Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
«_____» _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Обґрунтування та розробка електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____ Сергій ЦИГАНЕНКО
«____» _____ 2022 р.

Керівник проекту
к.т.н., доц.
_____Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ
«_____» _____ 2022 р.

Рецензент
к.т.н., доц.
_____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *автоматики та енергетики*

Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань *14 Електрична інженерія*

Спеціальність *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма *Електротехнічні системи електроспоживання*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ *Петро ПЛЄШКОВ*
«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Циганенка Сергія Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Обґрунтування та розробка електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату. Reasoning and development of the electrical part of the 8-spindle stone milling machine*

2. Керівник роботи *Козловський Олександр Антонович, к.т.н., доц.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту *2.12.2022 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи *розробка електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата з покращеними експлуатаційними характеристиками.*

Завдання*: 1. Сформулювати технічні вимоги до верстату 2. Провести аналіз електричної частини відомих зразків багатошпиндельних фрезерних верстатів. 3. Розробити принципову кінематичну, структурну та принципову електричну схеми верстата. 4. Удосконалити методики вибору електродвигунів для системи «двигун-КГП» і системи «двигун-зубчаста рейка» 5. Провести вибір силового обладнання електричної частини верстата. 6. Проаналізувати небезпечні та шкідливі фактори в цеху обробки каменю та розробити організаційні та технічні заходи безпеки щодо їх усунення. 7. Виконати техніко-економічну оцінку запропонованих технічних рішень.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економічна частина	*к.е.н., доц. Журило І. В.*		
Охорона праці	*к.т.н., доц. Савеленко І. В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ. Обґрунтування актуальності дослідження*	*2.09 – 7.09*	
2	*Розділ 1. Стан питання та задачі дослідження*	*8.09 – 21.09*	
3	*Розділ 2. Розробка принципової електричної схеми*	*22.09 – 2.10*	
	верстата		
4	*Розділ 3. Обґрунтування та вибір обладнання електрич-ної частини верстата*	*4.10 – 22.10*	
5.	*Охорона праці*	*25.10 – 8.11*	
6.	*Додаток А. Техніко-економічна оцінка ефективності електричної частини фрезерного верстата*	*9.11 – 23.11*	
7.	*Формулювання загальних висновків*	*24.11*	
8.	*Оформлення списку використаних джерел*	*25.11 – 26.11*	
9.	*Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді*	*29.11 – 30.11*	
	слайдів		

Дата видачі завдання

«____» _____2022 р.

Підпис керівника

_____ _____

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«____» _____2022 р.

Підпис здобувача

_____ _____

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 100 с, 23 рис., 10 табл. 21 джерело, 1 додаток

Циганенко С. С. Обґрунтування та розробка електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату.

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2021.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата з покращеними експлуатаційними характеристиками.

У роботі сформулювано технічні вимоги до електричної частини багатошпиндельного каменеобробного фрезерного верстату та проведено аналіз технічних рішень відомих прототипів. Обґрунтовано кінематичну схему верстату. Розроблено структурну та принципову електричні схеми електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату. На основі удосконалених математичних моделей проведено вибір електродвигунів приводів супортів осей X, Y, Z та сервопідсилювачів. Запропоновано методику вибору перетворювачів частоти для живлення груп асинхронних двигунів. Проведено вибір апаратів захисту та керування з урахуванням європейських стандартів.

Проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів у каменеобробному цеху та розроблено організаційні та технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт при експлуатації та обслуговуванні каменеобробних верстатів.

Проведено оцінку очікуваного економічного ефекту від впровадження розробленої електричної частини фрезерного верстату.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, СЕРВОДВИГУН, МОТОР-ШПИНДЕЛЬ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ФРЕЗЕРНИЙ ВЕРСТАТ З ЧПК

THE SUMMARY

Qualifying work: 100 pages, 23 figures, 10 tables, 22 sources, 1 appendix.

Tsyhanenko S. S. Reasoning and development of the electrical part of the 8-spindle stone milling machine.

Specialty 141 «Electric power engineering, Electrical engineering and Electromechanics», educational and professional program «Electrotechnical systems of power consumption». – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2022.

The purpose of the qualification work is to develop the electrical part of the 8-spindle stone milling machine with improved operational characteristics.

The paper formulates the technical requirements for the electrical part of the multi-spindle stone milling machine and analyzes the technical solutions of known prototypes. The kinematic scheme of the machine is substantiated. The structural and basic electrical diagrams of the electrical part of the 8-spindle stone-working milling machine have been developed. On the basis of improved mathematical models, the selection of electric motors for drives of X, Y, Z axis calipers and servo amplifiers was carried out. A technique for selecting frequency converters for powering groups of asynchronous motors is proposed. The selection of protection and control devices was carried out taking into account European standards.

The analysis of dangerous and harmful factors in the stone-working workshop was carried out and organizational and technical measures were developed to ensure the safety of work during the operation and maintenance of stone-working machines.

An assessment of the expected economic effect from the introduction of the developed electrical part of the milling machine was carried out.

ELECTRIC DRIVE, SERVO MOTOR, SPINDLE MOTOR, FREQUENCY CONVERTER, SELECTION OF ELECTRIC DRIVE, CNC MILLING MACHINE

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 8

ВСТУП 9

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ 12

1.1. Технічні вимоги до електричної частини фрезерного каменеобробного верстату 12

1.2. Аналіз конструктивних рішень відомих прототипів багатошпиндельних фрезерних верстатів 15

1.3. Загальне завдання дослідження та методика його виконання 22

1.4. Висновки до 1-ого розділу 25

2. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ВЕРСТАТА .. 26

2.1. Принципова кінематична схема верстата 26

2.2. Структурна електрична схема верстата 29

2.3. Принципова електрична схема верстата 33

2.4. Висновки до 2-ого розділу 39

3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ВЕРСТАТА 40

3.1. Вибір системи електроприводу осей X, Y, Z 40

3.2. Вибір системи електроприводу шпинделів 52

3.3. Вибір системи керування верстатом 60

3.4. Вибір апаратів захисту та керування верстатом 64

3.5. Вибір провідників електричної частини верстата 68

3.6. Конструктивне виконання електричної частини верстата 71

3.7. Висновки до 3-ого розділу 72

4. ОХОРОНА ПРАЦІ..... 74

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів у цехах обробки каменю ... 74

4.2. Заходи безпеки, щодо усунення небезпечних та шкідливих факторів ... 76

4.3. Розрахунок заземлювального пристрою цеху..... 78

4.4. Розрахунок блискавкозахисту 81

4.5. Висновки до 4-ого розділу 83

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 84

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... 86

ДОДАТОК А. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ВЕРСТАТА 88

А.1. Загальні вихідні дані 88

А.2. Визначення повної собівартості та оптової ціни нового верстата 89

А.3. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки) 94

А.4. Розрахунок показників економічної ефективності.....98

А.5. Висновки 100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕП – електропривод;

КГП – кулькогвинтова передача;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МОР – мастильно-охолоджувальна рідина;

ПЧ – перетворювач частоти;

РТ – реле теплове;

ЧПК – числове програмне керування;

CAD – computer aided design;

CAM – Computer-aided manufacturing;

CNC – computer numerical control;

ВСТУП

Актуальність теми. Природний камінь – це унікальний матеріал, який має ряд цінних властивостей, серед яких високі міцність, довговічність, інертність, екологічність, стійкість, а також естетичність. Проте у будівництві впродовж всієї історії людства він використовувався досить обмежено, лише для побудови культових споруд, замків. Це було пов’язано в першу чергу з високою трудомісткістю його обробки, внаслідок низького технічного рівня каменеобробних майстерень, а потім і підприємств. Докорінна зміна в галузі відбулася з появою ефективного алмазного інструменту та прогресивних технологічних процесів обробки на його основі. Сучасні верстати з ЧПК мають високу гнучкість, можливість отримання поверхонь зі складною формою, вони досить широко розповсюджені.

Особливістю каменеобробних фрезерних верстатів є порівняно низька продуктивність, що пов’язано з низькою швидкістю обробки матеріалу. Її підвищити можливо двома шляхами: збільшеннм швидкості різання каменю та збільшенням кількості одночасно працюючих робочих органів – фрез. Перший шлях є недоцільним, оскільки збільшення швидкості різання вище оптимальної призводить до швидкого зносу алмазних фрез. Тому, на сьогодні спостерігається тенденція до розробки багатошпиндельних верстатів з ЧПК, що призначені для виготовлення однакових виробів. До їх електричної частини висувається ряд вимог, зокрема, висока надійність, контроль блоком ЧПК кожного електропривода і т.п. які менш важливі для звичайних одношпиндельних верстатів. Для їх виконання необхідно правильно провести вибір електродвигунів всіх електроприводів з урахуванням особливостей багатошпиндельних каменеобробних фрезерних верстатів, однак існуючі методики не відповідають сучасним вимогам.

Тому вирішення задачі удосконалення методик вибору електродвигунів приводу супортів осей у різних режимах роботи багатошпиндельних каменеобробних фрезерних верстатів є актуальним.

Метою роботи є розробка електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати наступні часткові задачі:

- сформулювати технічні вимоги до верстату;

- провести аналіз електричної частини відомих зразків багатошпиндельних фрезерних верстатів;

- розробити принципову кінематичну, структурну та електричну схеми верстата;

- удосконалити методики вибору електродвигунів для системи «двигун-КГП» і системи «двигун-рейка»;

- провести вибір силового обладнання електричної частини верстата;

- проаналізувати небезпечні та шкідливі фактори в цеху обробки каменю та розробити організаційні та технічні заходи безпеки щодо їх усунення;

- виконати економічну оцінку запропонованих технічних рішень.

Об'єкт дослідження – енергетичні процеси в силових електричних колах фрезерного верстата.

Предмет дослідження – електрична частина 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата.

Методи досліджень. У основу роботи покладено системний підхід до проведення теоретичних досліджень, що базуються на використанні, теорії електричних кіл, диференціального та інтегрального числення, економічного аналізу. Були використані прикладні програми Mathcad, Microsoft Excel та Microsoft Word.

Наукова цінність отриманих результатів роботи полягає в подальшому розвитку математичних моделей руху супорту системи «двигун–кулько-гвинтова передача» і руху супорту системи «двигун–рейка» у різних режимах роботи верстата, які дозволяють визначити необхідний крутний момент приводних електродвигунів та їх потужність.

Практична цінність отриманих результатів випускної кваліфікаційної роботи для електроенергетичної галузі полягає в розробці електричних схем 8-ми шпиндельного фрезерного каменеобробного верстату на основі сучасної приладної бази, які можуть бути використані при проектуванні або модернізації подібних верстатів.

Ефективність отриманих результатів запропонованих науково-технічних рішень підтверджено розрахунком річного економічного ефекту від експлуатації 8-шпиндельного фрезерного каменеобробного верстату, електричну частину якого запропоновано у даній кваліфікаційній роботі.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одним із можливих підходів, щодо покращення продуктивності каменеобробних фрезерних верстатів з ЧПК при виробництві однотипних виробів є збільшення кількості їх мотор-шпинделів. Ця обставина накладає специфічні вимоги до електричної частини таких верстатів, що працюють у тяжких виробничих умовах – запилених і сирих приміщеннях. Щоб задовольнити цим вимогами при розробці електричної частини верстату, необхідно оцінити технічні рішення, що були використані при розробці аналогічних серійних верстатів.

1.1. Технічні вимоги до електричної частини фрезерного каменеобробного верстату

Каменеобробні фрезерувальні верстати з ЧПК в поєднанні з CAD/CAM системами дають можливість виконувати криволінійні різи, тобто виготовляти барельєфи з натурального та штучного каменю. Шляхом різання перпендикулярно встановленої до заготовки пальчикової фрези їй надається необхідний профіль (форма), розміри та чистота поверхні. Каменеобробні фрезерувальні бувають двох видів – призначені для обробки призматичних слябів (рис. 1.1) і циліндричних заготовок (рис. 1.2). У цій випускній кваліфікаційній роботі розглядається перший вид верстатів.

Багатошпиндельні каменеобробні фрезерувальні верстати мають портальну компоновку. Портал (П-подібна конструкція) 3 встановлено на напрямних, що дає змогу йому рухатися по осі Y. На поталі встановлені поперечні напрямні з супортом, який переміщується вздовж осі X. Крім того, на супорті осі Y 5 встановлено супорт осі Z 6, який рухається вертикально. На супорті 6 встановлюються шпинделі 4. Фреза кріпиться до шпинделю за допомогою цангового патрона. У електрошафі 2 розміщені апарати захисту, а також системи керування всіма механізмами верстата – головного руху, подачі осей X, Y, Z, насосів охолодження шпинделів і мастильно-охолоджуальної рідини і т.п.

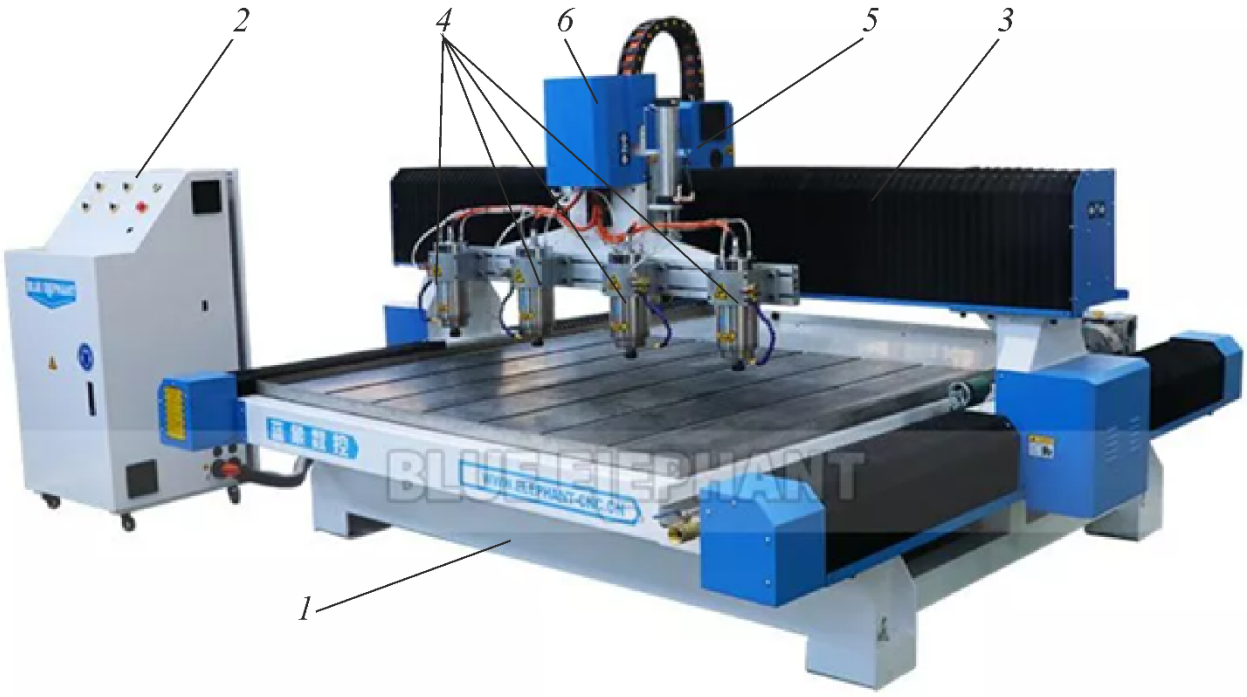


Рисунок 1.1 – Трьохосьовий фрезерний верстат ELECNC-1815 (4-рі шпинделі) [2]:
1 – рама; 2 – електрошафа; 3 – портал; 4 – шпинделі;
5 – супорт переміщення осі Y; 6 – супорт переміщення осі Z

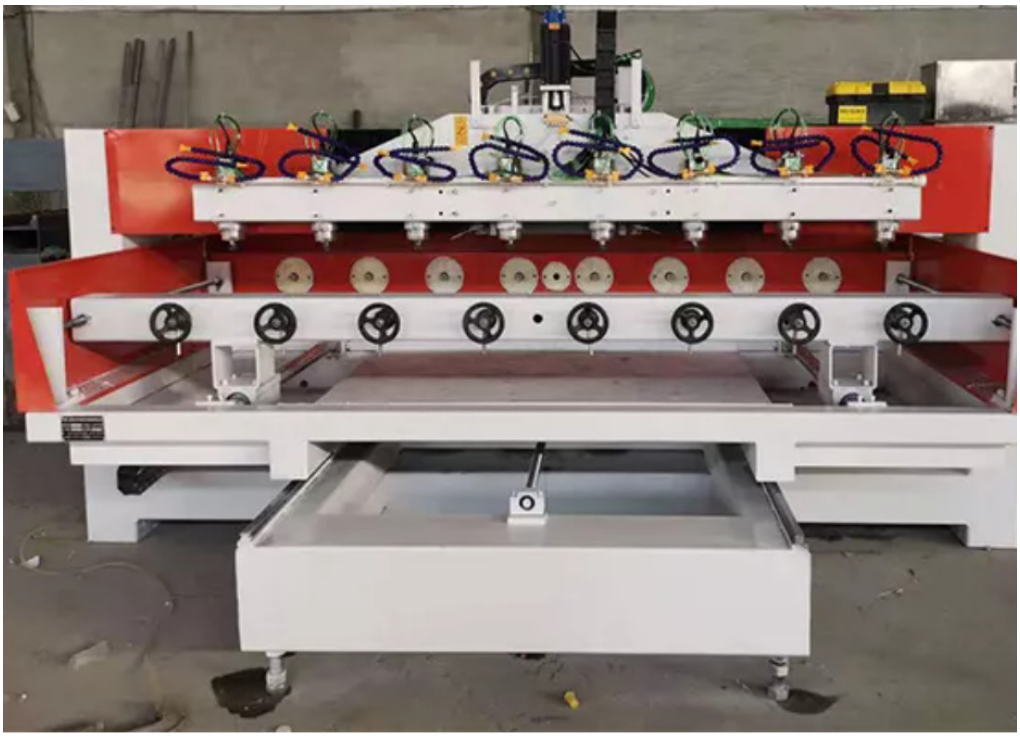


Рисунок 1.2 – Чотирьохосьовий токарно-фрезерний верстат
ZX-12025-8 (8-м шпинделів) [3]

Електроприводи каменеобробних фрезерних верстатів призначені для здійснення робочих і допоміжних переміщень інструментів. Отже, розрізняють приводи головного руху – призначені для виконання технологічної обробки заготовки шляхом знімання шару каменю та приведення заготовки до виду, визначеного 3D-моделлю, і приводи подач – призначені для переміщення фрези відносно заготовки за траєкторією, що задана в керуючій програмі. До кожного з цих видів приводів висуваються свої, специфічні вимоги стосовно передачі сили (потужності), забезпечення сталості швидкості, діапазону її зміни, точності переміщення порталу та супортів і їх похибки позиціонування, швидкодії, надійності, стійкості.

Електрична частина система 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного, повинна задовольняти наступним вимогам:

1. Напруга живлення – 380 В±10%, 50 Гц.

2. Електродвигуни шпинделів каменеобробного фрезерного верстату повинні мати жорстку конструкцію та бути оснащені керамічними підшипниками, що не вимагають обслуговування. Кожен мотор-шпиндель повинен бути термостабілізованим за допомогою водяного охолодження, а в його корпусі (за необхідності) повинен підтримуватися надлишковий тиск повітря. Частота обертання шпинделя – 0-24000 об/хв. Максимальна товщина пальчикової алмазної фрези – 20 мм. Корисна потужність мотор-шпиндель – 5,5 кВт.

Маса порталу – 1,5 т, супорта осі Y – 450 кг, осі Z – 330 кг.

Довжина зубчастої рейки рейкової передачі – X – 2,6 м.

Довжина гвинтів КГП: вісь, Y – 0,5 м, Z – 0,5 м.

Зовнішній номінальний діаметр різьби гвинтів КГП: вісь Y – 25 мм, вісь Z – 30 мм.

3. Встановлені приводи подачі осей X, Y, Z повинні бути змінного струму, мати широкий діапазон регулювання та не потребувати проміжних низьковольтних джерел живлення. На осі X повинно бути встановлено два приводи, що працюють узгоджено (синхронно).

Максимальна швидкість переміщення супортів, $v_{\text{п.}max}$ – 500 мм/с.

Максимальна швидкість фрезерування, $v_{\text{фр.}max}$ – 250 мм/с.

4. Система подачі МОР повинна бути виконана за замкнутим принципом і обладнана надійним, ремонтопридатним насосом. Тиск у системі при подачі до зони різання через зовнішні сопла повинен бути не менше 3,5 бар. Напруга живлення насосу подачі МОР – 380 В.

5. Електрична шафа управління повинна мати автоматичні вимикачі для захисту кожного з електроприводів, кіл, що їх живлять і оперативних кіл. Пульт керування (контролер ЧПК) повинен бути стаціонарним, вбудованим в передню панель електрошафи верстату. Контролер ЧПК повинен бути обладнаний MPG-портом або аналогічним для підключення дистанційного керування верстатом.

5. Електрична частина фрезерного верстату повинна забезпечувати безпеку обслуговуючого та експлуатаційного персоналу від впливу електричного струму та високочастотних полів.

Максимальна температура в приміщенні де встановлений верстат складає +28 ºС [4].

1.2 Аналіз конструктивних рішень відомих прототипів багатошпиндельних фрезерних верстатів

Портальні фрезерні верстати для обробки природнього та штучного каменю представляють собою 3 або 4-ри осьову платформу на супорт осі Z якої може встановлюватися різна кількість (від 4-х до 12-ти) шпинделів у залежності від необхідного робочого поля та продуктивності виробництва.

На рис. 1.1 представлено верстат трьохосьовий фрезерний верстат ELECNC-1815 (виробник BlueElephant CNC Machinery, Китай) на якому може бути встановлено до 4-х шпинделів. Основні технічні характеристики верстату представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики верстату ELECNC-1815 [2]

Опис	Параметр
Ефективна робоча зона	1800*1500*200 мм
Шпиндель	Шпиндель водяного охолодження Changsheng
Швидкість шпинделя	0-24000 об/хв
Електродвигун та драйвери	YAKO
Система контролю	Mach3
Інвертор	Best Inverter
Система змащення	Автоматична змазка
Робочий стіл	Т-подібний паз з нержавіючої сталі
Кульково-гвинтова передача	Тайвань TBI
Напруга	220 В, 50 Гц

Апаратура захисту та керування, перетворювачі частоти розміщуються в пересувній електрошафі поблизу верстата (рис. 1.1). Для роботи фрезерного верстата до неї необхідно підключати DSP-пульт. Привод ходових гвинтів оснащено, в залежності від комплектації, кроковими двигунами зі зворотнім зв’язком або серводвигунами. Для ефективного відводу тепла від електроапаратів та блоків силової електроніки шафа обладнана активною системою охолодження. У ній встановлено два вентилятори – нижній працює в режимі нагнітання, верхній – витягування. Вентилятори захищені сітками фільтрами, які періодично потрібно будуть забруднюватися пилом і вимагатимуть обслуговування. Головним недоліком електричної частини верстату є живлення від однофазної мережі 220 В, що призведе до нерівномірне завантаження цехового трансформатора.

