

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему **Розроблення приводу шпинделя трикоординатного фрезерного**

верстату

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Лобода Є.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Трет'як А.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2023 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра

«Розроблення приводу шпинделя трикоординатного фрезерного верстату»

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 48 сторінок, 11 рисунків, 7 таблиць, 13 джерел.

Ключові слова; Електропривод, частотний перетворювач, осьовий двигун, фрезерний верстат, привід шпинделя.

Об'єктом розроблення кваліфікаційної роботи є привод шпинделя трикоординатного фрезерного верстату, керування якого приводиться за допомогою головного приводу, осьових двигунів, шафи ЧПК, частотного перетворювача.

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є розроблення ефективного приводу шпинделя для трикоординатного фрезерного верстата, який забезпечує високу точність та продуктивність обробки деталей.

У роботі буде проведено аналіз існуючих видів фрезерних верстатів, та сфера їх застосування, обчислення характеристик головного електроприводу та підбір його елементів, вибір двигуна головного приводу та системи керування, обчислення та проектування природних механічних та електромеханічних параметрів мотора, розрахунок механічних та електромеханічних характеристик системи.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання на даному підприємстві.

ABSTRACT

bachelor's qualification work

«Development of a spindle drive of a three-coordinate milling machine»

The bachelor's thesis contains 48 pages, 11 figures, 7 tables, 13 sources.

Keywords; Electric drive, frequency converter, axial motor, milling machine, spindle drive.

The object of development of the qualification work is the drive of the spindle of a three-coordinate milling machine, which is controlled by the main drive, axial motors, the CNC cabinet, and the frequency converter.

The aim of the bachelor's qualification work is to develop an efficient spindle drive for a three-axis milling machine, which ensures high accuracy and productivity of processing parts.

The paper will analyze the existing types of milling machines and their scope of application, calculate the characteristics of the main electric drive and select its elements, choose the main drive engine and control system, calculate and design the natural mechanical and electromechanical parameters of the motor, calculate the mechanical and electromechanical characteristics of the system.

The work has practical value and its results after more detailed refinement can be considered for use at this enterprise.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1 Види фрезерних верстатів	8
1.2 Застосування вертикальних фрезерних верстатів переваги та недоліки	9
1.3 Застосування горизонтальних фрезерних верстатів переваги та недоліки	12
1.4 Застосування числових та універсальних фрезерних верстатів переваги та недоліки	15
РОЗДІЛ 2 ВИБІР ДВИГУНА ГОЛОВНОГО ПРИВОДУ ТА ПІДБІР ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ	
2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна	18
2.2 Побудова навантажувальної діаграми	22
2.3 Підбір частотного перетворювача	27
2.4 Підбір кабелів і елементів захисту	31
2.5 Вибір схеми керування	36
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	
3.1 Розрахунок та побудова природної механічної характеристики	39
3.2 Розрахунок та побудова штучних механічних характеристик (1,5f, 2f, 2,5f)	42
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	47
ДОДАТКИ	

ВСТУП

У сучасних умовах виробництва одним з найважливіших елементів в механічних виробках є точність обробки деталей. Одним із засобів досягнення високої точності обробки є застосування трикоординатних фрезерних верстатів. Ці верстати здатні виконувати складні операції обробки деталей в трьох координатних напрямках.

Одним з ключових елементів такого верстата є привід шпинделя, який забезпечує необхідну швидкість обертання і точність руху шпинделя. Розроблення ефективного приводу шпинделя є актуальною та важливою задачею для покращення якості та продуктивності трикоординатного фрезерного верстата. Розробка приводу шпинделя трикоординатного фрезерного верстата має велике значення для підвищення точності та продуктивності обробки деталей, що дозволить знизити витрати на виробництво та підвищити конкурентоспроможність підприємств, оскільки саме від якості та ефективності роботи приводу залежить точність та якість обробки матеріалів. Для досягнення максимального рівня точності та продуктивності необхідно розробити привід шпинделя, який забезпечує стабільну роботу верстата за будь-яких умов.

Отже, розробка приводу шпинделя трикоординатного фрезерного верстату є актуальною та важливою проблемою для підвищення продуктивності та точності обробки деталей.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, теоретичної частини, де розглянуті основні принципи роботи приводів шпинделів трикоординатних фрезерних верстатів, розділу, присвяченого для обчислення характеристик головного електроприводу та підбір його елементів, результатів дослідження та їх аналізу, висновків та списку використаних джерел.

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є розроблення ефективного приводу шпинделя для трикоординатного фрезерного верстата, який забезпечує високу точність та продуктивність обробки деталей. У роботі буде проведено аналіз існуючих видів фрезерних верстатів, та сфера їх застосування, обчислення характеристик головного електроприводу та підбір його елементів, вибір двигуна головного приводу та системи керування, обчислення та проектування природних механічних та електромеханічних параметрів мотора, розрахунок механічних та електромеханічних характеристик системи.

Результатом кваліфікаційної роботи бакалавра буде розроблення приводу шпинделя для трикоординатного фрезерного верстата, оцінка його ефективності та точності обробки деталей.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Види фрезерних верстатів

Фрезерний верстат — металообробний верстат, призначений для обробки фрезою плоских і фасонних поверхонь, тіл обертання, зубчастих коліс та інших заготовок. Деталь, закріплена на столі, робить поступальний рух (криволінійний або прямолінійний), при цьому фреза робить обертовий рух. Керування металорізальним верстатом здійснюється вручну, механічно або автоматично за допомогою системи ЧПК.

Існує багато різних видів фрезерних верстатів, але основні можна класифікувати за наступними критеріями:

1. Тип обробки: вертикальний, горизонтальний, універсальний (дозволяє обробляти деталі в обох напрямках) та спеціалізовані (наприклад, фрезерні верстати для виробництва зубних коліс).

2. Тип кріплення інструменту: ручне (для одиночних операцій), автоматичне (для масового виробництва), або числове керування (CNC), де рухи інструменту програмуються на комп'ютері.

3. Розмір робочої поверхні: стіл може бути стаціонарним або обертається, а також мати різні розміри та конфігурації.

4. Точність: високопрецизійні верстати забезпечують дуже точну обробку з високою повторюваністю, а також можуть включати опції автоматичного контролю та корекції.

Деякі приклади фрезерних верстатів за цими критеріями:

Вертикальний фрезерний верстат: інструмент вертикально закріплюється та рухається вздовж осі Z, а деталь розміщується на горизонтальному столі.

Горизонтальний фрезерний верстат: інструмент закріплюється горизонтально та рухається вздовж осі X, а деталь розміщується на вертикальному столі.

Числовий фрезерний верстат: має систему числового керування (CNC), що дозволяє програмувати точні рухи інструменту та отримувати повторювані результати.

1.2 Застосування вертикальних фрезерних верстатів переваги та недоліки

Вертикальний фрезерний верстат - це тип фрезерного верстата, в якому інструмент для фрезерування знаходиться в вертикальному положенні. Вертикальний фрезерний верстат може мати стіл, який рухається вздовж трьох осей, тобто X, Y та Z, що дозволяє обробляти різноманітні деталі з високою точністю. У вертикальному фрезерному верстаті, інструмент для фрезерування розміщується на шпинделі, який може бути обертований на різні кути для забезпечення необхідного кута нахилу інструменту для різання. Інструмент для фрезерування зазвичай з'єднаний з електродвигуном через ремінну передачу або безпосередньо з головним валом. Вертикальні фрезерні верстати можуть використовуватись для різних завдань, таких як фрезерування отворів, профілів, розташування пазів, плоскість поверхні та обробки кінців деталей. Вони широко використовуються в промисловості для виробництва деталей та виробів з різних матеріалів, включаючи метали, пластик та дерево.

Вертикальні фрезерні верстати можуть бути обладнані різноманітними аксесуарами, такими як кутові головки, розширювачі, пристосування для обробки кутів, пристрої для фрезерування випуклих поверхонь, цифрові відображення та інші. Ці аксесуари можуть збільшити функціональність та

ефективність верстату. Вертикальні фрезерні верстати можуть бути з ручним керуванням, але все частіше вони обладнуються комп'ютерним керуванням (CNC), що дозволяє автоматизувати процеси обробки та підвищити точність та продуктивність.

Основні переваги вертикальних фрезерних верстатів такі:

1. Більш висока точність і якість обробки: Вертикальні фрезерні верстати забезпечують більш високу точність і якість обробки, оскільки вони дозволяють розташовувати деталі більш стійко і забезпечують легкий доступ до місць обробки.

2. Більш широкий діапазон робочих операцій: Вертикальні фрезерні верстати можуть виконувати ширший діапазон робочих операцій, включаючи фрезерування, свердління, розвертання, нарізання різьби, вирівнювання і різання профілювання.

3. Можливість обробки великих деталей: вертикальні фрезерні верстати також можуть обробляти великі деталі, хоча, порівняно з горизонтальними верстатами, можуть мати обмеження на розмір деталей.

4. Ефективна витрата енергії: Вертикальні фрезерні верстати є більш ефективними в споживанні енергії, оскільки при праці вони споживають менше енергії, ніж горизонтальні фрезерні верстати.

5. Більш висока продуктивність: Вертикальні фрезерні верстати зазвичай мають більш високу продуктивність, оскільки вони здатні виконувати більш широкий діапазон робочих операцій і обробляти більші деталі.

Ці переваги зазвичай роблять вертикальні фрезерні верстати більш популярними серед виробників та використовувачів, які шукають найбільш ефективні та якісні методи обробки деталей.

Незважаючи на багато переваг вертикальних фрезерних верстатів, вони мають кілька недоліків, серед яких можна виділити наступні:

1. Обмежена робоча зона: більшість вертикальних фрезерних верстатів мають обмежену робочу зону, що може обмежувати можливості обробки великих деталей.

2. Обмеження відносно типів оброблюваних матеріалів: вертикальні фрезерні верстати можуть мати обмеження відносно типів матеріалів, які можна обробляти, оскільки не всі матеріали можуть бути оброблені з високою якістю і без ризику псування інструменту.

3. Потребують високої кваліфікації оператора: вертикальні фрезерні верстати з комп'ютерним керуванням вимагають високої кваліфікації оператора для належного програмування та ефективного використання.

4. Вартість: вертикальні фрезерні верстати можуть бути досить дорогими, зокрема, якщо потрібно придбати додаткові аксесуари та обладнання.

5. Потребують додаткового простору: вертикальні фрезерні верстати можуть потребувати значного простору для їх встановлення та ефективного використання, що може бути проблематичним для невеликих промислових підприємств або майстерень.

Узагалі, при виборі вертикального фрезерного верстата важливо зважати на його переваги та недоліки, а також на специфіку потреб виробництва, щоб забезпечити найбільш оптимальний вибір.

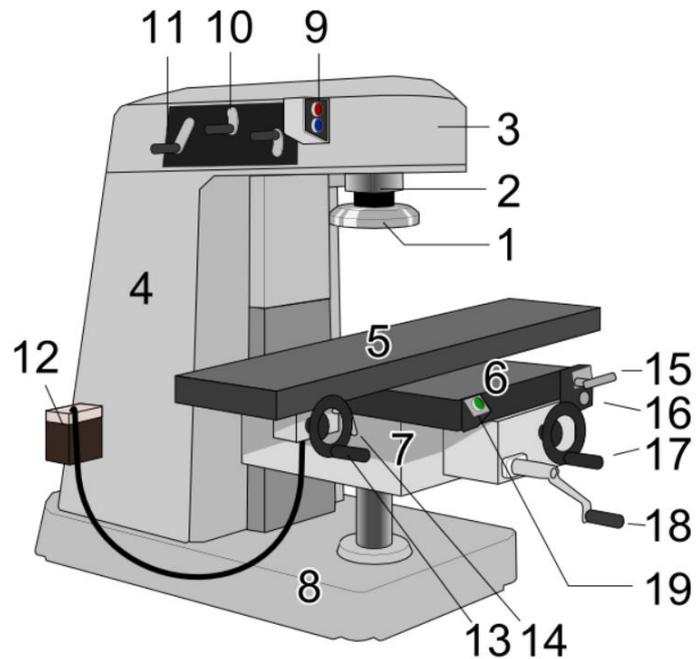


Рисунок 1.1 – Вертикальний фрезерний верстат (1. Торцева фреза 2. Шпиндель 3. Головка шпинделя 4. Колонка 5. Стіл 6. Сідло 7. Коліно 8. Основа 9. Перемикач шпинделя 10. Важіль перемикання швидкості шпинделя 11. Важіль керування швидкістю шпинделя 12. Масляний бак 13. Ручне колесо столу 14. Фіксатор столу 15. Ручка автоматичного переміщення сідла 16. Диск керування автоматичним переміщенням сідла 17. Ручне колесо сідла 18. Колінне ручне колесо 19. Кнопка швидкого доступу)

1.3 Застосування горизонтальних фрезерних верстатів переваги та недоліки

Горизонтальний фрезерний верстат - це тип верстату, що використовується для обробки металів, деревини та інших матеріалів. Горизонтальні фрезерні верстати використовуються для виготовлення складних деталей, в яких необхідні точні форми та розміри. Вони мають горизонтальну робочу поверхню, на якій розміщуються деталі для обробки.

