

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 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Форма навчання Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Олійника Сергія Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Електромеханічне обладнання механічного виробництва. Електропривод
токарного станку 1М63Н-3.

(повна назва теми)

за матеріалами РМЦ-3 ПАТ «ЛМЗ»

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

доцент, к.т.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Модло Є.О.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 2026 р. № _____

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 бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«____» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Олійника Сергія Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема випускної кваліфікаційної роботи Електромеханічне обладнання механічного виробництва. Електропривод токарного станку 1М63Н-3.

керівник випускної роботи Модло Євгеній Олександрович, доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ 2026 року
№ 238-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 13.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи: найбільший діаметр оброблення над супортом 350 мм; межі частоти обертання шпинделя від 10 до 1250 об/хв; номінальна потужність наявного двигуна головного руху 15 кВт за частоти обертання 1465 об/хв та напруга живлення 380 В частотою 50 Гц; оброблюваний матеріал – конструкційна вуглецева сталь із границею міцності близько 750 МПа; інструмент – різець із твердосплавною пластиною; заходи з охорони праці та пожежної безпеки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1 Аналітична частина: дослідити принцип роботи та характеристики електроприводу 1М63Н-3; проаналізувати існуючу систему управління; виявити недоліки. 4.2 Основна частина: розробити функціональну схему модернізованої системи електропривода; розробити алгоритм роботи; обрати керуюче обладнання; обґрунтувати вибір обладнання; розробити принципову схему підключення; побудувати комп'ютерну модель для перевірки адекватності роботи системи; розглянути заходи з охорони праці та пожежної безпеки; сформулювати висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

ВРБ.141.238-ст.05.E2 - Функціональна схема модернізованої системи електропривода головного руху «перетворювач частоти – асинхронний двигун»;
ВРБ.141.238-ст.05.E1 - Структурна схема моделі системи векторного керування електроприводом головного руху; ВРБ.141.238-ст.05.E3 - Принципова електрична схема; ВРБ.141.238-ст.05.E01 – Результати моделювання; ВРБ.141.238-ст.05.K1 – Загальний вигляд

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Модло Є.О.	15.04.2026	15.04.2026
Основна частина	Модло Є.О.	15.04.2026	15.04.2026

7. Дата видачі завдання 15.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	24.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	02.06.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	13.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	16.06.2026	

Студент

(підпис)

Олійник С.І.,
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Модло Є.О.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.				
1	A3	ВРБ.141.238-ст.05.К1	Загальний	1						
2			вигляд							
3										
4	A3	ВРБ.141.238-ст.05.E1	Схема електрична	1						
5			структурна моделі							
6			системи векторного							
7			керування електроприводом							
8			головного руху							
9										
10	A3	ВРБ.141.238-ст.05.E2	Схема електрична	1						
11			функціональна							
12										
13	A3	ВРБ.141.238-ст.05.E3	Схема електрична	1						
14			принципова							
15										
16	A3	ВРБ.141.238-ст.05.E01	Результати моделювання	1						
17										
18	A3	ВРБ.141.244-ст.05.ПЗ	Пояснювальна записка	88						
19										
20										
			ВРБ.141.238-ст.05.ВР							
Зм.	Арк.	№ документа					Підпис	Дата		
Розроб.		Олійник С.І..			Електромеханічне обладнання механічного виробництва. Електропривод токарного станку 1М63Н-3. Відомість роботи		Літера		Аркуш	Аркушів
Пров.		Модло Є.О.							4	1
							ННТІ ДУЕТ			
Н.контр.		Модло Є.О..					Каф.ЕІА			
Затв.		Модло Є.О.					гр. АВ-21			

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра: 88 с., 8 рис., 6 табл., 33 джерела використаної літератури.

Об'єкт розробки: є електропривод токарно-гвинторізного станку 1М63Н-3.

У ході роботи було проведено аналіз існуючого стану системи керування цим обладнанням, а також запропоновано технічне поліпшення шляхом модернізації силового електропривода з використанням системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ-АД) та заміни нерегульованого привода зі ступінчастою коробкою швидкостей на систему з векторним керуванням.

Були виконані детальні розрахунки параметрів електромеханічної системи, включаючи потужність двигуна для чорнових і чистових режимів оброблення сталі, момент інерції механічних частин, а також характеристики системи автоматичного керування. Для перевірки коректності запропонованих рішень виконано моделювання системи електропривода за допомогою середовища MATLAB/Simulink, що дало можливість оцінити якість регулювання, плавність пуску, реверсу та стабільність роботи привода в перехідних і навантажувальних режимах.

Окрім технічних аспектів, у роботі розглянуто питання охорони праці, виробничої безпеки, пожежної безпеки та енергоефективності, а також визначено необхідні заходи для нормалізації шкідливих факторів виробничого середовища. Робота завершується висновками, у яких підбито підсумки виконаних досліджень та обґрунтовано доцільність реалізації запропонованих технічних рішень.

Ключові слова: токарно-гвинторізний верстат 1М63Н-3, головний рух, асинхронний двигун, перетворювач частоти, векторне керування, плавний пуск, енергоефективність, MATLAB/Simulink, охорона праці.

ЗМІСТ

ВСТУП	8.
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	11
1.1 Загальна характеристика верстата	11
1.2 Основні технічні характеристики	24
1.3 Конструктивна будова та склад обладнання.	25
1.4 Електромеханічна система верстата	27
1.5 Електричні двигуни та їх технічні параметри	28
1.6 Система керування та захист електроприводу	36
1.7 Технічні та експлуатаційні вимоги до приводу головного руху.	38
1.8 Перспективи модернізації електроприводу	40
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	42
2.1. Недоліки нерегульованого електропривода та доцільність переходу до частотного керування	42
2.2. Порівняння наявної та модернізованої систем електропривода	43
2.3. Опис електропривода модернізованої системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун»	45
2.4. Робота схеми керування електроприводом	56
2.5. Модернізація системи керування на основі векторного принципу.....	58
2.6. Розрахунок потужності різання й перевірка електродвигуна	59
2.7. Вибір електродвигуна модернізованого привода	66
2.8. Розрахунок параметрів та вибір перетворювача частоти	68
2.9. Вибір комутаційно-захисної апаратури й живильних кабелів	70
2.10. Математичний опис асинхронного двигуна в обертовій системі координат	72
2.11. Структура моделі та реалізація векторного керування	74
2.12. Заходи з охорони праці	78
2.12.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників	79
2.12.2 Організаційні та технічні заходи безпеки	80

2.12.3 Пожежна безпека та засоби індивідуального захисту	81
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85

ВСТУП

Металорізальне обладнання вітчизняних машинобудівних підприємств значною мірою сформоване верстатами, спроектованими у другій половині минулого століття, серед яких помітне місце посідає важкий токарно-гвинторізний верстат моделі 1М63Н-3. Висока жорсткість станини, широкий діапазон оброблюваних діаметрів та надійність механічної частини зумовлюють тривалу експлуатацію подібних машин навіть за умов морального старіння системи керування. Водночас електропривод головного руху, побудований за схемою нерегульованого асинхронного двигуна зі ступінчастою механічною коробкою швидкостей, перестав відповідати вимогам енергоощадності, гнучкості технологічних режимів та точності підтримання швидкості різання, що висуваються до сучасного виробництва [22].

Заміна морально застарілої системи частотно-регульованим електроприводом «перетворювач частоти – асинхронний двигун» належить до перевірених інженерних рішень, які поєднують економічну доцільність із технічною простотою впровадження. Регульований привод змінного струму витіснив із багатьох галузей як привод постійного струму, так і традиційні нерегульовані рішення, ставши фактичним стандартом промислової автоматизації [31]. Стосовно металорізального обладнання перехід до частотного керування дає змогу плавно змінювати частоту обертання шпинделя, реалізувати безступінчасте регулювання, підтримувати раціональну швидкість різання впродовж усього циклу оброблення та суттєво знизити втрати енергії під час пуску, гальмування й роботи з частковим навантаженням [28].

Актуальність обраної теми визначається потребою підвищення енергетичної та експлуатаційної ефективності парку важких токарних верстатів за обмежених інвестиційних ресурсів, коли повна заміна обладнання економічно

невиправдана, а цільова модернізація електроприводної частини забезпечує відчутний приріст показників за помірних капіталовкладень [22].

Об'єктом дослідження є електропривод головного руху токарно-гвинторізного верстата 1М63Н-3.

Предметом дослідження виступають процеси та технічні рішення модернізації системи керування електроприводом головного руху на основі перетворювача частоти з векторним керуванням.

Мета роботи полягає у підвищенні енергетичних та експлуатаційних показників верстата 1М63Н-3 шляхом заміни нерегульованого електропривода головного руху частотно-регульованою системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» з векторним керуванням.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких завдань:

1. проаналізувати конструкцію та електрообладнання верстата 1М63Н-3, виявити недоліки наявної системи електропривода головного руху;
2. обґрунтувати структуру модернізованої системи та виконати порівняння показників наявного й запропонованого рішень;
3. розкрити принцип роботи схеми керування модернізованим електроприводом;
4. виконати розрахунок електропривода та здійснити обґрунтований вибір електрообладнання;
5. побудувати математичну модель системи та дослідити перехідні процеси засобами MATLAB/Simulink;
6. розробити заходи з охорони праці та оцінити економічну ефективність модернізації.

Методологічну основу роботи становлять аналіз науково-технічних джерел, методи теорії електропривода та електричних машин, математичне й

комп'ютерне моделювання динамічних режимів, а також методи техніко-економічного аналізу інвестиційних рішень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості безпосереднього застосування запропонованої структури привода, розрахункових співвідношень та переліку обраного обладнання під час реальної модернізації верстатів моделі 1М63Н та споріднених важких токарно-гвинторізних верстатів 163-ї серії.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальна характеристика верстата 1М63Н-3

Токарно-гвинторізний верстат 1М63Н-3 є універсальним металорізальним обладнанням третього покоління серії 163, що серійно випускалося Рязанським верстатобудівним заводом (РСЗ). Його конструкція є результатом поетапного вдосконалення базової моделі 163, розробленої у 1956 р., через модифікації 1М63, 1М63Б до версії 1М63Н, яка прийшла на заміну попереднику у 1992 р. Позначення моделі розшифровується за класифікацією ЄНПМС: «1» - токарна група, «М» - покоління модернізації, «63» - приблизна відповідність висоті центрів над станиною (315 мм за числом 3 у коді) [1], суфікс «Н» означає нормальний клас точності, «3» - модифікація з розширеною міжцентровою відстанню.

Верстат призначений для виконання широкого спектра токарних операцій: зовнішнього та внутрішнього точення, включаючи обробку конічних поверхонь, розточування, свердління, а також нарізання різьб чотирьох стандартів - метричної, дюймової, модульної та пітчевої. Обробка деталей здійснюється як у центрах, так і у патроні. Жорсткість конструкції станини, каретки та шпиндельного вузла забезпечує можливість роботи на підвищених швидкостях різання із застосуванням різців зі швидкорізальної сталі або оснащених твердосплавними пластинами при обробці деталей із чорних і кольорових металів [2]. За технічними описами верстатів сімейства 1М63Н, модель 1М63Н-3 належить до універсальних токарно-гвинторізних верстатів і застосовується для обробки деталей із найбільшою довжиною близько 3000 мм; для цих верстатів також характерні операції точіння циліндричних і конічних поверхонь, підрізання торців, свердління, розточування та нарізання різьб різних систем.

Конструктивно токарно-гвинторізний верстат 1М63Н-3 доцільно розглядати як складну електромеханічну систему, у якій механічна жорсткість, кінематична узгодженість, силова передача, електропривод і система керування взаємодіють як єдиний технологічний комплекс. Такий підхід важливий тому, що якість токарної обробки визначається не лише геометричними параметрами різального інструмента або режимами різання, а й стабільністю всієї системи «верстат - пристрій - інструмент - заготовка». Якщо хоча б один елемент цієї системи має недостатню жорсткість, люфт, вібраційні коливання або нестабільний режим руху, це безпосередньо впливає на точність розмірів, шорсткість поверхні, стійкість інструмента та продуктивність обробки. Саме тому для верстата 1М63Н-3 особливого значення набуває стан станини, шпиндельного вузла, супорта, коробки подач, ходового гвинта, ходового вала, задньої бабки та електропривода головного руху.

Основою несучої системи верстата є станина. Вона виконує функцію базової деталі, на якій розміщуються шпиндельна бабка, супорт, задня бабка та інші вузли. Станина сприймає статичні й динамічні навантаження, що виникають під час різання, переміщення супорта, затискання заготовки та роботи привода. В описах конструкції 1М63Н-3 зазначається, що станина має окремі напрямні для каретки та задньої бабки, зокрема призматичні та плоскі елементи напрямних, що забезпечують базування і переміщення основних вузлів уздовж осі обробки. Така конструкція є принципово важливою для універсального токарного верстата, оскільки каретка і задня бабка виконують різні функції, але обидві мають зберігати точне взаємне положення відносно осі шпинделя. У разі зношування напрямних виникають похибки прямолінійності переміщення, конусність оброблюваної поверхні, порушення співвісності та зниження точності обробки довгих деталей.

Шпиндельна бабка є одним із головних вузлів верстата, оскільки саме вона забезпечує головний обертальний рух заготовки. Усередині шпиндельної бабки розташовуються елементи передачі руху від електродвигуна до шпинделя, механізми зміни частоти обертання, опори шпинделя та пристрої для закріплення патрона або іншого технологічного оснащення. Для верстатів цієї групи характерним є шпиндель зі сквозним отвором і внутрішніми конусами, що розширює можливості роботи з прутковими та довгомірними заготовками; у технічних описах 1М63Н-3 також зазначається трьохопорна схема шпинделя. Трьохопорне базування шпинделя підвищує його стійкість до радіальних і осьових навантажень, що є особливо важливим під час обробки масивних деталей, точіння з великими припусками та застосування твердосплавного інструмента.

Патрон, установлений на шпинделі, забезпечує закріплення заготовки та передавання їй обертального руху. У практиці токарної обробки використання патрона є доцільним для деталей відносно невеликої або середньої довжини, коли заготовка може бути надійно затиснута кулачками без додаткової підтримки центром. Для довгих валів, осей, трубчастих заготовок або деталей зі значним вильотом застосовується обробка в центрах, інколи з використанням люнетів. Обробка в центрах забезпечує кращу співвісність і знижує ризик прогину заготовки, тоді як обробка в патроні є технологічно швидшою і зручнішою для багатьох типових операцій. Універсальність верстата 1М63Н-3 полягає саме в тому, що він допускає обидві схеми закріплення, а тому може використовуватися як для одиничного, так і для серійного виробництва.

Супорт є вузлом, який забезпечує переміщення різального інструмента відносно заготовки. Він включає каретку, поперечні полозки, верхні полозки, різцетримач і механізми ручного або механізованого переміщення. У процесі точіння супорт визначає траєкторію різця, а отже, безпосередньо впливає на

форму оброблюваної поверхні. Поздовжня подача використовується під час обробки циліндричних поверхонь, поперечна - під час підрізання торців або зміни діаметра, а поворотна верхня частина супорта може застосовуватися для обробки конічних поверхонь. Для нарізання різьби переміщення супорта має бути строго узгоджене з обертанням шпинделя, тому в роботі верстата важливу роль відіграють ходовий гвинт, коробка подач і механізми гвинторізного ланцюга.

Задня бабка виконує функцію підтримки заготовки або закріплення осевого інструмента. У піноль задньої бабки може встановлюватися центр, свердло, зенкер, розвертка або інший інструмент для обробки отворів. Під час обробки довгих валів задня бабка забезпечує додаткову опору, зменшує прогин заготовки та підвищує стабільність процесу різання. Її точне положення відносно осі шпинделя є обов'язковою умовою отримання правильної циліндричної форми. Якщо задня бабка зміщена в горизонтальній або вертикальній площині, оброблена поверхня може набувати конусності, навіть якщо інші вузли верстата працюють справно. Тому під час експлуатації верстата необхідно контролювати співвісність шпинделя і пінолі задньої бабки, а також стан її затискного механізму.

Електромеханічна система верстата 1М63Н-3 забезпечує перетворення електричної енергії в механічний рух головного привода, допоміжних приводів і систем керування. За даними технічних описів, для верстатів 1М63 і 1М63Н характерна потужність головного привода близько 15 кВт, а діапазон частот обертання шпинделя для окремих виконань подається в межах приблизно 10-1250 об/хв. Водночас у схемах електромеханічної системи необхідно розрізняти частоту обертання електродвигуна та частоту обертання шпинделя. Наприклад, позначення типу «М1 $n = 1460 \text{ хв}^{-1}$ » зазвичай характеризує номінальну швидкість обертання асинхронного електродвигуна, тоді як фактична частота обертання

шпинделя формується через механічні передачі, коробку швидкостей або частотне регулювання. Це принципово важливо для коректного технічного опису, оскільки безпосередньо шпиндель не обов'язково обертається з тією ж частотою, що й вал двигуна.

Головний електродвигун М1 є джерелом механічної енергії для обертання шпинделя. У традиційній схемі рух від двигуна передається через пасову передачу, муфту, коробку швидкостей або інші кінематичні ланки. У модернізованій електромеханічній схемі доцільним є використання частотного перетворювача, який дає змогу плавно регулювати швидкість обертання електродвигуна, зменшувати пускові струми, покращувати динаміку розгону та гальмування, а також адаптувати швидкість різання до конкретного матеріалу, діаметра заготовки й типу інструмента. Частотне регулювання не скасовує значення механічної коробки швидкостей, але може істотно розширити технологічну гнучкість верстата, особливо під час виконання операцій, що потребують плавної зміни швидкості.

Структурна схема електромеханічної системи верстата показує взаємозв'язок між мережею живлення, частотним перетворювачем, електродвигуном, шпинделем, трансформатором, пультом керування, контакторами та освітленням. Мережа 380 В / 50 Гц є основним джерелом живлення силового кола. Частотний перетворювач виконує функцію керування головним електроприводом, змінюючи частоту та напругу живлення двигуна. Електродвигун М1 перетворює електричну енергію в обертальний рух, який через механічну передачу надходить до шпинделя. Окремий трансформатор 380/110/24 В забезпечує живлення кіл керування, сигналізації або місцевого освітлення зниженою напругою, що підвищує електробезпеку обслуговування. Пульт керування є інтерфейсом оператора, через який здійснюються пуск, зупинка, реверсування, вибір режимів і аварійне вимкнення. Контактори К1, К2

забезпечують комутацію електричних кіл, а система освітлення покращує видимість робочої зони.