На рис. 1.2 представлено чотирьохосьовий токарно-фрезерний верстат ZX-12025-8 [3] призначений для фрезерування 8-ми кам’яних циліндричних або плоских заготовок. Цей верстат має аналогічну конструктивну компоновку осей X, Y, Z як і верстат ELECNC-1815, а відрізняється лише наявністю 4-ї поворотної осі A за допомогою якої приводяться в рух циліндричні заготовки. Основі технічні характеристики даного верстату подані в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики верстату токарно-фрезерний верстат ZX-12025-8 [3]

Параметр	**Значення**
Розмір заготовки, мм	350×1000
Вісь Z, робоча висота, мм	600
Кількість шпинделів, шт.	8
Тип приводу	сервопривод
Частота обертання шпинделів, об/хв	24000
Точність позиціонування, мм	0,05
Максимальна швидкість переміщення, мм/хв	30000
Максимальна швидкість фрезерування, мм/хв	15000
Потужність шпинделів, кВт	8×5,5 (опціонально 6-12)
Сумарна потужність, кВт	18,5
Робоча напруга, В	380±10% / 50 Гц
Габарити верстата, мм	2680×2000×2200
Маса верстата, кг	6300

Електрична частина верстата ZX-12025-8 складається з трьох електрошаф: шафи керування (рис. 1.3), шафи блоків керування севоприводами (рис. 1.4) і шафи перетворювачів частоти (рис. 1.5), силових і сигнальних кабелів та виконавчих двигунів. Шафи блоків керування сервоприводами осі **A** та перетворювачів частоти шпинделів розміщуються безпосередньо на токарно-фрезерному верстаті, таке конструктивне рішення дозоляє максимально наблизити блоки силової електроніки безпосередньо до електродвигунів. Внаслідок чого скорочується довжина живлячих кабелів, а отже знижуються втрати електроенергії та рівень електромагнітних завад від них, покращується узгодження електродвигунів з перетворювачами частоти. Також спрощується задача дотримання встановлених заводами виробниками теплових режимів електрообладнання верстату.

Шафа керування виконується пересувною, у металевому корпусі (рис. 1.3). На її передній панелі розміщені двері із замком та механічні кнопки керування, такі як «STOP» (аварійна зупинка верстата) та ін. Шафа розміщується поблизу верстата,

що дозволяє контролювати значення його технологічних параметрів на моніторі DSP-пульту та безпосередньо візуально – роботу, пальчикових фрез, шпинделів. У шафі знаходяться апарати захисту – автоматичні вимикачі та керування – контактори, блоки керування серводвигунами осей A-Z. З верстатом шафа з'єднана за допомогою гнучких кабелів прокладених у захисній гофрованій трубі. З метою усунення завад сигнальні кабелі до сенсорів і кінцевих вимикачів, а також силові до виконавчих двигунів приводів осей виконуються екранованими. У шафі розподіл електроенергії здійснюється за багаторівневим принципом «згори-вниз», тобто ввідний комутаційний апарат (трифазний автоматичний вимикач) розташовується у верхньому ряді від нього отримують живлення контактори, що подають живлення на ПЧ шпинделів, автоматичні вимикачі оперативних кіл керування. Вся проводка в шафі прокладена у прямокутних перфорованих полівінілхлоридних каналах.

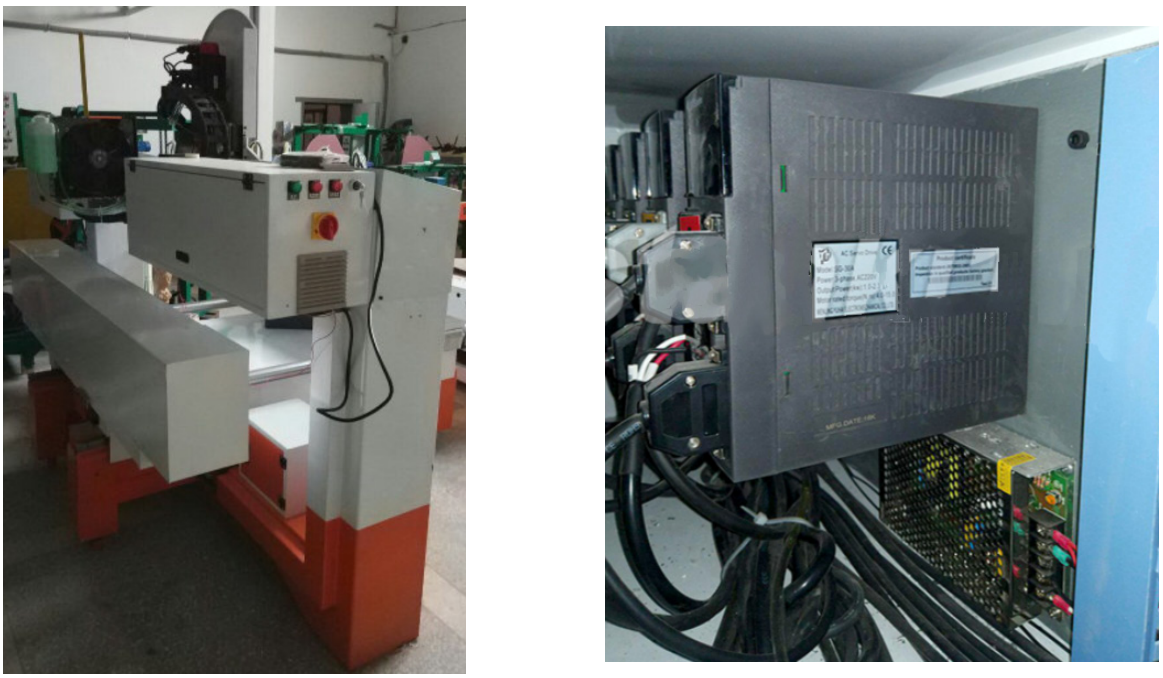
Електроапарати встановлені на DIN-рейках, що кріпляться до шасі, перетворювачі частоти двигунів кріпляться гвинтами безпосередньо до шасі. На нижньому рівні шафи встановлено клемник через який до шафи підключаються



Рисунок 1.3 – Компоновка шафи керування багатошпиндельного верстата

сигнальні кабелі вимірювальних перетворювачів і кінцевих вимикачів. Силові кабелі приводів підключено безпосередньо до клем блоків керування серводвигунів. На дні шафи встановлені знижувальний трансформатор для живлення оперативних кіл та мережевий дросель для захисту від вищих гармонічних складових напруги живлячої мережі.

З метою мінімізації розмірів електрошаф, що розміщуються безпосередньо на верстаті вони виконуються з однорядним розміщенням електрообладнання. У шафі сервоприводів осі А (рис. 1.4) серводрайдрайвери розміщені в один ряд з невеликими бічними повітряними проміжками та близько до верхньої стінки шафи. Екрановані силові кабелі від серводвигунів та сигналі кабелі від енкодерів через спеціальні роз'єми підключаються до блоків керування, через ці ж роз'єми здійснюється заземлення екранів кабелів. Живлення блоків керування серводвигунів здійснюється безпосередньо від однофазної мережі. Обмежені розміри електрошафи можуть призводити до перегріву блоків керування, для запобігання цьому шафа повинна бути обладнана високопродуктивною системою вентиляції. Під першим блоком керування розміщено джерело випрямленого струму, з пасивним охолодженням, що додатково підвищує його нагрів.



а) б)

Рисунок 1.4 – Електрошафа блоків керування серводвигунами осі А:
а) загальний вигляд; б) компоновка



Рисунок 1.5 – Компонування шафи перетворювачів частоти шпинделів

Аналогічно шафі блоків керування серводвигунами шафа перетворювачів частоти шпинделів теж розміщується безпосередньо на верстаті (рис. 1.5). Розміщення ПЧ в окремій шафі та наближення їх до шпинделів має позитивний ефект. Так, значно скорочується довжина силових екранованих кабелів між ПЧ та шпинделями, у межах шафи ПЧ не впливають на роботу інших електронних блоків верстата, така шафа має низьку складність електромонтажу та її просто обслуговувати.

Шафа має обмежені розміри, тому для покращення теплового режиму ПЧ вона обладнана активною системою вентиляції, що містить два електровентилятора – приточний та витяжний. На вентиляторах встановлено решітки обладнані пилозахисними сітками, однак вони не захищають шафу від потрапляння в неї вологого повітря. З метою зниження вартості електроматеріалів та комплектуючих верстату до одного ПЧ підключається одночасно по два шпинделі. Таке рішення не дозволяє налаштувати струмовий захист ПЧ для конкретного шпинделя. Тому на кожний шпиндель встановлюється тепловий захист. Комутація шпинделів здійснюється за допомогою пакетних перемикачів. У шафі відсутні шини аналогового та цифрового заземлення, отже вона з високою ймовірністю буде джерелом викочастотних електромагнітних завад.

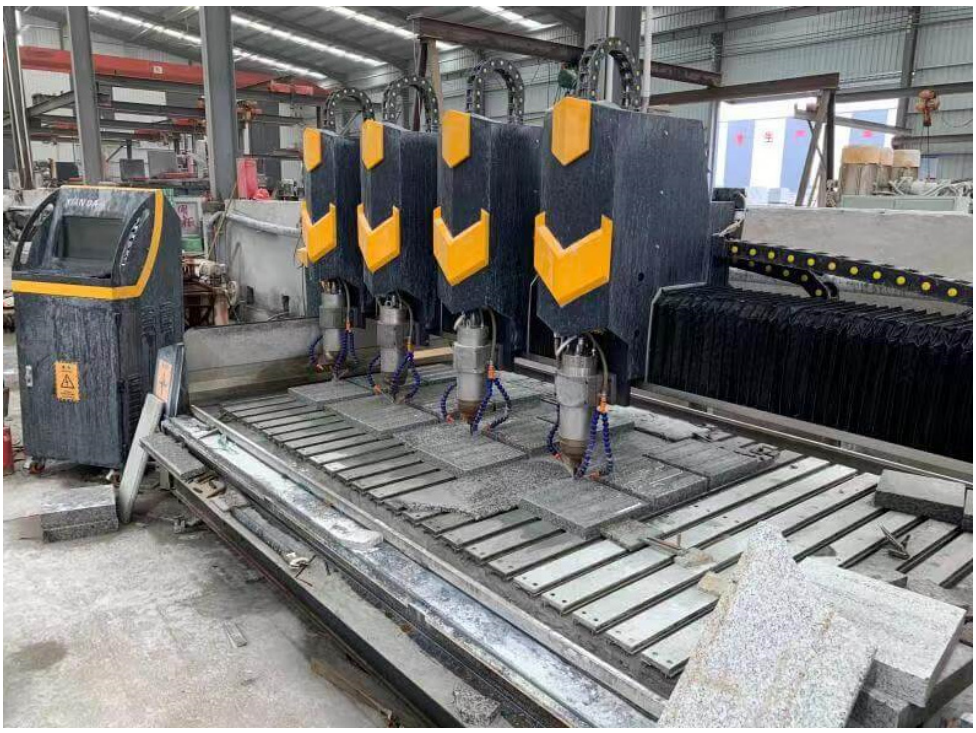


Рисунок 1.6 – Чотиришпиндельний фрезерний верстат у виробничому цеху [5]

У цілому, електрична частина багатошпиндельних фрезерних верстатів складається зі значної кількості силових та сигнальних ліній, які виконуються екранованим кабелем і містить від однієї до трьох електрошаф. У шафах встановлюється, крім електроапаратів захисту та керування, значна кількість блоків силової електроніки, які працюють на підвищених частотах, а отже є джерелом електромагнітних завад та підвищеного нагріву. Для зниження їх рівня встановлюються силові мережеві дроселі, які теж мають підвищений нагрів [6]. Переміщення супортів верстату потребує значних механічних зусиль, тому в якості виконавчих двигунів використовуються серводвигуни змінного струму з постійними магнітами, що отримують живлення від серводрайверів. Все електрообладнння верстату працює у сирих та запилених виробничих приміщеннях (рис. 1.6).

Отже, електрична частина багатошпиндельних фрезерних, що доступні на ринку має ряд недоліків та потребує удосконалення.

1.3 Загальне завдання дослідження та методика його виконання

Випускна кваліфікаційна робота спрямована на вирішення загального завдання досліджень, що заключається обґрунтуванні та розробці електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Для досягнення поставленого завдання досліджень потрібно вирішити такі часткові задачі:

1) сформулювати технічні вимоги до електричної частини верстату;

2) провести аналіз електричної частини найближчих аналогів багатошпиндельних фрезерних верстатів з точки зору підвищення їх експлуатаційної надійності та продуктивності;

3) проаналізувати кінематичну схему фрезерного верстату;

4) синтезувати принципову електричну схему фрезерного верстату;

5) обґрунтувати та провести вибір апаратів захисту та керування, обладнання електроприводу осей, струмопровідних пристроїв фрезерного верстату;

6) розробити компоновку електрошаф;

7) виконати аналіз небезпечні та шкідливі фактори у цеху каменеобробного виробництва, розробити організаційні і технічні заходи з техніки безпеки при експлуатації каменеобробних фрезерних верстатів;

8) провести економічну оцінку запропонованих технічних рішень.

Для ефективного розв’язання поставлених часткових задач загальне дослідження було розділено на 6-ть окремих етапів. Для кожного з них були використані свої методи досліджень. Дамо детальну характеристику кожного етапу розв’язання задачі розробки удосконаленої електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата.

Порядок вирішення часткових задач загального дослідження складає зміст його методики проведення досліджень, яка подана на рис. 1.7 у вигляді блок-схеми.

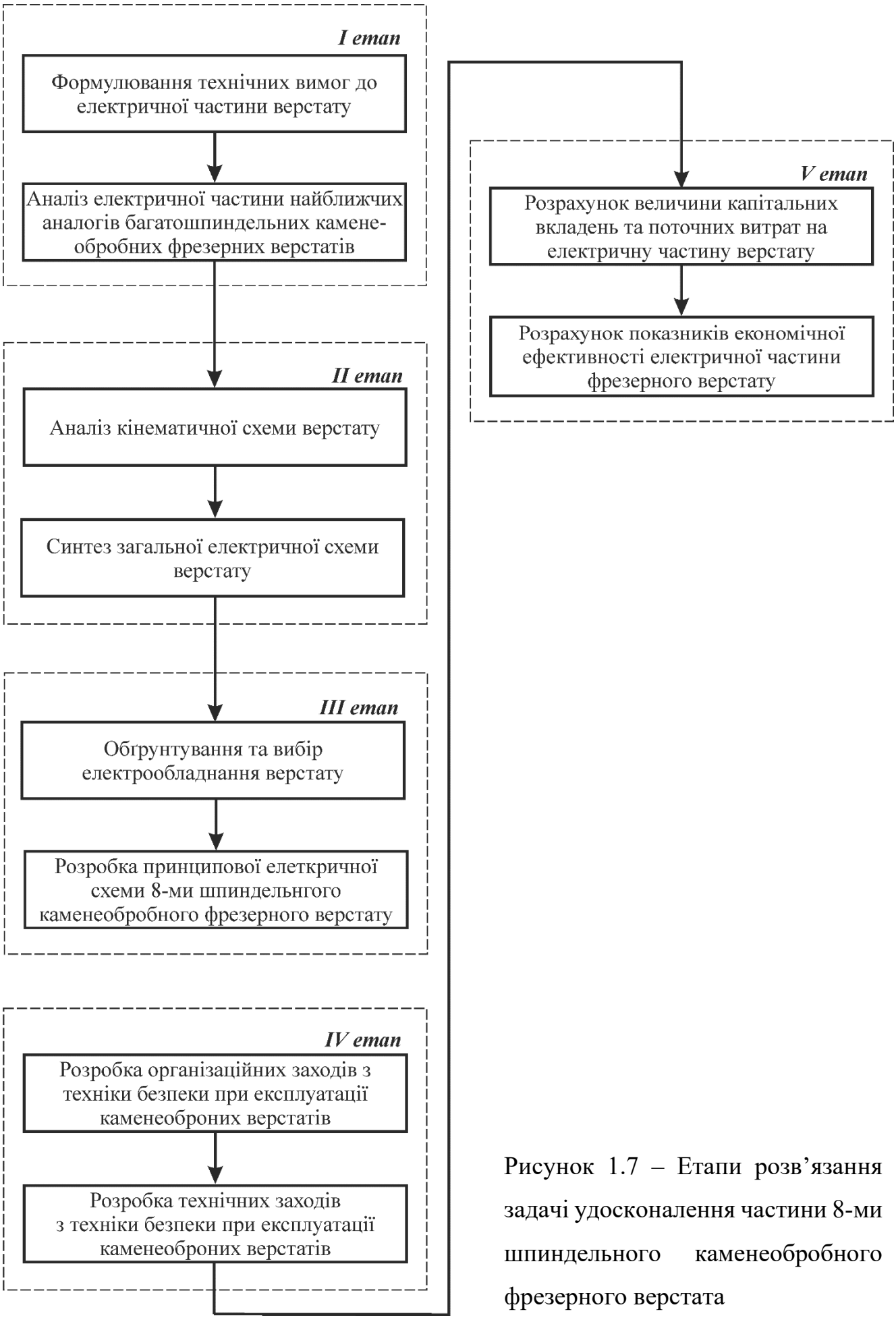


Рисунок 1.7 – Етапи розв’язання задачі удосконалення частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата

Відповідно до наведеної на рис. 1.7 структури загального дослідження, на І-му етапі проводиться формулювання технічних вимог до електричної частини верстату. На основі цих вимог проводиться підбір найближчих аналогів багатошпиндельних каменеобробних фрезерних верстатів і виконується аналіз їх електричної частини з точки зору рівня експлуатаційної надійності. На базі отриманих результатів, намічаються можливі шляхи підвищення експлуатаційної надійності їх електричної частини, зокрема електрообладнання встановленого в електрошафах. На цьому етапі будуть використані такі теоретичні методи наукових досліджень: систематизація та наукове узагальнення. Використання цих методів дозволить провести якісний аналіз електричної частини існуючих багатошпиндельних каменеобробних фрезерних верстатів і намітити шляхи її вдосконалення.

На ІІ-му етапі дослідження, відповідно до намічених шляхів підвищення експлуатаційної надійності електричної частини багатошпиндельних каменеобробних фрезерних верстатів проводиться розробка та аналіз кінематичної схеми, а також синтез загальної електричної схеми 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату згідно сформульованих вимог на І-му етапі досліджень. Для вирішення задач цього етапу використовуються методи теоретичних досліджень, зокрема, методи систематизації, аналізу та синтезу.

На ІІІ-му етапі проводиться обґрунтування та вибір обладнання електроприводу осей X, Y, Z електроприводу шпинделів, апаратів захисту та керування, системи керування верстатом, вибір провідників і завершується розробка електричної принципової схеми верстату. Вирішення задач даного етапу проводиться за допомогою методів аналізу та теорії електричних кіл.

На ІV-му етапі проводиться аналіз небезпечних та шкідливих факторів для обслуговуючого персоналу в цеху фрезерування каменю. Виконується розробка організаційних і технічних заходів з охорони праці та техніки безпеки під час

експлуатації каменеобробних фрезерних верстатів. Вирішення задач цього етапу проводиться на базі методів аналізу та теорії електричних кіл.

На V-му етапі проводиться визначення величини необхідних капітальних вкладень і поточних витрат, що необхідні на побудову та експлуатацію розробленої електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату, розрахунок ймовірного економічного ефекту після її побудови. Для вирішення поставлених завдань використовуються методи економічного аналізу.

1.4 Висновки до 1-ого розділу

1. Сформульовано технічні вимоги до електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату, що враховують особливості його експлуатації та дозволять обґрунтовано вибрати сервоприводи, перетворювачі частоти шпинделів і розбити компоновку електрошаф.

2. Встановлено, що до складу електричної частина багатошпиндельних фрезерних верстатів входять серводвигуни змінного струму з постійними магнітами, електроапарати захисту та керування, значна кількість блоків силової електроніки, мережевий дросель, тому електрошафи верстату є тепло-навантаженими і, при цьому, експлуатуються в сирих та запилених виробничих приміщеннях.

3. Намічено основні етапи виконання завдання розробки електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата з покращеними експлуатаційними характеристиками.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ВЕРСТАТА

Принципова електрична схема детально відображає всі електричні взаємозв’язки між елементами з урахуванням їх принципу дії. Перед її розробкою складається принципова кінематична схема верстата, що дозволяє визначити кількість і положення електроприводів, а також зв'язок між ними. На основі принципової кінематичної схеми верстата розробляється його структурна електрична схема, що дозволяє проаналізувати принцип роботи його електричної частини в загальному виді та встановити взаємозв’язки між окремими блоками. Ця схема є завершальним підготовчим етапом перед розробкою перед принципової електричної схеми.

2.1 Принципова кінематична схема верстата

З метою аналізу взаємодії всієї сукупності всіх механізмів, за допомогою яких здійснюється рух окремих елементів багатошпиндельного каменеобробного фрезерного, була розроблена його кінематична схема (рис. 2.1). Верстат має декілька кінематичних ланцюгів:

- електродвигун-шпиндель (ланцюг головного руху) – 8 шт.;
- електродвигун-супорт (ланцюг подач) – 3 шт.

Вони складаються з ряду кінематичних пар зубчастих коліс, рейкових і гвинтових передач [8, 9].

Головна ланка руху верстату – «електродвигун-шпиндель» зв’язує вал електродвигуна зі шпинделем, який обладнаний пристроєм для закріплення ріжучого інструменту – цанговим затискачем. У проектованому верстаті встановлено вісім шпинделів *1-8*, що приводяться в рух такою ж кількістю електродвигунів М1-М8). Шпиндель має «пряму» структуру, тобто зв’язаний з

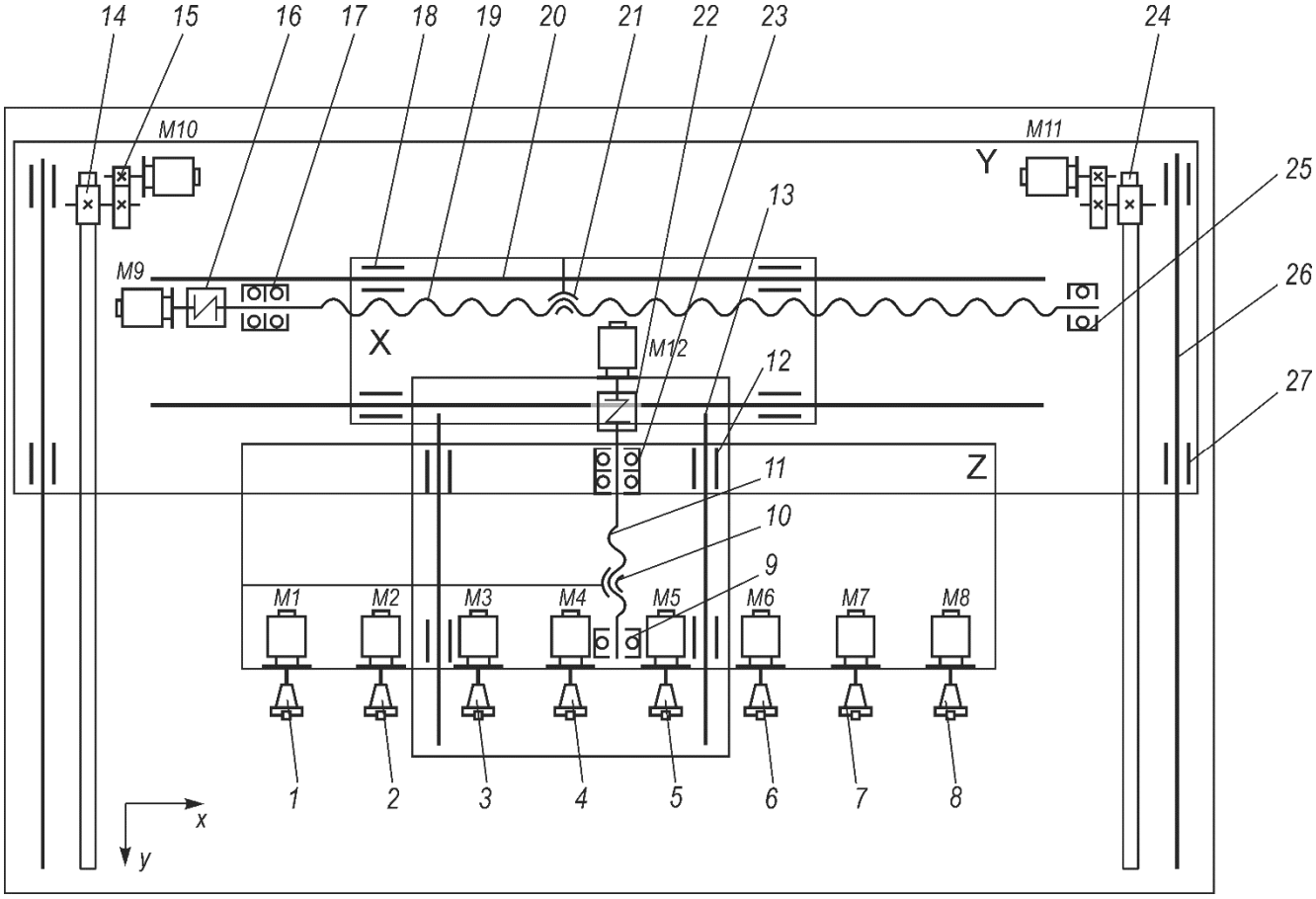


Рис. 2.1. Принципова кінематична схема верстату:

1-8 – шпиндель; 9, 25 – однорядний підшипник кочення; 10, 21 – нероз'ємна маточна гайка ковзання; 11, 19 – ходовий гвинт для передачі руху; 12, 18, 27 – каретка напрямної; 13, 20, 26 – лінійна напрямна; 14 – шестерня зубчастої рейкової передачі осі Y; 15 – редуктор; 16, 22 – сильфонна муфта; 17, 23 – дворядний підшипник кочення; 24 – зубчаста рейка зубчастої передачі осі Y

валом двигуна за допомогою муфти з пружним елементом, або є частиною валу електродвигуна. Всі шпинделі закріплюються на балці, що встановлена на супорті осі Z. Структурна формула кінематичного кола «електродвигун-шпиндель» має вигляд $n_{дв} = n_{ш}$, де $n_{дв}$ і $n_{ш}$ частота обертання, відповідно, ротора двигуна та шпинделя.

