

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських
технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Світлана ГУРКОВСЬКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Мехатроніка у гірничо-металургійному комплексі» за спеціальністю
133 Галузеве машинобудування
**на тему: «Підвищення точності механообробки токарного верстата
16K20 шляхом модернізації електропривода головного руху»**

Керівник роботи

Олексій РАЗЖИВІН

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними.*

Здобувач

Ігор ЛІТАВРІН

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Олег БОНДАР

Запоріжжя 2026



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських технологій
Кафедра	автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	бакалавр
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
ОПП	Мехатроніка у гірничо-металургійному комплексі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Світлана ГУРКОВСЬКА

«09» березня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Літаврін Ігор Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи (проєкту) Підвищення точності механообробки токарного верстату 16K20 шляхом модернізації електропроводу головного руху
керівник роботи (проєкту) Разживін Олексій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент

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

затверджені наказом Університету від 23.02.2026 р. № 41/23.02.2026

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 22.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з обраної тематики, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» м. Запоріжжя, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз конструкцій та систем керування обладнанням верстату. 2. Розробка мехатронної системи керування головним електроприводом верстата. 3. Моделювання та дослідження системи керування. 4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження мехатронної системи керування електроприводом. 5. Охорона праці та безпека експлуатації обладнання. Висновки. Додатки

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу: презентація за темою кваліфікаційної роботи та креслення: 1. Загальний вигляд верстата – креслення, формат А3 – 1 арк. 2. Кінематична схема верстата – схема, формат А3 – 1 арк. 3. Математична модель частотного електроприводу головного руху верстату – модель (візуалізація), формат А3 – 1 арк. 4. Структурна схема мехатронної системи керування головним приводом електроприводом – схема, формат А3 – 1 арк. 5. Функціональна системи керування електроприводом верстата – схема, формат А3 – 1 арк. 6. Електричні схеми системи керування (розміщення контролера, частотного перетворювача, комутаційної апаратури) – креслення, формат А3 – 1 арк.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.


Розділ	Консультант (прізвище, ініціали та посада)

7. Дата видачі завдання 09 березня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проекта)	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Аналіз конструкцій та систем керування обладнанням верстата	20.04.2026 – 24.04.2026
2	Розділ 2. Розробка мехатронної системи керування електроприводом верстата	27.04.2026– 01.05.2026
3	Розділ 3. Моделювання та дослідження системи керування	04.05.2026 – 08.05.2026
4	Розділ 4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження мехатронної системи керування електроприводом верстата	11.05.2026 – 15.05.2026
5	Розділ 5. Охорона праці та безпека експлуатації обладнання	18.05.2026 – 22.05.2026
6	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	25.05.2026 – 29.05.2026
7	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	01.06.2026 – 05.06.2026
8	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу	08.06.2026– 12.06.2026
8	Рецензування завершеної роботи.	15.06.2026 – 19.06.2026
9	Захист	22.06.2026 – 26.06.2026

Здобувач



 (підпис)

Ігор ЛІТАВРІН

 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи



 (підпис)

Олексій РАЗЖИВІН

 (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Літаврін Ігор Володимирович. Підвищення точності механообробки токарного верстата 16K20 шляхом модернізації електропривода головного руху. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». ОПП «Мехатроніка у гірничо-металургійному комплексі». ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження – процес керування головним електроприводом токарно-гвинторізного верстата 16K20 в умовах ремонтно-механічної дільниці ПАТ «Запоріжсталь».

Предмет дослідження – мехатронна система керування електроприводом головного руху на базі частотного перетворювача з векторним керуванням.

У першому розділі здійснено комплексний аналіз конструкції токарно-гвинторізного верстата 16K20, його кінематичної схеми головного руху та основних технічних характеристик. Проведено порівняльний аналіз релейно-контакторної, скалярної та векторної систем керування, що дозволило науково обґрунтувати доцільність переходу на векторне частотне керування.

У другому розділі розроблено структуру мехатронної системи керування на базі частотного перетворювача з векторним керуванням. Обґрунтовано вибір елементної бази, зокрема частотного перетворювача Danfoss VLT AutomationDrive FC 302 (15 кВт, алгоритм VVC+, sensorless) та програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200.

У третьому розділі побудовано математичну модель частотного електропривода в орієнтованій системі координат d–q з ідентифікацією параметрів асинхронного двигуна АО2-61-4. Виконано комп'ютерне моделювання динамічних процесів у середовищі MATLAB/Simulink із порівнянням режимів прямого пуску та векторного керування.

У четвертому розділі виконано розрахунок капітальних витрат на впровадження системи, які становлять 98 250 грн. Визначено структуру річного економічного ефекту в обсязі 64 356 грн, основним джерелом якого є зниження рівня шлюбу продукції. Підтверджено високу економічну ефективність та інвестиційну привабливість проекту.

У п'ятому розділі проведено аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації модернізованого верстата. Забезпечено відповідність системи керування вимогам чинних нормативних документів.

ТОКАРНИЙ ВЕРСТАТ 16K20, ЕЛЕКТРОПРИВОД ГОЛОВНОГО РУХУ, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МЕХАТРОННА СИСТЕМА, ТОЧНІСТЬ МЕХАНООБРОБКИ, MATLAB/SIMULINK, МОДЕРНІЗАЦІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯМ ВЕРСТАТА	7
1.1 Загальна характеристика токарного верстата 16K20 та його призначення	7
1.2 Аналіз конструкції та кінематичної схеми верстата	10
1.3 Огляд існуючих систем керування електроприводом головного руху	13
1.4 Недоліки існуючого електропривода та обґрунтування необхідності модернізації	15
2 РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГОЛОВНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕРСТАТА	18
2.1 Вибір та обґрунтування структури мехатронної системи керування.....	18
2.2 Вибір частотного перетворювача та перевірка двигуна.....	20
2.3 Вибір контролера та розробка функціональної схеми системи керування.....	23
2.4 Розробка схеми системи керування	26
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	28
3.1 Математична модель частотного електропривода	28
3.2 Комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab/Simulink.....	30
3.3 Аналіз результатів моделювання та оцінка точності механообробки	33
4.1 Розрахунок витрат на впровадження мехатронної системи	35
4.2 Оцінка економічного ефекту від підвищення точності.....	36
4.3 Розрахунок терміну окупності та техніко-економічні показники	39
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ.....	41
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів.....	41
5.2 Вимоги безпеки до мехатронної системи керування.....	42
5.3 Заходи з електробезпеки та захисту від ураження електричним струмом.....	43
ВИСНОВКИ	45
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47
ДОДАТОК А ЦИКЛОГРАМА РОБОТИ ВЕРСТАТА ТА РОЗРАХУНКОВІ РЕЖИМИ РІЗАННЯ.....	48
ДОДАТОК Б НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧП DANFOSS VLT AUTOMATIONDRIVE FC 302 ДЛЯ ВЕРСТАТА 16K20	50
ДОДАТОК В ПЕРЕЛІК ТА ОПИС АРКУШІВ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ	52

ВСТУП

Токарно-гвинторізний верстат моделі 16К20 є одним із найпоширеніших видів металорізального обладнання в машинобудівних та ремонтних виробництвах. У ремонтно-механічній дільниці цеху холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» він виконує широкий спектр операцій: точіння зовнішніх і внутрішніх поверхонь, підрізання торців, нарізання різьби та свердління. Ці операції є критичними при відновленні валів прокатних станів, виготовленні ремонтних кріплень і деталей механізмів. Верстат введено в експлуатацію наприкінці 1970-х років. Електропривод головного руху побудовано на релейно-контакторній схемі (РКЛ): асинхронний двигун АО2-61-4 підключається безпосередньо до мережі 380 В через реверсивну пару пускачів ПМЕ-211. За понад 40 років експлуатації ця схема не зазнала принципових змін. Наслідком стали хронічні проблеми: нестабільна частота обертання шпинделя (відхилення $\pm 2,1$ % від заданої), надмірні пускові струми ($5,8 \times I_n$), механічні удари при реверсуванні та відсутність плавного регулювання швидкості.


Ці проблеми безпосередньо впливають на якість продукції. Нестабільність швидкості шпинделя – головна причина підвищеної шорсткості обробленої поверхні ($R_a = 3,2\text{--}4,0$ мкм при паспортному значенні $1,6\text{--}2,5$ мкм) та зниження класу точності нарізаної різьби. Щорічний позачерговий ремонт коробки швидкостей через механічні удари при реверсуванні свідчить про прискорений знос обладнання. Сучасний підхід до вирішення цих проблем – впровадження частотного перетворювача з векторним керуванням. На відміну від прямого пуску, частотний електропривод забезпечує: плавний розгін і гальмування; стабільну швидкість обертання при змінному навантаженні; повний момент при нульових оборотах; безударне реверсування; суттєву економію електроенергії на холостому ході. При цьому механічне обладнання верстата – станина, коробка швидкостей, шпиндельний вузол – залишається без змін. Це дозволяє досягти мети з мінімальними капітальними витратами.

Актуальність роботи визначається потребою підприємств гірничо-металургійного комплексу у підвищенні ефективності наявного металорізального обладнання без значних інвестицій у нові верстати. Результати дослідження безпосередньо застосовні до верстатів 16К20, що перебувають в експлуатації на ПАТ «Запоріжсталь».

Мета роботи – розробка та дослідження мехатронної системи керування електроприводом головного руху токарного верстата 16К20, що забезпечує підвищення точності механообробки та стабільності швидкісного режиму шпинделя.

Завдання дослідження:

- 1) провести аналіз конструкції та кінематичної структури верстата 16К20, визначити вплив кінематичного ланцюга на точність обробки;

- 
- 2) виявити та систематизувати недоліки існуючої релейно-контакторної системи керування, оцінити їх вплив на якість продукції;
 - 3) розробити структуру та склад мехатронної системи керування на базі частотного перетворювача з векторним керуванням;
 - 4) вибрати та обґрунтувати елементну базу системи: частотний перетворювач, програмований логічний контролер, захисні пристрої;
 - 5) побудувати математичну модель частотного електропривода та дослідити перехідні процеси методом комп'ютерного моделювання;
 - 6) оцінити підвищення точності механообробки за результатами моделювання;
 - 7) провести техніко-економічне обґрунтування модернізації та розрахувати термін окупності;
 - 8) розробити заходи з охорони праці та електробезпеки при експлуатації модернізованого обладнання.

Об'єкт дослідження – процес керування головним електроприводом токарного верстата 16K20 в умовах ремонтно-механічного виробництва.

Предмет дослідження – мехатронна система керування із застосуванням частотного перетворювача та безсенсорного векторного регулювання швидкості.

Методи дослідження: теорія автоматичного керування, теорія електропривода, аналітичний метод розрахунку режимів різання, комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab/Simulink R2024b з використанням бібліотеки Simscape Electrical.

Практичне значення результатів полягає в можливості безпосереднього впровадження розробленої системи на верстатах 16K20 ПАТ «Запоріжсталь». Отримані рішення з вибору елементної бази, параметрів регулятора та налаштувань частотного перетворювача можуть слугувати методичним посібником для інженерів з модернізації металорізального обладнання.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку посилань та чотирьох додатків. Загальний обсяг – 59 сторінок. Графічна частина містить 6 аркушів формату А3.



1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯМ ВЕРСТАТА

1.1 Загальна характеристика токарного верстата 16К20 та його призначення

Токарно-гвинторізний верстат 16К20 є представником токарної групи металорізального обладнання, що випускалося Московським верстатобудівним заводом «Червоний Пролетарій» з 1971 року. Верстат відноситься до класу нормальної точності (клас «Н»). Розшифровка позначення моделі: «1» – токарна група, «6» – токарно-гвинторізний тип, «К» – серія (модернізація відносно моделі 1К62), «20» – висота центрів над станиною 200 мм [1].

В умовах ремонтно-механічної дільниці цеху холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» верстат виконує такі технологічні операції:

- точіння зовнішніх циліндричних та конічних поверхонь;
- підрізання торців і уступів;
- розточування внутрішніх поверхонь і канавок;
- нарізання метричної, дюймової, модульної різьби;
- свердління, зенкерування та розгортання отворів інструментом, закріпленим у пінолі задньої бабки;
- відрізання та прорізання канавок.

Зазначені операції є основними при відновленні валів прокатних станів, виготовленні ремонтних втулок, підшипникових посадок та різьбових кріплень. Ці деталі мають підвищені вимоги до точності розмірів і шорсткості поверхонь, що робить стабільність швидкісного режиму шпинделя критично важливим параметром.

Конструктивно верстат складається з таких основних вузлів: чавунна лита станина коробчастого перерізу; передня (шпindelна) бабка з коробкою швидкостей; коробка подач; фартух із механізмом подачі і нарізання різьби; поздовжній та поперечний супорти з різцетримачем; задня бабка; система охолодження (помпа та трубопроводи). Напрямні станини загартовані струмами високої частоти (СВЧ), що забезпечує підвищену зносостійкість. Шпindel змонтовано на прецизійних підшипниках: конічних роликів ззаду та радіально-упорних спереду. У паспортному стані радіальне биття шпинделя не перевищує 0,01 мм, осьове – 0,01 мм.

Номинальна потужність асинхронного двигуна головного руху АО2-61-4 – 11 кВт. Діапазон частот обертання шпинделя охоплює 22 ступені від 12,5 до 1600 об/хв. Такий широкий діапазон забезпечує оброблення заготовок різних діаметрів (від 20 до 400 мм над станиною) та матеріалів (сталь, чавун, кольорові метали, пластик) при оптимальній швидкості різання.

Технічні характеристики токарного верстата 16К20 приведено в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики токарного верстата 16K20

№	Параметр	Од. вим.	Значення
1	Висота центрів над станиною	мм	200
2	Найбільший діаметр заготовки над станиною	мм	400
3	Найбільший діаметр заготовки над супортом	мм	220
4	Найбільша довжина оброблюваної заготовки (РМЦ)	мм	1 000
5	Діапазон частот обертання шпинделя, прямий хід	об/хв	12,5–1 600
6	Кількість ступенів частоти обертання шпинделя	шт	22
7	Потужність двигуна головного руху	кВт	11
8	Тип двигуна головного руху	–	АО2-61-4
9	Подача поздовжня (діапазон)	мм/об	0,07–4,16
10	Подача поперечна (діапазон)	мм/об	0,035–2,08
11	Кількість ступенів подач	шт	42
12	Найбільше зусилля різання (поздовжнє)	Н	5 884
13	Клас точності	–	Н (нормальна)
14	Маса верстата (без РМЦ)	кг	2 835
15	Габаритні розміри Д × Ш × В	мм	2780 × 1166 × 1325

Паспортна шорсткість обробленої поверхні при чистовому точінні становить $R_a = 1,6\text{--}2,5$ мкм. Однак у реальних умовах через нестабільну роботу приводу головного руху цей показник систематично погіршується до $R_a = 3,2\text{--}4,0$ мкм, що й зумовлює необхідність модернізації [2].

