем, двигуна постійного струму з тиристорним перетворювачем КТЕ-100/220 та двигуна постійного струму з тиристорним регулятором напруги ТСУ-2.

На основі техніко-економічного аналізу обрано найбільш економічно доцільний варіант – модернізація з використанням тиристорного регулятора напруги ТСУ-2 та двигуна постійного струму Д-810. Запропоновано структуру мікропроцесорної системи керування на базі сучасного програмованого логічного контролера І-8088 з підтримкою протоколу Modbus TCP.

Розроблено алгоритм керування приводом, що передбачає завдання швидкості, контроль струму та швидкості, стабілізацію режимів роботи, а також програмну діагностику аварійних ситуацій.

Реалізація запропонованого рішення дозволить не лише усунути постійні простої через несправність коробки передач (на 36 год/рік), але й забезпечити плавне регулювання швидкості в діапазоні 30:1 з похибкою не більше 0,2 %, що значно перевищує вимоги сучасних стандартів до точності та надійності металообробного обладнання.

*Ключові слова:* автоматизація, верстат токарно-карусельний, датчик швидкості, модернізація, привод регульований, програмований логічний контролер, тиристорний регулятор.

## ЗМІСТ

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                       | 8  |
| 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....                                                                        | 10 |
| 1.1 Вимоги до керування й до устаткування .....                                                   | 10 |
| 1.2 Вимоги до привода карусельного верстата 1Л532 .....                                           | 13 |
| 1.3 Вибір і розрахунки силового встаткування .....                                                | 14 |
| 1.4 Економічне порівняння запропонованих варіантів .....                                          | 23 |
| 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....                                                                            | 26 |
| 2.1 Призначення та склад системи .....                                                            | 26 |
| 2.2 Розрахунки необхідного періоду знімання (обробки) сигналів і припустимої похибки виміру ..... | 31 |
| 2.3 Вибір датчика швидкості.....                                                                  | 32 |
| 2.4 Вибір контролера та модулів введення-виведення та гальванічної розв'язки .....                | 38 |
| 2.5 Розробка алгоритму керування приводом токарно-карусельного верстата .                         | 45 |
| 2.5.1 Етап ініціалізації системи.....                                                             | 45 |
| 2.5.2 Введення завдання швидкості.....                                                            | 47 |
| 2.5.3 Вимірювання фактичної швидкості обертання.....                                              | 47 |
| 2.5.4 Розрахунок похибки регулювання .....                                                        | 48 |
| 2.5.5 Формування керуючого впливу .....                                                           | 48 |
| 2.5.6 Робота тиристорного регулятора ТСУ-2 та двигуна Д-810 .....                                 | 48 |
| 2.5.7 Контроль струму та діагностика аварій .....                                                 | 49 |
| 2.5.8 Замкнений контур регулювання .....                                                          | 49 |
| 2.6 Економічне обґрунтування доцільності модернізації .....                                       | 50 |
| 2.6.1 Розрахунок втрат від простоїв верстата.....                                                 | 50 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.2 Витрати на ремонт коробки передач.....                                   | 51 |
| 2.6.3 Кошторис капітальних витрат .....                                        | 51 |
| 2.6.4 Розрахунок амортизації .....                                             | 52 |
| 2.6.5 Розрахунок експлуатаційних витрат .....                                  | 53 |
| 2.6.6 Економія електроенергії.....                                             | 53 |
| 2.6.7 Екологічний ефект у грошовому еквіваленті.....                           | 54 |
| 2.6.8 Загальна річна економія .....                                            | 54 |
| 2.7 Охорона праці.....                                                         | 56 |
| 2.7.1 Аналіз небезпечних факторів.....                                         | 56 |
| 2.7.2 Заходи з усунення небезпечних факторів.....                              | 57 |
| 2.7.3 Організація засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та медичних оглядів .. | 57 |
| 2.7.4 Пожежна безпека.....                                                     | 58 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                  | 60 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                                         | 62 |

## ВСТУП

Електроремонтний цех здійснює ремонт електрообладнання, що експлуатується на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Для обробки корпусів електродвигунів та виробів з чорних металів використовується спеціальний двоколонний токарно-карусельний верстат моделі 1Л532.

Регулювання швидкості головного приводу цього верстата зараз здійснюється за допомогою механічної коробки передач. Обертальний момент передається від асинхронного двигуна через коробку передач на виконавчий механізм, а зміна швидкості відбувається ступінчато (шляхом перемикання передач). Наразі коробка передач фізично зношена, що призводить до необхідності її частого ремонту – приблизно раз на місяць. Коробка передач російського виробництва, її заміна потребує значних капітальних вкладень.

Метою випускної роботи є модернізація головного приводу верстата шляхом заміни на регульований електропривод із мінімальними витратами та усунення необхідності ступінчастого регулювання швидкості через коробку передач.

Для вирішення поставленої задачі запропоновано три варіанти реалізації:

1. Привод змінного струму. Регулювання швидкості асинхронного двигуна здійснюється за допомогою транзисторного частотного перетворювача (наприклад, SINAMICS G120 від Siemens).

2. Привод постійного струму. Асинхронний двигун замінюється двигуном постійного струму. Регулювання частоти обертання виконується шляхом зміни напруги на якорі від тиристорного перетворювача типу КТЕ-100/220, що містить анодний реактор, а також регулятори швидкості та струму.

3. Привод постійного струму з тиристорним регулятором. Асинхронний двигун замінюється двигуном постійного струму. Регулювання частоти обертання здійснюється шляхом зміни випрямленої напруги на якорі від тиристорного регулятора напруги типу ТСУ-2.

У всіх варіантах для управління режимами роботи та контролю технологічних параметрів передбачається використання сучасного програмованого логічного контролера I-8088, а для відображення інформації — кольорового сенсорного HMI-дисплея Weintek cMT-X3072 з підтримкою промислового протоколу Modbus TCP. Вимірювання швидкості та струму буде здійснюватися за допомогою сучасних датчиків: інкрементального енкодера Omron E6B2-CWZ6C-500 та датчика струму LEM LTS 300-NP відповідно. Живлення системи керування забезпечуватиметься надійним джерелом Mean Well RS-50-24.

Після техніко-економічного аналізу обрано третій варіант (привод постійного струму з ТСУ-2) як найбільш економічно доцільний і технічно реалізовний для умов електроремонтного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Вимоги до керування й до устаткування

Значна потужність електродвигуна головного привода, висока твердість базових деталей і достатня міцність усіх елементів кінематичному ланцюга в комбінації із широкими діапазонами регулювання чисел оборотів планшайби й величин подач дозволяють вести на верстатах високопродуктивну роботу на швидкісних режимах різання [1]. Для регулювання швидкості головного привода токарно-карусельного верстата використовується механічна коробка передач. Обертаючий момент передається від асинхронного двигуна, через коробку передач на навантаження, а регулювання швидкості відбувається східчасто (перемикання швидкостей) [2].

На верстаті можна робити наступні операції:

- обточування циліндричних і конічних поверхонь;
- розточування циліндричних і конічних поверхонь;
- обточування плоских торцевих поверхонь правим і лівим вертикальним супортами. Крім того, правим вертикальним супортом можна робити обточування плоских торцевих поверхонь із підтримкою східчасто-постійної швидкості різання;
- свердління, зенкерування й розгортання.

При застосуванні спеціальних пристосувань і обладнань, які поставляються разом з верстатами можна робити обробку фасонних поверхонь тіл обертання по копірові (електрокопіювальне обладнання).

У табл.і 1.1 представлені основні дані карусельного верстата.

Таблиця 1.1

**Основні дані карусельного верстата**

| №з/п | Найменування параметрів                                                               | Модель 1Л532 |       |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|
| 1    | 2                                                                                     | 3            |       |
| 1    | Габарит і вага                                                                        |              |       |
|      | Габарит верстата (довжина х ширина висота), мм                                        |              |       |
|      | довжина                                                                               | 5485         |       |
|      | ширина                                                                                | 8030         |       |
|      | Висота                                                                                | 5511         |       |
|      | Вага верстата, кг                                                                     | 46400        |       |
|      | Найбільша вага встановлюваного виробу залежно від числа оборотів у хвилину планшайби. | об/хв        | кг    |
|      |                                                                                       | 20           | 16000 |
|      |                                                                                       | 25           | 14000 |
|      |                                                                                       | 31,5         | 12000 |
|      |                                                                                       | 40           | 10500 |
|      |                                                                                       | 50           | 9200  |
|      |                                                                                       | 63           | 8800  |
| 2    | Обладнання, що механізують роботу верстата                                            |              |       |
|      | Дистанційне перемикач чисел оборотів планшайби                                        | €            |       |
|      | Переміщення й автоматичний затиск поперечки                                           | €            |       |
|      | Настановні переміщення вертикальних супортів                                          | €            |       |
|      | Дистанційне включення й вимикання робочих подач вертикальних супортів                 | €            |       |
|      | Робота зі східчасто-постійною швидкістю різання при обточуванні торцевих поверхонь    | €            |       |

Продовження табл. 1.1

| 1 | 2                                                       | 3       |
|---|---------------------------------------------------------|---------|
| 3 | Характеристика вузлів верстата                          |         |
|   | Кількість вертикальних неревольвентных супортів         | 2       |
|   | Найбільші розміри перетину різця ( ширина x висота), мм | 40 x 60 |
| 4 | Вертикальні неревольвентні супорти                      |         |
|   | Найбільше переміщення, мм                               | 1720    |
|   | горизонтальне                                           | 1600    |
|   | вертикальне                                             |         |
|   | Ціна розподілу лімба, мм                                |         |
|   | горизонтального переміщення                             | 0,05    |
|   | 0,05                                                    | 0,05    |
|   | вертикального переміщення                               |         |
|   | Переміщення за один оборот лімба, мм                    |         |
|   | горизонтальне                                           | 205     |
|   | 0,05                                                    | 205     |
|   | вертикальне                                             |         |
| 5 | Швидкість настановних переміщень супортів, мм/хв        | 10÷4780 |
|   | Найбільший кут повороту повзуна супорта, градусів       | ±30     |
|   | Ціна розподілу шкали повороту повзуна супорта, градуси  | 1       |
|   | Ціна розподілу лімба повороту повзуна супорта, хвилини  | 1       |
|   | упори, що виключають:                                   |         |
|   | горизонтального переміщення                             | є       |
|   | вертикального переміщення                               | є       |
| 5 | Поперечка                                               |         |

|  |                              |      |
|--|------------------------------|------|
|  | Найбільше переміщення, мм    | 1240 |
|  | Швидкість переміщення, мм/хв | 360  |
|  | упори, що виключають         |      |

Продовження табл. 1.1

| 1 | 2                            | 3    |
|---|------------------------------|------|
| 6 | Планшайба                    |      |
|   | Діаметр планшайби, мм        | 2800 |
|   | Гальмування планшайби        | є    |
| 7 | Привод                       |      |
|   | Електродвигун головного руху |      |
|   | Число оборотів у хвилину     | 1460 |
|   | Потужність, кВт              | 55   |

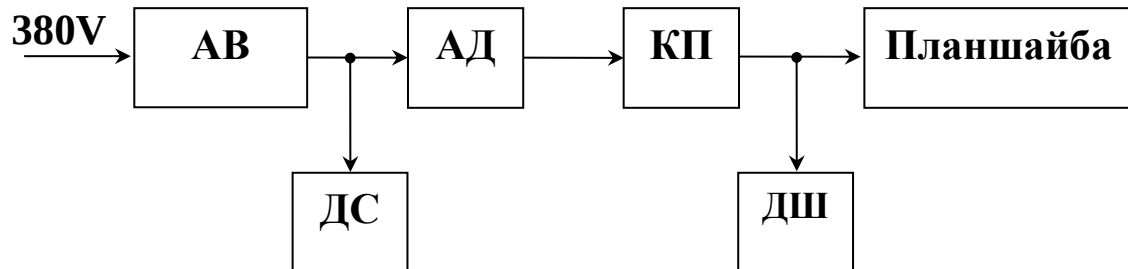
## 1.2 Вимоги до привода карусельного верстата 1Л532

Основними вимогами до привода карусельного верстата є [3]:

- номінальний струм при максимальнім навантаженні  $I_n = 100\text{A}$ ;
- діапазон регулювання швидкості  $D = 30:1$  [4];
- похибка підтримки швидкості  $\delta = \pm 2\%$ ;
- швидкодія засобів керування  $t_{\text{швид}}$  не більш 1сек.;
- умови експлуатації  $t_{\text{експ.}} = \text{від } +5 \text{ до } +40\text{ }^\circ\text{C}$ .

У роботі було поставлено завдання: з мінімальними витратами замінити головний привод верстата регульованим електроприводом і виключити регулювання швидкості перемиканням щаблів коробки передач.

Для розв'язку поставленого завдання спочатку розглянемо існуючу функціональну схему керування приводом верстата, представлену на рис.1.1.