У портального фрезерного верста кінематичні ланцюги подач виконуються незалежними, для кожної з осей X, Y, Z. Рух порталу (вісь Y) та супортів (осі X, Z) здійснюється по лінійних напрямних 13, 20, 26 за допомогою кареток напрямних 12, 18, 27.

Портал приводиться в рух двома електродвигунами (М10, М11), що синхронізовані електричним шляхом, за допомогою серводрайверів. Обертальний момент кожного з двигунів передається через редуктори 15 на шестерні зубчастих рейкових передач 14. Шестерні обертаючись входять у зачеплення з зубчастими рейками зубчастої передачі 24 і тягнуть за собою портал, так як двигуни М10, М11 разом з редукторами жорстоко приєднані до нього.

Структурна формула кінематичного кола «електродвигун-зубчаста рейкова передача» має вигляд

$$n_{ш} = n_{дв} i_{р},$$

де $n_{ш}$, $n_{дв}$ – частота обертання, відповідно, шестерні зубчастої рейкової передачі та двигуна;

$i_{р}$ – передаточне число редуктора.

У кінематичне коло осі Х входять: електродвигун М9, сильфонна муфта 16, ходовий гвинт 19 та нероз'ємна маточна гайка ковзання 21. Крутний момент від двигуна М9 через сильфонну муфту 9 передається на ходовий гвинт 19, який вільно обертається у дворядному 17 та однорядному 25 підшипниках кочення. На ходовий гвинт 19 накручена нероз'ємна маточна гайка ковзання 21, що жорстко прикріплена до супорту осі Х. Тоді при обертанні ходового гвинта 19 супорт почне рухатися по лінійних напрямних 20 за допомогою встановлених на них каретках напрямних 18.

Структурна формула кінематичного кола «електродвигун-ходовий гвинт» має вигляд $n_{дв} = n_{гв}$, де $n_{дв}$ і $n_{гв}$ частота обертання, відповідно, ротора двигуна та ходового гвинта.

Кінематична коло супорту Z алогічне, коло осі Х. Крутний момент від двигуна М12 через сильфонну муфту 22 передається на ходовий гвинт для передачі руху 11, що обертається у дворядному 23 та однорядному 9 підшипниках кочення. На ходовий гвинт 11 накручена нероз'ємна маточна гайка ковзання 10, що жорстко прикріплена до супорту осі Х. При обертанні ходового гвинта 11 супорт лінійно

рухається по лінійних напрямних 13 за допомогою встановлених на них каретках напрямних 12. Структурна формула кінематичного кола осі Z має вигляд: $n_{дв} = n_{гв}$, де $n_{дв}$ і $n_{гв}$ частота обертання, відповідно, ротора двигуна та ходового гвинта.

Аналіз кінематичної схеми фрезерного верстата та її окремих кінематичних ланок показує, що вона має досить просту структуру та складається з трьох окремих кінематичних ланок осей X, Y, Z. Це досягається у першу чергу використанням шпинделів з «прямою структурою», частота обертання яких змінюється шляхом зміни частоти обертання приводних електродвигунів електричним способом. Спрощення механічної частини верстата дозволяє зменшити габаритні розміри його механічних передач, підвищити їх коефіцієнти корисної дії, також знизити шум і вібрацію верстата в цілому.

Проведений аналіз також дає змогу розробити структурну електричну схему верстата.

2.2. Структурна електрична схема верстата

Структурна електрична схема визначає функціональні частини електричної частини верстата, їх призначення та взаємозв’язки між ними. На ній всі функціональні частини зображуються у вигляді прямокутників і умовних графічних позначень у середині яких вписуються їх позначення та порядкові номери. Силові кола зображуються товстими лініями, а сигнальні – тонкими зі стрілками. Стрілки вказують на напрям керуючих сигналів.

Структурна електрична схема 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата приведена на рис. 2.2. Фрезерний верстат отримує живлення від 3-фазної мережі змінного струму напругою 380 В. Захист від внутрішніх коротких замикань всієї схеми та окремих її споживачів виконують захисні апарати, відповідно, ЗА-1 та ЗА-2…ЗА-13. Захисний апарат є однофазним, до нього підключаються блок живлення БЖ, який є джерелом оперативної напруги випрямленого струму для всієї схеми, рівень якої складає 24 В. Від нього отримують живлення контролер ЧПК і всі вимірювальні перетворювачі схеми такі як сенсори положення супортів осей, механічні кнопки керування і т.п.

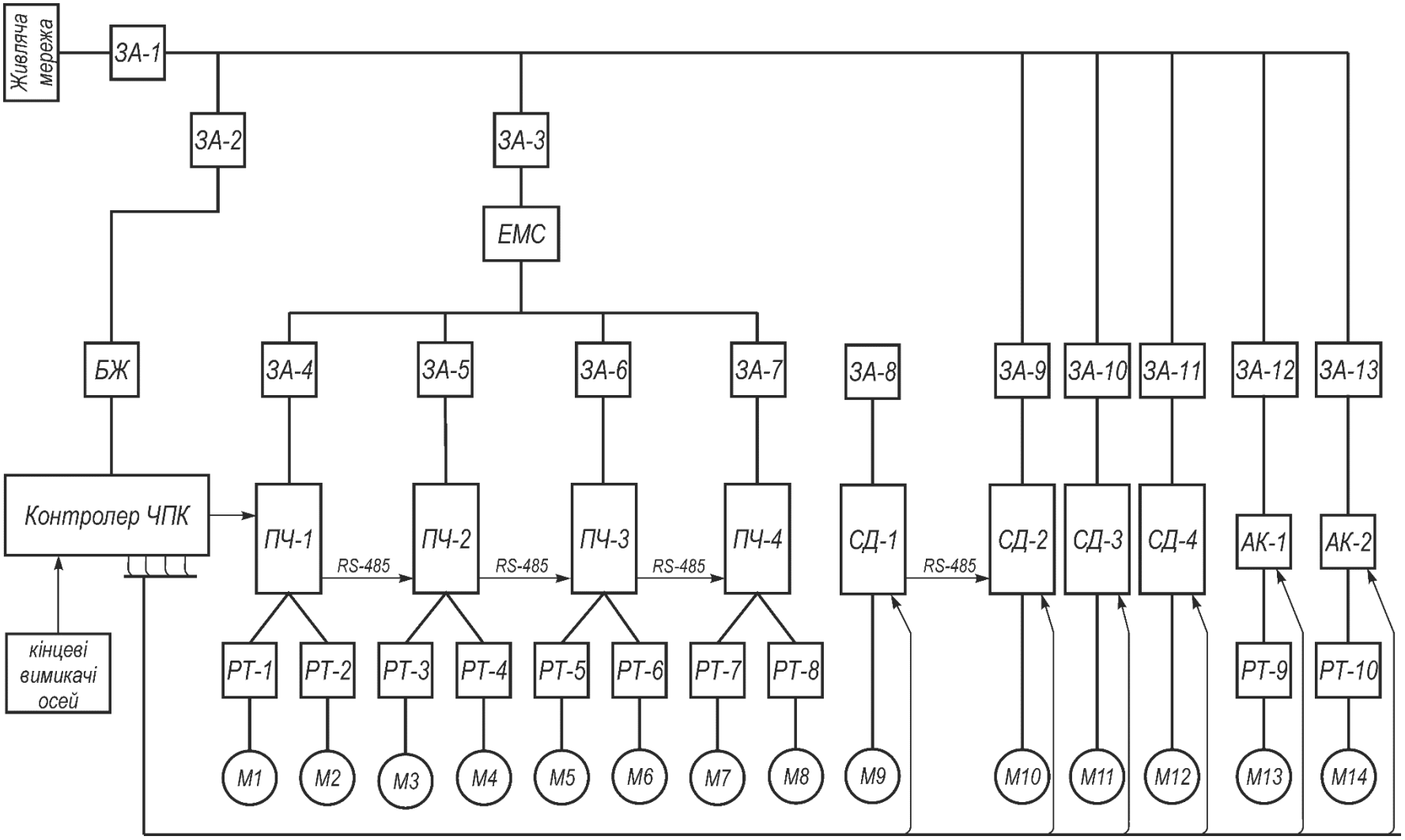


Рисунок 2.2 – Структурна електрична схема фрезерного верстата:

ЗА – захисний апарат; БЖ – блок живлення; ПЧ – перетворювач частоти; СД – серводрайвер; АК – апарат керування; РТ – реле теплове; ЕМС – мережевий фільтр електромагнітних завад; М – електродвигун;

Найбільшими споживачами електроенергії в схемі є перетворювачі частоти ПЧ-1 – ПЧ4. У зв'язку з тим, що ПЧ-1 – ПЧ-4 є джерелами вищих гармонічних складових напруги для мінімізації впливу на живлячу мережу вони підключаються до через ЕМС-фільтр. Який відповідає за виконання норм електромагнітної сумісності та захищає від струмів витікання. ЕМС-фільтр є пасивним і представляє собою мережевий дросель. ПЧ-1 – ПЧ-4 та дросель розміщуються в окремій електрошафі. Для захисту від внутрішніх КЗ та перевантаження ліній, що живлять ЕМС-фільтр і перетворювачі частоти на кожну з них встановлюються апарати захисту, відповідно, ЗА-3, ЗА-4 – ЗА-7. З метою зменшення кількості ПЧ, а отже і сумарних капіталовкладень у них до одного ПЧ підключається два мотор-шпинделі. Тому кожен перетворювач частоти повинен вибиратися з номінальною потужністю більшою ніж номінальна потужність мотор-шпинделя з урахування можливих перевантажень. Від перевантажень кожен мотор-шпиндель М1-М8 захищається тепловим реле, відповідно, РТ-1 – РТ-8, які при спрацюванні подають сигнал на відключення верстата. Перетворювачі між собою об'єднанні в локальну мережу за базі інтерфейсу RS-485. У якості фзичного каналу зв'язку використовується мідний екранований кабель – «вита пара». Перший перетворювач (ПЧ-1) підключається безпосередньо контролера ЧПК.

Серводрайвери СД-1 – СД4 розраховані на напругу живлячої мережі і підключаються до неї через захисні апарати ЗА-8 – ЗА-11. Серводрайвери СД-1 і СД-2 працюють у синхронному режимі. Для його реалізації між ними встановлюється лінія зв'язку на основі інтерфейсу RS-485. Кожен севодрайвер підключається до контролера ЧПК окремою лінією зв'язку. Обмін даними здійснюється за протоколом STEP/DIR або пропрієтарним його аналогом.

Мотор М13 насоса системи охолодження мотор-шпинделів отримує живлення від захисного апарата ЗА-12. Керування двигуном М13 здійснюється комутаційним апаратом КА-1, який отримує сигнал на вмикання (вимикання) від контролера ЧПК. Захист М13 від перевантаження реалізовано на основі теплового реле РТ-9.

Мотор М14 насоса, що призначений для подачі мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) у зону роботи алмазних фрез отримує живлення від захисного апарата ЗА-13. Керування двигуном М13 здійснюється комутаційним апаратом КА-2, який отримує сигнал на вмикання (вимикання) від контролера ЧПК. Захист М4 від перевантаження реалізовано на основі теплового реле РТ-10.

Двигуни М13 і М14 можуть бути як однофазними так і трифазними.

Структурна електрична схема фрезерного верстата працює наступним чином. Після вмикання ввідний захисний апарат ЗА-1 подає живлення на всі захисні апарати другого рівня схеми: ЗА-2 – ЗА-13. Оскільки, вони були увімкненими, то відповідно отримують живлення БЖ, ПЧ-1 – ПЧ-4, СД-1 – СД-4 та АК-1, АК-2. Блок живлення БЖ подає випрямлену напругу 24 В на контролер ЧПК внаслідок чого відбувається завантаження його вбудованої операційної системи, а отже запуск. Після запуску контролер перевіряє стан сенсорів положення осей X, Y, Z і відсутність сигналу «Аварія» кола, що формують нормально замкнені контакти всіх вимірювальних перетворювачів. Одночасно з цим відбувається ініціалізація всіх ПЧ і СД. Далі оператор вводить керуючу програму обробки заготовки та запускає її виконання. Контролер ЧПК подає сигнал на вмикання ПЧ-1, який передає його іншим ПЧ по інтерфейсу зв’язку RS-485. Відбувається запуск мотор-шпинделів М1 – М8. Перетворювач частоти ПЧ-4 після запуску подає керуючі сигнали на АК-1, АК-2 на вмикання електродвигунів насосів М13 і М14.

Згідно завантаженої керуючої програми контролер ЧПК за протоколом STEP/DIR подає керуючі сигнали на СД-1 – СД4, які дають команди переміщення робочих органів (фрез) за траєкторією відповідно до заданих координат. Якщо в процесі робочого циклу спрацює будь-яке з теплове реле, кінцевий вимикач або сигнал «Аварійна зупинка» надійде з будь-якого серводрайвера чи перетворювача частоти –контролер ЧПК відпрацює сигнал «АВАРІЯ» та зупинить верстат. Після усунення оператором причини аварії, верстат відновлює роботу з точки зупинки.

Після закінчення керуючої програми контролер ЧПК зупиняє верстат: відводить робочий інструмент у точку з координатами $x = 0$, $y = 0$ $z = 0$ (точка «Home»), вимикає електродвигун М13 насосу подачі СОР, а після досягнення шпинделями певного рівня температури і електродвигун М14 насосу охолодження мотор-шпинделів.

Отже, розроблена структурна схема електричної частини фрезерного верстату дозволила проаналізувати його принцип роботи у загальному виді.

2.3 Принципова електрична схема верстата

На принциповій електричній схемі кожен елемент відображається умовно-графічним позначенням (УГП). Вона представляє собою сукупність окремих, елементарних електричних ланок і типових функціональних вузлів, що в певній послідовності виконують ряд стандартних операцій.Принципова електрична схема дозволяє зрозуміти, як її конкретні елементи з'єднані один з одним, як працює електрична частина фрезерного верстата. Схема виконується для знеструмленого стану її елементів. Для більшого розуміння принципова електрична схема умовно ділиться на дві частини: силову і керування. Тому такі електроапарати як контактори, теплові реле зображуються рознесеним способом [10]. При оформленні схеми з метою підвищення її наочності використовується, так званий, рядковий спосіб їх зображення. За такого способу УГП елементів або їх складових частин, що входять до одного ланцюгу зображуються послідовно один за одним по горизонтальних і вертикальних прямих, а окремі ланки – поряд, формуючи таким чином паралельні рядки.

Принципова електрична схема 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату повинна задовольняти наступним вимогам:

– надійності;

– простоті та економічності;

– коректності спрацювання в аварійних режимах;

– зручності при експлуатації;

– правильності оформлення.

Надійність принципової електричної схеми – це її здатність безвідмовно виконувати задані функції в встановлених межах впродовж всього строку експлуатації в заданих режимах роботи та умовах застосування [11, 12]. Для виконання цієї вимоги проводиться ряд технічних заходів, у першу чергу, застосування надійних пристроїв та електроапаратів, експлуатація їх у номінальних режимах роботи, автоматичний контроль за несправністю схеми та виключення можливості аварійних режимів внаслідок помилок оператора верстата та обслуговуючого персоналу. Надійність – це головною вимога, що висувається до принципової електричної схеми, якщо вона не буде забезпечена на необхідному рівні, всі інші переваги, цієї схеми не будуть мати сенсу.

Простота та економічність принципової електричної схеми забезпечується шляхом використання надійних, широко розповсюджених комплектуючих, максимально можливим скороченням їх кількості в схемі. Перетворювачі частоти електроприводу шпинделів і серводрайвери приводу осей повинні мати високий коефіцієнт корисної дії. З метою захисту електросхеми верстату від електромагнітних завад всі її блоки з’єднуються за допомогою екранованих кабелів, що істотно підвищують її остаточну вартість. З метою зменшення капіталовкладень електричну частину фрезерного верстату обов’язковим є аналіз вимог, що висуваються до неї. Якщо виявиться, що та чи інша вимога значно здорожують електричну частину верстату то проводиться повторний їх ретельний аналіз. Після розробки електричної частини верстату обов’язково проводиться оцінка її економічної ефективності.

Принципова електрична схема верстату має бути побудована таким чином, щоб при розвитку аварійних режимів, що виникли внаслідок несправності її силових ланцюгів і ланцюгів керування, провалів напруги, зникнення з подальшим відновленням напруги живлячої мережі забезпечувалася неможливість подальшого розвитку аварії, коректна зупинка верстата та найголовніше – безпека обслуговуючого персоналу. Для цього при розробці принципової електричної схеми необхідно аналізувати поведінку схеми при відключенні або виході з ладу

частини захисних апаратів і апаратів керування, появи короткого замикання в різних її частинах. Зазвичай аналіз проводиться для почергово для кожного окремого аварійного режиму, оскільки ймовірність виникнення каскадної аварії досить низька.

Принципова електрична схема верстата повинна бути спроектована таким чином, щоб її експлуатація була максимально простою, вимагала мінімуму витрат часу експлуатаційного персоналу, була безпечною при проведенні налагоджувальних робіт електротехнічним персоналом. Ці вимоги досягаються шляхом зменшення кількості органів керування верстатом і світлосигнальних індикаторів, наявністю відповідних позначень органів керування, інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом контролера ЧПК і всієї панелі керування верстатом.

Графічне зображення принципової електричної схеми повинно бути виконане згідно чинних державних стандартів, елементи на ній можуть бути згруповані у функціональні блоки, всі ліні повинні перетинатися під прямими кутом. У цілому схема має бути компактною та сприяти найкращому сприйняттю її змісту.

Принципова електрична схема 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату в трифазному виконанні представлена на рис. 2.3 та рис. 2.4.

Верстат може працювати в трьох режимах: очікування, фрезерування, зупинка, аварія. Розглянемо ці режими роботи схеми.

Живлення на верстат подається ввідним трифазним автоматичним вимикачем QF1. Після його вмикання загорається сигнальна лампа напруги мережі HL1. Після вводу в експлуатацію фрезерного верстата автоматичні вимикачі QF2-QF12 та SF1 постійно знаходяться у ввімкненому стані. Через автоматичний вимикач SF-1 підключаються до мережі 220 В блоки живлення G1 та G2. Від G1 отримує живлення контролер ЧПК, а від G2 – оперативні кола верстату. Після завантаження власних операційних систем у контролері ЧПК, сервопідсилювачах A1-A4 і перетворювачах частоти FC1-FC4 верстат переходить у режим «Очікування».

Для запуску верстату повинна бути зібрана наступна ланка: кнопка аварійної зупинки SB1, теплові реле K1.1-K10.1, KL1.1-KL4.1, блок-контакти автоматичних вимикачів QF2.1-QF12.1, блок-контакти контакторів KM1.4-KM1.5 у колі –COM-IN18 контролера ЧПК.

Запуск верстату починається із вмикання з клавіатури контролера насосів ОР та МОР. Для цього через проміжні реле KL5, KL6 подається живлення на котушки контакторів КМ1 і КМ2, які спрацьовують і подають живлення на електродвигуни М13, М14 і замикають свої блок-контакти, відповідно, КМ1.4 і КМ1.5 у колі контролера –COM-IN18. З панелі контролера ЧПК запускається керуюча програма, згідно команд якої запускаються електродвигуни М1-М8 шпинделів. Потім серводраверам А1-А4 подаються команди на переміщення супортів відповідних осей, а отже і робочих інструментів – фрез. Режим роботи може бути завершеним керуючою програмою, вручну – оператором, або внаслідок спрацювання одного із захистів – аварійно. Для екстреної зупинки верстату також передбачено кнопка з фіксацією SB1 типу «грибок».

Для обмеження руху супортів верстату встановлені лімітні кінцеві вимикачі QS1-SQ6 по два на кожну вісь, при натисканні на які контролер ЧПК відпрацює сигнал «Вихід за межі робочої зони» та зупинить верстат.

У разі виникнення коду помилки в серводрайверах А1-А4 спрацює одне із проміжних реле KL1-KL4 та розімкне свій нормально замкнений контакт у колі –COM-IN18 контролера ЧПК, який зупинить верстат та згенерую сигнал «Аварія». Контролер ЧПК аналогічним чином працює в результаті вимикання автоматичних вимикачів QF2-QF12, теплових реле КК1-КК10 та перетворювчів частоти FC1-FC4.