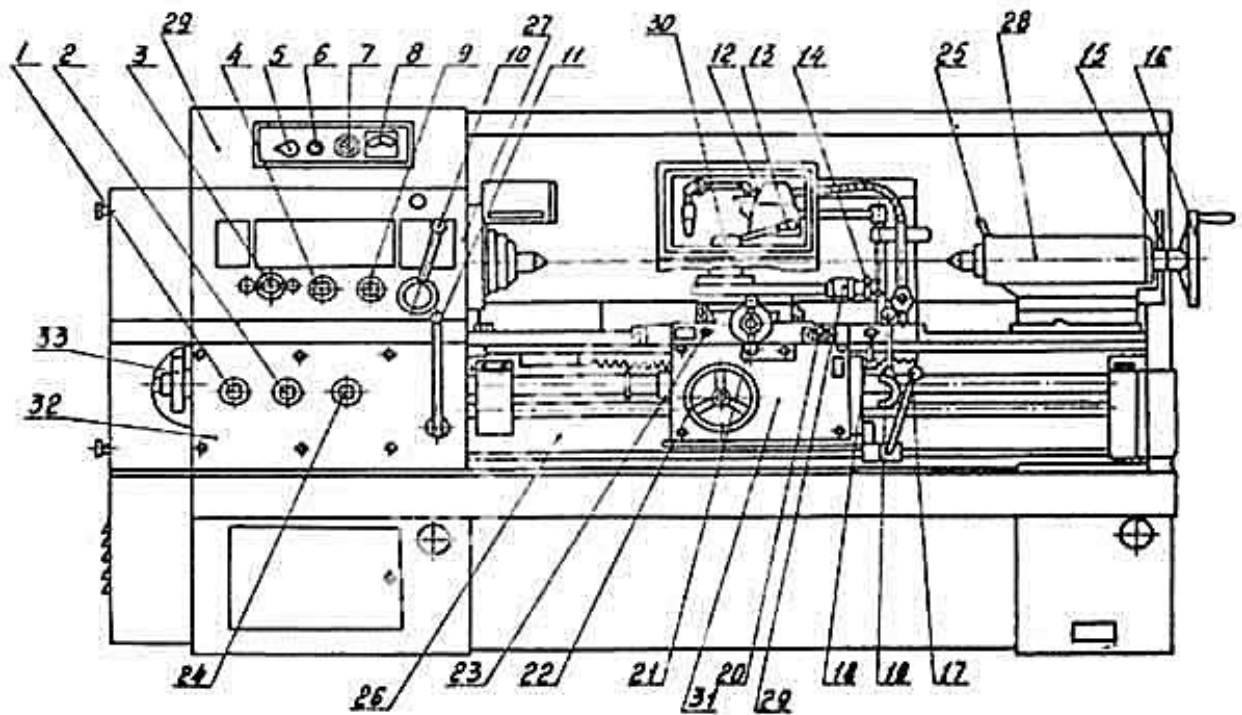


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд токарного верстата 16K20

На рисунку 1.1 приведено наступні умовні позначення:

- 1 - рукоятка встановлення величини подачі та кроку різьблення;
- 2, 3 - рукоятка встановлення виду робіт: подачі та типу різьби;
- 4 - рукоятка встановлення числа обертів шпинделя;
- 5 - рукоятка встановлення нормального, збільшеного кроку різьблення та положення при розподілі багатозахідних різьблень;
- 6 - вступний автоматичний вимикач;
- 7 - сигнальна лампа;
- 8 - вимикач електронасоса подачі охолоджувальної рідини;
- 9 - покажчик навантаження верстата;
- 10 - рукоятка встановлення правого та лівого різьблення;
- 11 - рукоятка встановлення ряду чисел оборотів шпинделя;
- 12 - рукоятка управління фрикційною муфтою головного приводу (зблокована з рукояткою 17);
- 13 - вимикач лампи місцевого освітлення;
- 14 - рукоятка повороту та закріплення індексованої різцевої головки;
- 15 - рукоятка ручного переміщення різцевих санчат супорта;
- 16 - рукоятка кріплення пінолі задньої бабки до станини;
- 17 - маховик переміщення пінолі задньої бабки;
- 18 - рукоятка керування фрикційною муфтою головного приводу (зблокована з рукояткою 11);
- 19 - рукоятка увімкнення та вимкнення гайки ходового гвинта;
- 20 - рукоятка управління механічними переміщеннями каретки та поперечних санок супорта;

- 21 - кнопкова станція включення та вимкнення електродвигуна головного приводу;
- 22 - рукоятка ручного переміщення поперечних санчат супорта;
- 23 - маховик ручного переміщення каретки;
- 24 - кнопка золотника мастила направляючих каретки та поперечних санок супорта;
- 25 - рукоятка установки величини подачі та кроку різьблення та відключення механізму коробки подач при нарізанні різьблення безпосередньо;
- 26 - рукоятка затискача пінолі задньої бабки

1.2 Аналіз конструкції та кінематичної схеми верстата

Кінематичний ланцюг головного руху верстата 16K20 передає потужність від двигуна АО2-61-4 до шпинделя через дві послідовні групи передач: клинопасову та коробку швидкостей (див. рис.1.2, 1.3) Клинопасова передача. Двигун АО2-61-4 ($N_{\text{ел}} = 1460$ об/хв) передає потужність на вхідний вал коробки швидкостей через клинопасову передачу з передаточним числом $i_0 = 1/2$. Частота обертання на вхідному валу: $n_1 = 1460 \times 0,5 = 730$ об/хв. Клинові паси типу В (три паси) передають момент з допустимим пружним проковзуванням до 1 % від номінальної частоти.

Коробка швидкостей. Конструктивно складається з чотирьох валів і трьох груп рухливих блоків шестерень. Перша група – двоступінчастий блок ($z = 56/z = 38$ або $z = 27$): два передаточних відношення. Друга група – триступінчастий блок ($z = 43/z = 51/z = 38$): три передаточних відношення. Третя група – двоступінчастий блок для вибору прямого чи переборного ряду ($i = 1$ або $i = 1/4$).

Розрахунок кількості ступенів частоти обертання шпинделя:

$$Z_{\text{заг}} = 2 \times 3 \times (1 + 1) = 2 \times 3 \times 2 = 12 \text{ (без перебору)} + 12 \text{ (з перебором)} = 24.$$

Через збіг двох ступенів при $n = 500$ та $n = 630$ об/хв фактична кількість становить:

$$Z_{\text{роб}} = Z_{\text{заг}} - 2 = 24 - 2 = 22 \text{ ступені.}$$

Передаточне відношення переборного ряду: $i_{\text{п}} = 1/4 = 0,25$. Максимальна частота обертання шпинделя: $n_{\text{макс}} = 730 \times i_{\text{КШмакс}}$, де $K_{\text{Шмакс}}$ – максимальне передаточне відношення коробки швидкостей без перебору.

Шлях передачі для отримання $n = 400$ об/хв (найпоширеніший режим чорнового точіння): двигун \rightarrow клинопасова ($i_0 = 0,5$) \rightarrow блок 1 (z_1/z_2 відповідне) \rightarrow блок 2 (z_3/z_4) \rightarrow переборний ряд \rightarrow шпиндель.

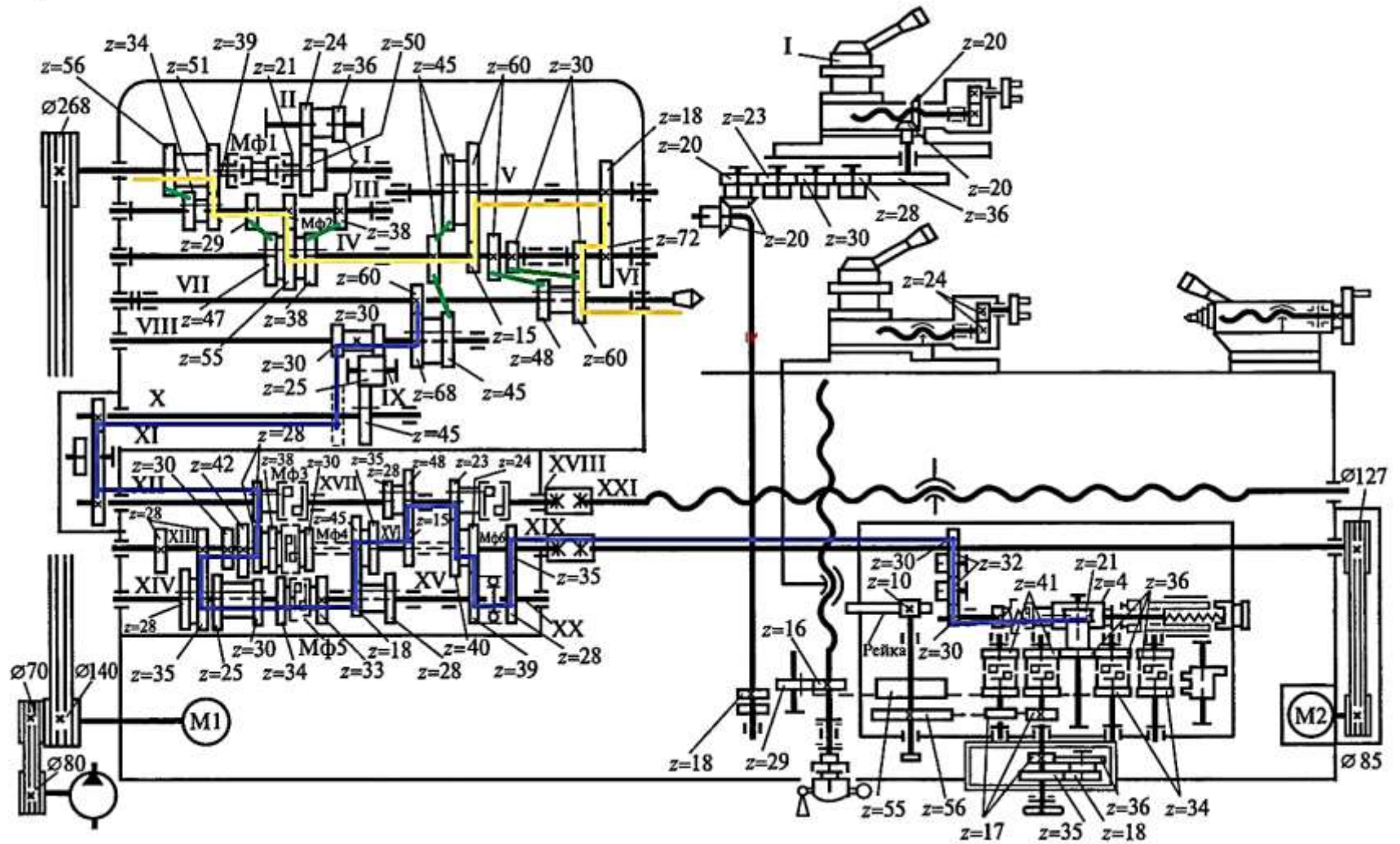
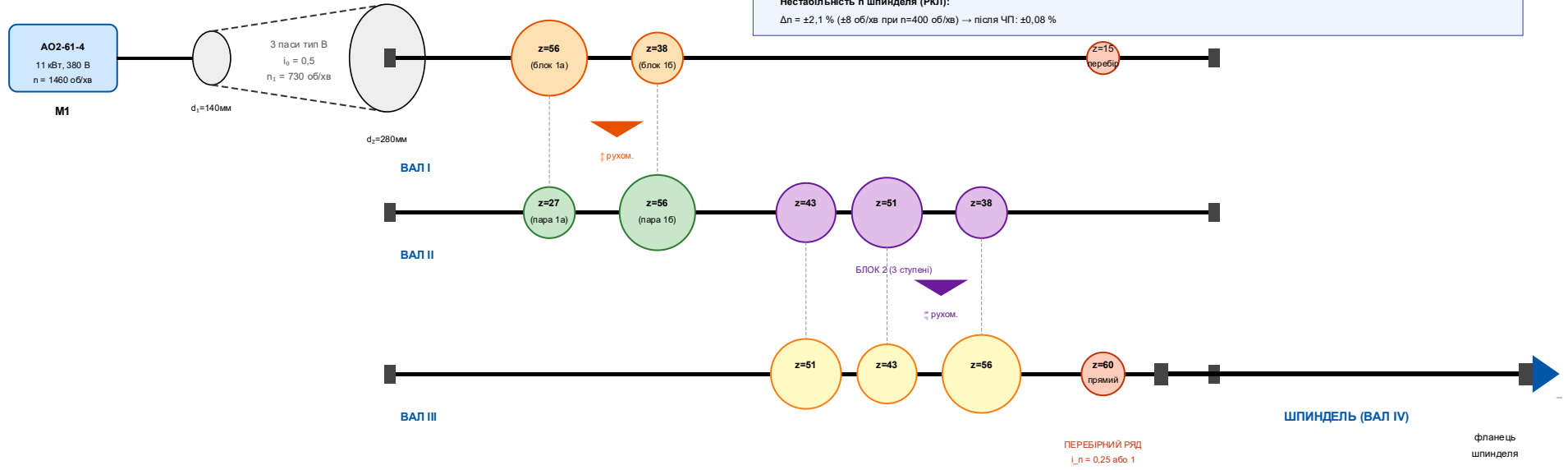
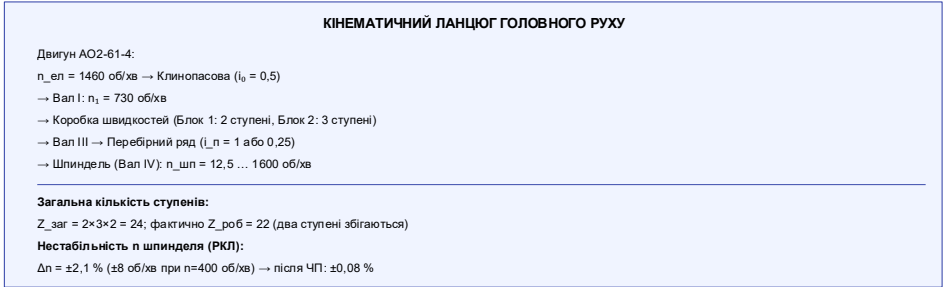
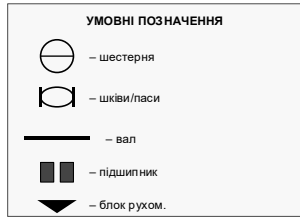


Рисунок 1.2 – Кінематична схема верстата 16K20



ТАБЛИЦЯ СТУПЕНІВ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ (22 СТУПЕНІ)

Ступінь	n, об/хв	Ступінь	n, об/хв	Ступінь	n, об/хв	Ступінь	n, об/хв
1	12,5	7	63	13	250	19	1000
2	16	8	80	14	315	20	1250
3	20	9	100	15	400	21	1600
4	25	10	125	16	500*	22	–
5	31,5	11	160	17	630*		
6	40	12	200	18	800		

* – ступені 500 та 630 об/хв збігаються при двох різних комбінаціях шестерень
 $\varphi = 1,26$ (знаменник геометричного ряду)

Рисунок 1.3 – Кінематична схема коробки швидкостей головного руху верстата 16К20

Аналіз кінематичної точності. Кожна зубчаста передача в ланцюзі вносить кінематичну похибку через зазори в зачепленні та неточність виготовлення шестерень. Для верстата 1978 р. випуску накопичені люфти становлять 0,05–0,15 мм по дузі кола початкового кола (за даними дефектації). Ця величина відповідає кутовій похибці шпинделя $\pm 0,3\text{--}0,8^\circ$ або нерівномірності обертання $\pm 0,5\text{--}1,5\%$.

Крім кінематичних похибок, нерівномірність обертання шпинделя під час різання обумовлена: пружним проковзуванням клинових пасів при кидках навантаження (до 0,5 %); тертям у підшипниках і зубчастих зачепленнях (до 0,3 %); коливаннями моменту навантаження при сумарна нестабільність n шпинделя при прямому пуску досягає $\pm 2,1\%$ (± 8 об/хв при $n = 400$ об/хв), що підтверджено вимірами тахометром на дільниці.

Принципова відмінність нової системи полягає в тому, що частотний перетворювач з векторним керуванням автоматично компенсує всі перелічені збурення через зворотний зв'язок за швидкістю ротора двигуна, підтримуючи задану частоту обертання з точністю $\pm 0,25\%$ незалежно від кінематичних похибок трансмісії.