**Рис. 1.1. Функціональна схема керування приводом верстата**  
(розроблено автором)

На схемі прийняті наступні позначення:

АВ – автоматичний вимикач;

АД – асинхронний двигун;

КП – коробка передач;

ДС – датчик струму;

ДШ – датчик швидкості.

Недоліками існуючої системи є:

- східчає регулювання швидкості;
- необхідність частого (порядку одного разу на місяць) ремонту коробки передач;

### 1.3 Вибір і розрахунки силового встаткування

1.3.1 Регулювання швидкості асинхронного двигуна виконується від транзисторного перетворювача частоти (варіант 1), див. рис.2.1.

Основні параметри системи:

- у якості силового регулювального органа використовується транзисторний регулятор частоти обертання типу SINAMICS G120 [5];
- регулятор струму вбудований у САР ТПЧ;
- функції контролера це реалізація регулятора швидкості, а також перетворення сигналу імпульсного датчика швидкості ІДШ в аналогову форму й видача сигналу про величину швидкості в САР ТПЧ, одержання інформації в цифровому виді про необхідну величину швидкості обертання, перетворення її в аналогову величину й видача в САР ТПЧ у вигляді сигналу завдання, індикація даних;

ТПЧ має всі види захистів (термо захист двигуна, к.з, несиметрія фаз, а також регулятор швидкості й струму)

У такому варіанті додаткових датчиків струму й напруги не знадобиться, тому що вони вже є в ТПЧ.

Керуюча програма контролера буде виконувати функції:

- завдання команд ТПЧ, обмін інформацією й тестування його роботи;
- програмні блокування аварійних ситуацій (Наприклад: відсутність імпульсів від ІДШ, неправильні дії операторів, і ін.);
- керування приводом;
- видача основних параметрів процесу операторові й ремонтному персоналу (наприклад: струм двигуна, швидкість обертання двигуна, і ін.);
- тестування й видача аварійних ситуацій на монітор.

1.3.2 Для плавного регулювання швидкості обертання головним приводом токарно-карусельного верстата застосовуємо електропривод постійного струму. (варіант 2), див. рис. 1.2.

Основні параметри системи:

- у якості регулювального органа використовуємо стандартний тиристорний перетворювач (ТП) постійного струму типу КТЕ-100/220 [6];
- регулятор струму й регулятор швидкості реалізовані в САР ТП;
- функції контролера у варіанті 2 – перетворення сигналу ІДС в аналогову форму й видача сигналу про величину швидкості в САР ТП, одержання інформації в цифровому виді про необхідну величину швидкості обертання, перетворення її в аналогову величину й видача в САР ТП у вигляді сигналу завдання, індикація даних.

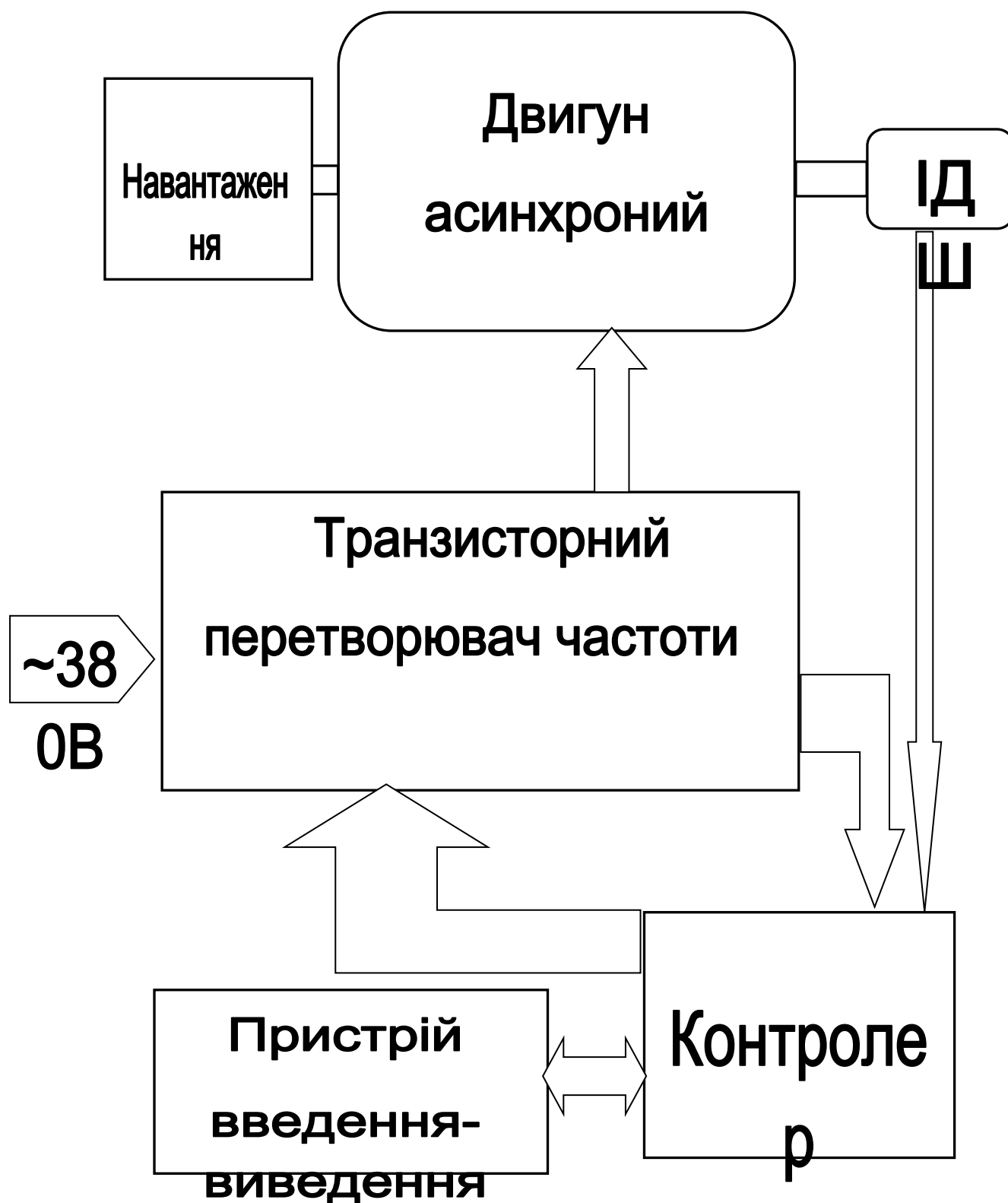


Рис.1.2. Блок-схема головного привода токарно-карусельного верстата.

Варіант1

(розроблено автором)

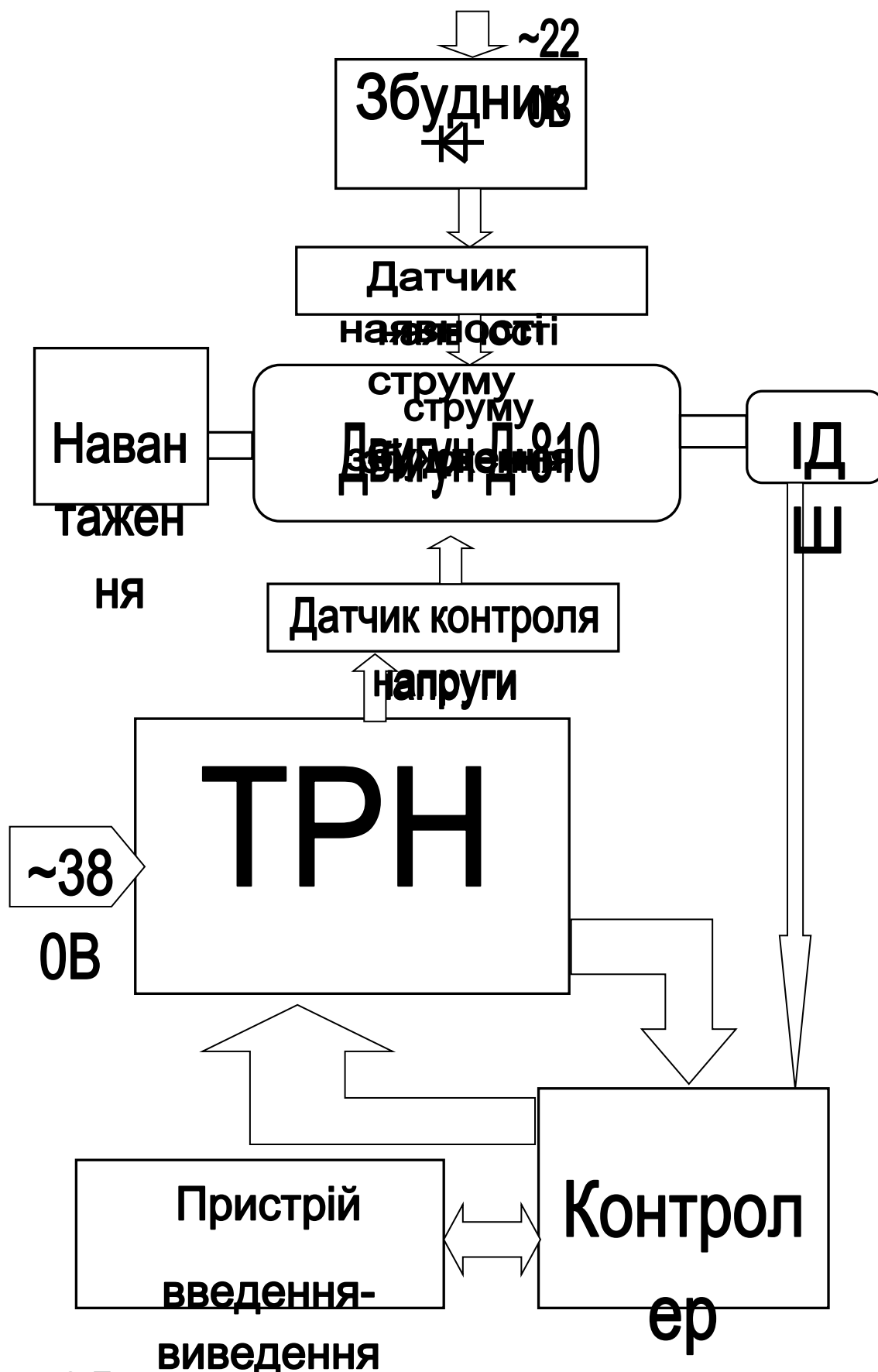


Рис. 1.3. Блок-схема головного привода токарно-карусельного верстата

Варіант 2

(розроблено автором)

1.3.3 Для плавного регулювання швидкості обертання головним приводом токарно-карусельного верстата застосовуємо електропривод постійного струму (варіант 3), див. рис. 1.4.

Приводний двигун змінного струму заміняємо на двигун типу Д-810 з регулюванням оборотів по напрузі якоря [7].

Основні технічні дані двигуна Д-810:

- потужність, кВт.....55
- напруга, В.....220
- номінальні обороти у хвилину.....500
- номінальний струм якоря, А.....250 (піковий до 375 А)

До збудника твердих вимог не пред'являємо – це буде міст Ларіонова, заживлений від 220В. Наявність струму порушення проконтролюємо шунтом у ланцюзі обмотки збудження.

Якірна обмотка живиться від тиристорного регулятора напруги (ТРН), що полягає зі стандартного ТСУ й трифазного моста Ларіонова. Випрямлену напругу контролюємо на дільнику напруги, а струм у колі якоря двигуна будемо контролювати датчиком струму.

Зворотний зв'язок по швидкості реалізована на датчику кута повороту ІДШ. Вихідний сигнал ІДШ повинен бути поданий на імпульсний вхід керуючого програмувального контролера, де шляхом програмного перетворення вихідні імпульси ІДШ після обробки в цифровому регуляторі швидкості видаються на ТСУ у вигляді аналогової величини (напруги керування), пропорційної заданій швидкості обертання.



Керування всіма режимами здійснюється дистанційно оператором, від існуючого пульта керування карусельного верстата, сигнали якого задаються в контролер. Робоча планшайба, механічно жорстко з'єднана через редуктор з валом електродвигуна гл. привода.

Живлення силового встаткування, а також обладнань керування й виконавчих апаратів керування здійснене з існуючого шафи керування головного привода.

Контролер управляє швидкістю привода (аналоговий сигнал) за допомогою керуючого органа ТРН. Індикація й уведення основних параметрів для привода за допомогою НМІ-панелі СМТ-Х3072 від компанії Weintek.

Живлення збудника  $\sim 220\text{V}$ .

Живлення ТСУ 3-фазне  $\sim 380\text{V}$ .

Живлення контролера, ІДШ– постійне  $24\text{V}$ .

Як приклад на рис. 1.5 показана інформація, виведена на дисплей при роботі верстата.