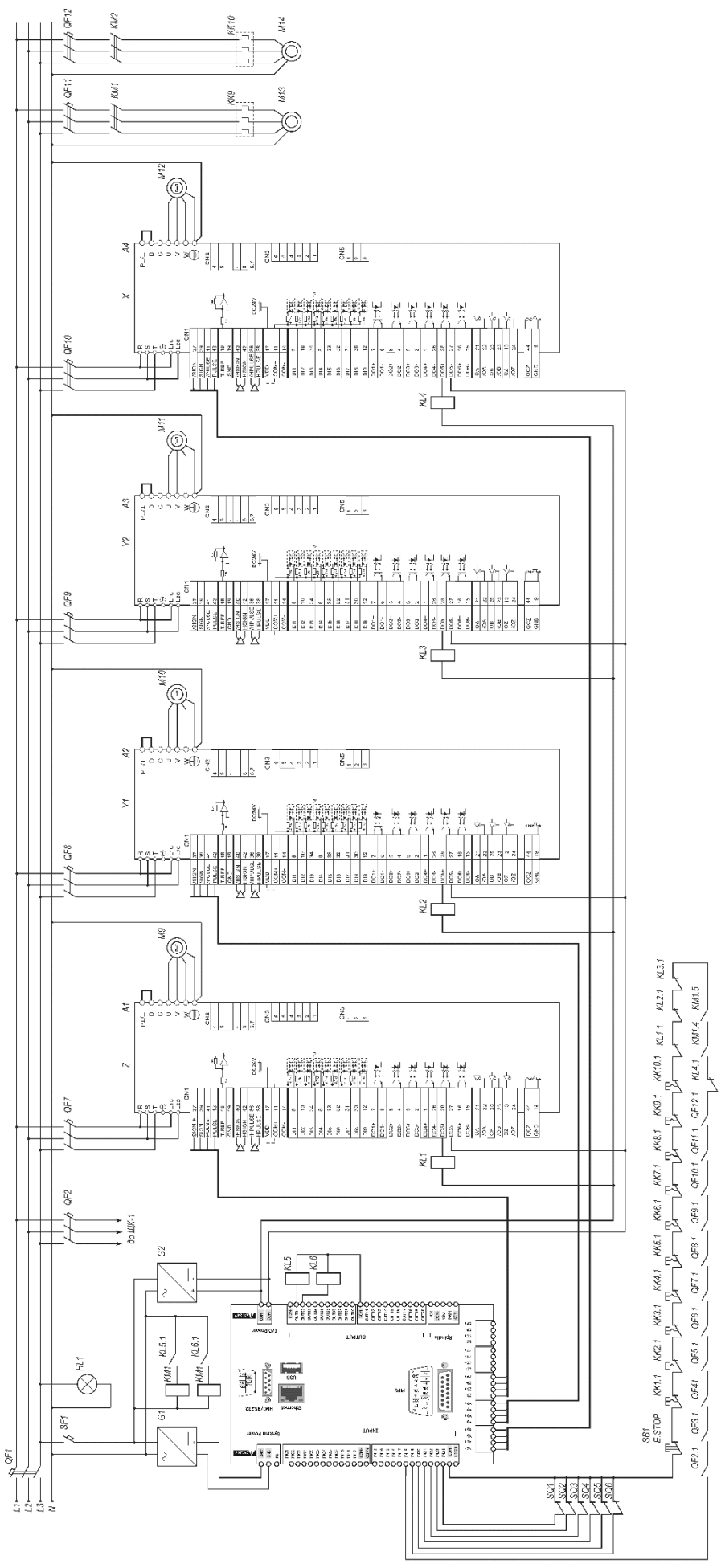


Рисунок 2.3 – Електрична принципова схема фрезерного верстата (щит керування ЩК-1)

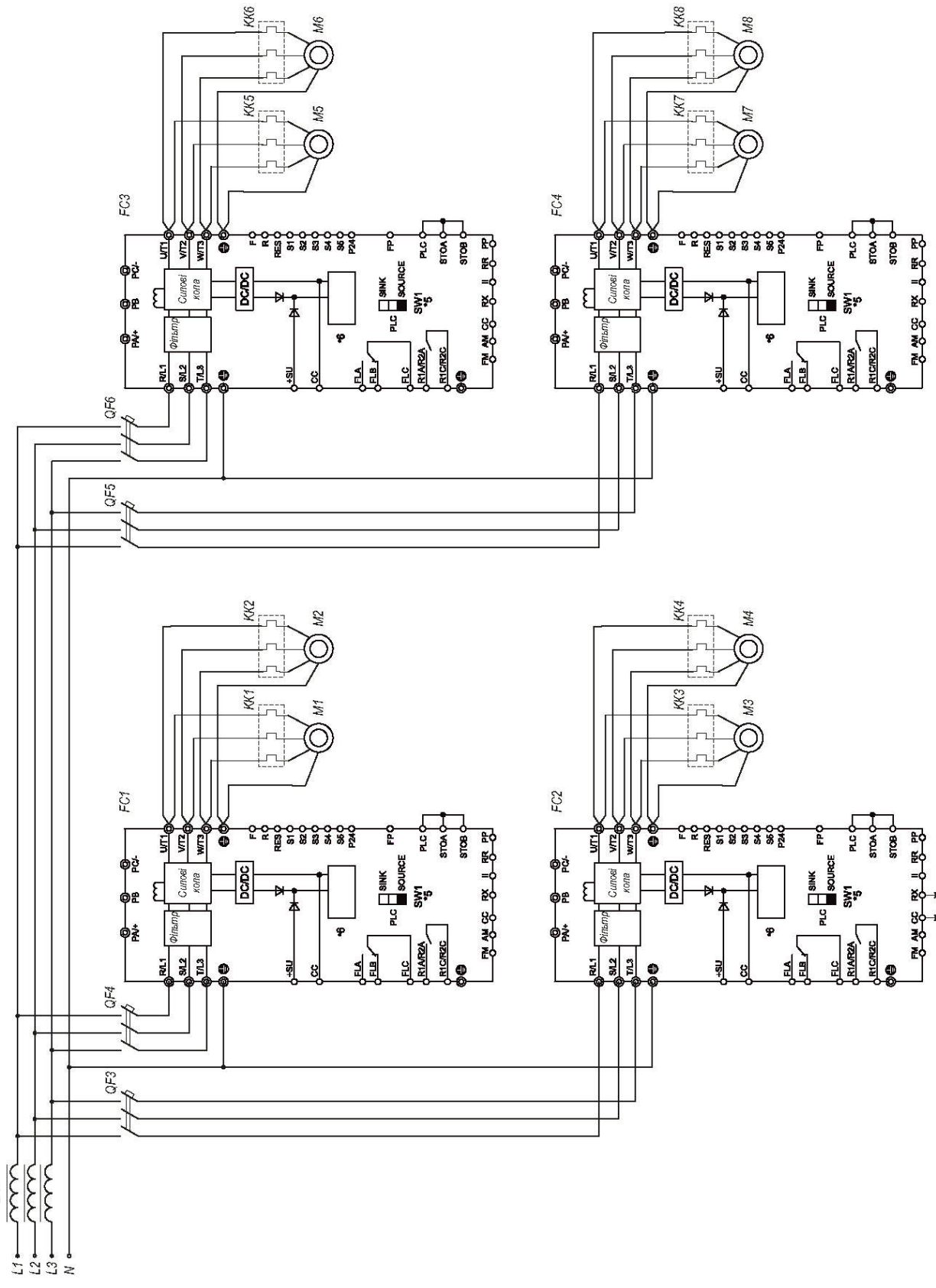


Рисунок 2.4 – Електрична принципова схема фрезерного верстата (щит керування ЩК-2)

2.4 Висновки до 2-ого розділу

1. Встановлено, що розроблена кінематична схема має просту структуру та складається з трьох окремих кінематичних ланок осей X, Y, Z, що досягається використанням мотор-шпинделів з «прямою структурою». Побудова верстата зі спрощеною механічною частиною дозволить зменшити його габаритні, підвищити коефіцієнт корисної дії, а також знизити шум і вібрацію в цілому.

2. Розроблена структурна схема електричної частини фрезерного верстату дозволила проаналізувати його принцип роботи у загальному виді, та встановити взаємозв’язки між його окремими елементами.

3. Розроблено принципову електричну схему верстата з урахуванням вимог, що висуються до схем багатошпиндельних каменеобробних фрезерних верстатів. Надійність схеми забезпечується дворівневою структурою розподілу електроенергії.

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ВЕРСТАТА

Електрообладнання є дуже важливим елементом фрезерного верстату. Адже від роботи електроприводів залежить точність позиціонування робочого інструменту, продуктивність і надійність верстату в цілому, а від системи ЧПК – функціональні можливості. Тому вибір обладнання електричної верстату необхідно проводити обґрунтовано та ретельно, враховувати всі фактори. У першу чергу, це стосується електроприводу супортів осей X, Y, Z. Оскільки, завищення їх потужності призведе до перевитрати капіталовкладень, а заниження – зменшення продуктивності верстату. Це ж стосується і електроприводу шпинделів, та джерел їх живлення – перетворювачів частоти. В цілому все електрообладнання повинно бути із одного цінового сегменту, що б мати приблизно однакову надійність.

3.1 Вибір систем електроприводу осей X, Y, Z

На сьогодні на ринку України представлена значна кількість сервоприводів провідних світових виробників таких як Delta Electronics, Omron, Mitsubishi, Yaskawa та ін. Їх продукція розділена між ціновими сегментами, всередині кожного з них севоприводи мають близькі технічні характеристики, ідентичний функціонал і експлуатаційну надійність. Тому при виборі виробника обладнання також важливу роль відграватиме гарантійне /після гарантійне сервісне обслуговування, наявність технічної документації українською мовою, служби технічної підтримки, досвід експлуатації встановлених систем та їх ремонтопридатність. З огляду на вказані чинники та співвідношення ціна / якість до подальшого розгляду приймаємо продукцію транснаціональна корпорація Delta Electronics (Тайвань), що є визнаним лідером і експертом у галузі силової промислової електроніки.

Вибір електродвигунів приводу супортів осей X, Y, Z здійснимо на базі методик і результатів досліджень [8, 9, 13, 14], за такими умовами достатності:

1) моменту двигуна

$$M_{\text{дв.ном}} \geq M_{\text{о.роз}}; \tag{3.1}$$

2) частоти обертання ротора двигуна в режимі переміщення

$$n_{\text{дв.ном}} \geq n_{\text{дв.рор.п}}; \tag{3.2}$$

3) частоти обертання ротора двигуна в режимі фрезерування

$$n_{\text{дв.ном}} \geq n_{\text{дв.рор.ф}}; \tag{3.3}$$

4) потужності двигуна

$$P_{\text{дв.ном}} \geq P_{\text{дв.роз}}. \tag{3.4}$$

Визначимо необхідний крутний момент електродвигуна механізму рейкової передачі (рис. 3.1) на основі повної кінетичної енергії системи «двигун-рейка»:

$$E = \frac{1}{2}\left[j_{\text{дв}} \cdot \omega^2 + j_{\text{зп}} \cdot \omega^2 + m v_{\text{п}}^2 \right] = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \omega^2, \tag{3.5}$$

де $j_{\text{дв}}$ – момент інерції приводного двигуна;

ω – кутова швидкість;

$v_{\text{п}}$ – лінійна швидкість переміщення рейки;

$m_{\text{пр}}$ – приведена маса системи

$$m_{\text{пр}} = m_{\text{суп}} + \frac{j_{\text{дв}} + j_{\text{зп}}}{r_{\text{ш}}^2}, \tag{3.6}$$

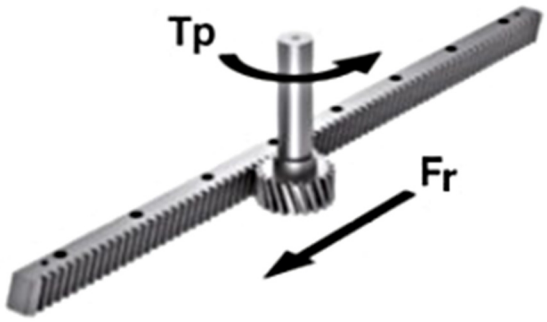


Рисунок 3.1 – Рейкова передача

$m_{\text{суп}}$ – маса супорту, згідно вихідних даних, кг;

$j_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна;

$r_{\text{ш}}$ – радіус шестерні рейкової передачі, згідно вихідних даних, $r_{\text{ш}} = 26{,}37$ мм;

j – момент інерції.

Похідна від кінетичної енергії системи за часом

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \omega^2 = m_{\text{пр}} \cdot v_{\text{п}} \cdot a\,. \tag{3.7}$$

Сумарна потужність всіх сил системи передачі

$$\sum P_i = \sum \left(F_{\text{п}} - F_{\text{т}} \right) = \left(\frac{M}{r_{\text{ш}}} - \mu \cdot m \cdot g \right) v_{\text{п}}\,, \tag{3.8}$$

де $F_{\text{п}}$ – сила подачі;

$F_{\text{т}}$ – сила тертя системи;

μ – коефіцієнт тертя між шестернею та зубчастою рейкою, приймаємо 0,1.

Похідна від кінетичної енергії за часом, також визначається потужностями зовнішніх сил:

$$\frac{dE}{dt} = \sum P_i\,, \tag{3.9}$$

або

$$m_{\text{пр}} \cdot v_{\text{п}} \cdot a = \left(\frac{M}{r_{\text{ш}}} - \mu \cdot m \cdot g \right) v_{\text{п}}, \tag{3.10}$$

де g – гравітаційна постійна, м/с^2;

Крутний момент, що необхідно прикласти до шестерні рейкової передачі:

$$M = r_{\text{ш}} \left(a \cdot m_{\text{пр}} + \mu \cdot m \cdot g \right), \tag{3.11}$$

a – максимальне прискорення, що зазнає система, м/с^2.

Момент приведений до валу електродвигуна (з урахуванням їх кількості):

$$M_{\text{дв}} = \frac{r_{\text{ш}}}{i \cdot n} \left(a \cdot m_{\text{пр}} + \mu \cdot m \cdot g \right), \tag{3.12}$$

де i – передаточне число планетарного редуктора, приймаємо $i = 8$ [ ];

n – кількість електродвигунів, у приводі супорту осі Y.

Необхідні частоти обертання ротора двигуна

- у режимі переміщення, м/с

$$n_{\text{дв.пер}} = \frac{60 i \cdot v_{\text{пер}}}{\pi \cdot d_{\text{зк}}}, \tag{3.13}$$

де $v_{\text{пер}}$ – швидкість переміщення зубчатої рейки, м/с;

$d_{\text{зк}}$ – ділильний діаметр зубчастого колеса зубчастої рейкової передачі, м

$$d_{\text{зк}} = z \cdot k, \tag{3.14}$$

z – кількість зубів шестерні зубчастої рейкової передачі, приймаємо $z = 20$ шт.;

k – модуль зубчастої рейкової передачі, приймаємо $k = 2{,}5$ шт.

- у режимі фрезерування, м/с

$$n_{\text{дв.фр}} = \frac{60i \cdot v_{\text{фр}}}{\pi \cdot d_{\text{зк}}}. \tag{3.15}$$

Необхідна потужність двигуна:

- у режимі переміщення:

$$P_{\text{дв.пер}} = \frac{M \cdot \omega_{\text{пер}}}{n \cdot \eta_{\text{зрп}} \cdot \eta_{\text{дв}}}, \tag{3.16}$$

де $\eta_{\text{зрп}}$ – ККД зубчастої рейкової передачі, приймаємо 0,96;

$\eta_{\text{дв}}$ – ККД електродвигуна, приймаємо 0,93;

$\omega_{\text{пер}}$ – кутова швидкість зубчастої рейки в режимі переміщення

$$\omega_{\text{пер}} = \frac{2v_{\text{пер}}}{d_{\text{зк}}}; \tag{3.17}$$

підставивши вираз (3.17) у (3.16) отримаємо

$$P_{\text{дв.пер}} = \frac{2M \cdot v_{\text{пер}}}{n \cdot \eta_{\text{зрп}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot d_{\text{зк}}}, \tag{3.18}$$

- аналогічно (3.17), у режимі фрезерування

$$P_{\text{дв.фр}} = \frac{2M \cdot v_{\text{фр}}}{n \cdot \eta_{\text{зрп}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot d_{\text{зк}}}. \tag{3.19}$$

$v_{\text{фр}}$ – швидкість зубчастої рейки в режимі фрезерування.

Вихідні дані до вибору електродвигунів осі Y заносимо в табл. 3.1, а результати розрахунку – у табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до вибору електродвигунів порталу

Параметр						
i	m, кг	$j_{дв}$, кг·м^2	$v_{пер}$, м/с	$v_{фр}$, м/с	a, м/с^2	$d_{зк}$, м
8	1500	$11{,}2\cdot10^{-4}$	0,5	0,25	3,0	$50\cdot10^{-3}$

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку параметрів вибору електродвигунів порталу

Параметр					
$m_{пр}$, кг	$M_{дв}$, Н·м	$n_{дв.фр}$, об/хв	$n_{дв.пер}$, об/хв	$P_{дв.пер}$, Вт	$P_{дв.фр}$, Вт
1510	2×9,2	1528,7	3057	1306	653,1

На основі проведених розрахунків проводимо вибір севодвигунів серії ECMA і серводрайверів серії ASD-A2 [15].

Для переміщення супорту осі Y попередньо вибираємо серводвигуни з номінальною напругою 400 В типу ECMA-J11020RS, що комплектується сервопідсилювачем ASD-B2-2023-B.

Проводимо перевірку вибраних двигунів за умовами (3.1-3.4) на основі каталожних даних:

$$M_{дв.ном} = 2\times9{,}55\ \text{Н} \quad \geq \quad M_{дв.фр} = 18{,}42\ \text{Н};$$

$$n_{дв.ном} = 2000\ \text{об/хв} \quad \geq \quad n_{дв.пер} = 1528{,}7\ \text{об/хв};$$

$$n_{дв.max} = 3000\ \text{об/хв} \quad \approx \quad n_{дв.пер} = 3057\ \text{об/хв}.$$

$$P_{дв.ном} = 2000\ \text{Вт} \quad \geq \quad P_{дв.пер} = 1306\ \text{Вт};$$

$$P_{дв.ном} = 2000\ \text{Вт} \quad \geq \quad P_{дв.фр} = 653{,}1\ \text{Вт}.$$

Отже, всі умови виконуються, тому приймаємо два серводвигуни ECMA-E21310RS до установки.

Згідно закону збереження енергії механічна робота, яку повинен виконати електродвигун для приведення в рух супорта осі складе, Дж:

$$A_{\text{дв}} = \frac{\left| A_{\text{фр}} - A_{\text{тяж}} \right| + A_{\text{роз.порт}} + A_{\text{роз.кгп}}}{\eta_{\text{мех}}} + A_{\text{роз.дв}}, \quad (3.20)$$

де $A_{\text{фр}}$ – зусилля, що створюється фрезою, Дж:

$$A_{\text{фр}} = k \cdot g \cdot F_{\text{фр}} \cdot P_{\text{гв.кгп}}, \quad (3.21)$$

k – кількість одночасно працюючих фрез, шт.;

$F_{\text{фр}}$ – зусилля, яке повинен розвивати верстат на фрезі, кг·с. Аналіз літературних джерел [13, 14] показав, що $F_{\text{фр}}$ залежить від ряду чинників таких як вид натурального каменю, швидкість подачі та діаметру фрези та ін. і знаходиться в межах від 10-60 Н. Отже, у розрахунку приймаємо для кінцевої фрези $F_{\text{фр}} = 45$ кг·с;

$P_{\text{гв.кгп}}$ – крок КГП передачі осі. З урахуванням того, що максимальна частотах обертання двигунів типових сервоприводів складає 3000 об/хв, крок гвинта для заданої швидкості переміщення супорту осі, м:

$$P_{\text{гв.кгп}} = \frac{v_{\text{с}}}{n_{\text{д.ном}}} = \frac{v_{\text{с}}}{3000}, \quad (3.22)$$

$v_{\text{с}}$ – швидкість переміщення супорту осі верстату, мм;

$A_{\text{роз.порт}}$ – робота, що витрачається на розгін супорту, Дж:

$$A_{\text{роз.порт}} = \alpha \cdot m_{\text{с}} \cdot P_{\text{гв.кгп}}, \quad (3.23)$$

α – прискорення супорту для всіх режимів 2,5 м/с^2;

$m_{\text{с}}$ – маса супорту осі, кг;

$A_{\text{роз.кгп}}$ – робота, що витрачається на розгін КГП, Дж:

$$A_{\text{роз.кгп}} = \frac{\pi^2 \cdot m_{\text{гв.кгп}} \cdot d_{\text{гв.кгп}}^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{P_{\text{гв.кгп}}}, \tag{3.24}$$

$d_{\text{гв.кгп}}$ – діаметр гвинта КГП, м;

$m_{\text{гв.кгп}}$ – маса порталу, кг;

$A_{\text{роз.дв}}$ – робота, що витрачається на розгін двигуна, Дж:

$$A_{\text{роз.дв}} = J_{\text{дв}} \frac{\pi^2 \cdot \alpha}{P_{\text{гв.кгп}}}, \tag{3.25}$$

$J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна, кг·м^2;

$A_{\text{тяж}}$ – робота, що витрачається на подолання сили тяжіння, Дж:

$$A_{\text{тяж}} = g \cdot m_{\text{с}} \cdot P_{\text{гв.кгп}} \cos\left(\alpha_g\right), \tag{3.26}$$

α_g – кут між вектором руху супорту осі і вектором сили тяжіння, рад;

$\eta_{\text{мех}}$ – коефіцієнт корисної дії механічної частини приводу осі Y, що враховує втрати енергії на тертя в опорних підшипниках і в гайці КГП.

Необхідний момент приводного двигуна для здійснення роботи, Н·м

- у режимі фрезерування:

$$M_{\text{дв.пер}} = \frac{A_{\text{дв}}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{\left|-A_{\text{тяж}}\right| + A_{\text{роз.порт}} + A_{\text{роз.кгп}}}{\eta_{\text{мех}}} + A_{\text{роз.дв}}\right]. \tag{3.27}$$

- у режимі переміщення

$$M_{\text{дв.фр}} = \frac{A_{\text{дв}}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{\left|A_{\text{фр}} - A_{\text{тяж}}\right| + A_{\text{роз.порт}} + A_{\text{роз.кгп}}}{\eta_{\text{мех}}} + A_{\text{роз.дв}}\right]; \tag{3.28}$$

Необхідна частота обертання двигуна:

- у режимі переміщення, об/хв

$$n_{\text{дв.п}} = \frac{v_{\text{п}} \cdot i}{P_{\text{гв.кгп}}}, \tag{3.29}$$

де i – передаточне число редуктора;

$v_{\text{п}}$ – швидкість переміщення осей верстату, м/хв;

- у режимі фрезерування, об/хв

$$n_{\text{д.фр}} = \frac{v_{\text{фр}} \cdot i}{P_{\text{гв.кгп}}}. \tag{3.30}$$

$v_{\text{порт.фр}}$ – швидкість переміщення осей верстату у режимі фрезерування, м/хв.

Потужність навантаження двигуна

- режимі переміщення

$$P_{\text{нав.пер}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{д.пер}} \cdot M_{\text{дв.пер}}}{60}; \tag{3.31}$$

- режимі фрезерування

$$P_{\text{нав.фр}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{д.фр}} \cdot M_{\text{дв.фр}}}{60}. \tag{3.32}$$

Вихідні дані та параметри до вибору електродвигунів осей X, Z зводимо в табл. 3.3, а результати розрахунків – табл. 3.4.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані до вибору електродвигунів осей X, Z

Вісь	Параметр										
	$\eta_{мех}$	g, м/с^2	$F_{фр}$, кг·с	$v_{п.max}$, м/хв	$v_{фр.max}$, м/хв	α, м/с^2	m_c, кг	$d_{гв.кгп}$, м	$m_{гв.кгп}$, кг	$J_{дв}$, кг·м^2	α_g, рад
X	0,86	9,81	45	30	15	2,5	450	0,025	1,9	$11{,}2\cdot10^{-4}$	$\pi/2$
Z	0,86	9,81	45	30	15	2,5	330	0,03	2,8	$55{,}0\cdot10^{-4}$	π

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку параметрів вибору електродвигунів осей X, Z

Вісь	Параметр					
	$A_{фр}$, Дж	$A_{тяж}$, Дж	$A_{роз.суп}$, Дж	$A_{роз.кгп}$, Дж	$A_{роз.дв}$, Дж	$A_{дв(пер/фр)}$, Дж
X	35,3	0	11,3	1,5	2,8	17,6/58,6
Z	35,3	-32,4	8,3	3,0	13,6	64,4/30,2

продовження табл. 3.4

Вісь	Параметр					
	$M_{дв.пер}$, Н·м	$M_{дв.фр}$, Н·м	$n_{дв.фр}$, об/хв	$n_{дв.пер}$, об/хв	$P_{дв.пер}$, Вт	$P_{дв.фр}$, Вт
X	2,8	9,3	1500	3000	878,3	1465,8
Z	10,2	4,8	1500	3000	3218,5	753,7

На основі проведених розрахунків проводимо вибір севодвигунів серії ECMA і серводрайверів серії ASD-A2 [15].