Наявність частотного перетворювача в структурі електромеханічної системи має також важливе експлуатаційне значення. Плавний пуск зменшує механічні удари в передачах, знижує навантаження на пасову передачу, підшипники, муфти та електричну мережу. Плавне гальмування зменшує час зупинки, але водночас не створює надмірних динамічних навантажень, якщо параметри гальмування налаштовані правильно. Для токарного верстата це особливо важливо, оскільки шпиндельний вузол і затиснута заготовка мають значний момент інерції. Різке гальмування може спричинити додаткові навантаження на механізми, а надто повільна зупинка знижує продуктивність і ускладнює роботу оператора. Тому налаштування електропривода повинно враховувати не лише електричні, а й механічні параметри системи.

Технологічні можливості верстата 1М63Н-3 визначаються поєднанням потужного головного привода, значної жорсткості несучих елементів, широкого діапазону подач і можливості нарізання різьб різних стандартів. За описами верстатів 1М63Н, найбільший діаметр обробки над станиною становить близько 630 мм, а над супортом - близько 350 мм; для модифікації з РМЦ 3000 мм характерна можливість обробки деталей значної довжини. Такі параметри дають змогу використовувати верстат для обробки валів, втулок, фланців, кілець, муфт, різьбових деталей, ремонтних заготовок і деталей середнього та великого машинобудування. Особливо цінною є універсальність, оскільки один верстат може виконувати різні операції без необхідності залучення кількох спеціалізованих машин.

Зовнішнє точіння є однією з базових операцій, під час якої різець знімає шар металу із зовнішньої поверхні обертової заготовки. Ця операція може виконуватися як чорново, так і чистово. Під час чорнового точіння основною

метою є швидке видалення припуску, тому застосовуються більші глибини різання та подачі. Під час чистового точіння основна увага приділяється точності розміру та якості поверхні, тому режими різання підбираються обережніше. Верстат 1М63Н-3 завдяки жорсткій станині й потужному приводу може працювати в обох режимах, однак для забезпечення якості необхідно враховувати стан інструмента, правильність його встановлення, жорсткість кріплення заготовки та наявність вібрацій.

Внутрішнє точіння і розточування виконуються для обробки отворів, внутрішніх циліндричних або конічних поверхонь. Ці операції є більш чутливими до жорсткості інструмента, оскільки розточувальна оправка має певний виліт і може пружно деформуватися під дією сили різання. Тому під час розточування важливо обмежувати виліт інструмента, правильно вибирати режим різання та забезпечувати надійне кріплення заготовки. Для великих деталей, які можуть оброблятися на верстаті 1М63Н-3, це має особливе значення, оскільки збільшення діаметра й маси заготовки підвищує вимоги до балансування, затискання та стабільності обертання.

Обробка конічних поверхонь може виконуватися різними способами: поворотом верхніх полозків супорта, зміщенням задньої бабки або використанням спеціальних пристроїв. Вибір способу залежить від довжини конуса, кута нахилу, точності та серійності обробки. Поворот верхніх полозків зручний для коротких конусів, тоді як зміщення задньої бабки застосовується для довших конічних поверхонь з невеликим кутом. У будь-якому випадку точність конічної поверхні залежить від правильності налаштування геометрії переміщення інструмента відносно осі заготовки. Тому верстат має забезпечувати стабільність положення супорта, відсутність надмірних люфтів і точність установчих операцій.

Свердління на токарному верстаті зазвичай виконується інструментом, закріпленим у пінолі задньої бабки. Заготовка обертається в патроні або центрах, а свердло подається вздовж осі. Така схема забезпечує співвісність отвору з віссю обертання заготовки, якщо задня бабка правильно відрегульована. Під час свердління великих або глибоких отворів важливо контролювати відведення стружки, охолодження інструмента, поступовість подачі та стан ріжучих крайок. Для точного отвору після свердління можуть застосовуватися зенкерування, розвертання або розточування.

Нарізання різьби є однією з ключових функцій токарно-гвинторізного верстата. Для 1М63Н-3 принципово важливою є можливість нарізання метричної, дюймової, модульної та пітчевої різьби, що підтверджується технічними описами цієї групи верстатів. Метрична різьба широко застосовується в машинобудуванні, дюймова - у вузлах, пов'язаних із відповідними стандартами, модульна - у зубчастих передачах і черв'ячних елементах, пітчева - у системах, де крок виражається через питч. Нарізання різьби потребує точної кінематичної узгодженості між обертанням шпинделя і поздовжнім переміщенням супорта. Якщо ця узгодженість порушена, профіль різьби буде неточним, а деталь може бути непридатною до складання.

Окремого значення набуває використання різців зі швидкорізальної сталі та твердосплавних пластин. Швидкорізальна сталь забезпечує достатню в'язкість і здатність працювати в умовах ударних або переривчастих навантажень, однак має нижчу теплостійкість порівняно з твердими сплавами. Твердосплавні пластини допускають вищі швидкості різання і можуть підвищувати продуктивність, проте потребують більш жорсткої системи та правильного вибору режимів. Саме тому жорсткість станини, шпиндельного вузла і супорта має безпосередній зв'язок із можливістю реалізації продуктивних режимів обробки. Якщо система недостатньо жорстка, застосування твердосплавного

інструмента може спричиняти вібрації, сколи пластини, погіршення шорсткості та зниження точності.

Під час обробки чорних металів, зокрема сталей і чавунів, основними факторами є твердість матеріалу, структура заготовки, наявність окалини, характер стружкоутворення та тепловиділення. Для кольорових металів і сплавів важливими стають інші параметри: схильність до налипання матеріалу на різальну кромку, теплопровідність, пластичність і вимоги до чистоти поверхні. Універсальний верстат повинен забезпечувати достатній діапазон швидкостей і подач, щоб оператор міг підібрати режим для різних матеріалів. У цьому контексті 1М63Н-3 є придатним для ремонтних, інструментальних і виробничих робіт, де номенклатура деталей і матеріалів може бути досить широкою.

Важливою експлуатаційною характеристикою є також масивність верстата. Велика маса й жорстка станина підвищують стійкість до вібрацій, однак водночас висувають вимоги до фундаменту, монтажу, вирівнювання і закріплення. Неправильне встановлення верстата може призвести до перекосу станини, порушення геометричної точності та нерівномірного зношування напрямних. Тому монтаж такого обладнання повинен передбачати контроль рівня, перевірку геометрії переміщень, регулювання опор і періодичну верифікацію точності. Для верстата, призначеного для обробки довгомірних деталей, це особливо актуально, оскільки навіть незначне відхилення напрямних на великій довжині може спричинити помітну похибку форми.

З погляду технічного обслуговування ключовими є контроль мастильної системи, стану напрямних, підшипників шпинделя, зубчастих передач, муфт, ременів, електродвигуна, контакторів і пульта керування. Недостатнє змащування напрямних прискорює зношування і погіршує плавність переміщення супорта. Зношування підшипників шпинделя може спричинити биття, нагрівання та погіршення чистоти обробки. Порушення роботи

електричних контактів, кнопок або контакторів може створювати ризики нестабільного запуску, зупинки або аварійного вимкнення. Тому технічний стан верстата має оцінюватися комплексно, з урахуванням механічних і електричних показників.

У виробничій експлуатації верстат 1М63Н-3 може використовуватися для виготовлення та ремонту валів, осей, втулок, пальців, фланців, муфт, різьбових з'єднань, корпусних деталей із циліндричними посадками та інших елементів машин. Особливо цінним він є в ремонтно-механічних цехах, де потрібно обробляти різноманітні деталі без вузької спеціалізації. На відміну від високопродуктивних спеціальних або автоматизованих верстатів, універсальний токарно-гвинторізний верстат має перевагу гнучкості. Оператор може швидко змінити тип операції, спосіб закріплення, інструмент, подачу, швидкість і технологічну послідовність. Це робить 1М63Н-3 придатним для одиничного, дрібносерійного і ремонтного виробництва.

Разом із тим універсальність не означає відсутності обмежень. Порівняно з сучасними верстатами з числовим програмним керуванням, 1М63Н-3 потребує більшої участі оператора, ручного налаштування режимів, контролю розмірів, корекції подач і досвіду в підборі інструмента. Точність і продуктивність значною мірою залежать від кваліфікації токаря, правильності налаштування верстата та дотримання технологічної дисципліни. Однак для навчальних, ремонтних і універсальних виробничих завдань така конструкція має суттєву перевагу: вона наочно демонструє принципи токарної обробки, кінематику головного й подачного руху, взаємодію механічних вузлів і електропривода.

З погляду аналізу електромеханічної системи, верстат 1М63Н-3 є зручним об'єктом для дослідження, оскільки в ньому чітко простежується перетворення енергії та руху. Електрична енергія від мережі надходить до силового кола, керується через апаратуру пуску або частотного регулювання, перетворюється

електродвигуном у механічне обертання, передається до шпинделя, а далі реалізується як головний рух різання. Паралельно система керування забезпечує логіку ввімкнення, захисту, блокування, реверсування, освітлення і безпечної роботи. Така структура дозволяє розглядати верстат не лише як механічний агрегат, а як інтегровану технічну систему.

Практична надійність такої системи залежить від узгодженості всіх її частин. Потужний двигун не забезпечить якісної обробки без жорсткої станини й справного шпиндельного вузла. Точна механіка не буде ефективною без стабільного електропривода й надійної системи керування. Справний супорт не гарантує точності, якщо заготовка неправильно закріплена або задня бабка зміщена. Тому під час оцінювання роботи верстата необхідно враховувати не окремі вузли, а їхню взаємодію. Саме ця системність і визначає технічний рівень токарно-гвинторізного верстата.

У межах курсового проєкту опис верстата 1М63Н-3 має не лише довідкове, а й аналітичне значення. Він дозволяє обґрунтувати вибір об'єкта дослідження, пояснити структуру його електромеханічної системи, визначити функції основних вузлів і показати, як конструктивні характеристики впливають на технологічні можливості. Верстат є достатньо складним для змістовного аналізу, але водночас достатньо зрозумілим як класичний представник універсального токарного обладнання. Завдяки цьому на його прикладі можна розглянути взаємозв'язок між механічною жорсткістю, електроприводом, системою керування, технологічними операціями й експлуатаційною ефективністю.

Отже, токарно-гвинторізний верстат 1М63Н-3 є універсальним металорізальним обладнанням, призначеним для виконання широкого комплексу токарних і гвинторізних операцій. Його технологічні можливості забезпечуються поєднанням жорсткої станини, потужного головного привода, розвиненої системи подач, шпиндельного вузла, супорта, задньої бабки та електричної

системи керування. Можливість обробки деталей у патроні та центрах, виконання зовнішнього й внутрішнього точіння, свердління, розточування, обробки конусів і нарізання різьб різних стандартів робить цей верстат придатним для широкого спектра виробничих і ремонтних завдань. У технічному аналізі він може розглядатися як приклад класичної електромеханічної системи, у якій якість обробки визначається узгодженою роботою механічних, електричних і технологічних складових.

Область застосування охоплює переважно умови одиничного та дрібносерійного виробництва - ремонтні майстерні, інструментальні цехи, виробничі дільниці механічних цехів машинобудівних підприємств. Здатність обробляти заготовки діаметром до 630 мм над станиною і довжиною до 3000 мм дозволяє застосовувати верстат для виготовлення деталей середніх та великих типорозмірів, зокрема валів, осей, втулок, фланців, різьбових кріпильних елементів та корпусних деталей тіл обертання. Конструктивно передбачено можливість точення конусів за допомогою конусної лінійки або зміщення задньої бабки, що розширює технологічні можливості верстата порівняно з вузькоспеціалізованими аналогами.

Схему загального вигляду та розташування основних вузлів верстата 1М63Н-3 ілюструє рис. 1.1.

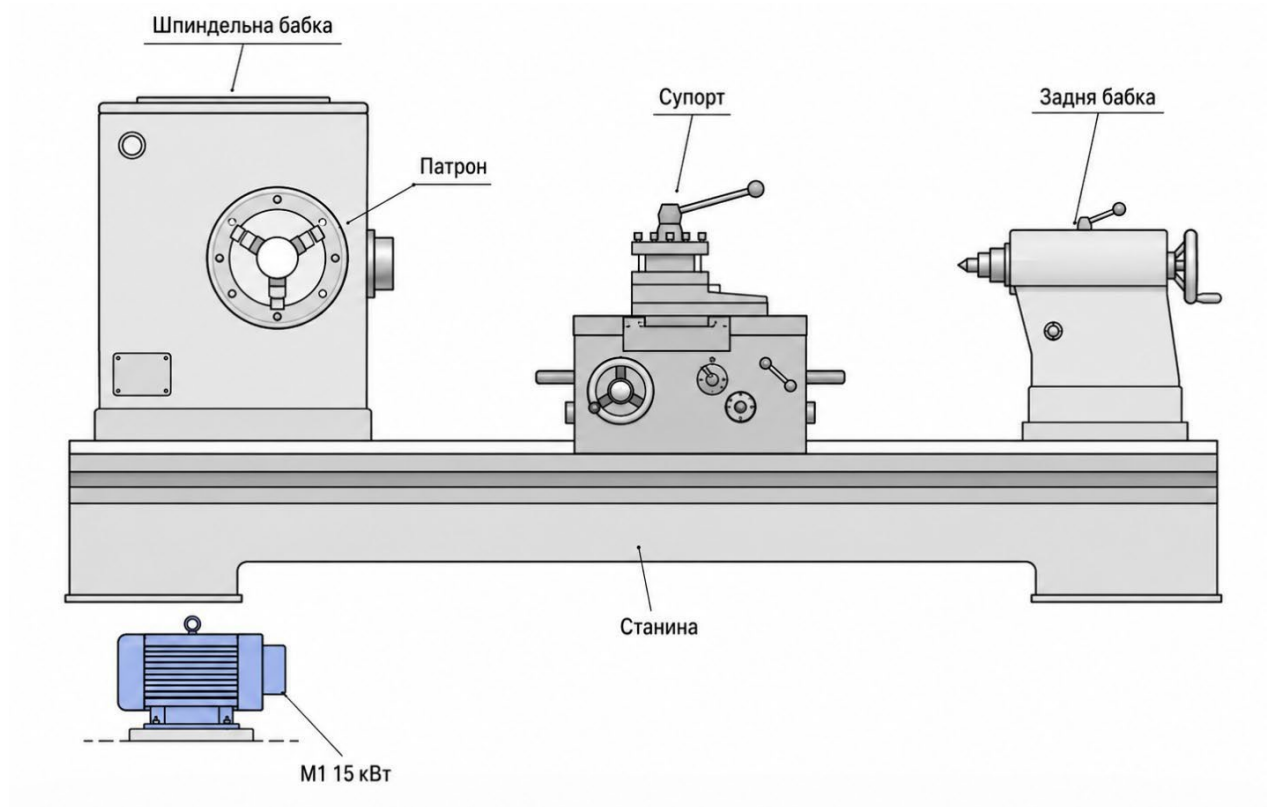


Рис. 1.1. Схема розташування основних вузлів токарно-гвинторізного верстата 1М63Н-3
(складено автором)

Як видно з рис. 1.1, конструкція верстата включає передню бабку з коробкою швидкостей, задню бабку, каретку з супортом, фартух та станину. Привідний асинхронний двигун розміщений у лівій частині станини і з'єднаний зі шпинделем через клинопасову передачу та коробку швидкостей. Розосереджена компоновка елементів керування забезпечує зручний доступ оператора до органів управління зі стаціонарного та пересувного пультів.

1.2 Основні технічні характеристики

Технічні характеристики верстата 1М63Н-3 є базовим документальним підґрунтям для аналізу електромеханічної системи. У табл. 1.1 наведено паспортні дані верстата, що визначають умови роботи електроприводу.

Таблиця 1.1 - Основні технічні характеристики верстата 1М63Н-3

Параметр	Значення
Клас точності	Н (нормальний)
Найбільший діаметр обробки над станиною, мм	630
Найбільший діаметр обробки над супортом, мм	350
Найбільша довжина обробки, мм	2800/3000
Кінець шпинделя (ГОСТ 12593-72)	8М
Отвір шпинделя (конус Морзе)	6
Діаметр прутка в отворі шпинделя, мм	65
Кількість ступенів швидкостей шпинделя	22 (пряме) / 11 (зворотне)
Діапазон частот обертання шпинделя (пряме), об/хв	10 - 1250
Діапазон частот обертання шпинделя (зворотне), об/хв	18 - 1800
Кількість ступенів подач	32
Прискорене поздовжнє переміщення супорту, мм/хв	4500
Прискорене поперечне переміщення супорту, мм/хв	1600
Потужність головного приводу, кВт	15
Потужність двигуна прискореного переміщення, кВт	1,1
Потужність двигуна насоса охолодження, кВт	0,125
Маса верстата (з електрообладнанням), кг	5600
Габаритні розміри (Д x Ш x В), мм	4950 x 1780 x 1550

Наведені у табл. 1.1 дані засвідчують, що верстат належить до важкого токарного обладнання середньої потужності. Потужність головного привідного електродвигуна 15 кВт при 22 ступенях регулювання частоти обертання шпинделя у діапазоні 10-1250 об/хв забезпечує реалізацію широкої номенклатури технологічних режимів різання [3]. Наявність 32 ступенів подач у поздовжньому

та поперечному напрямках із прискореним переміщенням з'ясовує необхідність у окремому мотор-редукторі для швидкісного ходу. Маса верстата 5600 кг обумовлює значні вимоги до пускових характеристик електроприводу з точки зору надійного утримання технологічного режиму при різних режимах навантаження.

1.3 Конструктивна будова та склад обладнання

Конструктивно верстат 1М63Н-3 складається із кількох функціональних вузлів, кожен з яких пов'язаний з конкретним виконавчим елементом електромеханічної системи. Станина - масивна литовинна основа верстата із загартованими напрямними - є несучим елементом, на якому монтуються всі інші вузли. Передня бабка одночасно виконує функції коробки швидкостей головного руху: в ній розміщено шпиндель, набір зубчастих коліс та фрикційна муфта для гальмування шпинделя при відключенні. Привід коробки швидкостей здійснюється від асинхронного електродвигуна М1 через клинопасову передачу на фрикційний вал коробки швидкостей [4].

Коробка подач і фартух утворюють кінематичний ланцюг подачі: від шпинделя через гітару змінних шестерень та коробку подач рух передається на ходовий гвинт (при нарізанні різьб) або ходовий вал (при точінні). У фартуху розміщено механізм перетворення обертового руху ходового валу в поздовжнє та поперечне переміщення супорту. Додатково у верстаті передбачено окремий двигун М2 для прискореного переміщення супорту.

Задня бабка - рухомий вузол, що переміщається вздовж станини і фіксується у необхідному положенні для підтримки заготовок у центрах або кріплення різального інструменту при свердлінні. Електрично задня бабка не

пов'язана із приводною системою - її переміщення здійснюється вручну або через фартух при прискореному ході.

Система охолодження ріжучого інструменту та заготовки включає насосну установку з двигуном МЗ малої потужності (0,125 кВт), що забезпечує подачу охолоджувальної рідини у зону різання. Всі три електродвигуни верстата підключені до мережі змінного струму 380 В / 50 Гц і керуються дистанційно з відповідних кнопочних постів.