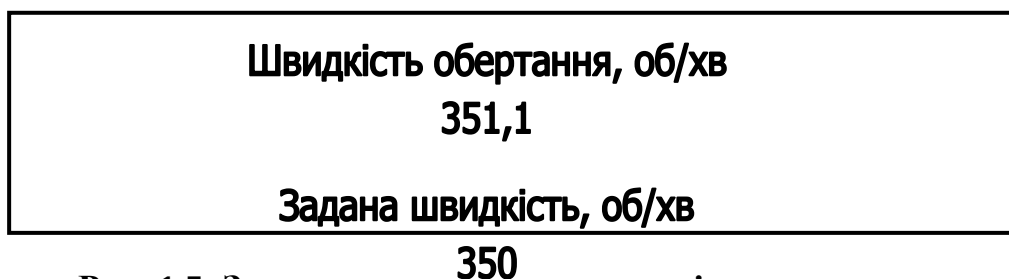


Рис. 1.5. Зразок виведення параметрів привода на дисплей

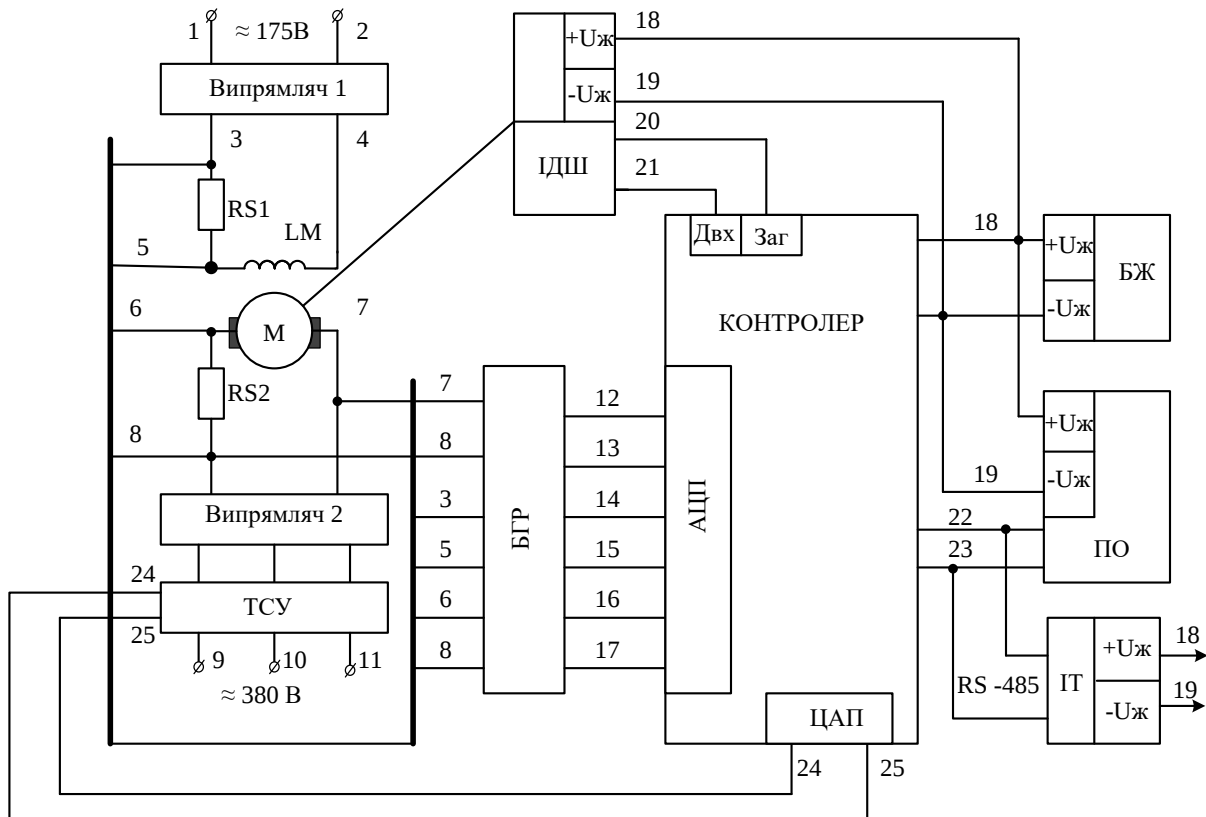
**Струм двигуна, А** **215**

**Напруга якоря, В** **184**

У контролері записана керуюча програма, що виконує функції:

- алгоритм регулятора привода;
- перетворення величин зворотному зв'язка;
- програмні блокування аварійних ситуацій (Наприклад: відсутність струму порушення, відсутність струму якоря після подачі напруги, відсутність імпульсів від ІДШ, неправильні дії операторів, і ін.);
- керування приводом;

- видача основних параметрів процесу операторові й ремонтному персоналу (наприклад: струм двигуна, швидкість обертання двигуна, і ін.);
- тестування й видача аварійних ситуацій на монітор КЛЮ9.



Розшифровка умовних позначень:

RS1 – шунт обмотки збудження двигуна;

LM – обмотка збудження двигуна;

М – якорь двигуна постійного струму;

RS 2 – шунт струму якоря;

ТСУ – тиристорна станція керування;

ІДШ – індуктивний датчик швидкості;

БГР – блок гальванічної розв'язки (датчики струму та напруги);

Двх – дискретний вхід контролера;

БЖ – блок живлення;

ПО – пульт оператора;

ІТ – індикаційне табло;

**Рис.1.6. Схема підключення апаратних засобів системи керування карусельним верстатом**  
(розроблено автором)

#### 1.4 Економічне порівняння запропонованих варіантів

Підсумуємо, які технічні можливості доступні в кожному варіанті, для цього складемо наступну таблицю (див. табл. 1.2) [8].

Таблиця 1.2

##### Технічні параметри запропонованих варіантів

| Найменування параметра                          | Варіант 1                                                | Варіант 2                                                | Варіант 3                                                    |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Тип силового перетворювача                      | Частотний перетворювач SINAMICS G120 (Siemens)           | Тиристорний перетворювач постійного струму КТЕ-100/220   | Тиристорний регулятор напруги ТСУ-2                          |
| Система автоматичного регулювання               | Є вбудований регулятор струму й швидкості                | Є вбудований регулятор струму й швидкості                | Реалізована на базі сучасного ПЛК (I-8088) з ПІД-регулятором |
| Номінальна потужність, кВт                      | 55                                                       | 55                                                       | 55                                                           |
| Діапазон регулювання швидкості                  | 1:100                                                    | 1:50                                                     | 1:30                                                         |
| Погрішність відпрацювання завдання швидкості, % | 0,5                                                      | 0,5                                                      | 0,2                                                          |
| Спосіб завдання швидкості                       | Клавіатура на пульті керування                           | Клавіатура на пульті керування                           | Цифрове введення через НМІ сМТ-Х3072                         |
| Спосіб відображення інформації                  | Кольоровий сенсорний НМІ-дисплей з підтримкою Modbus TCP | Кольоровий сенсорний НМІ-дисплей з підтримкою Modbus TCP | Кольоровий сенсорний НМІ-дисплей з підтримкою Modbus TCP     |

Для знаходження варіанта з мінімальними витратами на впровадження складемо табл.1.3:

Таблиця 1.3

**Порівняння вартостей устаткування для запропонованих варіантів**

| № з/п                                                              | Найменування устаткування                           | Тип / модель                          | Ціна, тис. грн | Разом, тис. грн |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------|-----------------|
| <b>Варіант 1 – Привод змінного струму (частотний перетворювач)</b> |                                                     |                                       |                |                 |
| 1                                                                  | Частотний перетворювач                              | SINAMICS G120 (55 кВт, 3АС 380–480 В) | 58,0           |                 |
| 2                                                                  | Датчик швидкості                                    | Omron E6B2-CWZ6C-500                  | 8,5            |                 |
| 3                                                                  | Контролер, модулі введення/виведення, блок живлення | I-8088 + I-87017 + Mean Well RS-50-24 | 15,0           |                 |
| Підсумок (Варіант 1)                                               |                                                     |                                       |                | 81,5            |
| <b>Варіант 2 – Привод постійного струму (КТЕ-100/220)</b>          |                                                     |                                       |                |                 |
| 1                                                                  | Тиристорний перетворювач                            | КТЕ-100/220                           | 98,0           |                 |
| 2                                                                  | Датчик швидкості                                    | Omron E6B2-CWZ6C-500                  | 8,5            |                 |
| 3                                                                  | Контролер, модулі, блок живлення                    | як вище                               | 15,0           |                 |
| Підсумок (Варіант 2)                                               |                                                     |                                       |                | 121,5           |
| <b>Варіант 3 – Привод постійного струму (ТСУ-2)</b>                |                                                     |                                       |                |                 |
| 1                                                                  | Тиристорний регулятор                               | ТСУ-2                                 | 21,0           |                 |
| 2                                                                  | Випрямляч (для збудження)                           | 3-фазний / однофазний                 | 1,2            |                 |
| 3                                                                  | Збудник Д-810                                       | (вбудований або окремий)              | 1,5            |                 |
| 4                                                                  | Дросель згладжувальний                              | $L \geq 10$ мГн                       | 1,7            |                 |
| 5                                                                  | Датчик швидкості                                    | Omron E6B2-CWZ6C-500                  | 8,5            |                 |
| 6                                                                  | Датчик струму                                       | LEM LTS 300-NP                        | 4,5            |                 |
| 7                                                                  | Контролер, модулі, блок живлення                    | I-8088 + I-87017 + Mean Well RS-50-24 | 15,0           |                 |
| Підсумок (Варіант 3)                                               |                                                     |                                       |                | 53,4            |

Примітка: Вартість двигунів (асинхронного або Д-810) не врахована, оскільки вони є в наявності в електроремонтному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Виходячи з вимог до привода, наведених у п.1.2 усі три запропоновані варіанти дозволять замінити головний привод верстата регульованим електроприводом і виключити регулювання швидкості перемиканням щаблів коробки передач. Але при впровадженні варіанта 3 із приводом постійного струму й тиристорним регулятором напруги ТРН витрати будуть мінімальними, тому зупинимо свій вибір на ньому.

## 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Призначення та склад системи

Мікропроцесорна система керування головним приводом токарно-карусельного верстата призначена для:

- завдання швидкості обертання електропривода планшайби верстата у фіксованому ступінчастому режимі;
- стабілізації швидкості обертання на вибраному рівні (ступені);
- виведення інформації про фактичну швидкість обертання планшайби верстата на цифровий дисплей;
- апаратного та програмного блокування при аварійних ситуаціях;
- керування приводом у режимах: «Пуск», «Стоп», «Гальмування», «Поштовх» (точне позиціонування), «Реверс», «Завдання швидкості».

Структура та компоненти системи:

Силова частина привода виконана за схемою ТРН – ВБ – Д (Тиристорний регулятор напруги – Випрямний блок – Двигун).

Як приводний двигун (Д) використовується двигун постійного струму Д-810 з регулюванням швидкості шляхом зміни напруги на якорі.

Для забезпечення незалежного збудження двигуна застосований однофазний випрямляч, що живиться від мережі змінного струму напругою 220 В.

Тиристорне регулювання напруги (ТРН) виконане на базі комплектного тиристорного обладнання ТСУ-2, яке керує напругою трифазної мережі. Після ТСУ-2 напруга випрямляється трифазним мостовим випрямним блоком (ВБ), зібраним із шести діодів на номінальний струм 200 А. Випрямлена напруга через згладжувальний дросель подається на якор двигуна.

Живлення ТСУ-2 здійснюється через понижувальний силовий трансформатор (потужністю  $S = 60$  кВА) з первинною напругою  $\sim 380$  В і вторинною  $\sim 175$  В.

Система керування та контролю:

Контролер отримує інформацію про швидкість привода від імпульсного датчика швидкості (ІДШ).

Сигнал фактичної швидкості, сформований контролером, виводиться на цифровий дисплей.

Контролер також формує сигнал завдання швидкості для ТСУ-2 та контролює процеси пуску та гальмування привода.

Керування всіма режимами здійснюється дистанційно оператором з існуючого пульта керування (ПК) верстата, сигнали з якого надходять у контролер.

Робоча планшайба механічно з'єднана з валом двигуна головного привода через редуктор.

Живлення силового обладнання, апаратів керування та виконавчих механізмів забезпечується з існуючої шафи керування головного привода.

На рис 2.1 показана структурна схема системи.