Для переміщення супорту осі X попередньо вибираємо серводвигун з номінальною напругою 400 В типу ECMA-J11020RS, що комплектується сервопідсилювачем ASD-B2-2023-B.

Проводимо перевірку вибраного двигуна за умовами (3.1-3.4) на основі каталожних даних і його механічної характеристики (рис. 3.2):

$$M_{дв.min} = 6{,}4\ \text{Н} \quad \geq \quad M_{дв.пер} = 2{,}9\ \text{Н},$$

де $M_{дв.min}$ – мінімальне значення моменту двигуна визначено з його механічної характеристики (рис. 3.1);

$$M_{\text{дв.ном}} = 9{,}55\ \text{Н} \quad \geq \quad M_{\text{дв.фр}} = 9{,}3\ \text{Н};$$

$$n_{\text{дв.ном}} = 2000\ \text{об/хв} \quad \geq \quad n_{\text{дв.пер}} = 1500\ \text{об/хв};$$

$$n_{\text{дв.}max} = 3000\ \text{об/хв} \quad \geq \quad n_{\text{дв.пер}} = 3000\ \text{об/хв}.$$

$$P_{\text{дв.ном}} = 2000\ \text{Вт} \quad \geq \quad P_{\text{дв.пер}} = 920{,}3\ \text{Вт};$$

$$P_{\text{дв.ном}} = 2000\ \text{Вт} \quad \geq \quad P_{\text{дв.фр}} = 1486{,}8\ \text{Вт}$$

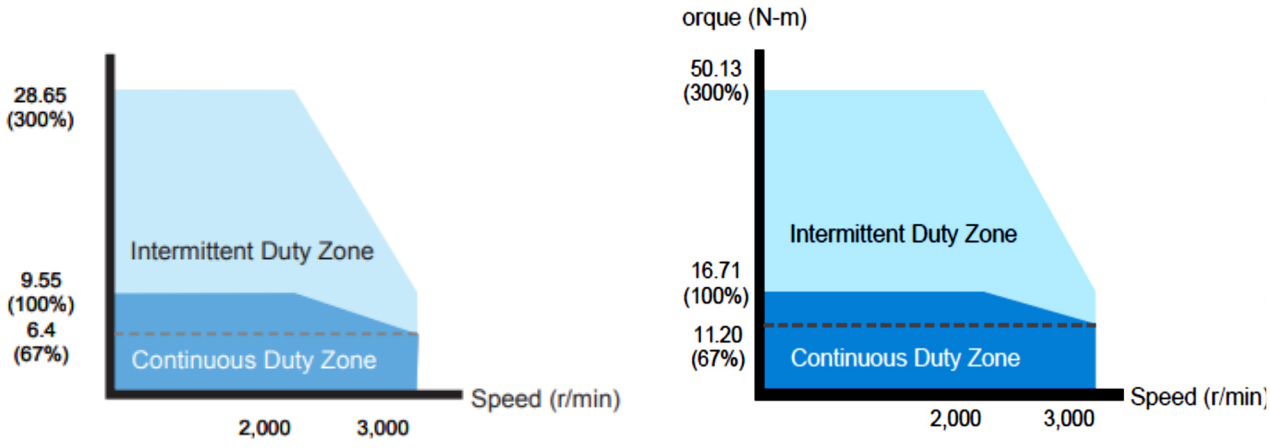
отже, всі умови виконуються, тому приймаємо серводвигун ECMA-E21310RS до установки.

Для переміщення супорту осі Z попередньо вибираємо серводвигун з номінальною напругою 400 В типу ECMA-E11835RS, що комплектується сервопідсилювачем ASD-B2-3023-B.

Проводимо перевірку вибраного двигуна за умовами (3.1-3.4) на основі каталожних даних і його механічної характеристики (рис. 3.2):

$$M_{\text{дв.}min} = 11{,}2\ \text{Н} \quad \geq \quad M_{\text{дв.пер}} = 10{,}2\ \text{Н};$$

$$M_{\text{дв.ном}} = 16{,}7\ \text{Н} \quad \geq \quad M_{\text{дв.фр}} = 4{,}8\ \text{Н};$$



а) *б)*

Рисунок 3.2 – Механічні характеристики серводвигунів:

а) ECMA-J11020RS; б) ECMA-E11835RS

$$n_{\text{дв.ном}} = 2000\ \text{об/хв} \quad \geq \quad n_{\text{дв.пер}} = 1500\ \text{об/хв};$$

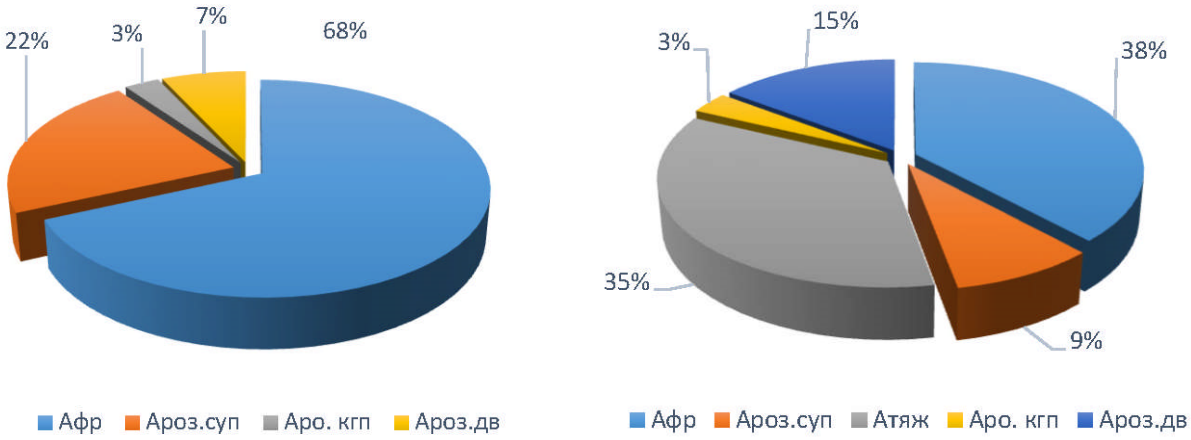
$$n_{\text{дв.}max} = 3000\ \text{об/хв} \quad \geq \quad n_{\text{дв.пер}} = 3000\ \text{об/хв};$$

$$P_{\text{дв.ном}} = 3500\ \text{Вт} \quad \geq \quad P_{\text{дв.пер}} = 3218{,}5\ \text{Вт};$$

$$P_{\text{дв.ном}} = 3500\ \text{Вт} \quad \geq \quad P_{\text{дв.фр}} = 753{,}7\ \text{Вт}$$

Таким чином, всі умови виконуються, тому приймаємо двигун ECMA-L11830RS до установки.

Аналіз математичної моделі (3.20-3.32) показує, що діаметр валу КГП прямопропорційний моменту в 4-й степені, тобто збільшення діаметру КГП у два рази призведе до збільшення моменту розгону в шістнадцять разів. На рис. 3.3 представлені діаграми розподілу роботи яку виконують електродвигуни осей. Для осі X найбільша частка роботи (68%) здійснюються на подолання зусилля, що створюють фрези, для осі Z вона складає 38%. Значну роботу (35% від загальної) електродвигун осі Z виконує на подолання сили тяжіння, що діє на супорт. З рівняння (3.23) видно, що збільшення маси та прискорення супортів потребує прямопропорційного збільшення моменту електродвигуна (за умови постійності інших характеристик приводу). За малих прискорень робота, що здійснюється на розгін КГП та супорту осі буде наближатися до нуля.



а) б)

Рисунок 3.3 – Діаграми розподілу механічної роботи яку виконує серводвигун: а) супорт осі X; б) супорт осі Z

3.2 Вибір систем електроприводу шпинделів

Шпиндель – важлива частина фрезерного верстату (рис. 3.5). У верстатах з ЧПК застосовують мотор-шпинделі прямої передачі. До їх складу входить електродвигун, ротор якого закріплений на шпинделі між передньою і задньою опорами, тобто електродвигун і шпиндель суміщені в одному корпусі. У верстатах нормальної точності електродвигун і шпиндель з'єднуються жорсткою муфтою.

Шпинделі для фрезерних верстатів з ЧПК мають ряд особливостей:

- з метою забезпечення підвищеної продуктивності верстатів вони оснащуються високошвидкісними асинхронними електродвигунами;

- зазвичай, заміна робочого інструменту виконана механізованим способом, який реалізується головним контролером ЧПК з розширеними функціональними можливостями;

- електродвигуни мотор-шпинделів мають рідинне охолодження, завдяки цьому вони мають підвищену надійність, більш точне позиціонування, мінімальне биття, великий крутний момент.

- корпус мотор-шпинделя знаходиться під збитковим тиском повітря, для запобігання попадання в нього охолоджувальної рідини та пилу.

- працюють у режимі силового фрезерування (великі оберти повільна подача).

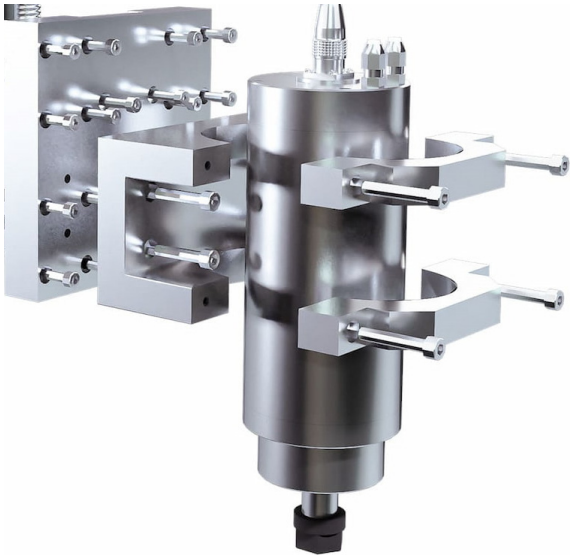


Рис. 3.5. Вибухова діаграма шпиндельного вузла верстата з ЧПК

Робочий вал сучасного шпиндельного двигуна встановлюється на гібридні керамічні підшипники, що мають знижену масу, високу твердість та низький коефіцієнт температурного розширення. Завдяки цим технічним рішенням електродвигун значно менше гріється, зменшуються втрати потужності на тертя в підшипниках, рівень вібрації валу залишається стабільним у всьому діапазоні робочих температур та збільшенні швидкості обертання шпинделя. З метою забезпечення необхідної навантажувальної здатності шпинделя, підшипники встановлюють групами по 2-3 шт. у кожній, що дозволяє розподілити навантаження та збільшити загальну жорсткість шпинделя. Підшипники шпинделя – дуже чутливі до зовнішніх забруднень. Потрапляння пилу, МОР та ін. зовнішніх матеріалів у робочу область підшипників призводить до їх пошкодження і навіть відмову. Це в першу чергу стосується підшипників з перманентним мастилом. Для запобігання потраплянню зовнішніх забруднень у шпиндель застосовуються спеціальні ущільнення. Найчастіше використовуються повітряні ущільнення – подача стисненого повітря під низьким тиском усередину шпинделя. Потік цього повітря під низьким тиском виходить назовні у носовій та задній частині шпинделя, що захищає шпиндель від потрапляння забруднень усередину.

Для високошвидкісних шпинделів верстатів з ЧПК найчастіше використовуються асинхронні двигуни. Вони мають широкий діапазон робочих швидкостей без будь-якої значної втрати потужності та забезпечують дуже високий момент при низьких швидкостях обертання або високу потужність при високих швидкостях обертання шпинделя. У мотор-шпинделів потужність і швидкість, необхідні виконання всіх видів обробки, визначаються характеристиками електродвигуна. На рис. 3.6 наведено типові залежності потужності та моменту мотор-шпинделя від поточної частоти обертання. Мотор-шпинделі спроектовані таким чином, що їх максимальна потужність досягається при частотах обертання ротора електродвигуна близьких до максимальної, а обертаючий момент – навпаки, на низьких і середніх частотах ротора. Тобто, для асинхронних двигунів мотор-шпинделів є характерним наявність кричної точки після якої потужність електродвигуна стабілізується на певному рівні, а крутний момент зменшується.

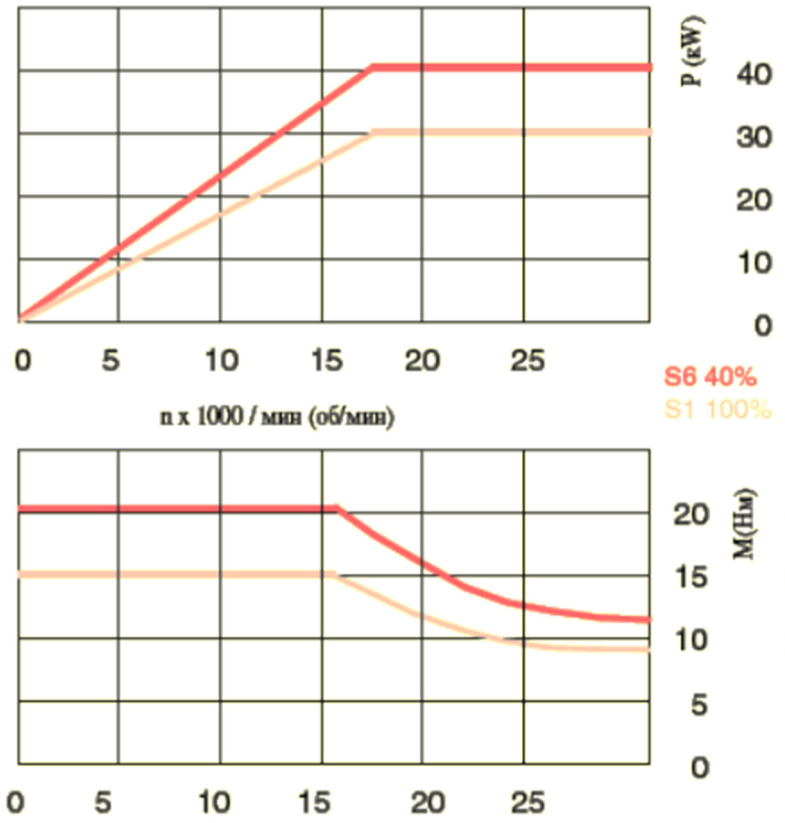


Рис. 3.6. Діаграми потужності *P* і моменту *M* мотор-шпинделя з асинхронним двигуном

Вбудований асинхронний двигун мотор-шпинделя, зазвичай виконується трифазним, а для його живлення використовується перетворювач частоти. Залежно від заданого режиму обробки він перетворює частоту змінного струму живлячої мережі, тим самим забезпечує плавний запуск, зупинку та стабільну роботу шпинделя, захищає його від перевантажень та перегріву.

Електродвигун шпинделя працює в переміжному режимі роботи (S6). Цей режим характеризується почерговою зміною робочого та неробочого режимів (рис. 3.7). У переміжному режимі ротор електродвигуна не зупиняється. З рис. 3.7 слідує, що електричні втрати в електродвигуні на проміжку часу Δt_0 зменшуються, що також пов’язано зі зниженням опору його обмоток внаслідок охолодження. У каталогах приводиться номінальна потужність мотор-шпинделя для тривалого режиму роботи (*S*1).

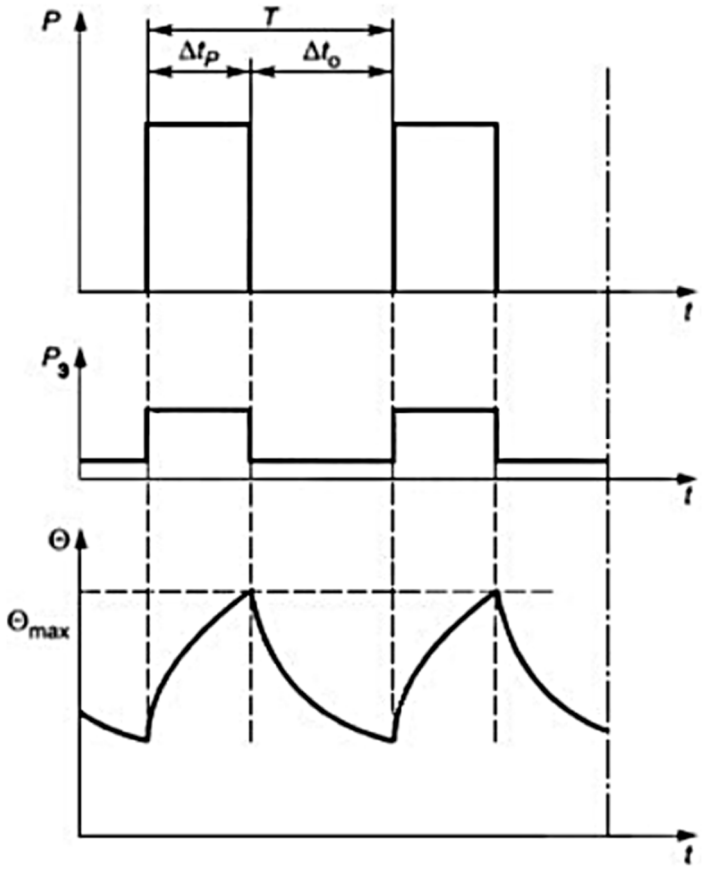


Рис. 3.7 – Зміна споживаної потужності (P), електричних втрат (P_e) і температури в переміжному режимі роботи електродвигуна мотор-шпинделя

З урахуванням вищевикладеного вибір мотор-шпинделя для фрезерного каменеобробного верстату доцільно проводи за наступними умовами:

- напругою установки

$$U_{уст} \leq U_{ном}; \tag{3.33}$$

- номінальною потужністю

$$P_{уст} \leq P_{ном}; \tag{3.34}$$

- частотою обертання шпинделя

$$n_{уст} \leq n_{ном}; \tag{3.35}$$

- видом системи охолодження;

- типом і кількістю підшипників.

Попередньо приймаємо до розгляду мотор-шпиндель GDK125-18-24Z/5.5 з призначений для обробки металів та каменю постійним крутним моментом [16].

Перевірка правильності вибору представлена у вигляді табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Вибір мотор-шпинделя

Дані згідно технічних вимог	Каталожні дані
$U_{уст}$ = 380 В (3 фази)	$U_{ном}$ = 380 В (3 фази)
$P_з$ = 5,5 кВт	$P_{ном}$ = 5,5 кВт
$n_з$ = 18000 – 24 000	$n_{ном}$ = 18 000 – 24 000
Тип охолодження: *рідинне*	*рідинне*
Підшипники:	
керамічні кількість 2×2	керамічні кількість 2×2

Отже, мотор-шпиндель GDK125-18-24Z/5.5 задовольняє всім сформульованим технічним вимогам, тому приймаємо його до установки.

Для живлення мотор-шпинделів необхідно провести правильний вибір перетворювачів частоти. Оскільки від нього буде залежати не тільки ефективність і ресурс ПЧ, а і всього електроприводу в цілому.

На сьогодні, чіткого переліку умов вибору ПЧ не існує, що пов’язано у першу чергу з різноманіттям типів промислового електроприводу. Тому визначальними критеріями для вибору ПЧ будуть тип виконавчого механізму та струм (потужність) електродвигуна. Тобто, номінальна потужність перетворювача частоти повинна бути узгоджена навантажувальною здатністю електродвигуна. Наприклад, якщо потужність ПЧ буде занижена він не зможе забезпечити динамічної роботи електропривода внаслідок постійного перевантаження та вийде з ладу. При виборі ПЧ для живлення мотор-шпинделя також потрібно враховувати перевантажувальну здатність його електродвигуна, так як він працює в переміжному режимі роботи *S*6.

Отже, вибір ПЧ для мотор-шпинделя доцільно проводити за наступними умовами:

- напругою установки;

- кількістю фаз живлячої мережі та електродвигуна мотор-шпинделя;;

- пускового струму, електропривода в момент пуску;

- повної пускової потужності.

Головною особливістю мотор-шпинделів є запуск у режимі неробочого ходу.

З метою зменшення кількості ПЧ у електричній частині багатошпиндельного каменеобробного фрезерувального верстату, вона проектуються так, що від одного ПЧ отримує живлення два мотор-шпинделі. У більшості перетворювачів частоти функція «Робота з кількома електродвигунами» реалізована. Якщо електродвигуни мають однакові параметри, то їх обмотки підключаються паралельно, але кожен своїм кабелем. При цьому перетворювач частоти повинен працювати у скалярному режимі. Параметри розгону, гальмування, захисту та ін. будуть однаковими для обох двигунів. Потужність ПЧ повинна дорівнювати або перевищувати суму потужностей електродвигунів.

Пусковий струм необхідний групі електродвигунів при пуску від ПЧ

$$I_{\text{п}\Sigma} = nI_{s1}\left[1+\frac{n_\Sigma}{n}\left(k_I-1\right)\right] = 2\cdot 11\cdot\left[1+\frac{2}{2}\left(1{,}2-1\right)\right] = 26{,}4 \text{ А};$$

де n – кількість електродвигунів, що паралельно підключені до одного ПЧ, шт.;

$I_{\text{ном}}$ – номінальний струм електродвигуна мотор-шпинделя, А;

n_Σ – кількість електродвигунів, що одночасно запускаються, шт.;

k_I – коефіцієнт кратності пускового струму приймаємо $k_I = 1{,}2$ оскільки високошвидкісні шпинделі фрезерних верстатів – це легке навантаження.

Повна пускова потужність необхідна групі електродвигунів при пуску від ПЧ:

$$S_{\text{п}\Sigma} = S_{\text{д.ном}}\left[1+\frac{n}{n_\Sigma}\left(k_I-1\right)\right] = 7{,}3\left[1+\frac{2}{2}\left(1{,}2-1\right)\right] = 8{,}8 \text{ кВА};$$

де $S_{\text{д.ном}}$ – повна номінальна потужність електродвигуна в режимі роботи $S1$:

$$S = \frac{P_{\text{д.ном}}}{\eta \cdot \cos\varphi} = \frac{5,5}{0,88 \cdot 0,86} = 7,3 \text{ кВА};$$

η – коефіцієнт корисної дії електродвигуна;

cosφ – коефіцієнт потужності електродвигуна.

Виходячи з аналогічних міркувань до вибору сервоприводів, попередньо приймаємо до розгляду ПЧ загальнопромислового призначення VFAS3-4150PC типорозмір A3 (виробник Toshiba). Проведемо перевірку правильності попереднього вибору ПЧ за умовами:

- відповідності номінальної вхідної напруги ПЧ $U_{\text{пч.вх.ном}}$ напрузі живлячої мережі $U_{\text{м}}$

$$3 \text{ фази}, U_{\text{м}} = 380 \text{ В} \quad = \quad 3 \text{ фази}, U_{\text{пч.вх.ном}} = 380 \text{ В};$$

- відповідності номінальної напруги електродвигуна $U_{\text{дв.ном}}$ напрузі на виході перетворювача частоти $U_{\text{пч.вих.ном}}$

$$3 \text{ фази}, U_{\text{дв.ном}} = 380 \text{ В} \quad = \quad 3 \text{ фази}, U_{\text{пч.вих.ном}} = 380 \text{ В};$$

- можливості забезпечення ПЧ максимального значення струму групи електродвигунів $I_{\text{пΣ}}$ у момент пуску, за умови, що він триває більше 60 с

$$I_{\text{пΣ}} = 26,4 \text{ А} \quad < \quad I_{\text{пч.ном}} = 31,7 \text{ А};$$

- можливості забезпечення ПЧ повної пускової потужності для групи електродвигунів $S_{\text{пΣ}}$ у момент пуску, за умови, що він триває більше 60 с

$$S_{\text{пΣ}} = 14,6 \text{ кВА} \quad < \quad S_{\text{пч.ном}} = 24,2 \text{ кВА};$$

- нагріву ПЧ у номінальному режимі роботи

$$I_{S6} = 26 \text{ А} \quad < \quad I_{\text{пч.ном}} = 31{,}7 \text{ А};$$

де I_{S6} – струм мотор-шпинделя в режимі роботи *S*6:

$$I_{S6} = I_{S1.\text{ном}}\sqrt{\frac{140}{100}} = 11\sqrt{\frac{140}{100}} = 13{,}0 \text{ А},$$

$I_{S1.\text{ном}}$ – номінальний струм електродвигуна в режимі роботи *S*1.