Горизонтальні фрезерні верстати застосовуються в різноманітних галузях виробництва, таких як автомобільна промисловість, авіаційна промисловість, машинобудування, суднобудування, виготовлення залізничного обладнання, металургійна промисловість та інші. За допомогою горизонтальних верстатів можна обробляти деталі різних форм та розмірів з металів, пластмас, деревини та інших матеріалів. Вони використовуються для виготовлення різноманітних деталей, таких як кулісні механізми, шестерні, зубчасті колеса, шпindelні корпуси, вали, корпуси редукторів та інші.

Також, горизонтальні верстати можуть бути використані для виконання різноманітних операцій, таких як свердління, фрезерування, різання, шліфування та інші, що робить їх дуже універсальними виробничими інструментами.

Однією з головних переваг горизонтальних фрезерних верстатів є їх відносна простота у використанні та обслуговуванні. Також, горизонтальні верстати можуть бути більш ефективними для обробки деталей з великою шириною та малою глибиною, тоді як вертикальні верстати краще підходять для обробки деталей з великою глибиною та малою шириною. До інших переваг горизонтальних верстатів можна віднести їх відносну стійкість до вібрації та більш високу точність обробки при великих завантаженнях. Також, у деяких випадках горизонтальні верстати можуть бути більш економічними в експлуатації, особливо якщо вони використовуються для обробки деталей масового виробництва.

Недоліки горизонтальних фрезерних верстатів:

1. Складність налаштування: Налаштування горизонтальних фрезерних верстатів може бути складним процесом, особливо для складних деталей зі складними формами.

2. Висока вартість: Горизонтальні фрезерні верстати можуть бути дорожчими в порівнянні з вертикальними фрезерними верстатами, що може бути проблемою для бізнесів з обмеженим бюджетом.

3. Горизонтальні верстати мають меншу універсальність в порівнянні з вертикальними, так як не підходять для багатьох видів обробки.

4. Високі витрати на обслуговування. Горизонтальний верстат може бути складним у технічному обслуговуванні та ремонті через більш складну конструкцію і більшу кількість деталей, що потребують заміни.

Вибір між вертикальним і горизонтальним фрезерним верстатом залежить від конкретної задачі, яку потрібно вирішити. Кожен з цих типів верстатів має свої переваги і недоліки, але взагалі обидва вони є універсальними виробничими інструментами і можуть виконувати багато операцій з різноманітними матеріалами. Зокрема, горизонтальні верстати зазвичай використовуються для фрезерування плоских поверхонь та виготовлення деталей з великою довжиною або шириною. Вони також можуть виконувати операції з прецизійної обробки, такі як гравіювання і шліфування. Вертикальні верстати, з іншого боку, зазвичай використовуються для виготовлення деталей зі складними формами, обробки отворів та глибоких пазів, а також для свердління, фрезерування, різання та інших операцій.

Отже, обидва типи верстатів можуть бути універсальними в залежності від конкретних потреб і завдань виробництва.

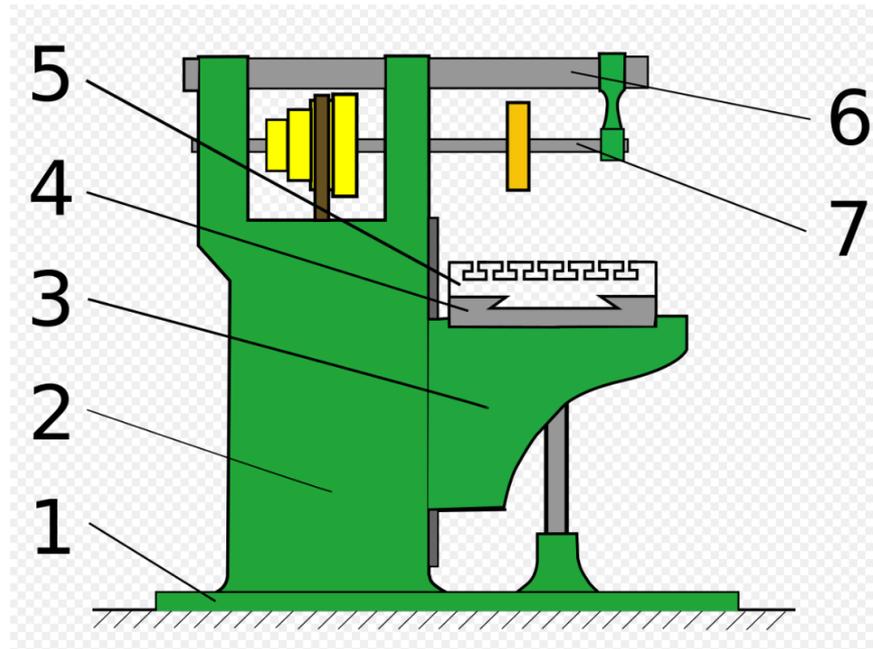


Рисунок 1.2 – Горизонтальний фрезерний верстат (1 — фундаментна плита, 2 — станина, 3 — консоль, 4 — салазки, 5 — стіл, 6 — хобот, 7 — оправка з фрезою)

1.4 Застосування числових та універсальних фрезерних верстатів переваги та недоліки

Універсальний фрезерний верстат відрізняється рядом конструктивних особливостей: вузол шпинделя, коробка, а також основні вузли розташовуються у внутрішній частині станини. В конструкції верстата передбачені вертикальні і горизонтальні напрямні, по яких пересуваються його консоль і робочий стіл. Робочу поверхню, крім цього, можна виставити по відношенню до шпинделя обладнання під потрібним кутом, що дозволяє обробляти з його допомогою деталі з металу, що володіють навіть найскладнішою конфігурацією.

Таке досить компактне обладнання, встановлене будинку, в майстернях навчальних закладах і в невеликих виробничих цехах, дозволяє виконувати різні технологічні операції: нарізати різьблення, свердлити отвори,

виконувати обробку всіляких деталей і матеріалів різними видами фрез та інше.

Обробка заготовок на фрезерних верстатах такого типу відрізняється непоганою точністю, так як їх конструкція має виняткову жорсткістю (зрозуміло, при грамотній установці). Відрізняються такі консольно-фрезерні верстати і високою продуктивністю, що дає можливість використовувати їх для виробництва виробів серійними партіями. Незважаючи на свою високу продуктивність і широку функціональність, такі верстати відрізняє низьке енергоспоживання і компактні розміри, що дозволяє зручно розміщувати їх навіть на невеликій площі.

Числовé програмне керування (ЧПК) — комп'ютеризована система керування, яка зчитує командні інструкції спеціалізованої мови програмування (наприклад, G-код) і керує приводами метало-, дерево- чи пластмасообробних верстатів та верстатним оснащенням.

Числове керування — автоматичне керування процесом, що здійснюється пристроєм, який використовує числові дані котрі, як правило, вводяться під час виконання операції.

Сучасніші системи ЧПК, що мають назву CNC ґрунтуються на системі керування побудованій на:

- Мікроконтролері
- Програмованому логічному контролері
- Промисловому комп'ютері на основі мікропроцесора

Такого роду пристрої активно використовуються у всіляких сферах промисловості на масовому виробництві високоякісних деталей. Верстати з ЧПК високопродуктивні і здатні забезпечити неперевершену якість не в єдиному екземплярі, а на потоці, що робить їх незамінним обладнанням на будь-якому серйозному виробництві.

Верстати з ЧПК, які обробляють деталі з різних металів з високою продуктивністю і точністю, мають один великий недолік: пристойну вартість, але його повністю компенсують такі позитивні фактори:

1. Зниження потреби в кваліфікованих фахівцях на виробництві;
2. Висока продуктивність щодо верстатів з ручним керуванням;
3. Зниження терміну виробничих циклів;
4. Прискорення переходу на виробництво нової продукції.



Рисунок 1.3 – Токарно-фрезерний обробний центр з ЧПК

Висновок: В ході першого розділу було проведено аналіз існуючих видів фрезерних верстатів, перелік переваг та недоліків кожного з видів, сфера застосування фрезерних верстатів. Було розглянуто сучасні верстати з ЧПК.

РОЗДІЛ 2 ВИБІР ДВИГУНА ГОЛОВНОГО ПРИВОДУ ТА ПІДБІР ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна

Початкові дані:

- межа подач столу: 0 – 14000 мм/хв
- швидкість швидкого переміщення столу по осі X: $V_{Xmax\delta X} = 14000$ мм/хв
- сила різання: $F_p = 166$ Н
- максимальна маса оброблюваної деталі і пристосувань встановлюються на столі верстата: $m_2 = 150$ кг
- маса виконавчого механізму: $m_1 = 70$ кг
- сила попереднього натягу: $F_H = 100$ Н
- крок гвинта: $S_b = 5$ мм
- ефективна потужність різання $P_{ef} = 1,8$ кВт

Даний фрезерний верстат містить двигун головного приводу та 3 однакові осьові двигуни по одному для кожної координати (X Y Z)

Розрахунок потужності двигуна головного приводу здійснимо за формулою:

$$P_{ном} = \frac{P_{ef}}{\eta_{п}} \quad (2.1)$$

де $\eta_{п}$ – ККД головного приводу і приймається 0,70 - 0,85

$$P_{ном} = \frac{1,8}{0,70 - 0,85} = 2,57 - 2,12 \text{ кВт}$$

За $P_{\text{ном}}$ попередньо вибираємо двигун GDK 110-9-18Z. Його параметри:

$$P_{\text{ном}} = 2,2 \text{ кВт};$$

$$\omega_{\text{ном}} = 157 \text{ с}^{-1}; (n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/хв}; n_{\text{max}} = 3000 \text{ об/хв})$$

$$M_{\text{доп1}} = M_{\text{доп2}} = M_{\text{ном}} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$J_{\text{д}} = 0,022 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Розрахунок потужності осьового двигуна здійснимо відповідно методикою викладеної в [4]:

Визначимо зусилля подачі по осі X:

$$F_n = k_p F_p + \mu F_{NZ} + F_H \quad (2.2)$$

де $k_p = 1 \div 1,5$ - коефіцієнт запасу;

$\mu = 0,1$ - коефіцієнт тертя;

F_{NZ} - сума паралельних сил, що діють на напрямні, визначаються за формулою:

$$F_{NZ} = (m_1 + m_2)g \quad (2.3)$$

де $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння;

$$F_n = 1,25 \cdot 166 + 0,1(70 + 150) \cdot 9,8 + 100 = 523,1 \text{ Н}$$

Потужність, прикладена до виконавчого механізму в режимі різання:

$$P_{MX} = F_n \cdot V_{\text{робтах}} \quad (2.4)$$

де $V_{\text{робтах}}$ - максимальна швидкість робочої подачі, $V_{\text{робтах}} =$
 $= 14000 \text{ мм/хв} = 0,23 \text{ м/с}$

$$P_{MX} = 523,1 \cdot 0,23 = 120,31 \text{ Вт}$$

За P_{MX} попередньо вибираємо двигун SZGH-06060DC. Його параметри:

$$P_{\text{НОМ}} = 0,6 \text{ кВт};$$

$$\omega_{\text{НОМ}} = 314 \text{ с}^{-1}; (n_{\text{НОМ}} = 3000 \text{ об/хв}; n_{\text{max}} = 4000 \text{ об/хв})$$

$$M_{\text{доп1}} = M_{\text{доп2}} = M_{\text{НОМ}} = 1,91 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$J_{\text{д}} = 0,39 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Зробимо перевірку електродвигуна по допустимому максимальному моменту в статичному і динамічному режимах.

Відповідно до комутаційної кривої для двигунів серії ПБЗ

$$M_{\text{доп3}} = 5,5 \cdot M_{\text{НОМ}} \quad (2.5)$$

Для обраного двигуна маємо

$$M_{\text{доп3}} = 5,5 \cdot 1,91 = 10,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перевірку зробимо в основних режимах: режим старту з місця, режим робочої подачі, режим швидкого ходу при підводі робочого органу до деталі.

Визначимо передавальне число між робочим органом виконавчого механізму і двигуном:

$$i_0 = \frac{V_{X\text{max}\delta X}}{\omega_{\text{max}}} \quad (2.6)$$

$$\omega_{\text{max}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{max}}}{60} = \frac{2\pi \cdot 4000}{60} = 419 \text{ с}^{-1} \quad (2.7)$$

$$V_{X\text{max}\delta X} = 14000 \text{ мм/хв} = 0,23 \text{ м/с}$$

$$i_0 = \frac{0,23}{419} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м/рад}$$

Визначимо момент на валу двигуна від сили різання:

$$M_n = \frac{F_n \cdot i_0}{\eta} \quad (2.8)$$

де $\eta = 0,9$ - ККД передачі «гвинт - гайка»

$$M_n = \frac{523,1 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4}}{0,9} = 0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент на двигуні від сил тертя складається з моментів тертя в напрямляючих і від сили попереднього натягу.