Умовні позначення на структурній схемі (рис. 2.1):

TV – силовий трансформатор

ТРН – тиристорний регулятор напруги

ТСУ-2 – комплектне тиристорне обладнання

ВБ – силовий випрямний блок

М – двигун постійного струму

ВЗ – випрямляч збудження (поля)

ІДШ – імпульсний датчик швидкості

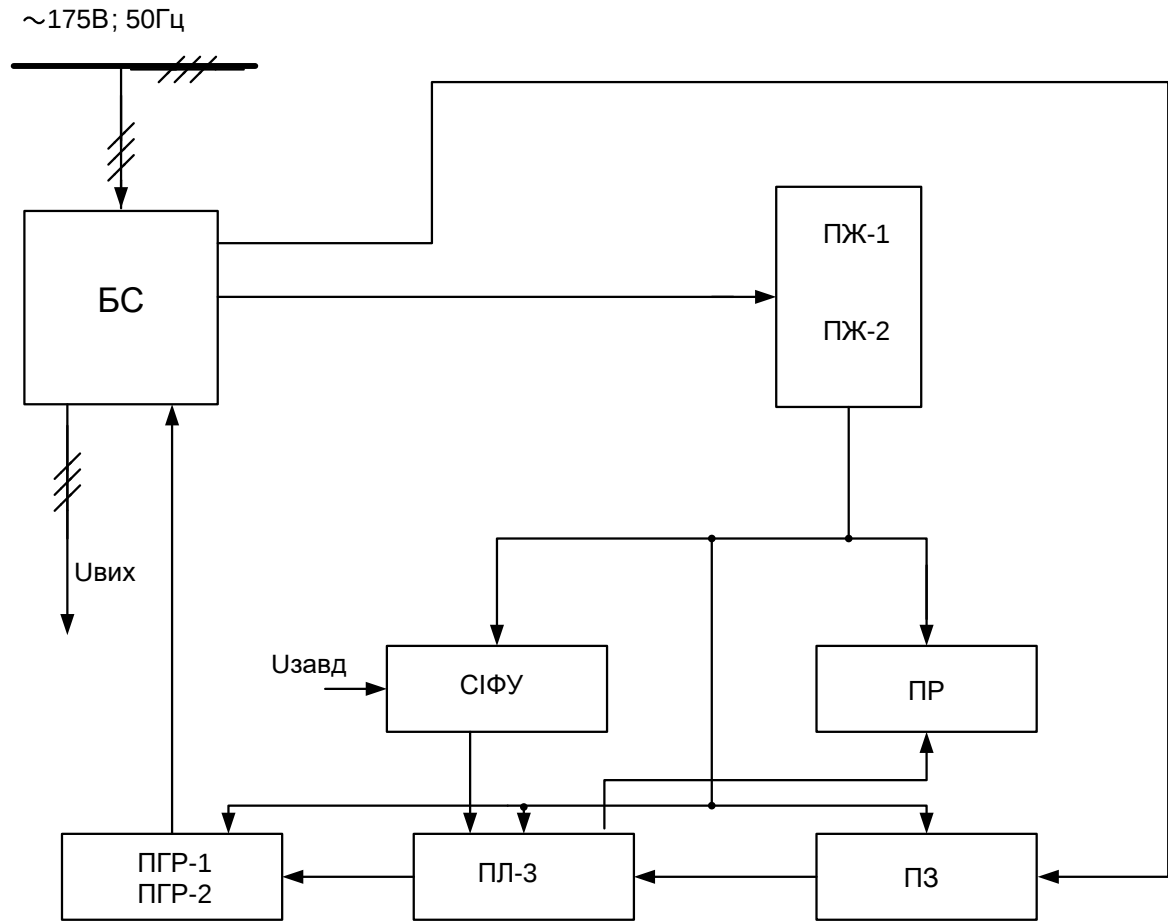
БЖ – блок живлення (контролера, індикації, датчиків)

ОЦІ – обладнання цифрової індикації

ПК – пульт керування

РКБ – релейно-контакторний блок





**Рис. 2.2. Структурна схема ТСУ-2**

(розроблено автором)

БС – блок силовий;

ПГР-1, ПГР-2 – панель гальванічної розв'язки;

ПЛ-3 – панель логіки;

ПЗ – панель захистів;

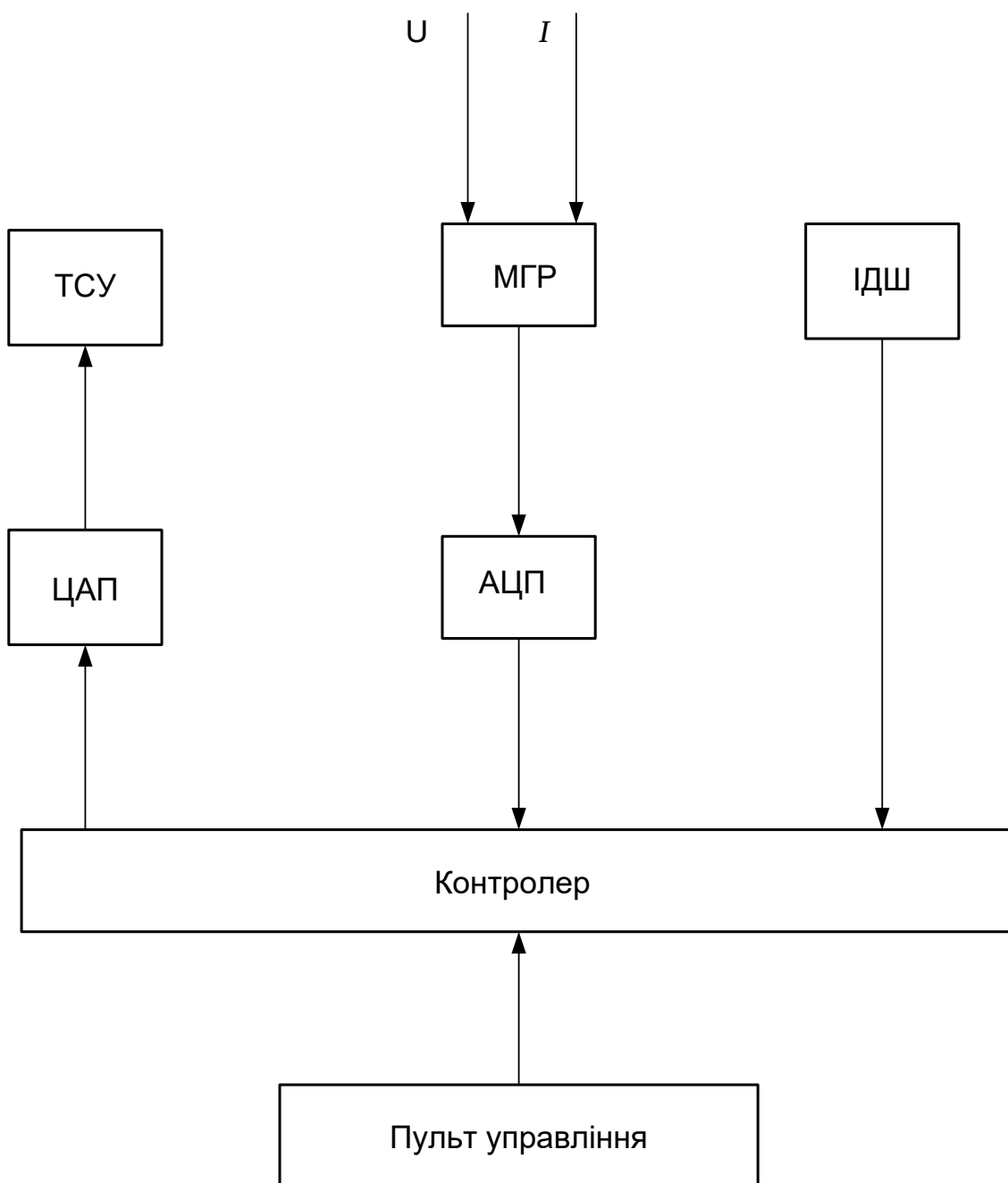
ПР – панель реле;

СИФУ – система імпульсно-фазового керування;

ПЖ-1 – панель живлення 1;

ПЖ-2 – панель живлення 2.

Структурна схема даного типовиконання ТСУ забезпечує пуск і регулювання частоти обертання вперед, зупинку, динамічне гальмування, керування електромагнітними муфтами.



**Рис. 2.3. Планована структурна схема системи керування**  
(розроблено автором)

## 2.2 Розрахунки необхідного періоду знімання (обробки) сигналів і припустимої похибки виміру

Для розв'язку поставленого завдання становить інтерес розглянути питання про похибки вимірів і вірогідності обробки отриманого сигналу. Прийmemo умову, що сумарна похибка  $\delta$  обумовленого струму двигуна не повинна перевищувати 2 %. Похибка  $\delta$  включає наступні складові:

$\delta_1$  – похибка блоку МГР;

$\delta_2$  – похибка АЦП контролера;

$\delta_3$  – методичну похибка, внесену дискретністю роботи контролера;

$\delta_4$  – похибка обчислень.

Сумарна похибка  $\delta_1$  і  $\delta_2$ , становить 0,31%. Похибкою  $\delta_4$  можна зневажити. Тому розглянемо тільки похибку  $\delta_3$ , величина якої по суті представляє похибку, обумовлену частотою знімання сигналів, що характеризують величину струму двигуна.

При роботі в контролер надходять дані про величину напруги  $U$ , швидкості обертання планшайби  $n$ , і струму  $I$ . Виходячи з того, що швидкість зміни струму в багато крат більше швидкості зміни інших даних, ми будемо вести подальші розрахунки по струму.

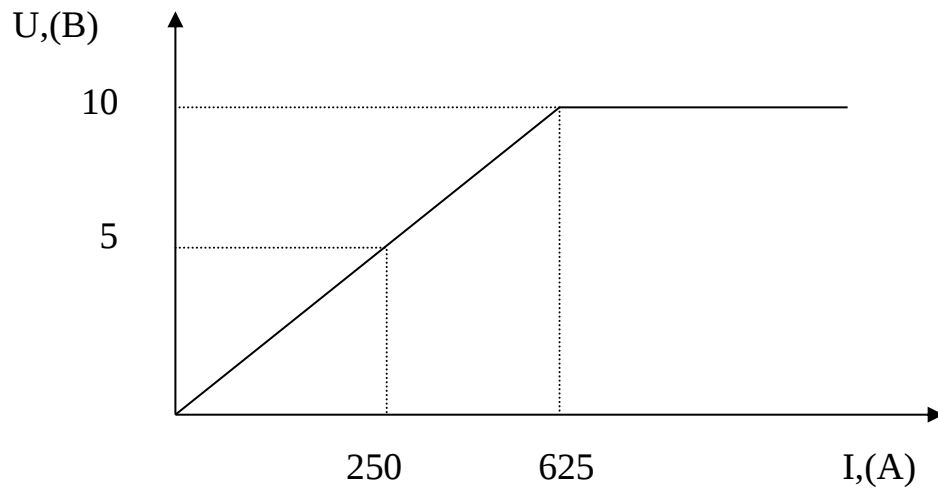
Для забезпечення заданої методичної похибки виміру струму в 1,69% (залишок від заданих 2%) нам необхідно задатися частотою знімання інформації. Для розрахунків скористаємося графіком на рис. 2.4

Максимальна вхідна напруга АЦП 10В, тоді цьому максимальному значенню напруги повинна відповідати максимальному значенні струму  $I_{\max}=625\text{A}$ . Для виміру струму виберемо шунт ШСМ  $I_n=750\text{A}$ ,  $U_n=75\text{mV}$ .

1,69% від максимального значення струму становить 10,56А. Струм наростає с.  $\frac{dI}{dt} = 1\text{kA/сек}$  Для знаходження інтервалу часу між двома звертаннями до датчика струму складемо наступну пропорцію:

1000A – 1сек;

10,56A – x сек;



**Рис. 2.4. Вхідна характеристика АЦП**

(розроблено автором)

Тоді інтервал не повинен перевищувати наступне значення:

$$\Delta\tau = \frac{10,56 \cdot 1}{1000} = 0,01056\text{с.}$$

Для надійності беремо  $\Delta\tau_{\text{обігу}} = \Delta\tau / 2 = 0,00528\text{с.}$  Або  $\approx 189,39$  Гц.

### 2.3 Вибір датчика швидкості

Більшість регульованих приводів виробничих механізмів, що перебувають в експлуатації на підприємствах гірничо-металургійного комплексу країни, оснащене уніфікованими комплектними тиристорними перетворювачами (КТЕУ). Уведення сигналу завдання в КТЕУ на зміну швидкості обертання приводного двигуна, як правило, виконується оператором-технологом за допомогою звичайного резистивного потенціометра. Очевидний недолік - "втрата контакту", що дуже часто приводить до аварії механізмів,

наприклад, буравленню металу за рахунок зменшення швидкості обертання валків прокатних клітей або навіть повній зупинці валків.

У якості сигналів зворотного зв'язку, що несуть інформацію про величину швидкості обертання двигуна, у діючих КТЕУ служать сигнали тахогенераторів або сигнал ЕРС двигуна. При цьому похибка виміру швидкості становить 2,5..7%, що для сучасного виробництва не можна вважати навіть задовільним. Крім того, для правильного ведення технологічного процесу операторові потрібна інформація про швидкість обертання двигуна, видавана на спеціальні табло в цифровому вигляді.

Дотепер на деяких об'єктах використовуються спеціалізовані цифрові вимірники швидкості, засновані на обробці в логічних обладнаннях сигналів імпульсних датчиків кута повороту, наприклад, типу ПДФ, установлених на валах приводних двигунів. Такі вимірники, як правило, уведено в експлуатацію 12..15 років тому, мають низьку роздільну здатність і обмежені функціональні можливості, а сучасних закінчених розв'язків - немає.