Аналіз конструктивної будови верстата показує, що електромеханічна система вирішує три відносно незалежних функціональних завдання: забезпечення головного обертального руху шпинделя, здійснення поздовжньо-поперечного переміщення інструменту (зокрема прискореного ходу) та охолодження зони різання. Відповідно структура електроприводу включає три самостійних силових ланцюги з єдиним живленням від вступного автомата ВА1.

1.4 Електромеханічна система верстата

Електромеханічна система верстата 1М63Н-3 побудована на принципах релейно-контакторного керування асинхронними двигунами трифазного змінного струму. Живлення силової частини здійснюється від заводської мережі напругою 380 В, 50 Гц через вступний автоматичний вимикач ВА1, встановлений у ніші передньої бабки. Увімкненням вступного автомата подається напруга на всі електродвигуни та ланцюги керування верстата [4].

Ланцюги керування мають дворівневу систему живлення: змінний струм 110 В для контакторів та реле - від знижуючого трансформатора, постійний струм 24 В для низьковольтних елементів схеми - від напівпровідникового випрямляча. Окремий трансформатор забезпечує живлення лампи місцевого освітлення напругою 24 В. Такий підхід підвищує безпеку оператора при роботі зі схемою керування порівняно із безпосереднім підключенням апаратури до мережі 380 В

Структурну схему електроприводу зображено на рис. 2.1.



Рис. 1.2. Структурна схема електромеханічної системи верстата 1М63Н-3 (складено автором)

Як видно з рис. 1.2, система має ієрархічну будову: від мережі живлення через вступний апарат захисту - до силових контакторів, від яких безпосередньо живляться виконавчі двигуни. Рівень керування - трансформаторно-випрямний - формує знижені напруги для апаратури управління. Кнопкові пости на передній бабці (ПБ), каретці (ПК) та фартуху (ПФ) забезпечують можливість керування верстатом з трьох позицій, що відповідає ергономічним вимогам до промислового обладнання.

1.5 Електричні двигуни та їх технічні параметри

Верстат 1М63Н-3 обладнано трьома трифазними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Базовим принципом вибору асинхронних двигунів для приводів металорізальних верстатів є їхня надійність, нескладність конструкції та прийнятна вартість при відносно простій схемі керування контакторним способом [5]. У табл. 1.2 наведено технічні параметри електродвигунів верстата.

Таблиця 1.2 - Технічні параметри електродвигунів верстата 1М63Н-3

Позначення	Призначення	Тип	Потужність, кВт	Частота обертання, об/хв
М1	Головний рух (шпиндель)	АО2-61-4	15	1460
М2	Прискорений хід супорту	АОЛ-21-4 (або аналог)	1,1	1400

МЗ	Насос охолодження	ПА-22	0,125	2800
----	-------------------	-------	-------	------

Головний двигун М1 типу АО2-61-4 потужністю 15 кВт із синхронною частотою 1500 об/хв (номінальна 1460 об/хв при слизі $\sim 2,7\%$) є чотириполюсним асинхронним двигуном загальнопромислового виконання. Саме цей двигун визначає виробничі можливості верстата: завдяки широкому діапазону ступінчастого регулювання шпинделя через механічну коробку швидкостей забезпечується підтримання раціональних швидкостей різання для деталей різного діаметра і матеріалу. Слід зазначити, що за результатами аналізу джерел [6], привід головного руху металорізальних верстатів належить до класу механізмів із постійною потужністю, де більшим швидкостям різання відповідає менше зусилля, і навпаки.

Двигун М2 для прискореного переміщення супорту має суттєво меншу потужність - 1,1 кВт - і призначений виключно для несилкових установчих переміщень каретки по вісі Z та поперечного супорту по вісі X. Електроприводи подач подібного типу, як наголошується в навчальній літературі Національного гірничого університету [7], виконують установлювальні рухи, необхідні для приведення робочих органів у задане положення з мінімальними витратами часу і максимальною точністю зупинки.

Двигун насоса охолодження МЗ типу ПА-22 (0,125 кВт, 2800 об/хв) є малопотужним електродвигуном допоміжного привода, що забезпечує примусову подачу охолоджувальної рідини у зону різання. У технічному описі його доцільно характеризувати як двигун допоміжної системи охолодження, оскільки він не бере безпосередньої участі у формуванні головного руху різання або подачі, але істотно впливає на стабільність температурного режиму обробки, стійкість різального інструмента та якість оброблюваної поверхні. Якщо в первинному технічному джерелі двигун названо «однополюсним», у пояснювальному тексті бажано уточнити, що за частотою обертання 2800 об/хв

він фактично відповідає швидкохідному двигуну з частотою, близькою до синхронної швидкості 3000 об/хв для мережі 50 Гц, тобто йдеться про двигун із малою кількістю полюсів, який забезпечує достатню частоту обертання робочого колеса насоса. Таке уточнення потрібне для технічної коректності, оскільки в електромашинній термінології частіше використовують поняття кількості полюсів або пар полюсів, а не формулювання «однополюсний» у буквальному значенні.

Основне функціональне призначення двигуна МЗ полягає у забезпеченні роботи насоса системи охолодження. Під час токарної обробки в зоні контакту різального інструмента і заготовки виникає інтенсивне тепловиділення, зумовлене пластичною деформацією зрізуваного шару, тертям стружки по передній поверхні різця, тертям задньої поверхні інструмента по обробленій поверхні та загальною механічною роботою різання. Якщо тепло не відводиться, температура різальної кромки швидко підвищується, що спричиняє прискорене зношування інструмента, зміну геометрії різальної частини, погіршення шорсткості поверхні, зниження точності розмірів і підвищення ризику утворення пригарів, задирок або термічних дефектів на поверхні деталі. Саме тому система подачі охолоджувальної рідини є обов'язковим допоміжним елементом технологічної системи верстата.

Охолоджувальна рідина виконує не лише функцію відведення тепла. Вона також зменшує тертя у зоні різання, полегшує відведення стружки, частково захищає оброблювану поверхню від локального перегрівання, знижує ймовірність налипання матеріалу на різальну кромку та сприяє підвищенню стійкості інструмента. Для токарно-гвинторізного верстата 1М63Н-3 це особливо важливо, оскільки верстат призначений для обробки широкої номенклатури деталей із чорних і кольорових металів. У разі обробки сталей охолодження допомагає зменшити температуру різання та стабілізувати процес

стружкоутворення. Під час обробки кольорових металів і сплавів мастильно-охолоджувальна рідина може зменшувати схильність матеріалу до налипання, що позитивно впливає на чистоту поверхні. Під час свердління, розточування та нарізання різьби подача рідини є особливо важливою, оскільки інструмент працює в умовах ускладненого відведення стружки та підвищеного локального нагрівання.

Двигун М3 має порівняно невелику потужність - 0,125 кВт, однак для привода насоса охолодження така потужність є достатньою, оскільки насос не виконує силової механічної обробки, а лише забезпечує циркуляцію рідини з бака до зони різання. Його робота має допоміжний, але технологічно значущий характер. На відміну від головного двигуна М1, який приводить у рух шпиндель і забезпечує основну енергетичну складову різання, двигун М3 працює в режимі відносно стабільного навантаження. Його завданням є підтримання безперервного або періодичного потоку охолоджувальної рідини відповідно до потреб технологічної операції. Невелика потужність двигуна також знижує енергоспоживання допоміжної системи та не створює істотного додаткового навантаження на електричну мережу верстата.

Частота обертання 2800 об/хв свідчить про швидкохідний характер привода насоса. Для насосів охолодження це є доцільним, оскільки достатня частота обертання робочого органу забезпечує необхідний напір і витрату рідини за компактних габаритів агрегату. У практичній експлуатації важливо, щоб насос створював стабільний потік без значних пульсацій, а рідина подавалася безпосередньо в зону різання або на ділянку контакту інструмента із заготовкою. Недостатня подача охолодження може призвести до нерівномірного температурного режиму, тоді як надмірна або неправильно спрямована подача може ускладнювати спостереження за процесом обробки, розбризкувати рідину та погіршувати умови праці оператора. Тому ефективність роботи системи

охолодження визначається не лише характеристиками двигуна МЗ, а й станом насоса, трубопроводів, фільтрів, кранів, сопел і бака для рідини.

Увімкнення МЗ у схемі передбачено лише за умови попереднього пуску головного двигуна М1, що реалізується блокуванням у ланцюзі керування. Така логіка є технічно обґрунтованою, оскільки подача охолоджувальної рідини має сенс насамперед тоді, коли верстат виконує робочий процес і шпиндель перебуває в русі. Блокування запобігає випадковому або недоцільному ввімкненню насоса за відсутності головного руху. Це підвищує раціональність роботи електричної схеми, зменшує зайве спрацювання допоміжного двигуна, обмежує непотрібну циркуляцію рідини та знижує ризик розбризкування охолоджувальної рідини під час підготовчих або налагоджувальних операцій. Крім того, така схема полегшує керування верстатом для оператора, оскільки допоміжна система працює узгоджено з головним приводом.

Блокування у ланцюзі керування може реалізовуватися через допоміжні контакти контактора головного двигуна або через інший елемент керування, який фіксує стан увімкнення М1. Після пуску головного двигуна відповідний контакт замикає або дозволяє замикання кола керування насосом охолодження. Якщо головний двигун вимкнений, коло керування МЗ залишається розімкненим, тому насос не може бути запущений у робочому режимі. Такий принцип належить до елементарних, але важливих засобів електричного блокування, які забезпечують правильну послідовність роботи вузлів верстата. У складніших схемах може також передбачатися ручне керування насосом після запуску головного привода, коли оператор самостійно вмикає охолодження залежно від типу операції. Наприклад, під час короткого підрізання торця охолодження може бути необов'язковим, тоді як під час тривалого точіння, розточування або нарізання різьби його використання є бажаним.

З погляду безпеки експлуатації така схема також має позитивне значення. Охолоджувальна рідина може створювати додаткові ризики, якщо подається неконтрольовано: зволоження робочої зони, потрапляння рідини на підлогу, розбризкування на електрообладнання або погіршення видимості процесу обробки. Тому її подача має бути технологічно виправданою й керованою. Умовне підпорядкування роботи насоса стану головного привода допомагає уникнути ситуації, коли насос працює без потреби. Водночас у процесі експлуатації важливо перевіряти справність блокування, оскільки відмова контактів або неправильне підключення можуть призвести до некоректної роботи допоміжного привода.

Двигун МЗ і насос охолодження слід розглядати як частину допоміжної підсистеми, яка забезпечує сталість процесу різання. Якщо головний привод відповідає за механічну енергію обертання, а супорт і коробка подач - за формування траєкторії руху інструмента, то система охолодження відповідає за теплову та трибологічну стабільність процесу. Ця підсистема не визначає форму деталі безпосередньо, але впливає на якість обробки опосередковано. За відсутності ефективного охолодження можуть виникати такі негативні явища, як передчасне затуплення різця, погіршення розмірної стабільності, збільшення сили різання, утворення наросту на різальній кромці, підвищена шорсткість і зниження продуктивності. Отже, допоміжний характер МЗ не зменшує його значення для загальної працездатності верстата.

Особливо помітна роль системи охолодження під час нарізання різьби. У цій операції профіль різальної кромки безпосередньо формує профіль різьби, тому будь-яке погіршення стану інструмента або перегрівання може призвести до дефектів профілю, задирок, неточності кроку або поганої якості бокових поверхонь різьби. подача мастильно-охолоджувальної рідини зменшує тертя, полегшує відведення стружки та сприяє чистішому формуванню різьбового

профілю. Під час свердління й розточування охолодження також є важливим через ускладнене видалення стружки з отвору. Якщо стружка накопичується в зоні різання, вона може пошкоджувати оброблену поверхню, підвищувати температуру та спричиняти заклинювання інструмента.

Для нормальної роботи двигуна МЗ необхідно забезпечити справність електричних і механічних елементів системи. Електрична частина включає живлення двигуна, пускову апаратуру, захист від короткого замикання та перевантаження, контакти керування, блокувальні елементи та з'єднувальні проводи. Механічна частина охоплює насос, вал, робоче колесо, ущільнення, корпус, забірний фільтр, трубопроводи й сопло подачі. Якщо електродвигун справний, але забірний фільтр забруднений, подача рідини буде недостатньою. Якщо насос механічно зношений або має підсмоктування повітря, потік буде нестабільним. Якщо трубопровід засмічений стружкою або продуктами забруднення, охолодження не досягатиме зони різання в потрібному обсязі. Тому технічне обслуговування системи охолодження повинно бути комплексним.

До основних експлуатаційних заходів належать регулярна перевірка рівня охолоджувальної рідини в баку, очищення фільтрів, контроль стану трубок і шлангів, перевірка герметичності з'єднань, огляд електричних контактів і періодичне ввімкнення насоса для перевірки стабільності потоку. Також важливо контролювати стан самої рідини. Забруднена або стара мастильно-охолоджувальна рідина може втрачати свої властивості, сприяти корозії, утворювати осад, неприємний запах або забивати канали подачі. У разі значного забруднення рідину необхідно замінити, а бак промити від шламу, стружки та відкладень. Недотримання цих вимог може знизити ефективність охолодження навіть за повністю справного двигуна МЗ.

З погляду діагностики несправностей, відсутність подачі охолоджувальної рідини може бути зумовлена кількома причинами. Якщо двигун МЗ не

запускається, слід перевірити наявність живлення, стан пускової апаратури, справність блокування від М1, цілісність обмоток і контактних з'єднань. Якщо двигун запускається, але рідина не подається, імовірними причинами є засмічення фільтра, несправність насоса, відсутність рідини в баку, підсмоктування повітря або закупорення трубопроводу. Якщо подача є, але слабка або нерівномірна, потрібно перевірити стан робочого колеса, забірної каналу, сопла й рівень забруднення рідини. Такий поділ несправностей на електричні та гідравліко-механічні є важливим для швидкого пошуку причини відмови.

У структурній схемі електромеханічної системи верстата двигун М3 доцільно показувати окремим допоміжним блоком, пов'язаним із системою керування та головним двигуном М1 через блокувальний зв'язок. Така графічна подача дозволяє чітко показати, що насос охолодження не є автономним споживачем, який працює незалежно від технологічного процесу, а підпорядкований логіці роботи головного привода. У поясненні до схеми варто зазначити, що блокування забезпечує вмикання насоса лише після запуску шпинделя або за наявності дозволу від схеми керування головним приводом. Це робить опис не просто переліком елементів, а аналізом функціональної взаємодії між вузлами.

У практичному технологічному сенсі система охолодження підвищує стабільність процесу і дозволяє повніше використовувати можливості верстата. Якщо верстат має достатню жорсткість і потужність, але охолодження працює нестабільно, оператор змушений знижувати режими різання, частіше зупиняти обробку, контролювати стан інструмента й очищати зону різання від стружки. Це зменшує продуктивність і може погіршувати якість. Навпаки, справна система охолодження дає змогу підтримувати більш стабільні режими, продовжувати ресурс інструмента та зменшувати технологічні втрати. Тому допоміжний двигун

МЗ, попри малу потужність, є важливим елементом забезпечення ефективності токарної обробки.

Отже, двигун насоса охолодження МЗ типу ПА-22 потужністю 0,125 кВт і частотою обертання 2800 об/хв виконує функцію привода допоміжної системи подачі охолоджувальної рідини. Його робота забезпечує відведення тепла із зони різання, зменшення тертя, покращення умов стружкоутворення, підвищення стійкості різального інструмента та стабілізацію якості обробленої поверхні. Увімкнення МЗ лише після пуску головного двигуна М1 є доцільним технічним рішенням, оскільки воно забезпечує правильну послідовність роботи верстата, запобігає непотрібній роботі насоса та підвищує безпеку експлуатації. У системному аналізі верстата 1М63Н-3 цей двигун слід розглядати не як другорядну деталь, а як функціонально важливий елемент допоміжного технологічного забезпечення процесу різання.

1.6 Система керування та захист електроприводу

Система керування електроприводом верстата 1М63Н-3 реалізована на апаратурі релейно-контакторного типу. Усі двигуни - трифазні асинхронні, керовані потужними контакторами, пов'язаними з органами управління верстата. Зупинка шпинделя при відключенні здійснюється електромеханічною фрикційною муфтою [4], що забезпечує швидке гальмування без реверсу двигуна М1. Таке технічне рішення є типовим для верстатів даного класу та забезпечує достатній час уповільнення при масиві шпиндельного вузла.

Керування електроприводами верстата є дистанційним кнопковим із трьох постів: пульта передньої бабки (ПБ), пульта на каретці (ПК) та пульта на фартуху (ПФ). Такий розподіл органів керування відповідає технологічній логіці роботи токаря - оператор може зупинити або запустити шпиндель з будь-якого зручного

положення, не відходячи від зони різання. Кнопки «Стоп» є самозатискними і забезпечують аварійну зупинку незалежно від стану контакторів. Підключення всіх пристроїв здійснюється через вступний автомат ВА1, встановлений на бічній стінці ніші передньої бабки.

Захист електродвигунів і ланцюгів керування від струмів короткого замикання та перевантажень здійснюється автоматичними вимикачами та тепловими реле. Для кожного силового ланцюга передбачено тепловий захист: при тривалому перевантаженні теплові реле КК1 (для М1) та КК2 (для М2) відключають відповідні контактори, припиняючи подачу струму до двигунів. Аварійне відключення всіх приводів верстата виконується натисканням будь-якої з кнопок «Стоп» або ручним вимкненням вступного автомата ВА1 [8].

Заземлення корпусів електродвигунів та станини верстата є обов'язковою вимогою безпеки. Відповідно до вимог нормативної бази [9], електричний опір між гвинтом заземлення і будь-якою металевою частиною, що при пробі ізоляції може опинитися під напругою понад 50 В, не повинен перевищувати 0,1 Ом. Заземлення окремих електродвигунів допускається замінити заземленням станини за умови надійного контакту між корпусами електрообладнання і станиною.

Таким чином, система керування верстата 1М63Н-3 функціонально достатня для виконання технологічних завдань у режимі ручного керування, однак є морально застарілою в аспекті енергоефективності та гнучкості регулювання. Релейно-контакторна апаратура, незважаючи на надійність та простоту, не забезпечує плавного пуску та безступінчастого регулювання частоти обертання шпинделя, притаманних сучасним системам частотно-векторного керування.

1.7 Технічні та експлуатаційні вимоги до приводу головного руху

Привід головного руху є критичним елементом металорізального верстата, оскільки від його параметрів безпосередньо залежать продуктивність обробки, точність деталі та стійкість різального інструменту. Теоретико-методологічний аналіз вітчизняної фахової літератури [10] дозволяє встановити, що механізми приводу головного руху токарних верстатів відносяться до класу механізмів з постійною потужністю: зі зміною діапазону швидкостей різання момент опору змінюється обернено пропорційно швидкості, тоді як потужність залишається приблизно сталою. Ця особливість є визначальною при виборі параметрів електродвигуна і системи регулювання.