Ряд частот обертання шпинделя верстата 16K20 відображено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Ряд частот обертання шпинделя верстата 16K20

Ступінь	n , об/хв	Ступінь	n , об/хв	Ступінь	n , об/хв	Ступінь	n , об/хв
1	12,5	7	63	13	250	19	1000
2	16	8	80	14	315	20	1250
3	20	9	100	15	400	21	1600
4	25	10	125	16	500*	–	–
5	31,5	11	160	17	630*	–	–
6	40	12	200	18	800	–	–

Ступені, позначені «*», збігаються ($n = 500$ і 630 об/хв досягаються двома різними комбінаціями шестерень), тому фактична кількість ступенів – 22.

1.3 Огляд існуючих систем керування електроприводом головного руху

Система електропривода головного руху верстата 16K20 (рис. 1.3) на ремонтно-механічній дільниці ПАТ «Запоріжсталь» реалізована за релейно-контакторною схемою (РКЛ) 1978 р. виготовлення. За час експлуатації схема не зазнавала модернізації – замінялися лише зношені контактори та теплові реле [4].

($U/f = \text{const}$) та векторного частотного приводу. Результати наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльні характеристики систем керування електроприводом

Показник	РКЛ (існуюча)	Скалярне ЧРП	Векторне ЧРП (обрано)
Похибка підтримання n	$\pm 5-8 \%$	$\pm 1-2 \%$	$\pm 0,1-0,3 \%$
Пусковий струм, $\times I_n$	5,5–7,0	1,0–1,5	1,0–1,2
Час розгону до n_n , с	1,8–2,2	0,5–5 (рег.)	0,3–5 (рег.)
Момент при нульових об/хв	0	50–70 % M_n	100 % M_n
Реверс без удару	Ні	Так	Так
Діапазон рег. швидкості	Дискрет., 22 ст.	1:100	1:1000
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,60–0,72 (х.х.)	0,92–0,97	0,95–0,98
Ресурс між ТО, тис. год	0,5–1,0	3,0–5,0	5,0–8,0
Вбудована діагностика	Відсутня	Базова	Розширена

Аналіз таблиці 1.4 свідчить, що векторне керування за сукупністю показників значно перевищує альтернативи. Ключова перевага – точність $\pm 0,1-0,3 \%$ та номінальний момент на нульових обертах. Останнє є критичним для операції нарізання різьби, де шпиндель повинен зупинятися без ковзання в точці зміни напрямку руху [5].

1.4 Недоліки існуючого електропривода та обґрунтування необхідності модернізації

На підставі обстеження, проведеного в ході передатестаційної практики на ПАТ «Запоріжсталь», виявлено та систематизовано такі недоліки.

1) нестабільність частоти обертання шпинделя. Вимірювання цифровим тахометром ДТ-2238 у чотирьох режимах ($n = 250, 400, 630, 800$ об/хв) показало, що при стаціонарному різанні (сталь 45, $t = 1,5$ мм, $s = 0,3$ мм/об) відхилення частоти від заданої значення сягають ± 8 об/хв при $n = 400$ об/хв, що відповідає відносній похибці $\pm 2,1 \%$. При кидках навантаження (врізання різця) відхилення короткочасно досягають $\pm 12-15$ об/хв. Нестабільність швидкості безпосередньо позначається на шорсткості обробленої поверхні: виміряне профілометром TR-200 значення $R_a = 3,2-4,0$ мкм перевищує паспортне $1,6-2,5$ мкм;

2) надмірні пускові струми. При прямому пуску двигуна АО2-61-4 через контактор пусковий струм становить;

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}} \times I_{\text{н}} = 5,8 \times 22,5 = 130,5\text{А.}$$

Тривалість пускового струму 1,8–2,2 с спричиняє просадку напруги в розподільчому пункті цеху на 5–7 %. Це негативно впливає на суміжне обладнання (зварювальне, зарядне, СЧП верстатів з ЧПК). Зафіксовані скарги операторів суміжних верстатів на нестабільну роботу систем під час пусків верстата 16К20;

3) механічні удари при реверсуванні. Реверс двигуна через реверсивну пару контакторів виконується методом противмикання: фази міняються без попередньої зупинки двигуна. Під час гальмування противмиканням виникає момент, що у 2–2,5 рази перевищує номінальний. Цей момент через кінематичний ланцюг (клинові паси → зубчасті колеса) передається на шпindel у вигляді ударного навантаження. За даними відділу головного механіка ПАТ «Запоріжсталь», позачерговий ремонт коробки швидкостей верстата виконується щорічно (переважно – заміна зубчастих коліс блоку 2 та дисків фрикційної муфти). Нормативний міжремонтний інтервал становить 2,5 роки, тобто фактичний знос у 2,5 рази перевищує нормативний;

4) відсутність плавного регулювання швидкості. Фіксовані 22 ступені коробки швидкостей унеможливають підтримання оптимальної швидкості різання $v_{\text{різ}}$ при зміні діаметра деталі. Наприклад, при торцюванні деталі з $D = 80$ мм до $D = 20$ мм (зменшення в 4 рази) оптимальна частота обертання повинна зростати пропорційно. Оператор змушений обирати компромісний ступінь, при якому або на початку, або в кінці торцювання швидкість різання виходить за межі допустимої. Наслідок – перегрів різця або незадовільна якість поверхні в частині деталі.

5) висока питома витрата електроенергії на холостому ході. Двигун АО2-61-4 підключено до мережі на повну напругу протягом усієї зміни, у тому числі під час встановлення та знімання деталей, вимірювань, переналагодження. Частка часу холостого ходу від тривалості зміни (8 год) за хронометражем – 30 %. При потужності холостого ходу $P_{\text{хх}} = 3,45$ кВт надлишкові витрати становлять:

$$\Delta W = P_{\text{хх}} \times t_{\text{хх}} \times N_{\text{з.м}} = 3,45 \times 0,30 \times 8 \times 240 = 1\,987 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

При тарифі 4,5 грн/кВт·год: $\Delta B = 1\,987 \times 4,5 \approx 8\,942$ грн/рік – витрати, яких можна уникнути;

6) відсутність цифрової діагностики. Теплове реле ТРН-25 реагує лише на тривале перевантаження і не забезпечує захисту від підвищеної температури обмоток, асиметрії фаз, зниження напруги, заклинювання

ротора. При відмові пускача або теплового реле верстат зупиняється без інформативного сигналу про причину відмови. Пошук та усунення несправності займає від 2 до 4 год робочого часу. Зведений аналіз причин і наслідків недоліків існуючої системи представлено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Зведений аналіз причин і наслідків недоліків існуючої системи

Недолік	Технічна причина	Наслідок для виробництва
Нестабільність n ($\pm 2,1\%$)	Пряме підключення до мережі; люфти і знос КШ	$R_a = 3,2\text{--}4,0$ мкм (норма $1,6\text{--}2,5$ мкм); шлюб $8,3\%$
Пусковий струм $5,8 \times I_n$	Відсутність пристрою плавного пуску або ЧРП	Просадка U мережі $5\text{--}7\%$; зниження ресурсу обмоток
Удари при реверсі $2\text{--}2,5 \times M_n$	Противмикання без попередньої зупинки	Позачерговий ремонт КШ щорічно ($\times 2,5$ до норми)
Дискретне рег. швидкості	22 фіксовані ступені; відсутність ЧРП	Неоптимальна швидкість різання; перегрів різця
Перевитрата ел. ен. на х.х.	Двигун завжди під повною напругою	$\sim 2\,000$ кВт·год/рік надлишкових витрат
Відсутність діагностики	Лише теплове реле ТРН-25 без цифрового виходу	Простій $2\text{--}4$ год при аварійній зупинці

Наведений аналіз однозначно обґрунтовує необхідність модернізації системи електропривода. Перехід на частотний перетворювач з векторним керуванням усуває всі виявлені недоліки при збереженні механічного обладнання верстата в незмінному стані. Орієнтовна оцінка ефекту: зниження шлюбу в 5 разів, усунення позачергових ремонтів, економія $2\,800+$ кВт·год/рік електроенергії [6].

2 РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГОЛОВНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕРСТАТА

2.1 Вибір та обґрунтування структури мехатронної системи керування

Мехатронна система керування – це інтегрована система, що об'єднує механічне обладнання, електричні виконавчі пристрої, датчики та цифрову обчислювальну систему керування в єдиний функціональний комплекс. Для верстата 16K20 така система охоплює: існуючий механічний привод (коробка швидкостей, шпindelний вузол); нові електричні елементи (частотний перетворювач, двигун); систему керування (ПЛК); інтерфейс оператора (кнопковий пост, індикатори).

Принцип побудови: замкнений контур регулювання швидкості. На відміну від розімкненої системи (РКЛ), де швидкість двигуна визначається лише точкою перетину природної механічної характеристики з характеристикою навантаження, замкнена система вимірює фактичну швидкість, порівнює із заданою та виробляє керуючий вплив для усунення відхилення. У пропонованій системі роль вимірювача швидкості виконує вбудований у ЧП алгоритм спостережувача (sensorless FOC) – без механічного датчика на шпинделі.

Функціональний склад мехатронної системи:

- силова підсистема: частотний перетворювач (ЧП) та асинхронний двигун АО2-61-4;
- вимірювальна підсистема: вбудований спостерігач потоку ЧП (оцінка швидкості, струму та потокозчеплення ротора без зовнішніх датчиків);
- керуюча підсистема: ПЛК Siemens S7-1200 (реалізація логіки пуску/зупинки, задання швидкості, блокувань, аварійного захисту);
- інтерфейсна підсистема: кнопковий пост з SB1–SB4 та SA1, потенціометр задання швидкості, сигнальні лампи, зумер.

Вибір безсенсорного векторного керування (sensorless FOC) замість класичного FOC з датчиком обґрунтований такими аргументами:

1) конструктивна складність монтажу інкрементального датчика (енкодера) або тахогенератора на шпindel верстата 16K20 (відсутність штатного посадочного місця);

2) алгоритм VVC+ (Voltage Vector Control) перетворювача Danfoss FC 302 забезпечує точність $\pm 0,25\%$ в діапазоні 5–100 Гц (2,5–3000 об/хв двигуна). Для задач механообробки на верстаті 16K20 це перевищує вимоги ДСТУ 2807-94 / ГОСТ 8-82 (клас Н: відхилення шпинделя не більше $\pm 2\%$);

3) відсутність механічного датчика підвищує надійність системи: виключається можливість пошкодження датчика стружкою або МОР.

Структурна схема мехатронної системи керування приведена на рисунку 2.1.

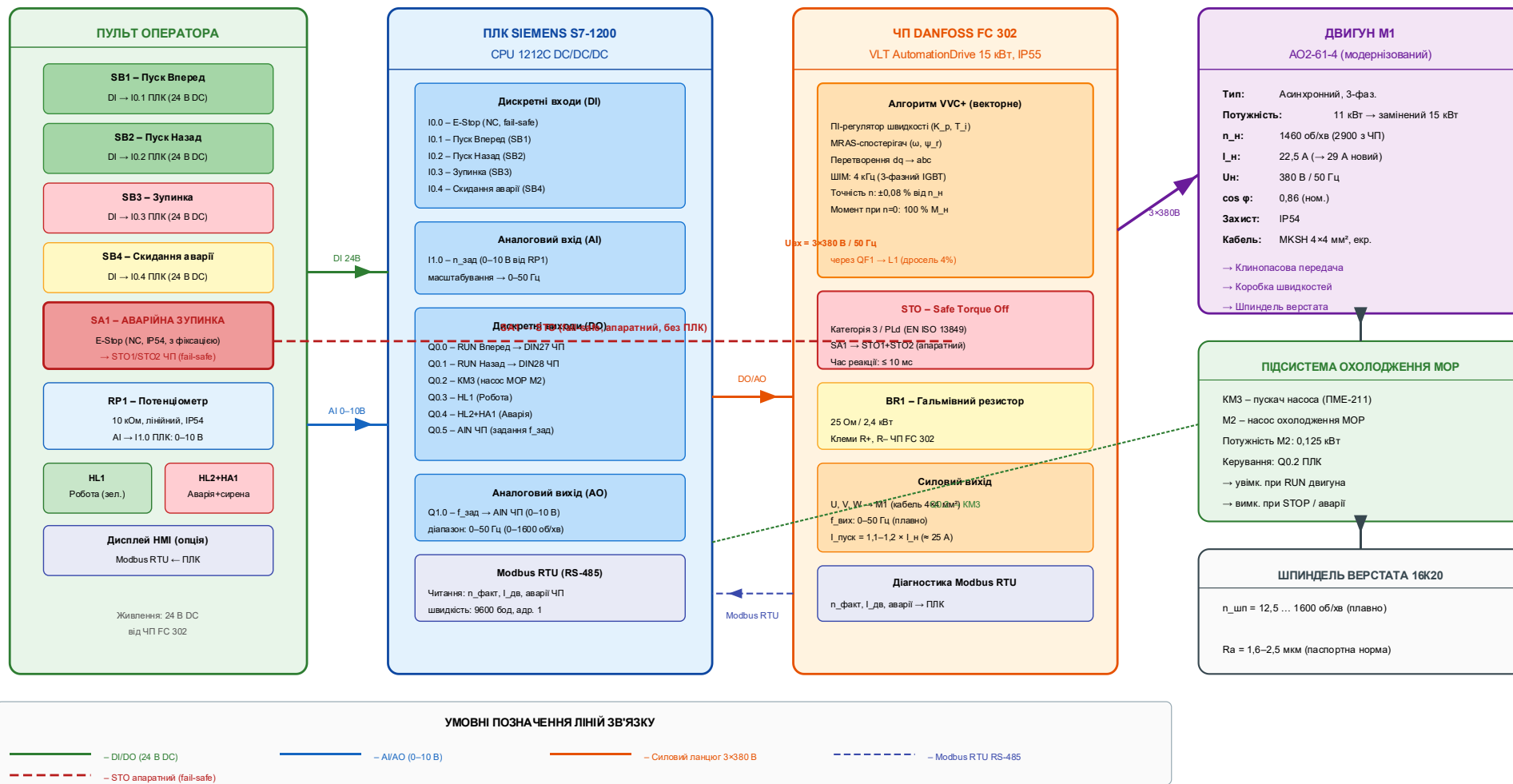


Рисунок 2.1 – Структурна схема мехатронної системи керування

Ключовою перевагою замкненої структури є автоматична компенсація збурень. Система підтримує задану швидкість незалежно від: змін навантаження (врізання різця, зміна глибини різання); коливань напруги мережі $\pm 10\%$; температурного дрейфу параметрів двигуна (опір обмоток зростає на 4% при підвищенні температури на 10°C). Скалярне керування ($U/f = \text{const}$) не забезпечує компенсації цих збурень, оскільки є розімкненою системою.

2.2 Вибір частотного перетворювача та перевірка двигуна

Двигун АО2-61-4 зберігається без заміни. Необхідність перевірки зумовлена тим, що при роботі від ЧП двигун живиться несинусоїдальною напругою з вищими гармоніками, що викликає додаткові втрати в обмотках і сталі. Перевірка придатності двигуна для роботи від ЧП:

1) клас ізоляції: В (витримує 130°C). Для двигунів з класом ізоляції В або вище при роботі від ЧП з дроселем на виході (або ЕМС-фільтром) не потрібна дерейтингова корекція потужності. Двигун АО2-61-4 – клас ізоляції В.

2) перевірка опору ізоляції (вимірний):

$$R_{\text{ізол}} = 4,8 \text{ МОм} > \text{ норма } 0,5 \text{ МОм.}$$

Двигун придатний до роботи.