Видалося б, які можуть бути проблеми з підрахунком імпульсів. На вітчизняному ринку засобів автоматизації є недорогі модулі 32-х розрядних таймерів-лічильників, що містять до того ж цифровий індикатор. Неначебто потрібно всього лише, підсумувати число імпульсів, що зробили від датчика кутових переміщень за фіксований програмно встановлюваний (0.1 з або 1 с) інтервал часу. Але не так виявляється все просто. Необхідні й додаткова обробка, і засоби завдання швидкості й формування аналогових сигналів керування, і багато чого іншого.

Вимірник, що відповідає духу часу, повинен забезпечувати виконання таких функцій, як:

- обчислення середнього значення швидкості;
- завдання оператором необхідного значення величини швидкості обертання й передачу цієї інформації в аналоговому виді в систему керування приводом;
- установку вихідних даних про механізм (кількість імпульсів від

датчика на один оборот вала й робочий діапазон швидкостей);

- перетворення середнього значення швидкості в аналоговий сигнал і передача його в систему керування приводом;
- видача в цифровому виді інформації про швидкість на табло;
- зв'язок із засобами керування верхнього рівня.

У розв'язуваному завданні може бути використано три методи цифрового виміру швидкості.

Перший - визначення інтервалу часу між появою двох сусідніх імпульсів від датчика кутових переміщень. Величина швидкості в цьому випадку:

$$n = K/t, \quad (2.1)$$

де  $K$  - коефіцієнт, обумовлений кількістю імпульсів від датчика на один оборот, і необхідністю видачі операторові значення швидкості з розмірністю "обороту у хвилину";

$t$  - проміжок часу між приходом двох сусідніх імпульсів.

Другий метод припускає підрахунок кількості імпульсів  $N$ , що зробили за фіксований інтервал часу  $T_{\text{змін}}$ , згідно з вираженням

$$n = K \cdot N. \quad (2.2)$$

Третій метод полягає у визначенні інтервалу часу  $T$ , за яке контрольований вал зробить задана кількість оборотів  $Z$ , тобто

$$n = K \cdot Z/T. \quad (2.3)$$

Дискретний сигнал, дискретний метод виміру й, природно, виникають методичні похибки. Про це слід пам'ятати. Але є ще й динамічна похибка  $S$ , виникнення якої також обумовлене періодом дискретизації, тобто запізнюванням у визначенні середньої швидкості між двома сусідніми сигналами датчика при розгоні або гальмуванні механізму. Оцінити її можна як  $S = T_i \cdot a$ , де  $T_i$  - час, рівне відповідно  $t$ ,  $T_{\text{вим}}$  або  $T$  відповідно для перерахованих методів виміру,  $a$  - максимальна величина прискорення (уповільнення) механізму в об/хв/с.

У статті [9] представлені графіки залежності величин динамічних і методичних похибок при вимірі швидкості для реверсивних "швидкохідних" і "тихохідних" механізмів. "Швидкохідні" - це механізми типу різного виду ножиців, рольганги, лінійки маніпуляторів і ін. "Тихохідні" - головні привода обтискних станів. Цифри 50,100,150,..., 10000 на графіках означають кількість імпульсів від датчика на один оборот вала.

Величини абсолютних  $Q_a$  і відносних  $Q_0$  методичних похибок визначалися з виражень:

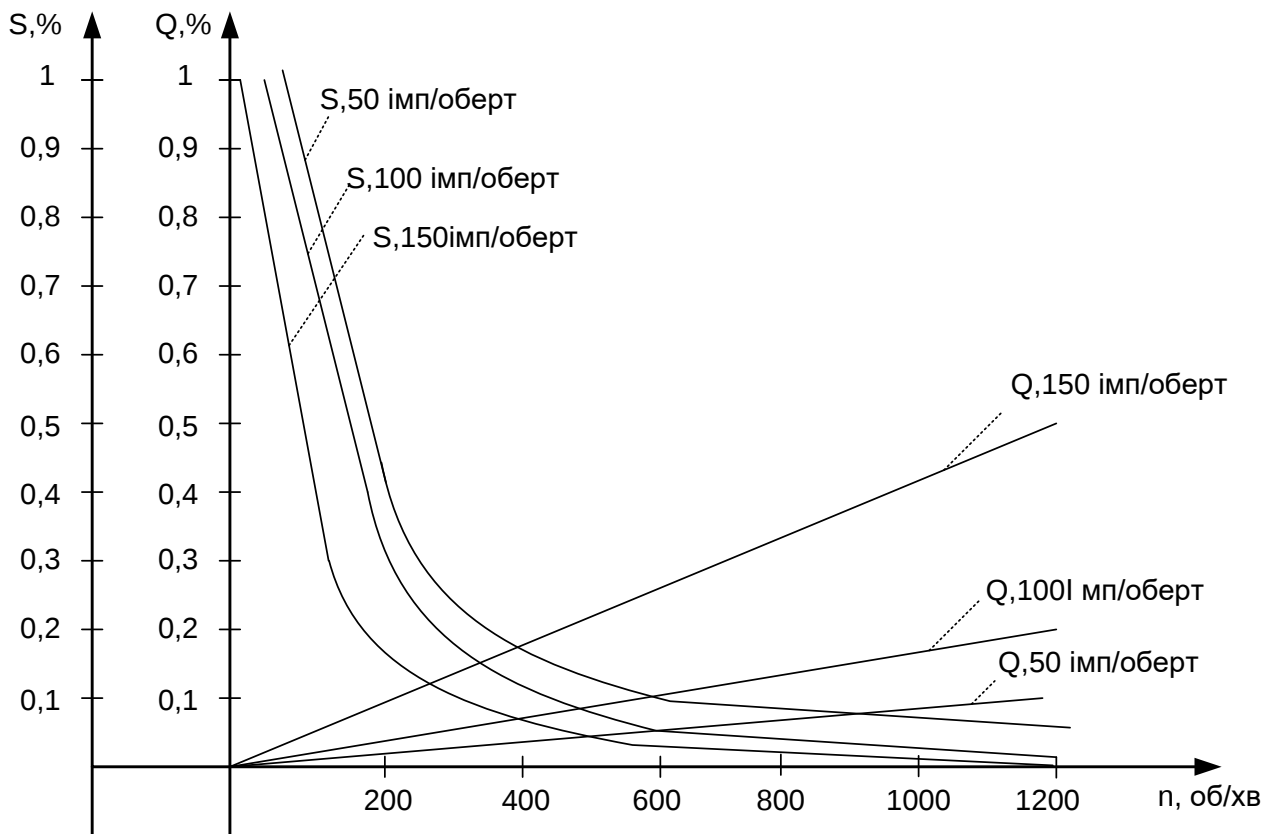
$$\begin{aligned} Q_a &= K/(t-t_j) \cdot n_{\text{вимі}}. \\ Q_0 &= (100Q \cdot a)/n_{\text{вимі}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $t$  - розрахункова тривалість періоду між вступами сигналів від датчика;

$t_j$  - період вступу сигналів таймера (1 мкс);

$n_{\text{вимі}}$  - прийняте за обмірюване значення швидкості в  $i$ -й крапці.

Для визначення кількості імпульсів датчика на один оберт планшайби скористаємося наступним графіком з [9] див. рис. 2.5



**Рис. 2.5. Графіки залежності методичної й динамічної похибки від обертів механізму**  
(розроблено автором)

Виходячи із графіка, мінімальне значення методичної похибки – при спрацьовуванні датчика швидкості із частотою 50 імпульсів на оберт.

Однак це значення є мінімальним достатнім, а не оптимальним для модернізованої системи.

З огляду на те, що:

- діапазон регулювання швидкості становить 30:1 (від 20 до 600 об/хв на валу двигуна);
- вимога до похибки – не більше 2%, а бажана –  $\leq 0,2\%$ ;
- частота опитування контролера – 189 Гц;
- використовується сучасний програмований контролер (I-8088) з підтримкою швидкісних імпульсних входів – доцільно застосувати інкрементальний оптичний енкодер з вищою роздільною здатністю.

Замість застарілого індуктивного датчика ВБІ-П40 приймаємо до використання сучасний енкодер Omron E6B2-CWZ6C-500, що має наступні переваги:

- 500 імпульсів на оборот, що забезпечує похибку вимірювання  $< 0,2\%$  у всьому діапазоні швидкостей;
- вихідний сигнал HTL (24 В), сумісний із імпульсними входами контролера I-8088;
- частота перемикання до 100 кГц, що значно перевищує вимоги системи (макс.  $\sim 1$  кГц при 600 об/хв);
- ступінь захисту IP65, стійкість до вібрацій і промислових завад;
- надійність і довгий термін служби.

Навіть на мінімальній швидкості 20 об/хв ( $\approx 0,33$  об/с) енкодер генерує 167 імпульсів/с, що достатньо для стабільного вимірювання за методом підрахунку імпульсів за фіксований час (0,1 с). Це дозволяє відмовитися від менш точного методу вимірювання за інтервалом між імпульсами.

Таким чином, використання 500 імпульсів на оберт не лише відповідає графіку мінімуму похибки, але й забезпечує значний запас точності та стійкості до завад, що є критично важливим для надійної роботи промислового обладнання.

Таблиця 2.1

#### Технічні параметри енкодера Omron E6B2-CWZ6C-500 [10]

| № з/п | Найменування параметру          | Одиниця виміру | Параметр                 |
|-------|---------------------------------|----------------|--------------------------|
| 1     | Тип                             | —              | Інкрементальний оптичний |
| 2     | Імпульсів на оборот             | шт.            | 500                      |
| 3     | Вихідний сигнал                 | —              | HTL (24 В)               |
| 4     | Максимальна частота перемикання | кГц            | 100                      |
| 5     | Ступінь захисту                 | IP             | IP65                     |
| 6     | Напруга живлення                | В              | 10–30                    |
| 7     | Діапазон температур             | °С             | –30 ... +85              |
| 8     | Габаритні розміри               | мм             | Ø50 × 63                 |

## 2.4 Вибір контролера та модулів введення-виведення та гальванічної розв'язки

Для реалізації мікропроцесорної системи керування регульованим електроприводом токарно-карусельного верстата 1Л532 виконаємо комплексний вибір сучасних компонентів, що відповідають сучасним вимогам до точності, надійності та підтримки.

Таблиця 2.2

### Аналіз необхідної кількості та типу входів-виходів контролера

| № з/п | Параметр                        | Одиниця виміру  | Значення   |
|-------|---------------------------------|-----------------|------------|
| 1     | Напруга живлення                | В (пост. струм) | 24         |
| 2     | Похибка перетворення АЦП        | %               | $\leq 0,1$ |
| 3     | Мінімальна частота опитування   | Гц              | $\geq 189$ |
| 4     | Кількість дискретних входів     | шт.             | 3          |
| 5     | Кількість аналогових входів     | шт.             | 1          |
| 6     | Кількість аналогових виходів    | шт.             | 1          |
| 7     | Наявність Ethernet (Modbus TCP) | —               | так        |
| 8     | Наявність портів RS-485         | шт.             | 2          |

Для даної розробки зупинимо свій вибір на блоках контролерів серії I-8088 (ICP DAS) – 32-бітний контролер з підтримкою Modbus TCP, вбудованим Ethernet, достатнім обсягом пам'яті та зовнішніми модулями введення/виведення.

Замість ДІТ-80 (ефект Холла, похибка  $\pm 1.5\%$ ) обираємо LEM LTS 300-NP – датчик з компенсованим ефектом Холла, похибкою  $\pm 0.5\%$  та гальванічною ізоляцією 4 кВ.

В якості модулів введення/виведення використовуємо I-87017 – 12-розрядний аналоговий модуль з 8 входами та 2 виходами (0–10 В), вбудованою гальванічною ізоляцією (3 кВ). Додатковий модуль МГР не потрібен.