Момент тертя в напрямляючих визначається виразом:

$$M_{ТН} = (m_1 + m_2) g \mu i_0 = (70 + 150) 9,8 \cdot 0,1 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4} = 0,12 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9)$$

Для передачі «гвинт - гайка» враховуємо момент сил тертя в винтовій парі, що виникає в результаті попереднього натягу:

$$M_{ТВ} = 0,032 F_H S_B \frac{1}{3} \quad (2.10)$$

$$M_{ТВ} = 0,032 \cdot 100 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{3} = 0,005 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Статичний момент на валу двигуна дорівнює:

а) при робочій подачі

$$M_1 = M_n + M_{ТН} + M_{ТВ} = 0,32 + 0,12 + 0,005 = 0,445 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

б) на швидкому ході

$$M_2 = M_{ТН} + M_{ТВ} = 0,12 + 0,005 = 0,125 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.12)$$

Прискорення валу двигуна при нормованому прискоренні механізму $a_{nx} = 0,25 \text{ м/с}^2$ складе:

$$\epsilon_d = \frac{a_{nx} \cdot \omega_{max}}{V_{Xmax\delta X}} = \frac{0,25 \cdot 419}{0,23} = 455,4 \text{ с}^{-2} \quad (2.13)$$

Наведений момент інерції механізму визначається виразом:

$$J_{мех} = (m_1 + m_2) \cdot \frac{V_{Xmax\delta X}^2}{\omega_{max}^2} \quad (2.14)$$

$$J_{мех} = (70 + 150) \cdot \frac{0,23^2}{419^2} = 6,63 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Необхідний динамічний момент двигуна з урахуванням запасу 20% дорівнює:

$$M_{\text{дин}} = (1,2J_d + J_{\text{мех}}) \epsilon_d \quad (2.15)$$

$$M_{\text{дин}} = (1,2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-4} + 6,63 \cdot 10^{-5}) 455,4 = 5,1 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначимо необхідний момент двигуна при перехідному режимі для додання виконавчого механізму необхідного прискорення:

$$M_3 = M_{\text{дин}} + M_2 = 5,1 \cdot 10^{-2} + 0,125 = 0,176 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.16)$$

маємо:

$$M_1 = 0,445 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{доп1}} = 1,91 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_2 = 0,125 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{доп2}} = 1,91 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.17)$$

$$M_3 = 0,176 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{доп3}} = 10,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таким чином, обраний двигун задовольняє умовам перевірки по допустимому моменту у всіх режимах. Побудуємо навантажувальну діаграму.

2.2 Побудова навантажувальної діаграми

Вибираємо для розрахунку цикл, коли процес різання проходить при максимальній швидкості і повернення столу відбувається на швидкому ході, при цьому приймаємо максимальну подачу, рівня довжині столу (Рис 2.1)



Рисунок 2.1

Визначимо час розгону і гальмування:

$$t_{\text{роз1}} = \frac{(J_{\text{д}} + J_{\text{мех}})\omega_{\text{роб.мах}}}{M_{\text{дин}}} \quad (2.18)$$

де $\omega_{\text{роб.мах}}$ – максимальна швидкість робочої подачі, $\omega_{\text{роб.мах}} = 157 \text{ с}^{-1}$

$$t_{\text{роз1}} = \frac{(0,39 \cdot 10^{-4} + 6,63 \cdot 10^{-5})314}{5,1 \cdot 10^{-2}} = 0,65 \text{ с}$$

$$t_{\text{Г1}} = \frac{(J_{\text{д}} + J_{\text{мех}})\omega_{\text{роб.мах}}}{M_{\text{ТН}} + M_{\text{Г}} + M_{\text{ТВ}}} \quad (2.19)$$

де $M_{\text{Г}}$ – гальмівний момент, створений гальмуванням постійним струмом.

$$M_{\text{Г}} = M_{\text{НОМ}} \cdot i_{\text{ШВП}} \quad (2.20)$$

де $i_{\text{ШВП}}$ – передаточне відношення ШВП. Для даного двигуна $i_{\text{ШВП}} = 1:5$

$$M_{\text{Г}} = 1,91 \cdot 5 = 9,55 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$t_{\text{Г1}} = \frac{(0,39 \cdot 10^{-4} + 6,63 \cdot 10^{-5})314}{0,12 + 9,55 + 0,005} = 0,0034 \text{ с}$$

Визначимо час різання:

$$t_{\text{рз}} = \frac{S_{\text{роб}}}{V_{\text{роб.мах}}} \quad (2.21)$$

де $S_{\text{роб}}$ - шлях пройдений при різанні, який визначається за формулою

$$S_{\text{роб}} = l_{\text{СТ}} - (S_1 + S_2) \quad (2.22)$$

де S_1 і S_2 - шлях пройдений під час пуску і гальмуванні відповідно, $l_{\text{СТ}}$ – довжина столу (0,7м).

Шлях пройдений під час пуску і гальмуванні визначимо за формулою:

$$S_1 + S_2 = \frac{a_{\text{nx}}}{2} (t_{\text{роз1}}^2 + t_{\text{г1}}^2) \quad (2.23)$$

$$S_1 + S_2 = \frac{0.25}{2} (0,65^2 + 0,0034^2) = 0,0528 \text{ м} = 52,8\text{мм}$$

$$S_{\text{роб}} = l_{\text{СТ}} - 52,8 = 700 - 52,8 = 647,2 \text{ мм}$$

$$t_{\text{пз}} = \frac{647,2}{14000} = 0,046 \text{ хв} = 2,76 \text{ с}$$

Після закінчення процесу різання стіл повертається з оброблюваної деталлю в вихідну точку на швидкому ході.

Визначимо час розгону і гальмування без навантаження:

$$t_{\text{роз2}} = \frac{J_{\text{д}} \omega_{\text{max}}}{M_{\text{дин}}} \quad (2.24)$$

$$t_{\text{роз2}} = \frac{0,39 \cdot 10^{-4} \cdot 419}{5,1 \cdot 10^{-2}} = 0,32 \text{ с}$$

$$t_{\text{г2}} = \frac{J_{\text{д}} \omega_{\text{max}}}{M_{\text{ТН}} + M_{\text{Г}} + M_{\text{ТВ}}} \quad (2.25)$$

$$t_{\text{г2}} = \frac{0,39 \cdot 10^{-4} \cdot 419}{0,12 + 9,55 + 0,005} = 0,0017 \text{ с}$$

Шлях пройдений під час пуску і гальмуванні

$$S_1 + S_2 = \frac{a_{\text{nx}}}{2} (t_{\text{роз2}}^2 + t_{\text{г2}}^2) \quad (2.26)$$

$$S_1 + S_2 = \frac{0.25}{2} (0,32^2 + 0,0017^2) = 0,0128 \text{ м} = 12,8\text{мм}$$

Шлях пройдений на швидкому ході:

$$S_{ш.х} = l_{СТ} - 12,8 = 700 - 12,8 = 687,2 \text{ мм}$$

Визначимо час швидкого ходу:

$$t_{ш.х} = \frac{S_{ш.х}}{V_{Xmax\delta X}} \quad (2.27)$$

$$t_{ш.х} = \frac{687,2}{14000} = 0,049 \text{ хв} = 2,94 \text{ с}$$

За розрахованими даними побудуємо навантажувальну діаграму (Рис 2.2)

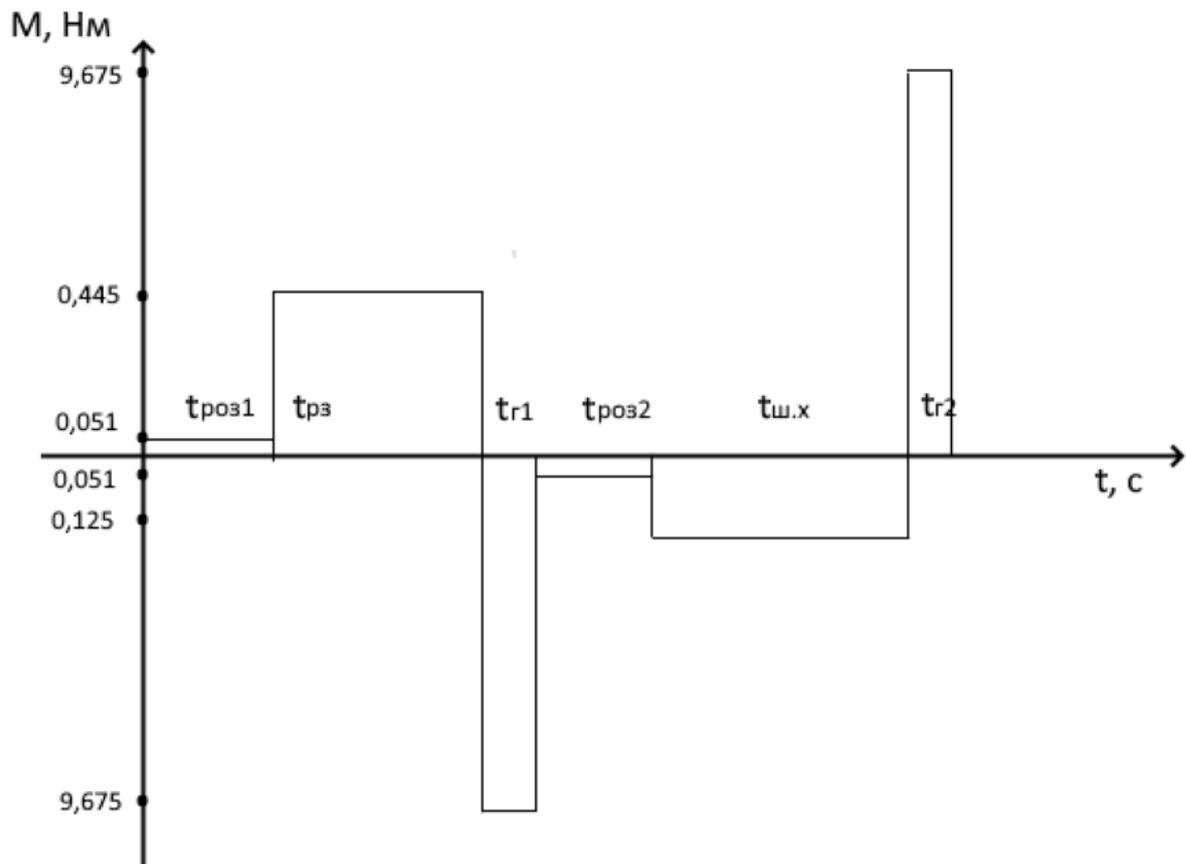


Рисунок 2.2 – Навантажувальна діаграма

Визначимо ефективний момент, прийнявши, що наступні цикли будуть:

$$M_{еф} = \sqrt{\frac{\sum(M_i^2 t_i)}{\sum t}} \quad (2.28)$$

$$M_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{(5,1 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,65 + 0,445^2 \cdot 2,76 + 9,675^2 \cdot 0,0034 + (5,1 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,32 + 0,125^2 \cdot 2,94 + 9,675^2 \cdot 0,0017}{0,65 + 2,76 + 0,0034 + 0,32 + 2,94 + 0,0017}} = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{еф}} = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м} < M_{\text{доп1}} = 1,91 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.29)$$

Таким чином, обраний двигун задовольняє умовам перевірки.

Технічні дані двигуна головного приводу GDK110-9-18Z:

1. Номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 2,2 \text{ кВт}$
2. Номінальний момент $M_{\text{НОМ}} = 14 \text{ Н} \cdot \text{м}$
3. Номінальна швидкість $n_{\text{НОМ}} = 1500 \text{ об/хв}$
4. Номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$
5. Номінальний струм $I_{\text{НОМ}} = 6 \text{ А}$
6. Максимальна швидкість $n_{\text{max}} = 3000 \text{ об/хв}$
7. Момент інерції $J_{\text{д}} = 0,022 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Технічні дані осьового двигуна SZGH-06060DC:

1. Номінальна потужність $P_{\text{НОМ}} = 0,6 \text{ кВт}$
2. Номінальний момент $M_{\text{НОМ}} = 1,91 \text{ Н} \cdot \text{м}$
3. Номінальна швидкість $n_{\text{НОМ}} = 3000 \text{ об/хв}$
4. Номінальна напруга $U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$
5. Номінальний струм $I_{\text{НОМ}} = 3,5 \text{ А}$
6. Максимальна швидкість $n_{\text{max}} = 4000 \text{ об/хв}$
7. Момент інерції $J_{\text{д}} = 0,39 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

На рисунку 2.3 зображено загальний вигляд верстата



Рисунок 2.3 Загальний вигляд верстата

2.3 Підбір частотного перетворювача

Частотний перетворювач (також відомий як інвертор частоти) - це електронний пристрій, який здатен змінювати постійний струм (DC) на змінний струм (AC) зі змінною частотою. Він використовується для контролю швидкості обертання електричних двигунів, забезпечуючи точне регулювання швидкості в області від нуля до максимального значення.