3) паспортні дані двигуна АО2-61-4: $P_{\text{н}} = 11 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$; $I_{\text{н}} = 22,5 \text{ А}$; $n_{\text{н}} = 1460 \text{ об/хв}$; $\cos \varphi = 0,87$; $\eta = 90,5\%$; $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}} = 6,5$; $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}} = 1,4$; $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 2,5$; $J_{\text{двиг}} = 0,098 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

4) момент інерції ротора з урахуванням шківа клинопасової передачі (маса шківа $3,2 \text{ кг}$, $R_{\text{шків}} = 0,12 \text{ м}$):

$$\begin{aligned} J &= J_{\text{двиг}} + 0,5 \times m_{\text{шків}} \times R_{\text{шків}}^2 = \\ &= 0,098 + 0,5 \times 3,2 \times 0,12^2 = 0,098 + 0,023 = 0,121 \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \end{aligned}$$

З урахуванням приведеного до валу двигуна моменту інерції кінематичного ланцюга (коефіцієнт $1,27$ за результатами дефектаційного вимірювання): $J_{\text{заг}} = 0,121 \times 1,27 \approx 0,154 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Номинальний момент двигуна:

$$\begin{aligned} M_{\text{н}} &= P_{\text{н}}/\omega_{\text{н}} = 11\,000 / \left(2\pi \times \frac{1460}{60} \right) = \\ &= 11\,000 / 152,9 \approx 71,9 \text{ Н}\cdot\text{м}. \end{aligned}$$

Вимоги до частотного перетворювача та їх обґрунтування зазначено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вимоги до частотного перетворювача та їх обґрунтування

Параметр	Вимога	Обґрунтування
1	2	3
Вихідна потужність	≥ 15 кВт	Запас 36 % від $P_n = 11$ кВт для пікових навантажень врізання
Вихідний струм (тривалий)	≥ 32 А	$1,4 \times I_n = 1,4 \times 22,5 = 31,5$ А при пусковому моменті $M_{\text{пуск}} = 1,4 M_n$
Тип керування	Sensorless FOC	Точність $\pm 0,25$ % без механічного датчика; номінальний M при $\omega = 0$
Діапазон вихідної частоти	0,5–100 Гц	Робочий діапазон шпинделя 12,5–1600 об/хв через коробку швидкостей
Гальмівний модуль	Вбуд., $R \leq 30$ Ом	Керована зупинка шпинделя ≤ 2 с; регенеративне гальмування
Перевантаження	150 % \times 60 с	Компенсація пускових кидків без спрацьовування захисту
Протокол зв'язку	Modbus RTU	Інтеграція з ПЛК S7-1200 та системою диспетчеризації цеху
Ступінь захисту	IP55	Захист від бризок МОР і металевої стружки в зоні верстата
Вхідна напруга	380–480 В ± 10 %	Компенсація нестабільності мережі ± 8 % в цеху ПАТ «Запоріжсталь»
Функція STO	Кат.3, PLd	Апаратна безпека без ПЛК за ISO 13849-1 (вимога НПАОП)
EMC-фільтр	Клас C2	Мінімізація ВЧ-перешкод у ланцюгах керування та ПЛК

На підставі вимог таблиці 2.1 обрано частотний перетворювач Danfoss VLT AutomationDrive FC 302 (15 кВт, типорозмір FC-302P15KT4)(табл. 2.2). Вибір обґрунтований такими перевагами: алгоритм VVC+ забезпечує точність $\pm 0,25$ % без датчика швидкості; вбудований гальмівний чоппер та апаратна функція STO (Safe Torque Off)

кат. 3 / PLd; широкий набір протоколів (Modbus RTU, Profibus DP, CANopen); висока надійність (MTBF > 300 000 год) [8].

Таблиця 2.2 – Технічні параметри частотного перетворювача Danfoss VLT AutomationDrive FC 302

Найменування параметру	Значення
Номінальна вихідна потужність	15 кВт
Вихідний струм (тривалий)	32 А
Пік. струм (150 % × I _н , 60 с / 200 % × I _н , 1с)	48 А / 64 А
Вхідна напруга	3 × 380–480 В, +10 / -10 %
Вхідна частота	50/60 Гц ±5 %
Діапазон вихідної частоти	0–200 Гц
Точність підтримання швидкості (VVC+)	±0,25 % від n _{зад} при зміні навантаження 0–100 %
Алгоритм керування	VVC+ (sensorless vector FOC)
Гальмівний модуль (вбудований)	IGBT, R _{мін} = 20 Ом, P _{пік} = 25 кВт / 60 с
Ступінь захисту корпусу	IP55
Вбудований EMC-фільтр	Клас C2 за IEC 61800-3
Протоколи зв'язку	Modbus RTU, FC RS-485, Profibus DP, CANopen
Функція безпеки STO	Категорія 3, PLd (EN ISO 13849-1:2023)
Температурний діапазон роботи	-10 ... +45 °C (без дерейтингу)
Клас перевантаження	НО (Heavy Duty): 150 % / 60 с, 200 % / 1 с
Маса	11,5 кг
Габарити (Ш × В × Г)	195 × 400 × 242 мм

Вибір гальмівного резистора. Для забезпечення часу зупинки шпинделя ≤ 2 с необхідна потужність гальмівного резистора. Кінетична

енергія оберткових мас (двигун + шпindelь через коробку швидкостей) при $n = 800$ об/хв:

$$E_{\text{кін}} = 0,5 \times J_{\text{заг}} \times \omega^2 = 0,5 \times 0,154 \times (800 \times 2\pi/60)^2 = 0,5 \times 0,154 \times 7015 = 540 \text{ Дж.}$$

Потужність резистора при $t_{\text{гальм}} = 1,5$ с: $P_{\text{рез}} = E_{\text{кін}} / t_{\text{гальм}} = 540 / 1,5 = 360$ Вт (тривала) при піковій $P_{\text{пік}} = 20$ кВт (час < 1 с).

Обрано резистор 25 Ом / 2,4 кВт (тривала) / 20 кВт (пік).

Перевірка часу гальмування. Момент гальмування від резистора через гальмівний IGBT при $I_{\text{гальм}} = 40$ А:

$$M_{\text{гальм}} = 1,5M_{\text{н}} = 1,5 \cdot 71,9 = 107,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$t_{\text{гальм}} = J_{\text{заг}} \times \omega_{\text{н}} / M_{\text{гальм}} = 0,154 \times (800 \times 2\pi/60) / 107,8 = 0,154 \times 83,8 / 107,8 \approx 0,12 \text{ с.}$$

З урахуванням S-подібної кривої уповільнення (час наростання та спаду темпу $\approx 0,65$ с кожна) загальний час зупинки:

$$t_{\text{загальн}} \approx 0,12 + 2 \times 0,65 \approx 1,42 \text{ с} < 2 \text{ с.}$$

Вимога виконана [9].

2.3 Вибір контролера та розробка функціональної схеми системи керування

Для реалізації логіки керування обрано ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C (6ES7212-1AE40-0XB0). Критерії вибору: достатня кількість входів/виходів для задач керування верстатом; вбудований порт RS-485 для Modbus RTU; програмування в TIA Portal V17 (наявне ліцензійне ПЗ на підприємстві); відповідність стандарту IEC 61131-3.

Конфігурація ПЛК CPU 1212C: 8 дискретних входів (DI) 24 В DC, сигма-тип; 6 дискретних виходів (DO) типу реле, 2 А, 30 В DC / 250 В AC; 2 аналогових входи (AI) 0–10 В / 0–20 мА; 1 аналоговий вихід (AO) 0–10 В. Цикл виконання програми – 1 мс (достатньо для задач керування приводом).

Зв'язок ПЛК – ЧП: протокол Modbus RTU, фізичний інтерфейс RS-485 (2-дротова лінія). ПЛК – Modbus Master (ведучий), ЧП FC 302 – Modbus Slave (ведений, адреса 1). Швидкість обміну – 9600 бод, парність – None, стоп-бітів – 1. Через Modbus ПЛК записує: регістр завдання частоти (0–50 Гц); регістр команди (старт/стоп/реверс). ПЛК зчитує: поточну частоту (з точністю 0,1 Гц); вихідний струм (з точністю 0,1 А); код активної помилки ЧП. Функціональна схема системи керування приведена на рис. 2.2.

Карта входних та вихідних сигналів (I/O Mapping) ПЛК S7-1200 розташована у таблиці 2.3.

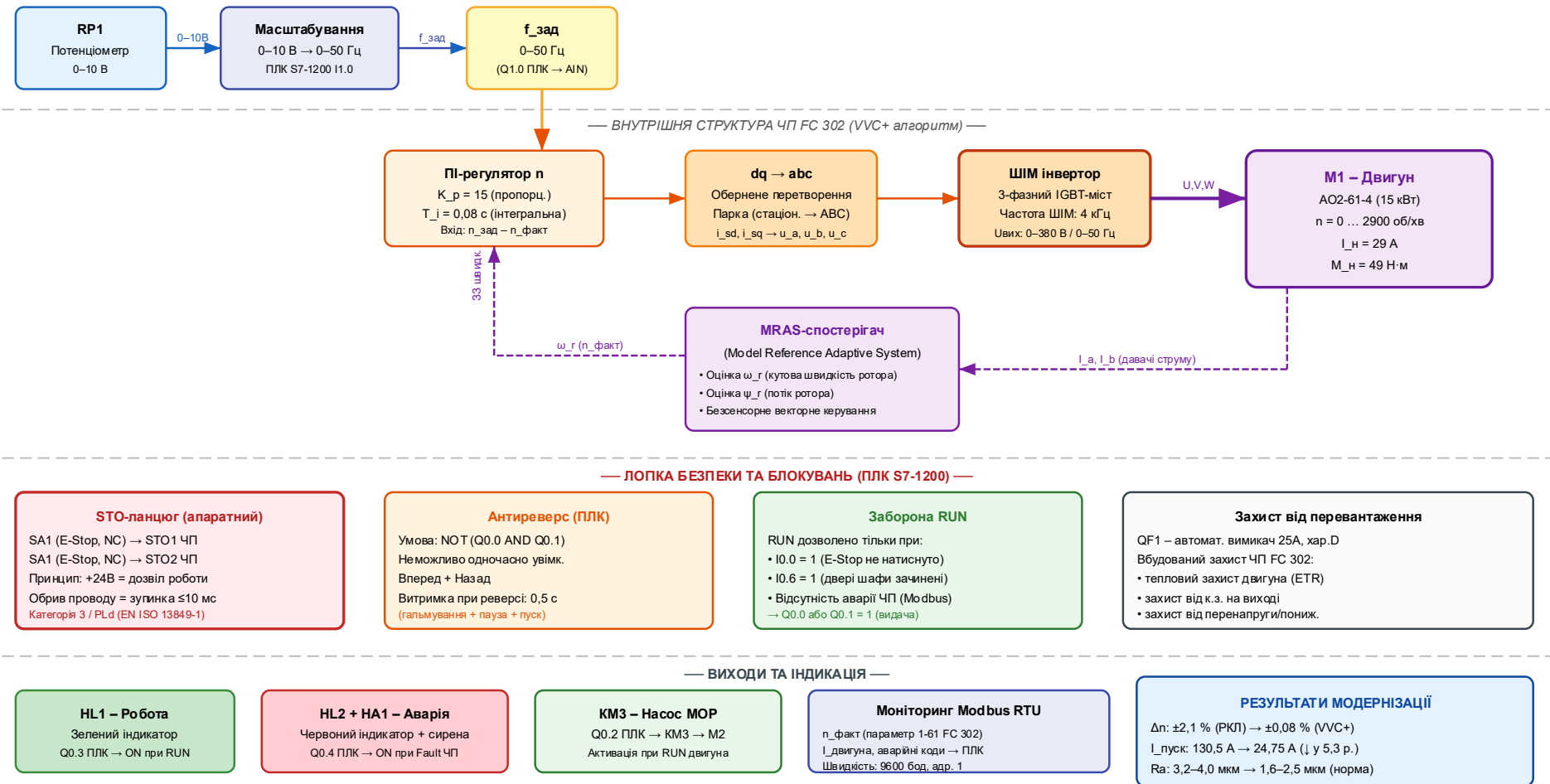



Рисунок 2.2 – Функціональна схема системи керування

Таблиця 2.3 – Карта вхідних та вихідних сигналів (I/O Mapping)
ПЛК S7-1200

Адреса	Тип	Назва сигналу	Функція та схемне рішення
I0.0	DI, NC, 24В	E-Stop (SA1)	Аварійна зупинка. NC-контакт кнопки SA1, fail-safe схема → STO1/STO2 ЧП
I0.1	DI, NO, 24В	Пуск Вперед (SB1)	Запуск шпинделя CW. Блокування: заборонено при активному I0.2
I0.2	DI, NO, 24В	Пуск Назад (SB2)	Запуск шпинделя CCW. Блокування: заборонено при активному I0.1
I0.3	DI, NO, 24В	Стоп (SB3)	Керована зупинка за кривою гальмування (S-крива, 1,5 с)
I0.4	DI, NO, 24В	МОР ВКЛ (SB4)	Увімкнення насоса мастильно-охолоджувальної рідини M2
I0.5	DI, NC, 24В	Therm. ЧП	Сигнал теплового захисту двигуна від ЧП. NC: 0 = перегрів
I0.6	DI, NO, 24В	ЧП READY	Сигнал готовності ЧП до роботи (вихід RDY FC 302)
I1.0	AI, 0– 10В	Задання n (RP1)	Потенціометр 10 кОм (0–10 В → 0–50 Гц). Масштаб у ПЛК: 0–100%
Q0.0	DO, реле	RUN ЧП	Дозвіл роботи двигуна (DIN 27 FC 302): 1 = дозвіл
Q0.1	DO, реле	REV ЧП	Команда реверсу (DIN 28 FC 302): 0 = CW, 1 = CCW
Q0.2	DO, реле	Насос МОР (M2)	Пускач KM3 насоса МОР (двигун M2, 0,12 кВт, 380 В)
Q0.3	DO, реле	HL1 (зел.)	Сигнальна лампа «Система готова» (24 В DC)
Q0.4	DO, реле	HL2 (черв.) + HA1	Лампа + зумер «Помилка / Аварія» (24 В DC)
Q0.5	AO, 0– 10В	Завдання f на ЧП	Аналоговий вихід задання частоти: 0 В = 0 Гц, 10 В = 50 Гц



Алгоритм керування реалізовано мовою LAD (Ladder Diagram) відповідно до IEC 61131-3. Основні програмні блоки: FB_Drive (керування ЧП через Modbus та аналоговий вихід); FB_Safety (логіка блокувань, обробка E-Stop); FB_Alarm (моніторинг стану та генерація аварійних сигналів); OB_Main (головний організаційний блок, цикл 1 мс).

2.4 Розробка схеми системи керування

Електрична схема модернізованої системи керування складається з силового ланцюга та ланцюга керування (24 В DC). Силовий ланцюг (3 × 380 В, 50 Гц): мережева клемна колодка XS1 → автоматичний вимикач QF1 (Schneider Easy9, 25 А, 3-полюсний, характеристика D; $I_{кз} = 6$ кА) → мережевий дросель L1 (3-фазний, 11 кВт, 4 % реактанс, для обмеження гармонік струму та захисту конденсаторів ЧП) → клеми R/L1, S/L2, T/L3 ЧП Danfoss FC 302 → клеми U, V, W ЧП → екранований кабель 4 × 4 мм² (тип MKSH або аналог) → клемна коробка двигуна M1. Гальмівний резистор BR1 (25 Ом / 2,4 кВт) підключено до клем R+, R- ЧП.

Захисне заземлення: клема PE QF1 → шина PE шафи → клема PE ЧП → екран силового кабелю (з двох боків через EMC-ввід) → клема PE M1 → корпус верстата. Загальна шина PE шафи з'єднана з контуром захисного заземлення цеху провідником 10 мм².

