

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____	О. КОЛЛАРОВ
(підпис)	(ініціали, прізвище)
«___» _____	2023 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Синтез та оптимізація роботи електроприводу металорізального верстату.

Виконала: студентка 4 курсу, групи ЕЛК-19
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____	_____
ЄВСТРАТЕНКО Дар'я	(підпис)
(ім'я та прізвище)	
Керівник <u>зав. каф. «ЕлІн», к.т.н., доц. О. КОЛЛАРОВ</u>	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)

Рецензент _____	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)

Нормоконтроль:

_____ Е. НЕМЦЕВ
(підпис)

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент(-ка) _____
(підпис)

(дата)

ЛУЦЬК – 2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ
Дар'ї ЄВСТРАТЕНКО

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Синтез та оптимізація роботи електроприводу
металорізального верстату

керівник роботи Олександр КОЛЛАРОВ, к.т.н., доц. каф. «ЕлІн»,
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 6 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Електродвигун для привода: АД з
короткозамкненим ротором, номінальною потужністю $P_{\text{ном}}=8.5$ (кВт),
номінальна напруга $U_{\text{ном}}=220/380$ (В), швидкість обертання електродвигуна
 $w_{\text{ном}}=2800$ (об/хв), сумарний момент інерції $J=0.185$ (кг*м²), число пар полюсів
 $p=1$, коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)=0.861$, частота електромережі $f=50$ (Гц).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Виконання аналізу керування координатами електропривода із ЧПК.

2. Розрахунок й побудова механічних й регульовальних характеристик привода.

3. Синтез, налаштування та оптимізація системи керування за моментом й швидкістю. Проектування математичної моделі розроблення системи.

4. Проведення заходів із виконання питання охорони праці під час роботи з металорізального верстата

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

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 4.1–4.3	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Розділ 4.4	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Нормоконтролер	Е. НЕМЦЕВ, ст. викл. каф		

7. Дата видачі завдання 8 травня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	08.05–12.05.23	
2.	Розділ 2	13.05–21.05.23	
3.	Розділ 3	22.05–28.05.23	
4.	Розділ 4	29.05–02.06.23	
5.	Охорона праці	02.06–06.06.23	

Студентка _____
(підпис)

Дар'я ЄВСТРАТЕНКО
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олександр КОЛЛАРОВ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Д. ЄВСТРАТЕНКО «Синтез та оптимізація роботи електроприводу металорізального верстату» / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023 р..

В роботі відбувалось дослідження роботи електроприводу металорізального верстату у різних режимах. Для детального вивчення перехідних процесів, під час зміни режимів, що є швидкоплинними була спроектована математична модель (збір структурної схеми в додатку Matlab із складових підсистеми бібліотеки SimPowerSystem), системи в цілому. Вона включає в свій комплекс не тільки сам електропривод, а ще й лінії живлення, підсистеми захисту та обліку електричної енергії, пристрої комутації. Для забезпечення безперебійного живлення, додатково було розглянуто й питання, щодо резерву за допомогою альтернативних джерел.

Для успішного вирішення висвітленої у дипломній роботі проблеми, а саме модернізації та оптимізації приводу металорізального верстату, було на початку роботи виконано аналіз, а після нього й здійснено вибір оптимальної топології електроприводу. Надалі відбувалась схематична побудова окремих електричних схем загальної мережі, разом із розрахунком і вибором її складових елементів. Через багатоконтурність системи керування були почергово досліджені й налаштовані контури за моментом, швидкістю та положенням за модульний оптимум.

Ключові слова: ВЕРСТАТ, ПЛАВНИЙ ПУСК, ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДАТЧИКИ, АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ, MATHCAD, РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, MATLAB, РЕГУЛЯТОРИ, ПІДСИЛЮВАЧ, ПІДПОРЯДКОВАНЕ КЕРУВАННЯ.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	7
ВСТУП	8
1. АНАЛІЗ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ.	12
1.1. Опис технологічного процесу металорізального верстату із числовим програмним керуванням.	12
1.2. Завдання металорізального верстата у загальному процесі виготовлення деталей.	14
1.3. Вибір загальної топології досліджуваного електроприводу.	15
2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ПРИВОДУ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА. ВИБІР СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ЇЇ НАЛАШТУВАННЯ.	27
2.1 Опис схеми системи електроживлення ЕП та вибір її складових елементів.	27
2.2. Опис системи електропостачання, яка наразі використовується на установці.	28
2.3 Розрахунок потужності, необхідної для електричного приводу та обладнання.	32
2.3.1 Встановлення необхідної потужності головного двигуна.	34
2.3.2 Розрахунок потужності двигуна, котрий забезпечує рух подачі.	36
3. ВИБІР ТИПУ КОМПЛЕКТНОГО ЕП ДЛЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА.	41
3.1 Опис та вибір комплектуючих ЕП головного руху.	41
3.2 Опис та вибір комплектуючих ЕП приводів різання (за осями).	46
3.3 Опис технологічного засобу, котрий дозволяє взаємодіяти із	49

перетворювачем, а також і передавати йому сигнали.

3.4. Перевірка функціональності обраного комплекту ЕП.	51
3.5 Обрання методу прокладання електропостачання.	68
4. РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА ІЗ СИСТЕМОЮ ЖИВЛЕННЯ.	74
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83
ДОДАТОК А	85
ДОДАТОК Б	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РП – регулятор положення;

КШ– коробка швидкостей;

КП– коробка подач;

ПК – програмне керування;

ЕП – електричний привод;

МВ – металорізальний верстат;

ПР – перехідний режим;

ЧРЕП – електропривод зі частотним регулюванням;

САМ – система (з англ. - computer-aided manufacturing) - автоматизація процесу підготовки виробництва за допомогою ПК.

ВСТУП

Виконана дипломна робота звертає основну свою увагу на тему модернізації електричного обладнання токарного станка із числовим програмним керування. У рамках проведеної роботи було реалізовано розрахунок потужності електродвигуна й обраний відповідний комплектний привод. При цьому також був розроблений для породільних переміщень розрахунок кінематичної схеми й обраний відповідний комплектний електропривод подачі, із урахуванням вимог до металорізального верстату. У практичному проектуванні представлений роботи був проведений розрахунок навантажувальної діаграми й тахограми електроприводу. Також був проведений розрахунок секції ліній живлення, аналіз за нагрівом й просадкою напруги, із відповідним вибором комутаційного, розподільного й захисного електрообладнання. У цій же частині роботи представлені й результати із моделювання динамічних режимів (перехідних процесів) роботи асинхронного частотного електричного приводу головного руху із векторною системою автоматизованого управління, при цьому була уточнена й перевірена й працездатність електроприводу в цілому.

Слід також акцентувати увагу, що практичні дослідження виконувалися за методом імітаційного математичного моделювання із застосуванням програмного пакету Matlab та розробленій моделі асинхронного електричного приводу із застосуванням бібліотеки Simulink.

Сьогодні у більшій частині промислових підприємств України основна доля верстатів із числовим ПК вже має термін використання 15-20 років, інколи можна зустріти й електрообладнанням із минулого століття. Поетапне зниження виробничих параметрів приводу верстатів, при певній обмеженості ресурсів, спонукає підприємства пройти шляхом зі модернізації електричного обладнання.

При цьому дана модернізація верстата із числовим ПК, як правило, асоціюється зі повною заміною самої системи управління. Вже після

проведеного комплексу робіт із заміни ПУ, на виході підприємство (замовник) отримує той комплект приводу, що й хотів отримати – сучасний, автоматизований металорізальний верстат, котрий має кращу надійність й продуктивність.

Проте, як демонструє досвід, інколи вдосконалена система керування, має в цілому мале збільшення за надійністю, це може бути викликано тим, що у приводі залишилися старі пристрої електричної автоматики й вимірювальних систем. При такому виконанні можуть виникати принципово нові проблеми, котрі пов'язані зі освоєнням самої системи її налагоджувальними чинниками, а також персоналом обслуговування (а саме - технологами, операторами, електроніками). Значною мірою зростання за надійністю можливо тоді, коли із числовим ПК разом установлюються при новітні приводи й відбувається ремонт капітальний за електричною частиною металорізального верстату. Однак у такому виконанні суттєво збільшуються й витрати на оновлення – приблизно у 4–5 разів, навіть якщо будуть залучені дешеві види електроприводів і без урахування додаткових витрат й ресурсів на налаштування систем в цілому [8].

Тоді виходячи із цього аналізу, для оптимальної експлуатації існуючого, проте застарілого комплексу верстатів з числовим ПК є достатнім провести комплексну виконати заміну частки фізично «виснажених» приладів металорізального верстата, а також забезпечити ремонт інших складових частин верстата.

Варто відзначити, що системи із числовим ПК сьогодні все частіше використовуються у більш широкому спектрі завдань і мова не тільки про обробку металевих деталей та виробів, що буде розглянуто у цьому проекті. Електроенергетична промисловість сьогодення застосовує частіше системи стандартні із наявним ЧПК з метою виконання свердління високошвидкісного, а також обробки матеріалів. Тож різання скла, різання дерева, вироблення контурування для металевих пластин, а також розробка плат електронних для

персональних комп'ютерів та спонукають розширення область використання систем із числових ПК [3].

Якщо переходити до дослідження, то варто відзначити що за початковими даними до дипломування, металорізальний верстат має застарілу, як для сьогодення, системою числового програмного керування «Simatic 200» із електроприводами «Marathon 145THFR5329». Тож вони вироблені на застарілій елементній базі та зняті із серійного виробництва, а відповідно й пошук додаткових пристроїв є проблематичною.

Комплекс робіт із модернізації включає в себе наступні етапи:

- Заміну числового програмного керування, планується Sinumerik серії 820.
- Установлення електроприводу головного руху компанії Siemens.
- Установлення електроприводів подачі за координатами, типів компанії Siemens та відповідних сервоприводів змінного струму у серії SA-NA.
- Заміну пускорегулюючої та захисної апаратури у вбудованих шафах управління верстатом фірми Schneider El. напругою живлення 24 В;
- Зміну датчиків у ланці вимірювальної системи у зворотному зв'язку усієї кінематичної ланки, що означає прилад на гвинті у кулькової гвинтовій передачі.
- Вдосконалення вбудованої панелі (панелі оператора та візуалізації в її програмному застосунку) у пульт керування. Simatic HMI – електронне керування на виносній панелі оператора, виконати модернізацію (обрання та проектування у мат. моделі) модулів вводу-виведення інформації та вимірюваних параметрів.

Під час впровадження у металорізальному верстаті сучасних систем сьогодення ЧПК й управління електроприводами можна досягати такі переваги:

- Збільшення параметрів за надійністю роботи металорізального верстату.

- Збільшення загальної продуктивності й зручності обслуговування устаткування.
- Проектування пристроїв із заданими, уточненими параметрами.
- Зменшення, за рахунок підвищення гнучкості за заміною пристроїв, часу на ремонт.
- Проведення діагностичних робіт за допомогою математичної моделі, розробка та впровадження програм керування через шини Profibus та зв'язку Ethernet із віддаленого комп'ютера оператора.
- Розширення можливостей за технологічними ланками у системі сучасного різального інструмента (верстата).
- Опис основних етапів й методології, щодо впровадження металорізального верстату у єдину комп'ютеризовану систему, із метою проведення автоматизованого контролю за основними параметрами.

Випускна кваліфікаційна робота має обсяг 95 машинописних сторінок, яка складається із вступу, чотирьох основних розділів, переліку використаної літератури, котрий складається із 13 найменувань та загальних висновків. Також робота має 2 додатки, 9 таблиць та 30 рисунків.

1. АНАЛІЗ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ.

1.1 Опис технологічного процесу металорізального верстату із числовим програмним керуванням.

Виходячи із аналізу [7, 11-12] в цілому загальний комплекс із програмного керування верстатом металорізальним включає у себе: власне верстат із числовим програмним керуванням, програму забезпечення, щодо управління верстатом для виконання певної операції керування.

Вхідними даними для даного комплексу виступають інформаційні показники від операції, котру необхідно здійснити, в той час, як вихідним каскадом даних є інформація про оброблення (відпрацювання) вхідних задач відповідно.

Тоді програма управління має містити стисло викладену у регламентованій послідовності, усю необхідну технологічну інформацію із метою виконання одного циклу операції за технологічним процесом опрацювання (обробки) деталі верстатом [4].

А вже здійснивши вибір за формою майбутньої заготовки й автоматизованого складання маршрутної технологічної схеми розпочинають детальне вивчення та виконання технологічного процесу, котрий складається із окремих етапів й вимагає детальних розрахунків на кожному з них.

Зазвичай, всі описані вище дії виконуються з використанням комп'ютера, за [7,9] наступним алгоритмом:

1. Створюють геометричний план за обробкою деталі, котрий включає ескіз обробки з визначенням розмірів припусків, технологічних основ й місць кріплення власне заготовки.

2. Розробляють комплекс програмного керування для роботи з деталлю, котрий включає попередній етап обробки, технологічний процес зі списком

необхідних операцій, картою різання з режимами різання, інструментом та обладнанням, необхідним для виконання процесу.

3. Розробляють карту налагодження металорізального верстата, що містить послідовність операцій з визначенням припусків для інструментів в різцетримачі. Блоки корекції закріплюються на верстаті відповідно до інструментів.

4. Виконують розрахунок й графічну проектування руху траєкторії інструменту для оброблення деталей із деталей з поверхнею складної кривини.

5. Створюють числову керуючу програму для програмного управління.

6. Коригують й виявляють помилки в керуючій програмі після перевірки під час обробки першої деталі із партії.

Завершуючи аналіз [6, 8] варто відмітити, що у системах ЧПК сьогодення відмічаються наступні спільні характерні риси:

- Застосування все більш продуктивної обчислювальної техніки та вдосконалення алгоритмів управління дозволяє збільшити продуктивність обчислень, що призводить в свою чергу й до покращення якості керування та безпосередньо впливає на продуктивність й якість обробки даних.

- Покращення інтерфейсу користувача полягає у наданні все більш розвинених методів моделювання й візуалізації технологічного процесу із виготовлення деталей й контролю за ним, що дозволяє полегшити користування програмним забезпеченням та забезпечує точність та ефективність управління процесом виробництва.

- Вдосконалення пристроїв формального опису за технологічним процесом, таких як складання програм керування, дозволяє максимально звільнити оператора від рутинних операцій управління під час переналагодженні обладнання. Крім того, таке рішення забезпечує інтелектуальний автоматизований контроль за усім технологічним процесом й станом обладнання, що сприяє підвищенню ефективності і точності виробництва.

Для забезпечення оперативної й об'єктивної інформації про стан виробництва персоналу, працюючому з системами управління ієрархічних мереж, необхідно побудувати такі системи із можливістю ефективної підготовки, сортування й обробки інформації, котрі обмінюється по цих мережах. Такі засоби повинні бути вдосконалені, аби забезпечити максимально ефективний обмін інформацією поміж різними рівнями управління виробництвом [6, 10].

1.2 Завдання металорізального верстата у загальному процесі виготовлення деталей.

Роль металорізального верстата у загальному процесі виготовлення деталей є важливим елементом технологічного процесу.

Так верстат із числовим програмним керуванням серії AIP132M4 має призначення для напівавтоматичної токарної обробки внутрішніх й зовнішніх поверхонь деталей, що мають форму тіл обертання із складним східчастим чи криволінійним профілем [2].

Металорізальний верстат можна використовувати для виробництва як дрібних, так і серійних партій деталей.

Використовуються продуктивні й високоефективні методи технологічної обробки простих поверхонь. Із них можливо перерахувати наступні:

- Застосування різальних інструментів з широким різцем і поперечною подачею для обробки поверхонь;
- Використання фасонних різців для обточування зовнішніх та внутрішніх поверхонь;
- Використання різьбонарізних головок та інших інструментів для обробки різьбових отворів та інших елементарних поверхонь.

Метод концентрації обробки застосовується шляхом одночасного використання декількох інструментів для обробки заготівлі, таких як два або

більше різці, різець та свердло та тому подібне. Дана технологія, разом із іншими прийомами, дозволяє ефективно, точно і головне швидко проводити обробку [2, 7, 9].

Загалом зменшує витрати на встановлення автоматичної лінії й скорочує робочі години, необхідні для виготовлення партії деталей.

Особливості програмування при застосуванні функції, котра контролює положення у кінці інструменту:

- Програма, створена обробником керованим програмним кодом в САМ-системі, використовує систему координат деталі, де програмний нуль знаходиться у точці перетину похилої й поворотних осей. Проте, на реальному верстаті інколи ці осі можуть не перетинатися.

- Обробник програмного керованого коду не перетворює траєкторію руху інструмента на лінійну.

- Обробник програмного керованого коду дозволяє вирішувати задачі зворотної кінематики, аби перетворити вектор за орієнтації осі інструменту на кути повороту й нахилу, котрі відображаються на реальному верстаті

- Постпроцесор не враховує жодних компенсаційних рухів, тому нахил інструмента відбувається відносно його кінчика.

- Під час нахилів й поворотах система координат змінюється динамічна, що призводить до розходження програмних осей «XYZ» від станкових.

- При умові нахилу відмінний від нуля, тоді у програмі ось Z не збігається із віссю інструменту, що означає, що для правильного відведення інструменту необхідно використовувати усі три координати, навіть якщо поворотна й похила осі контролюються столом [3, 10].

1.3 Вибір загальної топології досліджуваного електроприводу.

Щодо основних особливостей металорізального верстата:

Характеристики дизайну включають у свій склад наявність міцної стійкої рами, котра була виготовлена шляхом лиття чавуну й піддана

термообробці, а також шліфуванні напрямні, яка забезпечують довговічність і підвищену точність оброблення.