Частотні перетворювачі широко застосовуються у промисловості і технологічних процесах, де потрібне точне управління швидкістю двигуна.

Вони забезпечують більшу ефективність та енергозбереження, оскільки швидкість двигуна може бути оптимально налаштована для виконання потрібної роботи з врахуванням вимог енергоефективності.

Основними компонентами частотного перетворювача є випрямляч, зворотний змінювач, імпульсний модулятор (PWM-генератор) та фільтри. Випрямляч перетворює постійний струм в змінний струм, який потім подається на зворотний змінювач. Зворотний змінювач перетворює змінний струм на бажану частоту і подає його на навантаження (електричний двигун). Імпульсний модулятор регулює частоту і скважність імпульсів для керування швидкістю обертання двигуна.

Одна з основних переваг частотних перетворювачів полягає в тому, що вони забезпечують плавний пуск і зупинку електричних двигунів, що допомагає уникнути різкого навантаження на систему та зберегти механічні компоненти. Крім того, вони дозволяють контролювати обертовий момент і керувати напругою та частотою живлення, що дає можливість пристосовувати роботу системи до змінних умов та потреб.

Частотні перетворювачі можуть мати різні характеристики, такі як потужність, вхідні та вихідні напруги, кількість фаз, типи керування (векторне, скалярне.), додаткові функції (автоматичне регулювання, захист від перевантаження, дистанційне керування тощо). Вибір відповідного частотного перетворювача залежить від конкретних вимог, додаткових функцій та особливостей застосування.

Узагальнюючи, частотні перетворювачі є важливими компонентами в електротехнічних системах, що дозволяють змінювати частоту та швидкість роботи електричних пристроїв, забезпечуючи більшу ефективність, енергозбереження та точність управління.

Частотний перетворювач можна вибрати за такими основними параметрами:

- Потужність. Підбирають більшу, ніж повна потужність двигуна, який буде до нього підключений. Частотний перетворювач вибирають найближчий в бік збільшення з модельного ряду.

Потужність частотного перетворювача повинна бути більше номінальної потужності двигуна на 15%.

- Струм. Струм частотного перетворювача повинен бути рівний або більшим ніж струм для трифазного електродвигуна, споживаний при повному навантаженні.

- Кількість живильних фаз і напруга – однофазні та трифазні. До однофазним на вхід підключається на 220В, а на виході ми отримуємо 3 фази з лінійною напругою 220В або на 380.

- Тип управління – векторне і скалярне. Частотні перетворювачі зі скалярним керуванням не забезпечують точного регулювання в широких межах, при дуже низьких або дуже високих частотах можуть змінюватися параметри двигуна (падає момент). Для частотника з векторним керуванням застосовуються ланцюга зворотного зв'язку, з їх допомогою підтримується стабільність роботи в широкому діапазоні частот.

- Діапазон регулювання. Цей параметр важливий, коли потрібно регулювати електропривод в широкому діапазоні.

Здійснимо підбір частотного перетворювача за параметрами двигуна головного приводу.

Розрахунок струму частотного перетворювача здійснюється за формулою:

$$I_{\text{ч.п}} \geq I_{\text{ном}} = 6 \text{ А} \quad (2.30)$$

Розрахунок потужності частотного перетворювача здійснюється за формулою:

$$P_{\text{ч.п}} \geq 1,15P_{\text{ном}} = 1,15 \cdot 2,2 = 2,53 \text{ кВт} \quad (2.31)$$

де $I_{\text{ч.п}}$ і $P_{\text{ч.п}}$ – струм і потужність частотного перетворювача відповідно.

За даними параметрами вибираємо частотний перетворювач PI150 004G3Z. Його параметри подані в таблиці 2.1



Рисунок 2.4 Частотний перетворювач PI150 004G3Z.

Таблиця 2.1 – параметри частотного перетворювача PI150 004G3Z.

Потужність кВт	4
Номінальний струм	9
Номінальна напруга живлення	380В 3ф
Вихідна напруга	Від 0В до напруги живлення
Перезавантажувальна здатність	150% впродовж 1хвилини
Частота	1-1,5кГц
Робоча температура	-10...+40С
Ступінь захисту IP	20
Розміри	185x72x134мм
Маса	1кг

На рисунку 2.5 наведена схема підключення перетворювача частоти.

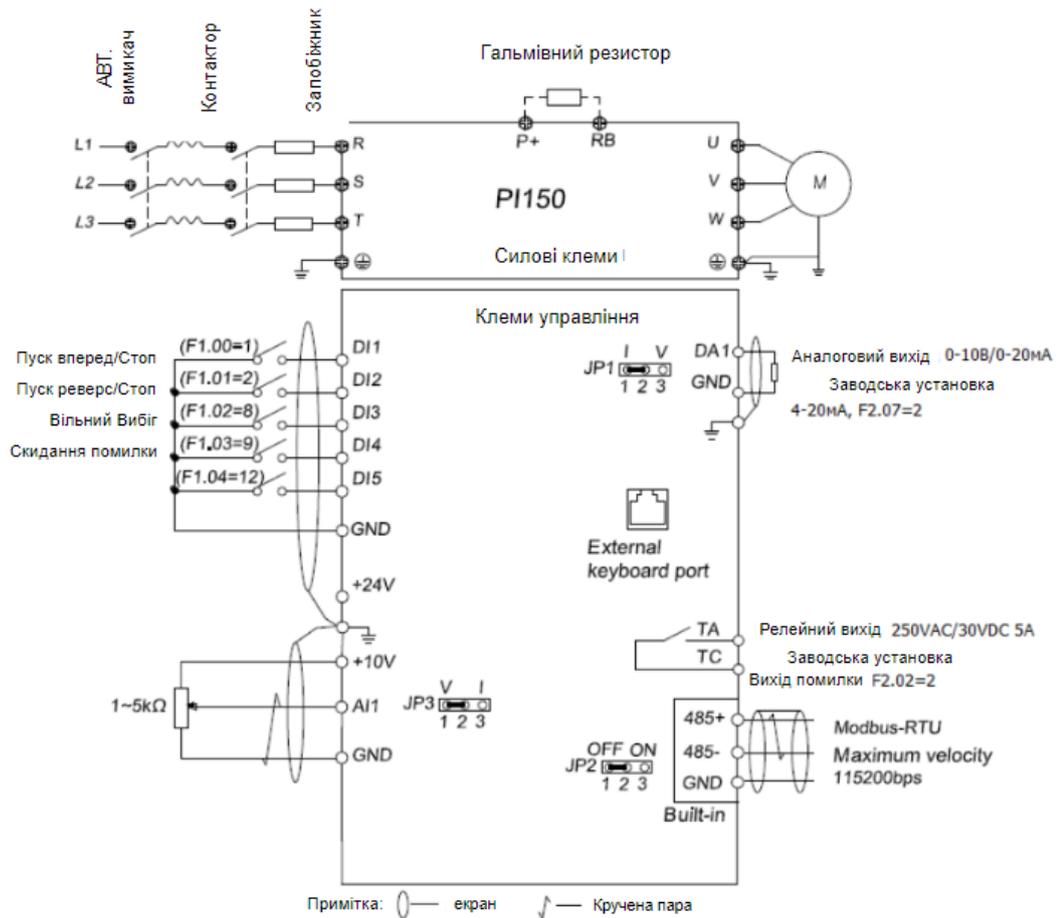


Рисунок 2.5 Схема підключення перетворювача частоти

2.4 Підбір кабелів і елементів захисту

Розрахунок і підбір кабелів і елементів захисту здійснимо за методикою викладеної в [5]

Спочатку здійснимо розрахунок номінальних струмів навантажень.

Для $U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$ номінальний струм навантаження розраховується за формулою:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi} \quad (2.32)$$

Для $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$ номінальний струм навантаження розраховується за формулою:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi} \quad (2.33)$$

де $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності. Для даних двигунів $\cos\varphi = 0,9$

Розрахуємо струм навантаження для двигуна головного приводу:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{2200}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 3,71 \text{ А}$$

Розрахуємо струм навантаження для осьового двигуна:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{600}{220 \cdot 0,9} = 3,03 \text{ А}$$

При проектуванні вибирають провідник з запасом 25-30% від номінального струму. Це пов'язано в першу чергу з можливістю модернізації обладнання без модернізації електропроводки, збільшенням терміну експлуатації електропроводки, полегшенням вибору обладнання.

$$I_p = I_{\text{НОМ}} + 25\% \quad (2.34)$$

Для двигуна головного приводу:

$$I_p = 3,71 \cdot 1,25 = 4,64 \text{ А}$$

Для осьового двигуна:

$$I_p = 3,03 \cdot 1,25 = 3,79 \text{ А}$$

З таблиці 2.2 вибираємо переріз провідника в залежності від кількості жил і способу прокладання.

Маємо такі умови: кабель, з мідними жилами, прокладений відкрито.

Вибираємо кабель найбільш ближчий до I_p , тобто повинна виконуватись умова:

$$I_{\text{доп}} > I_p \quad (2.35)$$

де $I_{\text{доп}}$ - Допустимий тривалий струм для проводів із мідними жилами по таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Допустимий тривалий струм для проводів із мідними жилами

Переріз струмопровідної жили, мм ²	Струм*, А, для проводів і кабелів				
	одножильних	двожильних		трижильних	
	при прокладанні				
	у повітрі	у повітрі	у землі	у повітрі	у землі
1,5	23	19	33	19	27
2,5	30	27	44	25	38
4	41	38	55	35	49
6	50	50	70	42	60
10	80	70	105	55	90
16	100	90	135	75	115
25	140	115	175	95	150
35	170	140	210	120	180
50	215	175	265	145	225
70	270	215	320	180	275
95	325	260	385	220	330
120	385	300	445	260	385
150	440	350	505	305	435
185	510	405	570	350	500
240	605	—	—	—	—

Для двигуна головного приводу:

$$I_{\text{доп}} > 4,64 \text{ А}$$

Провідник: трижильний мідний кабель $S = 1,5 \text{ мм}^2$, $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$

Для осьового двигуна:

$$I_{\text{доп}} > 3,79 \text{ А}$$

Провідник: двожильний мідний кабель $S = 1,5 \text{ мм}^2$, $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$

Розрахунок загальної потужності споживачів та вибір провідника для підключення ЩС здійснимо за формулою:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ном г.п}} + 3P_{\text{ном о.д}} \quad (2.36)$$

де $P_{\text{ном г.п}}$ – номінальна потужність двигуна головного приводу

$P_{\text{ном о.д}}$ – номінальна потужність осьового двигуна (не забуваємо, що даний верстат містить 3 таких двигуна)

$$P_{\Sigma} = 2,2 + 3 \cdot 0,6 = 4 \text{ кВт}$$

Визначимо $I_{\text{ном}}$:

$$I_{\text{ном}} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 7,6 \text{ А}$$

Враховуємо запас 25%:

$$I_p = 7,6 \cdot 1,25 = 9,5 \text{ А}$$

Провідник: трижильний мідний кабель $S = 1,5 \text{ мм}^2$, $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$

Номінальні струми автоматичних вимикачів вибираються так, щоб їхні значення були якнайближче до розрахункових значень струму ланцюгів або номінальним струмам електроустаткування.

Автоматичні вимикачі (АВ) розподіляються на такі типи: В, С, D, К, Z.

Використовуємо клас С – використовується при невеликому індуктивному навантаженні

Для 1ф проводки $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ застосовується АВ типу S201-С

Для 3ф проводки $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ застосовується АВ типу S203-С

Доступні номінали: 6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63А

Номинальний струм АВ повинен бути більшим ближчим до розрахункового струму навантаження вибраного провідника:

$$I_{\text{ном АВ}} \geq I_p \leq I_{\text{доп}} \quad (2.37)$$

Для двигуна головного приводу $I_p = 4,64 \text{ А}$, $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$:

АВ: S203-С 6

Для осьового двигуна $I_p = 3,79 \text{ А}$, $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$:

АВ: S201-С 6

Для загальної потужності (ЩС) $I_p = 9,5 \text{ А}$, $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$:

АВ: S203-С 10

ПЗВ вибирається за таким же принципом як і АВ, але потрібно враховувати диференціальний струм, який згідно ПУЄ не повинен перевищувати 30мА.

ПЗВ, як правило, встановлюють для групи споживачів, тобто в силовий щит (ЩС). Якщо номінальний струм групи споживачів (ЩС) перевищує номінальний струм ПЗВ, то встановлюють декілька ПЗВ і розділяють між ними навантаження.