Таблиця 2.3

**Технічні дані контролера I-8088 [11]**

| № з/п | Параметр                         | Одиниця виміру | Значення                           |
|-------|----------------------------------|----------------|------------------------------------|
| 1     | Виробник                         | —              | ICP DAS                            |
| 2     | Модель                           | —              | I-8088                             |
| 3     | Процесор                         | —              | ARM Cortex-M7,<br>480 МГц          |
| 4     | RAM                              | КБ             | 512                                |
| 5     | Flash                            | МБ             | 4                                  |
| 6     | EEPROM (енергонезалежна пам'ять) | КБ             | 8                                  |
| 7     | Дискретні входи                  | шт.            | 8 (0 -30 В)                        |
| 8     | Дискретні виходи                 | шт.            | 8 (відкритий колектор)             |
| 9     | Напруга живлення                 | В              | 10–30                              |
| 10    | Споживана потужність             | Вт             | ≤ 3                                |
| 11    | Робоча температура               | °C             | –25 ... +75                        |
| 12    | Протоколи зв'язку                | —              | Modbus TCP,<br>Modbus RTU,<br>MQTT |

Таблиця 2.4

**Технічні дані модуля аналогового введення/виведення I-87017**

| № з/п | Параметр                     | Одиниця виміру | Значення            |
|-------|------------------------------|----------------|---------------------|
| 1     | Модель                       | —              | I-87017             |
| 2     | Кількість аналогових входів  | шт.            | 8                   |
| 3     | Кількість аналогових виходів | шт.            | 2                   |
| 4     | Діапазон сигналу             | В              | 0–10                |
| 5     | Роздільна здатність АЦП/ЦАП  | біт            | 12                  |
| 6     | Час перетворення             | мкс            | < 100               |
| 7     | Похибка                      | %              | ±0,1                |
| 8     | Гальванічна ізоляція         | кВ             | 3                   |
| 9     | Живлення                     | —              | від шини контролера |
| 10    | Сумісність із серією         | —              | iECS (I-8000)       |

Таблиця 2.5

**Технічні дані датчика струму LEM LTS 300-NP [12]**

| № з/п | Параметр                    | Одиниця виміру | Значення                  |
|-------|-----------------------------|----------------|---------------------------|
| 1     | Тип сенсора                 | —              | Компенсований ефект Холла |
| 2     | Діапазон вимірювання струму | А              | 0 – 300                   |
| 3     | Вихідний сигнал             | В              | 0 – 10                    |
| 4     | Напруга живлення            | В              | ±15                       |
| 5     | Похибка                     | %              | ±0,5                      |
| 6     | Гальванічна ізоляція        | кВ             | 4                         |
| 7     | Діапазон температур         | °С             | –40 ... +105              |
| 8     | Лінійність                  | %              | < 0,2                     |
| 9     | Клас захисту                | —              | IP20                      |
| 10    | Монтаж                      | —              | DIN-рейка                 |

З метою забезпечення сучасного, надійного й зручного інтерфейсу оператора в системі керування головним приводом токарно-карусельного верстата моделі 1Л532 замість застарілого буквено-цифрового дисплея КЛ09 пропонується використовувати сучасний промисловий HMI-термінал серії Weintek cMT-X3072.

HMI-панель cMT-X3072 від компанії Weintek є компактним сенсорним пультом з 7-дюймовим кольоровим TFT-дисплеєм (роздільна здатність 800×480), призначеним для візуалізації технологічних параметрів, керування процесами та діагностики аварійних ситуацій у реальному часі.

Основні переваги використання cMT-X3072:

Підтримка промислового протоколу Modbus TCP/RTU — забезпечує безперешкодну інтеграцію з програмованим логічним контролером I-7188XC;

- висока надійність: ступінь захисту IP65 (з боку екрана), робоча температура від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ;

- інтуїтивний графічний інтерфейс: відображення швидкості обертання планшайби, струму якоря двигуна, стану системи («Пуск», «Стоп», «Аварія» тощо);

- можливість створення історії аварій, експорт даних через USB або Ethernet;

- програмування через безкоштовне ПО EasyBuilder Pro, що дозволяє швидко налаштувати екрани під конкретну задачу.

**Технічні характеристики пульта**

| № з/п | Найменування параметру              | Од.вим.         | Параметр                                          |
|-------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|
| 1     | Діагональ дисплея                   | дюйм            | 7                                                 |
| 2     | Тип дисплея                         | —               | TFT LCD, кольоровий                               |
| 3     | Роздільна здатність                 | пікселі         | 800 × 480                                         |
| 4     | Ступінь захисту (фронтальна панель) | IP              | IP65                                              |
| 5     | Робоча температура                  | °C              | –10 ... +50                                       |
| 6     | Напруга живлення                    | В (пост. струм) | 24                                                |
| 7     | Споживаний струм                    | А               | ≤ 0,5                                             |
| 8     | Інтерфейси зв'язку                  | —               | Ethernet (Modbus TCP), RS-232/RS-485 (Modbus RTU) |
| 9     | Програмне забезпечення              | —               | EasyBuilder Pro (безкоштовно)                     |
| 10    | Підтримка мов інтерфейсу            | —               | Українська, англійська (та ін.)                   |
| 11    | Тип сенсорного екрана               | —               | Резистивний (4- або 5-шаровий)                    |
| 12    | Сертифікації                        | —               | CE, UL, cUL, RCM                                  |

Для живлення мікропроцесорної системи керування регульованим електроприводом токарно-карусельного верстата 1Л532 необхідно забезпечити стабільне, надійне та гальванічно ізольоване джерело живлення постійного струму. Система включає:

- контролер I-8088 (споживання ≤ 3 Вт),
- НМІ-панель Weintek cMT-X3072 (споживання ≤ 12 Вт),

- датчик струму LEM LTS 300-NP (потребує  $\pm 15$  В, але у вашому випадку живиться від окремого джерела або внутрішнього перетворювача),
- енкодер Omron E6B2-CWZ6C-500 (споживання  $\leq 1$  Вт),
- модулі введення/виведення I-87017 (живлення від шини контролера).

Сумарне споживання керуючих кіл становить приблизно 16–18 Вт при напрузі 24 В пост. струму. З урахуванням запасу 30% на пікові навантаження та можливе розширення системи, необхідна потужність джерела живлення — не менше 25 Вт.

У якості джерела живлення обираємо Mean Well RS-50-24 – надійний промисловий блок живлення, широко представлений на ринку України, з підтвердженою надійністю у важких умовах (металургія, машинобудування).

Переваги Mean Well RS-50-24:

- потужність 50 Вт – достатня для поточної системи та майбутніх розширень;
- гальванічна ізоляція між входом та виходом – 4 кВ (захист від мережевих імпульсів);
- високий ККД (89%) – знижує тепловиділення;
- вбудовані захисти: від КЗ, перевантаження, перенапруги, перегріву;
- DIN-рейковий монтаж – сумісний із промисловими шафами;
- широкий діапазон вхідної напруги (85 - 264 В змінного струму) – стійкість до провалів мережі.

Застосування цього блоку живлення забезпечує стабільну роботу контролера та НМІ-панелі навіть при коливаннях напруги в промисловій мережі (поширена проблема на підприємствах гірничо-металургійного комплексу).

**Технічні дані блоку живлення Mean Well RS-50-24 [13]**

| № з/п | Параметр             | Одиниця виміру  | Значення                                  |
|-------|----------------------|-----------------|-------------------------------------------|
| 1     | Виробник             | —               | Mean Well                                 |
| 2     | Модель               | —               | RS-50-24                                  |
| 3     | Вихідна напруга      | В               | 24                                        |
| 4     | Вихідний струм       | А               | 2,1                                       |
| 5     | Вихідна потужність   | Вт              | 50                                        |
| 6     | Вхідна напруга       | В (змін. струм) | 85–264                                    |
| 7     | Частота мережі       | Гц              | 47–63                                     |
| 8     | ККД                  | %               | 89                                        |
| 9     | Гальванічна ізоляція | кВ              | 4                                         |
| 10    | Захисти              | —               | Перевантаження, КЗ, перенапруга, перегрів |
| 11    | Ступінь захисту      | IP              | IP20                                      |
| 12    | Робоча температура   | °С              | –20 ... +70                               |
| 13    | Монтаж               | —               | DIN-рейка (35 мм)                         |
| 14    | Сертифікації         | —               | CE, UL, TUV, CCC                          |

Застосування блоку живлення Mean Well RS-50-24 забезпечує:

- надійне живлення усіх компонентів системи керування;
- захист від аварійних ситуацій у мережі;
- довгострокову підтримку (виробник гарантує постачання на 10+ років);
- сумісність із сучасними стандартами промислової автоматизації.

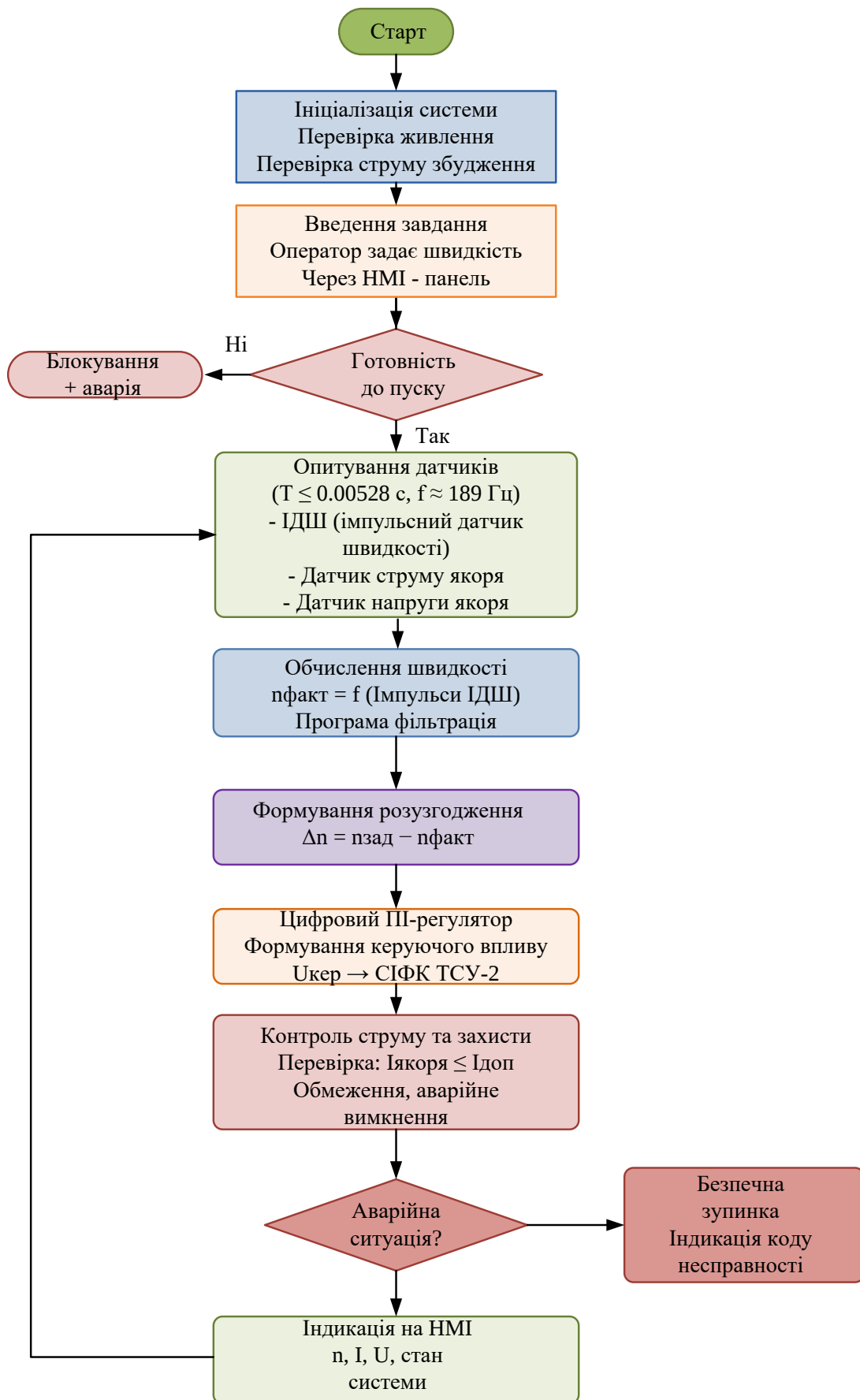
## **2.5 Розробка алгоритму керування приводом токарно-карусельного верстата**

Розроблений алгоритм керування реалізований у програмному забезпеченні контролера I-8088 (ICP DAS) і забезпечує замкнену систему автоматичного регулювання швидкості обертання планшайби верстата 1Л532 (див. рис. 2.6). Алгоритм функціонує в режимі реального часу з періодом дискретизації  $T \leq 0,00528T \leq 0,00528$  с (частота опитування  $\approx 189$  Гц), що гарантує динамічну точність регулювання та стійкість системи при зміні навантаження.

### **2.5.1 Етап ініціалізації системи**

При вмиканні системи контролер I-8088 виконує комплексну діагностику всіх підсистем:

1. Перевірка живлення: аналізується наявність трифазної напруги  $\sim 380$  В на вході силового трансформатора, симетрія фаз (відхилення  $\leq 2\%$ ), а також стабільність напруги 24 В від блоку Mean Well RS-50-24.
2. Діагностика збудження двигуна Д-810: система перевіряє наявність струму в обмотці збудження через шунт RS1. Відсутність збудження блокує подальший пуск.
3. Тестування датчиків:
  - імпульси від енкодера Omron E6B2-CWZ6C-500 (500 імпл./об) перевіряються на наявність та форму сигналу HTL;
  - вихід датчика струму LEM LTS 300-NP (0–10 В) аналізується на відповідність діапазону.
4. Зв'язок із НМІ: підтвердження з'єднання з панеллю cMT-X3072 за протоколом Modbus TCP.
5. Аналіз історії аварій: читання останніх 50 записів із енергонезалежної пам'яті (8 КБ).