Формування вимог до приводу головного руху верстата 1М63Н-3 здійснювалося на основі аналізу паспортних даних верстата, навчальних посібників кафедри електропривода Національного гірничого університету [7] та результатів дослідження, опублікованих у матеріалах конференції «Theory and Practice of Science» (Рим, 2024) [5]. До основних вимог, що визначають специфіку роботи приводу головного руху верстата, належать:

- діапазон регулювання швидкості шпинделя не менше 100:1 з рівномірною щільністю ступенів у логарифмічній шкалі;
- стабільність підтримання заданої швидкості при змінному навантаженні з похибкою не більше 5-10% від номінального значення;
- мінімальний час пуску та гальмування при зміні режиму обробки для скорочення машинного часу;
- реверсування шпинделя з гальмуванням фрикційною муфтою для забезпечення нарізання різьб;

- надійний тепловий захист двигуна при тривалих перевантаженнях понад 120% номінального моменту.

Особливої уваги заслуговує питання механічних характеристик привода. Для токарного верстата критичним є жорсткість механічної характеристики двигуна - здатність зберігати швидкість при зростанні моменту опору. Асинхронний двигун серії АО2 у зоні нижче критичного ковзання забезпечує достатньо жорстку характеристику: відносне ковзання при переході від холостого ходу до номінального навантаження становить $\sim 3\%$, що є прийнятним для більшості операцій точіння.

Водночас результати дослідження [5] наголошують, що для приводів головного руху найбільш раціональним способом регулювання швидкості є метод із постійною потужністю, коли великим швидкостям різання відповідає менше зусилля, а малим швидкостям - більші зусилля. Ця умова у верстаті 1М63Н-3 задовольняється механічним шляхом через ступінчасту коробку швидкостей, однак за потреби плавного безступінчастого регулювання необхідна заміна системи керування на частотно-векторну.

У табл. 1.3 систематизовано вимоги до основних показників якості керування приводом головного руху.

Таблиця 1.3 - Вимоги до показників якості системи електроприводу головного руху

Показник	Нормативне значення	Відповідність 1М63Н-3
Діапазон регулювання	1:100 і більше	Ступінчасто: 10-1250 об/хв
Статична похибка швидкості	$< 10\%$ номін.	Задовільна (АД, жорстка хар.)
Перевантажувальна здатність	2,0-2,5 Мном	АО2-61-4: $\sim 2,2$ Мном

Час пуску (від 0 до ном.)	< 5 с при Мном	Контакторний пуск: ~3-4 с
Час гальмування шпинделя	< 5 с	Фрикційна муфта: ~2-3 с
Захист від перевантаження	Теплове реле	КК1 (наявне)
Клас захисту двигуна	IP44 мінімум	IP44

Аналіз даних табл. 1.3 підтверджує, що верстат 1М63Н-3 задовольняє базові вимоги до показників якості системи привода для операцій звичайної точності. Разом з тим ступінчасте регулювання і відсутність можливості плавної зміни швидкості шпинделя залишаються принциповими обмеженнями при виконанні операцій підвищеної точності.

1.8 Перспективи модернізації електроприводу

Дослідження, представлене на Міжнародній конференції «Theory and Practice of Science: Key Aspects» (Рим, 2024) [5], присвячене модернізації електроприводів токарних верстатів в Україні, розглядає напрями вдосконалення систем керування через впровадження числового програмного керування (ЧПК) та комплектних регульованих електроприводів замість релейно-контакторних схем. Автори наголошують, що результатом такого вдосконалення є перетворення верстата на складну автоматичну систему точного серійного виробництва, де роль оператора зводиться до вибіркового контролю якості деталей та переналагодження програми.

Застосування частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) взамін контакторного керування дає ряд технічних переваг, що підтверджуються фаховою літературою [12]: плавний безступінчастий пуск зі зменшенням пускових струмів у 4-5 разів, широкодіпазонне регулювання швидкості шпинделя без ступінчастої коробки, можливість векторного керування

моментом, економія електроенергії до 30-50% за рахунок оптимізації U/f -характеристики. Для верстата 1М63Н-3 доцільним є застосування перетворювача частоти для двигуна М1 із збереженням існуючої коробки швидкостей як дворежимного редуктора (грубий та тонкий діапазон).

Вибір перетворювача частоти для привода шпинделя токарного верстата потужністю 15 кВт потребує врахування специфічних умов роботи: широкого діапазону навантажень, необхідності реверсу при нарізанні різьб, роботи з постійним моментом у нижньому діапазоні частот. Аналіз практичних рекомендацій [13] показує, що для токарних верстатів перевага надається перетворювачам із векторним керуванням (без датчика зворотного зв'язку або із енкодером), що забезпечують точне утримання моменту на шпинделі навіть при змінному навантаженні.

Результати власного аналізу у процесі практики виявили, що верстат 1М63Н-3, на базі якого проводилися спостереження, функціонує у режимі стандартного релейно-контакторного керування. Характерними ознаками зносу електромеханічної системи, виявленими при огляді, є підвищений час спрацьовування контакторів, часткове підгорання контактних поверхонь та нестабільність кнопочових постів. Усе це підтверджує доцільність модернізації системи керування із впровадженням сучасної апаратури.

Вітчизняний досвід реалізації подібних проектів, описаний у наукових роботах підрозділів Національного університету кораблебудування [14], підтверджує ефективність впровадження частотно-векторного керування на виробничому обладнанні: підвищення надійності та гнучкості налагодження, забезпечення необхідної точності регулювання та покращення експлуатаційних характеристик систем електроприводу.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Недоліки нерегульованого електропривода та доцільність переходу до частотного керування

Ступінчастість регулювання становить найвідчутніше обмеження наявної системи. Шпиндель здатний обертатися лише з фіксованими частотами, тому під час оброблення заготовок змінного діаметра швидкість різання відхиляється від оптимальної, що знижує стійкість інструмента та погіршує якість обробленої поверхні. Підтримання сталої швидкості різання під час підрізання торця або оброблення ступінчастого валу механічними засобами недосяжне в принципі [14].

Прямий пуск асинхронного двигуна в мережу супроводжується кратністю пускового струму від п'яти до семи відносно номінального значення, унаслідок чого виникають кидки моменту, динамічні удари в кінематичному ланцюзі та просідання напруги в живильній мережі цеху. Багаторазові пуски прискорюють зношування зубчастих передач, пасів та фрикційних елементів, скорочуючи ресурс механічної частини [7].

Енергетична неефективність нерегульованого привода виявляється насамперед у роботі з частковим навантаженням. Двигун, розрахований на найважчий режим, більшу частину робочого часу працює недовантаженим, через що коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності знижуються, а споживання реактивної потужності зростає. Втрати енергії у перехідних режимах за некерованого пуску та гальмування в кілька разів перевищують втрати за плавного частотного розгону [14]. Реалізація частотного пуску й гальмування дає змогу істотно зменшити втрати енергії в перехідних режимах порівняно з некерованими процесами [14].

Окремою проблемою постає відсутність інтеграції верстата в автоматизовані виробничі системи. Механічне керування унеможливорює

дистанційне задавання режимів, програмну зміну швидкості та діагностику стану привода, що звужує сферу застосування верстата у сучасних виробничих процесах. Сукупність наведених обмежень обґрунтовує доцільність модернізації, провідним напрямом якої виступає заміна нерегульованого привода частотно-регульованою системою змінного струму [8].

Серед типових заходів модернізації металорізальних верстатів виокремлюють заміну застарілих двигунів сучаснішими, встановлення перетворювачів частоти, оновлення комутаційно-захисної апаратури та запровадження засобів числового програмного або логічного керування [10]. Для головного привода важкого токарного верстата раціональним і водночас економічно виваженим рішенням є збереження потужного асинхронного двигуна з одночасним переведенням його живлення на перетворювач частоти, що забезпечує безступінчасте регулювання без докорінної перебудови механічної частини [8].

2.2. Порівняння наявної та модернізованої систем електропривода

Зіставлення нерегульованої та частотно-регульованої систем зручно проводити за сукупністю технічних, енергетичних та експлуатаційних ознак, які безпосередньо впливають на продуктивність і собівартість оброблення. Результати порівняння наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння наявної та модернізованої систем електропривода головного руху

Ознака	Наявна система (нерегульований АД + коробка швидкостей)	Модернізована система (ПЧ + АД, векторне керування)
Спосіб регулювання швидкості	ступінчастий, механічний (22 ступені)	безступінчастий, електричний

Підтримання сталої швидкості різання	неможливе	реалізується програмно
Характер пуску	прямий, з кидком струму до 5–7 Іном	плавний, зі стримуванням струму
Динамічні навантаження кінематики	значні	мінімізовані
Коефіцієнт потужності за часткового навантаження	низький	високий (корекція перетворювачем)
Втрати енергії у перехідних режимах	високі	знижені у кілька разів
Реверс і гальмування	механічне, з фрикційним зношуванням	електричне, кероване
Інтеграція в автоматизовані системи	відсутня	повна (дистанційне й програмне керування)
Діагностика та захист	релейні, обмежені	вбудовані функції перетворювача
Рівень зношування механіки	підвищений	знижений

Джерело: складено автором на основі [22, 28, 31].

Наведене порівняння свідчить про системну перевагу частотно-регульованого рішення за всіма ключовими ознаками. Безступінчасте регулювання й підтримання раціональної швидкості різання підвищують якість оброблення та стійкість інструмента, плавний пуск зменшує динамічні навантаження й продовжує ресурс механічної частини, а зниження втрат у перехідних і сталих режимах формує економічний ефект. Технічна обґрунтованість переходу до структури «перетворювач частоти – асинхронний двигун» дає змогу перейти до детального розроблення модернізованої системи.

2.3. Опис електропривода модернізованої системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун»

Запропонована система головного руху ґрунтується на живленні асинхронного короткозамкненого двигуна від статичного перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму. Силова частина перетворювача складається з трьох послідовно поєднаних вузлів: некерованого діодного випрямляча, який перетворює трифазну напругу мережі на пульсуючу напругу постійного струму; ланки постійного струму з ємнісним фільтром та згладжувальним дроселем, що формує стабілізовану напругу проміжного кола; автономного інвертора напруги на біполярних транзисторах з ізольованим затвором, який за допомогою широтно-імпульсної модуляції формує на виході трифазну напругу регульованих частоти та амплітуди [16]. Зміна частоти й амплітуди вихідної напруги спричиняє зміну частоти обертання магнітного поля статора та, відповідно, швидкості обертання вала двигуна [16].

Перетворювач частоти за схемою «випрямляч – автономний інвертор» належить до найпоширеніших рішень регульованого привода, оскільки забезпечує широкий діапазон керування швидкістю й моментом за високого коефіцієнта корисної дії силового перетворення [15]. Функціональну структуру модернізованої системи зображено на рисунку 2.1.

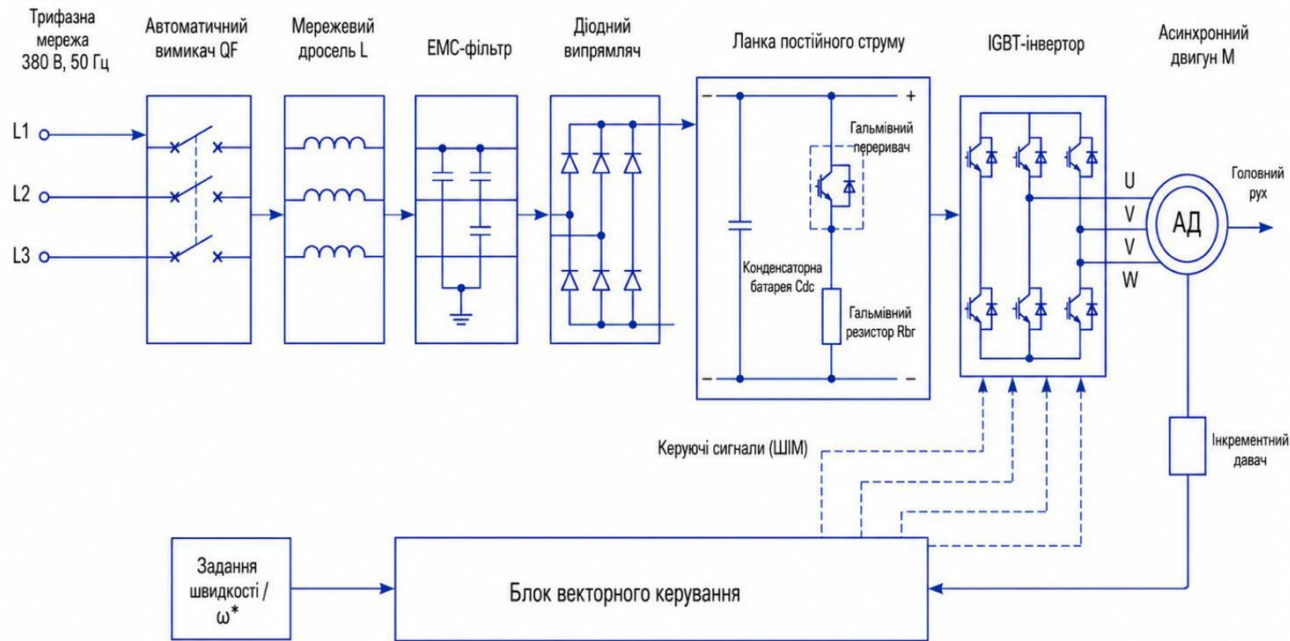


Рисунок 2.1 – Функціональна схема модернізованої системи електропривода головного руху «перетворювач частоти – асинхронний двигун» з векторним керуванням

Регульований привод широкого застосування складається з асинхронного короткозамкненого двигуна та статичного перетворювача частоти з ланкою постійного струму, що разом утворюють замкнену систему автоматичного керування швидкістю [16]. Перевагою обраної структури є збереження наявного або встановлення сучасного асинхронного двигуна головного руху без зміни компоновальної схеми верстата, а також можливість гнучкого налаштування характеристик привода програмними засобами перетворювача. Такий підхід є технічно обґрунтованим, оскільки модернізація не потребує радикальної перебудови механічної частини обладнання, не змінює базову кінематичну схему головного руху, не вимагає повної заміни приводного вузла, але водночас забезпечує істотне підвищення якості керування. У цьому випадку основним об'єктом модернізації стає не сам електродвигун як електромеханічний

перетворювач енергії, а спосіб його живлення, регулювання та захисту. Перехід від нерегульованого живлення безпосередньо від мережі до живлення через перетворювач частоти дає змогу формувати напругу і частоту відповідно до фактичної технологічної потреби, а не обмежуватися фіксованою частотою промислової мережі 50 Гц.

Асинхронний короткозамкнений двигун залишається найбільш доцільним виконавчим елементом для привода головного руху завдяки простоті конструкції, високій механічній міцності, відсутності колекторно-щіткового вузла, порівняно невисокій вартості, зручності обслуговування та достатній перевантажувальній здатності. Його конструкція добре пристосована до умов промислової експлуатації, де важливими є надійність, стійкість до пилу, вібрацій, температурних коливань і тривалої роботи у повторно-короткочасних або змінних режимах. Основним недоліком асинхронного двигуна при прямому підключенні до мережі є обмежена керованість швидкості та значні пускові струми. Саме ці недоліки усуваються шляхом застосування перетворювача частоти. Тому збереження асинхронного двигуна у складі модернізованого електропривода є раціональним рішенням, оскільки воно поєднує конструктивну простоту двигуна з функціональними можливостями сучасної силової електроніки.

Статичний перетворювач частоти з ланкою постійного струму виконує функцію проміжної силової та керувальної ланки між мережею живлення і двигуном. У типовій структурі така система містить вхідний захисно-комутаційний апарат, мережевий дросель, електромагнітний фільтр, випрямляч, ланку постійного струму з конденсаторною батареєю, гальмівний переривач із резистором, інвертор на силових IGBT-модулях і мікропроцесорний блок керування. Вхідний автоматичний вимикач забезпечує захист від коротких замикань та аварійних струмів. Мережевий дросель зменшує імпульсні струми на

вході перетворювача, покращує електромагнітну сумісність і знижує вплив нелінійного навантаження на мережу. ЕМС-фільтр обмежує високочастотні завади, що виникають унаслідок імпульсного характеру роботи силової частини. Випрямляч перетворює трифазну змінну напругу мережі у випрямлену напругу постійного струму. Ланка постійного струму згладжує пульсації та виконує роль енергетичного буфера. Інвертор формує трифазну напругу змінної частоти та амплітуди, необхідну для живлення асинхронного двигуна.

Ланка постійного струму має особливе значення для стабільності роботи електропривода. Конденсаторна батарея в її складі забезпечує накопичення енергії, згладжування напруги та підтримання стабільного живлення інвертора під час зміни навантаження. У режимах гальмування або швидкого зниження швидкості двигун може переходити в генераторний режим, коли механічна енергія обертових частин повертається в електричну форму. Якщо така енергія не може бути повернена в мережу, вона спрямовується на гальмівний резистор через гальмівний переривач. Це дає змогу уникнути небезпечного підвищення напруги в ланці постійного струму та забезпечити контрольоване гальмування механізму. Для привода головного руху така функція є важливою, оскільки вона дозволяє скоротити час зупинки, підвищити керованість перехідних процесів і зменшити механічні навантаження на передачі.

Використання частотного перетворювача змінює сам характер роботи електродвигуна. При живленні від мережі швидкість асинхронного двигуна практично визначається частотою мережі, кількістю пар полюсів і ковзанням. У такому випадку можливості регулювання швидкості обмежені, а будь-яка зміна технологічного режиму часто потребує механічного регулювання, перемикання передач або використання додаткових пристроїв. У частотно-регульованому приводі швидкість задається електронно, шляхом зміни частоти вихідної напруги перетворювача. Це дає змогу плавно регулювати швидкість головного руху в

широкому діапазоні, адаптуючи її до конкретної операції. У результаті підвищується технологічна гнучкість обладнання, зменшується потреба у механічних перемикачів, полегшується налагодження режимів і покращується повторюваність роботи.

Для головного руху верстата особливо важливо забезпечити не лише зміну швидкості, а й стабільність її підтримання під навантаженням. Якщо під час роботи момент опору змінюється, то у нерегульованому приводі це може призводити до просідання швидкості, погіршення якості оброблення, підвищення вібрацій, нерівномірності ходу та збільшення навантаження на механічні елементи. У замкненій системі автоматичного керування швидкістю фактична частота обертання двигуна вимірюється давачем, порівнюється із заданим значенням, а похибка надходить на регулятор швидкості. Регулятор формує керувальний вплив, який змінює момент двигуна так, щоб зменшити відхилення швидкості. Саме тому замкнена структура має перевагу перед розімкненою, оскільки вона здатна автоматично компенсувати зміну навантаження.