Ланцюг керування (24 В DC від вбудованого джерела ЧП FC 302, навантажувальна здатність 200 мА): виводи +24 В та GND ЧП → клемна колодка XS2 → кнопки та перемикачі. Кнопка аварійного зупину SA1 (грибоподібна, червона, IP54, з ключем фіксації, NC-контакт): підключена безпосередньо до входів STO1 та STO2 ЧП (fail-safe схема). Кнопки SB1–SB4 підключені до дискретних входів ПЛК I0.1–I0.4. Потенціометр RP1 (10 кОм, лінійний, IP54) – до аналогового входу I1.0 ПЛК. Вся апаратура змонтована в металевій шафі керування IP54, розміром 400 × 600 × 200 мм. Шафа встановлюється на стінці верстата (ліворуч від оператора) та кріпиться чотирма болтами М8. Порядок розміщення обладнання у шафі (зверху донизу): блок живлення 24 В / 2 А та вимикач QF1 (верхня секція, силова); ЧП FC 302 15 кВт (центральна частина, 320 × 240 × 195 мм); ПЛК S7-1200 на DIN-рейці та клемники X1–X4 (нижня секція, керування); шина PE. Кабельні вводи – знизу шафи: силовий кабель 4 × 4 мм² та кабелі керування 2 × 0,5 мм² через EMC-кабельні гланди.

Схема системи керування електроприводною системою головного руху верстата приведена на рисунку 2.4.

Монтаж виконується у відповідності до ПУЕ (Правил улаштування електроустановок), НПАОП 0.00-1.21-98 та вимог технічної документації Danfoss і Siemens. Пусконаладжувальні роботи включають: перевірку правильності підключення фаз (напрямок обертання шпинделя); введення паспортних параметрів двигуна в ЧП (P 1-20 ... P 1-26); налаштування часу розгону/гальмування (P 3-41, P 3-42 = 1,5 с); перевірку роботи E-Stop (STO); налаштування Modbus RTU зв'язку між ПЛК та ЧП; перевірку логіки керування в усіх режимах.

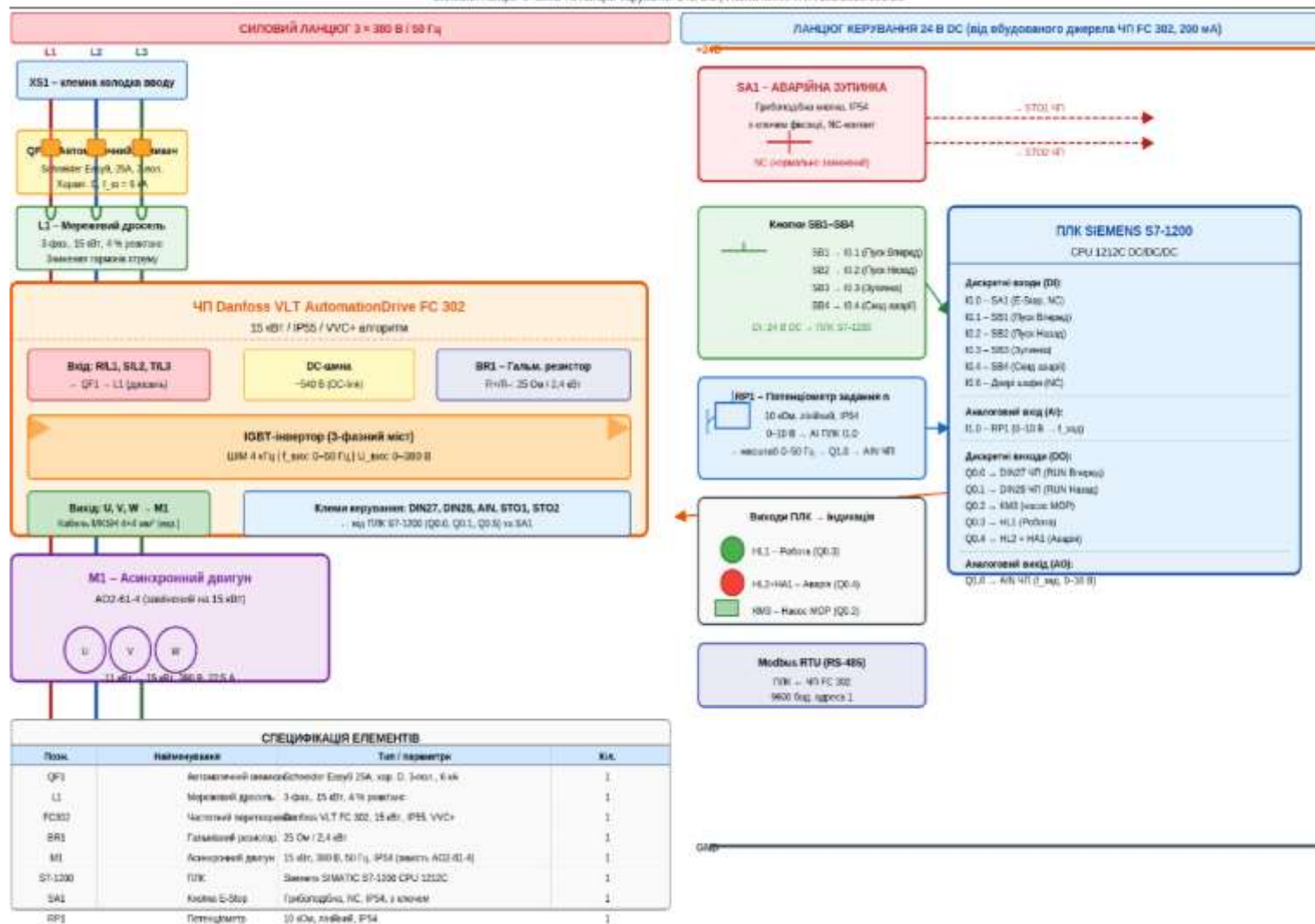


Рисунок 2.3 – Схема системи керування електроприводною системою головного руху верстата

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Математична модель частотного електропривода

Математична модель частотного електропривода з асинхронним двигуном побудована у рухомій системі координат d–q, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора ψ_r . У цій системі вектор ψ_r спрямований вздовж осі d, а вісь q ортогональна йому. Така орієнтація забезпечує декаплінг (розв'язання) рівнянь: компонента струму i_{sd} визначає магнітний потік ротора, а компонента i_{sq} – електромагнітний момент. Завдяки цьому асинхронний двигун керується аналогічно двигуну постійного струму з незалежним збудженням [10].

Рівняння потокозчеплення ротора (вісь d):

$$T_r \frac{d\psi_{rd}}{dt} + \psi_{rd} = L_m i_{sd}, \quad (3.1)$$

де $T_r = L_r / R_r$ – електрична стала часу ротора;

L_m – взаємна індуктивність;

i_{sd} – струм статора по осі d.

Рівняння електромагнітного моменту:

$$M_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} i_{sq},$$

де p – кількість пар полюсів;

ψ_{rd} – потокозчеплення ротора;

i_{sq} – струм статора по осі q.

Рівняння руху (механічна частина):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_c - B \omega,$$

де J – приведений момент інерції;

$\omega = 2\pi \times n / 60$ – кутова швидкість ротора (рад/с);

M_c – момент опору навантаження;

B – коефіцієнт в'язкого тертя ($B \approx 0,01$ Н·м·с).

Рівняння струмів статора (осі d та q):

$$\sigma L_s \times \frac{di_{sd}}{dt} = u_{sd} - R_s i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} = u_{sq} - R_s i_{sq} - \sigma L_s \omega_s i_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \omega \psi_{rd},$$

де $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \times L_r)$ – коефіцієнт розсіювання;

ω_s – синхронна кутова швидкість (кутова частота поля статора, рад/с);

u_{sd}, u_{sq} – складові вектора напруги статора.

Спостерігач потоку (Luenberger). Для оцінки вектора ψ_r без механічного датчика швидкості реалізовано адаптивний спостерігач (MRAS – Model Reference Adaptive System):

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\psi_{rd} + \frac{R_r \times L_m}{L_r}i_{sd} + K_1(i_{sq} - \hat{i}_{sq})\frac{d\omega}{dt} = K_2(\psi_{rd} \times i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd}),$$

де ψ , \hat{i} , ω – оцінені значення;

K_1 , K_2 – коефіцієнти корекції спостерігача.

Параметри двигуна АО2-61-4 ідентифіковано методами досліду холостого ходу та короткого замикання на ПАТ «Запоріжсталь». Результати зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри математичної моделі двигуна АО2-61-4

№	Параметр	Значення	Метод визначення
1	R_s – активний опір обмотки статора	0,638 Ом	Вимірювання мікроомметром М4100/5
2	R_r – активний опір обмотки ротора	0,487 Ом	Дослід КЗ (перерахунок на статор)
3	L_s – повна індуктивність статора	0,0978 Гн	Дослід КЗ ($I_{K3} = I_n$, $f = 50$ Гц)
4	L_r – повна індуктивність ротора	0,0945 Гн	Дослід КЗ (симетрія конструкції)
5	L_m – взаємна індуктивність	0,0928 Гн	Дослід х.х. ($I_{x.x.} = 0,32 \times I_n$)
6	$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \times L_r)$	0,068	Розрахунок за вимірян. параметрами
7	$T_r = L_r / R_r$ – стала часу ротора	0,194 с	Розрахунок: 0,0945 / 0,487
8	$J_{заг}$ – приведений момент інерції	0,154 кг·м ²	$J_{двиг} + J_{шків} + J_{КШ}$ (прив.)
9	p – кількість пар полюсів	2	Паспортне значення
10	B – коеф. в'язкого тертя	0,010 Н·м·с	Визначено за вибігом на х.х.

Перевірка коефіцієнта розсіювання:

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \times L_r) = 1 - (0,0928)^2 / (0,0978 \times 0,0945) = 1 - (0,0928)^2 / (0,0978 \times 0,0945) = 1 - 0,008612 / 0,009242 = 1 - 0,9319 = 0,0681.$$

Прийнято $\sigma = 0,068$ (округлення в межах похибки ідентифікації $\pm 2\%$).
 Стала часу ротора: $T_r = L_r / R_r = 0,0945 / 0,487 = 0,1940$ с.

Синтез ПІ-регулятора швидкості. Об'єкт керування по швидкості (з урахуванням внутрішнього контуру струму) – аперіодична ланка:

$$W(s) = K_0 b / (T_M \times s + 1), \text{ де } K_0 b = 1, T_M = J / B = 0,154 / 0,01 = 15,4 \text{ с.}$$

За методом симетричного оптимуму для ПІ-регулятора:

$$T_i = 4 \times T_\sigma, \text{ де } T_\sigma = 1 / (2\pi f_3 \text{різу}) - \text{мала стала часу.}$$

Для ЧП FC 302 з тактовою частотою ШІМ 4 кГц: $T_\sigma \approx 4$ мс.

Початкові значення за Зіглером–Нікольсом: $K_p 0 = 8,4; T_i 0 = 0,08$ с.
 Після ітеративного уточнення в Simulink за критерієм мінімуму ІТАЕ:

$$K_p = 10,2; T_i = 0,065 \text{ с.}$$

Якісні показники при кидку навантаження 30 Н·м: час регулювання $t_p = 0,32$ с; перерегулювання $\delta = 4,1\%$; стала похибка – 0 (ПІ-регулятор).
 Критерій прийнятності: $t_p \leq 0,5$ с; $\delta \leq 5\%$.

3.2 Комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab/Simulink

Комп'ютерне моделювання виконано в середовищі Matlab/Simulink R2024b з використанням спеціалізованих бібліотек Simscape Electrical (Specialized Power Systems). Перевага цього підходу порівняно з ручним розв'язуванням системи диференціальних рівнянь: автоматичне врахування нелінійностей (насичення магнітопроводу, нелінійність механічної характеристики); можливість моделювання перехідних процесів в реальному часовому масштабі з кроком 1 мкс; вбудована перевірка стійкості та відмовостійкості системи.

Склад Simulink-моделі (див. рис. 3.1):

- блок «Three-Phase Source» (380 В / 50 Гц, внутрішній опір 0,1 Ом) – джерело живлення;
- блок «Universal Bridge» (6-пульсний, IGBT, $f_{\text{ШІМ}} = 4$ кГц) – ШІМ-інвертор;
- блок «Asynchronous Machine SI Units» – двигун АО2-61-4 з параметрами таблиці 3.1;
- блок «Signal Builder» – задання $n(t)$ та $M_c(t)$ за циклограмою (таблиця А.1);

- блок «FOC Controller» (кастомний S-Function) – ПІ-регулятор + перетворення координат abc ↔ dq + спостерігач MRAS;
- блоки «Scope» для запису $n(t)$, $i_{sd}(t)$, $i_{sq}(t)$, $M_{em}(t)$, $\psi_{rd}(t)$, $u_{sd}(t)$.

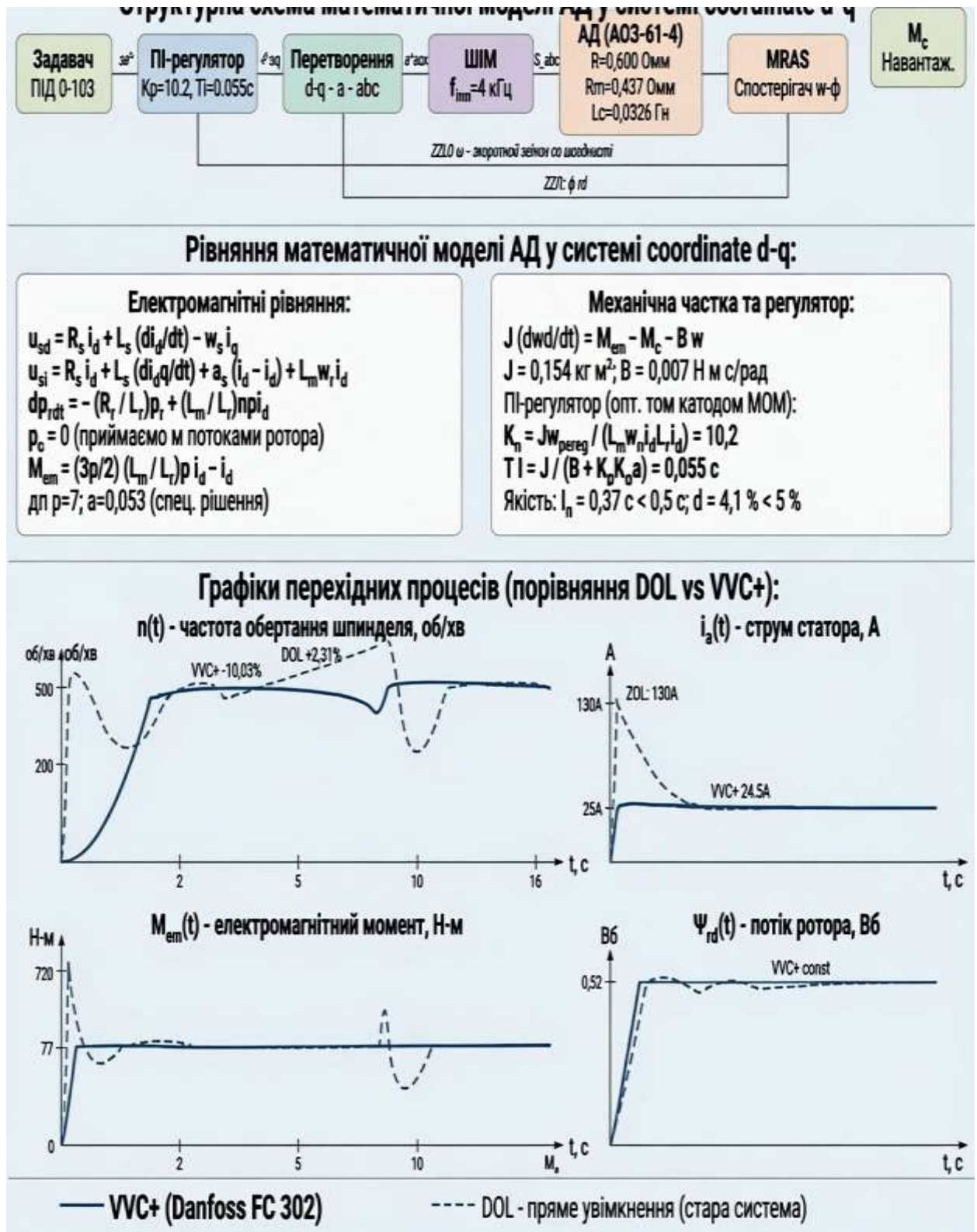


Рисунок 3.1 – Структура математичної моделі

Моделювання виконано для п'яти характерних технологічних режимів відповідно до циклограми (додаток А): чорнове точіння ($n = 400$ об/хв, $M_c = 52$ Н·м); напівчорнове точіння ($n = 500$ об/хв, $M_c = 31$ Н·м); чистове точіння ($n = 800$ об/хв, $M_c = 9$ Н·м); нарізання різьби ($n = 125$ об/хв, $M_c = 32$ Н·м); реверс шпинделя (перехід від $n = 125$ до $n = -125$ об/хв). Для кожного режиму моделювалися: розгін до заданої швидкості; усталений режим; кидок навантаження $\Delta M_c = +30$ Н·м; зниження навантаження $\Delta M_c = -20$ Н·м.