Параметри попередньо прийнятого ПЧ VFAS3-4150PC задовольняють всі висунутим до нього вимогам, тому приймаємо 4-ри таких ПЧ до установки.

Вибір мережевого (вхідного) дроселю проводимо за допустимим струмом. Попередньо приймаємо до розгляду дросель типу ED3N-0.1/150. Тоді

$$I_{ПЧ\Sigma} = 135{,}6 \text{ А} \quad \leq \quad I_{\text{др.ном}} = 150 \text{ А},$$

де $I_{ПЧ\Sigma}$ – сумарний струм всіх перетворювачів частоти, що встановлені у верстаті

$$I_{\text{ПЧ}\Sigma} = nI_{\text{пч.ном}} = 4 \cdot 33{,}9 = 135{,}6 \text{ А},$$

n – кількість встановлених перетворювачів частоти, шт;

$I_{\text{пч.ном}}$ – номінальний струм ПЧ

$$I_{\text{пч.ном}} = \frac{S_{\text{пч.ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{м}}} = \frac{16{,}6}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38} = 33{,}9 \text{ А},$$

$S_{\text{пч.ном}}$ – повна номінальна потужність ПЧ, кВА.

Отже, дросель ED3N-0.1/150 задовольняє умові нагріву тому приймаємо його до установки.

3.3 Вибір системи керування верстатом

Головною особливістю сучасник верстатів з ЧПК є наявність у керуючому пристрої програмованої ЕОМ, яка підготовлює необхідну інформацію для обробки деталі. Завдяки цьому досягається висока універсальність верстатів з ЧПК.

На сьогодні загальноприйнятою є класифікація систем ЧПК за призначенням (рис. 3.8), яка вирізняє такі системи:

- позиційні;
- контурні або безперевні;
- універсальні або комбіновані.

Для фрезерних верстатів застосовуються контурні системи ЧПК. Їх головним завдання полягає в забезпеченні керування переміщенням робочого органу за траєкторією та з контурною швидкістю, що задані керуючою програмою. Такі системи ЧПК на відміну, наприклад, позиційних забезпечують безперервне переміщення інструмента почергово або відразу за декількома координатами, завдяки чому забезпечується швидка обробка дуже складних деталей.

Контурні системи ЧПК можуть бути розімкненими та замкненими.

Верстати з розімкненими системи ЧПК будуються на базі крокових двигунів у комплекті з гідропідсилювачем. Внаслідок відсутності інформації про дійсне положення робочого органу верстату, у них під час експлуатації з’являються похибки, що важко діагностуються оскільки їх джерелом є механічна частина верстату. Тому промислові фрезерні верстати з системами ЧПК такого типу практично зникли з експлуатації.



Рис. 3.8. Класифікація систем ЧПК за технологічними завданнями [19]

Замкнені системи ЧПК поділяються на наступні:

- зі зворотнім зв’язком за положенням робочих органів верстата;

- зі зворотнім зв’язком за положенням робочих органів верстата та з компенсацією похибок верстата;

- адаптивні.

У фрезерних верстатах, що не входять до складу потокових технологічних ліній використовуються ЧПК другого виду. В основу таких систем ЧПК покладено принцип слідкуючих систем. У сучасних електроприводах вимірювальні перетворювачі зворотного зв’язку (енкодери) встановлюються у корпусі електродвигуна. Така система порівняно проста та зручна, а розмір енкодера не залежить від величини переміщення.

Основою системи керування ЧПК є автономний контролер, який встановлюється в електрошафі (шафі керування). Для промислових верстатів він обладнаний користувацьким інтерфейсом: екраном, вбудованою / виносною клавіатурою, механічними кнопками «ПУСК», «ПАУЗА», «СТОП» та ін.

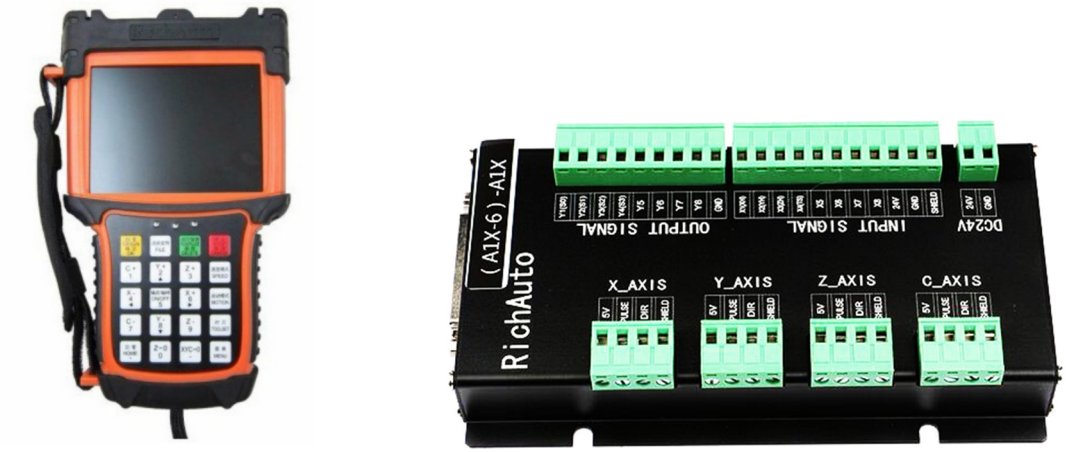
Автономний контролер – це спеціалізований пристрій керування електроавтоматикою верстата з вбудованим електронним обчислювальним пристроєм. Такий контролер відноситься до систем класу CNC (Computer Numerical Control). Під час роботи контролер опитує входи/виходи, і отримані дані аналізуються. Результати прийнятих рішень передаються на відповідні фізичні виходи до яких підключаються керуючі входи електропривода супортів осей верстата.

Керування драйверами електродвигунів здійснюється за протоколом STEP/DIR. Логічний сигнал DIR вказує напрям обертання двигуна, а імпульс STEP дає команду на поворот валу двигуна на один кутовий інкремент.

Системи ЧПК класу CNC надають змогу виконувати редагування програм керування верстатом. Вони мають необхідний програмний функціонал, який дозволяє враховувати та коректувати постійні похибки механічної частини верстата (люфти). У контролері передбачено енергонезалежну пам'ять у яку можливо вносити, редагувати та зберігати константи верстата.

На сьогодні, системи керування багатошпиндельних каменеобробних фрезерних верстатів виконуються на основі DSP-контролерів (рис. 1.3, рис. 3.9) або класичних CNC стойок (рис. 3.10).

Головною особливістю будь-якого DSP-контролера є наявність інтерфейсної плати (рис. 3.9, б) та пульту керування (рис. 3.9, а). DSP-контролер призначений для спрощення і прискорення подання команд на верстат. Він відноситься до класу автономних систем ЧПК. Контролер зчитує керуючу програму з пам’яті та перетворює програмні коди (G-код) у сигнали керування електроприводами верстату. У цій системі ЧПК верстатом роль вбудованого обчислювального пристрою виконує DSP-процесор. Контролер дозволяє виконувати всі необхідні операції з керування верстатом. До переваг таких систем керування верстатом відносять мобільність, легкість і простота інтерфейсу, сумісність з сучасним ПЗ для проектування об’ємних рельєфів (ArtCam, Type 3, Pro-E та ін.). Не зважаючи на ряд переваг такі DSP-контролери мають порівняно невеликий екран (до 5 дюймів), з їх досвіду експлуатації відомо про випадки перегинання з’єднувального кабелю, відламуванням роз’єму від плати та ушкодження процесора статичною електрикою. Тому для каменеобробних верстатів, що працюють у режимі роботи 24 на 7, а головними вимогами до них є надійність і мінімальна кількість браку доцільне використання контролерів ЧПК у вигляді CNC стойок.



а) б)

Рис. 3.9. DSP-контролер A-57 RichAuto:

а) пульт керування; б) інтерфейсна плата

Стаціонарні CNC стойки широко представлені в різних цінових категоріях і відрізняються апаратними та функціональними можливостями. Каменеобробні фрезерні верстати в порівнянні, наприклад, металообробними верстами – це дуже повільними машини, тому для їх керування цілком достатньо функціонала автономного контролера середнього рівня. Попередньо приймаємо до розгляду контролер ЧПК DDCS-Expert [17]. Він оснащений 7-ми дюймовим кольоровим дисплеєм, клавіатурою та за необхідності – переносним MPG-пультом. Контролер підтримує до 5-ти осей, з яких 2-4 осьової лінійної інтерполяції та одну (будь-яка) кругову інтерполяцію, має 24 гальванічно ізольовані цифрові входи та 21 цифровий вихід, режим автоматичного та ручного зонду, методи компенсації люфтів, декілька алгоритмів інтерполяції, підтримка режиму декількох шпинделів. Система ЧПК повністю сумісна зі стандартним G-кодом і підтримує програми CAD/CAM такі як ArtCam, MasterCam, ProE, JDSoft SurfMill та ін. Контролер може попередньо переглядати траєкторії обробки перед фрезеруванням, що робить систему більш стійкою, підвищує точність обробки.

Однією з головних умов при виборі контролера ЧПК верстата є узгодженість специфікацій імпульсних сигналів «контролер-серводрайвер». Тому проводимо перевірку на узгодженість специфікацій імпульсних сигналів:

$$f_{c.max} = 1000 \text{ кГц} \quad \geq \quad f_{ld.max} = 500 \text{ кГц};$$
$$f_{c.max} = 1000 \text{ кГц} \quad \geq \quad f_{oc.max} = 200 \text{ кГц},$$

де $f_{\text{к.max}}$ – максимальна частота вихідного на вісь контролера;

$f_{\text{ld.max}}$ – максимальна частота імпульсів на вході серводрайвераа у режимі Line driver;

$f_{\text{oc.max}}$ – максимальна частота імпульсів на вході серводрайвераа у режимі Open collector.

Отже, контролер ЧПК DDCS-Expert задовольняє всім умовам тому приймаємо його до установки.



а)



б)



в)

Рис. 3.10 Контролер ЧПК DDCS-Expert [17]:

а) контролер; б) додаткова клавіатура; в) виносний пульт

3.4 Вибір апаратів захисту та керування верстатом

Для захисту електрообладнання верстату використовуються автоматичні вимикачі промислових серій оснащені додатковими блок-контактами. Використання блок-контактів необхідне для відслідковування стану автоматичного вимикача контролером ЧПК.

Вибір автоматичних вимикачів проводимо за:

- типом;
- номінальною напругою

$$U_{\text{а.ном}} \geq U_{\text{уст}}; \qquad (3.36)$$

де $U_{\text{а.ном}}$, $U_{\text{уст}}$ – відповідно, номінальна напруга автоматичного вимикача і електроустановки, В;

- номінальним струмом

$$I_{\text{а.ном}} > I_{\text{р}}\,, \tag{3.37}$$

де $I_{\text{а.ном}}$ – номінальний струм автоматичного вимикача, А;

$I_{\text{р}}$ – розрахунковий струм споживача;

- номінальним струмом теплового розчеплювача:

$$I_{\text{т.р.ном}} > I_{\text{р}}; \tag{3.38}$$

- номінальним струмом електромагнітного розчеплювача:

$$I_{\text{ел.р.ном}} > I_{\text{р}};$$

- уставка струму спрацювання теплового розчеплювача:

$$I_{\text{уст.т.р}} = k_{\text{з}} I_{\text{р}} \tag{3.39}$$

де $k_{\text{з}}$ – коефіцієнт запасу, для групових автоматичних вимикачів ВА88-35, ВА88-33 рівний 1,3; для вимикачів ВА47-29 – 1,13;

- уставка струму електромагнітного розчеплювача

$$I_{\text{уст.е.р}} = k_{\text{з}} I_{\text{пік}}\,, \tag{3.40}$$

де $k_{\text{з}}$ – коефіцієнт запасу рівний 1,25;

$I_{\text{пік}}$ – піковий струм, якщо до автоматичного вимикача підключено один електродвигун, то $I_{\text{пік}} = I_{\text{пуск}}$.

Вибір автоматичних приведено у вигляді табл. 3.6

Таблиця 3.6 Вибір автоматичних вимикачів

№ п/п	Призначення вимикача	$I_р$, А	Тип автомата	Номінальні параметри автоматич. вимикача			Уставки розчеплювачів		Перевірка умов	
				$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$I_{т.р.ном}$, А	$I_{у.т.р}$, А	$I_{у.е.р} > I_{у.е.роз}$, А	$U_{а.ном} \geq U_{уст}$, В	$I_{у.т.р} > I_р$, А
QF1	Ввідний	172,3	ВА88-35	690	200	200	260	2000	690 > 380	260 > 172,3
SF1	Оперативний	2,0	ВА47-29	400	2,0	2,0	2,26	20 (D)	690 > 380	2,6 > 2,0
QF2	Ввідний ЩК-2	135,6	ВА88-33	690	160	160	208,0	1600	690 > 380	208 > 135,6
QF3	FC1	33,9	ВА47-29	400	40	40	45,2	120 (В)	400 > 380	45,2 > 33,9
QF4	FC2	33,9	ВА47-29	400	40	40	45,2	120 (В)	400 > 380	45,2 > 33,9
QF5	FC3	33,9	ВА47-29	400	40	40	45,2	120 (В)	400 > 380	45,2 > 33,9
QF6	FC4	33,9	ВА47-29	400	40	40	45,2	120 (В)	400 > 380	45,2 > 33,9
QF7	А1	12,0	ВА47-29	400	25[1)]	25	28,3	250 (D)	400 > 380	28,3 > 12,0
QF8	А2	7,0	ВА47-29	400	25[1)]	25	28,3	250 (D)	400 > 380	28,3 > 7,0
QF9	А3	7,0	ВА47-29	400	25[1)]	25	28,3	250 (D)	400 > 380	28,3 > 7,0
QF10	А4	7,0	ВА47-29	400	25[1)]	25	28,3	250 (D)	400 > 380	28,3 > 7,0
QF11	Насос ОР	1,9	ВА47-29	690	2	2	2,26	20 (D) > 16,7	400 > 380	2,6 > 2,0
QF12	Насос МОР	4,2	ВА47-29	690	5	5	5,65	50 (D) > 36,8	400 > 380	5,65 > 4,2

Примітка. 1 – згідно рекомендацій виробника ПЧ.

Для керування електродвигунами насосів М13 і М14 проводимо вибір контакторів за наступними умовами:

- категорією змінного струму;
- номінальною напругою головних кіл

$$U_{\text{а.ном}} \geq U_{\text{уст}}; \tag{3.41}$$

де $U_{\text{а.ном}}$, $U_{\text{уст}}$ – відповідно, номінальна напруга автоматичного вимикача і електроустановки, В;

- номінальною напругою котушки керування

$$U_{\text{кот.ном}} \geq U_{\text{уст}}; \tag{3.42}$$

- номінальним струмом головних кіл

$$I_{\text{к.ном}} > I_{\text{р}}, \tag{3.43}$$

Попередньо до розгляду приймаємо контактори МКИ-10610 категорії АС-3, що призначені для пуску електродвигунів з КЗ ротором і відключення їх при номінальному навантаженні з номінальним струмом 6 А.

Проводимо перевірки для електродвигуна насосу МОР

$$U_{\text{к.ном}} = 400 \geq U_{\text{уст}} = 380 \text{ В};$$
$$U_{\text{кат.ном}} = 230 \geq U_{\text{уст.ф}} = 220 \text{ В};$$
$$I_{\text{ном}} = 6 \geq I_{\text{р}} = 4{,}2 \text{ А}.$$

Попередньо вибраний контактор МКИ-10610 задовольняє всім умовам тому приймаємо його до установки у колах керування електродвигунами М13 і М14.

Для захисту електродвигунів шпинделів М1-М8 та насосів М13, М14 використовуємо електротеплові реле РТИ-1300. Вибір реле проводимо аналогічно вибору контакторів за умовами (3.41) і (3.43).

Результати вибору теплових реле приведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7. Вибір теплових реле

№ п/п	Споживач	$I_р$, А	Тип реле	$I_{ном}$, А	Перевірка умов	
					$U_{р.ном} \geq U_{уст}$, В	$I_{р.ном} > I_р$, А
1	М1 (М2-М8)	17,0	РТИ-1322	17-25	660 > 380	25 > 17
2	М13	1,9	РТИ-1307	1,6-2,5	660 > 380	2,5 > 1,9
3	М14	4,2	РТИ-1310	4-6	660 > 380	6,0 > 4,2

Отже, попередньо вибрані теплові реле типу РТИ-1300 задовольняють всім умовам, тому приймаємо їх до установки.

3.5 Вибір провідників електричної частини верстата

Проводка верстатів з ЧПК виконується проводами та кабелями, як правило, з мідними жилами. Вони повинні мати достатню механічну міцність. Розрізняють жорсткі з'єднання між нерухомими частинами, та гнучкі між частинами верстата, що схильні до частих рухів, у першу чергу, це супорти осей. Жорсткі з'єднання доцільно виконувати проводами класу гнучкості 1 та 2. Кабелі, що піддаються постійному згинанню повинні мати гнучкі жили 5-го або 6-го класу.

У електричній частині верстату необхідно застосовувати, в першу чергу, проводи та кабелі з ізоляцією із таких матеріалів: полівілхлорид (PVC), гума натуральна, силіконова гума (SIR), зшитий поліетилен (XPLE).

Отже, для кіл керування використовується провід марки ПВ-3, а для підключення серводвигунів та електродвигунів шпинделів – трифазні кабелі з мідними жилами підвищеної гнучкості марки ZR-RVVP, для електродвигунів М13, М14 – трифазні кабелі з мідними гнучкими жилами КГНВ.

Вибір проводів і кабелів, що прокладені в середині щитів і по верстату проводимо за такими умовами [18]:

- допустимої напруги, В:

$$U_{\text{пр.ном}} \geq U_{\text{уст}}, \tag{3.44}$$

де $U_{\text{пр.ном}}$ – номінальна напруга ізоляції провідника, В;

- мінімального перерізу за умовами механічної міцності:

$$F_{\text{пр}} \geq F_{\text{пр.min}}, \tag{3.45}$$

$F_{\text{пр}}$ – переріз провідника, мм^2;

$F_{\text{пр.min}}$ – мінімальний переріз провідника за умовами механічної міцності, мм^2;

- ефективної струмопровідної спроможності:

$$I_{z.\text{еф}} = k_t \cdot k_{\text{гр}} \cdot I_z > I_{\text{роз}}, \tag{3.46}$$

де k_t – температурний коефіцієнт, враховує дійсну температуру навколишнього середовища в якому прокладений провідник, приймаємо $k_{t=30^\circ\text{C}} = 1{,}15$ [18];

$k_{\text{гр}}$ – коефіцієнт групування, згідно [18];

I_z – струмопровідна спроможність провідника при $t = 40$ ºС і з урахуванням способу прокладання, згідно [18];

- на відповідність захисному пристрою

$$I_{z.\text{еф}} > k_{\text{зах}} \cdot I_{\text{з.ном}}, \tag{3.47}$$

де $k_{\text{зах}}$ – коефіцієнт захисту, $k_{\text{зах}} = 1$, для проводів з полівінілхлоридною ізоляцію (PVC) і що мають обов'язковий захист за перевантаженням;

$I_{\text{з.ном}}$ – номінальний струм захисного пристрою.

Для кіл керування використовується провід марки ПВ-3, а для підключення серводвигунів та електродвигунів шпинделів – чотирижильні кабелі з мідними жилами підвищеної гнучкості марки ZR-RVVP, для електродвигунів М13, М14 – трифазні кабелі з мідними гнучкими жилами КГНВ-4х1,0.

Результати вибору проводів та кабелів силових кіл і кіл керування представлені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8. Вибір проводів та кабелів електричної частини верстату

№ п/п	Споживач	$I_{роз}$, А	$F_{пр.min}$, мм^2	Спосіб прокладання	F, мм^2	I_z, А	$k_{гр}$	$I_{z.еф}$, А	Марка кабелю / проводу
1	ЩК-2	135,6	0,75	В2	2×35,0	198	0,85	168,1	ZR-RVVP
2	FC1 (FC3-FC4)	33,9	0,75	В1	10,0	44	0,8	40,4	ZR-RVVP
3	М1 (М2-М8)	17,0	0,75	В2	4,0	23	1,0	26,5	ZR-RVVP
4	А1	12,0	0,75	В1	6,0	31,0	0,75	26,7	ZR-RVVP
5	А2, А3, А4	7,0	0,75	В1	6,0	31,0	0,75	26,7	ZR-RVVP
7	М13	1,9	0,75	В2	0,75	8,5	1,0	9,9	КГНВ
8	М14	4,2	0,75	В2	0,75	8,5	1,0	9,9	КГНВ
9	Кола керування	–	0,5	В1	0,5	6,0	0,65	4,5	ПВ-3

продовження табл. 3.8

Споживач	$U_{пр.ном} \geq U_{уст}$, В	$F_{пр} \geq F_{пр.min}$, мм^2	$I_{z.еф} > I_{роз}$, А	$I_{z.еф} > k_{зах} \cdot I_{з.ном}$, А
ЩК-2	660 > 380	2×35 > 0,75	168,1 > 135,6	168 >160
FC1 (FC3-FC4)	500 > 380	10,0 > 0,75	40,4 > 33,9	40,4 > 40
М1 (М2-М8)	500 > 380	4,0 > 0,75	26,5 > 17,0	26,5 > 25
А1	500 > 380	6,0 > 0,75	26,7 > 12,0	26,7 > 25
А2, А3, А4	500 > 380	6,0 > 0,75	26, 7 > 7,0	26,7 > 25
М13	660 > 380	0,75 = 0,75	9,9 > 1,9	9,9 > 2,0
М14	660 > 380	0,75 = 0,75	9,9 > 4,2	9,9 > 5,0
Кола керування	450 > 220	0,5 = 0,5	4,5	4,5 > 2,0

3.6 Конструктивне виконання електричної частини верстата

Всі апарати захисту та керування, севродрайвери, перетворювачі частоти, контролер ЧПК розміщуються в двох металевих щитах ЩК-1 і ЩК-2 зі ступенем захисту від навколишнього середовища IP44.

Щит ЩК-1 має навісне виконання і закріплюється на стіні цеху поблизу верстата. У ньому розміщуються серводрайвери А1-А4 синхронних двигунів супортів осей, автоматичні вимикачі QF1-QF2, SF1, QF7-QF12, джерела живлення контролера ЧПК G1 і оперативних кіл G2, контактори КМ1, КМ2 і проміжні реле KL1-KL6. Контролер ЧПК та його кнопкова панель врізаються у двері щита ЩК-1, біля них також розміщуються сигнальні лампи. Від серводрайверів А1-А4, відповідно, до двигунів М9-М12 прокладаються кабелі марки ZR-RVVP у захисній гофрованій трубі, а безпосередньо по верстату – у кабелеукладачах. Електродвигуни насосів ОР та МОР підключаються за допомогою кабелів КГНВ-4х1.