Механізм основного руху, котрий включає головний електричний двигун значення потужністю 10 (кВт) та шпиндель, що забезпечує надзвичайно високий крутний момент значенням до 900 (Н*м). Важливо також зазначити, що наявність високоточного шпинделя із отвором діаметром 55 (мм) дозволяє виконувати обробку деталі із пруткового матеріалу, тоді як зона обробки відповідно може мати лінійне налагодження чи револьверну головку це залежить від проекту [7].

Механізми переміщення за координатами X і Z є надзвичайно довговічними завдяки надійному захисту кулько-гвинтових пар. Крім того, даний верстат оснащений системою ЧПК й електроприводами, котрі можуть бути як українського, так і зарубіжного виробництва, забезпечуючи додаткову ефективність і надійність роботи.

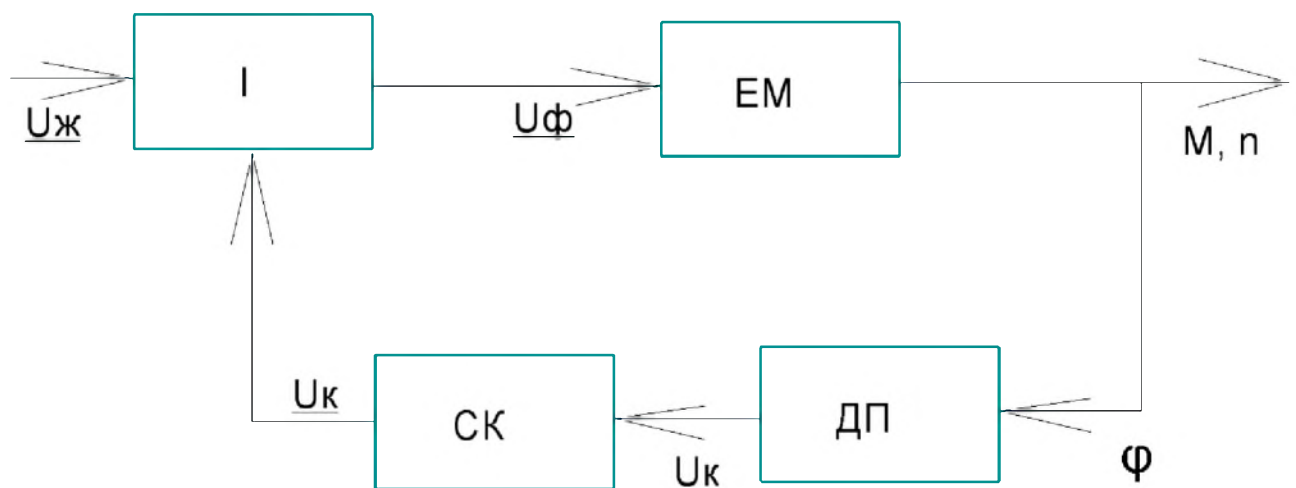


Рисунок 1.1 – Опис функцій й компонентів вентильного електродвигуна у вигляді схематичної діаграми

Склад вентильного електроприводу, котрий підтримує стійкий режим роботи, включає перетворювач й вентильний електродвигун (ВД), який не має механічного колектора. Замість цього, його функції виконує інвертор напівпровідниковий, а роль щіток виконує датчик положення ротора. На рис.

1.1 представлений опис компонентів й функцій вентильного електричного двигуна у вигляді схематичної діаграми. Тут можна побачити наступні позначення:

- СК – система керування.
- U_{ϕ} – напруга у СІФК.
- І – інвертор.
- ДП – датчик положення ротора.
- ϕ – кут повороту валу вентильного електродвигуна.
- М - момент на валу вентильного ЕД.
- U_k - керуюча напруга.
- ЕМ – електромеханічна машина.
- n – частота обертання валу вентильного ЕД.
- $U_{ж}$ – напруга живлення.

У вентильному електродвигуні необхідно забезпечити синхронний оберт ротора із обертом статора поля. Для цього варто правильно перемикаєти фазні обмотки статора у послідовності, аби вектор за потоком статора передавався попереду потоку ротора [4, 6].

Для правильного підключення фази до джерела живлення у вентильному двигуні варто мати дані про поточне положення ротора, щодо вісей фаз, а також вектор потоку збудження. Дана інформація отримується за допомогою датчиків положення (ДП).

Система керування обробляє інформацію від датчиків положення й генерує сигнали для управління ключами, котрі відповідають послідовності включення й відключення фаз. Дані дії забезпечують правильну роботу вентильного двигуна.

Під час обертання ротора вентильного двигуна відбувається переключення обмоток згідно із послідовністю, котра забезпечує переміщення вектору потік статора переміщується на наступний крок згідно з послідовністю,

що забезпечує правильну роботу вентильного двигуна. Це дозволяє ротору продовжувати обертатися синхронно із полем статора [3, 8].

Для виконання функції силових ключів у вентильному двигуні можуть використовуватись IGBT-транзистори, котрі складаються із біполярного й польового транзисторів. Фотоелектричний датчик може бути використаний в якості датчика положення вентильного двигуна [6].

Мікропроцесорне керування, яке базується на програмі контролера, використовується для керування перемиканням за силовими ключами у вентильному електродвигуні. Це дозволяє зберегти усі переваги, котрі властиві двигуну постійного струму, при цьому й усунути його основні недоліки.

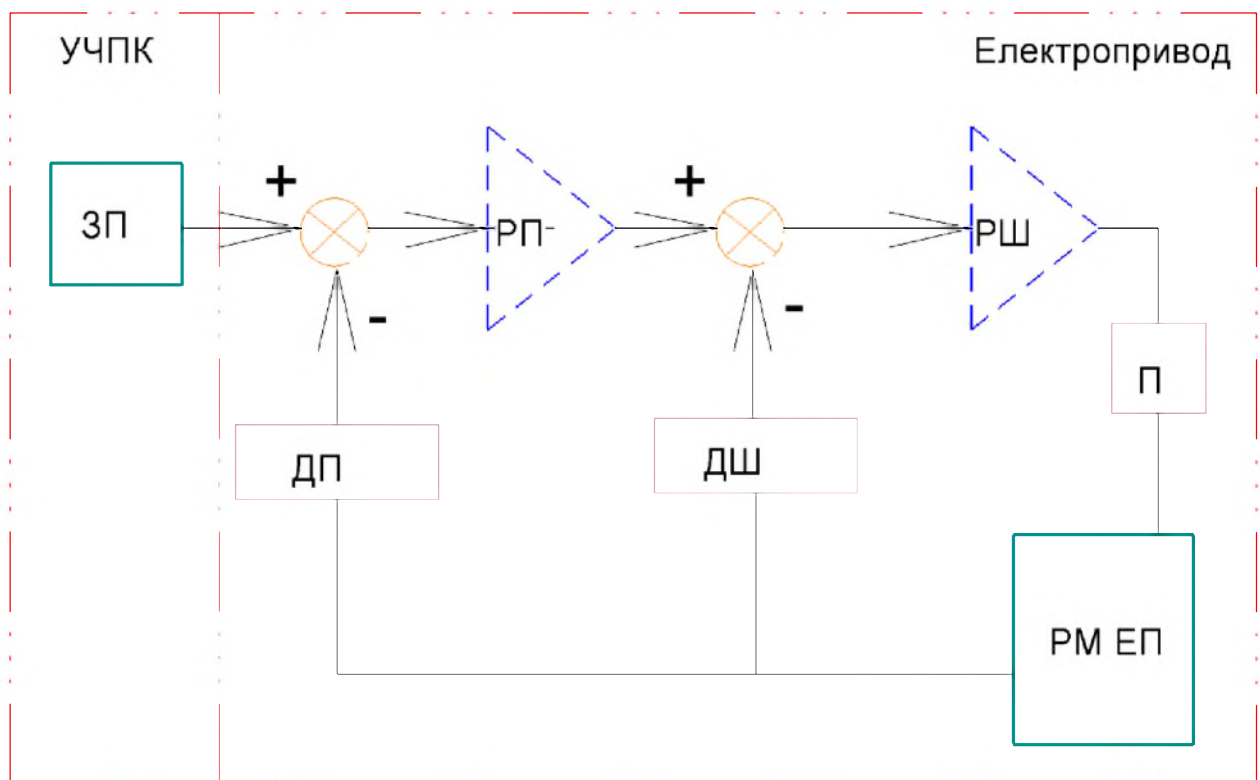


Рисунок 1.2 – Структурна схема керування електроприводом із контролем за положенням

Електричний привод має можливість працювати у трьох режимах: контроль за значеннями положення, швидкістю й струму чи моменту, із застосуванням слідкуючого вентильного механізму. Тож на рис. 1.2 показана функціональна схема цього електроприводу. Регулювання положення валу

ротора електродвигуна можливе завдяки оптичному інкрементному енкодеру, який встановлено на ньому. Даний оптичний енкодер може виконувати функції датчика кутових переміщень й датчика положення. Оптичний енкодер перетворює переміщення валу ротора на послідовність електричних сигналів, котрі містять інформацію про напрямок та величину руху. Тоді електропривод (рис. 1.2) складається із декількох елементів, котрі забезпечують контроль за положенням:

ЗП (завдання позиції), що визначає необхідну позицію для руху.

РП (регулятор позиції) здійснює керування положенням, а РШ (регулятор швидкості) - швидкістю.

Підсилювач (П) підсилює сигнали для забезпечення потрібного рівня напруги й струму.

Датчик швидкості (ДШ) визначає швидкість обертання двигуна, а датчик положення (ДП) контролює власне положення приводу [7, 11].

Схема рис. 1.2 доцільно використовувати, коли електричний двигун безпосередньо установлюється на ходовому гвинті при кульково-гвинтовій передачі (як наведено на рис. 1.3).

При цьому за умови, що електродвигун установлюється згідно зі схемою, яку зображена на рис. 1.1, тоді схема, яка зображена на рис. 1.2, приводить до додаткової похибки, яку вносить шківна передача.

Дана похибка має прямий вплив на точність позиціонування приводів подачі верстата.

У цьому випадку швидкість регулюється за допомогою електроприводу, а положення приводу - за допомогою числового програмного управління (УЧПУ). Становище гвинта ШВП контролюється за допомогою фотоелектричного датчика, встановленого на гвинті за допомогою сполучної муфти

У даному випадку регулювання швидкістю можна за допомогою електроприводу, в той час, як положення електроприводу контролюється за

допомогою числового програмного керування (ПЧПК). Фотоелектричний датчик, який встановлений на гвинті завдяки сполучної муфти, використовується для контролювання стану гвинта КГП [4].

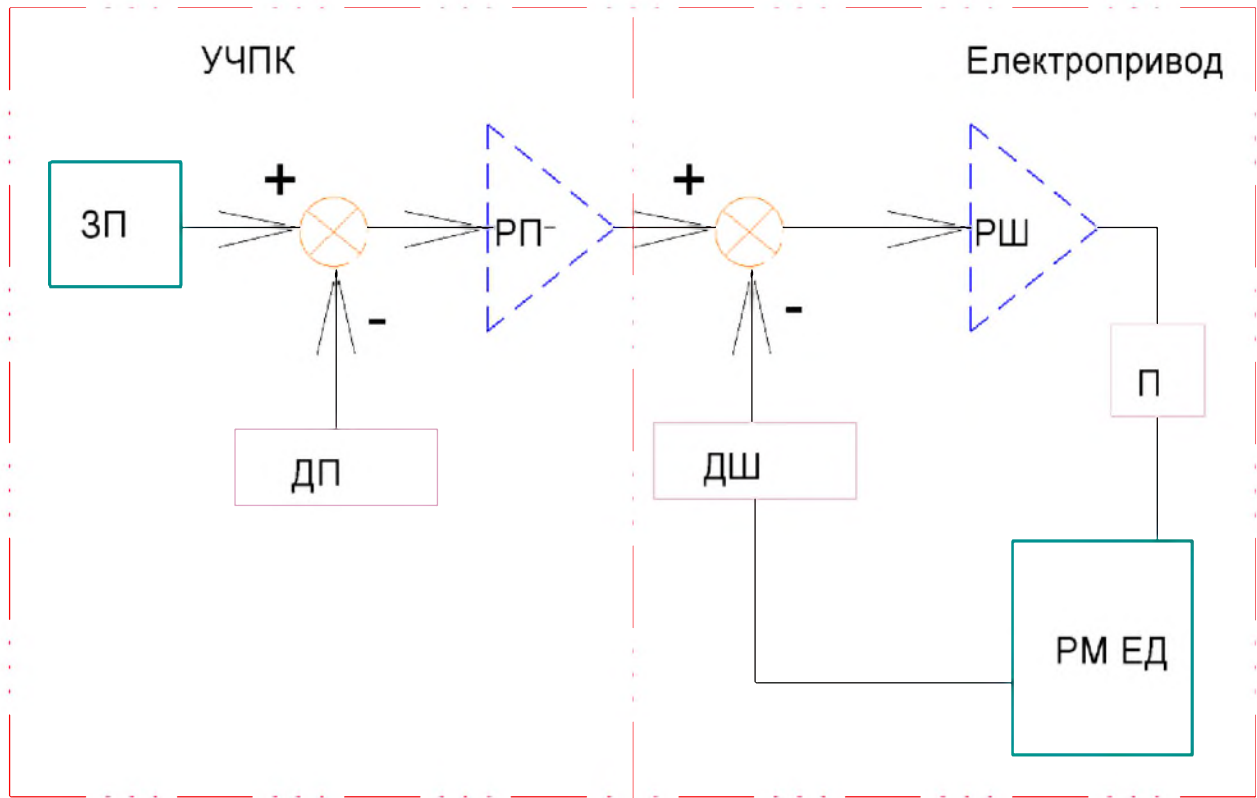


Рисунок 1.3 – Структурна схема управління електроприводом із здійсненням контролю за швидкістю

Розміщення електричного двигуна на ходовому гвинті кульково-гвинтової передачі зображено на рис. 1.4, тут позначені наступні елементи:

- ДП – датчик положення;
- М – електричний двигун.

$$J_m = \rho^2 \cdot m_c \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}, \quad (1.2)$$

де: – ρ – параметр, який визначається для забезпечення взаємної відповідності обертальної та поступальної швидкостей (1.1);

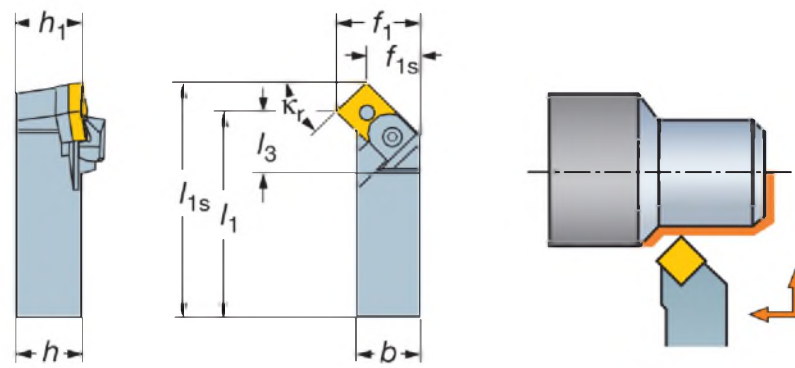
– m_c – значення маси супорта - $m_c = 50$ (кг).

На рис. 1.5 представлено створену кінематичну схеми пристрою (верстату), а в табл. 1 вказані її основні позначення.

Таблиця 1 – Позначення елементів на кінематичній схемі

Порядковий номер на схемі	Пристрій
1	Станина
2	Підставка із транспортером стружки
3	Передача гвинт-гайка кочення за поздовжнім переміщенням
4	Супортна група
5	Патрон, котрий механізований із електромеханічним приводом
6	Ліва опора гвинта поздовжнього переміщення
7	Шпиндельна бабка
8	Рухоме огородження
9	Нерухоме огородження
10	Автоматизована головка
11	Шафи керування
12	Задня бабка
13	Розведення комунікацій
14	Привід поперечного переміщення
15	Електромеханічний привід пінолі задньої бабки

Кут різання = 45°



Розміри (мм)

b	f_1	f_{1s}	h	h_1	l_1	l_{1s}	l_3
40	50.0	34	40	40	250	266	34

Рисунок 1.6 – Схема роботи ріжучих пластин

На рис. 1.7 показано схему пристрою, що перетворюють кутові переміщення за допомогою оптичних технологій на сигнали електричного струму. Даний пристрій також можна зустріти на рис. 1.5.

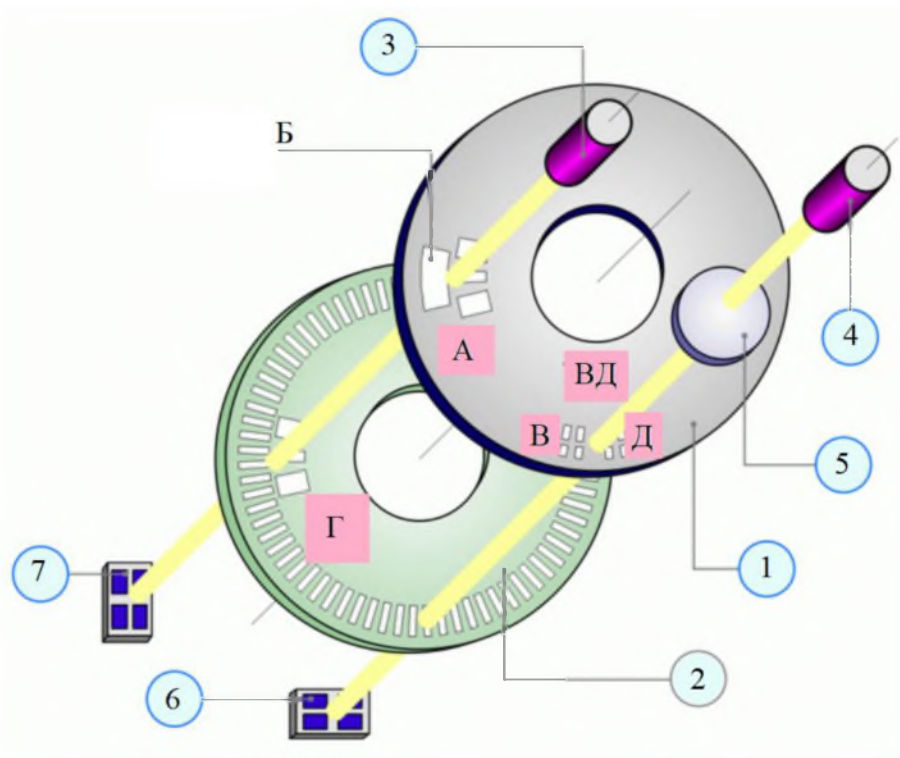


Рисунок 1.7 – Вузол, який проводить операцію зчитування

Вузол, що зчитує (представлений на рис. 1.7), має наступні елементи [2, 7]:

- растровий аналізатор (позначення 1) нерухомого зчитувального вузла;
- радіальну растрову шкалу 2, яка жорстко пов'язана з валом перетворювача;
- квадратний фотодіод (позначення 3-4);
- конденсор (позначення 5);
- випромінюючий діод (позначення 6-7).