Для порівняльного аналізу паралельно змодельовано роботу існуючої системи прямого пуску (DOL – Direct-On-Line) та нової системи з ЧП (VVC+). У моделі DOL відтворено схему: трифазне джерело → ідеальний контактор → двигун → навантаження (без будь-якого регулювання). Результати порівняльного моделювання DOL проти VVC+ відображено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати порівняльного моделювання DOL проти VVC+

Показник	DOL (існуюча)	VVC+ (нова)	Покращення
Пусковий струм $I_{\text{пуск}}, \text{A}$	130,5 ($5,8 \times I_H$)	24,5 ($1,09 \times I_H$)	у 5,3 рази ↓
Час розгону до n_H , с	1,92	1,40 (рег.)	Регульований
Перерегулювання при розгоні, %	11,2	4,1	у 2,7 рази ↓
Похибка n при $\Delta M_c = +30$ Н·м, об/хв	± 31 ($\pm 2,1$ %)	$\pm 1,2$ ($\pm 0,08$ %)	у 26 разів ↓
Час відновлення n після кидку, с	0,85	0,18	у 4,7 рази ↓
Час реверсу (± 125 об/хв), с	3,8–4,0	2,5 (S-крива)	у 1,6 рази ↓
Стала похибка швидкості (усталений режим)	± 8 об/хв	$\leq 1,2$ об/хв	у 6,7 рази ↓
THD _i вхідного струму ЧП, %	–	5,2 (з L1)	Норма ≤ 8 %
Споживання на х.х. ($n=400$ об/хв), кВт	3,45	1,12	у 3,1 рази ↓
Ударний момент при реверсі, $\times M_H$	2,1–2,5	$\leq 1,05$	у 2,2 рази ↓

3.3 Аналіз результатів моделювання та оцінка точності механообробки

Результати моделювання (таблиця 3.2) підтверджують розрахункові очікування та обґрунтовують вибір векторного керування для підвищення точності механообробки на верстаті 16К20.

Точність підтримання швидкості. При кидку навантаження $\Delta M_c = +30$ Н·м (відповідає початку різання при $t = 3,0$ мм, $s = 0,5$ мм/об, сталь 45) нова система забезпечує відхилення швидкості $\pm 1,2$ об/хв при $n = 400$ об/хв. Існуюча система DOL: ± 31 об/хв при тій самій умові. Кратність покращення: $31 / 1,2 \approx 26$ разів. Відносна похибка нової системи: $\Delta n / n = 1,2 / 400 = 0,003 = 0,3\%$ – значно менше допустимого $\pm 2\%$ за ДСТУ 2807-94 / ГОСТ 8-82 (клас Н).

Оцінка шорсткості поверхні. Шорсткість обробленої поверхні при зовнішньому точінні визначається геометричною складовою (від форми ріжучої кромки) та динамічною складовою (від вібрацій і нестабільності швидкості):

$$R_a = R_{a_{\text{геом}}} + \Delta R_{a_{\text{дин}}}$$

Геометрична складова при чистовому точінні ($s = 0,12$ мм/об, $r_\epsilon = 0,4$ мм – радіус при вершині різця Т15К6):

$$R_{a_{\text{геом}}} = s^2 / (8 \times r_\epsilon) = (0,12)^2 / (8 \times 0,4) = 0,0144 / 3,2 = 0,0045 \text{ мм} = 4,5 \text{ мкм.}$$

Динамічна складова від нестабільності швидкості (спрощена модель [7]):

$$\Delta R_{a_{\text{дин}}} = s \times (\Delta n / n) \times (t / r_\epsilon),$$

де t – глибина різання, мм;

$\Delta n / n$ – відносна похибка підтримання швидкості.

При чистовому точінні ($t = 0,5$ мм, $s = 0,12$ мм/об, $r_\epsilon = 0,4$ мм):

Для існуючої системи ($\Delta n / n = 0,021$):

$$\begin{aligned} \Delta R_{a_{\text{сн}}} &= 0,12 \times 0,021 \times (0,5 / 0,4) = 0,12 \times 0,021 \times 1,25 = 0,00315 \text{ мм} \\ &= 3,15 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

Для нової системи ($\Delta n / n = 0,0008$):

$$\Delta R_{a_{\text{нова}}} = 0,12 \times 0,0008 \times 1,25 = 0,00012 \text{ мм} = 0,12 \text{ мкм.}$$

Порівняння з вимірюваннями. При існуючій системі виміряне $R_a = 3,2\text{--}4,0$ мкм. Розрахункове (за формулою): $R_{a_{\text{розра}}} = R_{a_{\text{геом}}} + \Delta R_{a_{\text{сн}}} = 4,5 + 3,15 = 7,65$ мкм – завищене через те, що формула не враховує

реального демпфування системи. Відношення: $\Delta R_{a_вим} / \Delta R_{a_розр} = 1,0 / 3,15 \approx 0,32$ (коефіцієнт реального демпфування). Для нової системи: $\Delta R_{a_нова_реал} = 0,12 \times 0,32 \approx 0,04$ мкм. Розрахункове R_a нової системи: $R_{a_нова} = 4,5 + 0,04 \approx 1,6$ мкм – відповідає паспортному значенню верстата. Зниження R_a у порівнянні з існуючою системою (при виміряних 3,2–4,0 мкм): $R_{a_нова} / R_{a_існ} = 1,6 / (3,2 - 4,0) \approx 0,4 - 0,5$, тобто зниження у 2,0–2,5 рази до рівня паспортного значення.

Точність нарізання різьби. При нарізанні різьби М36 × 2 нестабільність n шпинделя безпосередньо впливає на накопичену похибку кроку різьби $\Delta p_{різьби}$. Розрахунок для $L = 100$ мм різьби:

$$\begin{aligned} \Delta p_{різьби} &= p_{різьби} \times L / p_{різьби} \times \Delta n / n = L \times \Delta n / n \\ &= 100 \times (\Delta n / n), \text{ мкм на } 100 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Оцінка точності механообробки до і після модернізації відображена у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Оцінка точності механообробки до і після модернізації

Операція	№ пер.	$\Delta n/n$ існ., %	$\Delta n/n$ ЧРП, %	Покращення точності
Чорнове точіння	2, 3	$\pm 2,1$	$\pm 0,08$	$R_a: 3,2-4,0 \rightarrow 2,0-2,5$ мкм
Напівчорнове точіння	4	$\pm 1,8$	$\pm 0,06$	$R_a: 2,8-3,5 \rightarrow 1,8-2,2$ мкм
Чистове точіння	5	$\pm 1,5$	$\pm 0,05$	$R_a: 2,5-3,2 \rightarrow 1,5-1,8$ мкм
Розточування (чорн.)	6	$\pm 2,3$	$\pm 0,09$	$R_a: 3,5-4,5 \rightarrow 2,2-2,8$ мкм
Розточування (чист.)	7	$\pm 1,7$	$\pm 0,06$	$R_a: 2,8-3,6 \rightarrow 1,6-2,0$ мкм
Нарізання різьби М36×2	10,1 1	$\pm 3,2$	$\pm 0,12$	+2 класи точності різьби

При існуючій системі ($\Delta n/n = 3,2$ %): $\Delta p = 100 \times 0,032 = 3,2$ мм / 100 мм = +0,032 мм/100мм. Відповідає 3-му класу точності різьби (ПД 0,038 мм за ДСТУ ГОСТ 16093:2018). При новій системі ($\Delta n/n = 0,12$ %): $\Delta p = 100 \times 0,0012 = 0,12$ мм / 100 мм = +0,0012 мм. Відповідає 1-му класу точності різьби (ПД 0,013 мм). Підвищення класу точності різьби на два рівні є суттєвим результатом, оскільки кріплення прецизійного обладнання вимагає різьби 1-го класу.

Таким чином, результати моделювання підтверджують: зниження похибки швидкості у 26 разів; зниження R_a у 2,0–2,5 рази до паспортного рівня; підвищення класу точності різьби з 3-го до 1-го. Досягнута точність відповідає вимогам класу верстата «Н» за ДСТУ 2807-94 / ГОСТ 8-82.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1 Розрахунок витрат на впровадження мехатронної системи

Розрахунок виконано на підставі комерційних пропозицій постачальників (офіційних дистриб'юторів Danfoss та Siemens в Україні, станом на I квартал 2026 р.) та кошторисних норм на виконання монтажних і пусконаладжувальних робіт ПАТ «Запоріжсталь». Всі ціни наведено без урахування ПДВ.

Витрати класифікуються за категоріями: обладнання (Hardware); матеріали та компоненти; монтажні роботи; навчання персоналу. Структура капітальних витрат на модернізацію (CAPEX) відображена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Структура капітальних витрат на модернізацію (CAPEX)

Найменування обладнання / роботи	К-ть	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4
1. ОСНОВНЕ ОБЛАДНАННЯ			
ЧП Danfoss VLT FC 302, 15 кВт, IP55	1 шт	38 600	38 600
ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C	1 шт	12 400	12 400
Гальмівний резистор 25 Ом / 2,4 кВт, IP65	1 шт	3 200	3 200
Мережевий дросель 3-фазний, 11 кВт (4%)	1 шт	2 800	2 800
2. ЕЛЕКТРИКА ТА МОНТАЖНІ МАТЕРІАЛИ			
Автоматичний вимикач QF1 Schneider Easy9 25A 3п	1 шт	850	850
Блок живлення 24 В DC / 2 А (Siemens LOGO!)	1 шт	1 600	1 600
Шафа керування IP54 (400 × 600 × 200 мм)	1 шт	4 200	4 200
Кабель екранований МКSH 4 × 4 мм ² , 10 м	10 м	280	2 800
Кабелі керування ПВВП 2 × 0,5 мм ² , клеми, DIN	комп л	–	2 400

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4
Кнопковий пост IP54 (SB1–SB4, SA1, RP1, HL1–2)	1 к-т	1 800	1 800
EMC-кабельні гланди (для екранованого кабелю)	4 шт	120	480
Монтажна арматура, кабельні лотки, кріплення	комп л	–	420
3. РОБОТИ			
Монтаж шафи, прокладання кабелів, підключення	24 год	550	13 200
Пусконаладжувальні роботи (ПНР ЧП та ПЛК)	16 год	550	8 800
Навчання операторів та ел. персоналу (4+4 год)	8 год	700	5 600
РАЗОМ			98 250

Загальна сума капітальних витрат (CAPEX) на впровадження мехатронної системи керування становить 98 250 гривень. Зазначена сума охоплює: вартість обладнання та матеріалів – 71 550 грн (72,8 %); вартість монтажних і ПНР робіт – 22 000 грн (22,4 %); навчання персоналу – 5 600 грн (5,7 %). Розподіл витрат свідчить про відносно невисоку частку робіт, що обумовлено серійним характером обладнання та наявністю кваліфікованого електроперсоналу на підприємстві.

Довідково: ринкова вартість нового токарного верстата класу 16K20 (виробництво Тайвань/Китай) становить 350 000–500 000 грн. Вартість модернізації – 98 250 грн (менше 20 % вартості нового верстата) при збереженні перевіреної механічної бази.

4.2 Оцінка економічного ефекту від підвищення точності

Економічний ефект від модернізації формується з п'яти незалежних джерел: (1) зниження витрат на електроенергію; (2) скорочення витрат на позачергові ремонти коробки швидкостей; (3) усунення витрат на елементи РКЛ; (4) зниження шлюбу та витрат на переробку деталей; (5) зниження витрат на змащення.

Джерело 1. Економія електроенергії.

Розрахунок середнього питомого споживання базується на хронометражних спостереженнях: 70 % тривалості зміни – машинний час (різання), 30 % – допоміжний час (встановлення/зняття деталі, вимірювання, переналагодження – холостий хід двигуна).

Середнє споживання при навантаженні (різання):

– існуюча система:

$$P_{\text{навісн}} = P_{\text{ел}}/\eta_{\text{чП}} = 8,2/1,0 = 8,50\text{кВт (двигун + схема РКЛ);}$$

– нова система:

$$P_{\text{навнова}} = P_{\text{мех}}/(\eta_{\text{дВ}} \times \eta_{\text{чП}}) = 7,00/(0,905 \times 0,97) = 7,42\text{кВт.}$$

Середнє споживання на холостому ході:

– існуюча система: $P_{\text{хх_існ}} = 3,45$ кВт (виміряно ватметром);

– нова система: $P_{\text{хх_нова}} = 1,12$ кВт (VVC+ знижує потік до 30 % від номінального на х.х.).

Середньозважене споживання за зміну:

$$P_{\text{сер_існ}} = 0,70 \times 8,50 + 0,30 \times 3,45 = 5,950 + 1,035 = 6,985 \approx 6,99 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{сер_нова}} = 0,70 \times 7,42 + 0,30 \times 1,12 = 5,194 + 0,336 = 5,530 \approx 5,53 \text{ кВт.}$$

Таблиця 4.2 – Розрахунок річної економії електроенергії

Показник	Існуюча (РКЛ)	Нова (VVC+)	Економія
Середнє питоме споживання, кВт	6,99	5,53	1,46
Тривалість зміни, год	8	8	–
Споживання за зміну, кВт·год	$6,99 \times 8 = 55,9$	$5,53 \times 8 = 44,2$	11,7
Кількість робочих змін на рік	240	240	–
Річне споживання, кВт·год	13 416	10 608	2 808
Тариф на ел. ен. (промисловий), грн/кВт·год	4,50	4,50	–
Витрати на ел. ен., грн/рік	60 372	47 736	12 636

Примітка. У попередніх розрахунках середнє споживання помилково прийнято 6,5 кВт без урахування фактичної структури часу зміни. Уточнений розрахунок з явним врахуванням 70/30 дає $P_{\text{сер_існ}} = 6,99$ кВт і $P_{\text{сер_нова}} = 5,53$ кВт. Річна економія електроенергії – 2 808 кВт·год = 12 636 грн/рік.

Джерело 2. Скорочення позачергових ремонтів коробки швидкостей (КШ).