Доступні номінали: 16; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100А

Так як струм ЩС1 $I_p = 9,5 \text{ А}$, то обираємо ПЗВ найбільший ближчий до розрахункового струму, тобто 16А.

ПЗВ: ВДІ -63 4Р/16 (4Р – кількість полюсів при напрузі 380 В)

2.5 Вибір схеми керування

На рисунку 2.6 наведена схема електрична принципова головного електроприводу.

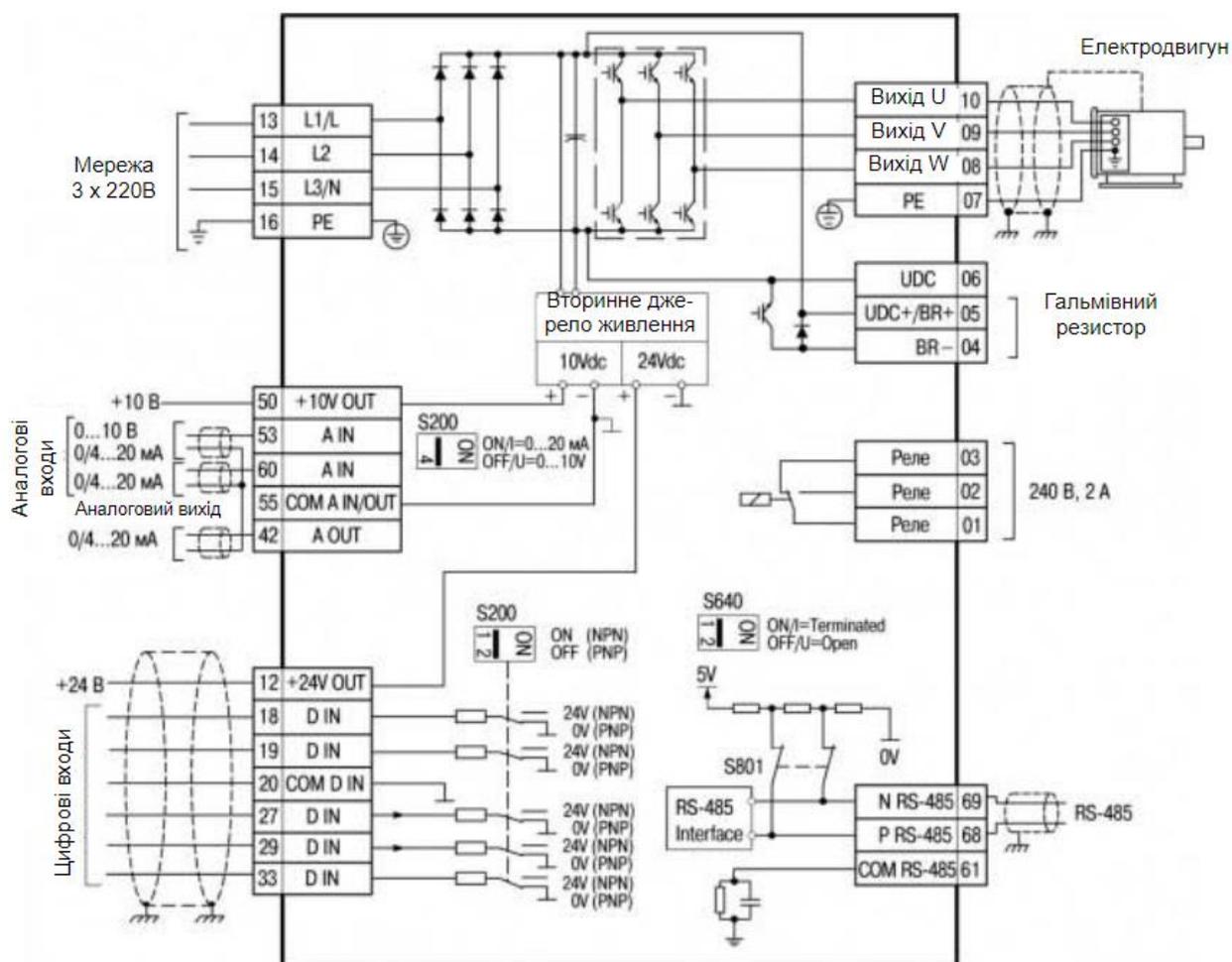


Рисунок 2.6 Схема електрична принципова головного електроприводу

У системах електричного приводу верстата можуть використовуватися як цифрові, так і аналогові входи для забезпечення керування та контролю параметрів роботи.

Цифровий вхід працює з двома станами - "ввімкнено" і "вимкнено". Він приймає сигнали у вигляді цифрових сигналів 0 і 1, або "напруга відсутня" і "напруга присутня". Зазвичай цифрові входи використовуються для простих

команд керування, таких як ввімкнення або вимкнення приводу, вибір режиму роботи або інші прості команди.

Аналоговий вхід працює з безперервними аналоговими сигналами. Він приймає вхідні сигнали у вигляді напруги або струму, які можуть змінюватися в діапазоні значень. Аналогові входи зазвичай використовуються для зчитування значень реальних параметрів, таких як швидкість, положення, температура або інші фізичні величини. Наприклад, аналоговий вхід може вимірювати положення робочого органа верстата і передавати цю інформацію контролеру для забезпечення точності руху.

На рисунку 2.7 наведена схема електрична функціональна системи керування верстатом.

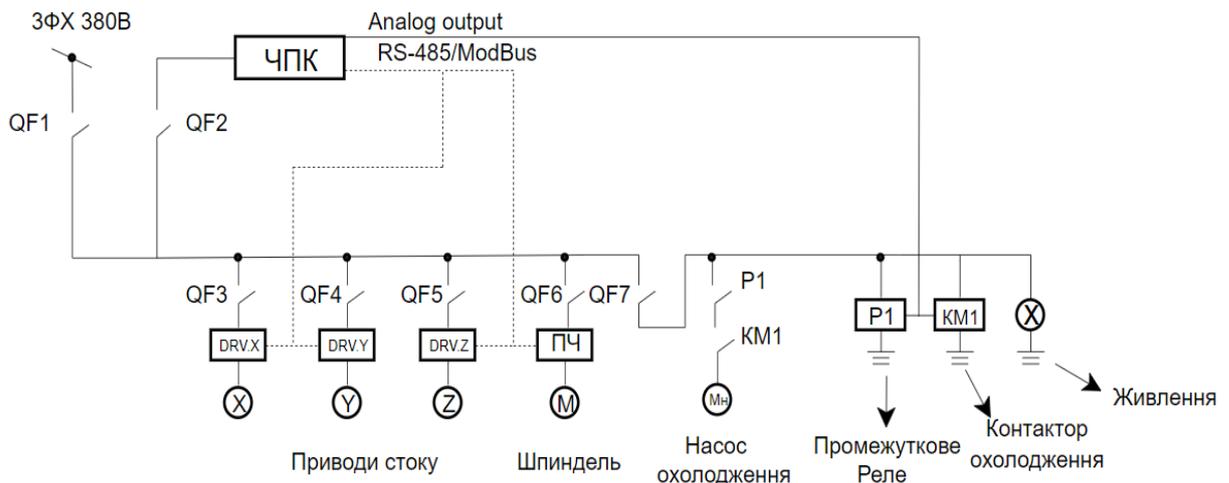


Рисунок 2.7 Схема електрична функціональна системи керування верстатом

У даній схемі використовуються драйвера двигунів координат X, Y, Z, які використовуються для керування руху двигунів, які відповідають за переміщення вздовж осей X, Y, Z на верстаті. Основним завданням драйвера є забезпечення точного керування швидкістю, напрямом та положенням двигуна. Мн – мотор насосу системи охолодження. Промежуток реле призначене для керування контактором KM1

Висновок: У ході другого розділу було проведено вибір головного і осьового двигуна. За проведеними розрахунками було вибрано двигун головного приводу GDK110-9-18Z, а також осьовий двигун SZGH-06060DC. Було здійснено вибір за струмом і потужністю частотного перетворювача. За цими параметрами було вибрано частотний перетворювач P1150 004G3Z. Було вибрано провoda та елементи захисту. Наведено електричну принципову схему головного приволу і функціональну схему керування верстатом.

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Розрахунок та побудова природної механічної характеристики

Двигун головного приводу має такі номінальні дані:

Номінальна потужність $P_H = 2,2$ кВт

Номінальна частота обертання $n_H = 1500$ об/хв

Номінальна напруга статора $U = 380$ В

Активний опір фази статора $R_1 = 2,9$ Ом

Реактивний опір фази статора $X_1 = 1,47$ Ом

Реактивний опір фази ротора $X_2 = 0,72$ Ом

Приведений момент навантаження $M_c = 0,8M_H$

Розрахунок та побудову механічних характеристик здійснимо за методикою викладеної в [6]

Визначимо загальні параметри, необхідні для подальших розрахунків.

- номінальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ 1/с}$$

- синхронна кутова швидкість:

$\omega_c = 157 \text{ 1/с}$ у відповідності до стандартної шкали синхронних швидкостей, яка подана в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Стандартний ряд синхронних швидкостей АД

p	n_c [об/хв]	ω_c [1/с]
1	3000	314
2	1500	157
3	1000	104,7
4	750	78,5
5	600	62,8

- номінальний електромагнітний момент двигуна:

$$M_H = \frac{1,05P_H}{\omega_H} = \frac{1,05 \cdot 2200}{157} = 14,71 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.1)$$

- приведенний активний опір ротора:

$$R'_2 = R_2 k_r \quad (3.2)$$

де R_2 – активний опір ротора;

k_r - коефіцієнт приведення опорів

$$k_r = \sqrt{\frac{R_1^2 + X_1^2}{R_1}} = \sqrt{\frac{2,9^2 + 1,47^2}{2,9}} = 1,91 \quad (3.3)$$

За k_r знайдемо R_2 :

$$k_r = \sqrt{\frac{R_2^2 + X_2^2}{R_2}} = 1,91 = \sqrt{\frac{R_2^2 + 0,72^2}{R_2}} \gg R_2 = 0,15 \text{ Ом} \quad (3.4)$$

$$R'_2 = 0,15 \cdot 1,91 = 0,29 \text{ Ом}$$

- приведенний реактивний опір ротора:

$$X'_2 = X_2 k_r = 0,72 \cdot 1,91 = 1,37 \text{ Ом} \quad (3.5)$$

- сумарний індуктивний опір:

$$X_k = X_1 + X'_2 = 1,47 + 1,37 = 2,84 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

Визначимо параметри для розрахунку природної характеристики.

Знайдемо критичне ковзання $s_{кп}$ та критичний момент $M_{кп}$ для природної характеристики:

$$s_{кп} = \frac{R'_2}{X_k} = \frac{0,29}{2,84} = 0,1 \quad (3.7)$$

Враховуємо, що у формулі для M_k напруга статора повинна бути фазною, тобто $U_\phi = 220$ В.

$$M_{кп} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c X_k} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot 2,84} = 162,82 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.8)$$

За спрощеною формулою Клосса отримаємо:

$$M_i = \frac{2M_{кп}}{\frac{s_i + s_{кп}}{s_{кп}} + \frac{s_i}{s_i}} = \frac{2 \cdot 162,82}{\frac{s_i + 0,1}{0,1} + \frac{s_i}{s_i}} = \frac{325,64}{0,1 + \frac{s_i}{s_i}} \quad (3.9)$$

Задаємось значеннями ковзання s_i та розраховуємо значення M_i .

Корисно включити до розрахунку значення критичного ковзання $s_{кп}$.

Відповідні значення кутової швидкості розраховуються як:

$$\omega_i = \omega_c (1 - s_i) = 157 \cdot (1 - s_i) \quad (3.10)$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 3.2, за якою будується природна механічна характеристика.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку природної механічної характеристики

s_i	M_i , Нм	ω_i рад/с
0	0	157
0,01	32,24	155,43
0,05	130,26	149,15
0,1	162,82	141,3
0,2	130,26	125,6
0,4	76,62	94,2
0,6	52,81	62,8
0,8	40,08	31,4
1,0	32,24	0

3.2 Розрахунок та побудова штучних механічних характеристик (1,5f, 2f, 2,5f)

Для зміни частоти f , необхідно пам'ятати, що для кожної механічної характеристики шкали осі $s \in$ різні, тобто точка ідеального холостого ходу ($\omega = \omega_c$ або $s = 0$) знаходиться на різних точках осі s для різних характеристик. Варто також враховувати те, що сумарний індуктивний опір $X_k = X_1 + X'_2$ змінюється пропорційно частоті f . Це викликає необхідність подальшого перерахунку значень s_k та M_k , які залежать від X_k .

Оскільки, сумарний індуктивний опір $X_k = X_1 + X'_2$ змінюється пропорційно частоті f , перераховуємо значення, що залежать від X_k .