Зазвичай кутові виміри обмежуються значенням 360° та можуть містити похибки від $0,5^\circ$ до 1° .

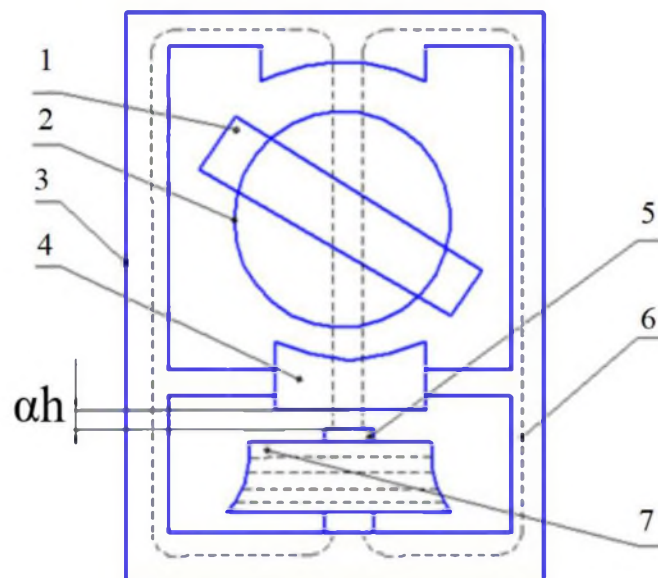


Рисунок 1.8 – Структурна схема перетворювача кутових переміщень феродинамічного типу

На рис. 1.8, де наведено схематичне зображення перетворювача кутових переміщень, який працює на основі феродинамічної технології, позначені наступні елементи 1 – рама; 2 і 3 - магнітопровід; 4 – полюсний наконечник; 5 – поршень циліндричної форми; 6 – магнітний потік; 7 – обмотка.

При цьому, аби визначити величину кутового зсуву варто використовувати (1.3).

$$E = U_{жс} \cdot k \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \varphi}{\varphi_m}\right), \quad (1.3)$$

де: – φ_m – значення максимального кута;

– k – значення коефіцієнту налаштування.

2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ПРИВОДУ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА. ВИБІР СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ЇЇ НАЛАШТУВАННЯ.

2.1 Опис схеми системи електроживлення ЕП та вибір її складових елементів.

Із виконаного аналізу у першому розділі, випливає, що електрообладнання верстата включає наступні компоненти:

1) Встановлення числової програмної системи управління, із метою керування циклом обробки власне деталі.

2) Комплектний асинхронний електропривод із глибоким регулюванням, із метою забезпечення управління приводами головного руху й подачі.

3) Електродвигуни, котрі керують приводами патрона, різцетримача, охолодження, мастила напрямних, пінолі, мастила шпинделя, а також транспортера для видалення стружки (рис. 1.5).

4) Датчики фотоімпульсні для здійснення контролю за переміщенням по вісях, а також для нарізування різьби.

5) Пристрої захисту, сигнальні й управляючі пристрої.

6) Інші пристрої й апарати, котрі забезпечують комутацію та приєднання електричних кіл й керування за механізмами [6, 8, 11].

Тоді характеристики технічного обладнання включають в себе технічні параметри ЧПУ, датчиків й електричних двигунів. Інформація про систему із живлення електричного обладнання включає роботу з електромережі трифазного змінного струму із напругою значенням 380 (В) (та відхиленням 10%) й частотою 50 (Гц) (та відхиленням 2%), котра має глухозаземлену нейтраль.

На самому металорізальному верстаті використовуються різні типи струму із різними параметрами. Ланцюги асинхронних електричних двигунів,

живлення комплектного приводу, управління трансформаторів отримують змінний струм із значенням напруги 380 (В) й частотою 50 (Гц).

Ланцюги пускача вступного, УЧПК й вентиляторів живляться змінним струмом значенням напругою 220 (В), тоді як ланцюги керування живляться змінним струмом напругою 110 (В).

Ланцюги із місцевого освітлення й сигналізації отримують живлення змінним струмом із напругою 24 (В). Окрім того, є ланцюги управління й сигналізації, що отримують живлення постійним струмом із напругою 24 (В). Для забезпечення безпеки використання, всі металеві частини самого верстату, котрі можуть бути під напругою вище за значення 42 (В), мають бути заземлені [5, 9].

2.2 Опис системи електропостачання, яка наразі використовується на установці.

Металообробні верстати, як до прикладу, токарно-револьверний, круглошліфувальний, вертикально-свердильний, горизонтально-проточний, горизонтально-розточувальний, токарний напівавтомат, токарний з ЧПК, горизонтально-фрезерний, радіально-інші, токарно-гвинторізний, виступають споживачами інструментального відділення середньої потужності.

Дані верстати є трифазними й встановлюються стаціонарно із рівномірним розподілом за площею цеху. Також в цеху є електричні приймачі контактного зварювання, котрі працюють у повторно-короткочасному режимі, включаючи точкові стаціонарні, зварювальні шовні роликові електромашини. Всі приймачі електрики призначені для живлення змінним струмом та напругою 380 (В) й промислової частоти. Для здійснення живлення усіх споживачів застовується цехова КТП, котра має два трифазних трансформатору типу ТМ–1000/10/0.4 із масляним природним охолодженням, призначених для конвертування електроенергії й живлення різних споживачів в мережах змінного струму.

Трансформатори серії ТМ-1000 мають 5 ступенів регулювання за напругою на ВН із точністю у 5% від номінального значення. Регулювання виконується за допомогою перемикачів без збудження (ПБВ), котре потребує ручного переведення трансформатора на інший діапазон, у момент коли він вимкнений. Трансформатори серії ТМ мають герметичну конструкцію, а замість олії застосовується азот в якості захисту, що має назву азотної подушки. Основні технічні параметри трансформатора серії ТМ-1000/10 приведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри трансформатора серії ТМ-1000/10

Значення параметру	Назва параметру
1000	$S_{\text{ном}}$, Номінальна потужність, [кВА]
10	$U_{\text{ВН.ном}}$, Вища напруга номінальне значення, [кВ]
0.4	$U_{\text{НН.ном}}$, Нижча напруга номінальне значення, [кВ]
13.6	Втрати у режимі КЗ, [кВт]
2.45	Втрати за холостого ходу, [кВт]
5.45	$U_{\text{К.З}}$ Напруга короткого замикання, [%]
1.8	$I_{\text{х.х}}$ Струм холостого ходу, [%]

Під час проектування електропостачання, головною тенденцією виступає скорочення довжини мереж із меншою напругою за рахунок поблизу розташування трансформаторних підстанцій більшої напруги до споживачів електрики. Електромережі напругою $U_{\text{ЕМ}}$ до 1000 (В) можуть бути розподільними чи живильними, котрі можуть бути виконані за магістральними, радіальними чи змішаними схемами. Схеми радіальні часто застосовуються із метою живлення потужних споживачів й дрібних електроприводів, розподілених за цехом. Схеми магістральні застосовуються для електроприводів, котрі обслуговують один агрегат та пов'язані єдиним технологічним процесом. Змішані схеми несуть у собі поєднання елементів

наявних у магістральних й радіальних схемах, що є найбільш поширеними. У даному випадку, розподільна мережа відділу виконана інструментального за схемою радіальною [4, 12].

Так на рис. 2.1 представлено однолінійна схему електропостачання, у частині трансформації.

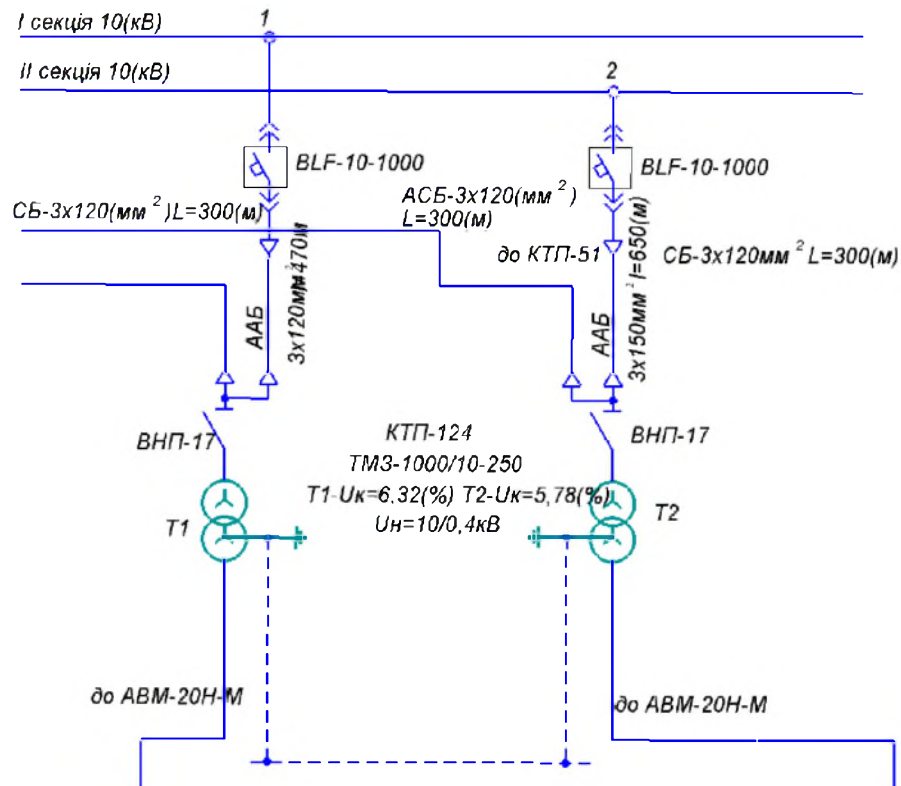


Рисунок 2.1.а – Однолінійна схема електропостачання, частина ВН

В склад комплектного електроприводу входять наступні компоненти: шафа із електричними перетворювачами, два асинхронні двигуни із інтегрованими датчиками за температурою положення блок трансформаторів, а також вентиляторами та пристроями діагностики сигнального контролю. Даний електричний привід здатен забезпечувати роботу в усіх чотирьох квадрантах характеристики механічної під час зміни значення напруги, якою керує, у діапазоні 10 (В) [6].

При цьому значення максимальної частоти обертання становить 1000 чи 1500 (хв^{-1}), залежно від габаритів й параметру приводу. Габарити приводу мають широкий діапазон номінальних моментів електродвигунів від 6 до 50

(Нм). Електричний привід генерує імпульсні сигнали переміщення, котрі можуть бути використані в пристрої ЧПК для виміру параметру переміщення пристроїв подач.

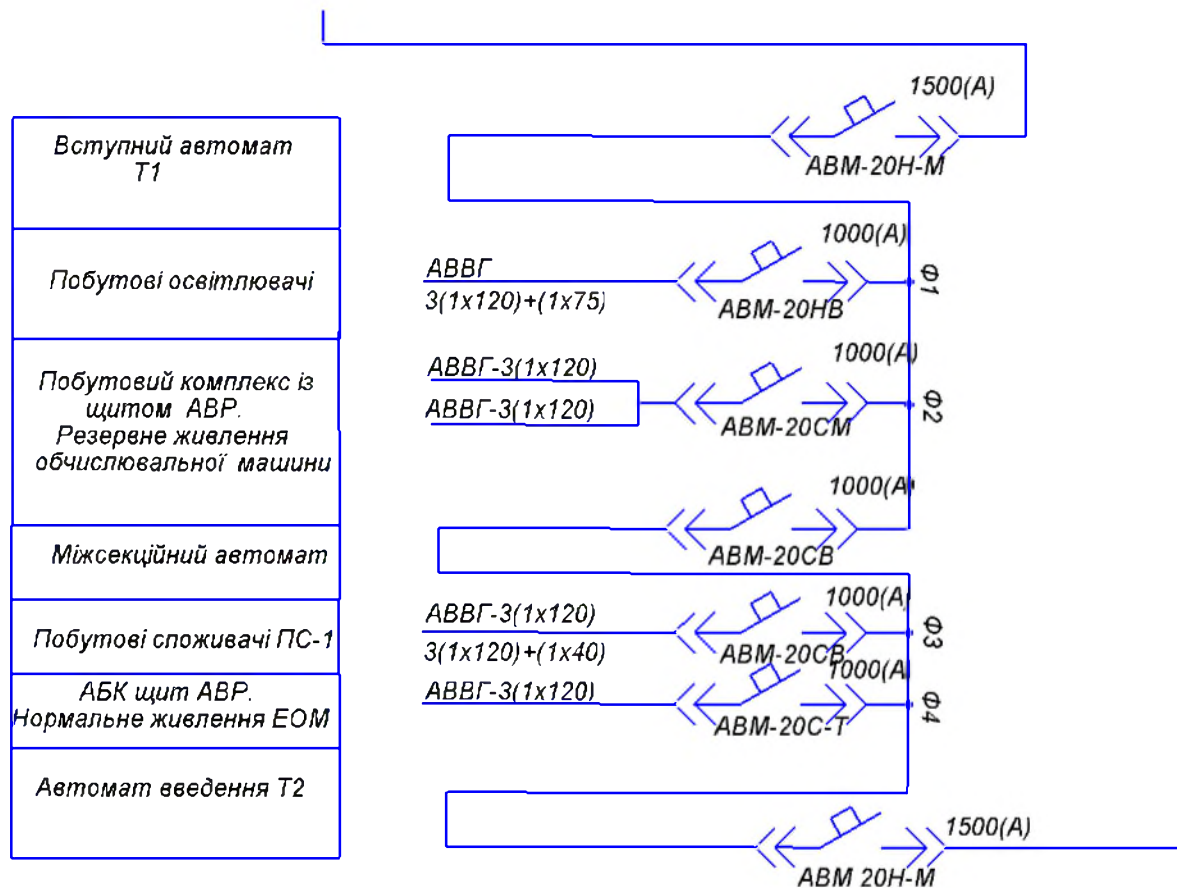


Рисунок 2.1.6 – Однолінійна схема електропостачання, частина НН

Для вимірювання переміщення використовуються дві серії імпульсних сигналів із фазовим зсувом у 90 градусів, котрі передають інформацію про напрямок й величину руху. Тоді за повний один оберт валу електродвигуна подається 1000 чи 2000 імпульсів, кількість залежить від характеристик ЕП. Генерується також й сигнал за нуль-міткою (НМ), котрий застосовується для генерування міток старту відліку. Значення частоти обертання головного приводу коливається у діапазоні від 50 до 4200 (об/хв), а значення потужності електроприводу становить 10 (кВт). Управління приводом реалізовано за допомогою частотно-струмового методу, при цьому привід забезпечує двозонне регулювання за частотою обертання.

Основними технічними вимогами є забезпечення широкого спектру технологічних режимів обробки; використання сучасного інструменту різання, досягнення максимально можливої ефективності роботи засобів виробництва із метою максимізації випуску продукції при мінімальних затратах ресурсів; забезпечення високої точності оброблення й високої чистоти обробки поверхні. Щоб відповідати цим вимогам, необхідні певні характеристики металорізального верстату й самого різального інструменту, потужний головний ЕП, а також досягнення цих вимог залежить від електромеханічних характеристик приводів подачі й системи керування [7, 12].

Головний ЕП у металорізальному верстаті повинен відповідати ряду особливостей, таких як значно вища потужність, необхідність застосування усієї потужності ЕД в широкому діапазоні частот обертання власне шпинделю, значні моменти інерції, котрі перевищують власні моменти інерції ЕД на високих швидкостях, використання ЕП із реверсом для ефективного гальмування під час зниження частоти і у режимах постійної підтримки швидкості різки, високий рівень точності позиціонування.

Ще одна особливість головного приводу у верстатах полягає у тому, що протягом значної частини робочого часу необхідно підтримувати постійну частоту обертання шпинделя.

2.3 Розрахунок потужності, необхідної для електричного приводу та обладнання.

При виборі електричних двигунів необхідно враховувати такі показники й параметри, як:

- тип струму й номінальні показники напруги;
- вигляд механічної природної характеристики;
- номінальна швидкість й потужність;
- методи гальмування й пуску та,

– можливості регулювання за швидкістю й конструктивне виконання ЕД.

Отже, перше за все варто розрахувати радіус приведення швидкості за (1.1) підставивши власні значення:

$$\rho = \frac{6 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot \pi} = 9.5 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}, \quad (2.1)$$

Також розрахуємо значення механічний момент інерції за (1.2):

$$J_m = (9.5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 50 = 4.75 \cdot 10^{-3} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}, \quad (2.2)$$

В той же час електропривод подачі повинен відповідати наступним вимогам:

- високий обертальний момент під час мінімальних розмірах електродвигуна;
- широкі можливості налаштування швидкості;
- велике значення максимальної швидкості;
- стабільність характеристик на високому рівні;
- висока здатність до перевантаження в режимах короткочасного, а також повторної й короткочасної дії навантаження;
- велика швидкодія під час розгону, приєднання й відключення навантаження, гальмування;
- зручний спосіб розташування ЕД на верстаті й вбудовування перетворювачів із управлінням шафи і вмонтовані у верстати ніш.
- рівномірний рух під час різного навантаження та у діапазоні всіх швидкостей, котрі включають найменші значення [9].