У щиті ЩК-2 встановлюються перетворювачі частоти FC1-FC4, автоматичні вимикачі QF3-FQ6 і теплові реле KK1-KK8. Щит ЩК-2 має навісне виконання, але на відміну від ЩК-1 розміщується на задній стороні балки порталу. Таке рішення дозволяє істотно скоротити довжину екранованих кабелів марки ZR-RVVP між ПЧ та електродвигунами М1-М8. Кабелі до електродвигунів мотор-шпинделів підводяться також через кабелеукладач. Всі кабелеукладачі повинні мати заповнення не більше 75% за об’ємом. Силові кабелі та сигнальні групуються в окремі групи, що розміщуються по різні сторони кабелеукладача.

Внутрішня проводка щитів виконується мідними проводами марки ПВ-3 та екранованими кабелями марки ZR-RVVP. Кола керування виконуються багатодротовим гнучким проводом ПВ-3 з перерізом 0,5 мм^2 та багатожильними екранованими сигнальними кабелями з перерізом жили не менше 0,2 мм^2. Силові кола виконуються гнучкими мідними проводами та кабелями з перерізом жили не менше 0,75 мм. Між контактними з’єднаннями клемників і клем електроапаратів

проводи та кабелі прокладаються без зрощувань і проміжних з’єднань. Якщо виникає необхідність у їх роз’єднанні то використовуються спеціальні штепсельні роз’єми. Пучки проводів і кабелів прокладаються всередині пластикових, що не підтримують горіння перфорованих кабельних каналах. Для вводу кабелів у щити використовуються герметичні вводи типу PG необхідного діаметру або аналогічні.

Всі провідники закріплюються таким чином, щоб уникнути на них механічних навантажень.

У щитах клеми заземлення позначаються відповідними графічними позначеннями, на фронтальній стороні дверей наноситься знак електронебезпеки.

Обслуговування обох щитів здійснюється з фронтальної сторони.

3.7 Висновки до 3-ого розділу

1. Удосконалено математичну модель повної кінетичної енергії системи «двигун-рейка» і на її основі визначено необхідний крутний момент і вибрано двигуни механізму рейкової передачі осі Y та вибрано електропривод осі – серводрайвери ASD-B2-2023-B і електродвигуни ECMA-J11020RS.

Удосконалено математичну модель руху супортів системи «двигун-КГП». Аналіз моделі показав, що діаметр валу КГП прямопропорційний моменту в 4-й степені. Для осі X – 68% роботи електродвигуна витрачається на подолання зусилля, що створюють фрези, а для осі Z – 38%. Збільшення маси та прискорення супортів потребує прямопропорційного збільшення моменту електродвигунів. На базі розробленої моделі вибрано електропривод осей X, Z, відповідно, серводрайвер ASD-B2-2023-B і електродвигун ECMA-J11020RS; серводрайвер ASD-B2-3023-B і електродвигун ECMA-E11835RS.

2. Розроблено методику вибору перетворювача частоти при підключенні до нього групи електродвигунів та відповідно з нею обґрунтовано вибрано

перетворювач частоти VFAS3-4150PC (типорозмір А3) від якого отримують живлення два мотор-шпиделі GDK125-18-24Z/5.5.

3. Обґрунтовано, що для керуванням багатошпиндельного каменеобробного фрезерного верстату достатньо функціонала автономного контролера середнього рівня DDCS-Expert.

4. Виявлено, що в якості апаратів захисту від внутрішніх коротких замикань і перевантаження для верстату доцільно використати автоматичні вимикачі промислових серій ВА-88, ВА-47, а для захисту електродвигунів мотор-шпинделів та насосів – теплові реле серії РТИ-1300

5. Встановлено, що для каменеобробного фрезерного верстату найбільш придатними є проводи та кабелі з мідними жилами для жорстких з'єднань класу гнучкості 3 марки КГНВ, а для рухомих класу гнучкості 5 марки ZR-RVVP, а перетин їх жил визначається ефективною струмопровідною спроможністю, що свою чергу залежить від способу прокладання та номінального струму апарату захисту.

6. Обґрунтовано доцільність розміщення електрообладнання верстата в двох щитах керування – стаціонарному та рухомому. Причому рухомий щит розміщується безпосередньо на задній стороні балки порталу верстату.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Основною метою охорони праці на підприємстві є покращення умов праці, заміна тяжких і трудомістких робіт, недопущення та усунення причин нещасних випадків і професійних захворювань. Одним з основних розділів охорони праці – техніка безпеки та виробнича санітарія. Головним завданням техніки безпеки є запобігання впливу на робітників небезпечних та шкідливих виробничих факторів. На підприємстві техніка безпеки реалізується шляхом впровадження оранізаційних і технічних заходів і засобів.

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів у цехах обробки каменю

Головними небезпечними виробничими факторами в цехах обробки природного каменю є:

- вантажопідйомні машини;
- електрообладнання.

До основних шкідливих факторів відносяться:

- кам’яний пил;
- виробничий шум до 99 дБА;
- локальна вібрація.

Характерною особливістю підйомно-транспортних робіт у каменеобробних цехах є те, що вони представляють небезпеку не лише для обслуговуючого персоналу, а й взагалі для сторонніх осіб. Вона пов'язана, в більшості випадків, з ненавмисним контактом з рухомими частинами технологічного обладнання та можливим ударом падаючим слябом, блоком каменю та ін. вантажів при їх транспортуванні. Ця небезпека стосується не лише стаціонарного та пересувного обладнання, а й і самохідного – автонавантажувачів. При взаємодії з останнім, можливими небезпеками будуть наїзд і удар при зіткненні.

При порушенні техніки безпеки виконання робіт все електрообладнання цеху може призвести до ураження робітників електрострумом. Ця можливість викликана тим, що технологічне обладнання цеху обробки каменю живиться від мережі змінного струму напругою 380 В, а цех, внаслідок застосування технології «мокрий різ» – це сире приміщення.

Основні причини ураження електрострумом:

- випадковий дотик до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою;

- поява високого потенціалу на металевих частинах технологічного обладнання внаслідок ушкодження ізоляції його електричної частини;

- поява напруги на відключеному електрообладнанні на якому виконуються роботи з технічного обслуговування, внаслідок його помилкового включення;

- поява крокової напруги на поверхні землі в результаті замикання фази на землю.

Підвищена забрудненість повітря кам’яним пилом обумовлена застосуванням технології «сухий різ» у непризначених для цього місцях роботи, недосконалістю систем аспірації запиленого повітря. Вона призводить до інтенсивного накопичення пилу на поверхнях будівельних конструкцій, технологічного обладнання та на підлозі.

Шум високої інтенсивності з’являється при роботі каменерізального обладнання оснащеного алмазним інструментом. У деяких випадках джерелом шуму також можуть бути люфти в механізмах технологічного обладнання, наприклад, із-за зносу підшипникових вузлів.

Локальна вібрація виникає при обробці каменю ручним інструментом ударної, ударно-обертальної та обертальної дії (перфоратори, куто-шліфувальні машини) і передається на руки робітника. Вібрація – це фактор який має значну біологічну активність. За певних значень частоти і амплітуди коливань у організмі людини виникають серйозні порушення нейросудинної, опорно-рухової та нервово-м’язової систем.

Крім прямого шкідливого впливу на людину вібрація також супроводжується підвищеним шумом.

4.2 Заходи безпеки, щодо усунення небезпечних і шкідливих факторів

Способи захисту працівників від несприятливих виробничих факторів поділяються на активні та пасивні. Активні способи полягають у виявленні причин і джерел несприятливих виробничого факторів та впливом на них. За неможливості використання способів активного захисту використовуються пасивні. Вони бувають колективними та індивідуальними.

У першу чергу кожен робітник повинен використовувати засоби індивідуального захисту: різні види цілого, не порваного спецодягу та взуття, протишумні навушники, захисні окуляри, каску. Крім того, електрослюсар повинен дратовко повинен використовувати засоби від ураження електричним струмом – діелектричні рукавиці, електровимірювальні кліщі, інструмент з ізоляційним покриттям, покажчик напруги.

До засобів колективного захисту в каменеобробному цеху відносяться:

1) нормалізація повітряного середовища виробничих приміщень. Лише застосування пристроїв очищення повітря дозволяє знизити його запиленість до встановлених санітарних норм.

Вологе запилене повітря найбільш доцільно очищувати в циклонах, а сухе – за рукавними фільтрами. У обох випадках швидкість руху повітряного потоку забрудненого повинна знаходитися в межах 18-22 м/с.

Запуск вентиляторів аспіраційних систем має бути зблокований з роботою технологічного обладнання, що використовує технологію «сухий різ». Вони повинні вмикатися лише при початку роботи ріжучих інструментів, а вимикатися з певним запізненням (близько 2-3 хв), щоб у повітропроводах не залишався пил.

Температура точки роси запиленого повітря має бути вищою за температури стінок аспіраційної системи, що дозволить зменшити конденсацію водяної пари в повітропроводах і цементацію на їх стінках часток пилу.

Установка місцевих відсмоктувачів пилу забезпечує лише часткове видалення пилових фракцій, що знаходяться в зваженому стані. Внаслідок дії повітряних струменів загальнообмінної вентиляції, руху транспорту та людей в

цеху пил, що не був уловлений піднімається в повітря і таким чином, створюється вторинне пиловиділення. Завдяки чому, запиленість у цеху різко зростає. Дана проблема може бути вирішена лише шляхом установки спеціальних знепилюючих систем.

У зимовий час, при перевезенні великогабаритних заготовок виникає небезпека переохолодження цеху, тому пройоми транспортних воріт повинні бути обладнані автоматичними повітряними завісами, які вмикаються лише при відчинених воротах. Крім того, для проходу робітників у воротах роблять спеціальний вхід.

2) захист від шуму досягається використанням: звукоізоляції (кабіни), звукопоглинаючих навушників;

3) захист від вібрації досягається використанням ручного інструменту зі спеціальними віброгасними ручками.

4) захист від ураження електричним струмом: до головних технічних засобів захисту при дотику до струмопровідних частин технологічного обладнання в цеху відносяться:

- застосування електрообладнання відповідного виконання;

- використання малої напруги;

- застосування відповідної електроізоляції, ізоляційних пристосовувань, захисних огороджень, електроблокування, сигналізації, захисного заземлення.

Захистом від напруги, що з'явився на неструмопровідних частинах технологічного обладнання (металевих корпусах) внаслідок ушкодження ізоляції, служать захисні заземлення та пристрої захисного відключення.

Ізоляційні засоби призначені для електричної ізоляції тіла людини від струмопровідних частин обладнання при контакті із землею або заземлених частин при контакті зі струмопровідними частинами.

Ізолюючі захисні засоби поділяються на основні та додаткові та за класом напруги. Основні електрозахисні засоби здатні витримувати тривалий час робочу напругу. До основних (до 1000 В включно) відносяться: ізолювальні штанги та кліщі, покажчики напруги, електровимірювальні кліщі, діелектричні рукавички та

інструмент з ізольованими ручками. Додаткові – це такі електрозахисні засоби, що самі не забезпечують повну безпеку від ураження електрострумом, але є допоміжною мірою захисту разом з основними. До них відносяться (до 1000 В включно): діелектричне взуття, килими; різноманітні ізолювальні ковпаки, підставки, накладки; плакати та знаки безпеки, переносні заземлюючі пристрої.

5) попереджувальні плакати, знаки безпеки, прилади сигналізації: плакати та написи потрібні для того, щоб нагадати робітникам про небезпеку ураження електрострумом, можливість падіння вантажів з висоти і т.п. Прилади сигналізації бувають – звукові та світлові. Вони попереджають про наближення робітника на небезпечну відстань до механізмів працюючих верстатів.

4.3 Розрахунок заземлювального пристрою цеху

Заземлюючий пристрій цеху споруджується за межами цеху. Вертикальні електроди розміщуються в один ряд і виготовляються зі стальних стержнів діаметром $d = 16,0$ мм і довжиною $l = 2,0$ м. Верхні кінці електродів знаходяться в траншеї глибиною $0,8$ від поверхні землі. Вертикальні електроди з'єднують між собою горизонтальним електродом із стальної смуги 5×45 мм, за допомогою електрозварювання. У місці спорудження заземлювального пристрою ґрунт двошаровий. Природні заземлювачі відсутні, тому приймаємо $R_{\text{п}} = 0$ Ом. Креслення заземлювального пристрою представлено на рис. 4.1.

Згідно ПУЕ [20] опір заземлювального пристрою для електроустановок напругою до 1000 В не повинен бути більшим $4,0$ Ом, тому за розрахунковий опір приймаємо $R_{\text{з}} = 4,0$ Ом. Так як, опір природного заземлювача $R_{\text{п}} = 0$ Ом, то приймаємо $R_i = R_{\text{ш}} = 4,0$ Ом.

Розрахунковий питомий опіри ґрунту, згідно з [21]:

- для горизонтального електроду:

$$\rho_{\text{р.г}} = k_{\text{з.г}} \cdot \rho_{\text{п.в}} = 3,6 \cdot 70 = 252 \text{ Ом·м};$$

де $k_{з.г}$ – коефіцієнт запасу для горизонтальних електродів, що розміщуються в 2-й кліматичній зоні [21].

$\rho_{п.в}$ – питомий опір верхнього шару ґрунту [21];

- для вертикальних електродів:

$$\rho_{р.в} = \rho_{п.н} \cdot k_{п.в} = 500 \cdot 2,6 = 1300 \text{ Ом·м;}$$

де $\rho_{п.н}$ – питомий опір нижнього шару ґрунту [21];

$k_{з.в}$ – коефіцієнт запасу для вертикальних електродів, що розміщуються в 2-й кліматичній зоні [21].

Еквівалентний питомий опір двошарового ґрунту для вертикального стрижневого електрода

$$\rho_{р.в.е} = \frac{l}{\frac{\Delta l_1}{\rho_{р.г}} + \frac{\Delta l_2}{\rho_{р.в}}} = \frac{2}{\frac{0,5}{500} + \frac{1,5}{70}} = 89,2 \text{ Ом·м.}$$

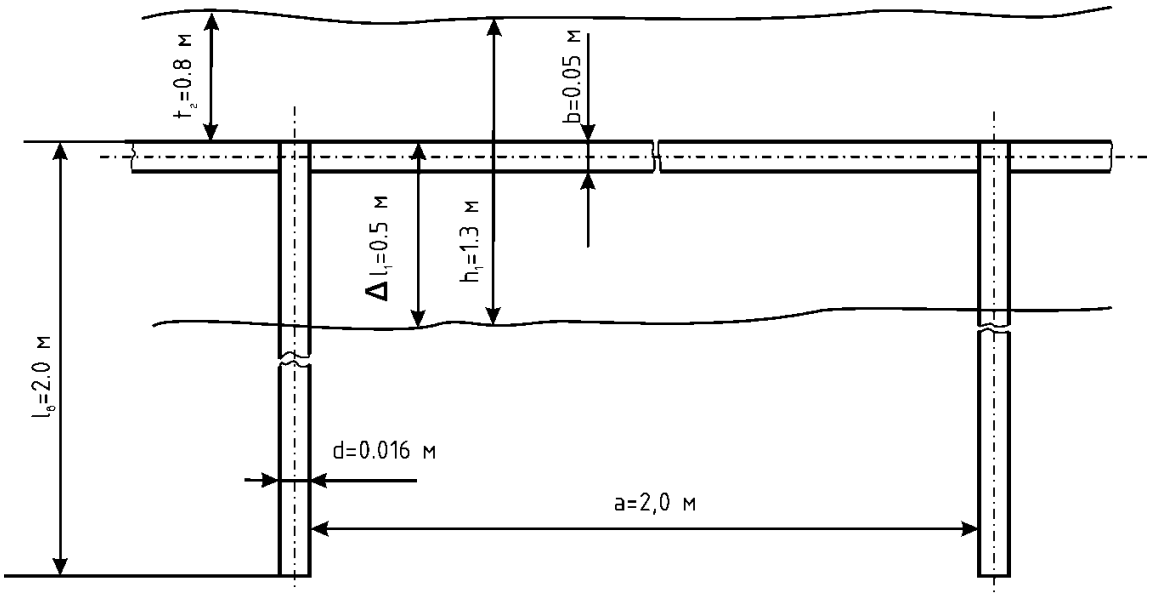


Рисунок 4.1 – Схематичний розріз контуру заземлення

Опір розтікання одного вертикального електрода:

$$R_{\text{в.о}} = \frac{\rho_{\text{р.в.е}}}{2 \cdot \pi \cdot l}\left[\ln\frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2}\ln\frac{4t_1 + l}{4t_1 - l}\right] = \frac{89,2}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,0}\left[\ln\frac{2 \cdot 2}{6 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2}\ln\frac{4 \cdot 1,8 + 2}{4 \cdot 1,8 - 2}\right] =$$
$$= 41,2 \text{ Ом},$$

де t_1 – відстань від верхнього рівня траншеї до середини вертикального електроду:

$$t_1 = t_{\text{г}} + 0,5l = 0,8 + 0,5 \cdot 2,0 = 1,8 \text{ м}.$$

Наближена кількість вертикальних електродів за попередньо прийнятого коефіцієнта використання $k_{i.\text{в}} = 0,6$ [21]:

$$n = \frac{R_{\text{в.о}}}{k_{i.\text{в}} \cdot R_i} = \frac{41,2}{0,6 \cdot 4,0} = 17 \text{ шт}.$$

Розрахунковий опір розтікання горизонтального електроду:

$$R_{\text{г}} = \frac{\rho_{\text{р.г}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{г}} \cdot k_{i.\text{г}}}\ln\left[\frac{2 \cdot l_{\text{г}}^{\,2}}{b \cdot t_{\text{г}}}\right] = \frac{252}{2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 0,58}\ln\left[\frac{2 \cdot 25^2}{0,05 \cdot 0,5}\right] = 35,01 \text{ Ом}.$$

де $k_{i.\text{г}}$ – коефіцієнт використання горизонтального електроду [21].

Уточнене значення потрібного опору вертикальних електродів

$$R_{\text{в}} = \frac{R_{\text{г}} \cdot R_i}{R_{\text{г}} - R_i} = \frac{35,1 \cdot 4,0}{35,1 - 4,0} = 4,5 \text{ Ом}.$$

Уточнена кількість вертикальних електродів за коефіцієнта використання $k_{i.\text{в.у}} = 0,58$ [21]

$$n = \frac{R_{\text{в}}}{k_{i.\text{в.у}} \cdot R_{\text{в}}} = \frac{41,2}{0,58 \cdot 4,51} = 15,7 \text{ шт.}$$

Остаточно приймаємо до установки 16 вертикальних електродів.

Отже, їх опір складе

$$R_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в.о}}}{k_{i.\text{в}} \cdot n} = \frac{41,2}{0,58 \cdot 16} = 4,44 \text{ Ом.}$$

Повний опір контуру заземлення

$$R_{\text{з}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{в}}} + \frac{1}{R_{\text{г}}}} = \frac{1}{\frac{1}{4,44} + \frac{1}{35,0}} = 3,94 \text{ Ом.}$$

Виконуємо перевірку

$$R_{\text{з}} = 3,94 \ < \ R_{\text{з.норм}} = 4,0 \text{ Ом,}$$

перевірка виконується, отже контур заземлення споруджується з 16-ти вертикальних електродів, що з'єднані між собою одним горизонтальним.

4.4 Розрахунок блискавкозахисту

Для здійснення блискавкозахисту цеху обробки каменю на його даху встановлюються два штирові блискавкоприймачі, які приєднуються до його

контуру заземлення. Висота будівлі складає $h_x = 9$ м, тоді висота блискавкоприймача становитиме

$$h_a = h - h_x = 20 - 9 = 11 \text{ м},$$

де h – повна висота блискавкоприймача, м.

Отже, радіус зон захисту r_x на висоті h_x дорівнюватиме:

$$r_x = h_a \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} = 11 \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{9}{20}} = 12,1 \text{ м}.$$

Тоді, найменша ширина зони захисту двох однакових блискавкоприймачів на висоті h_x складе:

$$b_x \approx 2 \cdot r_x \cdot \frac{7 \cdot h_a - a}{14 \cdot h_a - a} = 4 \cdot 12,1 \cdot \frac{7 \cdot 11 - 36}{14 \cdot 11 - 36} = 8,4 \text{ м}.$$

де a – відстань між сусідніми блискавкоприймачами, м.

Перетин зони захисту представлено на рис. 4.2.

Для захисту обладнання цеху обробки каменю від вторинних проявів блискавки, електромагнітної та електростатичної індукції, а також занесення високих потенціалів передбачено наступні заходи:

- захист від потенціалів, що виникають внаслідок дії електростатичної індукції, здійснюється шляхом заземлення всіх електропровідних елементів обладнання та комунікацій;

- захист від іскріння, що викликане електромагнітною індукцією, здійснюється шляхом з’єднання металевими перемичками всіх паралельно розташованих металевих комунікацій;

- для захисту від заносу високих потенціалів всі металеві комунікації та оболонки силових кабелів у місці вводу їх у цех приєднуються до заземлювального пристрою.

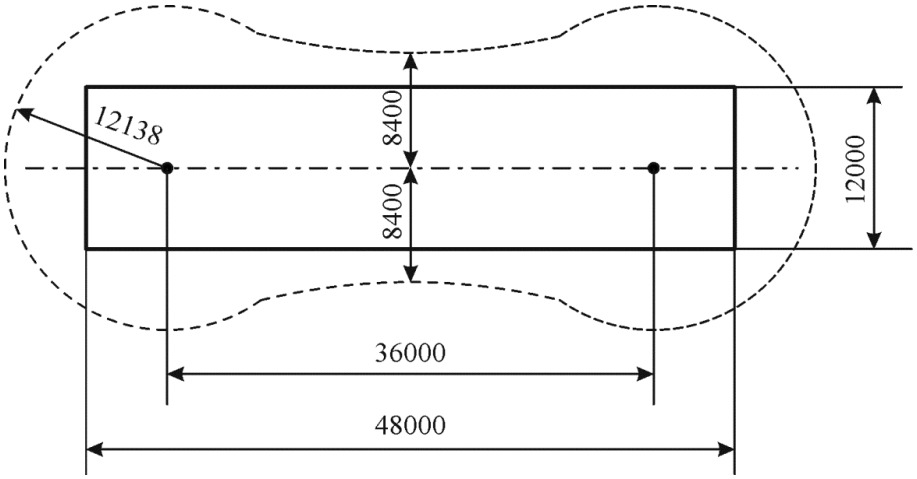


Рисунок 4.2 – Захист будівлі цеху подвійним стержневими блискавковідводом

4.4 Висновки до 4-го розділу

1. Встановлено, що в каменеобробному цеху найбільш небезпечними та шкідливими виробничими факторами є такі: вантажопідйомні машини, електрообладнання; кам’яний пил, виробничий шум до 99 дБА, локальна вібрація.

2. З’ясовано, що з організаційних і технічних заходів, які забезпечують безпеку робіт у каменеобробному цеху, найбільш важливими є наступні: нормалізація повітряного середовища виробничих приміщень, захист від шуму, вібрації, ураження електрострумом, попереджувальні плакати, знаки безпеки, прилади сигналізації.

3. Визначено, що для спорудження заземлювального пристрою з нормативним опором 4 Ом, що знаходиться в двошаровому ґрунті в 2-й кліматичній зоні, достатньо використати 16-ть вертикальних електродів довжиною 2,0 м і один зварний, горизонтальний довжиною 25,0 м.