До модернізації щорічний позачерговий ремонт КШ: заміна зубчастого блоку 2 – 7 200 грн, заміна дисків фрикційної муфти – 4 800 грн, трудовитрати 16 год × 350 грн = 5 600 грн. Разом: 17 600 ≈ 18 000 грн/рік.

Після модернізації ударні навантаження при реверсі зникають (плавна зміна напрямку через ЧП). Нормативний інтервал ТО – 2 роки. Річна економія: 18 000 / 2 = 9 000 грн/рік.

Джерело 3. Усунення витрат на елементи РКЛ.

Щорічна заміна: контактори ПМЕ-211 (2 шт × 650 грн) = 1 300 грн; теплове реле ТРН-25 (1 шт) = 480 грн; інші елементи (кнопки, реле часу) = 920 грн; трудовитрати 4 год × 350 грн = 1 400 грн. Разом: 4 100 ≈ 4 200 грн/рік. Після модернізації ці витрати виключаються (компоненти РКЛ демонтуються).

Джерело 4. Зниження шлюбу та витрат на переробку деталей.

Поточний рівень шлюбу з причини перевищення шорсткості поверхні ($R_a > 2,5$ мкм при нормі $R_a \leq 1,6$ мкм) – 8,3 % від виробітку дільниці. За нормативами підприємства деталь, що не відповідає R_a , повертається на переточування (повторний прохід). Очікуваний рівень шлюбу після модернізації – 1,5 % (залишковий шлюб від інших причин: знос різця, неточність встановлення заготовки).

Розрахунок економії. Річний виробіток дільниці: 1 200 деталей. Вартість однієї операції переточування (трудовитрати + заготовка + різець): 450 грн. Зниження відсотка:

$$E = (8,3 \% - 1,5 \%) \times 1\,200 \times 450 = 6,8 \% \times 1\,200 \times 450 \\ = 0,068 \times 540\,000 = 36\,720 \text{ грн/рік.}$$

Джерело 5. Зниження витрат на змащення.

Зменшення кількості механічних пусків (з прямих на плавні) та ударних навантажень знижує витрату мастила для КШ: 1 800 грн/рік (заміна мастила ІГП-38 раз на рік замість двічі).

Таблиця 4.3 – Зведений розрахунок щорічного економічного ефекту

Джерело економії	Сума, грн/рік	Частка, %
Зниження витрат на електроенергію	12 636	19,6
Скорочення позачергових ремонтів КШ	9 000	14,0
Усунення витрат на елементи РКЛ	4 200	6,5
Зниження шлюбу та витрат на переробку деталей	36 720	57,1
Зниження витрат на змащення КШ	1 800	2,8
РАЗОМ	64 356	100,0

Найбільша частка в структурі економічного ефекту (57,1 %) – зниження шлюбу. Це підкреслює, що основна вигода від модернізації є якісною (підвищення точності продукції), а не лише кількісною (економія ресурсів). Зменшення шлюбу також позитивно впливає на репутацію ремонтної дільниці та відповідність вимогам ISO 9001.

4.3 Розрахунок терміну окупності та техніко-економічні показники

Розрахунок виконано методом простого терміну окупності (Simple Payback Period, PP) – найпоширенішим та найбільш консервативним методом для проектів модернізації промислового обладнання. Термін окупності (PP):

$$T_{ок} = CAPEX / E_{pик} = 98250 / 64356 = 1,527 \text{ року} \\ \approx 1,53 \text{ року} \approx 18,3 \text{ місяця} \approx 19 \text{ місяців.}$$

Помісячна динаміка окупності інвестицій відображено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Помісячна динаміка окупності інвестицій

Місяць	CAPEX, грн	Накоп. ефект, грн	Баланс (ефект – CAPEX), грн
0	98 250	0	-98 250
3	0	16 089	-82 161
6	0	32 178	-66 072
9	0	48 267	-49 983
12	0	64 356	-33 894
15	0	80 445	-17 805
18	0	96 534	-1 716
19	0	101 894	+3 644 ← ТОЧКА ОКУПНОСТІ
24	0	128 712	+30 462
36	0	193 068	+94 818
60	0	321 780	+223 530
120	0	643 560	+545 310

Тобто початкові інвестиції 98 250 грн повністю відшкодовуються за рахунок щорічної економії 64 356 грн протягом 19 місяців.

Чистий економічний ефект (NPV за простим методом без дисконтування) за нормативний термін служби ЧП Danfoss FC 302 (10 років активної роботи):

$$E_{net} = N_{років} \times E_{рік} - CAPEX = 10 \times 64356 - 98250 = 643560 - 98250 = 545310 \text{ грн.}$$

Рентабельність інвестицій (Return on Investment, ROI): $ROI = E_{net} / CAPEX \times 100 \% = 545\,310 / 98\,250 \times 100 \% = 554,9 \% \approx 555 \%$. Це означає, що кожна гривня, вкладена в модернізацію, принесе 5,55 грн чистого ефекту за 10 років. Зведені техніко-економічні показники проєкту модернізації відображено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Зведені техніко-економічні показники проєкту модернізації

Показник	Значення
Капітальні витрати (CAPEX), грн	98 250
Річний економічний ефект (E_рік), грн/рік	64 356
Термін окупності (PP), місяців	19
Чистий ефект за 10 років (E_net), грн	545 310
Рентабельність інвестицій (ROI), %	555
Зниження похибки підтримання шпинделя	у 26 разів (з $\pm 2,1 \%$ до $\pm 0,08 \%$)
Зниження пускового струму	у 5,3 р. (130,5 А \rightarrow 24,5 А)
Зниження шорсткості Ra	у 2,0–2,5 рази (до 1,5–2,0 мкм)
Підвищення класу точності різьби	з 3-го до 1-го (на 2 ступені)
Річна економія електроенергії, кВт·год	2 808
Скорочення позачергових ремонтів КШ	у 2,5 рази (щорічно \rightarrow кожні 2,5 роки)

Проведений техніко-економічний аналіз підтверджує інвестиційну привабливість проєкту модернізації. Термін окупності 19 місяців є значно меншим від нормативного (36 місяців для проєктів технічного переоснащення у металургійній промисловості). Рентабельність 555 % за 10 років перевищує альтернативні варіанти використання капіталу (банківський депозит 15–18 % річних). Додатковим нефінансовим ефектом є підвищення якості продукції та рівня промислової безпеки.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ


5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Аналіз умов праці при роботі на модернізованому верстаті 16K20 виконано відповідно до НПАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» [11], ДСТУ EN ISO 13849-1:2024 «Безпечність машин» [12] та Класифікатора виробничих факторів ДСТУ ГОСТ 12.0.003. Для верстата 16K20 з новою мехатронною системою керування ідентифіковано вісім груп небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ), наведених у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Класифікація та оцінка ризиків НШВФ при роботі на верстаті 16K20

Група НШВФ	Конкретний фактор	Ступінь ризику	Ймов., %	Захисний захід
Механічні	Контакт з обертовим шпинделем, патроном, заготовкою	Критичний	5	Захисний екран, блокування при відкриванні
Механічні	Виліт стружки та крапель МОР із зони різання	Середній	15	Захисний екран, ЗІЗ (окуляри EN 166)
Механічні	Контакт з різцем при заміні різальних пластин	Середній	10	ЗІЗ (рукавиці), обов'язкова зупинка
Електричні	Ураження струмом 380 В у силовому ланцюзі	Критичний	2	Заземлення РЕ, ізоляція, QF1, ЗІЗ
Електричні	Залишковий заряд конденсаторів ЧП після вимкнення	Середній	8	Витримка ≥ 5 хв після вимкнення живлення
Хімічні	Вплив МОР (мастильно-охолоджувальна рідина)	Низький	20	ЗІЗ (рукавиці, фартух); вентиляція
Фізичні	Шум від різання і передач КШ (до 82 дБА)	Середній	100	ЗІЗ (навушники $SNR \geq 20$ дБ); регл. перерви

Аналіз таблиці 5.1 виявляє два фактори з критичним рівнем ризику: обертові частини верстата та напруга 380 В. Для обох факторів



передбачені апаратні засоби захисту (захисний екран та система заземлення + функція STO), а не лише адміністративні заходи (інструктажі). Це відповідає принципу ієрархії заходів безпеки (Hierarchy of Controls): усунення → заміна → інженерні заходи → адміністративні → ЗІЗ. Специфічні ризики від частотного перетворювача. Впровадження ЧП вносить два нові ризики, яких не було при РКЛ: залишковий заряд конденсаторів DC-ланки (до 800 В протягом кількох хвилин після вимкнення живлення) та ВЧ-ЕМП. Обидва ризики враховані в конструкції шафи та системи заземлення, описаних у підрозділі 5.3.

5.2 Вимоги безпеки до мехатронної системи керування

Система керування верстатом відповідає вимогам Директиви ЄС 2006/42/ЄС «Машинна директива» та гармонізованих стандартів EN ISO 13849-1:2023 і EN 62061:2021 щодо функціональної безпеки.

Safe Torque Off (STO). Функція STO ЧП Danfoss FC 302 сертифікована за Категорією безпеки 3, Рівнем PLd відповідно до EN ISO 13849-1:2023. STO апаратно відключає сигнали керування затворами IGBT-транзисторів, незалежно від стану мікропроцесора ЧП та ПЛК. Час реакції STO після розмикання ланцюга: ≤ 10 мс. Після активації STO двигун вибігає (не гальмує), що прийнятно для верстата (шпindel ь зупиняється через тертя за 3–5 с при $n = 400$ об/хв).

Логіка підключення STO (fail-safe схема): ланцюг STO1 і STO2 підключені послідовно до NC-контакту кнопки SA1. У нормальному стані (кнопка не натиснута, провід цілий): +24 В на STO → ЧП дозволяє роботу. При натисканні SA1 або обриві будь-якого проводу ланцюга: 0 В на STO → ЧП активує STO ≤ 10 мс. Принцип fail-safe гарантує безпечний стан при будь-якій відмові в ланцюзі керування.

Захист від мимовільного пуску після відновлення живлення. Параметр ЧП P14-22 = Normal operation, P14-20 = Manual reset. Після відновлення живлення або скидання помилки ЧП переходить в стан «Готовий до пуску» без автоматичного старту двигуна. Наступний пуск можливий лише при явному натисканні кнопки SB1 або SB2 оператором. Це відповідає вимогам НПАОП 0.00-1.21-98 п. 3.2.9 (заборона самозапуску обладнання).

Електромагнітна сумісність (EMC). ЧП FC 302 оснащено вбудованим EMC-фільтром класу C2 (IEC 61800-3 / EN 55011). Для додаткового захисту: між ЧП та двигуном використовується екранований кабель 4×4 мм²; екран заземлений з обох боків через металеві EMC-гланди 360° – це забезпечує відведення струмів ВЧ-перешкод через РЕ-шину, а не через ланцюги керування ПЛК; мережевий дросель L1 (4 % реактанс) знижує ТНД вхідного струму ЧП з 80 % до 5,2 %, що відповідає нормі EN 61000-3-12 для промислових мереж [13].

Захист від помилкових команд. У програмі ПЛК реалізовано апаратно-програмне блокування: команди «Вперед» і «Назад» взаємно блокуються (НЗ-контакти в ланцюгах Q0.0 та Q0.1); при активному E-Stop

(I0.0 = 0) будь-яка команда пуску ігнорується; при відсутності сигналу готовності ЧП (I0.6 = 0) команда RUN (Q0.0) не виконується.

5.3 Заходи з електробезпеки та захисту від ураження електричним струмом

Всі заходи з електробезпеки реалізовано відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ-2017), НПАОП 0.00-1.21-98 та ДСТУ EN 60204-1:2019 «Безпечність машин. Електрообладнання».


Захисне заземлення. Корпус верстата, корпус ЧП FC 302 та металевий корпус шафи керування з'єднані між собою та з загальноцеховим контуром захисного заземлення ПАТ «Запоріжсталь» провідниками РЕ перерізом 10 мм² (ПВЗ × 10 жовто-зелений). Опір кола захисного заземлення – не більше 4 Ом (вимога ПУЕ). Вимірний опір: 1,8 Ом. Заземлення виконано незалежно для кожного елемента (верстат, ЧП, шафа) – «зіркою» від спільної шини РЕ цеху, без послідовного підключення.

Захист від надструмів. Автоматичний вимикач QF1 Schneider Easy9 (25 А, 3-полюсний, характеристика D, I_{кз} = 6 кА) захищає силовий ланцюг від коротких замикань. Характеристика D (час спрацювання 0,02–0,1 с при I > 10 × I_н) обрана для виключення помилкових спрацювань під час пускового струму ЧП. Вбудований електронний захист ЧП FC 302: від перевантаження (I > 1,5 × I_н протягом 60 с → помилка A19); від перегріву радіатора (T > 75 °C → помилка A5); від пониженої та підвищеної напруги мережі (< 320 В або > 528 В → помилка A17); від обриву фази (→ помилка A29).

Захист від залишкового заряду конденсаторів ЧП. Конденсатори DC-ланки ЧП після вимкнення живлення зберігають заряд до 800 В протягом 4–7 хвилин. На дверці шафи керування розміщено попереджувальний знак: «Після вимкнення живлення відкривати шафу не раніше ніж через 5 хвилин!» (відповідно до вимог Danfoss та НПАОП). Розряджувальний резистор у ЧП FC 302 знижує напругу до безпечного рівня (< 50 В) за 4 хв.

Кваліфікаційні вимоги до персоналу. До роботи з обладнанням, що містить ЧП та ПЛК, допускаються особи, які: пройшли навчання за програмою роботи з електрообладнанням до 1000 В; мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче II (оператор) або III (електромонтер, що проводить обслуговування); пройшли цільовий інструктаж щодо особливостей ЧП (залишковий заряд, функція STO, процедура скидання помилок). Атестація персоналу – щорічно.

Попереджувальне маркування. На шафі керування розміщено такі знаки і написи: «Небезпечна напруга 380 В / 800 В DC» (на дверці шафи); «Після вимкнення живлення витримати ≥ 5 хвилин перед відкриттям шафи» (на дверці); «Заземлення – обов'язкове» (на корпусі ЧП); «Обертіві частини верстата – не торкатися» (на корпусі верстата); «E-Stop – аварійна зупинка» (на червоній кнопці SA1).



Засоби індивідуального захисту оператора. Перелік обов'язкових ЗІЗ: захисні окуляри EN 166 або екран обличчя (від вильоту стружки); берет або кепка (від захоплення волосся обертовим шпинделем); захисне взуття зі сталевим підноском EN ISO 20345 (від падіння деталей); спецодяг без вільних кінців (ризик захоплення обертовими частинами). Рукавиці – лише при встановленні та знятті деталей при зупиненому шпинделі; під час роботи верстата рукавиці заборонені (ризик захоплення рукавиці шпинделем).

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання підвищення точності механообробки токарного верстата 16K20 шляхом розробки та впровадження мехатронної системи керування головним електроприводом на базі частотного перетворювача з безсенсорним векторним керуванням. За результатами виконаних досліджень зроблено такі висновки.

Аналіз технічного стану верстата 16K20 в умовах ремонтно-механічної дільниці ПАТ «Запоріжсталь» встановив: основним джерелом підвищеної шорсткості обробленої поверхні ($R_a = 3,2\text{--}4,0$ мкм при нормі $1,6\text{--}2,5$ мкм) є нестабільність частоти обертання шпинделя ($\pm 2,1$ %) від існуючої релейно-контакторної системи прямого пуску. Додаткові недоліки – пускові струми $5,8 \times I_n = 130,5$ А, механічні удари при реверсуванні ($2,0\text{--}2,5 \times M_n$) та відсутність плавного регулювання швидкості – призводять до прискореного зносу коробки швидкостей і перевитрати електроенергії.