2.3.1 Встановлення необхідної потужності головного двигуна.

У встановленому режимі потужність на валу головного ЕП складається із:

- величини потужності витрат у передавальних механізмах, котра залежить від кількості ланок кінематичного ланцюга, навантаження й частоти обертання ЕП;

- величини потужності різання, котра є залежною від швидкості різання й зусилля.

Один із часто використовуваних підходів до розрахунку полягає у використанні коефіцієнта ККД верстата, який визначається як множення ККД кожної окремої ланки кінематичного ланцюга в режимі роботи під час певної швидкості.

$$\eta_{ст} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_{нв} \quad (2.3)$$

При збільшенні швидкості обертання робочих пристроїв верстата втрати у механізмах передач зростають, що зменшує значення коефіцієнту ККД металорізального верстата. Для таких верстатів, ККД за кінематичним ланцюгом головного ЕП під час максимального навантаження зазвичай становить значення у діапазоні від 0.65 до 0.75. Зазвичай, що стосується ланцюга подачі, ККД знаходиться в межах від 0.08 до 0.2 оскільки використовуються передачі зі зниженою передаточною здатністю, які мають знижений ККД.

Значення потужності на валу головного ЕП із врахуванням витрат у механізмах передач становить:

$$P_{н.в} = \frac{\omega_{шп.макс} \cdot M_{шп.макс}}{\eta_{ст}}, [кВт] \quad (2.4)$$

Значення швидкості обертання, виражена у кутовій одиниці часу:

$$\omega_{шп.макс} = \frac{2\pi \cdot n}{60}, [об / хв] \quad (2.5)$$

де: – $\eta_{ст}$ – значення ККД ККД кінематичного ланцюга головного приводу металорізального верстата зазвичай становить 0.8 під час повного навантаженні.

Обчислюємо значення потужності протягом всього діапазону на основі інформації про зміни частоти обертання, крутного моменту та величини потужності у шпинделі, котру можна знайти за паспортними даними. Тоді після підстановки параметрів у вирази 2.3 – 2.5 в табл. 2.1 представлено отримані результати.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики ЕД головного ЕП

Діапазон, в якому може змінюватись за частотою оберту шпинделя.	I	II	III
Момент на валу шпинделя, $M_{шп}$, [Нм]	42	124	367
Значення оберту валу ЕД, $n_{шп}$, [об/хв]	2675	926	295
Значення потужності ЕП шпинделя $P_{номп}$, [кВт]	10	10.75	11
Швидкість оберту шпинделя $\omega_{шп.макс}$, [об/хв]	287	79	27

2.3.2 Розрахунок потужності двигуна, котрий забезпечує рух подачі.

Для проведення механічної обробки виробу потрібно розрахувати момент опору для 2 режимів обробки: первинний та вторинний.

Здійснення розрахунку значення моменту опору необхідно враховувати певні елементи для різання, котрі застосовуються у момент заточення [8].

– Параметр швидкості різання (V_p) визначає шлях, котрий проходить кромка ріжучого інструменту відносно оброблюваної поверхні, та вимірюється у [м/хв].

– Характеристика подачі (s), котра визначає переміщення різця за повний один оберт деталі обробки, котрий вимірюється у [мм/хв].

– Параметр глибини різання (t_p), що визначає шарову товщину матеріалу, який зрізається із оброблюваної поверхні [мм].

Не буде зайвим враховувати й стійкість інструменту (T_i), яка визначає період часу, протягом котрого інструмент може працювати до затуплення, вимірюється у [год].

Тоді для знаходження величини швидкості різання під поздовжньому обробленні становить:

$$V_p = \frac{C_{un} \cdot K_n}{T_p^i \cdot t_p^j \cdot s_n^k}, [м / хв] \quad (2.6)$$

де: – i, j, k – показники ефективності обробки, котрі залежать від властивостей обробленого металу, а також типу обробки й матеріалу самого різця.

– K_n – показник коефіцієнт корекції, котрий обчислюється за допомогою виразу (2.7).

$$K_{\Pi} = K_{я.і} \cdot K_{с.п.} \cdot K_{я.о} \quad (2.7)$$

де: – $K_{я.і}$ – параметр, котрий ураховує якість матеріалу, із якого виготовлено інструмент, приймаємо 1.17.

– $K_{с.п.}$ – параметр, який характеризує поточний стан поверхні самої оброблюваної заготовки, приймаємо 0.87.

– $K_{я.о}$ – параметр, який відображає якість матеріалу, що підлягає обробці, та обчислюється за допомогою виразу (2.8).

$$K_{я.о} = K_{г.с} \cdot \left(\frac{750}{\sigma_{в.с.}} \right)^{n_2} \quad (2.8)$$

де: – $K_{г.с}$ – параметр, що відображає оброблюваність сталі у відповідності із її групи, приймаємо рівним 1.

– $\sigma_{в.с.}$ – для обраної марки сталі, приймаємо 625 (МПа).

– n_2 – значення ступені ефективності обробки, котре відображає здатність матеріалу до обробки сталі відповідно із її групою, приймаємо рівним 1.

Отже, дані коефіцієнти (2.7 – 2.8) будуть необхідні, аби потім швидкість й сили різку, а вже звідси обрати й за номінальними показниками тип ЕП. Тоді спершу скориставшись приведеними виразами (2.7 – 2.8) і виразом для пошуку швидкості (2.6) розрахуємо значення для двох видів обробки і занесемо все це у табл. 2.2.

Під час точіння, величину(F_p) сили різання можна розкласти на осьові складові сили, котрі збігаються за напрямом із трьома вісями координат самого металорізального верстату –радіальну, тангенціальну й осьову. Під час зовнішнього точіння з осьовим напрямком збігається відповідна осьова ріжуча сила, що можна визначити як:

$$F_p = 10 \cdot C_p \cdot T_p^i \cdot v^k \cdot s^j \cdot K_{\Pi} \quad (2.9)$$

де: – C_p – показник для конструкційної сталі із відповідними розрахунковими умовами для обробки, осьова складова сили обробки має постійне значення.

Таблиця 2.2 – Параметри первинної та вторинної обробки

Первинна обробка	Вторинна (остаточна) обробка	Значення коефіцієнтів, котрі відображають режим обробки.
1	1	$K_{я.і}$
0.87	1	$K_{с.п.}$
1.17	1.17	$K_{я.о}$
1	1	$K_{г.с}$
625	625	$\sigma_{в.с.}$
1	1	n_{Γ}
110.75	407.25	V_p (м/хв)
827.4	35.6	F_p (Н)
18.75	0.62	M_p (Нм)

Наразі можна визначити величину моменту під час різки:

$$M_p = 0.5 \cdot d \cdot F_p \quad (2.10)$$

де: – d – діаметр первинної обробки деталі, [м].

Для того, щоб електричний привод виробничого обладнання працював у відповідності до заданого технологічного режиму, потрібно, щоб номінальне значення потужність ЕД відповідала вихідної потужності й режиму його роботи. Тому під час визначення номінальної потужності ЕД можливо застосовувати попередньо визначені умови [8, 9]:

$$P_{\text{ном}} = 1.6 \cdot \omega_{\text{max}} \cdot M_{\text{max}}, \text{ (кВт)} \quad (2.11)$$

де: ω_{max} – значення максимальної швидкості оберту валу ЕД у [рад/с]

– M_{max} – показник максимального статичного момент, котрий переданий на вал ЕД [Н].

$$M_{\text{ст}} = \frac{\rho_{\text{ш}} \cdot F_p}{\eta_n}, \text{ (Н)} \quad (2.12)$$

де: $\rho_{\text{ш}}$ – радіус, на якому вимірюється момент обертання, коли вал ЕД обертається із швидкістю (ω).

– F_p – показник сили різання, котра відповідає встановленому режиму обробки (Н).

– η_n – ефективність механічної передачі [%].

Шляхом виконання розрахунків можливо визначити параметр частоти максимальної оберту ЕД так, щоб була забезпечена задана швидкість V переміщень супорту, що приймаємо 2 (м/хв) [8, 13].

Відповідні значення кутової швидкості, котрі були визначені для двох режимів обробки занесені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Швидкісні характеристики для двох режимів

$V_p, [м / хв]$	$w_p, [рад / с]$	$n, [об / хв]$	
2	216.42	2100	Переміщення із прискоренням
0.47	52.37	480	Первинна обробка
0.058	5.16	52	Вторинна (остаточна) обробка

Отже тепер можливу визначити потрібну потужність ЕД за (2.11):

$$P_{ном.ЕД} = 1.6 \cdot 9.75 \cdot 216.42 = 3.38 \text{ (кВт)}$$

(2.13)

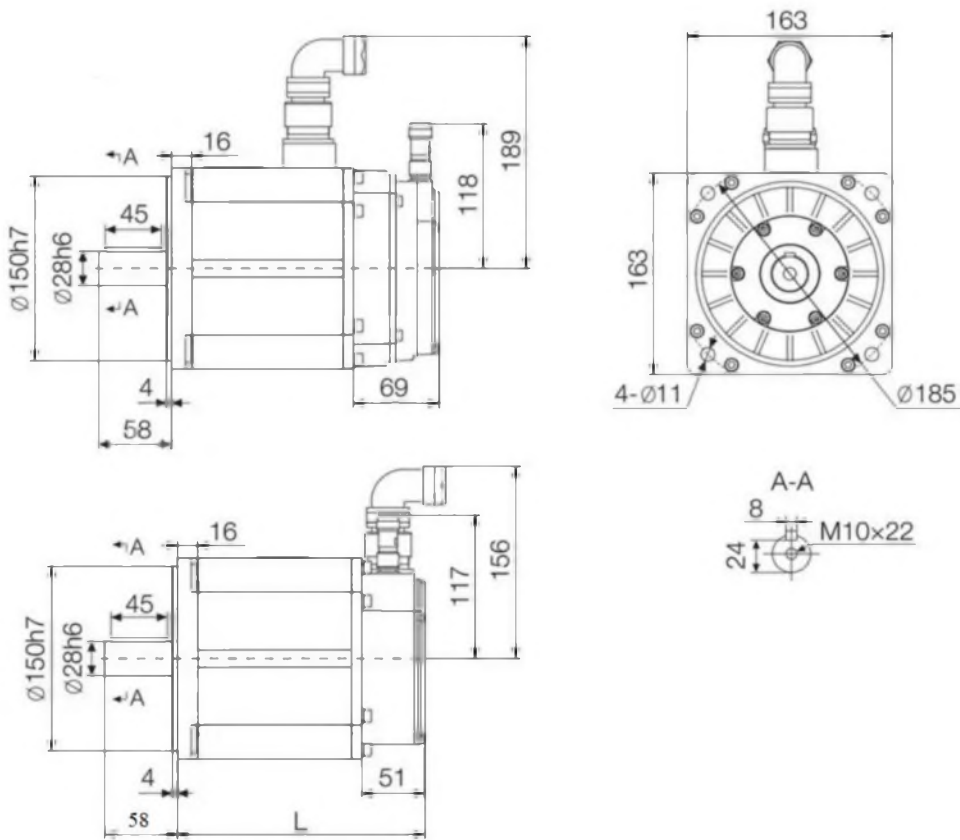


Рисунок 2.2 – Схема обраного двигуна для виконання обробки заготовки

3. ВИБІР ТИПУ КОМПЛЕКТНОГО ЕП ДЛЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА.

3.1 Опис та вибір комплектуючих ЕП головного руху.

Випрямний міст на вході частотного перетворювача функціонує на зразок електроприводу із постійним струмом, але його вихідний струм повинен бути обернений на трьохфазний (змінний струм), завдяки інверторові. Оскільки при роботі із постійним струмом немає переходів відносно нуля, тоді транзистори типу IGBT, котрі використовуються для перемикання й мають переривати струм навантаження. Під час закриття транзистора IGBT струм проходить за зворотнім діодом на обернений полюс напруги. Ймовірне перемикання у будь-який час та не залежить від виду напруги й відбувається без контролю за напругою. Описана схема була побудована на рис. 3.1.

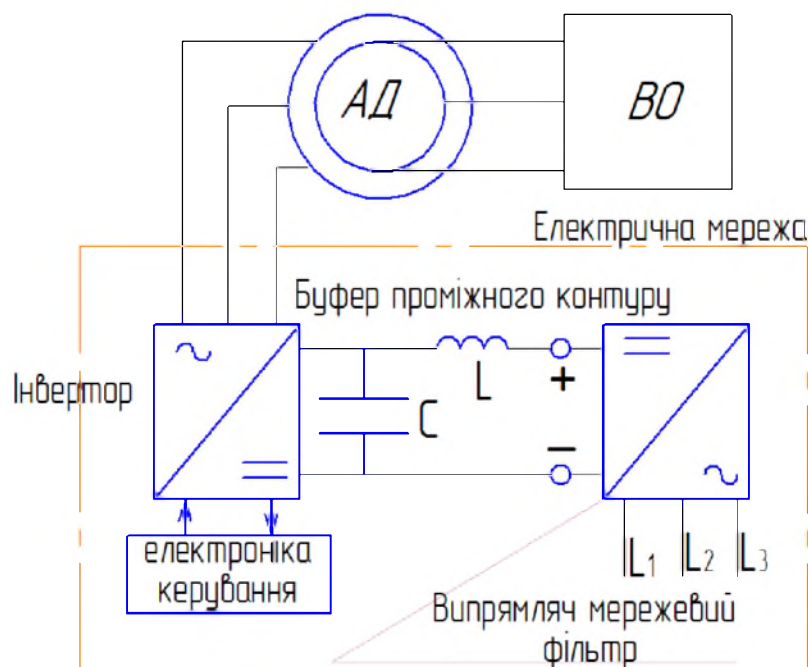


Рисунок 3.1 – Схема структурна, що включає в себе інвертор напруги та призначена для перетворення частоти.

Також варто додати до опису структурної схеми обраного ЕП, наведеного на рис. 3.1, що склад силової частини даного перетворювача частоти (ПЧ) представлений: мережею змінного струму, де є наявний випрямляч некерований; ділянка постійного струму, котра містить фільтр типу LC, АІН (інвертор напруги автономний) із ШІМ керуванням та власне асинхронний двигун (АД), котрий отримує живлення змінним струмом, із регулюванням частоти (тобто $f_{\text{ж}} = \text{var}$), а також амплітудою величиною $U_{\text{ж}} = \text{var}$. Керування самим інвертором виконується за допомогою блоку керування, котрий має у своїй структурі переважно електронні компоненти та виконується відразу у збірці [8].

У перетворювачах частоти комутація відбувається з великим значенням частоти, при цьому в напрузі вихідної з'являється складова високої частоти і, тому без застосування фільтра (рис. 3.1) можуть виникнути проблеми із сумісністю електромагнітною.

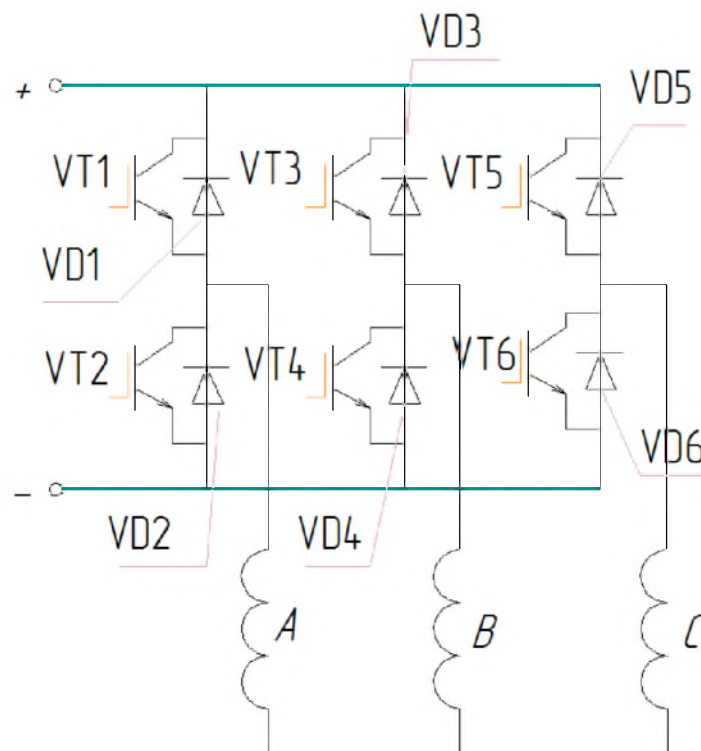


Рисунок 3.2 – Схема структурна АІН із використанням транзисторів біполярного типу

На рис. 3.3 представлено осцилограму, котра відображає як протягом певного часу (декілька періодів) відбувається управління транзисторами.