Для значень частот (1,5f, 2f, 2,5f) отримаємо:

$$X_{k_2} = X_k \cdot 1,5 = 2,84 \cdot 1,5 = 4,26 \text{ Ом}$$

$$X_{k_3} = X_k \cdot 2 = 2,84 \cdot 2 = 5,68 \text{ Ом}$$

$$X_{k_4} = X_k \cdot 2,5 = 2,84 \cdot 2,5 = 7,1 \text{ Ом}$$

$$s_{\text{кш}} = \frac{R'_2}{X_{k_2}} = \frac{0,29}{4,26} = 0,068$$

$$s_{\text{кш}_2} = \frac{R'_2}{X_{k_3}} = \frac{0,29}{5,68} = 0,051$$

$$s_{\text{кш}_3} = \frac{R'_2}{X_{k_4}} = \frac{0,29}{7,1} = 0,041$$

$$M_{\text{кш}} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c X_{k_2}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot 4,26} = 108,55 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{кш}_2} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_c X_{k_3}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot 5,68} = 81,41 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{кш}_3} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_c X_{k_4}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot 7,1} = 65,13 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

За спрощеною формулою Клосса отримаємо:

$$M_{i_2} = \frac{2M_{\text{кш}}}{\frac{s_i}{s_{\text{кш}}} + \frac{s_{\text{кш}}}{s_i}} = \frac{2 \cdot 108,55}{\frac{s_i}{0,068} + \frac{0,068}{s_i}} = \frac{217,1}{\frac{s_i}{0,068} + \frac{0,068}{s_i}}$$

$$M_{i_3} = \frac{2M_{\text{кш}_2}}{\frac{s_i}{s_{\text{кш}_2}} + \frac{s_{\text{кш}_2}}{s_i}} = \frac{2 \cdot 81,41}{\frac{s_i}{0,051} + \frac{0,051}{s_i}} = \frac{162,82}{\frac{s_i}{0,051} + \frac{0,051}{s_i}}$$

$$M_{i_4} = \frac{2M_{\text{кш}_3}}{\frac{s_i}{s_{\text{кш}_3}} + \frac{s_{\text{кш}_3}}{s_i}} = \frac{2 \cdot 65,13}{\frac{s_i}{0,041} + \frac{0,041}{s_i}} = \frac{130,26}{\frac{s_i}{0,041} + \frac{0,041}{s_i}}$$

$$\omega_{i_2} = \omega_{i_3} = \omega_{i_4} = \omega_i = \omega_c(1 - s_i) = 157 \cdot (1 - s_i)$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 3.3, 3.4, 3.5 за якими будуються штучні механічні характеристики (1,5f, 2f, 2,5f).

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку штучної механічної характеристики 1,5f

s_i	M_{i_2} , Нм	ω_i , рад/с
0	0	157
0,01	31,25	155,43
0,068	108,55	146,32
0,1	100,95	141,3
0,2	66,16	125,6
0,4	35,87	94,2
0,6	24,29	62,8
0,8	18,32	31,4
1,0	14,69	0

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку штучної механічної характеристики 2f

s_i	M_{i_3} , Нм	ω_i , рад/с
0	0	157
0,01	30,74	155,43
0,051	81,41	148,99
0,1	65,9	141,3
0,2	38,98	125,6
0,4	20,43	94,2
0,6	13,74	62,8
0,8	10,34	31,4
1,0	8,28	0

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку штучної механічної характеристики 2,5f

s_i	M_{i_4} , Нм	ω_i , рад/с
0	0	157
0,01	29,99	155,43
0,041	65,13	150,56
0,1	45,72	141,3
0,2	25,63	125,6
0,4	13,21	94,2
0,6	8,86	62,8
0,8	6,66	31,4
1,0	5,33	0

За даними таблиць 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 будемо графіки механічних характеристик, зображених на рисунку 3.1.

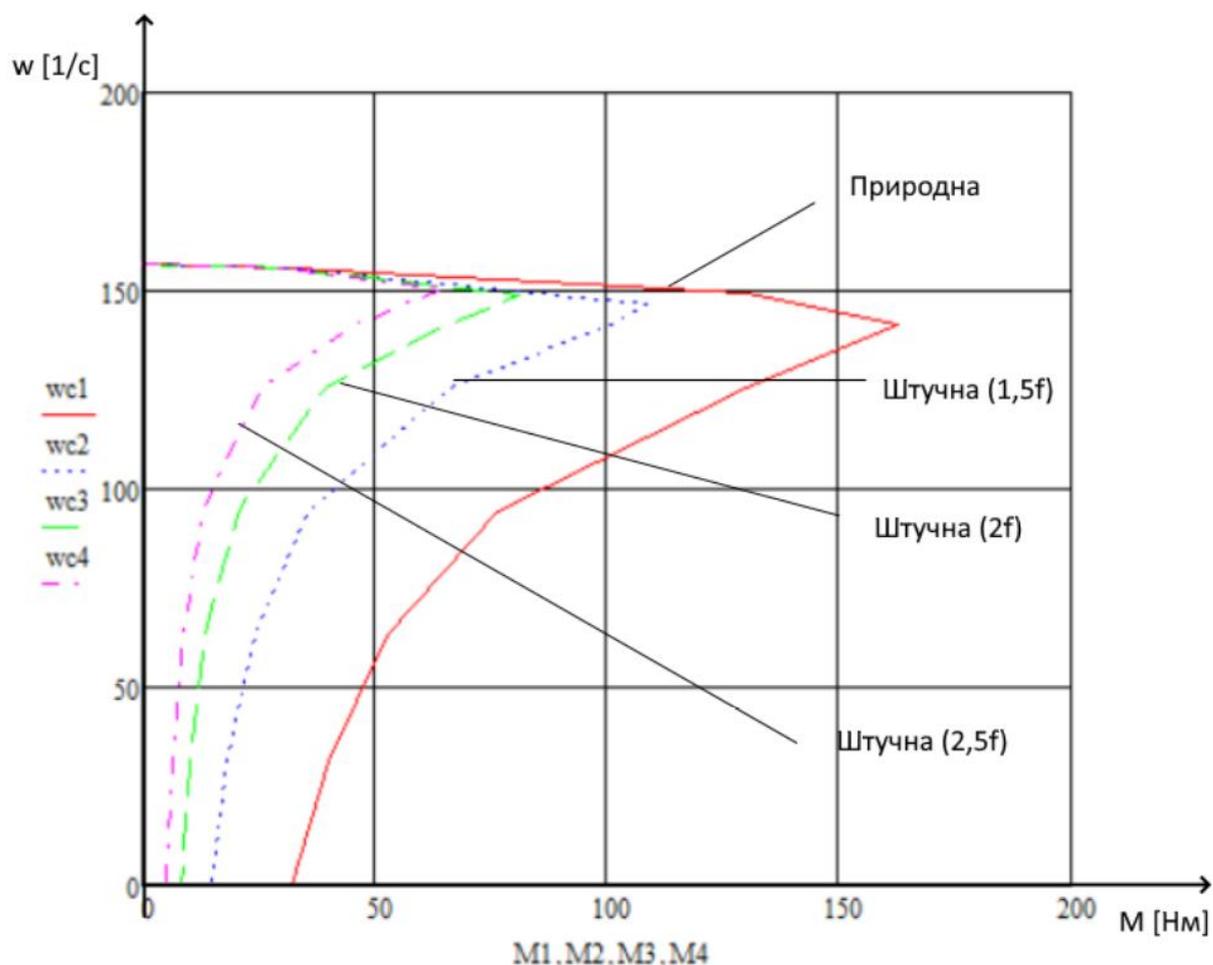


Рисунок 3.1 Графіки механічних характеристик

Висновок: У ході третього розділу було здійснено розрахунок та побудова механічних характеристик. За спрощеною формулою Клосса було знайдено критичні ковзання і критичні моменти для побудови природної і штучних (1,5f, 2f, 2,5f) характеристик. Дані характеристики подані на рисунку 3.1. Як можна побачити на рисунку 3.1 зі збільшенням частоти, момент відносно синхронної швидкості зменшується.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було проведено дослідження та розроблення приводу шпинделя трикоординатного фрезерного верстата. Основною метою роботи було створення ефективного та надійного приводу шпинделя, який забезпечував багатофункціональність та високу точність обробки.

У першому розділі було проведено аналіз існуючих видів фрезерних верстатів. Були виявлені переваги та недоліки різних видів верстатів. Враховуючи це, було визначено основні вимоги до розроблюваного приводу.

У другому розділі було проведено вибір головного і осьового двигуна. За проведеними розрахунками було вибрано двигун головного приводу GDK110-9-18Z, а також осьовий двигун SZGH-06060DC. Розрахунки показали, що ці двигуни підходять для заданих умов фрезерування, пройшли перевірку по допустимим моментам в динамічному та статичному режимах. Було здійснено вибір за струмом і потужністю частотного перетворювача. За цими параметрами було вибрано частотний перетворювач PI150 004G3Z. Було вибрано провода та елементи захисту. Наведено електричну принципову схему головного приводу і функціональну схему керування верстатом.

У третьому розділі було здійснено розрахунок та побудова механічних характеристик. За спрощеною формулою Клосса було знайдено критичні ковзання і критичні моменти для побудови природної і штучних (1,5f, 2f, 2,5f) характеристик.

Отже, на підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблений привід шпинделя трикоординатного фрезерного верстата відповідає поставленим вимогам та ефективно виконує свої функції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вікіпедія. Фрезерна група верстатів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/w/index.php?curid=281010>
2. Вікіпедія. Числове програмне керування [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/w/index.php?curid=76856>
3. Vseznauko. Фрезерний верстат по металу — типи, призначення, застосування [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://vseznauko.com.ua/frezernij-verstat-po-metalu-tipi-priz.html>
4. Козачкович М. М. Розрахунок електроприводів верстатів з числовим програмним керуванням/ М. М. Козачкович. – Дніпропетровськ, 2014. – 50 с.
5. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни: “Улаштування електроустановок споживачів, електрична частина станцій та підстанцій” / Полтава: НУПП, 2021. – 30 с.
6. Системи керування електроприводом Розрахунково-графічна робота асинхронні двигуни / Полтава: НУПП, 2023. – 58 с
7. Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. / А. А. Колб. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – 540 с.
8. ТОВ «НПФ ОБЕРОН». Каталог частотних перетворювачів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: nrf-oberon.com.ua
9. Вісник Розділля. Вибір частотного перетворювача по струму, потужності і іншим параметрам [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://visrozdil.lviv.ua/2021/02/18/vybir-chastotnogo-peretvoryuvacha-po-strumu-potuzhnosti-i-inshym-parametram>

10. Sitamasters. Частотний перетворювач для асинхронного електродвигуна вибір і розрахунок, управління, збірка [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://sitemasters.com.ua/elektrobladnannja/chastotnij-peretvorjuvach-dlja-asinhronnogo/>

11. Рефіт. Шпіндель GDK 110-9-18Z [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://refit.prom.ua/ua/p524000229-shpindel-gdk110-18z40.htm>

12. Технічні параметри двигуна SZGH-06060DC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

https://szgh.com.ua/servodvigatel_peremennogo_toka_szgh06060dc_600_vt_191_nm_ru

13. Tukles. biz. Способи і схеми гальмування електродвигунів. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

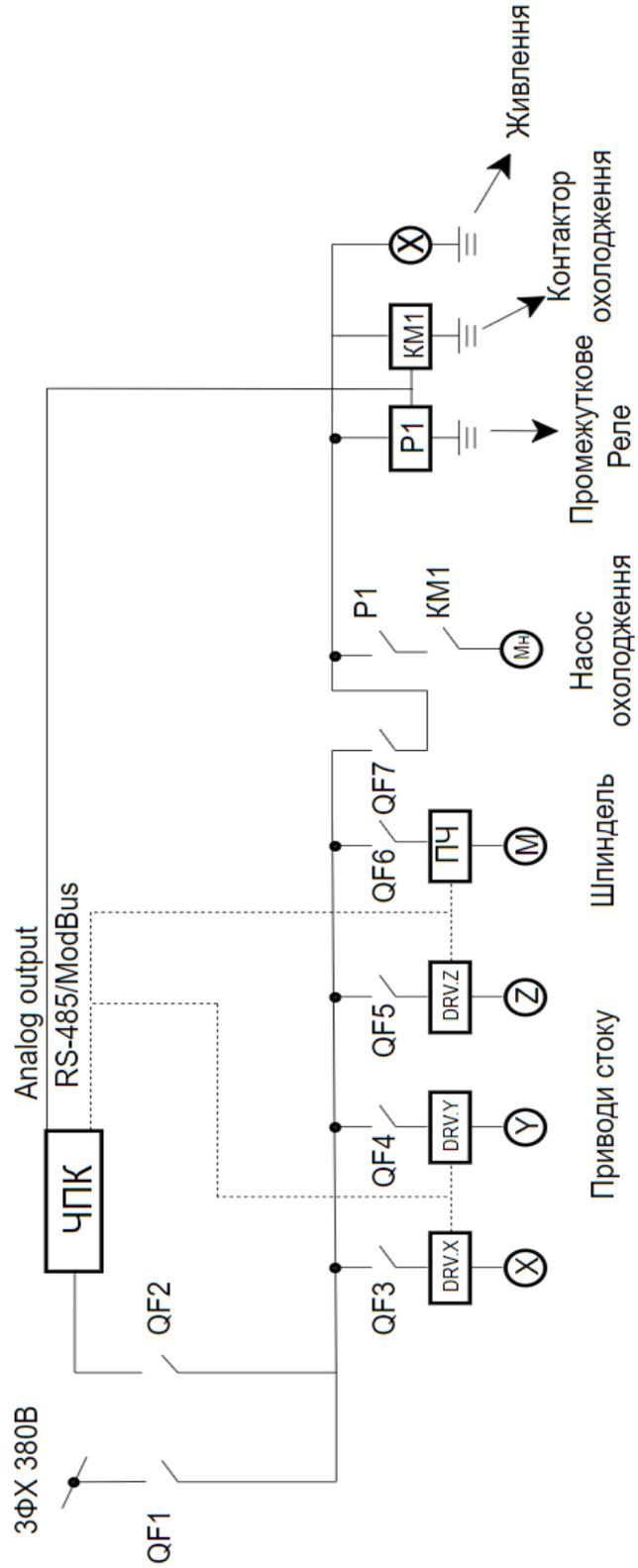
<https://tukles.biz.ua/galmuvannja-elektrodviguna-sposobi-i-shemi/>