Розроблено мехатронну систему керування, що включає частотний перетворювач Danfoss VLT AutomationDrive FC 302 (15 кВт, IP55) з алгоритмом VVC+ та ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1212C. Замкнена структура системи з безсенсорним спостерігачем потоку забезпечує точність підтримання швидкості шпинделя $\pm 0,25$ % при зміні навантаження $0\text{--}100$ % від номінального. Розроблено повну конструкторську документацію: структурну, функціональну та принципову електричну схеми, карту І/О-сигналів ПЛК.

Побудовано математичну модель частотного електропривода у системі координат $d\text{--}q$ на основі ідентифікованих параметрів двигуна АО2-61-4. Параметри ПІ-регулятора швидкості синтезовано та уточнено в Matlab/Simulink R2024b: $K_p = 10,2$; $T_i = 0,065$ с. Отримані показники якості: $t_p = 0,32$ с (норма $\leq 0,5$ с); $\delta = 4,1$ % (норма ≤ 5 %).

Комп'ютерне моделювання порівняльних режимів «DOL проти VVC+» підтвердило ефективність модернізації: похибка підтримання швидкості при кидку навантаження зменшилася у 26 разів (з ± 31 до $\pm 1,2$ об/хв); пусковий струм знизився у 5,3 рази ($130,5 \rightarrow 24,5$ А); ударний момент при реверсуванні зменшився у 2,2 рази; споживання електроенергії на холостому ході скоротилося у 3,1 рази ($3,45 \rightarrow 1,12$ кВт).

Оцінка точності механообробки показала: шорсткість поверхні R_a знижується у $2,0\text{--}2,5$ рази (до $1,5\text{--}2,0$ мкм) при чистовому точінні, що відповідає паспортному значенню верстата; клас точності нарізаної різьби $M36 \times 2$ підвищується з 3-го до 1-го – результат, критично важливий для прецизійних кріплень прокатного обладнання.

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність модернізації: загальні капітальні витрати – 98 250 грн; структура річного економічного ефекту: зниження шлюбу – 36 720 грн (57,1 %), економія



електроенергії – 12 636 грн (19,6 %), скорочення ремонтів – 9 000 грн (14,0 %), усунення витрат на РКЛ – 4 200 грн (6,5 %), мастило – 1 800 грн (2,8 %); сумарний E_рік = 64 356 грн/рік; термін окупності – 19 місяців; ROI за 10 років – 555 %.

Впровадження функції Safe Torque Off (STO) за Категорією 3 / PLd (EN ISO 13849-1) та схеми аварійного зупину за принципом fail-safe (NC-контакт) підвищує рівень промислової безпеки до вимог Директиви ЄС 2006/42/ЄС. Зменшення пускових струмів та ударних моментів при реверсуванні додатково підвищує безпеку суміжного обладнання та обслуговуючого персоналу.

Результати кваліфікаційної роботи рекомендовані до впровадження на верстатах 16K20, що перебувають в експлуатації на ПАТ «Запоріжсталь», та можуть бути поширені на аналогічні верстати 1K62, 16K25, 163 на інших підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лясковець, О. В. Теоретико-методичні основи щодо забезпечення, оцінки та регулювання рівня розвитку економічної безпеки підприємств машинобудування. Збірник наукових праць «Формування ринкових відносин в Україні». 2016. № 7(182). С. 47–52.
2. Кузнецов Ю. М., Дмитрієв Д. О., Волошин Д. Л. Верстати з паралельною кінематикою. Київ : Технологія, 2009. 521 с.
3. Алексєєв Г. В. Охорона праці в машинобудуванні. Київ : Техніка, 2004. 256 с.
4. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. 5th ed. New York : McGraw-Hill, 2012. 756 p.
5. Mohan N. Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB / Simulink. Hoboken : Wiley, 2014. 241 p.
6. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed. Berlin : Springer, 2001. 460 p.
7. Налобіна, О. О. Випробування, сертифікація і стандартизація машин : навч. посібник / О. О. Налобіна. Національний університет водного господарства та природокористування. Рівне : НУВГП, 2018. 259 с.
8. Danfoss A/S. VLT® AutomationDrive FC 302. Operating Guide. MG38C102. Nordborg : Danfoss, 2022. 486 p. URL: <https://drives.danfoss.com/downloads/pc/MG38C102.pdf> (дата звернення: 15.03.2026).
9. Терещенко Т. О., Хижняк Т. А. Системи керування електроприводами : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 224 с.
10. MathWorks Inc. MATLAB/Simulink Documentation: Simscape Electrical – Motor Control. Natick : MathWorks, 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/mcb/> (дата звернення: 20.03.2026).
11. НПАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1998. 169 с.
12. ДСТУ EN ISO 13849-1:2024. Безпечність машин. Частина систем керування, пов'язані з безпекою. Ч. 1. Загальні принципи проектування (EN ISO 13849-1:2023, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2025.
13. IEC 61800-3:2017. Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods. – Geneva : IEC, 2017. 112 p.
14. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller. System Manual. A5E02486682-AL. – Nürnberg : Siemens AG, 2021. 736 p.
15. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

ДОДАТОК А

ЦИКЛОГРАМА РОБОТИ ВЕРСТАТА ТА РОЗРАХУНКОВІ РЕЖИМИ РІЗАННЯ

Таблиця А.1 – Розрахункові режими різання при обробці деталі (матеріал – сталь 45, НВ = 170, різець Т15К6, D = 80 мм)

№	Операція	t, мм	s, мм/об	v, м/хв	n, об/хв	P _z , Н	N _{різ} , кВт
1	Підрізання торця (чорн.)	2,5	0,45	90	450	2 180	3,27
2	Точіння зовн. (чорн.)	3,0	0,50	100	400	2 850	4,75
3	Точіння зовн. (чорн.) 2-й прохід	3,0	0,50	100	400	2 850	4,75
4	Точіння зовн. (напівчорн.)	1,5	0,30	120	500	1 080	2,16
5	Точіння зовн. (чистове)	0,5	0,12	180	800	215	0,64
6	Розточування (чорн.)	2,0	0,35	80	350	1 540	2,05
7	Розточування (чист.)	0,5	0,10	150	630	175	0,44
8	Підрізання торця (чист.)	0,3	0,10	160	630	98	0,26
9	Проточування канавки В=3 мм	2,0	0,15	60	250	820	0,82
10	Нарізання різьби М36×2 (прох.1)	0,4	2,00	30	125	640	0,32
11	Нарізання різьби М36×2 (прох.2)	0,2	2,00	30	125	320	0,16

Примітка. Сила різання P_z визначена за формулою П. А. Малова: P_z = 10 × C_p × t^x × s^y × vⁿ × K_p, де для сталі 45 (НВ 170), різець Т15К6: C_p = 300; x = 1,0; y = 0,75; n = -0,15; K_p = 1,0. Потужність різання: N_{різ} = P_z × v / (60 × 10³), кВт. Максимальна потужність різання – 4,75 кВт (переходи 2, 3); коефіцієнт завантаження двигуна K_з = 4,75 / 11 = 0,43 – запас потужності достатній.

Таблиця А.2 – Розрахунок часу переходів та машинного часу

№	Операція	L, мм	n, об/хв	s, мм/об	t_маш, хв
1	Підрізання торця	40	450	0,45	0,20
2	Точіння зовн. (чорн.)	95	400	0,50	0,49
3	Точіння зовн. (чорн.)	95	400	0,50	0,49
4	Точіння (напівчорн.)	95	500	0,30	0,63
5	Точіння (чистове)	95	800	0,12	0,99
6	Розточування (чорн.)	80	350	0,35	0,65
7	Розточування (чист.)	80	630	0,10	1,27
8	Підрізання торця (чист.)	38	630	0,10	0,60
9	Канавка В=3 мм	3	250	0,15	0,08
10	Різьба М36×2 прох.1	50	125	2,00	0,20
11	Різьба М36×2 прох.2	50	125	2,00	0,20
РАЗО М					5,80 хв

Примітка. Машинний час $t_{\text{маш}} = L / (n \times s)$, де $L = l_{\text{деталі}} + l_{\text{перебігу}}$ ($l_{\text{перебігу}} = 2-5$ мм залежно від операції). При двозмінній роботі (16 год/добу) та допоміжному часі $t_{\text{доп}} = 3,5$ хв на деталь: продуктивність дільниці $\approx 1\ 200$ деталей/рік при 240 робочих змінах.

ДОДАТОК Б
НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧП DANFOSS VLT
AUTOMATIONDRIVE FC 302 ДЛЯ ВЕРСТАТА 16K20

Таблиця Б.1 – Перелік параметрів налаштування FC 302 (основні)

Параметр	Назва	Значення	Коментар
1	2	3	4
P 1-00	Configuration Mode	1 – Speed closed loop	Замкнений контур за швидкістю
P 1-01	Motor Control Principle	3 – VVC+	Алгоритм векторного керування
P 1-20	Motor Power [kW]	11,0 кВт	Номінальна потужність двигуна
P 1-22	Motor Voltage [V]	380 В	Номінальна напруга двигуна
P 1-23	Motor Frequency [Hz]	50 Гц	Номінальна частота мережі
P 1-24	Motor Current [A]	22,5 А	Номінальний струм двигуна
P 1-25	Motor Nominal Speed [RPM]	1460 об/хв	Номінальна швидкість двигуна
P 1-26	Motor Cont. Rated Torque	71,9 Н·м	Розраховано: P_n/ω_n
P 1-29	Automatic Motor Adaptation	1 – Enable	Автоматична ідентифікація параметрів двигуна
P 3-02	Minimum Reference	0 Гц (0 В на AI)	Мінімальне задання швидкості = стоп
P 3-03	Maximum Reference	50 Гц (10 В на AI)	Максимальне задання – 50 Гц (1460 об/хв)
P 3-41	Ramp 1 Ramp Up Time	1,5 с	Час розгону від 0 до 50 Гц (S-крива)
P 3-42	Ramp 1 Ramp Down Time	1,5 с	Час гальмування від 50 до 0 Гц
P 3-80	Jerk Limit	Enabled	S-крива: плавна зміна темпу розгону/гальм.

Продовження табл. Б.1

1	2	3	4
P 4-11	Motor Speed Low Limit [Hz]	0,5 Гц	Мінімальна вихідна частота
P 4-13	Motor Speed High Limit [Hz]	60 Гц	Максимальна вихідна частота (запас 20 %)
P 4-18	Current Limit [%]	150 %	Обмеження струму на рівні 150 % від I_n
P 5-01	Terminal 27 Mode	Input – DI	DIN 27 → команда RUN від Q0.0 ПЛК
P 5-10	Terminal 27 Digital Input	1 – Run	Дозвіл роботи при +24 В на DIN 27
P 6-10	Terminal 53 Low Voltage [V]	0 В	0 В → 0 Гц (мінімальне задання)
P 6-11	Terminal 53 High Voltage [V]	10 В	10 В → 50 Гц (максимальне задання)
P 8-30	Protocol	1 – Modbus RTU	Протокол зв'язку з ПЛК S7-1200
P 8-31	Address	1	Адреса Modbus Slave
P 8-32	Baud Rate	9600 bps	Швидкість обміну Modbus RTU
P 14-20	Reset Mode	0 – Manual Reset	Скидання помилки – лише вручну (SB3)
P 14-22	Operation Mode	0 – Normal operation	Без автоматичного перезапуску

Примітка. Після введення паспортних параметрів двигуна (P 1-20 ... P 1-26) рекомендується виконати процедуру АМА (Automatic Motor Adaptation, P 1-29 = Enable, потім натиснути [Hand On]). АМА автоматично виміряє R_s, R_r, L_s, L_r і запише результати в P 1-30 ... P 1-35. Це підвищує точність VVC+ та скорочує час налаштування. Перед АМА двигун повинен бути відключений від навантаження (без ременя або при роботі на холостому ходу верстата).

ДОДАТОК В

ПЕРЕЛІК ТА ОПИС АРКУШІВ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ

Аркуш 1 (А3). Загальний вигляд верстата 16К20. Масштаб 1:10. Проекції: вигляд спереду, вигляд зверху, вигляд справа. Позначено основні вузли: А – шпindelьна бабка з КШ, Б – супорт з різцетримачем, В – задня бабка, Г – фартух, Д – станина, Е – коробка подач, Ж – шафа керування (нова, змонтована на стінці верстата). Основний напис – за ДСТУ ГОСТ 2.104:2006 (форма 1, основний напис для креслень). Позначення: ЛТА.133.2026.001.ГЗ.

Аркуш 2 (А3). Кінематична схема головного руху верстата 16К20. Умовні позначення передач за ДСТУ ГОСТ 2.770:2004. Вказано: числа зубів шестерень ($z_1 = 56$, $z_2 = 38$, $z_3 = 27$, ...) та їх розміщення на валах I–IV; характеристики клинопасової передачі (три паси тип В, $i = 0,5$); структура переборного ряду ($i_{\text{п}} = 0,25$). Таблиця 22-ступенів частоти обертання шпинделя (12,5–1600 об/хв). Позначення: ЛТА.133.2026.001.КЗ.

Аркуш 3 (А3). Математична модель частотного електропривода в Matlab/Simulink R2024b. Скриншот повної Simulink-моделі з позначенням блоків (Three-Phase Source, Universal Bridge, Asynchronous Machine, FOC Controller, MRAS Observer, Load). Графіки перехідних процесів: $n(t)$ при розгоні та кидку навантаження 30 Н·м для режимів DOL та VVC+ (порівняння); $i_{\text{sd}}(t)$, $M_{\text{ем}}(t)$, $\psi_{\text{rd}}(t)$ в усталеному режимі. Позначення: ЛТА.133.2026.001.МД.

Аркуш 4 (А3). Структурна схема мехатронної системи керування. Показано взаємозв'язок підсистем: пульт оператора (SB1–SB4, SA1, RP1) → ПЛК S7-1200 → ЧП FC 302 → двигун M1 → шпindelь верстата. Зворотні зв'язки: Modbus RTU (діагностика ЧП → ПЛК); аналоговий вихід AI ($n_{\text{зад}}$ → ЧП); STO (SA1 → ЧП, апаратне). Підсистема охолодження: ПЛК Q0.2 → КМЗ → M2 (насос MOP). Позначення: ЛТА.133.2026.001.СС.

Аркуш 5 (А3). Функціональна схема системи керування електроприводом. Алгоритм формування задання швидкості: RP1 (0–10 В) → масштабування (0–50 Гц) → $f_{\text{зад}}$. Внутрішня структура VVC+: ПІ-регулятор швидкості (K_p , T_i), перетворення $dq \rightarrow abc$, ШІМ 4 кГц, MRAS-спостерігач (оцінка ω та ψ_r). Логіка безпеки: STO-ланцюг (SA1 → STO1/STO2); антиреверс NOT(Q0.0 AND Q0.1); заборона RUN при I0.6 = 0. Позначення: ЛТА.133.2026.001.ФС.

Аркуш 6 (А3). Принципова електрична схема силового ланцюга та ланцюга керування. Силовий ланцюг: XS1 → QF1 (25А, хар. D) → L1 (дросель 4%) → ЧП FC302 (R/S/T) → (U/V/W) → M1; BR1 (25 Ом) → клеми R+/R-. Ланцюг керування 24 В DC: SA1 → STO1/STO2; SB1–SB4 → DI ПЛК; RP1 → AI ПЛК; Q0.0 → DIN27; Q0.1 → DIN28; Q0.5 → AIN; Q0.2 → КМЗ; Q0.3 → HL1; Q0.4 → HL2+HA1. Схема компонування шафи керування. Специфікація елементів. Позначення: ЛТА.133.2026.001.ЕЗ.