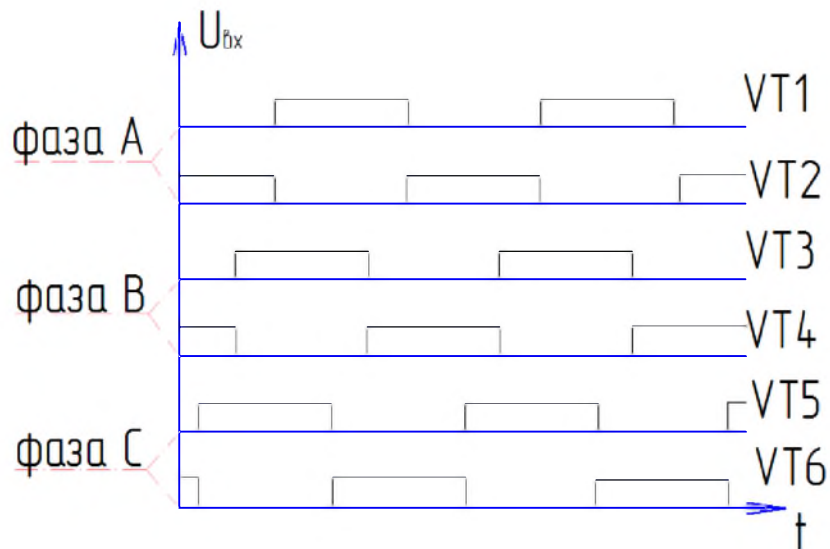


Рисунок 3.3 – Осцилограма керування транзисторами у ПЧ із АІН

Із метою підвищення точності підтримки за швидкістю й моментом на валу ЕД у найбільш оптимальних перетворювачах є реалізованим векторне керування, котре дозволяє працювати на повному моменті ЕД у межах нульових частот, разом із цим підтримуючи поточну швидкість на заданому рівні під час змінного навантаження не використовуючи датчики (за зворотним зв'язком). При цьому здійснюється й контроль моменту на валу ЕД.

$$\begin{cases} I_{\text{ном.ТП}} \geq I_{\text{ном.Д}} \\ U_{\text{ном.ТП}} \geq U_{\text{ном.Д}}, \end{cases} \quad (3.1)$$

де: $U_{\text{ном.Д}}$, $I_{\text{ном.Д}}$ – показник номінального значення напруги і струму двигуна ЕП;

– $U_{\text{ном.ТП}}$, $I_{\text{ном.ТП}}$ – показник номінального значення напруги і струму перетворювача (рис. 3.1).

Таблиця 3.1 – Технічні параметри розрахованого асинхронного ЕД

Micromaster 430	Назва комплектного ЕП
$P_{н.ЕД} = 11 \text{ (кВт)}$	Номінальна потужність ЕД
$S_{н.П} = 22 \text{ (кВА)}$	Номінальна потужність перетворювача
$U_{ном} = 380 \text{ (В)}$	Номінальна напруга
$I_{ном} = 25 \text{ (А)}$	Номінальний струм

Таблиця 3.2 – Технічні параметри розрахованого асинхронного ЕД

Значення та одиниця виміру	Назва параметру
$P_n = 11 \text{ (кВт)}$	Потужність номінальна двигуна
$U_{ЕД.ном} = 380 \text{ (В)}$	Номінальна напруга
$I_{ЕД.ном} = 21.2 \text{ (А)}$	Номінальний струм
$J_\phi = 0.21 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2 \text{)}$	Момент інерції
$p = 2$	Кількість пар полюсів
$\eta = 88.6 \text{ (\%)}$	ККД
$\cos(\varphi) = 0.87$	Коефіцієнт потужності
$N_\phi = 2825 \text{ (об / хв)}$	Фактична частота обертання валу N_ϕ
$I_{пуск} / I_{ном} = 7$	Співвідношення пускового й номінального струму
$M_{пуск} / M_{ном} = 2.1$	Відношення пускового й номінального моменту

Наразі спираючись на проведений розрахунок виникає можливість обрати комплектний ЕП для реалізації головного руху, ним виступає електромеханічний пристрій параметри якого наведені у табл. 3.1. У табл. 3.2 окремо представлено технічні характеристики самого ЕД.

Для виконання керування за головним рухом векторного приводу (асинхронним двигуном) застосовуємо плату на базі мікропроцесору 32-бітний Під платою розуміємо саме STM32 (позначення UZ1 на рис. 3.1), даний пристрій якомога краще підходить до поставлених задач, адже має вже вбудовані канали для виміру діючих основних характеристик приводу (приведені на рис. 3.4 – потужність, струм й напруга) [8, 11].

Тоді приймаючи до уваги розрахунок та обрану систему керування було реалізовано наступну схему підключення ЕП.

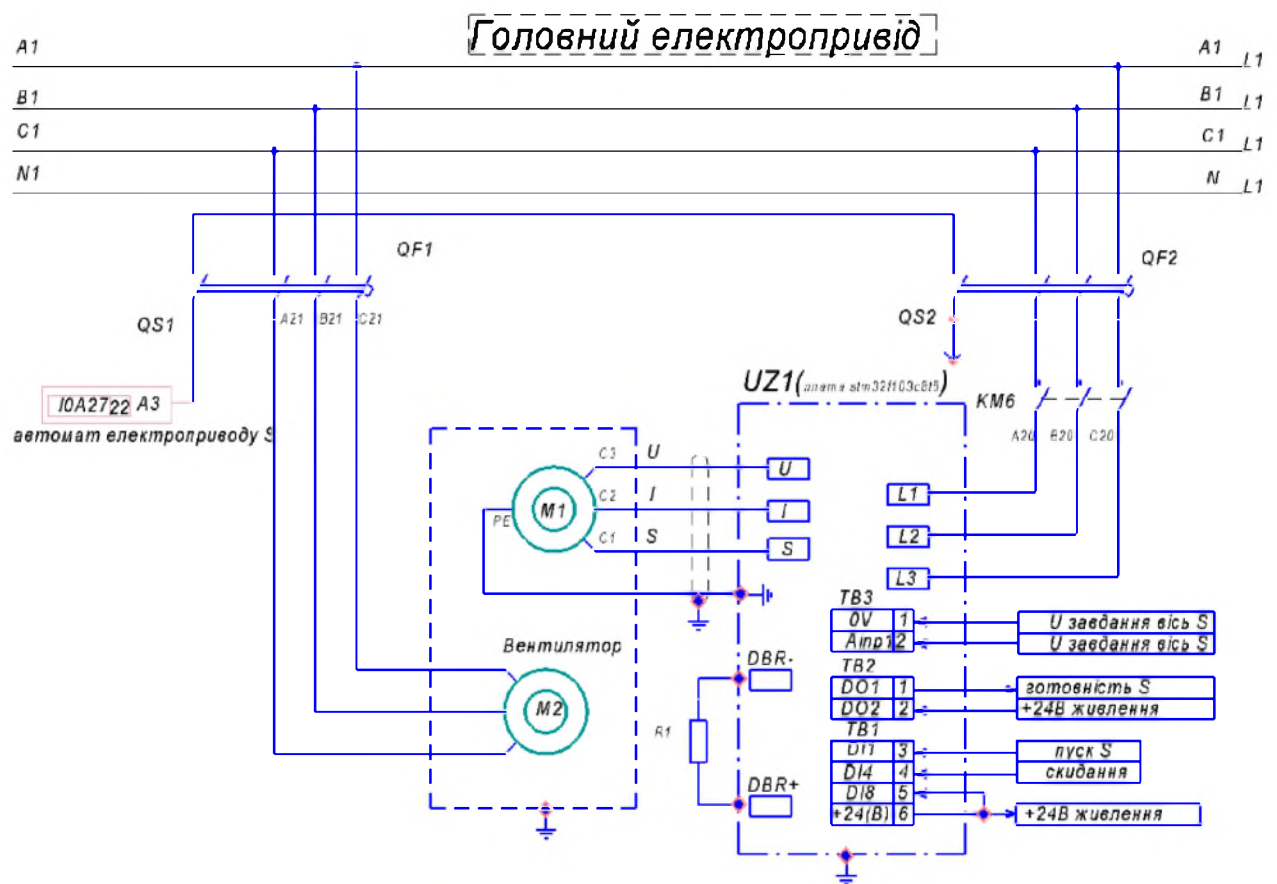


Рисунок 3.4 – Схема підключення приводу головного до плати керування

Асинхронний двигун для виконання головного руху (рис. 3.1), як буде показано й під час моделювання, має високі швидкісні й динамічні характеристики. Має також у своєму складі вбудований інкрементальний енкодер (через який надходить інформації про поточний стан положення та

кут повороту). Окрім цього, як видно із тої ж схеми підключення (рис. 3.1) в ЕД присутній й вентилятор вбудований.

Тоді дана система (рис. 3.4) дозволяє мати різний діапазон під час регулювання швидкості в залежності від відповідного методу керування:

- 1) За умови регулювання за законом U/f регулювання, діапазон становитиме 1:50.
- 2) Під час векторного керування із контуром розімкненим діапазон становитиме 1:150.
- 3) 2) Під час векторного керування із контуром замкненим діапазон становитиме 1:900.

На вплив керування за швидкістю реакція у системі становить 25 (Гц). При цьому кожен із секторів окреме має й обмеження за крутним моментом, що можливо встановити (або налаштувати) через використання записів у окремі параметри (констант).

Щодо інтегрування датчика за зворотнім зв'язком, то варто відзначити, що воно виконується через сигнальний термінал, а також термінал живлення, при цьому показник напруги може бути заданий через перемикач у діапазоні 5–24 (В). В то й же час, напругу блокування живлення енодера можливо отримати й від внутрішнього джерела живлення у 24 (В) самого ЕП [8, 13].

3.2 Опис та вибір комплектуючих ЕП приводів різання (за осями).

При цьому не варто забувати, що, як було зазначено в аналізі ще за двома осями треба обрати додаткові приводи.

Отже, електричний привод серії M300-AIP, котре буде далі розглядатись виступає реверсивним й унідирекційний приводом змінного струму із моментом на валу від 1.5 до 50 (Нм), котрий може регулюватися для спостереженням за переміщеннями й підтриманням заданої швидкості обертання у широкому діапазоні. Використовуються дані електроприводи для

швидкодіючих подавальних механізмів верстатів із металообробки, також до цього числа входять й ті, котрі мають числове програмне керування (як і у даному проекті), гнучких механізмів виробничих комплексів, виконавчих механізмів систем промислових, в цілому тих, котрі потребують регулювання за швидкістю обертання й високої точності.

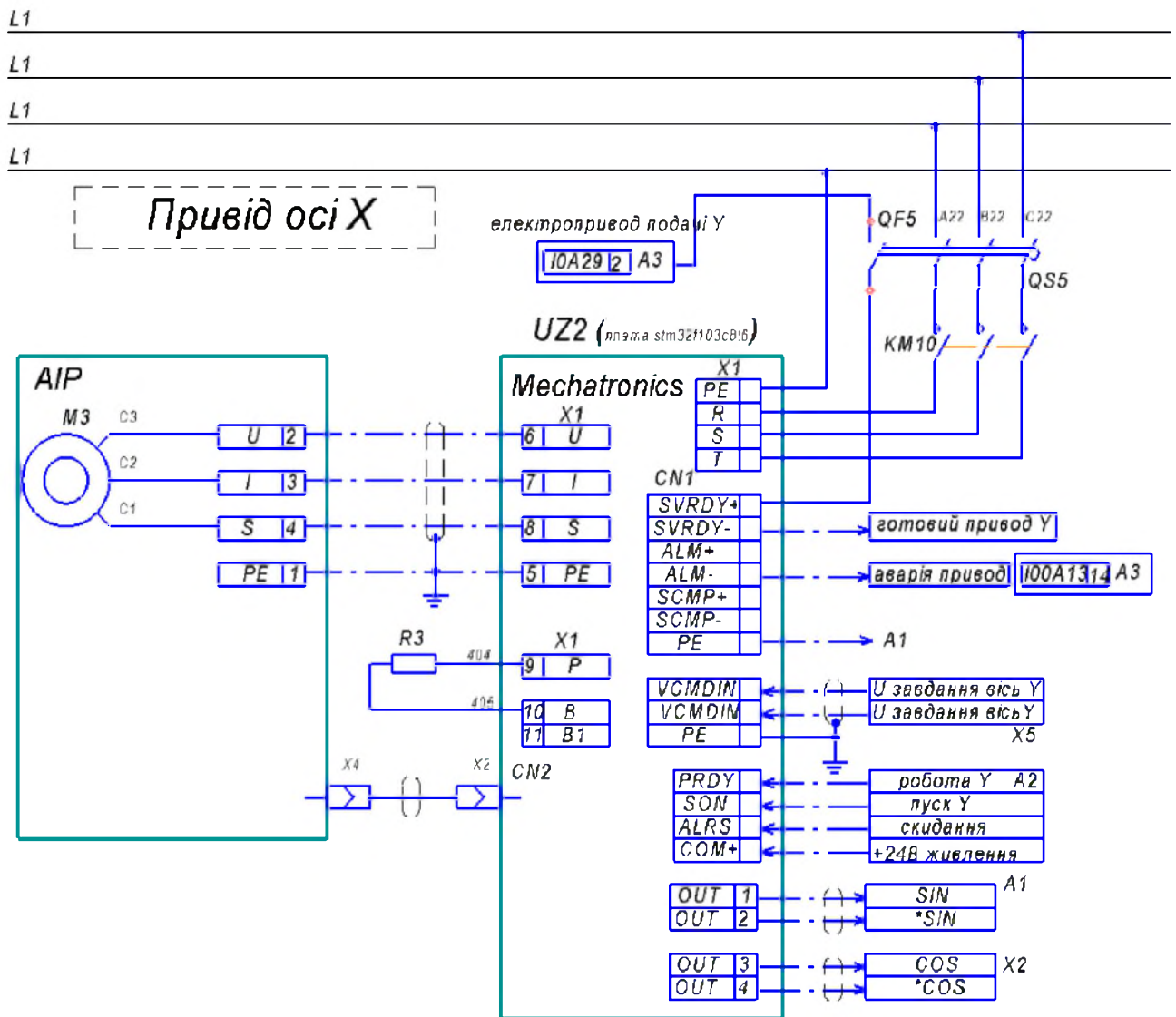


Рисунок 3.5 – З'єднання поміж собою складових частин електричного приводу серії M300-AIP

Також живлення потребує й додаткове обладнання, а саме система освітлення, яка стане у нагоді обслуговуючому установку персоналу, підсистема освітлення пов'язана із інформування про поточні режими роботи (в тому числі сюди можна включити й аварійні), а також загальна система

вентиляції шафи із ЕП. Тож схема електрична описана вище отримала свою реалізацію на рис 3.6.

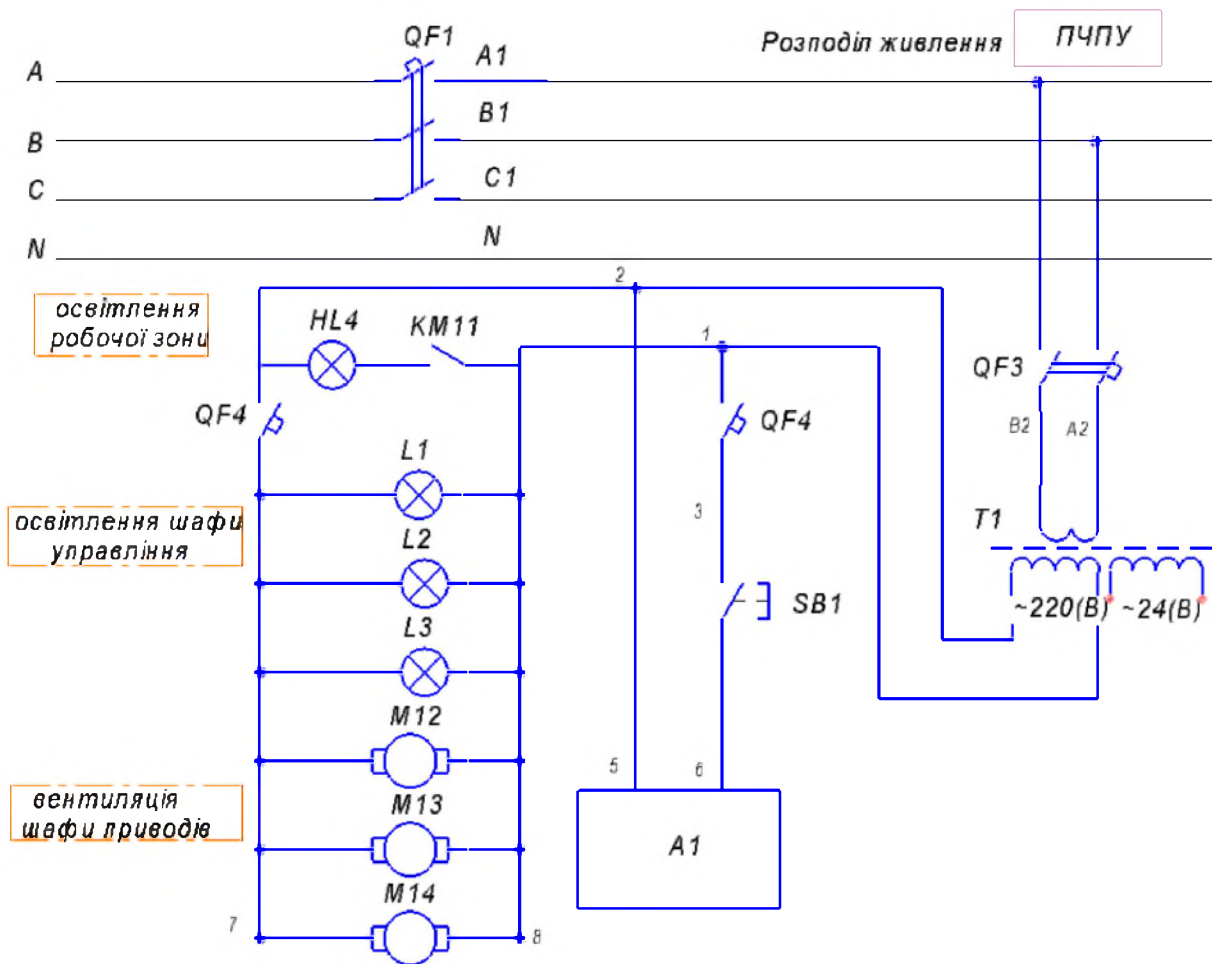


Рисунок 3.6 – Схема живлення системи освітлення й вентиляційної установки шафи із приводами

Як видно із рис. 3.6, інвертор використовується для управління ЕД і має ключі силові на транзисторах типу IGBT, котрі поєднують в собі польові й біполярні транзистори. Його мікропроцесорне управління забезпечується вдосконаленим 32-розрядним Cortex-M3 контролером, котрий й забезпечує цифровий контроль за станом й швидкістю.