Застосування інкрементного давача частоти обертання підвищує точність і динамічну якість регулювання. Давач формує імпульси, частота яких пропорційна швидкості обертання вала двигуна або приводного механізму. Ця інформація надходить до блока керування перетворювача частоти, де використовується для побудови зворотного зв'язку за швидкістю. Завдяки цьому система може швидко реагувати на зміну моменту опору, підтримувати задану швидкість у перехідних і сталих режимах, а також забезпечувати точніше позиціонування або стабілізацію технологічного процесу, якщо це потрібно умовами роботи. Для головного руху це означає підвищення рівномірності обертання, зниження коливань швидкості та покращення якості виконуваної операції.

Векторне керування є доцільним для такої системи, оскільки воно дозволяє керувати асинхронним двигуном не лише за частотою і напругою, а за електромагнітним станом машини. У спрощеному вигляді його суть полягає у розкладанні струму статора на дві складові. Одна складова відповідає за створення магнітного потоку, друга — за формування електромагнітного моменту. Завдяки цьому система керування може окремо підтримувати необхідний потік і необхідний момент. Такий принцип наближує асинхронний електропривод за керованістю до електропривода постійного струму з незалежним збудженням. Для головного руху це особливо важливо, оскільки привод повинен забезпечувати швидке формування моменту, стійку роботу при зміні навантаження та точне підтримання швидкості.

Перевага векторного керування порівняно зі скалярним полягає в тому, що воно краще працює у динамічних режимах. Скалярний закон керування типу «напруга — частота» є простішим і може бути достатнім для вентиляторів, насосів або механізмів із плавно змінним навантаженням, але для головного руху верстата він не завжди забезпечує потрібну точність і швидкодію. При різкій зміні моменту опору скалярна система реагує менш точно, оскільки не має прямого розділення потокової та моментної складових. Векторна система дозволяє швидко збільшити моментну складову струму, не руйнуючи магнітний режим двигуна. Це забезпечує кращу жорсткість механічної характеристики, тобто менше зниження швидкості при зростанні навантаження.

Збереження наявної компоновальної схеми верстата є окремою перевагою обраної модернізації. Будь-яка заміна електродвигуна на двигун іншого типорозміру або перехід до принципово іншої системи привода може вимагати зміни кріплень, муфт, ремінної передачі, редуктора, захисних кожухів, кабельних вводів і системи охолодження. Це ускладнює модернізацію, підвищує її вартість і збільшує тривалість простою обладнання. Якщо ж використовується

асинхронний двигун тієї самої або близької конструктивної групи, модернізація може бути виконана переважно за рахунок заміни або додавання електротехнічної частини: перетворювача частоти, захисної апаратури, давача швидкості, сигнальних кіл і елементів керування. У цьому випадку механічна частина верстата залишається практично незмінною, що значно спрощує впровадження.

Програмне налаштування характеристик привода є важливою експлуатаційною перевагою. У перетворювачі частоти можна задавати час розгону, час гальмування, максимальну і мінімальну частоту, обмеження струму, допустимий момент, режим гальмування, параметри теплового захисту, тип керування, характеристики регуляторів швидкості й струму, параметри двигуна та логіку роботи зовнішніх входів і виходів. Це дає змогу адаптувати електропривод до конкретної машини без механічної перебудови. Наприклад, для запобігання ривкам під час пуску можна збільшити час розгону; для підвищення продуктивності — скоротити час перехідних процесів у допустимих межах; для захисту механічної передачі — обмежити максимальний момент. Така гнучкість є недосяжною для традиційних нерегульованих схем.

Плавний пуск, який забезпечується частотним перетворювачем, має суттєве значення для ресурсу механічної частини. При прямому пуску асинхронного двигуна виникають великі пускові струми та ударні моменти, які передаються на вал, муфту, редуктор, ремінні або зубчасті передачі. Це призводить до підвищеного зношування, вібрацій і можливого розцентрування вузлів. У частотно-регульованому приводі пуск виконується з поступовим збільшенням частоти та напруги, тому момент наростає плавно. Механізм розганяється без різких ударів, що зменшує навантаження на кінематичний ланцюг. Для головного руху це особливо важливо, оскільки саме цей вузол

зазвичай має найбільшу потужність, найбільший момент і найістотніший вплив на якість технологічного процесу.

Кероване гальмування є не менш важливим. У традиційних схемах зупинка двигуна часто відбувається вільним вибігом або за допомогою механічного гальма. Вільний вибіг збільшує час простою, а механічне гальмо створює додаткове зношування. Перетворювач частоти дає змогу реалізувати електричне гальмування, при якому швидкість зменшується за заданою характеристикою. Якщо в системі є гальмівний резистор, енергія обертових мас може розсіюватися контрольовано, без небезпечного зростання напруги в ланці постійного струму. Це підвищує безпечність і технологічну зручність роботи обладнання, особливо тоді, коли потрібні часті пуски, зупинки або зміни швидкості.

З енергетичного погляду частотне регулювання дозволяє зменшити непродуктивні витрати електроенергії. Якщо технологічний процес не завжди потребує максимальної швидкості головного руху, робота на зниженій частоті може зменшувати споживання енергії та втрати в механічній частині. Крім того, зниження пускових струмів зменшує навантаження на електромережу, знижує просідання напруги і покращує умови роботи іншого електрообладнання. Навіть якщо економія електроенергії не є головною метою модернізації, підвищення керованості та зменшення втрат у перехідних процесах дають позитивний експлуатаційний ефект. Важливо, що енергоефективність тут досягається не лише за рахунок зменшення споживаної потужності, а й через оптимізацію режимів роботи.

Система частотного електропривода також підвищує діагностичні можливості обладнання. Перетворювач частоти може контролювати струм, напругу, частоту, температуру, перевантаження, аварійні режими, стан входів і виходів, помилки зворотного зв'язку та інші параметри. Це дає змогу вчасно виявляти несправності або відхилення від нормального режиму. Наприклад,

зростання струму при незмінному режимі може свідчити про збільшення механічного опору, зношування підшипників, порушення мастила, заклинювання інструмента або інші технологічні проблеми. У традиційній схемі такі відхилення часто виявляються лише після появи явних ознак несправності. У модернізованій системі вони можуть бути зафіксовані раніше, що підвищує надійність і ремонтпридатність обладнання.

У частині електробезпеки та захисту перетворювач частоти також має переваги. Він може реалізовувати захист від перевантаження, перевищення струму, перенапруги, зниження напруги, перегрівання, втрати фази, замикання на землю, помилки давача швидкості та аварійного зупинення. Такі функції доповнюють традиційні апаратні засоби захисту і дозволяють краще адаптувати захист до конкретного двигуна та механізму. Для цього в параметри перетворювача вводять паспортні дані двигуна: номінальну потужність, напругу, струм, частоту, швидкість обертання, коефіцієнт потужності та спосіб охолодження. Коректне введення цих параметрів є обов'язковою умовою правильної роботи теплової моделі та струмових обмежень.

Вибір замкненої системи керування швидкістю є обґрунтованим саме для головного руху, оскільки тут важлива не лише можливість змінювати швидкість, а й здатність підтримувати її при зміні технологічного навантаження. У розімкненій системі перетворювач формує задану частоту, але фактична швидкість двигуна може змінюватися через ковзання. Чим більший момент навантаження, тим більшим стає ковзання і тим нижчою може бути фактична швидкість. У замкненій системі це відхилення вимірюється і компенсується. Тому при зміні навантаження система автоматично коригує електромагнітний момент, підтримуючи заданий режим. Це підвищує точність технологічного процесу та зменшує вплив зовнішніх збурень.

Важливим є і те, що замкнена система з векторним керуванням дозволяє краще працювати в зоні малих швидкостей. Для багатьох технологічних операцій потрібно не просто зменшити швидкість, а зберегти достатній момент на валу. У простих схемах скалярного керування на низьких частотах можуть виникати проблеми з моментом через падіння напруги на активному опорі обмоток. Векторне керування компенсує такі ефекти більш точно, оскільки працює з математичною моделлю двигуна та зворотними зв'язками. Це дозволяє забезпечити стабільний момент у ширшому діапазоні швидкостей. Для головного руху така властивість може бути вирішальною, якщо верстат повинен виконувати операції з різними режимами навантаження.

Модернізована система також створює передумови для автоматизації. Перетворювач частоти може взаємодіяти з програмованим логічним контролером, панеллю оператора, системою числового програмного керування або іншими елементами автоматизованої системи. Команди пуску, зупинки, зміни швидкості, реверсу, аварійного вимкнення та вибору режимів можуть подаватися дистанційно. Крім того, перетворювач може передавати діагностичну інформацію: фактичну швидкість, струм, момент, потужність, стан аварій, температуру, напругу ланки постійного струму. Це розширює функціональність обладнання і дає можливість інтегрувати привод у сучасну систему керування виробничим процесом.

З погляду монтажу така модернізація потребує правильного компоновання силових і сигнальних кіл. Силові кабелі від перетворювача до двигуна повинні бути прокладені з урахуванням вимог електромагнітної сумісності. Кабель давача швидкості та сигнальні проводи потрібно відокремлювати від силових ліній, щоб зменшити наведення завад. За потреби застосовують екрановані кабелі, правильне заземлення екранів, ЕМС-фільтри та вихідні дроселі. Такі заходи важливі для стабільної роботи зворотного зв'язку, оскільки помилки в

сигналі давача можуть погіршити якість регулювання або викликати аварійні зупинки. Тому модернізація має включати не тільки вибір перетворювача, а й правильну електромонтажну реалізацію.

При впровадженні частотно-регульованого привода необхідно врахувати тепловий режим двигуна. Якщо двигун має власний вентилятор на валу, то при зменшенні швидкості його охолодження погіршується. У режимах тривалої роботи на малих частотах це може призвести до перегрівання, навіть якщо механічне навантаження не перевищує номінального. Для запобігання цьому використовують тепловий захист, обмеження моменту на малих частотах або незалежну вентиляцію двигуна. Якщо розрахунки показують, що еквівалентне навантаження є значно нижчим за номінальне, то тепловий ризик зменшується, однак повністю ігнорувати питання охолодження не можна. У проєкті доцільно передбачити перевірку роботи двигуна у всьому діапазоні швидкостей.

Обрана структура має також економічні переваги. Вона дозволяє модернізувати привод без повної заміни механічної частини верстата, що зменшує обсяг робіт, тривалість простою та вартість впровадження. Основні витрати пов'язані з придбанням перетворювача частоти, захисної апаратури, давача швидкості, кабельної продукції та виконанням монтажно-налагоджувальних робіт. При цьому очікуваний ефект проявляється у підвищенні керованості, зменшенні пускових струмів, зниженні механічного зношування, покращенні стабільності швидкості та розширенні технологічних можливостей обладнання. Тому модернізація має не лише технічне, а й економічне обґрунтування.

У підсумку регульований електропривод на базі асинхронного короткозамкненого двигуна та статичного перетворювача частоти з ланкою постійного струму є раціональним рішенням для модернізації головного руху. Така система поєднує надійність і простоту асинхронного двигуна з широкими

можливостями електронного керування. Вона забезпечує плавний пуск, кероване гальмування, стабілізацію швидкості, обмеження струму, захист від аварійних режимів, можливість програмного налаштування та інтеграції в автоматизовану систему керування. Збереження наявної компоновальної схеми верстата зменшує складність модернізації, а використання замкненого векторного керування підвищує точність, динамічну якість і технологічну стабільність привода. Саме тому обрана структура може розглядатися як технічно обґрунтована основа для подальшого розрахунку, вибору апаратури та розроблення функціональної схеми модернізованої системи електропривода головного руху.

2.4. Робота схеми керування електроприводом

Керування модернізованим електроприводом реалізується дворівневою структурою, у якій нижній рівень утворює перетворювач частоти з вбудованим мікропроцесорним регулятором, а верхній – пульт оператора або програмований логічний контролер верстата.

Робочий цикл починається з подавання живлення через увідний автоматичний вимикач, після чого заряджається конденсаторна батарея ланки постійного струму через схему обмеження пускового струму. Команда пуску, надана кнопкою пульта чи дискретним сигналом контролера, активує формування вихідної напруги інвертора згідно із заданою діаграмою розгону. Задавач інтенсивності формує плавне наростання частоти від нуля до робочого значення за встановлений час розгону, унаслідок чого двигун розганяється без кидків струму та моменту [7]. Реверс здійснюється зміною порядку чергування фаз вихідної напруги без перемикання силових контактів, а зупинення – кероване, шляхом плавного зниження частоти із розсіюванням енергії гальмування на гальмівному резисторі через переривач ланки постійного струму.

Захисні функції зосереджено в перетворювачі та реалізовано програмно й апаратно. Електронний тепловий захист відстежує інтеграл квадрата струму двигуна, запобігаючи його перегріванню; передбачено захист від коротких замикань, перенапруг і зниження напруги в ланці постійного струму, обриву фази та перевищення припустимого моменту. Сигнали стану привода (готовність, робота, аварія, поточна частота й струм) виводяться на пульт оператора та передаються на верхній рівень керування. Дискретні й аналогові входи перетворювача дають змогу задавати швидкість потенціометром, фіксованими уставками або сигналом контролера, що забезпечує гнучке узгодження роботи привода з технологічним циклом верстата.

2.5. Модернізація системи керування на основі векторного принципу

Перехід від скалярного до векторного керування становить змістове ядро модернізації, оскільки саме векторний принцип забезпечує високі статичні й динамічні показники привода металорізального верстата. Системи керування регульованим приводом поділяють на скалярні та векторні: за помірних вимог до динаміки достатньо скалярного керування, тоді як для приводів з підвищеними вимогами до точності підтримання швидкості й моменту застосовують векторне керування [13]. У частотно-регульованих асинхронних приводах векторне керування пов'язане як зі зміною частоти й поточних значень напруги, струму та потокозчеплення, так і зі взаємною орієнтацією їхніх векторів у декартовій системі координат [19].

Сутність векторного керування полягає в орієнтуванні системи координат за вектором потокозчеплення ротора, що дає змогу розділити струм статора на дві ортогональні складові: складову, яка визначає магнітний потік машини, та складову, яка визначає електромагнітний момент. Незалежне регулювання

наведених складових надає асинхронному приводу властивостей, близьких до привода постійного струму, забезпечуючи високу точність підтримання швидкості та швидко відпрацьовуваність моменту під час раптової зміни навантаження різанням [13]. Для важкого токарного верстата подібна властивість має визначальне значення, оскільки врізання інструмента в заготовку супроводжується стрибкоподібним зростанням моменту опору.

Реалізація векторного керування потребує інформації про дійсну швидкість і положення вала, яку постачає інкрементний давач частоти обертання, встановлений на двигуні головного руху. За помірно жорстких вимог можливе застосування безсенсорного варіанта, у якому швидкість обчислюється спостерігачем за вимірними струмами й напругами статора, що спрощує конструкцію та знижує вартість [19]. У роботі прийнято варіант із давачем швидкості як такий, що забезпечує найвищу точність у нижній частині діапазону регулювання, потрібну для чистового оброблення на малих частотах обертання шпинделя.

Закон керування узгоджується з характером навантаження верстата. У зоні нижче від номінальної частоти підтримується сталість відношення напруги до частоти з компенсацією падіння напруги на активному опорі статора, що забезпечує сталий допустимий момент і відповідає чорновому обробленню заготовок великого діаметра. Вище від номінальної частоти двигун переходить у режим ослаблення поля, у якому за майже сталої напруги зростання частоти супроводжується зниженням моменту за приблизно сталої потужності, що відповідає чистовому обробленню малих діаметрів на підвищених частотах обертання шпинделя. Поєднання зони сталого моменту й зони сталої потужності розширює технологічні можливості верстата та повніше реалізує переваги безступінчастого регулювання порівняно з механічною коробкою швидкостей [12].

Інтеграція модернізованого привода в систему керування верстатом передбачає під'єднання дискретних і аналогових сигналів перетворювача до програмованого логічного контролера, що дає змогу автоматизувати послідовність технологічних операцій, реалізувати блокування за станом захисних пристроїв та забезпечити дистанційне задавання режимів. Запропонована структура зберігає універсальність верстата за ручного керування й водночас відкриває шлях до його роботи у складі автоматизованих виробничих дільниць [8].

Розрахунок електропривода головного руху виконується на підставі паспортних характеристик верстата 1М63Н-3 та типових режимів оброблення сталевих заготовок твердосплавним інструментом. За вихідні приймаються найбільший діаметр оброблення над супортом 350 мм, межі частоти обертання шпинделя від 10 до 1250 об/хв, номінальна потужність наявного двигуна головного руху 15 кВт за частоти обертання 1465 об/хв та напруга живлення 380 В частотою 50 Гц. Оброблюваний матеріал – конструкційна вуглецева сталь із границею міцності близько 750 МПа, інструмент – різець із твердосплавною пластиною.

Робочий цикл важкого токарного верстата охоплює чорнові переходи з великою глибиною різання та подачею за помірних швидкостей, а також чистові переходи з малою глибиною різання за підвищених швидкостей. Для коректного вибору двигуна аналізуються два характерні режими: тривалий чорновий режим, який визначає еквівалентне навантаження, та найважчий короткочасний режим, який перевіряється за припустимим перевантаженням.

2.6. Розрахунок потужності різання й перевірка електродвигуна

Головна складова сили різання під час поздовжнього точення обчислюється за емпіричною залежністю

$$F_{Fzz} = 10 C C_{FFzz} t t^{xx} s s^{yy} v v^m K K_{FFzz},$$

де tt – глибина різання, мм; ss – подача, мм/об; vv – швидкість різання, м/хв;
 $CC_{FFzz} = 300$; показники степенів $xx = 1,0$, $yy = 0,75$, $nn = -0,15$; $KK_{FFzz} \approx 1,0$ для
 прийнятих умов оброблення.