ДОДАТКИ

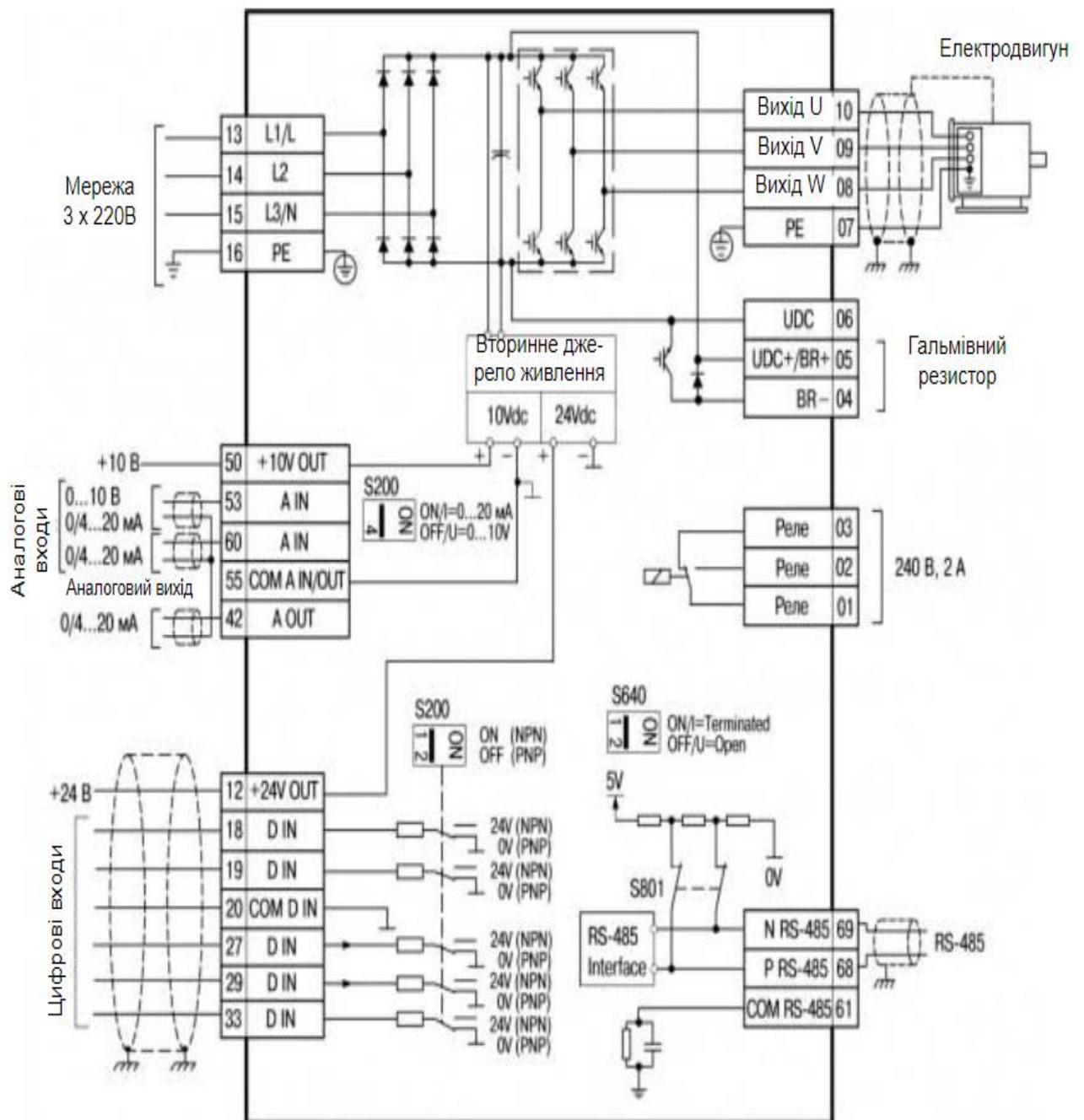
Додаток 1 – Загальний вигляд верстату



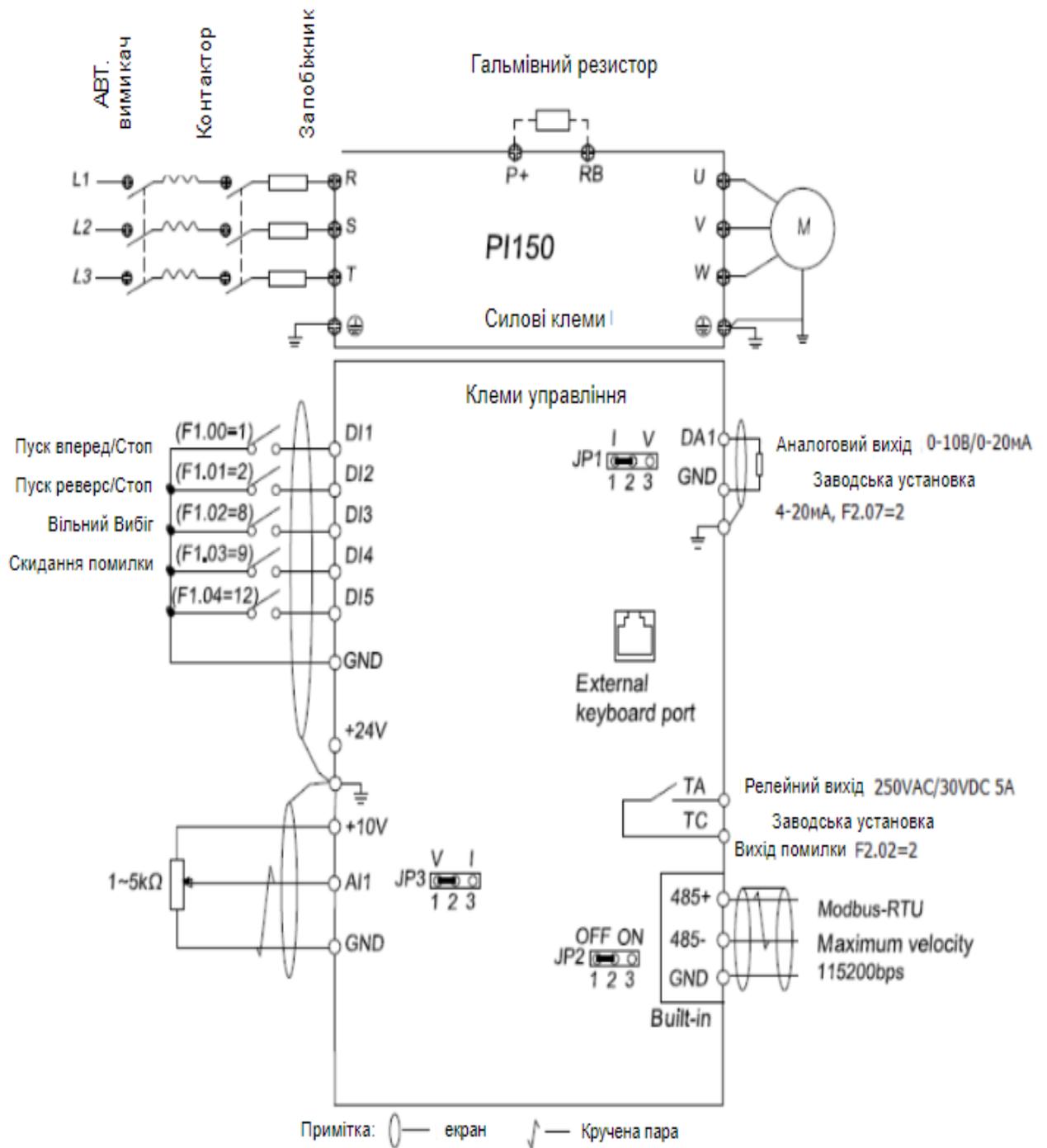
Додаток 2 – Схема електрична функціональна системи керування верстатом



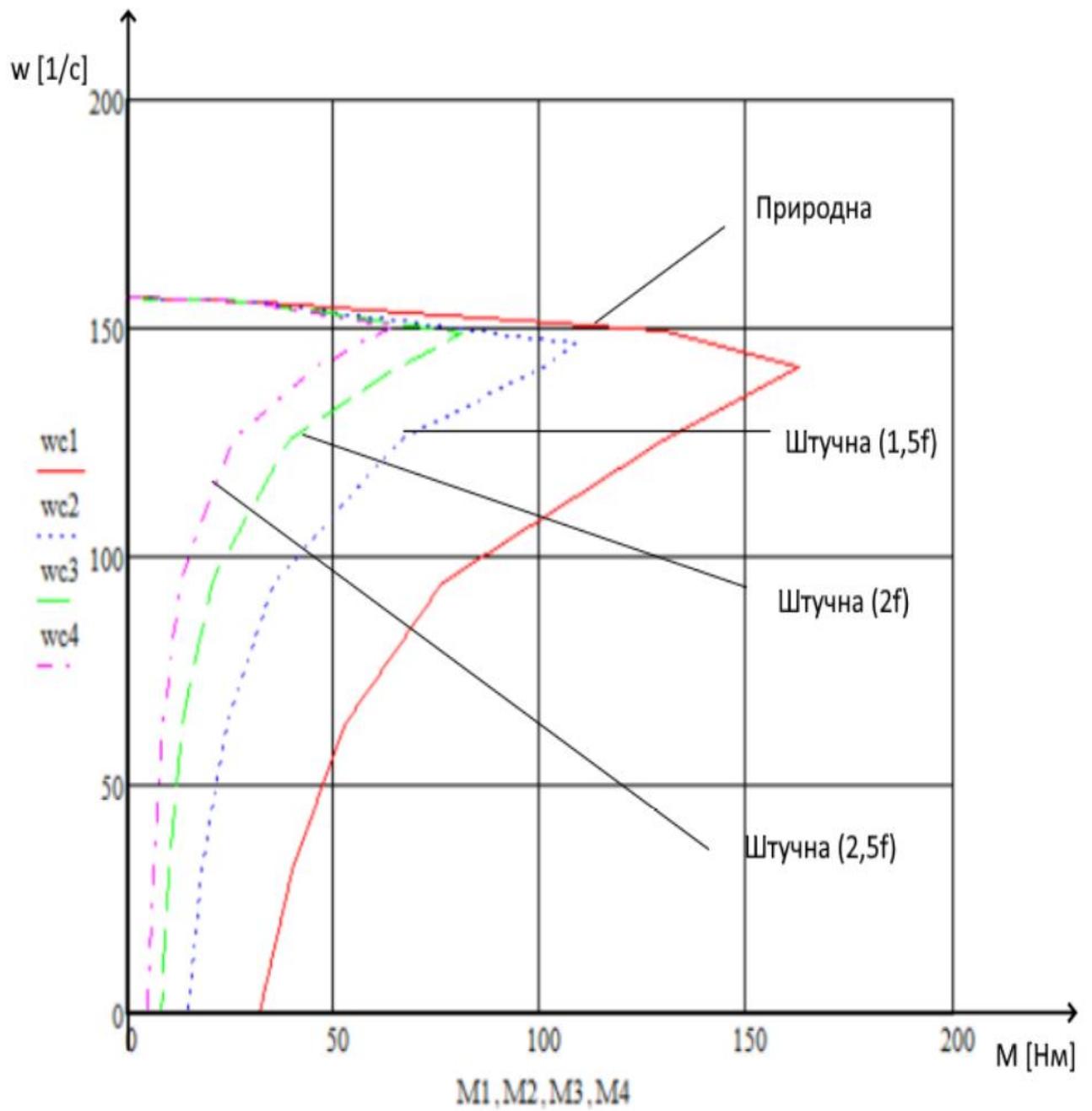
Додаток 3 – Схема електрична принципова головного електроприводу



Додаток 4 – Схема підключення перетворювача частоти



Додаток 5 – Механічні та електромеханічні характеристики



CHAPTER 1 ANALYTICAL PART

1.1 Types of milling machines

A milling machine is a metalworking machine designed for milling flat and shaped surfaces, bodies of rotation, gears and other workpieces. The part fixed on the table makes a translational movement (curvilinear or rectilinear), while the cutter makes a rotary movement. Control of the metal-cutting machine is carried out manually, mechanically or automatically using the CNC system.