3.3 Опис технологічного засобу, котрий дозволяє взаємодіяти із перетворювачем, а також і передавати йому сигнали.

Електродвигуном додаткової дії виступає вентильний синхронний змінного струму, який використовує постійні магніти на роторі для збудження. Його якір має трьохфазні обмотки, в свою чергу з'єднані вони за трикутником. Через ці обмотки протікає струм синусоїдальної форми, що дозволяє криву функції моменту згладжувати у моменти знижених швидкостей обертання.

Характеристики сигналів на вході до плати керування виглядає наступним чином:

- 1) напруга постійного струму - вид сигналу вхідного;
- 2) значення вхідного рівня сигналу:
 - а) немає сигналу (або логічний "нуль") – значення напруги в межах від 0 до 7.5 (В);
 - б) Присутній сигнал на вході (або логічна «одиниця») – значення напруги у межах 7.5-24 (В).
- 3) Показник вхідного номінального струму – 20 (мА).

Тоді вихідні характеристики сигналів мають наступну структуру:

- 1) типологія виходу являє собою колектор відкритий;
- 2) Значення напруга комутації при цьому у діапазоні від 15 до 30 (В);
- 3) Показник вхідного номінального струму складає 40 (мА).

Як видно із загальної схеми управління рис. 3.2 тип керування розділений на цифровий та аналоговий.

– При цифровому типі, амплітуда сигналів становить від 0 до 5 (В), межі вхідного струму становлять 8–16 (мА), входу представлений диференціальним типом.

При аналоговому типі, значення вхідного опору становить 12 (кОм), вхід представлений також диференціальним типом, амплітуда сигналів за напругою становить від -12 до +12 (В), використовується транзисторний тип

перетворювача, діапазон у котрому відбувається регулювання за швидкістю становить 1:5000, при цьому наявне й додаткове живлення напругою 24 (В).

Варто додати, що сама плата керування має й допустимі відхилення показників у електромережі живлення, так, до прикладу, за напругою допустимими є 20% відхилення від номінального значення(в той чи інший бік), а за показником частоти ЕМ допускає усього 2% відхилення від номінального значення (в обидва боки).

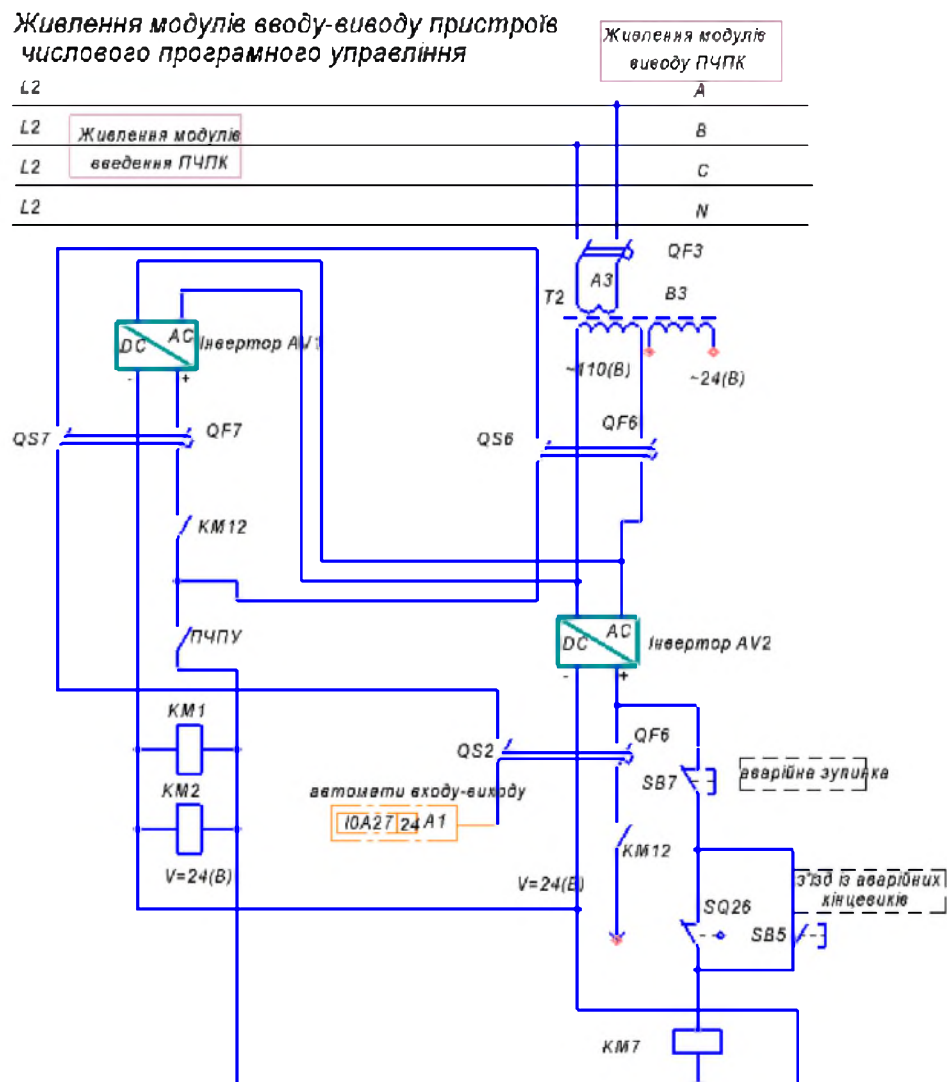


Рисунок 3.7 – Підключення датчиків (енкодерів) та сигналізаційної апаратури у
схему живлення

3.4. Перевірка функціональності обраного комплексу ЕП.

Перевірку вірної функціональності, а отже і вірності розрахунку допоможе здійснити побудова навантажувальної характеристики й тахограми.

Тоді розпочнемо саме із проектування тахограми й для цього спершу знайдемо час для здійснення пуску й гальмування у кожному режимі роботи (та для первинної й вторинної обробки), за загальним виразом:

$$t_{\text{пуск,г}} = \frac{\omega_{\text{ЕД}}}{E_{\text{ЕП}}} (с), \quad (3.2)$$

де: – $E_{\text{ЕП}}$ – показник допустиме прискорення електричного приводу (залежить від типу, паспортні дані). У даному випадку $E = 120$ (рад/с²);

– ω – значення частоти обертання асинхронного ЕД наприкінці перехідного режиму (ПР), (рад/с).

Важливим є і параметр час необхідного на обробку (або точення) самої заготовки довжиною, і тут варто відзначити, що даний параметр напряму залежить від довжини самої заготовки, тож для розрахунків приймемо, що довжина l_3 становить 250 (мм) й скористаємось формулою:

$$t_{\text{об}} = \frac{l_3 \cdot 60}{V_c} (с), \quad (3.3)$$

де: – l_3 – значення довжини деталі для обробки (мм);

– V_c – значення швидкості поступальної супорту для проведення обробки точення у заданому режимі (м/хв).

Для кожного із зазначених видів обробки розрахуємо параметри за (3.2 – 3.3) і занесемо всі ці дані до табл. 3.3. При чому дані із першого стовпчика

(параметр ω_{ED}) заповнюємо згідно із розрахунків виконаних у другому розділі роботи.

Таблиця 3.3 – Розрахункові результати часу оброки заготовки й тривалості перехідних процесів

Параметр	Первинна обробка	Вторинна обробка	Прискорені переміщення
ω_{ED} (рад/с)	52.37	5.16	216.42
$t_{пуск}$ (с)	0.523	0.058	2.73
t_z (с)	0.523	0.058	2.73
$t_{об}$ (с)	22.35	212.2	-
V_c (м/хв)	0.484	0.053	-

Тепер спираючись додатково на параметри обрані у пункті 2.2 можна знайти значення прискорення супорта під час протікання перехідних режимів:

$$a_c = E_{EP} \cdot \rho \left(\frac{M}{c^2} \right) \quad (3.4)$$

$$a_c = 120 \cdot 9.5 \cdot 10^{-3} = 1140 \cdot 10^{-3} \left(\frac{M}{c^2} \right)$$

За допомогою розрахунку прискорення й відомого часу на ПП, можливо визначити величину переміщення самого супорта під час протікання перехідних режимів:

$$l_c = \frac{a_c \cdot t_n^2}{2} \text{ (м)} \quad (3.5)$$

Тоді величину переміщення для будь-якого типу обробки при холостому ході у режимі обробки можливо розрахувати за:

$$l_{x.x.} = l_{n.c.} - l_z - 2 \cdot l_{np} \text{ (м)} \quad (3.6)$$

де: $l_{n.c.}$ – значення повного поздовжнього переміщення у супорті

$$l_{n.c.} = 0,27 \text{ (м)}$$

l_{np} – значення переміщення у момент протікання перехідних режимів і для первинної й для вторинної обробки.

За аналогією із попереднім розрахунком варто знайти й значення переміщення супорту під час холостого ходу у моменти прискорених переміщень:

$$l_{п.п.} = l_{n.c.} - 2 \cdot l_{np} \text{ (м)} \quad (3.7)$$

Після цього можемо знову звести усі розрахунки параметрів за (3.5-3.7) до табл. 3.4

Таблиця 3.4 – Розрахункова величина переміщення супорту у момент перехідних процесів

Параметр	Первинна обробка	Вторинна обробка	Прискорені переміщення
$l_c \text{ (м)}$	$4.2 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$

$l_{x.x.} \text{ (м)}$	0.016	0.016	0.142
------------------------	-------	-------	-------

Наразі невідомими для побудови тахограми залишилися лише часові показники для кожного із режимів під час х.х. Загальний вираз для усіх трьох режимів наступний:

$$t_{x.x.} = \frac{30 \cdot l_{x.x.}}{V_c} \text{ (с)} \quad (3.8)$$

Користуючись загальним для усіх режимів виразом (3.8) та даними із табл. 3.3–3.4 можна знайти показники для кожного режиму окремо. Так для первинної обробки:

$$t_{x.x.пр} = \frac{30 \cdot 0.016}{0.484} = 0.992 \text{ (с)} \quad (3.9)$$

Для вторинної обробки:

$$t_{x.x.вт} = \frac{30 \cdot 0.016}{0.053} = 9.06 \text{ (с)} \quad (3.10)$$

І на решті, можемо розрахувати час для здійснення повернення у початкове положення під час прискореного ходу (переміщення), при цьому варто прийняти $t_{об.хх} = 1$:

$$t_{x.x.пш} = \frac{30 \cdot 0.142}{1} = 4.26 \text{ (с)} \quad (3.11)$$

Наостанок можемо виконати розрахунок усіх часових інтервальних відрізків розглянутого технологічного процесу – обробки заготовки металорізальним верстатом у кожному режимі окремо.

Як вже було відзначено вище: за першим режимом буде 6 часових інтервалів, надалі буде відбуватися повернення у початковий стан пристрою і тут буде 4 часових інтервали і потім буде відбуватися другий режим, знову із 6 часовими інтервалами. при цьому варто відзначити той факт, що режим повернення пристрою буде повторюватися і після первинної обробки і після вторинної. Тобто загалом має бути 20 інтервалів на осі часу.

Для зручності усі інтервали часу(всіх режимів) будуть пронумеровані наскрізним порядком.

При цьому згідно технологічного процесу має ще бути час паузи, котрий викликаний потребою повернення обробляючого пристрою у початковий стан, приймаємо $t_{\Pi} = 3(c)$, при цьому $t_{\Pi} = t_6$.

Отже, розпочнемо із першого режиму (первинної обробки):

$$t_1 = t_{\text{пуск.пр}} = \frac{\omega_{EII}}{E_{EI}} = 0.523 (c)$$

$$t_{\text{пуск.пр}} = t_{\text{г.пр}} \Rightarrow t_1 = t_5$$

$$t_2 = t_{\text{х.х.пр}} = \frac{30 \cdot l_{\text{х.х.}}}{V_c} = 0.992 (c) \quad (3.12)$$

$$t_2 = t_4$$

$$t_3 = \frac{60 \cdot l_3}{V_{np}} = 22.35 (c)$$

Результатом розрахунку є тахограма представлена на рис. 3.8. Слід наголосити, що через те, що інтервал t_3 та t_6 відносно інших, є великим, тоді

довелося умовно «розрізати» цей проміжок часу, аби показати усі інтервали на функції.

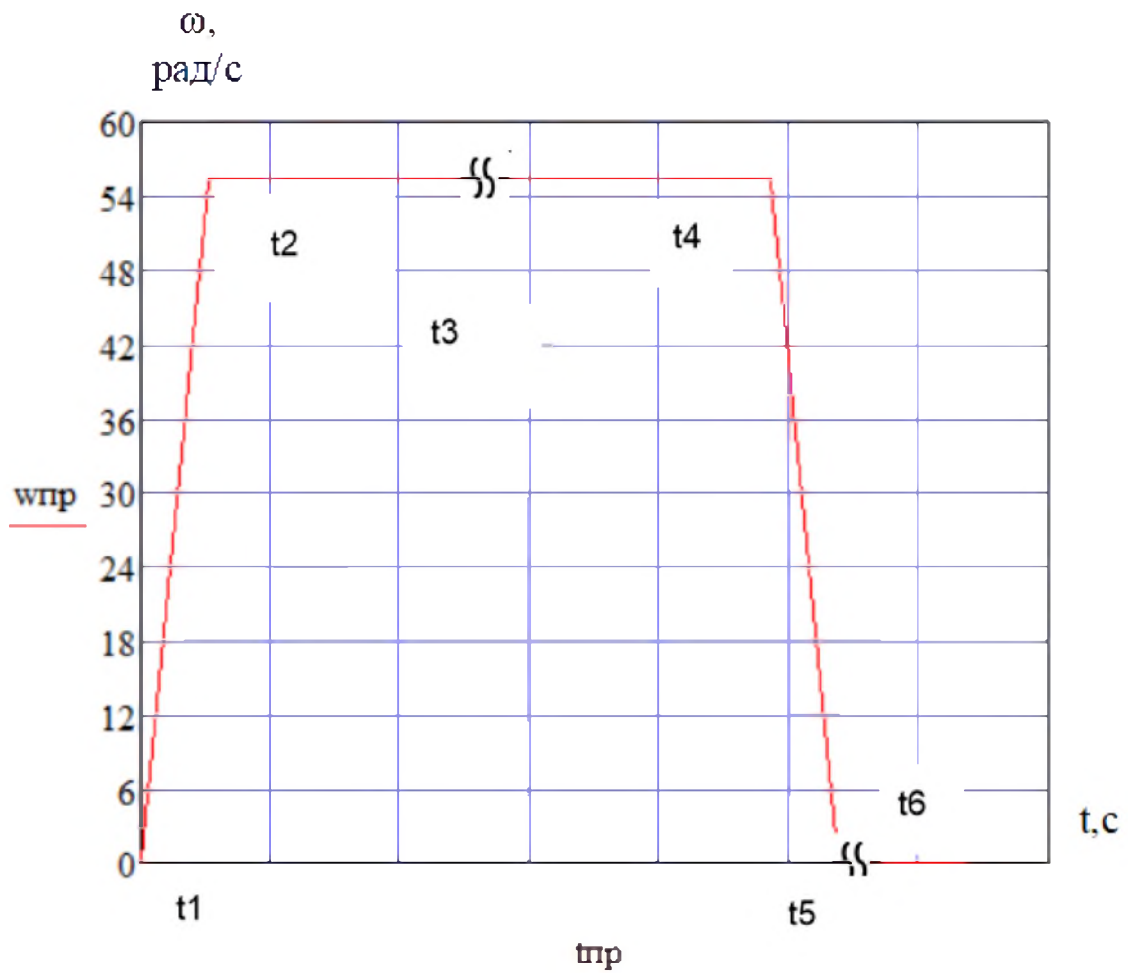


Рисунок 3.8 – Зображення тахограми під час первинної обробки

Згідно із планом далі йде режим повернення у початковий стан пристрою, тож для нього також знайдемо інтервали часу:

$$t_7 = t_{\text{III}} = \frac{\omega_{\text{III}}}{E_{\text{EP}}} = 2.73 \text{ (с)}$$

$$t_{\text{III}} = t_{\text{III}}' \Rightarrow t_7 = t_{17} = 2.73 \text{ (с)}$$

$$t_8 = t_{18} = t_{\text{х.х. III}} = 4.26 \text{ (с)} \quad (3.13)$$

$$t_{\text{III}} = t_2 \Rightarrow t_7 = t_9 = 2.73 \text{ (с)}$$

$$t_6 = t_{10} = 3 \text{ (с)}$$

$$t_2 = t_2' \Rightarrow t_9 = t_{19} = 2.73 \text{ (с)}$$

За виразами (3.13) тепер можливо знову побудувати тахограму для режиму повернення пристрою обробки (рис. 3.9). Тут слід звернути увагу на дві речі:

По-перше, на відміну від попередньої тахограма дана не вимагає розриву, адже усі інтервали часу є приблизно рівними, що видно із виразів у (3.13).

По-друге режим повернення має на меті здійснити рух у протилежний бік, до попереднього режиму, а це означає, що хоча у табл. 3.3 подано усі переміщення зі знаком «+», на тахограмі функція $w_{\text{III}}(t_{\text{III}})$ буде розташована у від'ємній частині відносно осі абсцис, що й відображено на рис. 3.6. Такий ж графік буде справедливим й для режиму повернення після повторної (або чистової) обробки.