Для тривалого чорнового режиму з параметрами $tt = 5$ мм, $ss = 0,5$ мм/об,
 $vv = 90$ м/хв

$$FF_{zz} = 10 \cdot 300 \cdot 5^{1,0} \cdot 0,5^{0,75} \cdot 90^{-0,15} \approx 4,54 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Потужність різання визначається співвідношенням

$$PP_{\text{різ}} = \frac{FF_z vv}{60\,000} = \frac{4,54 \cdot 10^3 \cdot 90}{60\,000} \approx 6,8 \text{ кВт.}$$

Потрібна потужність на валу двигуна з урахуванням коефіцієнта корисної
 дії механічної передачі $\eta\eta_{\text{пер}} = 0,85$

$$PP_{\text{дв}} = \frac{PP_{\text{різ}}}{\eta\eta_{\text{пер}}} = \frac{6,8}{0,85} \approx 8,0 \text{ кВт.}$$

Для найважчого короткочасного режиму з параметрами $tt = 8$ мм, $ss =$
 $0,8$ мм/об, $vv = 80$ м/хв

$$FF_{zz} = 10 \cdot 300 \cdot 8 \cdot 0,8^{0,75} \cdot 80^{-0,15} \approx 1,05 \cdot 10^4 \text{ Н,}$$

$$PP_{\text{різ}} = \frac{1,05 \cdot 10^4 \cdot 80}{60\,000} \approx 14,0 \text{ кВт, } PP_{\text{дв}} = \frac{14,0}{0,85} \approx 16,5 \text{ кВт.}$$

Тривале навантаження за робочий цикл оцінюється методом еквівалентної
 потужності

$$PP_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{ii} PP_{\text{різ}}^2 tt_{ii}}{\sum_{ii} tt_{ii}}}.$$

Прийнявши орієнтовну циклограму (чорнове точення $PP_1 = 8,0\text{кВт}$ упродовж $tt_1 = 0,45$ частки циклу, напівчистове $PP_2 = 5,0\text{кВт}$ упродовж $tt_2 = 0,30$, чистове $PP_3 = 3,0\text{кВт}$ упродовж $tt_3 = 0,15$, допоміжні переходи $PP_4 = 0,8\text{кВт}$ упродовж $tt_4 = 0,10$), дістаємо

$$PP_{\text{екв}} = \sqrt{8,0^2 \cdot 0,45 + 5,0^2 \cdot 0,30 + 3,0^2 \cdot 0,15 + 0,8^2 \cdot 0,10} \approx 6,1 \text{ кВт.}$$

Еквівалентне навантаження електропривода становить приблизно 6,1 кВт, тобто є значно меншим за номінальну потужність вибраного асинхронного двигуна, яка дорівнює 15 кВт. Таке співвідношення підтверджує наявність достатнього теплового запасу двигуна під час роботи в розрахунковому технологічному циклі. Інакше кажучи, за середньою тепловою дією навантаження двигун не працює на межі своїх можливостей, а має суттєвий резерв щодо допустимого нагрівання обмоток, магнітопроводу та інших активних частин. Це є важливим аргументом на користь збереження потужності привода на рівні 15 кВт при переході до частотного регулювання, оскільки модернізація в такому випадку спрямовується не на механічне збільшення встановленої потужності, а на підвищення якості керування, плавності пуску, стабільності швидкості та енергоефективності системи.

Для оцінювання ступеня використання двигуна за еквівалентним навантаженням можна визначити коефіцієнт використання номінальної потужності. Він обчислюється як відношення еквівалентної потужності до номінальної потужності двигуна:

$$P_{\text{екв}} / P_{\text{ном}} = 6,1 / 15 = 0,41.$$

Отже, за еквівалентним навантаженням двигун використовується приблизно на 41 % від своєї номінальної потужності. Такий результат свідчить про те, що у тривалому режимі роботи електродвигун не зазнаватиме

небезпечного теплового перевантаження. Навпаки, він працюватиме з достатнім запасом за нагріванням, що позитивно впливає на ресурс ізоляції обмоток, стабільність електромеханічних характеристик та загальну надійність електропривода. У практиці вибору електродвигунів для приводів головного руху такий запас є допустимим і технічно виправданим, оскільки головний рух часто характеризується нерівномірним навантаженням, наявністю короткочасних піків моменту та змінною інтенсивністю технологічного процесу.

Водночас у найважчому короткочасному режимі розрахункова потреба у потужності становить близько 16,5 кВт. Це значення перевищує номінальну потужність двигуна 15 кВт приблизно на 10 %. Формально таке перевищення можна подати так:

$$16,5 / 15 = 1,10.$$

Отже, максимальне короткочасне навантаження становить приблизно 110 % від номінальної потужності двигуна. Таке перевищення не є критичним, оскільки воно має короткочасний характер і не визначає тривалий тепловий режим роботи електродвигуна. Для асинхронних двигунів і сучасних перетворювачів частоти типовою є допустима короткочасна перевантажувальна здатність. У даному випадку приймається, що двигун і перетворювач частоти допускають перевантаження на рівні 150 % протягом 60 секунд. Це означає, що короткочасно система може забезпечити потужність:

$$P_{\text{доп}} = 1,5 \times P_{\text{ном}} = 1,5 \times 15 = 22,5 \text{ кВт.}$$

Порівняння допустимої короткочасної потужності з фактично необхідною потужністю у найважчому режимі показує, що система має достатній резерв:

$$P_{\text{доп}} / P_{\text{max}} = 22,5 / 16,5 = 1,36.$$

Таким чином, допустима короткочасна потужність перевищує розрахункову потребу найважчого режиму приблизно в 1,36 раза. Це означає, що навіть за виникнення пікового навантаження електропривод не працюватиме на

межі допустимої перевантажувальної здатності. Наявний резерв є достатнім для компенсації можливих похибок розрахунку, незначного зростання моменту опору, зміни умов роботи механічної частини, коливань технологічного навантаження та інших експлуатаційних факторів.

З технічного погляду важливо розрізняти тривале та короткочасне перевантаження. Тривале перевантаження є небезпечним, оскільки воно призводить до поступового накопичення тепла в активних частинах двигуна, прискореного старіння ізоляції та зниження ресурсу електричної машини. Короткочасне перевантаження, навпаки, може бути допустимим, якщо його тривалість обмежена, а після нього настає період роботи з меншим навантаженням. Саме такий характер має розглянутий найважчий режим, у якому потужність 16,5 кВт потрібна лише на окремому етапі технологічного циклу. Оскільки еквівалентна потужність за цикл становить лише 6,1 кВт, теплова дія цього короткочасного піку не призводить до перевищення допустимого нагрівання двигуна.

Розрахунок еквівалентного навантаження є більш коректним критерієм для оцінювання теплової придатності двигуна, ніж орієнтація лише на максимальну короткочасну потужність. Якщо вибирати двигун тільки за найбільшим піковим значенням, то це може призвести до необґрунтованого завищення встановленої потужності, збільшення вартості обладнання, підвищення габаритів, зростання пускових і експлуатаційних втрат, а також до погіршення коефіцієнта використання двигуна. У даному випадку максимальне навантаження 16,5 кВт є короткочасним і перекривається допустимим перевантаженням, тоді як еквівалентне навантаження 6,1 кВт підтверджує значний тепловий запас. Тому збільшення номінальної потужності двигуна не є технічно необхідним.

Збереження двигуна потужністю 15 кВт є також доцільним з огляду на впровадження частотного регулювання. Перетворювач частоти забезпечує

плавний пуск, контроль струму, обмеження пускових перевантажень і можливість формування потрібного моменту без різких електромеханічних ударів. У традиційній системі прямого пуску асинхронний двигун може споживати значний пусковий струм, що створює додаткове навантаження на мережу живлення, комутаційну апаратуру та механічну передачу. У частотно-регульованій системі пуск відбувається плавно, з поступовим наростанням частоти та напруги, тому механічні й електричні навантаження зменшуються. Це додатково підвищує надійність привода головного руху.

Особливо важливо, що використання векторного керування дозволяє точніше формувати електромагнітний момент асинхронного двигуна. На відміну від простого скалярного регулювання, векторне керування дає змогу окремо контролювати складові струму, які відповідають за створення магнітного потоку та моменту. Завдяки цьому двигун може швидко реагувати на зміну навантаження, підтримувати задану швидкість і компенсувати короточасні збурення. Для привода головного руху це має принципове значення, оскільки стабільність швидкості безпосередньо впливає на якість технологічного процесу, точність виконання операцій і рівномірність роботи механічної частини.

Зворотний зв'язок від інкрементного давача частоти обертання додатково підвищує якість керування. Давач передає інформацію про фактичну швидкість обертання в блок векторного керування, де вона порівнюється із заданим значенням. Якщо навантаження зростає і швидкість починає знижуватися, система автоматично збільшує момент двигуна в допустимих межах. Якщо навантаження зменшується, струм і момент відповідно знижуються, що зменшує енергоспоживання та теплове навантаження. Таким чином, система з векторним керуванням і зворотним зв'язком за швидкістю забезпечує не тільки достатню потужність, а й високу динамічну точність роботи електропривода.

Важливим є і те, що модернізація не потребує переходу на двигун більшої потужності. Якщо замінити двигун 15 кВт на потужніший без реальної потреби, це призведе до збільшення вартості двигуна, перетворювача частоти, кабельної продукції, захисної апаратури та монтажних робіт. Крім того, двигун більшої потужності працював би з нижчим коефіцієнтом завантаження, що не завжди є енергетично вигідним. За наявними розрахунками двигун 15 кВт забезпечує достатній тепловий запас у тривалому режимі та достатню перевантажувальну здатність у короткочасному режимі. Тому його збереження є раціональним технічним рішенням.

Окрему увагу слід звернути на роботу двигуна на знижених частотах. У режимі частотного регулювання швидкість обертання може зменшуватися, а разом з нею може знижуватися ефективність самовентиляції двигуна. Проте в даному випадку еквівалентне навантаження є суттєво нижчим за номінальне, тому тепловий запас залишається достатнім. Для підвищення надійності доцільно передбачити правильне налаштування теплового захисту в перетворювачі частоти, контроль номінального струму двигуна, обмеження максимального моменту та перевірку умов охолодження. Якщо технологічний процес передбачатиме тривалу роботу на низьких частотах із підвищеним моментом, можна додатково передбачити незалежну вентиляцію двигуна, однак за наведеними розрахунками така вимога не є обов'язковою.

Структура модернізованого електропривода також підтверджує правильність прийнятого рішення. Трифазна мережа 380 В живить перетворювач частоти через автоматичний вимикач, мережевий дросель та ЕМС-фільтр. Автоматичний вимикач виконує функцію захисту від аварійних струмів, мережевий дросель зменшує вплив імпульсних навантажень на мережу, а ЕМС-фільтр обмежує електромагнітні завади. Далі електроенергія надходить на діодний випрямляч, після чого формується ланка постійного струму з

конденсаторною батареєю. Конденсаторна батарея стабілізує напругу постійного струму, а гальмівний переривач із резистором забезпечує відведення енергії під час гальмування або різкого зниження швидкості. IGBT-інвертор формує керовану трифазну напругу змінної частоти для живлення асинхронного двигуна.

Отже, модернізована система має завершену функціональну структуру, у якій силова частина забезпечує перетворення електроенергії, а система керування забезпечує точне формування швидкості й моменту. Розрахунки навантаження підтверджують, що двигун потужністю 15 кВт відповідає умовам роботи як за тривалим тепловим режимом, так і за короткочасною перевантажувальною здатністю. Еквівалентна потужність 6,1 кВт засвідчує значний запас за нагріванням, а найважчий короткочасний режим 16,5 кВт не перевищує допустимих можливостей системи, оскільки допустима короткочасна потужність за перевантаження 150 % становить 22,5 кВт.

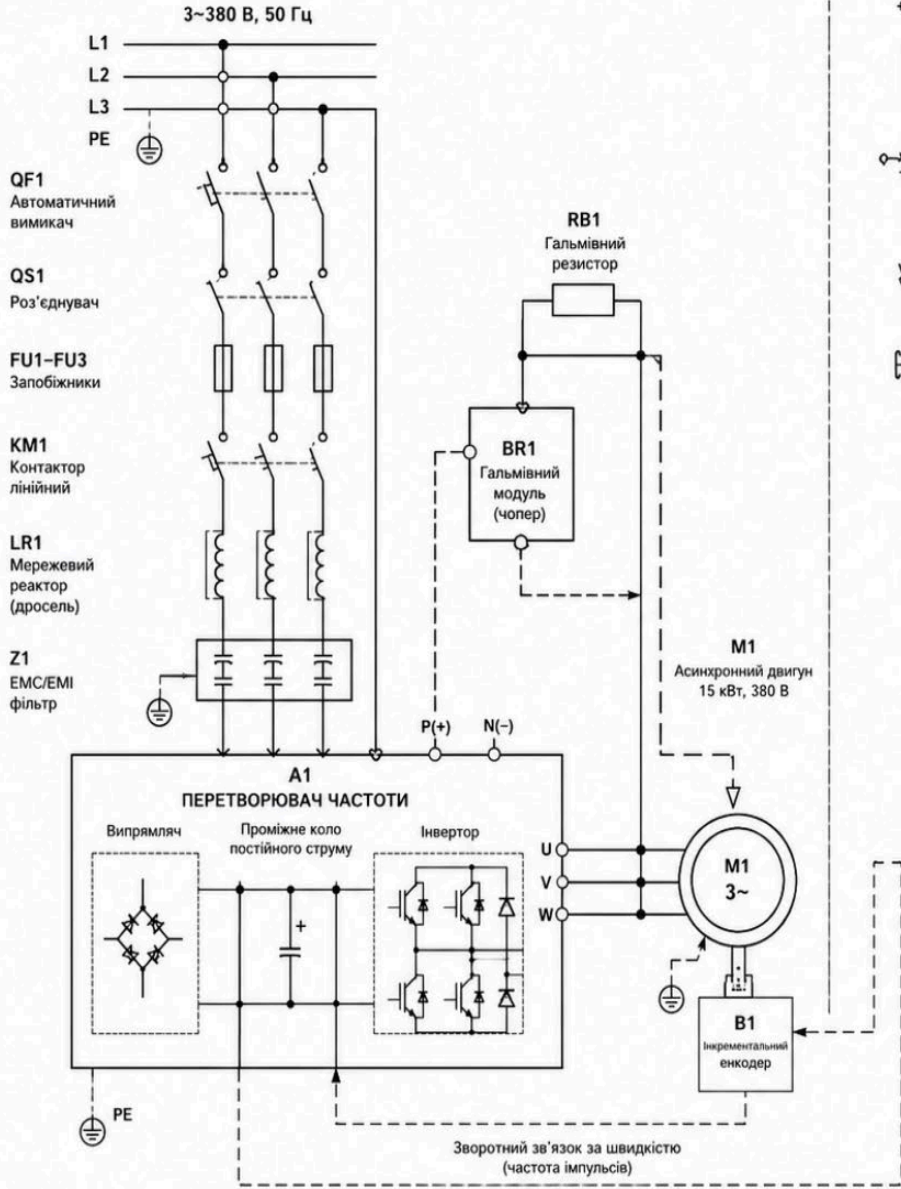
Таким чином, розрахунки обґрунтовують збереження номінальної потужності привода 15 кВт при переході до частотного регулювання. Збільшення потужності двигуна не є необхідним, оскільки наявний двигун забезпечує достатній тепловий і динамічний запас. Основний технічний ефект модернізації досягається не за рахунок нарощування встановленої потужності, а завдяки впровадженню перетворювача частоти з векторним керуванням, плавного пуску, стабілізації швидкості, контролю моменту, зниження пускових струмів і підвищення експлуатаційної надійності електропривода головного руху.

2.7. Вибір електродвигуна модернізованого привода

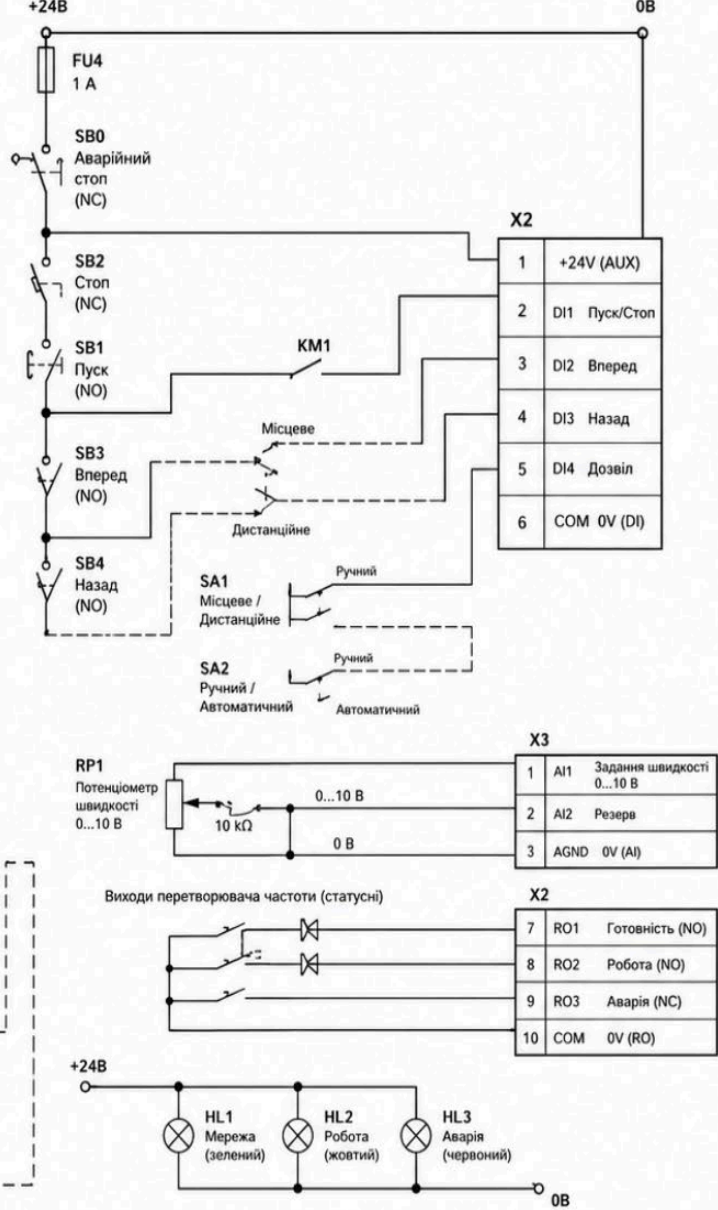
Для модернізованого привода доцільно встановити сучасний асинхронний короткозамкнений двигун підвищеного класу енергоефективності замість морально застарілого двигуна першого покоління. Застосування двигунів класів енергоефективності IE3–IE4 забезпечує економію електроенергії у межах 15–25 % порівняно з машинами нижчих класів за рахунок зменшення електричних і

магнітних втрат [28]. До встановлення приймається двигун потужністю 15 кВт із чотирма полюсами, номінальною частотою обертання 1465 об/хв, коефіцієнтом корисної дії на рівні класу IE3, що відповідає масогабаритним та приєднувальним розмірам наявного двигуна головного руху. Номінальні дані обраного двигуна подано в таблиці 2.2.