**Рис. 2.6. Алгоритм роботи контролера**  
(розроблено автором)

У разі успішного завершення діагностики на НМІ виводиться повідомлення «СИСТЕМА ГОТОВА ДО РОБОТИ». У разі аварії – генерується код помилки, відбувається відключення живлення ТСУ-2, а деталі відображаються на екрані сМТ-Х3072 червоним кольором зі звуковим попередженням.

### **2.5.2 Введення завдання швидкості**

Оператор задає швидкість обертання (від 20 до 600 об/хв) через сенсорний екран сМТ-Х3072. Значення проходить:

- валідацію: перевірка належності до діапазону 30:1;
- обмеження за масою виробу (згідно з табл. 1.1: при 20 об/хв – до 16 т, при 63 об/хв – до 8,8 т);
- перетворення в цифровий формат та збереження як уставки регулятора швидкості.

На екрані одночасно відображаються:

- задана та фактична швидкість;
- струм якоря;
- стан системи;
- прогнозований час досягнення усталеного режиму.

### **2.5.3 Вимірювання фактичної швидкості обертання**

Фактична швидкість визначається за сигналом від енкодера Omron E6B2-CWZ6C-500, який генерує 500 імпульсів на оберт. Контролер І-8088 автоматично застосовує один із трьох методів:

1. Метод інтервалу між імпульсами – для дуже низьких швидкостей (< 10 об/хв);
2. Підрахунок імпульсів за 0,1 с – для середніх і високих швидкостей;
3. Вимірювання часу на Z обертів – для точного позиціонування.

Виміряне значення фільтрується ковзним середнім (5 відліків) та зберігається як пфакт.

### 2.5.4 Розрахунок похибки регулювання

Похибка визначається як:

$$\varepsilon = n_{\text{зад}} - n_{\text{факт}} \quad (2.5)$$

Система порівнює  $|\varepsilon|/|\varepsilon|$  із зоною нечутливості  $\pm 2\%$  від  $n_{\text{зад}}$ . Наприклад, при  $n_{\text{зад}}=300$  об/хв – допустиме відхилення  $\pm 6$  об/хв.

Одночасно обчислюються:

- похідна  $d\varepsilon/dt$  – для випереджувального керування;
- інтегральна складова — для компенсації статичних помилок (тертя, люфти).

### 2.5.5 Формування керуючого впливу

Керуючий сигнал формується за ПІД-алгоритмом [14]:

$$U_{\text{кер}} = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon dt + K_d \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.6)$$

Коефіцієнти  $K_p, K_i, K_d$  підбираються емпірично з урахуванням інерції планшайби (до 16 т). Сигнал обмежується:

- зверху – 250 А (номінальний струм Д-810);
- знизу – мінімумом, що забезпечує стабільну роботу ТСУ-2.

Цифровий сигнал передається у модуль І-87017, де перетворюється в аналоговий сигнал 0-10 В (12-розрядний ЦАП) і подається на вхід тиристорного регулятора ТСУ-2.

### 2.5.6 Робота тиристорного регулятора ТСУ-2 та двигуна Д-810

Аналоговий сигнал 0 - 10 В керує СІФУ ТСУ-2, регулюючи кут відкриття тиристорів. Напруга з вторинної обмотки трансформатора ( $\sim 175$  В) випрямлюється мостом Ларіонова і надходить на якір двигуна через згладжувальний дросель ( $L \geq 10$  мГн).

Двигун Д-810 працює за принципом:

$$n = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} \quad (2.7)$$

Оскільки струм збудження підтримується постійним, швидкість практично пропорційна напрузі на якорі. Момент:

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \quad (2.8)$$

Планшайба обертається у діапазоні 4-100 об/хв (з урахуванням редукції).

### 2.5.7 Контроль струму та діагностика аварій

Струм якоря вимірюється датчиком LEM LTS 300-NP (точність  $\pm 0.5\%$ ) і передається в контролер через I-87017. При досягненні:

250 А – активується режим обмеження струму;

375 А – відбувається аварійне відключення.

Діагностикою охоплюються:

- відсутність імпульсів від енкодера;
- обрив збудження;
- втрата зв'язку з НМІ;
- вихід температури чи напруги за межі норми.

Усі аварії зберігаються в EEPROM із міткою часу.

### 2.5.8 Замкнений контур регулювання

Система реалізує двоконтурне регулювання:

- зовнішній контур – ПІ-регулятор швидкості;
- внутрішній контур – П-регулятор струму.

Така структура забезпечує:

- точність регулювання  $\pm 0.2\%$  (замість  $2\%$ );

- час регулювання  $< 1$  с;
- стійкість при зміні навантаження до 100%.

Алгоритм керування, реалізований на сучасній елементній базі (I-8088, Omron, LEM, Weintek, Mean Well), забезпечує високу точність, надійність, інтуїтивне керування та повну діагностику. Він повністю відповідає сучасним вимогам до модернізації промислового обладнання та дозволяє ефективно використовувати токарно-карусельний верстат 1Л532 після усунення зношеної коробки передач.

## **2.6 Економічне обґрунтування доцільності модернізації**

### **2.6.1 Розрахунок втрат від простоїв верстата**

Токарно-карусельний верстат 1Л532 через несправність зношеної механічної коробки передач простоює 36 годин на рік (3 години щомісяця).

Середня вартість однієї нормо-години роботи верстата – 950 грн/год (включаючи зарплату персоналу, накладні витрати та втрачену продуктивність, амортизація не входить, оскільки враховується окремо).

Прямі втрати від простоїв:

$$V_{\text{простою}} = t_{\text{пр}} \cdot C_{\text{год}} = 36 \cdot 950 = 34\,200 \text{ грн/рік} \quad (2.9)$$

### 2.6.2 Витрати на ремонт коробки передач

Таблиця 2.9

#### Витрати на ремонт коробки передач, грн/рік

| Стаття витрат                                      | Сума, грн/рік |
|----------------------------------------------------|---------------|
| Запасні частини (шестерні, підшипники, ущільнення) | 14 000        |
| Оплата праці ремонтників                           | 7 500         |
| Транспортування запчастин                          | 2 750         |
| <b>РАЗОМ</b>                                       | <b>24 250</b> |

Загальні річні втрати без модернізації:

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{простою}} + V_{\text{рем}} = 34\,200 + 24\,250 = 58\,450 \text{ грн/рік} \quad (2.10)$$

### 2.6.3 Кошторис капітальних витрат

Таблиця 2.10

#### Кошторис капітальних витрат

| № з/п | Найменування статті          | Одиниця виміру | Кількість | Ціна, тис. грн | Сума, тис. грн |
|-------|------------------------------|----------------|-----------|----------------|----------------|
| 1     | 2                            | 3              | 4         | 5              | 6              |
| 1     | Обладнання                   |                |           |                | 53,4           |
| 1.1   | Тиристорний регулятор ТСУ-2  | шт.            | 1         | 21,0           | 21,0           |
| 1.2   | Випрямляч збудження          | шт.            | 1         | 1,2            | 1,2            |
| 1.3   | Збудник Д-810                | шт.            | 1         | 1,5            | 1,5            |
| 1.4   | Згладжувальний дросель       | шт.            | 1         | 1,7            | 1,7            |
| 1.5   | Енкодер Omron E6B2-CWZ6C-500 | шт.            | 1         | 8,5            | 8,5            |
| 1.6   | Датчик струму LEM LTS 300-NP | шт.            | 1         | 4,5            | 4,5            |

Продовження табл.2.10

| 1                        | 2                                     | 3   | 4 | 5    | 6    |
|--------------------------|---------------------------------------|-----|---|------|------|
| 1.7                      | Контролер I-8088                      | шт. | 1 | 7,5  | 7,5  |
| 1.8                      | Модуль I-87017                        | шт. | 1 | 2,5  | 2,5  |
| 1.9                      | Блок живлення Mean Well RS-50-24      | шт. | 1 | 4,0  | 4,0  |
| 1.10                     | HMI-панель Weintek cMT-X3072          | шт. | 1 | 12,0 | 12,0 |
| 2                        | Проектні та програмні роботи          |     |   |      | 20,0 |
| 3                        | Монтажні та пусконаладжувальні роботи |     |   |      | 15,0 |
| 4                        | Транспортні витрати                   |     |   |      | 3,5  |
| 5                        | Непередбачені витрати (5%)            |     |   |      | 4,6  |
| Разом капітальних витрат |                                       |     |   |      | 96,5 |

Примітка: Вартість двигуна Д-810 не врахована, оскільки він є в наявності.

#### 2.6.4 Розрахунок амортизації

Амортизаційні відрахування розраховуються за [15] (група 4, строк корисного використання – 7 років, норма – 14,3%):

$$A = K \cdot N_a = 96,5 \cdot 0,143 = 13\,800 \text{ грн/рік} \quad (2.11)$$

## 2.6.5 Розрахунок експлуатаційних витрат

Таблиця 2.11

### Порівняння експлуатаційних витрат

| Стаття витрат           | До модернізації, грн/рік | Після модернізації, грн/рік |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Простої (36 год)        | 34 200                   | 0                           |
| Ремонт КП               | 24 250                   | 0                           |
| Технічне обслуговування | 4 000                    | 2 000                       |
| Електроенергія          | 829 227                  | 760 941                     |
| Амортизація             | 0                        | 13 800                      |
| Разом                   | 891 677                  | 776 741                     |

## 2.6.6 Економія електроенергії

Потужність двигуна – 55 кВт, завантаження – 60%, годин роботи – 2 000 год/рік.

ККД до модернізації –  $\eta_1 = 0,78$ , після –  $\eta_2 = 0,85$ .

Тариф на електроенергію (з ПДВ): 9,80 грн/кВт·год

Споживання до модернізації:

$$W_1 = \frac{P \cdot k_{\text{зав}} \cdot t}{\eta_1} = \frac{55 \cdot 0,6 \cdot 2000}{0,78} = \frac{0,7855 \cdot 0,6 \cdot 2000}{0,78} = 84615 \text{ кВт/год} \quad (2.12)$$

Споживання після модернізації:

$$W_1 = \frac{P \cdot k_{\text{зав}} \cdot t}{\eta_1} = \frac{55 \cdot 0,6 \cdot 2000}{0,85} = \frac{0,7855 \cdot 0,6 \cdot 2000}{0,85} = 77647 \text{ кВт/год} \quad (2.13)$$

Економія електроенергії:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = 84\,615 - 77\,647 = 6\,968 \text{ кВт/год/рік} \quad (2.14)$$

$$E_{\text{ел}} = \Delta W \cdot C_{\text{ел}} = 6\,968 \cdot 9,8 = 68\,286 \text{ грн/рік} \quad (2.15)$$

### 2.6.7 Екологічний ефект у грошовому еквіваленті

Скорочення викидів CO<sub>2</sub> (коефіцієнт емісії – 0,5 кг CO<sub>2</sub>/кВт·год):

$$\Delta \text{CO}_2 = \Delta W \cdot 0,5 = 6\,968 \cdot 0,5 = 3,484 \text{ т/рік} \quad (2.16)$$

Грошова економія за за внутрішньою ESG-ціною ПАТ "АМКР"  
(3900грн/т):

$$E_{\text{еко}} = 3,484 \cdot 3900 = 13\,588 \text{ грн/рік} \quad (2.17)$$

### 2.6.8 Загальна річна економія

$$E_{\text{заг}} = V_{\text{заг}} + E_{\text{ел}} + E_{\text{еко}} = 58\,450 + 68\,286 + 13\,588 = 140\,324 \text{ грн/рік} \quad (2.19)$$

Чиста річна економія:

$$E_{\text{чист}} = E_{\text{заг}} - A = 140\,324 - 13\,800 = 126\,524 \text{ грн/рік} \quad (2.20)$$

Термін окупності:

$$T_{\text{окуп}} = K / E_{\text{чист}} = 96\,500 / 126\,524 = 0,76 \text{ року} \approx 9 \text{ місяців} \quad (2.20)$$