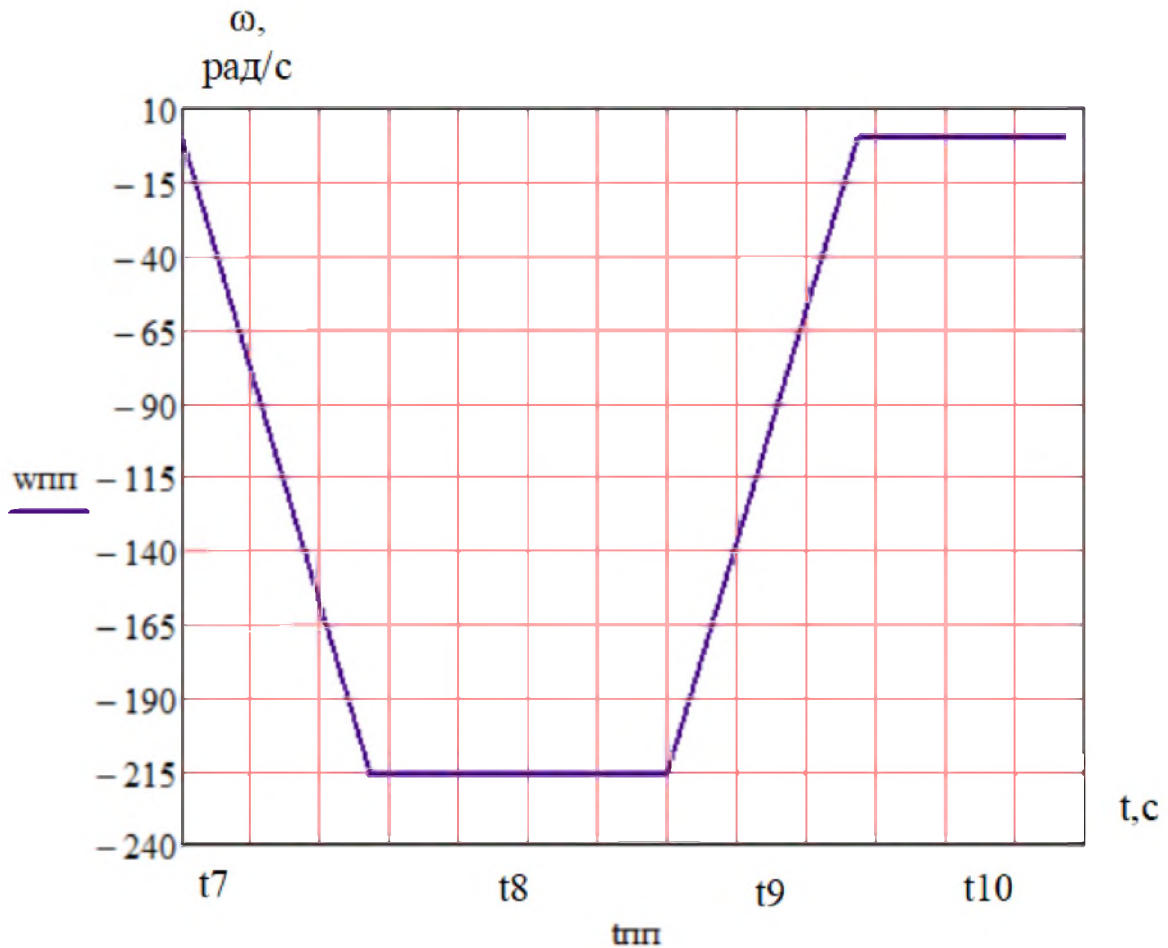


Рисунок 3.9 – Зображення тахограми під час повернення пристрої обробки

Надалі для повної картини роботи ЕП залишалось побудувати тахограми під час повторної обробки заготовки.

Знову таки, під час побудови тахограми рис. 3.7 працюють такі ж самі правила, що й під час побудови характеристики для первинної обробки, тобто використовуються «переривання» функції, аби відобразити повну картину руху виконавчого механізму.

$$t_{11} = t_{6m} = \frac{\omega_{6m}}{E_{EI}} = 0.058 \text{ (с)}$$

$$t_{6m} = t_{6m}^I \Rightarrow t_{11} = t_{15} = 0.058 \text{ (с)}$$

$$t_{12} = t_{14} = t_{x.x.6m} = \frac{30 \cdot l_{x.x.}}{V_c} = 9.06 \text{ (с)} \quad (3.14)$$

$$t_{13} = t_c = \frac{60 \cdot l_3}{V_{6m9}} = 212.2 \text{ (с)}$$

$$t_6 = t_{16} = 3 \text{ (с)}$$

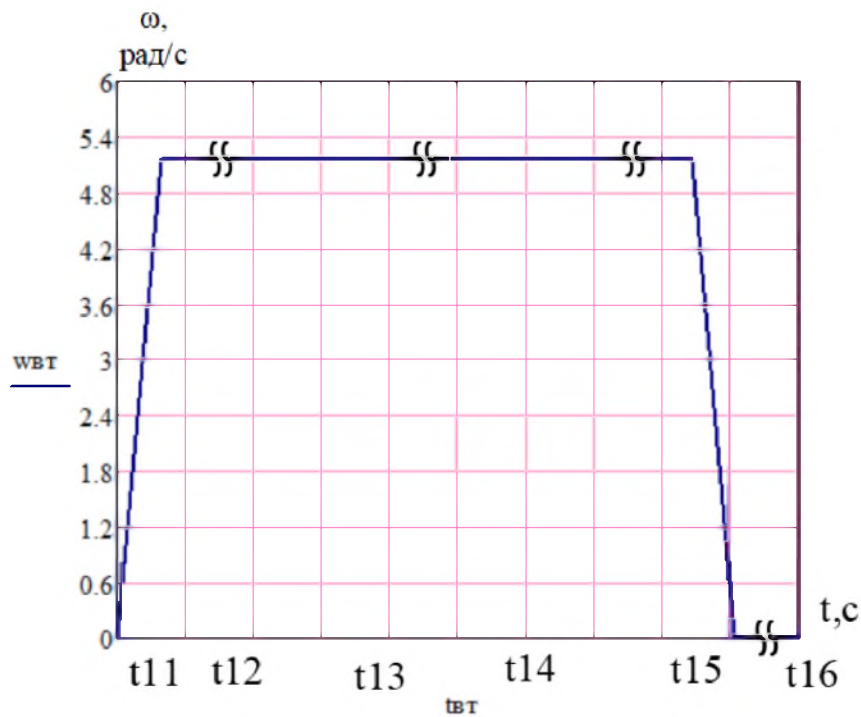


Рисунок 3.10 – Зображення тахограми під час потворної обробки заготовки

Після цього етапу згідно плану, йде режим повернення пристрою обробки у початковий стан, повторення другого режиму. Проте є ще один часовий інтервал, котрий також є важливим, однак у цей момент ЕП не працює

– це час на заміну заготовівлі, він як правило залежить по-перше від її габаритів, а по-друге і від типу фіксуючого механізму. Для нашої задачі прийmemo $t_{зм.зг}=150(с)$.

Провівши аналіз розрахунків за (3.2-3.14) та побудувавши функції (рис. 3.8–3.10) стає зрозумілим, що обраний ЕП задовольняє вимогам. Тепер постає завдання оцінити ще й характеристики ЕП через проектування й аналіз діаграми навантаження.

Із метою побудови діаграми за навантаженням, в першу чергу варто знайти показник моментів на дослідних інтервалах часу.

Знову розділяємо переміщення на три складових, і першим у нас виступає етап прискорення тоді визначення цього показника відбувається за (3.15).

$$M_{дин.пр} = \pm(E_{EP} \cdot J_{\Sigma ED}) (H \cdot m) \quad (3.15)$$

де: – $J_{\Sigma ED}$ – показник сумарного моменту інерції ЕД та механічної передачі (кг*м²);

Величина E_{EP} вже була описана вище, проте у виразі (3.15) видно що може бути різний знак, це залежить від режиму, під час розгону обираємо «+», а під час гальмування – «-».

$$M_{дин.пр/г} = \pm 120 \cdot 0.029 = \pm 3.48 (H \cdot m) \quad (3.16)$$

Тоді величина моменту в режимі холостого ходу буде рівна:

$$M_{х.х.} = M_{дин.пр/г} \cdot 0.05 = 3.48 \cdot 0.05 = \pm 0.174 (H \cdot m) \quad (3.17)$$

У моменти пуску та проведення гальмування момент сумарний буде дорівнювати:

$$M_{n/z} = M_{\text{дин.пр/г}} + M_{\text{х.х.}} (H \cdot m) \quad (3.18)$$

Тоді під час самої обробки справедливим для величини моменту буде наступний вираз:

$$M_{\text{об}} = M_{n/z} (H \cdot m) \quad (3.19)$$

Також, як і у попередньому розділі у розрахунках приймається до уваги прискорене переміщення, а також переміщення за відсутності навантаження, на робочих швидкостях, тут значення моменту становить:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{х.х.}} = \pm 0.174 (H \cdot m) \quad (3.20)$$

Тож тепер варто виконати розрахунок за показниками моментів, котрі наведені на валу ЕД для кожного із досліджуваного режимів, у відповідності до розглянутих раніше інтервалів часу на тахограмах. Тобто моменти тут будуть мати такий самий порядок, котрий було застосовано у попередньому розрахунку.

І спершу у нас до розгляду представлений режим первинної обробки:

$$M_1 = M_{\text{дин.пр/г}} + M_{\text{х.х.}} = 3.48 + 0.174 = 3.654 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$M_2 = M_{\text{х.х.}} = 0.174 \text{ (Н} \cdot \text{м)}; \quad M_2 = M_4 \Rightarrow M_4 = M_{\text{х.х.}}$$

(3.21)

$$M_3 = M_{n/2} = 10.3 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad M_6 = 0 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$M_5 = M_{\text{х.х.}} - M_{\text{дин.пр/г}} = 0.174 - 3.48 = -3.306 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

За результатами (3.21) тепер можливо звести й діаграму навантаження для первинної обробки, котра представлена на рис. 3.11.

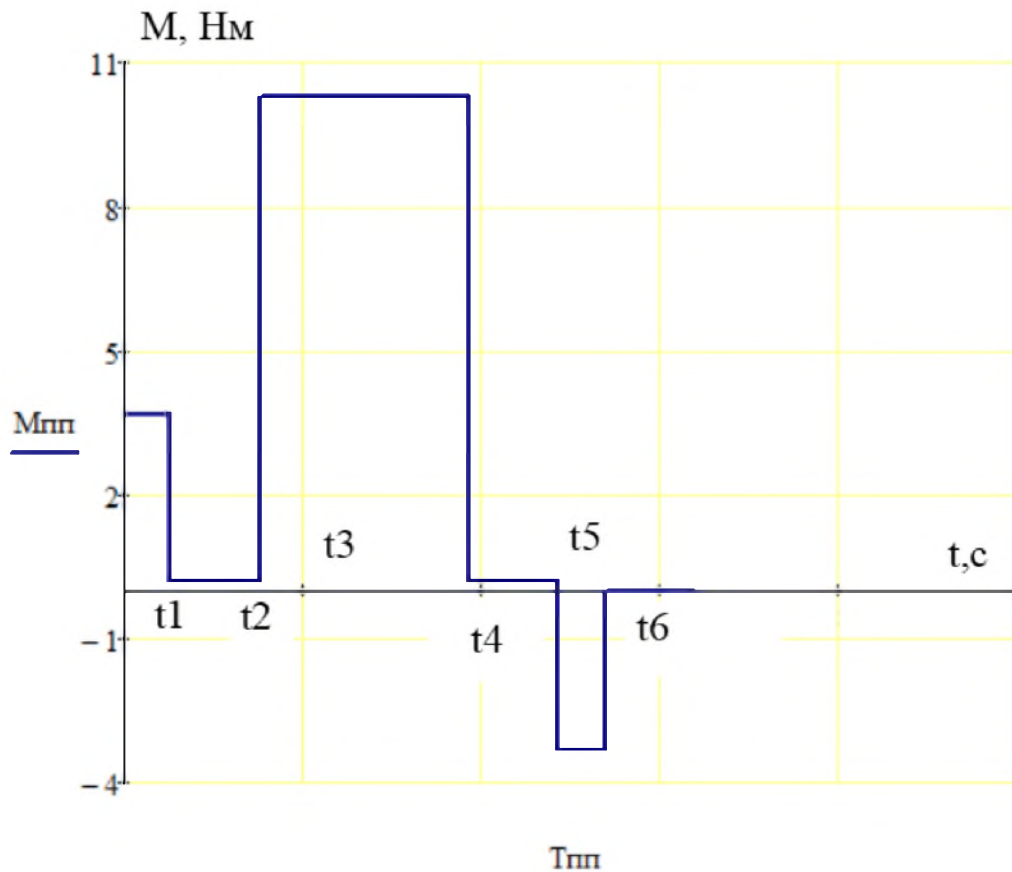


Рисунок 3.11 – Діаграма навантаження для режиму первинної обробки

Знову за планом поміж двома видами обробки стоїть повернення пристрою у початковий стан, тоді розрахунок для цього режиму виглядатиме наступним чином:

$$M_{17} = M_7 = -M_{\text{дин.пр/г}} - M_{\text{х.х.}} = -3.48 - 0.174 = -3.654 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$M_{18} = M_8 = -M_{\text{х.х.}} = -0.174 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

(3.22)

$$M_{20} = M_{10} = 0 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$M_{19} = M_9 = M_{\text{дин.пр/г}} - M_{\text{х.х.}} = 3.48 - 0.174 = 3.306 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

За результатами (3.22) було побудовано діаграму навантаження (рис. 3.12) під час повернення пристрою у початковий стан.

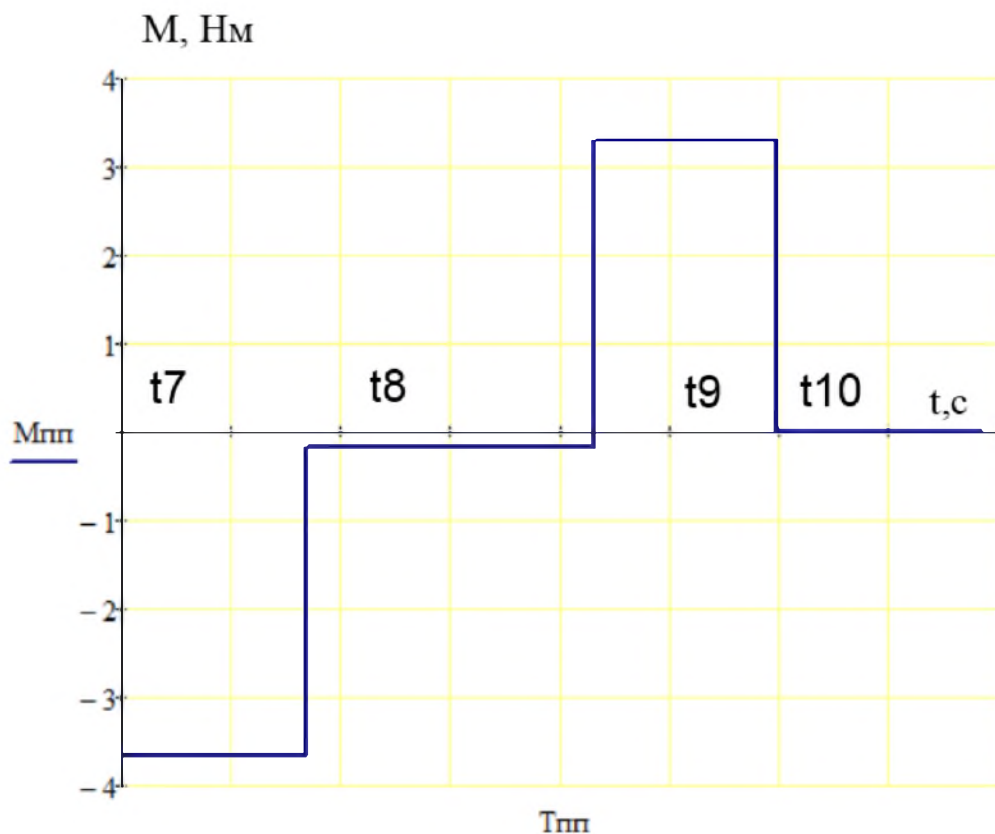


Рисунок 3.12 – Діаграма навантаження під час повернення пристрою у початковий стан.

Наостанок до розгляду представлений режим вторинної(чистової) обробки:

$$M_{11} = M_{\text{дин.пр/г}} + M_{\text{х.х.}} = 3.48 + 0.174 = 3.654 \text{ (H} \cdot \text{м)}$$

$$M_{12} = M_{\text{х.х.}} = 0.174 \text{ (H} \cdot \text{м)}; \quad M_{13} = M_{\text{см}} = 0.42 \text{ (H} \cdot \text{м)};$$

(3.22)

$$M_{14} = M_{\text{х.х.}} = 0.174 \text{ (H} \cdot \text{м)} \quad M_{16} = 0 \text{ (H} \cdot \text{м)}$$

$$M_{15} = M_{\text{х.х.}} - M_{\text{дин.пр/г}} = 0.174 - 3.48 = -3.306 \text{ (H} \cdot \text{м)}$$

За результатами (3.23) було побудовано діаграму (рис. 3.13) навантаження під час вторинної обробки.