4. Визначено, що два штирові блискавковідводи висотою 20 м кожен, забезпечують захист цеху від ударів блискавки на висоті 9 м.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання, що спрямоване на розробку електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Сформульовано технічні вимоги до електричної частини 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстату, що враховують особливості його експлуатації. Встановлено, що електричну частину багатошпиндельних фрезерних верстатів складають серводвигуни змінного струму, електроапарати захисту та керування, значна кількість блоків силової електроніки, мережевий дросель. Це обладнання зазвичай розміщується в декількох електрошаф верстату, які є значно теплонавантаженими і, при цьому, експлуатуються в сирих та запилених виробничих приміщеннях.

2. Обґрунтовано доцільність виконання кінематичної схеми верстату на основі 3-х окремих кінематичних ланок осей X, Y, Z і використання мотор-шпинделів з «прямою структурою». Побудова верстату зі спрощеною електромеханічною частиною дозволяє підвищити його коефіцієнт корисної дії, та знизити шум і вібрацію в цілому.

Проаналізовано принцип роботи електричної частини фрезерного верстату на базі розробленої електричної структурної схеми та встановлено взаємозв’язки між його окремими елементами, що дозволило розробити принципову електричну схему верстату з дворівневою структурою розподілу електроенергії та контролем стану всіх приводів і механізмів верстату.

3. Удосконалено математичні моделі руху супортів системи «двигун-рейка» та системи «двигун-КГП» на основі аналізу рівнянь їх повної кінетичної енергії. Аналіз моделі руху супорту системи «двигун-КГП» показав, що діаметр валу КГП прямопропорційний моменту в 4-й степені. Для осі X 61% роботи електродвигуна витрачається для розгону супорту, а для осі Z – 67% на подолання сили тяжіння,

що діє на супорт. На базі розроблених моделей вибрано комплектний сервопривод осей верстата.

Удосконалено методику вибору перетворювача частоти для живлення групи асинхронних двигунів. На основі якої проведено обґрунтований вибір перетворювачів частоти для живлення двох мотор-шпинделів.

4. Встановлено, що в каменеобробному цеху найбільш небезпечними виробничими факторами є вантажопідйомні машини та електрообладнання, а шкідливими – кам’яний пил, виробничий шум до 99 дБА та локальна вібрація. Найбільш дієвими засобами колективного захисту є нормалізація повітряного середовища виробничих приміщень, захист від шуму, вібрації, ураження електрострумом, прилади сигналізації та попереджувальні плакати.

5. Встановлено, що річний економічний ефект від експлуатації 8-шпиндельного фрезерного каменеобробного верстату, електричну частину якого запропоновано в кваліфікаційній роботі, склав 633 тис. грн. при відсутності потреби у додаткових капітальних витратах, що доводить доцільність його впровадження у виробництво.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.

2. ELECNC-1815 Multi-head CNC Router for stone engraving. URL: https://www.cncrouter-shop.com/pro/elecnc-1815-multi-head-cnc-router-with-4-spindles/

3. Multi Spindle 3D Stone CNC Router Machine. URL: https://www.igoldencnc.com/multi-spindle-3d-stone-cnc-router-machine.html.

4. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Затверджено Постанова Головного державного санітарного лікаря України 1 грудня 1999 року № 42.

5. CNC Stone Engraving – 4 Heads Planar Stone Engraving Machine. URL: https://stone-cutting-machine.com/cnc-stone-engraving/.

6. Черекбашев Р., Хаймин В. Расчет теплового баланса при установке синусоидальных фильтров в шкафы управления с частотными преобразователями / Р. Черекбашев, В. Хаймин // Силовая Электроника, № 3, 2015. С. 25-28.

7. Інноваційне конструювання обробного обладнання та спеціалізованих роботів: Обладнання для обробки природного каменю. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.

8. Основи електроприводу: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. Ю. Синявський, В. В. Савченко; за ред. Ю. М. Лавріненка. – К.: 2010. – 409 с.

9. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода / Чиликин М.Г., Сандлер А.С. – М: Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.

10. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.

11. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. – 36 с.

12. Гук Ю. Б., Казак Н. А., Мясников А. В. Теория и расчет надёжности систем электроснабжения / под. ред. Р. Я. Федосенко. М.: Энергия, 1970. – 176 с.

13. Research on Mathematical Model and Cutting Characteristics in Machining of Natural Marble by Diamond Coated Tool / Guangyu Yan, Yuhou Wu, He Wang, Dehong Zhao, Feng Lu // Mechanika, 2019. – Vol. 25(2). – p. 165-171.

14. Gencay Sariisik. Force and Specific Energy in Natural Rocks Cutting by Four-Axis Machine, Earth Crust / Gencay Sariisik, ed. Muhammad Nawaz and Farha Sattar and Sandeep Narayan Kundu // IntechOpen, 23.05.2019 p. 1-20.

15. Сервоприводи і серводвигуни серії ASD-B2. Елетронний ресурс. URL: https://delta-electronics.com.ua/ua/g3806312-servoprivody-servodvigateli-serii.

16. Шпинделі для обробки каменю та металу. Електронний ресурс. URL: https://cnc.prom.ua/ua/p1005474845-shpindel-gdk125-24z55.html.

17. DDCS Series Motion Controller. Електронний ресурс. URL: http://www.ddcnc.com/?m=home&c=View&a=index&aid=154&lang=en.

18. ДСТУ EN 60204-1:2019 Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2018, IDT; IEC 60204-1:2016, MOD). Дата прийняття 23.12.2019 р. Дата початку дії 01.01.2020 р.

19. Михайлов, М. И. Конструирование и расчет станков: учеб. пособие / М. И. Михайлов. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 418 с.

20. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Вид-во «Форт», 2017. – 760 с.

21. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / под. общ. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. – М.: Энергия, 1980. – 576 с.

ДОДАТОК А. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ВЕРСТАТА

Оцінка доцільності розробки 8-ми шпиндельного каменеобробного верстата проводиться на основі інформації про ринок фрезерних каменеобробних верстатів з ЧПК. Використовуючи встановлені критерії вибирається найближчий верстат-аналог та його оптова ціна. Далі проводиться економічне порівняння базового та запропонованого варіантів. Для його виконання необхідно визначити повну собівартість і оптову ціну запропонованого варіанту, річні експлуатаційні витрати обох варіантів. На основі отриманих даних проводиться розрахунок показників економічної ефективності – річний економічний ефект від застосування фрезерного верстату з запропонованою електричною частиною.

А.1 Загальні вихідні дані

Для вирішення питання щодо економічної ефективності використання 8-шпиндельного фрезерного каменеобробного верстату, у складі якого застосовано розроблену в даній роботі електричну частину, необхідно обрати базу для порівняння, яку приймають за основу для виявлення техніко-економічних переваг нового технічного рішення і визначення економічного ефекту від впровадження його у виробництво.

У якості бази для порівняння приймемо варіант фрезерної обробки поверхні барельєфу із природного каменю (граніту) на 4-шпиндельному верстаті. Застосування в новому верстаті розробленої електричної частини на основі використання більш потужних електродвигунів та 8 мотор-шпинделів GDK125-18-24Z/5.5 потужністю 5,5 кВт кожний, дозволить одночасно проводити 3D-фрезерування поверхні барельєфу 8-ма фрезами і тим самим підвищивши продуктивність обробки заготовок.

Загальні вихідні дані для розрахунку зведено до табл. А.1.

Таблиця А.1 – Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Програма випуску виробів	шт./рік	450	450
2.	Штучний час обробки виробу	год.	17,0	8,5
3.	Площа, яку займає верстат	$м^2$	3,70	6,93
4.	Встановлена потужність електродвигунів верстата	кВт	28,0	52,5
6.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частин	УРО	15/22	18/40
7.	Розряд роботи оператора	розряд	4	5
8.	Оптова ціна верстата	грн.	1252500	-

А.2 Визначення повної собівартості та оптової ціни нового верстата

Повну собівартість верстата розраховуємо за статтями калькуляції:

$$C_{\text{пов}} = M_{\text{о}} + M_{\text{д}} + T_{\text{в}} + З_{\text{ор}} + З_{\text{др}} + B_{\text{с}} + B_{\text{о}} + B_{\text{цех}} + B_{\text{з}} + B_{\text{ін}} + B_{\text{пв}}, \quad \text{(А.1)}$$

де $M_{\text{о}}$ – витрати на основні матеріали та покупні комплектуючі, грн.

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні комплектуючі вироби представлено в табл. А.2. Витрати на основні матеріали та покупні комплектуючі механічної частини верстата узято укрупнено за даними підприємства.

$M_{\text{д}}$ – витрати на додаткові матеріали, грн.;

$T_{\text{в}}$ – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$З_{\text{ор}}$ – основна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$З_{\text{др}}$ – додаткова заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$B_{\text{с}}$ – єдиний соціальний внесок, грн.;

$B_{\text{о}}$ – витрати на утримання та експлуатацію обладнання, грн.;

$B_{\text{цех}}$ – цехові витрати, грн.;

$B_{\text{з}}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{\text{ін}}$ – інші виробничі витрати, грн.;

$B_{\text{пв}}$ – позавиробничі витрати, грн.

Таблиця А.2 – Матеріальні витрати на виготовлення 8-ми шпиндельного каменеобробного фрезерного верстата

№ п/п	Покупні комплектуючі вироби	Кіль-кість	Оптова ціна, грн.	Вартість, грн.
1.	Матеріали основні для виготовлення деталей механічної частини			1680
2.	Покупні комплектуючі механічної частини верстата			192500
3.	Блок ЧПУ			28000
4.	Покупні комплектуючі електричної частини, у тому числі:			965451
4.1	Щит електричний 1800х800х400	1	14112	14112
4.2	Щит електричний 1000х700х300	1	5040	5040
4.3	Сервопідсилювач ASD-B2-2023-B	3	39248	117744
4.4	Електродвигун ECMA-J11020RS 2 кВт	3	45222	136567
4.5	Сервопідсилювач ASD-B2-3023-B	1	44770	44770
4.6	Електродвигун ECMA-E11835RS 3 кВт	1	43845	43845
4.7	Редуктор до серводвигуна	2	23310	46620
4.8	Перетворювач частоти VFAS3-4150PC	4	54908	219632
4.9	Дросель ED3N-0.1/150	1	16146	16146
4.10	Мотор-шпиндель GDK125-18-24Z/5.5	8	32360	258880
4.11	Автоматичний вимикач ВА88-35 (200 А)	1	3123	3123
4.12	Автоматичний вимикач ВА88-33 (160 А)	1	1835	1835
4.13	Автоматичний вимикач ВА47-29 (40 А)	4	251	1004
4.14	Автоматичний вимикач ВА47-29 (25 А)	4	236	943
4.15	Автоматичний вимикач ВА47-29 (2-8 А)	3	190	570
4.16	Блок-контакт авт. вимикача	13	140	1820
4.17	Контактор МКИ-10610	2	465	930
4.18	Теплові реле РТИ-1322	10	290	2900
4.19	Кабель ZR-RVVP 4х35	18	1460	26280
4.20	Кабель ZR-RVVP 4х10	10	472	4720
4.21	Кабель ZR-RVVP 4х6	25	250	6250
4.22	КГНВ 4х0,75	20	8	160
4.23	Провід ПВ-3	80	4,5	360
4.24	Гнучкий кабель-канал 50х100	8	1400	11200
	Всього покупних комплектуючих			1185951

Після визначення трудомісткості виготовлення верстату розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{\text{ор}} = \sum_{i=1}^{n} C_{\text{г(i)}} \cdot T_{\text{i}} , \qquad \text{(А.2)}$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

$C_{\text{г}(i)}$ – середня годинна тарифна ставка робітників, які виконують i-й вид робіт з урахуванням умов праці, грн./год.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на електромонтажних роботах:

$$З_{\text{ор}}^{\text{ем}} = 28,0 \cdot 57,185 = 1601,18 \,\text{грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_{\text{о}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор}_i} \cdot \frac{П_{\text{во}_i}}{100} , \qquad \text{(А.3)}$$

де $П_{\text{во}i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на електромонтажних роботах:

$$B_{\text{о}}^{\text{ем}} = 1601,18 \cdot \frac{150}{100} = 2401,77 \,\text{грн.}$$

в) цехові витрати:

$$B_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор}_{\text{i}}} \cdot \frac{П_{\text{цв}_{\text{i}}}}{100} , \qquad \text{(А.4)}$$

де $П_{цві}$ – процент цехових витрат по кожному *і*-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для електромонтажних робіт:

$$B_{цех}^{ем} = 1601{,}18 \cdot \frac{132}{100} = 2113{,}56 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. А.3.

Таблиця А.3 – Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, включені до собівартості виготовлення верстата

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Годинна тарифна ставка робітників, грн./год.	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, $B_о$		Цехові витрати $B_{цех}$	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	25,0	4	66,354	1658,85	220	3649,47	132	2189,68
Механічні	285,0	4	57,185	16297,73	280	45633,63	132	21513,00
Термічні	18,0	3	58,032	1044,58	310	3238,19	182	1901,13
Складальні	590,0	4	57,185	33739,15	150	50608,73	142	47909,59
Електромонтажні	28,0	4	57,185	1601,18	150	2401,77	132	2113,56
Фарбувальні	5,0	2	45,319	226,60	110	249,25	120	271,91
Пакувальні	12,0	2	41,935	503,22	110	553,54	120	603,86
Інші	18,0	3	51,466	926,39	180	1667,50	140	1296,94
Всього	981,0	-	-	55997,68	-	108002,1	-	77799,68

Розрахунок інших статей калькуляції, а також повної собівартості верстата та його оптової ціни зведено до табл. А.4.

Таблиця А.4 – Повна собівартість та оптова ціна верстата

№ п.п.	Стаття калькуляції	Позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн
1.	Матеріали основні	$М_о$	табл. А.2	1680,00
2.	Матеріали допоміжні	$М_д$	4% від $М_о$	67,20
3.	Покупні комплектуючі вироби	$П_н$	табл. А.2	1185951,00
4.	Зворотні відходи (віднімаються)	$–В_{зв}$	6% від $М_о$	100,80
5.	Транспортно-заготівельні витрати	$Т_в$	5% від $(М_о + М_д + П_н)$	47507,93
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}$, $Е_{тех}$	78,8% від $З_{ор}$	44126,17
7.	Всього матеріальні витрати			1279231,50
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. А.3	55997,68
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	5599,77
10.	Єдиний соціальний внесок	$В_с$	22,0% від $(З_{ор} + З_{др})$	13551,44
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$В_о$	табл. А.3	108002,08
13.	Цехові витрати	$К_{цех}$	табл. А.3	77799,68
14.	Загальнозаводські витрати	$К_{зав}$	220% від $З_{ор}$	100795,83
15.	Інші виробничі витрати	$В_{ін}$	1,43% від $З_{ор}$	671,97
16.	Виробнича собівартість	$С_{вир}$	Σст. (7 ÷ 15)	1641649,95
17.	Позавиробничі витрати	$К_{пв}$	1% від $С_{вир}$	16416,50
18.	Повна собівартість	$С_{пов}$	$С_{вир} + К_{пв}$	1658035,71
19.	Прибуток	$П_н$	20% від $С_{пов}$	198964,29
20.	Оптова ціна	$Ц_{опт}$	$С_{пов} + П_н$	1857000,0

Оптову ціну верстата розраховуємо за формулою:

$$Ц_{опт} = С_{пов} \cdot \left[1 + \frac{П_{пн}}{100}\right], \qquad (А.5)$$

де $С_{пов}$ – повна собівартість верстата, грн.

$П_{пн}$ – процент нормативного прибутку (рентабельність верстата), %.

$$Ц_{опт} = 1658035,71 \cdot (1 + 12/100) = 1857000 \text{ грн.}$$

А.3 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Визначення експлуатаційних витрат будемо проводити за умови роботи верстата протягом року для двох варіантів: базового (4-шпиндельного верстата), та нового (8-шпиндельного). До розрахунку включаються лише ті статті витрат, які відрізняються у порівнюваних варіантах. Кошторис річних експлуатаційних витрат розраховується за такими статтями:

– основна та додаткова заробітна плата оператора з відрахуваннями на соціальні потреби;

– витрати на електроенергію силову;

– витрати на допоміжні матеріали;

– витрати на ремонт;

– витрати на утримання приміщення;

– амортизаційні відрахування;

– витрати на налагодження верстата.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування:

$$B_{\text{з}} = C_{\text{г}} \cdot T_{\text{нор}} \cdot \left(1 + K_{\text{д}}\right) \cdot \left(1 + K_{\text{с}}\right), \qquad \text{(А.6)}$$

де $C_{\text{г}}$ – годинна тарифна ставка робітника, грн./год.;

$T_{\text{нор}}$ – час обробки одного виробу, год.;

$K_{\text{д}}$, $K_{\text{с}}$ – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби.

У базовому варіанті:

$$B_{\text{з}}^{\text{баз}} = 57{,}185 \cdot 17{,}0 \cdot \left(1 + 0{,}1\right) \cdot \left(1 + 0{,}22\right) = 1465{,}02 \text{ грн.}$$

У проектному варіанті:

$$B_{\text{з}}^{\text{пр}} = 57{,}185 \cdot 8{,}5 \cdot \left(1 + 0{,}1\right) \cdot \left(1 + 0{,}22\right) = 732{,}51 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{N}} \cdot K_{\text{д}}}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{с}}} \cdot T_{\text{нор}} \cdot Ц_{\text{ел}}, \qquad \text{(А.7)}$$

де $N_{\text{в}}$ – встановлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

$K_{\text{о}}$ – коефіцієнт одночасної роботи двигунів (приймають 0,65...0,8);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для фрезерних верстатів – 0,6...0,7);

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом (приймають 0,4);

$\eta_{\text{с}}$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів – 0,86;

$\eta_{\text{м}}$ – коефіцієнт, який враховує втрати електроенергії в мережі підприємства;

Цел – ціна 1 кВт-год силової електроенергії без ПДВ, грн.

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{28,0 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot 17,0 \cdot 4,5 = 538,06 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{52,5 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot 8,5 \cdot 4,5 = 470,80 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{нор}}}{100} \cdot K_{\text{п}}, \qquad \text{(А.8)}$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$К_{п}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для дрібносерійного $К_{п} = 0,85$).

$$B_{дм}^{баз} = \frac{79,5 \cdot 15 \cdot 17,0}{100} \cdot 0,85 = 172,32 \text{ грн.};$$

$$B_{дм}^{пр} = \frac{79,5 \cdot 20 \cdot 8,5}{100} \cdot 0,85 = 114,88 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{р} = \frac{R_{м} \cdot Г_{вм} + R_{е} \cdot Г_{ве}}{F_{дрм}} \cdot T_{нор}, \qquad (А.9)$$

де $Г_{вм}$, $Г_{ве}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин верстата, грн./рік;

$F_{дрм}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3950 год.).

$$B_{р}^{баз} = \frac{15 \cdot 880 + 22 \cdot 720}{3950} \cdot 17,0 = 124,98 \text{ грн.};$$

$$B_{р}^{пр} = \frac{20 \cdot 880 + 40 \cdot 720}{3950} \cdot 8,5 = 99,85 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{уп} = \frac{F_{о} \cdot K_{д} \cdot C}{F_{дрм}} \cdot T_{нор}, \qquad (А.10)$$

де $F_{о}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2;

$K_д$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення):

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м^2 виробничого приміщення, грн./м^2.

$$B_{уп}^{баз} = \frac{3,7 \cdot 3,5 \cdot 17,0}{3950} \cdot 780 = 43,47 \text{ грн.};$$

$$B_{уп}^{пр} = \frac{6,93 \cdot 2,5 \cdot 780 \cdot 8,5}{3950} = 29,08 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_а = \frac{Ф_{бал} \cdot Н_а}{F_{дрм} \cdot 100} \cdot T_{нор}, \quad (А.11)$$

де $Н_а$ – норма амортизації, %;

$Ф_{бал}$ – балансова вартість верстата, грн.

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$Ф_{бал} = Ц_{опт} \cdot \left(1 + К_{тр} + К_м + К_Ф\right), \quad (А.12)$$

де $Ц_{опт}$ – оптова ціна верстата, грн.;

$К_{тр}$, $К_м$, $К_Ф$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

Таким чином, балансова вартість:

– базового верстата:

$$Ф_{бал}^{баз} = 1252500 \cdot \left(1 + 0,06 + 0,05 + 0,05\right) = 1452900 \text{ грн.},$$

– нового верстата:

$$Ф_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 1857000 \cdot (1 + 0,06 + 0,05 + 0,05) = 2154120 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{1452900 \cdot 15 \cdot 17,0}{3950 \cdot 100} = 937,95 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{пр}} = \frac{2154120 \cdot 15 \cdot 8,5}{3950 \cdot 100} = 695,33 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. А.5.

Таблиця А.5 – Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні потреби	$B_{\text{з}}$	1465,02	732,51
2	Силова електроенергія	$B_{\text{ел}}$	538,06	470,80
3	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	172,32	114,88
4	Ремонт обладнання	$B_{\text{р}}$	124,98	99,85
5	Утримання приміщення	$B_{\text{уп}}$	43,47	29,08
6	Амортизація обладнання	$B_{\text{а}}$	937,95	695,33
Загальна сума		$B_{\text{е}}$	3281,80	2142,45

А.4 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від застосування 8-шпиндельного фрезерного каменеобробного верстату:

$$E_{\text{р}} = \left(B_{\text{е.баз}} - B_{\text{е.пр}} \right) \cdot N - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{д}},$$

де $B_{\text{е.баз}}$, $B_{\text{е.пр}}$ – величина експлуатаційних витрат відповідно у базовому і новому варіанті;

N – річна програма виготовлення виробів, шт./рік;

$E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних капіталовкладень. $E_{\text{н}} = 0{,}25$;

$K_{\text{д}}$ – додаткові капітальні витрати, грн.:

$$K_{\text{д}} = \Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} \cdot Q_{\text{пр}} - \Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} \cdot Q_{\text{баз}}, \qquad \text{(А.13)}$$

$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}}, \Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}}$ – відповідно балансова вартість проектного та базових верстатів, грн.;

$Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{баз}}$ – потреба у верстатах для виконання річної виробничої програми виготовлення деталей.

Розрахункову потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_{\text{д}} \cdot T_{\text{нор}}}{F_{\text{дрм}} \cdot k_{\text{в}}}, \qquad \text{(А.14)}$$

де $k_{\text{в}}$ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

$$Q_{баз} = \frac{450 \cdot 17{,}0}{3950 \cdot 1{,}01} = 1{,}9\,;\; Q_{пр} = \frac{450 \cdot 8{,}5}{3950 \cdot 1{,}01} = 0{,}96\,.$$

Таким чином, для виконання річної виробничої програми випуску виробів у базовому варіанті потрібно два 4-шпинделних верстата, в проектному – один 8-шпиндельний.

$$K_{\text{д}} = 2154120 \cdot 1 - 1452900 \cdot 2 = -751680 \text{ грн.}$$

$$E_p = \left(3281{,}80 - 2142{,}45\right) \cdot 450 - 0{,}16 \cdot (-751680) = 633000 \text{ грн.}$$

А.5 Висновки

1. Встановлено, що оптова ціна 4-х шпиндельного фрезерного каменеобробного верстата з ЧПК прийнятого за базовий варіант складає 1250000 грн.

2. Визначено, що повна собівартість нового верстата складає 1658035,71 грн., а його оптова ціна – 1857000,0 грн.

3. Встановлено, що річні експлуатаційні витрати визначені за статтями, що відрізняються в порівнюваних варіантах для нового верстата менші від базового на 1139,35 грн.

4. Річний економічний ефект від експлуатації 8-шпиндельного фрезерного каменеобробного верстату, електричну частину якого запропоновано у даній кваліфікаційній роботі, склав 633 тис. грн. при відсутності потреби у додаткових капітальних витратах, що доводить доцільність його впровадження у виробництво.