1. СИЛОВОЕ КОЛО



2. КОЛО КЕРУВАННЯ



Таблиця 2.2 – Номінальні дані електродвигуна головного руху модернізованого привода

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність, кВт	$PP_{\text{НОМ}}$	15
Номінальна лінійна напруга, В	$UU_{\text{НОМ}}$	380
Номінальна частота, Гц	$ff_{\text{НОМ}}$	50
Кількість пар полюсів	pp	2
Синхронна частота обертання, об/хв	nn_0	1500
Номінальна частота обертання, об/хв	$nn_{\text{НОМ}}$	1465
Номінальне ковзання	$ss_{\text{НОМ}}$	0,023
Коефіцієнт корисної дії (клас ІЕ3)	$\eta\eta_{\text{НОМ}}$	0,915
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi\varphi_{\text{НОМ}}$	0,86
Кратність максимального моменту	$MM_{\text{minmax}}/MM_{\text{НОМ}}$	2,8
Кратність пускового струму	$II_{\text{П}}/II_{\text{НОМ}}$	7,0

Джерело: складено автором на основі [26, 28].

Номінальний струм двигуна обчислюється за виразом

$$II_{\text{НОМ}} = \frac{PP_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} UU_{\text{НОМ}} \eta\eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi\varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{15\,000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,915 \cdot 0,86} \approx 29,0 \text{ А.}$$

Номінальний електромагнітний момент двигуна

$$MM_{\text{НОМ}} = \frac{PP_{\text{НОМ}}}{\omega\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{PP_{\text{НОМ}} \cdot 60}{2\pi p n n_{\text{НОМ}}} = \frac{15\,000 \cdot 60}{2\pi \cdot 1465} \approx 97,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Максимальний момент за кратності 2,8 становить близько 274 Н·м, що з належним запасом перебиває момент опору найважчого режиму різання.

2.8. Розрахунок параметрів та вибір перетворювача частоти

Перетворювач частоти добирається за номінальною потужністю двигуна, його номінальним струмом та потрібним діапазоном і характером регулювання. Тривалий вихідний струм перетворювача приймається з коефіцієнтом запасу не менше ніж 1,1 відносно номінального струму двигуна

$$I_{\text{ПЧ}} \geq 1,1 I_{\text{ном}} = 1,1 \cdot 29,0 \approx 31,9 \text{ А.}$$

Перетворювач повинен забезпечувати перевантажувальну здатність на рівні 150 % упродовж 60 с для відпрацювання короточасних піків моменту різання, підтримувати векторне керування з давачем швидкості, мати вбудований гальмівний переривач та функції захисту двигуна. Зазначеним вимогам відповідає перетворювач частоти загальнопромислового призначення потужністю 15 кВт на напругу 380–480 В із векторним керуванням, наприклад серії Danfoss VLT AutomationDrive FC-302 (виконання на 15 кВт) або рівноцінний за параметрами виріб іншого виробника. Подібні перетворювачі добре зарекомендували себе під час модернізації регульованих приводів виробничих механізмів [7].

Вхідний струм перетворювача з боку мережі за наявності згладжувального дроселя ланки постійного струму

$$I_{\text{вх}} = \frac{PP_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U U_{\text{ном}} \eta_{\text{ПЧ}} \cos \varphi_{\text{вх}}} = \frac{15\,000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,97 \cdot 0,95} \approx 24,7 \text{ А,}$$

де $\eta_{\text{ПЧ}} = 0,97$ – коефіцієнт корисної дії перетворювача; $\cos \varphi_{\text{вх}} = 0,95$ – вхідний коефіцієнт потужності за наявності дроселя.

Опір гальмівного резистора, потрібний для розсіювання енергії під час динамічного гальмування з напругою спрацьовування переривача ланки постійного струму $U U_{\text{гр}} \approx 780 \text{ В}$, оцінюється за умовою неперевикнення припустимого струму інвертора

$$RR_{\text{гр}} \geq \frac{U_{\text{г}}^2}{PP_{\text{гр}}},$$

де $PP_{\text{гр}}$ – припустима потужність гальмування. За орієнтовної потужності гальмування на рівні номінальної потужності двигуна $RR_{\text{гр}} \approx 40,6 \text{ Ом}$; до встановлення приймається стандартний гальмівний резистор опором 40 Ом потужністю розсіювання, узгодженою з частотою гальмувань у циклі.

2.9. Вибір комутаційно-захисної апаратури й живильних кабелів

Увідний автоматичний вимикач добирається за вхідним струмом перетворювача із заокругленням до найближчого більшого стандартного номіналу й характеристикою спрацьовування, придатною для роботи з нелінійним навантаженням перетворювача

$$I_{\text{н.авт}} \geq I_{\text{вх}} = 24,7 \text{ А} \Rightarrow I_{\text{н.авт}} = 32 \text{ А.}$$

Переріз жил живильного кабелю двигуна визначається за тривалим допустимим струмом з урахуванням зниження струмового навантаження через несинусоїдність вихідної напруги перетворювача. Приймавши коефіцієнт зниження $kk_{\text{зн}} = 0,8$, потрібний тривалий допустимий струм кабелю

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{ном}}}{kk_{\text{зн}}} = \frac{29,0}{0,8} \approx 36,3 \text{ А.}$$

Зазначеній умові відповідає мідний екранований кабель перерізом $4 \times 6 \text{ мм}^2$, тривалий допустимий струм якого за прокладання в повітрі становить близько 46 А. Перевірка за втратою напруги на ділянці завдовжки $LL = 15 \text{ м}$

$$\Delta UU = \frac{\sqrt{3} I_{\text{ном}} LL (RR_0 \cos \varphi \varphi + XX_0 \sin \varphi \varphi)}{1000},$$

за питомого активного опору $RR_0 = 3,08 \text{ Ом/км}$ та реактивного $XX_0 = 0,09 \text{ Ом/км}$ дає $\Delta UU \approx 2,3 \text{ В}$, що становить близько 0,6 % номінальної напруги й перебуває в межах припустимого. Перелік обраного електрообладнання модернізованого привода узагальнено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Перелік основного електрообладнання модернізованого електропривода головного руху

Позиція	Найменування	Технічні дані
1	Електродвигун головного руху	асинхронний, 15 кВт, 380 В, 1465 об/хв, клас ІЕ3
2	Перетворювач частоти	15 кВт, 380–480 В, $I_{ПЧ} \approx 32$ А, векторне керування, вбудований переривач
3	Автоматичний вимикач увідний	трифазний, $I_n = 32$ А, характеристика для перетворювальних навантажень
4	Мережевий дросель	узгоджений із вхідним струмом 24,7 А
5	Фільтр електромагнітної сумісності	відповідно до класу перетворювача
6	Гальмівний резистор	40 Ом, потужність за циклограмою гальмувань
7	Інкрементний давач частоти обертання	для замикання контуру швидкості векторного керування
8	Кабель живлення двигуна	мідний екранований, 4×6 мм ²
9	Пристрій захисного вимкнення	тип В (для кіл з перетворювачем частоти)

Джерело: складено автором на основі [21, 26, 28].

Обране обладнання забезпечує реалізацію частотно-регульованого привода головного руху з векторним керуванням, узгодженого з потужністю та режимами роботи верстата 1М63Н-3. Достатність теплового запасу двигуна, перевантажувальна здатність перетворювача й перевірені за струмом та втратою напруги кабелі підтверджують працездатність запропонованого технічного рішення, динамічні властивості якого досліджуються методом математичного моделювання в наступному розділі.

2.10. Математичний опис асинхронного двигуна в обертовій системі координат

Дослідження динамічних властивостей модернізованого привода потребує адекватної математичної моделі, здатної відтворити взаємодію електромагнітних і механічних процесів у системі «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Метод математичного моделювання залишається найпоширенішим засобом дослідження асинхронних електроприводів, оскільки дає змогу отримати залежності струмів, моменту та швидкості від часу, оцінити втрати в машині й обґрунтовано обрати раціональні за енергоспоживанням закони керування [47]. Узагальнена модель електромеханічної системи, побудована з урахуванням принципів векторного керування, забезпечує достовірне відтворення реальних режимів роботи та створює основу для подальшої оптимізації системи керування [17].

Опис трифазної машини доцільно виконувати в ортогональній обертовій системі координат, віссі якої позначено як dd та qq . Перехід від трифазних змінних статора до двофазних здійснюється прямим перетворенням Кларк та Парка, що зводить нелінійну систему зі змінними у часі коефіцієнтами до системи з постійними коефіцієнтами та істотно спрощує синтез регуляторів [54]. Орієнтування осі dd за вектором потокозчеплення ротора розділяє керування магнітним станом машини й керування електромагнітним моментом, унаслідок чого асинхронний двигун за властивостями наближається до двигуна постійного струму [13].

Електромагнітні процеси у двигуні описуються системою диференціальних рівнянь рівноваги напруг статора й ротора, записаних у координатах dd – qq , що обертаються із синхронною кутовою швидкістю $\omega\omega_{sS}$:

$$u_{ss} = R_{ss} i_{ss} + \frac{d\psi_{ss}}{dt} - \omega\omega_{sS} \psi_{qs},$$

$$\begin{aligned}
u_{ssss} &= R_{ss} i_{ssss} + \frac{d\psi_{ssss}}{dt} + \omega_{ss} \psi_{ssss}, \\
0 &= R_{rr} i_{rrss} + \frac{d\psi_{rrss}}{dt} - (\omega_{ss} - \omega_{rr}) \psi_{rrss}, \\
0 &= R_{rr} i_{rrss} + \frac{d\psi_{rrss}}{dt} + (\omega_{ss} - \omega_{rr}) \psi_{rrss},
\end{aligned}$$

де R_{ss}, R_{rr} – активні опори фаз статора й ротора; $i_{ssss}, i_{ssss}, i_{rrss}, i_{rrss}$ – складові струмів; $\psi_{ssss}, \psi_{ssss}, \psi_{rrss}, \psi_{rrss}$ – складові потокозчеплень; ω_{rr} – електрична кутова швидкість ротора.

Зв'язок потокозчеплень зі струмами визначається індуктивностями машини:

$$\begin{aligned}
\psi_{ssss} &= L_{ss} i_{ssss} + L_{mm} i_{rrss}, \psi_{ssss} = L_{ss} i_{ssss} + L_{mm} i_{rrss}, \\
\psi_{rrss} &= L_{rr} i_{rrss} + L_{mm} i_{ssss}, \psi_{rrss} = L_{rr} i_{rrss} + L_{mm} i_{ssss},
\end{aligned}$$

де L_{ss}, L_{rr} – повні індуктивності статора й ротора; L_{mm} – взаємна індуктивність.

Електромагнітний момент, що його розвиває машина, виражається через векторний добуток потокозчеплення ротора та струму статора:

$$MM = \frac{3}{2} p \frac{L_{mm}}{L_{rr}} \psi_{rrss} i_{ssss} - \psi_{rrss} i_{ssss},$$

де p – кількість пар полюсів. За орієнтування осі dd за вектором потокозчеплення ротора складова ψ_{rrss} дорівнює нулю, тому вираз моменту спрощується до

$$MM = \frac{3}{2} p \frac{L_{mm}}{L_{rr}} \psi_{rrss} i_{ssss},$$

що унаочнює пропорційність моменту моментоутворювальній складовій струму статора i_{ssss} за сталого потокозчеплення.

Механічна частина привода описується рівнянням руху одномасової системи:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_{cc}, \Omega = \frac{\omega_{rr}}{p},$$

де J – сумарний момент інерції, зведений до вала двигуна; Ω – механічна кутова швидкість; M_{cc} – момент опору різання, який у моделі задається як збурення.

2.11. Структура моделі та реалізація векторного керування

Модель системи побудовано за дворівневою структурою керування, що відповідає схемі, розкритій у підрозділі 2.3. Внутрішні контури регулюють складові струму статора i_{ssss} та i_{ssss} за допомогою пропорційно-інтегральних регуляторів, зовнішній контур регулює механічну швидкість, формуючи завдання на моментоутворювальний струм i_{ssss}^* . Задане потокозчеплення підтримується завданням на магнітоутворювальний струм i_{ssss}^* , яке нижче від номінальної частоти зберігається сталим, а в зоні ослаблення поля зменшується обернено пропорційно до швидкості. Порівняльний аналіз показує, що застосування пропорційно-інтегральних регуляторів у системі векторного керування забезпечує високу точність керування й зниження динамічних навантажень за різких змін сигналу завдання [51].

Параметри регуляторів розраховано за методом налаштування контурів на технічний оптимум. Електромагнітна стала часу статорного кола та механічна стала часу привода визначають сталі інтегрування, а коефіцієнти підсилення узгоджено з еквівалентною сталою часу перетворювача, прийнятою на рівні

періоду широтно-імпульсної модуляції. Структуру моделі з позначенням контурів регулювання подано на рисунку 2.3.

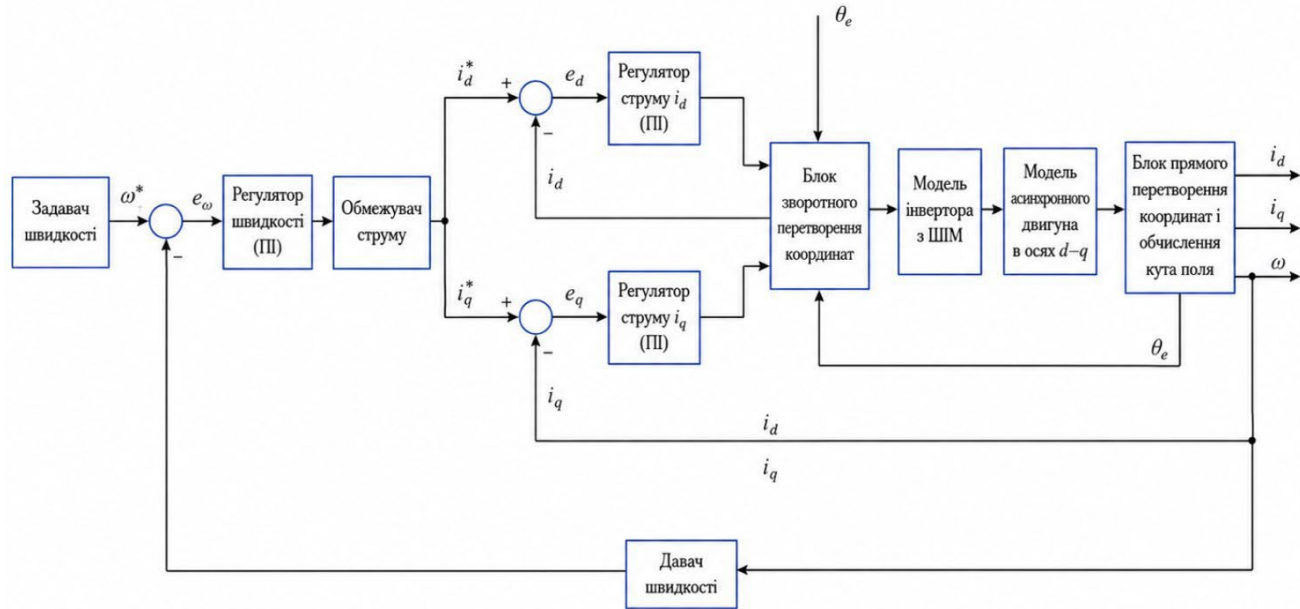


Рисунок 2.3 – Структурна схема моделі системи векторного керування електроприводом головного руху

Для дослідження перехідних процесів складено програмну модель у середовищі MATLAB, яка чисельно інтегрує наведену систему рівнянь методом Рунге – Кутти та реалізує алгоритм векторного керування з пропорційно-інтегральними регуляторами струму й швидкості. Модель відтворює повний робочий епізод привода: розгін до заданої частоти обертання шпинделя, усталений режим холостого ходу, накид моменту різання, що імітує врізання інструмента в заготовку, скидання навантаження та кероване гальмування. Параметри двигуна узгоджено з номінальними даними таблиці 2.2. Текст програми наведено нижче.

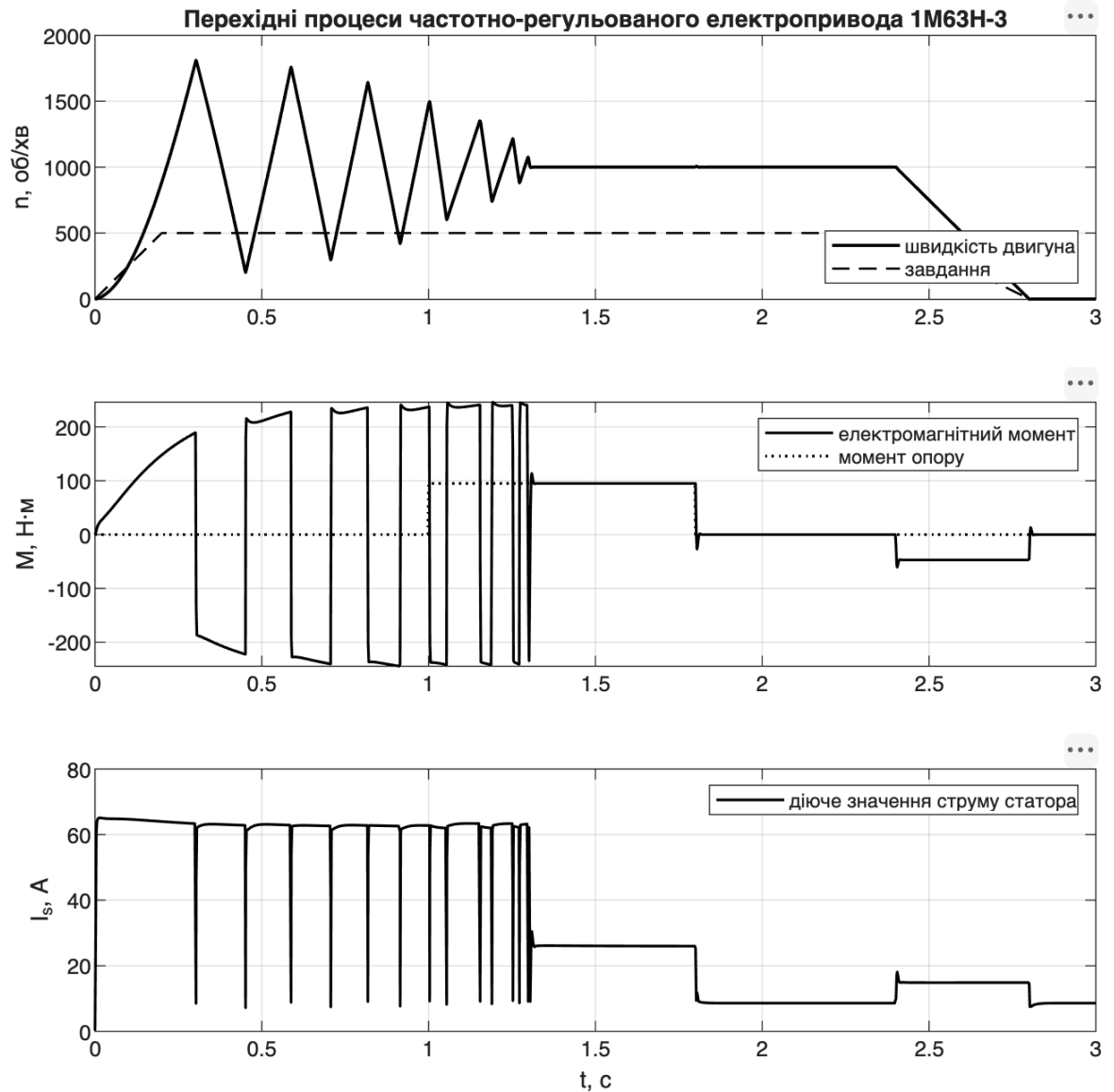


Рис 2.4. Результати моделювання

Чисельний експеримент відтворює характерні етапи роботи привода, отримані залежності частоти обертання, електромагнітного моменту та діючого струму статора від часу подано на рисунку 2.4. Криві перехідних процесів узгоджуються з фізичними уявленнями про поведінку частотно-регульованого

асинхронного двигуна під час пуску, накиду навантаження та гальмування, що підтверджує адекватність моделі [49].