There are many different types of milling machines, but the main ones can be classified according to the following criteria:

1. Type of processing: vertical, horizontal, universal (allows you to process parts in both directions) and specialized (for example, milling machines for the production of gear wheels).

2. Type of tool attachment: manual (for single operations), automatic (for mass production), or numerical control (CNC), where the movements of the tool are programmed on a computer.

3. The size of the work surface: the table can be stationary or rotating, and also have different sizes and configurations.

4. Precision: High precision machines provide very precise machining with high repeatability and can include automatic control and correction options.

Some examples of milling machines according to these criteria:

Vertical milling machine: the tool is fixed vertically and moves along the Z axis, and the part is placed on a horizontal table.

Horizontal milling machine: The tool is fixed horizontally and moves along the X-axis, and the part is placed on a vertical table.

Numerical Milling Machine: Has a numerical control (CNC) system that allows you to program precise movements of the tool and obtain repeatable results.

1.2 Advantages and disadvantages of using vertical milling machines

A vertical milling machine is a type of milling machine in which the milling tool is in a vertical position. A vertical milling machine can have a table that moves along three axes, i.e. X, Y, and Z, which allows for machining a variety of parts with high precision. In a vertical milling machine, the milling tool is placed on a spindle that can be rotated to various angles to provide the required angle of inclination of the cutting tool. The milling tool is usually connected to the electric motor via a belt drive or directly to the main shaft. Vertical milling machines can be used for a variety of tasks, such as milling holes, profiles, locating grooves, surface flatness and finishing of parts. They are widely used in industry to produce parts and products from a variety of materials, including metals, plastics and wood.

Vertical milling machines can be equipped with a variety of accessories, such as angle heads, extenders, devices for processing corners, devices for milling convex surfaces, digital displays and others. These accessories can increase the functionality and efficiency of the machine. Vertical milling machines can be manually operated, but increasingly they are equipped with computer control (CNC), which allows the automation of machining processes and increases accuracy and productivity.

The main advantages of vertical milling machines are as follows:

1. Higher precision and quality of processing: Vertical milling machines provide higher precision and quality of processing because they allow parts to be positioned more stably and provide easy access to processing locations.

2. Wider range of work operations: Vertical milling machines can perform a wider range of work operations, including milling, drilling, turning, threading, leveling and profile cutting.

3. Ability to process large parts: Vertical milling machines can also process large parts, although they may have limitations on the size of parts compared to horizontal machines.

4. Efficient energy consumption: Vertical milling machines are more efficient in energy consumption because they consume less energy during operation than horizontal milling machines.

5. Higher productivity: Vertical milling machines usually have higher productivity because they are able to perform a wider range of work operations and machine larger parts.

These advantages generally make vertical milling machines more popular with manufacturers and users looking for the most efficient and high-quality methods of processing parts.

Despite the many advantages of vertical milling machines, they have several disadvantages, among which the following can be distinguished:

1. Limited work area: Most vertical milling machines have a limited work area, which can limit the ability to process large parts.

2. Limitations on the types of materials that can be machined: Vertical milling machines can have limitations on the types of materials that can be machined, as not all materials can be machined with high quality and without the risk of damaging the tool.

3. Requires highly skilled operator: CNC vertical milling machines require highly skilled operator for proper programming and efficient use.

4. Cost: Vertical milling machines can be quite expensive, especially if you need to purchase additional accessories and equipment.

5. Need extra space: Vertical milling machines can require a lot of space to set up and use effectively, which can be problematic for small industrial plants or workshops.

In general, when choosing a vertical milling machine, it is important to consider its advantages and disadvantages, as well as the specifics of production needs, in order to ensure the most optimal choice.

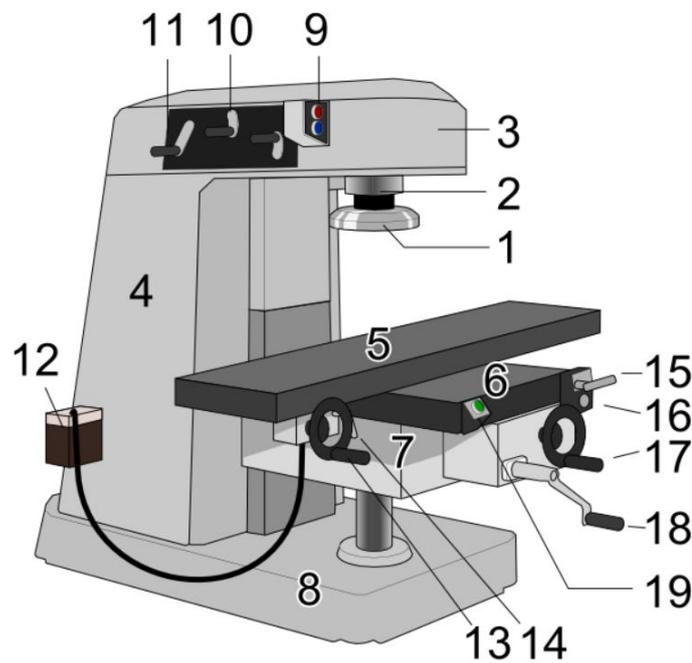


Figure 1.1 - Vertical milling machine (1. End mill 2. Spindle 3. Spindle head 4. Column 5. Table 6. Saddle 7. Knee 8. Base 9. Spindle switch 10. Spindle speed switching lever 11. Spindle speed control lever 12 .Oil tank 13. Table hand wheel 14. Table lock 15. Automatic saddle movement handle 16. Automatic saddle movement control disc 17. Saddle hand wheel 18. Knee hand wheel 19. Quick access button)

1.3 Advantages and disadvantages of using horizontal milling machines

A horizontal milling machine is a type of machine used to process metals, wood, and other materials. Horizontal milling machines are used for the production of complex parts that require precise shapes and sizes. They have a horizontal working surface on which the parts for processing are placed.

Horizontal milling machines are used in a variety of industries, such as the automotive industry, the aviation industry, mechanical engineering, shipbuilding, the manufacture of railway equipment, the metallurgical industry, and others. With the help of horizontal machines, it is possible to process parts of various shapes and sizes from metals, plastics, wood and other materials. They are used to manufacture various parts such as ball mechanisms, gears, gears, spindle housings, shafts, gearbox housings and others.

Also, horizontal lathes can be used to perform a variety of operations such as drilling, milling, cutting, grinding, and more, making them very versatile production tools.

One of the main advantages of horizontal milling machines is their relative ease of use and maintenance. Also, horizontal machines may be more efficient for machining parts with large widths and small depths, while vertical machines are better suited for machining parts with large depths and small widths. Other advantages of horizontal machines include their relative resistance to vibration and higher processing accuracy at high loads. Also, in some cases, horizontal machines can be more economical to operate, especially if they are used for machining parts of mass production.

Disadvantages of horizontal milling machines:

1. Difficulty in setting up: Setting up horizontal milling machines can be a difficult process, especially for complex parts with complex shapes.

2. High cost: Horizontal milling machines can be more expensive compared to vertical milling machines, which can be a problem for businesses with a limited budget.

3. Horizontal machines have less versatility compared to vertical machines, as they are not suitable for many types of processing.

4. High maintenance costs. A horizontal machine can be difficult to maintain and repair due to the more complex construction and the greater number of parts that need to be replaced.

The choice between a vertical and horizontal milling machine depends on the specific problem to be solved. Each of these types of machines has its advantages and disadvantages, but in general, both of them are versatile production tools and can perform many operations with a variety of materials. In particular, horizontal machines are usually used for milling flat surfaces and manufacturing parts with large lengths or widths. They can also perform precision machining operations such as engraving and grinding. Vertical machine tools, on the other hand, are generally used for making parts with complex shapes, machining holes and deep grooves, and for drilling, milling, cutting, and other operations.

Therefore, both types of machines can be universal depending on the specific needs and tasks of production.

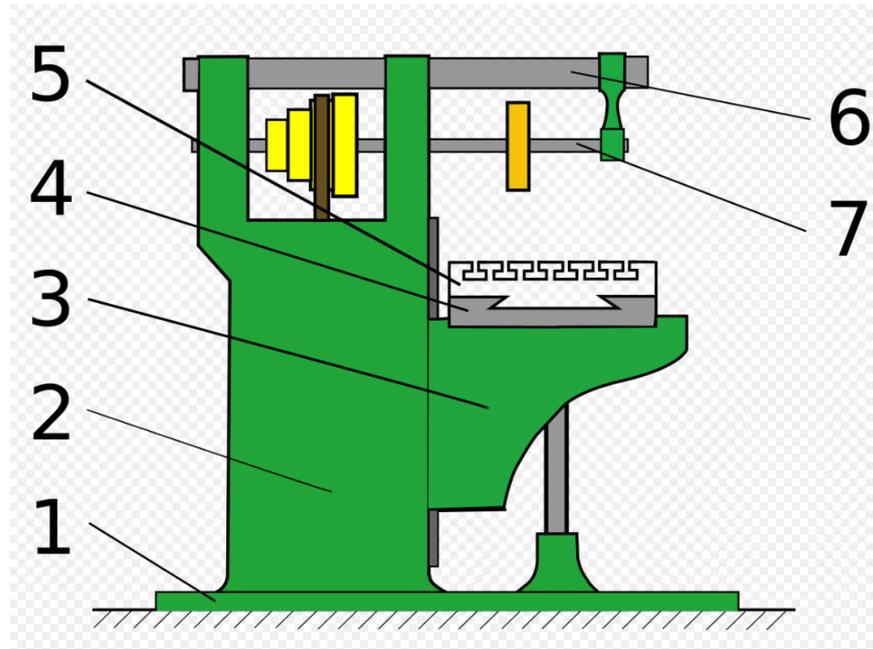


Figure 1.2 – Horizontal milling machine (1 — foundation plate, 2 — bed, 3 — console, 4 — slide, 5 — table, 6 — trunk, 7 — mandrel with milling cutter)

1.4 Use of numerical and universal milling machines advantages and disadvantages

The universal milling machine is distinguished by a number of design features: the spindle unit, the box, as well as the main units are located in the inner part of the bed. The design of the machine includes vertical and horizontal guides along which its console and work table move. In addition, the working surface can be set in relation to the spindle of the equipment at the desired angle, which allows you to process with its help metal parts with even the most complex configuration.

Such rather compact equipment, installed at home, in workshops, educational institutions, and in small production shops, allows you to perform various technological operations: cut threads, drill holes, perform processing of all kinds of parts and materials with various types of cutters, etc.

Processing of workpieces on milling machines of this type is characterized by good accuracy, as their design has exceptional rigidity (of course, with competent installation). Such cantilever-milling machines are distinguished by their high productivity, which makes it possible to use them for the production of products in serial batches. Despite their high productivity and wide functionality, such machines are characterized by low energy consumption and compact dimensions, which allows them to be conveniently placed even in a small area.

Numerical control (NC) is a computerized control system that reads command instructions from a specialized programming language (eg, G-code) and controls the drives of metal, wood, or plastic processing machines and machine tools.

Numerical control is the automatic control of a process carried out by a device that uses numerical data that is usually entered during an operation.

More modern CNC systems, called CNC, are based on a control system built on:

- Microcontrollers
- Programmable logic controller
- An industrial computer based on a microprocessor

Devices of this kind are actively used in various industries for the mass production of high-quality parts. CNC machines are highly productive and are able to provide unsurpassed quality not in a single instance, but on the flow, which makes them indispensable equipment for any serious production.

CNC machines, which process parts from various metals with high productivity and precision, have one big drawback: a decent cost, but it is fully compensated by the following positive factors:

1. Reducing the need for qualified specialists in production;
2. High productivity compared to machines with manual control;
3. Reducing the term of production cycles;
4. Acceleration of the transition to the production of new products.



Figure 1.3 – Turning and milling processing center with CNC

Conclusion: In the course of the first chapter, an analysis of existing types of milling machines, a list of advantages and disadvantages of each type, the scope of application of milling machines was carried out. Modern machines with CNC were considered.