**Підсумкові техніко-економічні показники модернізації**

| №   | Показник                           | Одиниця виміру | До модернізації | Після модернізації | Зміна (+/–) |
|-----|------------------------------------|----------------|-----------------|--------------------|-------------|
| 1   | Експлуатаційні витрати             |                |                 |                    |             |
| 1.1 | Витрати від простоїв               | грн/рік        | 34 200          | 0                  | –34 200     |
| 1.2 | Витрати на ремонт КП               | грн/рік        | 24 250          | 0                  | –24 250     |
| 1.3 | Технічне обслуговування            | грн/рік        | 4 000           | 2 000              | –2 000      |
| 1.4 | Витрати на електроенергію          | грн/рік        | 829 227         | 760 941            | –68 286     |
| 1.5 | Амортизаційні відрахування         | грн/рік        | 0               | 13 800             | +13 800     |
|     | Разом експлуатаційні витрати       | грн/рік        | 891 677         | 776 741            | –114 936    |
| 2   | Економічний ефект                  |                |                 |                    |             |
| 2.1 | Економія від усунення простоїв     | грн/рік        | –               | 34 200             | +34 200     |
| 2.2 | Економія на ремонті КП             | грн/рік        | –               | 24 250             | +24 250     |
| 2.3 | Економія електроенергії            | грн/рік        | –               | 68 286             | +68 286     |
| 2.4 | Екологічний ефект (ESG)            | грн/рік        | –               | 13 588             | +13 588     |
|     | Валова річна економія              | грн/рік        | –               | 140 324            | –           |
| 2.5 | Амортизаційні витрати              | грн/рік        | –               | –13 800            | –13 800     |
|     | Чиста річна економія               | грн/рік        | –               | 126 524            | –           |
| 3   | Інвестиційні показники             |                |                 |                    |             |
| 3.1 | Капітальні витрати                 | тис. грн       | –               | 96,5               | +96,5       |
| 3.2 | Термін окупності                   | місяців        | –               | 9                  | –           |
| 4   | Технічні показники                 |                |                 |                    |             |
| 4.1 | Діапазон регулювання швидкості     | –              | 6:1             | 30:1               | +24         |
| 4.2 | Похибка регулювання швидкості      | %              | 1,5             | ≤ 0,2              | –1,3        |
| 4.3 | Простої обладнання                 | год/рік        | 36              | 0                  | –36         |
| 5   | Енерго-екологічні показники        |                |                 |                    |             |
| 5.1 | Споживання електроенергії          | кВт·год/рік    | 84 615          | 77 647             | –6 968      |
| 5.2 | Скорочення викидів CO <sub>2</sub> | т/рік          | –               | 3,48               | +3,48       |
| 5.3 | Строк служби обладнання            | років          | –               | 7–10               | –           |

Модернізація головного приводу верстата 1Л532 за запропонованим варіантом:

- забезпечує чисту річну економію 126 524 грн;
- має термін окупності 9 місяців;
- повністю усуває простої через несправність коробки передач;
- підвищує точність регулювання до 0,2%;
- реалізує екологічну економію в рамках ESG-стратегії.

Цей проєкт є економічно доцільним, технічно реалізовним і повністю відповідає вимогам сучасної промислової автоматизації.

## **2.7 Охорона праці**

Безпечна експлуатація модернізованого токарно-карусельного верстата 1Л532 вимагає системного підходу до охорони праці, що включає аналіз небезпек, технічні та організаційні заходи, а також виконання вимог законодавства України.

### **2.7.1 Аналіз небезпечних факторів**

У процесі експлуатації верстата на персонал впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Електричний струм – у силових колах присутня напруга 380 В змінного струму та 220 В постійного струму, що створює ризик ураження струмом при несправності ізоляції або під час обслуговування.

2. Рухомі частини – обертова планшайба діаметром 2800 мм з частотою обертання до 100 об/хв несе ризик механічних травм.

3. Підвищена температура – нагрів тиристорного регулятора ТСУ-2, двигуна Д-810 та силового трансформатора.

4. Електромагнітні поля – від силових кабелів та двигуна постійного струму.

5. Шум і вібрація – при обробці металу (рівень шуму до 85 дБА).

6. Ризик виникнення пожежі – через іскріння в колекторі двигуна та перевантаження силових елементів.

Найбільш імовірні аварійні ситуації: контакт із рухомою частиною, коротке замикання в силовій шафі, перегрів обладнання.

### **2.7.2 Заходи з усунення небезпечних факторів**

Для нейтралізації зазначених ризиків реалізовано комплекс заходів:

Електробезпека:

- загальне заземлення всіх металевих корпусів (опір  $\leq 4$  Ом);
- гальванічна ізоляція між силовими та керуючими колами (від 3 до 4 кВ);
- використання автоматичних вимикачів з характеристикою C16;
- блокування живлення при відкритті дверей шафи керування.

Механічна безпека:

- сталева огорожа планшайба з дверцятами, оснащеними мікроперемикачами (при відкритті – аварійний стоп);
- двоконтурне гальмування (електричне + механічне);
- аварійний вимикач «Стоп» на пульті та корпусі верстата.

Термічний захист:

- датчики температури на двигуні та ТСУ-2;
- автоматичне відключення при температурі  $> 90^{\circ}\text{C}$ .

Усі аварійні стани відображаються на НМІ-панелі cMT-X3072 з поясненням українською мовою.

### **2.7.3 Організація засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та медичних оглядів**

Згідно з [20], для працівників електроремонтного цеху передбачено:

ЗІЗ за нормами:

- діелектричні рукавиці (щомісяця);
- захисні окуляри (при роботі з абразивними матеріалами);
- навушники (при шумі > 80 дБА);
- спецодяг із діелектричними властивостями.

Медичні огляди:

- перед початком роботи – обов’язковий;
- періодичні – 1 раз на 2 роки (для електротехнічного персоналу);
- позапланові – після аварії або скарг на самопочуття.

Видача ЗІЗ здійснюється через спецодяговий склад цеху з реєстрацією в особистій картці працівника.

#### **2.7.4 Пожежна безпека**

Згідно з [21], у приміщенні, де розташований верстат, забезпечено:

Первинні засоби пожежогасіння:

- вуглекислотний вогнегасник ВВ-5 – 1 шт.;
- порошковий вогнегасник ВП-4 – 1 шт.

Сигналізація: димові датчики, підключені до центральної пожежної станції підприємства.

Евакуаційні виходи: дві двері, розташовані на відстані 15 м одна від одної, з аварійним освітленням.

Кабельна продукція виконана з вогнестійкої ізоляції (маркування нг(А)-LS), що знижує ризик поширення полум’я.

Впровадження запропонованих заходів забезпечує:

- повну відповідність вимогам [22];
- виключення ураження електричним струмом, механічних травм та пожеж;
- ефективну організацію використання ЗІЗ та медичного контролю.

Модернізація не лише підвищує технічну ефективність, а й суттєво покращує умови та безпеку праці обслуговуючого персоналу.



## ВИСНОВКИ

У роботі було поставлено мету – модернізувати головний привод токарно-карусельного верстата 1Л532 шляхом заміни зношеної механічної коробки передач на регульований електропривод із безступінчастим регулюванням швидкості.

Розглянуто три технічні варіанти реалізації:

1. Асинхронний двигун + частотний перетворювач (SINAMICS G120);
2. Двигун постійного струму + тиристорний перетворювач КТЕ-100/220;
3. Двигун постійного струму Д-810 + тиристорний регулятор напруги ТСУ-2.

На основі комплексного техніко-економічного аналізу обрано третій варіант як найбільш економічно ефективний (загальна вартість обладнання – 53,4 тис. грн, капітальні витрати – 96,5 тис. грн) і технічно реалізований у умовах електроремонтного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Запропоновано мікропроцесорну систему керування на базі ПЛК І-8088, яка забезпечує:

- безступінчасте регулювання швидкості у діапазоні 30:1;
- точність підтримки швидкості  $\leq 0,2 \%$  (замість 2% за стандартом);
- повну діагностику аварій (обрив збудження, відсутність сигналу енкодера, перевантаження);
- інтуїтивний інтерфейс через НМІ-панель Weintek cMT-X3072.

Економічний ефект модернізації становить:

- виключення простоїв (36 год/рік);
- економія на ремонті КП – 24,25 тис. грн/рік;
- зниження споживання електроенергії – 6 968 кВт·год/рік;
- загальна річна економія – 126 524 грн (чиста, після амортизації);
- термін окупності – 9 місяців.

Крім того, реалізовано заходи з охорони праці, пожежної безпеки та екологічної відповідності (скорочення викидів CO<sub>2</sub> на 3,48 т/рік).

Таким чином, запропоноване рішення є економічно доцільним, технічно надійним та відповідає сучасним вимогам індустріальної автоматизації, ESG-стандартам та безпеки праці.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гольдберг О. Д., Гурін Я. С., Свіріденко І. С. Проектування електроприводів: навч. посібник. – 2-ге вид., доп. – Київ: Каравела, 2019. – 448 с.
2. Москаленко В. В. Автоматизований електропривод: підручник. – 6-те вид., перероб. і доп. – Київ: КНЕУ, 2021. – 430 с.
3. ДСТУ EN 60204-1:2019 Безпека машин. Електрообладнання машин. Частина 1: Загальні вимоги (EN 60204-1:2018, IDT). – Київ, 2019. – 98 с.
4. Копилов С. П., Козорез Ю. О. Автоматизований електропривод. Теорія та практика. – Харків: Фоліо, 2018. – 543 с.
5. Siemens AG. SINAMICS G120: Technical documentation. – 2024. – Режим доступу: <https://new.siemens.com/global/en/products/drives/low-voltage/sinamics-g120.html>
6. ICP DAS. Industrial Drives & Thyristor Control Systems: Application Note. – Taiwan, 2023. – 32 p.
7. ГОСТ 28215-89 Електродвигуни постійного струму серії Д. Технічні умови. – Чинний.
8. Ситник В. О., Денисюк С. П., Лисенко В. В. Мікропроцесорні системи керування в промисловій автоматизації. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 312 с.
9. Бабенко М.А., Коротченков В.М., Носиків В.Л. і ін., Вимір швидкості обертання валків прокатних клітей на основі засобів мікропроцесорної техніки, Металург. і горноруд. Пром-ть- 2002- № 1, с.43-45.
10. Omron Corporation. E6B2-CWZ6C Rotary Encoder Datasheet. – 2025. – Режим доступу: <https://www.omron.com>
11. ICP DAS. I-8088 Embedded Controller User Manual. – 2024. – Режим доступу: <https://www.icpdas.com>
12. LEM International. LTS 300-NP Current Transducer Datasheet. – 2025. – Geneva, Switzerland.
13. Mean Well Enterprises Co., Ltd. RS-50 Series Switching Power Supply Specification. – 2025. – Тайвань. – Режим доступу: <https://www.meanwell.com>

14. Башарин А. В. Перехідні процеси в системах підпорядкованого регулювання електроприводів. – Київ: Техніка, 2020. – 210 с.
15. Податковий кодекс України. Стаття 138. Норми амортизації. – К.: Верховна Рада України, 2025.
16. Довідник технічного персонала ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Внутрішній документ № АМ-ЕР-2025.
17. Офіційний прейскурант компанії «Sensor Ukraine». Каталог промислового обладнання. Січень 2026.
18. Energy Efficiency in Industrial Drives / LEM International, 2024.
19. Mean Well Enterprises. RS-50 Series Technical Manual. Taiwan, 2025.
20. Наказ Міністерства соціальної політики України «Про затвердження Типових норм видачі засобів індивідуального захисту» № 298 від 10.06.2020.
21. Правила пожежної безпеки в Україні. Затв. Наказом МНС України № 344 від 25.03.2021.
22. Закон України «Про охорону праці» та ДСТУ EN 60204-1:2019
23. С. Гушко. Вимоги з оформлення письмових робіт у державному університеті економіки і технологій. Затверджено Науково-методичною радою Державного університету економіки і технологій (протокол №2 від «08» грудня 2020р.). Навч. посібник. Кривий Ріг, 2020.-53с.



Звіт подібності

Метадані

|                                              |                    |                                              |                  |              |
|----------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|------------------|--------------|
| Назва організації                            |                    | підрозділ                                    |                  |              |
| STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY |                    | STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY |                  |              |
| Заголовок                                    |                    |                                              |                  |              |
| 174-Зд-2026вrm                               |                    |                                              |                  |              |
| Автор                                        |                    | Науковий керівник / Експерт                  |                  |              |
| 174-Зд-2026вrm                               |                    | Молдло Є.О.                                  |                  |              |
| Кількість слів                               | Кількість символів | Дата звіту                                   | Дата редагування | ІД документа |
| 7334                                         | 53432              | 1/13/2026                                    | 1/13/2026        | 333099481    |

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

|                        |  |    |
|------------------------|--|----|
| Заміна букв            |  | 67 |
| Інтервали              |  | 0  |
| Мікропробіли           |  | 0  |
| Білі знаки             |  | 0  |
| Парафрази (SmartMarks) |  | 6  |

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

| 10 найдовших фраз   |                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                           | Колір тексту |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------|
| ПОРЯДКОВИЙ<br>НОМЕР | НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)                                                                                                                                                                                                                                    | КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ<br>СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ) |              |
| 1                   | 151-10д-д<br>1/13/2025<br>STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY (STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY)                                                                                                                                                       | 17 0.23 %                                 |              |
| 2                   | <a href="https://www.amkrprof.org.ua/news/rezolyuciya-akcii-protestu-trudovikh-kolektiviv-pat-arselormittal-kriviy-rig-pp-stil-servis-0">https://www.amkrprof.org.ua/news/rezolyuciya-akcii-protestu-trudovikh-kolektiviv-pat-arselormittal-kriviy-rig-pp-stil-servis-0</a> | 13 0.18 %                                 |              |

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій  
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату  
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Лебідь Олег Сергійович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська (бакалаврська) робота (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений(а). Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

01.06. 2025