Рисунок 2.4 – Перехідні процеси модернізованого електропривода: частота обертання, електромагнітний момент та діюче значення струму статора

Розгін привода відбувається плавно за заданою діаграмою інтенсивності, частота обертання наростає монотонно й без перерегулювання виходить на завдання приблизно 1000 об/хв, тоді як струм статора впродовж розгону обмежується на рівні уставки регулятора швидкості, що унеможливорює недопустимі кидки. Плавність наростання струму засвідчує перевагу частотного пуску над прямим пуском нерегульованого привода, за якого пусковий струм сягав би семикратного номінального значення [21].

Накид моменту різання в момент часу 1,0 с спричиняє короткочасне просідання швидкості, яке система швидко компенсує завдяки зростанню моментоутворювальної складової струму, після чого швидкість повертається до завдання. Кероване підтримання швидкості за раптової зміни навантаження різанням підтверджує доцільність застосування векторного принципу для металорізального верстата, де врізання інструмента супроводжується стрибком моменту опору [13]. Скидання навантаження в момент 1,8 с викликає симетричний за характером короткочасний сплеск швидкості, так само відпрацьований регулятором.

Етап гальмування реалізується керуванням зниженням завдання швидкості, момент двигуна змінює знак, а енергія гальмування розсіюється на гальмівному резисторі через переривач ланки постійного струму. Плавність гальмування зменшує динамічні навантаження кінематичного ланцюга порівняно з механічним фрикційним зупиненням наявної системи. Числові показники якості регулювання, що їх обчислює програма, свідчать про незначне просідання швидкості за накиду навантаження та помірний усталений струм статора в

режимі різання, що відповідає очікуваним характеристикам привода з налаштуванням контурів на технічний оптимум [51]. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої системи й слугують підставою для оцінювання заходів охорони праці та економічної ефективності модернізації.

2.12 Заходи з охорони праці

2.12.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників

Експлуатація токарно-гвинторізного верстата 1М63Н-3 із модернізованим електроприводом супроводжується дією сукупності небезпечних і шкідливих виробничих чинників, що потребують системного аналізу та запровадження відповідних захисних заходів. Безпека праці під час оброблення металу на верстатах регламентується чинними нормативними актами, передусім Правилами охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями, затвердженими відповідним наказом і зареєстрованими в Міністерстві юстиції України [32].

Механічні небезпеки становлять найбільш характерну групу чинників і пов'язані з обертанням шпинделя, рухом супорта та утворенням стружки. Доступні для дотику обертові частини, незакріплена заготовка чи інструмент, а також відлітання розжареної зливної стружки здатні спричинити травмування працівника. Для токарних верстатів вимоги стандартів передбачають захисні пристрої, причому за швидкості різання понад 5 м/с товщину матеріалу захисного екрана збільшують щонайменше удвічі, а оглядові вікна виготовляють із прозорого матеріалу в кілька шарів загальною товщиною не менше ніж 10 мм [33].

Електричні небезпеки набувають додаткового значення в умовах модернізованої системи, оскільки перетворювач частоти є джерелом напруги несинусоїдної форми та потенційним джерелом струмів витоку. Враховуючи дію електричного струму на організм людини, металеві елементи обладнання, що можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, підлягають обов'язковому заземленню, а місця під'єднання до електромережі забезпечуються написами із зазначенням виду струму й напруги [37]. Біля

кожного верстата передбачають діелектричні підставки, а біля силового щита – діелектричні килимки, що захищають верстатника від ураження струмом [37].

До шкідливих чинників належать підвищений рівень шуму та вібрації від працюючого обладнання, недостатня освітленість робочої зони, наявність аерозолів мастильно-охолоджувальної рідини в повітрі, а також локальне теплове навантаження. Тривала дія наведених чинників за відсутності захисних заходів знижує працездатність і може призвести до професійних захворювань.

2.12.2 Заходи з організації та технічні заходи безпеки

Організаційні заходи ґрунтуються на вимозі допускати до самостійної роботи на верстатах токарної групи лише осіб, які пройшли перевірку знань будови верстата, пристроїв, інструмента та правил безпеки з відповідним записом у журналі реєстрації інструктажів [35]. Перед початком роботи верстатник зобов'язаний переконатися у справності механізмів, захисних пристроїв та заземлення, а під час роботи – не торкатися обертових частин обладнання й оброблюваної деталі [35]. Працівникам, відповідальним за стан переносного електроінструмента та пристроїв, призначення надається наказом керівника, а облік ведеться у відповідному журналі [36].

Технічні заходи безпеки охоплюють комплекс рішень, узгоджених із модернізованою електричною частиною верстата. Перелік основних заходів та чинників, на усунення яких вони спрямовані, наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Небезпечні чинники та відповідні заходи охорони праці на робочому місці верстатника

Чинник	Можливий наслідок	Захисний захід
Обертові частини, заготовка, інструмент	механічна травма	захисні екрани, огороження, надійне закріплення заготовки
Зливна стружка	поріз, опік	стружколамальні канавки, захисний екран, прибирання гачком
Дотик до струмопровідних частин	ураження струмом	захисне заземлення, ізоляція, написи про напругу
Струми витоку перетворювача	ураження струмом	пристрій захисного вимкнення типу В, заземлення корпусу ПЧ

Підвищений шум і вібрація	професійні захворювання	віброізоляція, засоби індивідуального захисту органів слуху
Недостатня освітленість	зорове напруження, травми	комбіноване освітлення робочої зони
Аерозолі мастильно-охолоджувальної рідини	подразнення дихальних шляхів	місцева витяжна вентиляція

Джерело: складено автором на основі [32, 33, 37].

Особливістю модернізованого привода є застосування пристрою захисного вимкнення типу В, придатного для кіл із перетворювачами частоти, оскільки звичайні пристрої типу А не реагують належним чином на згладжені постійні струми витоку, характерні для випрямної ланки перетворювача. Корпус перетворювача та електрошафа під'єднуються до контуру захисного заземлення, а екран кабелю двигуна заземлюється з обох боків для зниження електромагнітних завад. Зазначені рішення забезпечують електробезпеку експлуатації за збереження переваг частотного регулювання.

2.12.3. Пожежна безпека та засоби індивідуального захисту

Пожежна небезпека на ділянці механічного оброблення зумовлена наявністю горючих мастильних матеріалів, можливим перегріванням електрообладнання та іскрінням. Запобігання загорянням досягається регулярним контролем стану електропроводки, неприпущенням перевантаження кіл та своєчасним прибиранням промащеного дрантя й стружки. Електрошафа з перетворювачем частоти обладнується природною або примусовою вентиляцією для відведення теплоти, що виділяється силовими напівпровідниковими елементами, оскільки перегрівання скорочує ресурс перетворювача й підвищує ризик відмови.

Засоби індивідуального захисту верстатника охоплюють захисні окуляри для убезпечення очей від стружки, спецодяг без вільних звисань, що виключає захоплення обертовими частинами, та взуття із захисним носком. Засоби індивідуального захисту повинні відповідати вимогам чинного технічного

регламенту [32]. Сукупність організаційних, технічних та протипожежних заходів формує безпечні умови праці на модернізованому робочому місці й відповідає вимогам чинного законодавства про охорону праці.

ВИСНОВКИ

Виконане дослідження присвячене модернізації електропривода головного руху важкого токарно-гвинторізного верстата 1М63Н-3 шляхом заміни нерегульованої системи з механічною коробкою швидкостей частотно-регульованим приводом «перетворювач частоти – асинхронний двигун» з векторним керуванням.

Аналіз конструкції та електрообладнання верстата виявив системні обмеження наявного рішення: ступінчастість регулювання швидкості, неможливість підтримання раціональної швидкості різання, значні пускові струми й динамічні навантаження за прямого пуску, а також знижену енергетичну ефективність за роботи з частковим навантаженням. Зіставлення наявної та модернізованої систем за технічними, енергетичними й експлуатаційними ознаками засвідчило перевагу частотно-регульованого привода за всіма ключовими показниками.

Обґрунтовано структуру модернізованої системи, що ґрунтується на живленні асинхронного двигуна від перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму, та розкрито принцип роботи дворівневої схеми керування з плавним пуском, керуванням гальмуванням і вбудованими функціями захисту. Перехід від скалярного до векторного керування з орієнтуванням за вектором потокозчеплення ротора забезпечує незалежне регулювання магнітного потоку й моменту, що надає асинхронному приводу властивостей, потрібних для оброблення з раптовою зміною навантаження різанням.

Розрахунок електропривода підтвердив достатність потужності привода 15 кВт: еквівалентне навантаження робочого циклу становить близько 6,1 кВт, а найважчий короткочасний режим перекривається перевантажувальною

здатністю двигуна й перетворювача. На підставі розрахунків обрано комплект електрообладнання, що охоплює двигун класу енергоефективності IE3, перетворювач частоти 15 кВт із векторним керуванням, давач частоти обертання, комутаційно-захисну апаратуру та живильні кабелі, перевірені за струмом і втратою напруги.

Побудована математична модель системи в координатах $d-q$ з реалізацією векторного керування та програмною підтримкою в середовищі MATLAB дала змогу дослідити перехідні процеси пуску, накиду й скидання навантаження та гальмування. Результати моделювання підтвердили плавність розгону з обмеженням струму, швидку компенсацію просідання швидкості за накиду моменту різання та кероване гальмування, що засвідчує адекватність моделі й працездатність запропонованої системи.

Розроблено заходи охорони праці, які враховують механічні, електричні, пожежні та санітарно-гігієнічні чинники, зокрема застосування пристрою захисного вимкнення типу В та належного заземлення, узгоджених із особливостями перетворювача частоти. Економічне обґрунтування показало, що за капітальних витрат близько 181,5 тис. грн та сумарного річного ефекту близько 18,9 тис. грн простий строк окупності становить приблизно 9,6 року, причому за сприятливих умов завантаження й тарифів цей показник скорочується. Поряд із грошовим ефектом модернізація розширює технологічні можливості верстата та відкриває шлях до його інтеграції в автоматизовані виробничі системи.

Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути безпосередньо застосовані під час реальної модернізації верстатів моделі 1M63H та споріднених важких токарно-гвинторізних верстатів 163-ї серії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воскобойник В. Е., Бородай В. А., Боровик Р. О., Нестерова О. Ю. Основи електропривода виробничих машин та комплексів : навч. посіб. Дніпро : Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. 254 с. URL: <https://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%20%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B0%2029.01.2021.pdf> (дата звернення: 12.04.2025).
2. Каталог металорізальних верстатів. Верстат токарно-гвинторізний 1М63: технічні характеристики. URL: https://www.metalinstryment.com/sprav_1m63b.htm (дата звернення: 14.04.2025).
3. MarketStan. Верстат токарно-гвинторізний 1М63 (163) РМЦ 2800 мм, ДПЗ00. URL: <https://marketstan.com/ua/pl194657973-1m63-163-stanok.html> (дата звернення: 14.04.2025).
4. Metalinstryment.com. 1М63Н Електроустаткування верстата. URL: https://metalinstryment.com/sprav_1m63_sx.htm (дата звернення: 13.04.2025).
5. Модернізація електроприводів токарних верстатів в Україні : матеріали 9-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Theory and Practice of Science: Key Aspects», (Рим, 19-20 лют. 2024). URL: https://www.researchgate.net/publication/378986977_Modernizacia_elektroprivodiv_tokarnih_verstativ_v_Ukraini (дата звернення: 17.04.2025).
6. Електропривод. Структура і загальні відомості : конспект лекцій. Донецька гірничо-металургійна академія. URL: http://www.dgma.donetsk.ua/metod/esa/teoriya_elektroprivoda/konspekt_lekciy.pdf (дата звернення: 15.04.2025).

7. Казачковський М. М. Розрахунок електроприводів верстатів з числовим програмним керуванням : метод. вказівки до курсового та дипломного проектування. Дніпропетровськ : НГУ. URL: https://elprivod.nmu.org.ua/ua/student/disciplines/pdpdp/%D0%95%D0%9F_%D0%A7%D0%9F%D0%A3.pdf (дата звернення: 15.04.2025).
8. Токар. Спеціальна технологія. 2 розряд. Тема 12. п. 12.3. Налагодження електроустаткування верстатів. URL: <https://turner2.pto.org.ua/index.php/turner2-tema12/turner2-modul-12-7> (дата звернення: 16.04.2025).
9. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями : наказ Міненерговугілля України від 19.12.2013 № 966. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0327-14> (дата звернення: 16.04.2025).
10. Левін Ю. О. Електропривод та автоматизація верстатів : навч. посіб. Полтава : НУП ім. Юрія Кондратюка, 2022. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/12808/1/%D0%9D%D0%B0%D0%B2%D1%87_%D0%BF%D0%BE%D1%81_%D0%95%D0%9F_%D0%90%D0%92%D0%90_%D0%9B%D1%94%D0%B2%D1%96.pdf (дата звернення: 15.04.2025).
11. Електроприводи подач верстатів: методичні вказівки до лабораторних робіт. URL: <https://studfile.net/preview/12369966/> (дата звернення: 17.04.2025).
12. a2m.com.ua. Частотно-регульований привід (VFD): будова, принцип роботи та сфери застосування. Опубліковано: 12.12.2024. URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/what-is-a-vfd> (дата звернення: 18.04.2025).
13. SPC.com.ua. Як вибрати частотний перетворювач для електродвигунів (з прикладами). URL: <https://spc.com.ua/blogs/frequency-inverters/how-to-choose-a-frequency-inverter> (дата звернення: 18.04.2025).
14. Волохов В. В. Модернізація системи керування електропривода конвеєра завантаження зерна : магістерська робота / наук. кер. О. Г. Васильєв. Миколаїв :

- НУК, 2024. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/f49f411c-8a75-4ed2-8f2f-172b2397957e> (дата звернення: 19.04.2025).
15. Безпека праці в цеху металообробки : матеріали з охорони праці. URL: https://loretest.com/op_metaloobrobka.html (дата звернення: 30.05.2026).
16. Енергозбереження засобами електроприводу : навчальні матеріали кафедри електроприводу. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: http://electroprivod.kpi.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=57 (дата звернення: 30.05.2026).
17. Математичне моделювання асинхронного електроприводу намотувального пристрою // Вісник Херсонського національного технічного університету. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/1431 (дата звернення: 30.05.2026).
18. Математичне моделювання перехідних процесів в асинхронному двигуні з короткозамкнутою кліткою в польовій постановці // Математичне моделювання. 2024. № 2(51). DOI: 10.31319/2519-8106.2(51)2024.317499. URL: <http://matmod.dstu.dp.ua/article/view/317499> (дата звернення: 30.05.2026).
19. Математичне моделювання системи електроприводу «тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун» : наукова стаття. Дніпро : ДДТУ. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).
20. Математичне моделювання системи векторного керування асинхронним приводом мостового крана з нечітким регулятором з метою підвищення енергоефективності // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2024. № 104. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.1.22. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/article/view/301298> (дата звернення: 30.05.2026).

21. Модернізація електропривода стрічкового конвеєра : кваліфікаційна робота. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», інституційний репозитарій eNUPPIR. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/item/13237> (дата звернення: 30.05.2026).
22. Модернізація електроприводів токарних верстатів в Україні : наукова стаття. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/378986977_Modernizacia_elektroprivodiv_tokarnih_verstativ_v_Ukraini (дата звернення: 30.05.2026).
23. Обробка металу на верстатах: вимоги безпеки і охорони праці // Охорона праці і пожежна безпека. URL: <https://oppb.com.ua/news/obrobka-metalu-na-verstatah-vymogy-bezpeky-i-ohorony-praci> (дата звернення: 30.05.2026).
24. Основи електропривода виробничих машин та комплексів : навчальний посібник. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка». URL: <https://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/Посібник%20основи%20електропривода%2029.01.2021.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).
25. Охорона праці при роботі на металообробних верстатах: загальні вимоги // Охорона праці. URL: <http://op.rv.ua/article/ohorona-praci-pry-roboti-na-metaloobrobnyh-verstatah-zagalni-vymogy> (дата звернення: 30.05.2026).
26. Підвищення енергоефективності промислового електроприводу засобами модернізації : наукова стаття // Комунальне господарство міст. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. URL: <https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/en/article/download/3284/3129> (дата звернення: 30.05.2026).
27. Підвищення ефективності системи електроприводу токарного верстату на базі перетворювачів частоти // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. URL:

http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/226187 (дата звернення: 30.05.2026).

28. Практичний посібник з підготовки техніко-економічного обґрунтування. Київ : Міністерство економіки України. URL: <https://me.gov.ua/file/0640ae90-dbd7-425b-88e4-b7791abc4092> (дата звернення: 30.05.2026).

29. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями : НПАОП 0.00-1.71-13. URL: https://dnaop.com/html/54598/doc-НПАОП_0.00-1.71-13 (дата звернення: 30.05.2026).

30. Частотне керування асинхронним приводом : навчально-методичні матеріали. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/Методичка_Частотне%20керування%20асинхронним%20приводом.pdf (дата звернення: 30.05.2026).

31. Скалярне керування асинхронним двигуном. Закони частотного управління : освітній курс. Київ : КНУБА. URL: <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=36069&chapterid=603> (дата звернення: 30.05.2026).

32. Векторне керування асинхронними двигунами : освітній курс. Київ : КНУБА. URL: <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=36026> (дата звернення: 30.05.2026).

33. Техніко-економічне обґрунтування, як шлях до залучення фінансування проєктів. Київ : UABIO. 2025. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2025/11/19-Olijnyk-_TEO-dlya-finansuvannya.pdf (дата звернення: 30.05.2026).



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-9д-2026арб

Автор

141-9д-2026арб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133408

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

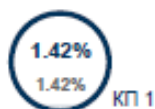
6/2/2026

Дата редагування

—

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.



15861

Кількість слів



129866

Кількість символів

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		47
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		4

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

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	--	---

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

Я, *Олійник Сергій Ігорович*, 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