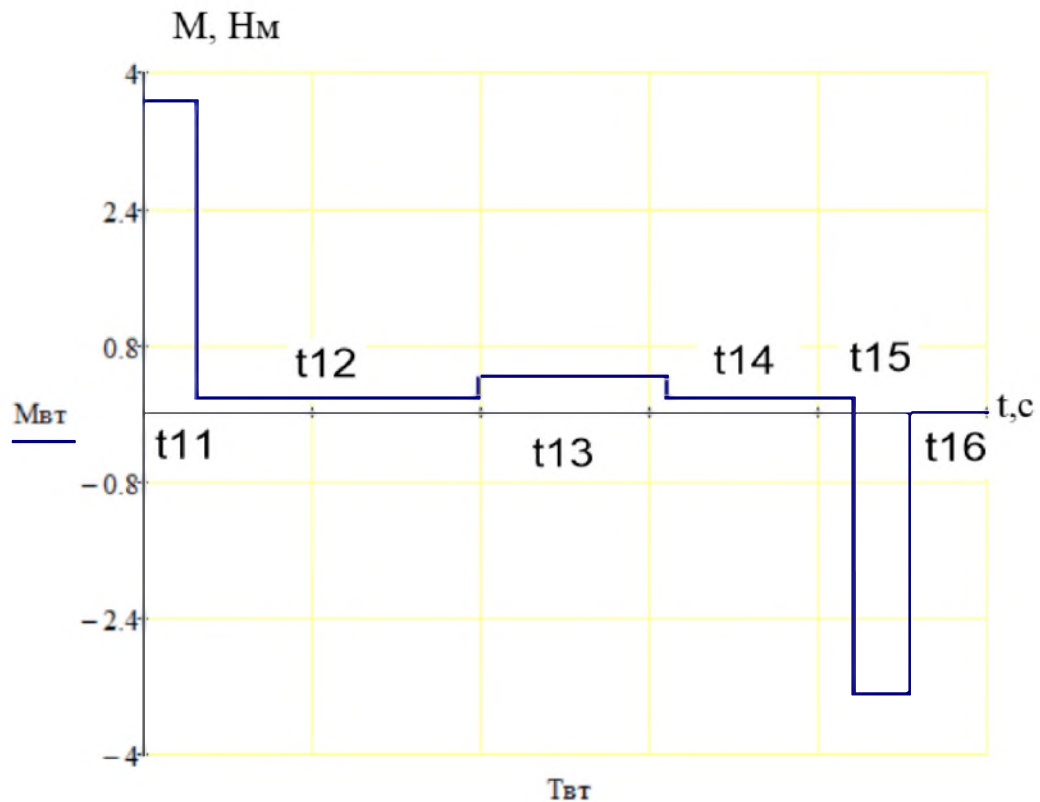


Рисунок 3.13 – Діаграма навантаження під час під час вторинної обробки.

Аби показати, що обраний двигун є працездатний, необхідно довести, що його енергетична частина є стійкою.

При цьому стійкість або працездатність ЕП під навантаженням можна перевірити, як:

$$\frac{M_{\max.ЕП}}{M_{\text{ном.ЕП}}} \leq \lambda_m (=1.3) \quad (3.23)$$

$$\frac{10.3}{25} = 0.412; \quad 0.412 < 1.3$$

Перевірка на працездатність асинхронного ЕП виконуємо за методом еквівалентного моменту, в такому випадку виконується залежність $M \equiv I$.

$$M_{ЕП} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^i t_i \cdot M_i^2}{\sum_{n=0}^i t_i \cdot \alpha_i}} \leq M_{\text{ном.ЕД}} \quad (3.24)$$

де: – t_i – значення часового інтервалу визначеного на тахограмі.

– α_i – значення коефіцієнту віддачі тепла для певної ділянки побудованої тахограми.

Для ЕД, у котрих вентиляція відбувається природньо, значення α_i , котре залежить від умов проведення охолодження ЕД під час зміні показника швидкості оберту валу, варто розраховувати як:

$$\alpha_i = 1 - \text{коли, } \omega_i = \omega_{\text{ном}}$$

$$\alpha_i = \left(\frac{\omega_{\text{max}}}{2 \cdot \omega_{\text{ном}}} + 1 \right) \cdot \alpha_0 - \text{коли, } \omega_{\text{max}} < \omega_{\text{ном}} \text{ та швидкість змінна} \quad (3.25)$$

$$\alpha_i = \left(\frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{ном}}} + 1 \right) \cdot \alpha_0 - \text{коли, } \omega_{\text{max}} < \omega_{\text{ном}} \text{ та швидкість постійна}$$

Для охолодженого й нерухомого двигуна у відповідності до [7] можна прийняти $\alpha_0 = 0,5$, а згідно побудованим тахограмам справедливим буде наступний вираз:

$$\alpha_0 = \alpha_6 = \alpha_{20} = \alpha_{16} = \alpha_{10} = 0,5 \quad (3.26)$$

Згідно із (3.25) можливо встановити значення α_i під час встановлених режимів.

$$\alpha_2 = \left(\frac{\omega_{\text{max.ЕД.нр}}}{\omega_{\text{ном}}} + 1 \right) \cdot \alpha_0 = \alpha_3 = \alpha_4 = \left(\frac{52.37}{102.26} + 1 \right) \cdot 0.5 = 0.756 \quad (3.27)$$

$$\alpha_{12} = \left(\frac{\omega_{\text{max.ЕД.ет}}}{\omega_{\text{ном}}} + 1 \right) \cdot \alpha_0 = \alpha_{13} = \alpha_{14} = \left(\frac{5.16}{102.26} + 1 \right) \cdot 0.5 = 0.525$$

В той же час у моменти прискорення коефіцієнт α_i буде дорівнювати 1, а це значить: $\alpha_{18} = \alpha_8 = 1$

Найбільш складною задачею є визначення коефіцієнтів α_i під час перехідного процесу. Тут згідно із рекомендаціями [7] треба обрати середнє значення на інтервалі часу протікання перехідного процесу:

$$\begin{aligned}\alpha_5 &= \alpha_1 = 0.635 \\ \alpha_7 &= \alpha_{19} = \alpha_9 = \alpha_{17} = 0.775 \\ \alpha_{15} &= \alpha_{11} = 0.525\end{aligned}\tag{3.28}$$

Нарешті маючи усі значення коефіцієнтів α_i та показники часових інтервалів із попереднього розділу визначаємо у (3.24) всі складові:

$$M_{EP} = \sqrt{\frac{1732}{252.85}} = 2.617 \text{ (H} \cdot \text{м)}\tag{3.29}$$

$$2.617 \leq 25 \Rightarrow M_{EP} \leq M_{\text{ном.ЕД}}$$

Показник тривалості увімкнення можна знайти через період циклу (T_n) та T_p – загальний час роботи.

$$\begin{aligned}\varepsilon_e &= \frac{T_p}{T_n} \\ \varepsilon_e &= \frac{5.27}{9} = 0,585\end{aligned}\tag{3.30}$$

Із отриманого виразу (3.30) видно, що величина тривалості увімкнення (ε_e) не є стандартним (табличним) значенням, а отже треба взяти найближче більше значення із таблиці [10] і виконати уточнений перерахунок за виразом (3.31).

$$M_{EP}' = M_{EP} \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{e.cm}}} \quad (3.31)$$

де: $\varepsilon_{e.cm}$ – табличне значення тривалості увімкнення, згідно із (3.30),

приймаємо: $\varepsilon_{e.cm} = 0.6$

$$M_{EP}' = M_{EP} \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{e.cm}}} = 2.617 \sqrt{\frac{0.585}{0.6}} = 2.584 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (3.32)$$

$$M_{EP} \leq M_{EP}' \leq M_{\text{ном.ЕД}}$$

Вираз (3.32) доводить, що уточнене значення номінального моменту ЕД також задовольняє вимогам (3.24) і в той же час цей показник більший, ніж еквівалентний (3.32). Тоді можна зробити остаточний висновок, що й умова за нагрівом обраний ЕД відповідає.

3.5. Обрання методу прокладання електропостачання.

Металообробний верстат на енергетичній ділянці є невеликим споживачем енергії за потужністю. Усе електричне обладнання в системі розраховано для роботи із трифазним змінним струмом й напругою величиною

380 (В) частотою $f_{EM}=50$ (Гц), пристрої розподілені рівномірно по площі та устанавлюються стаціонарно.

Із метою прийому й послідуочого розподілу електрики до споживчих груп використовують за [5, 8-9] розподільні силові шафи, а також розподільні пункти (РП).

Згідно із проведенням розрахунком самого ЕП можемо обрати сучасну силову розподільну шафу типу СПМ 75-10, котра розрахована на номінальний струм $I_{ном}=250$ (А).

При виборі РП необхідно виконати основну умови, яка полягає у тому, що струм розрахунковий приймачів, котрі відповідно приєднані до силового пункту має бути меншим за струм номінальний самого пункту, що обумовлено виразом:

$$I_{розр.пр} \leq I_{ном.РП} \quad (3.33)$$

Дані обраного РП представлені у табл. 3.5

Таблиця 3.5 – Основні параметри розподільну шафу типу СПМ 75-10

Параметр	Значення, вимірні одиниці
Значення номінального струму ($I_{ном.РП}$)	250 (А)
Значення номінальної напруги змінного струму ($U_{ном.РП}$)	380/220 (В)
Частота мережі	$f_{EM}=50$ (Гц)
Ступінь захисту шафи	ІР 54
Номінальний робочий режим	тривалий

Під час вибору величині перерізу провідника за умов технічних враховуються наступні фактори, наприклад:

- 1) Умови за теплового нагріву.
- 2) Втрати за напругою.
- 3) Пропускна здатність (або спроможність) та захисні характеристики.
- 4) Механічна міцність й стійкість за термічними умовами до струмів режиму короткого замикання.

Тоді величину перетину провідника електромережі цеха можна обрати за струмом навантаження розрахунковим ($I_{\text{нв.розр}}$) у такий спосіб, аби самі провідники при $I_{\text{нв}}$, котре відповідає роботі за тривалого режиму і умові нормального середовища розташування, не мали б перегрів поза допустимих меж.

Величині розрахункового струму навантаження ($I_{\text{нв.розр}}$) відповідає максимальний рівень струмового навантаження за часовий інтервал:

$$I_{\text{нв.розр}} = \frac{P_i}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (A) \quad (3.34)$$

При цьому згідно із вимог ПУЕ $I_{\text{нв.розр}}$ має бути меншим за величини струму за тривалого навантаження (табличне значення) на кабелі, шини й дроти

$$I_{\text{нв.розр}} \leq I_{\text{дот}} \quad (3.35)$$

В той же час у момент прокладки декількох кабелів, а також більше ніж чотирьох проводів у одному коробі, в виразі (3.35) починає приймати участь параметр $k_{\text{пр}}$ – коефіцієнт поправки, котрий приймає до уваги умови прокладки кабелів.

Під час перебігу нормальних умов $k_{np} = 1$. За інших умов, якщо до прикладу, у трубі 5 та 6 проводів $k_{np} = 0.69$, якщо 7–10, тоді $k_{np} = 0.62$.

І тоді сам вираз (3.35) постає у вигляді:

$$\frac{I_{нв.розр}}{k_{np}} \leq I_{дон} \quad (3.36)$$

Що стосується врахування напруги під час вибору перетину, то як було розглянуто вище для ЕП, допускають певні відхилення від номінального значення, у даному випадку це 5 (%), а знайти величину відхилення можливо за:

$$\Delta U_{\epsilon} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{нв.розр} \cdot L \cdot 100 \cdot (x_0 \cdot \sin \varphi + r_0 \cdot \cos \varphi)}{U_{л.ЕМ}} \quad (3.37)$$

де: – L – значення відстані поміж точками живлення й докладання навантаження рівнодіючого (км).

– x_0 , r_0 – реактивний та активний опір на 1 (км) лінії, Ом/км.

Тепер можливо підставити усі дані в (3.34) й знайти струм розрахунковий лінії живлення для РП:

$$I_{нв.розр} = \frac{37500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.905} = 63.03 \text{ (А)} \quad (3.38)$$

Надалі за даними [13] приймаємо кабель типу АВВГ 4*25, відповідно перерізом 25 мм²; при цьому його допустиме значення $I_{дон} = 88 \text{ (А)}$, тоді:

$$\frac{I_{нв.розр}}{k_{np}} \leq I_{дон}; \frac{63.,3}{1} \leq 88 \quad (3.39)$$

$$\sin(\varphi) = \sin(\arccos 0.905) = 0.682$$

За [9, 13] було обрано провід із алюмінієвими жилами тож він має наступні значення питомих опорів:

$$r_0 = 0.357 \left(\frac{Ом}{км} \right) \quad (3.40)$$

$$x_0 = 0.068 \left(\frac{Ом}{км} \right)$$

Тоді за (3.37) величина втрат за напругою у лінії становить:

$$\Delta U_e = \frac{\sqrt{3} \cdot 63.03 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot (0.068 \cdot 0.905 + 0.357 \cdot 0.682)}{380} \approx 1.33 \text{ (\%)} \quad (3.41)$$

Висновок за (3.41): величина втрати напруги у проводі знаходиться у межах допустимого відхилення – 5 (%).

За такою ж методологією можемо обрати і кабелі для допоміжних приводів.

Ще на що варто звернути уваги і що буде інтегровано у мат моделі і вже є на схемах живлення у другому розділі, це відповідно вибір вимикачів й контакторів.

Умови для вибору автоматичних вимикачів наступні:

$$\Delta U_{\text{ном.}AB} \geq U_{\text{ном.}EM}$$

$$I_{\text{ном.}AB} \geq I_{\text{тр.дон}}; I_{\text{ном.роз}} \geq I_{\text{ном.ЕД}} \quad (3.42)$$

$$I_{\text{вст.}EM} \geq 1.25 \cdot I_n; I_{\text{ном.ТВ}} \geq I_{\text{ном.ЕД}}$$

4. РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА ІЗ СИСТЕМОЮ ЖИВЛЕННЯ.

Одним із основних завдань поставлених під час виконання дипломної роботи виступає задача, щодо проведення досліджень із динамічних робочих режимів асинхронного ЕП головного руху із частотним керуванням, автоматизованим. Метою цього етапу є перед усім перевірка працездатності системи в цілому – ЕП разом із системою живлення та комутаційною апаратурою, а також перевірка та підтвердження припущень зроблених у теоретичній частині. Додатково моделювання може дати оцінку поведінки системи не тільки у нормальних режимах, а ще й у тих, котрі будуть від нього відрізнятися.

Отже дослідження динамічних процесів відбувається завдяки методології математичного імітаційного моделювання, із цією метою у програмному пакеті Matlab застосовується додаток Simulink, де є можливість зібрати за допомогою електротехнічних компонентів бібліотеки систему із асинхронним електричним приводом (яку буде представлено на рис. 4.2), внутрішні параметри самого ЕД представлені на рис. 4.1

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]: [1.5e+04 400 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]: [0.375 0.00745]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]: [0.273 0.00346]

Mutual inductance Lm (H): 0.06419

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m²) F(N.m.s) p()]: [0.21 0.009541 2]

Initial conditions

[slip, th(deg), ia, ib, ic(A), pha, phb, phc(deg)]:

[0 0 0 0 0 0 0]

☒ Simulate saturation ☐ Plot

[i(Arms) ; v(VLL rms)]: [1, 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

Рисунок 4.1 – Параметри асинхронного ЕД

Параметризація використаної моделі самого асинхронного двигуна була здійснена за допомогою вибору пристрою, що відбувалося у розділі роботи 2.4. Однак, як буде показано на рис. 4.1 (параметри моделі АД), деякі характеристики асинхронного ЕД не вказувалися у паспорті, проте їх можна було вирахувати через вже відомі характеристики.

До прикладу, визначення повного опору режиму КЗ можна знайти:

$$Z_{K3} = \frac{U_{1\phi.ном}}{I_{1\phi.ном}} = \frac{380}{37.15} = 10.23 \text{ (Ом)} \quad (4.1)$$

Тоді одна із складових (4.1) величина активного опору КЗ:

$$R_{K3} = Z_{K3} \cdot \cos \varphi_{ном} = R_{1ном} + \frac{R'_{2ном}}{s_{ном}} = 8.44 \text{ (Ом)} \quad (4.2)$$

Тоді опір обмотки активний статора й ротора можна віднайти за:

$$R_{1ном} = \frac{R_{K3} \cdot s_{ном}}{1 + s_{ном}} = 0.375 \text{ (Ом)} \quad (4.3)$$

$$R'_{2ном} = (R_{K3} - R_{1ном}) \cdot s_{ном} = 0.273 \text{ (Ом)}$$

Друга із складових виразу (4.1) є величиною реактивного опору КЗ, і загальний вираз для її знаходження:

$$X_{K3} = \sqrt{\frac{m \cdot U_{1\phi.ном}^2 \cdot R'_{2ном}}{s_{кр} \cdot \omega_{0ном} \cdot M_{maxв}} - \left(\frac{R'_{2ном}}{s_{кр}} + R_{1ном} \right)^2} = 2.29 \text{ (Ом)} \quad (4.4)$$

Тоді опір обмотки реактивний статора й ротора можна віднайти за:

$$X_{1ном} = \frac{X_{K3}}{3} = 0.763 \text{ (Ом)}$$
(4.5)

$$X'_{2ном} = X_{K3} - X_{1ном} = 1.526 \text{ (Ом)}$$

Величина взаємної індуктивності поміж обмотками статора й ротора визначається:

$$L_{12} = \frac{U_{1ф.ном}}{I_{0ф.ном} \cdot \omega_{0EM}} = 74.5 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}$$
(4.6)

Величина номінальної індуктивності за розсіюванням обмотки статора розраховується:

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_{1ном}}{\omega_{0EM}} = 3.46 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}$$
(4.7)

І також можна визначити номінальна індуктивність обмотки розсіювання ротора:

$$L'_{\sigma 2} = \frac{X'_{2ном}}{\omega_{0EM}} = 6.93 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}$$
(4.8)

металорізального верстата

Варто зазначити, що до складу досліджуваної системи увійшли наступні компоненти:

- 1) модель АД, котра представлена в нерухомій (d та q) системі координат;
 - 2) Автоматизована підсистема векторного керування в координатній системі x та y;
 - 3) Координатні перетворювачі;
 - 4) Підсистема, котра виконує функції перетворювача частоти, сюди входить власне перетворювача частоти і підсистема керування ним, у реальній роботі дана підсистема міститься у самому перетворювачі;
- Підсистеми, котрі реалізують керуючі впливи (сюди можна віднести і блоки завдання і блоки підсилення сигналів);
 - Підсистема, котра використовує сигналізаційні, індикації та інформаційні блоки, а також вивід на осцилографи результатів виконаного моделювання.

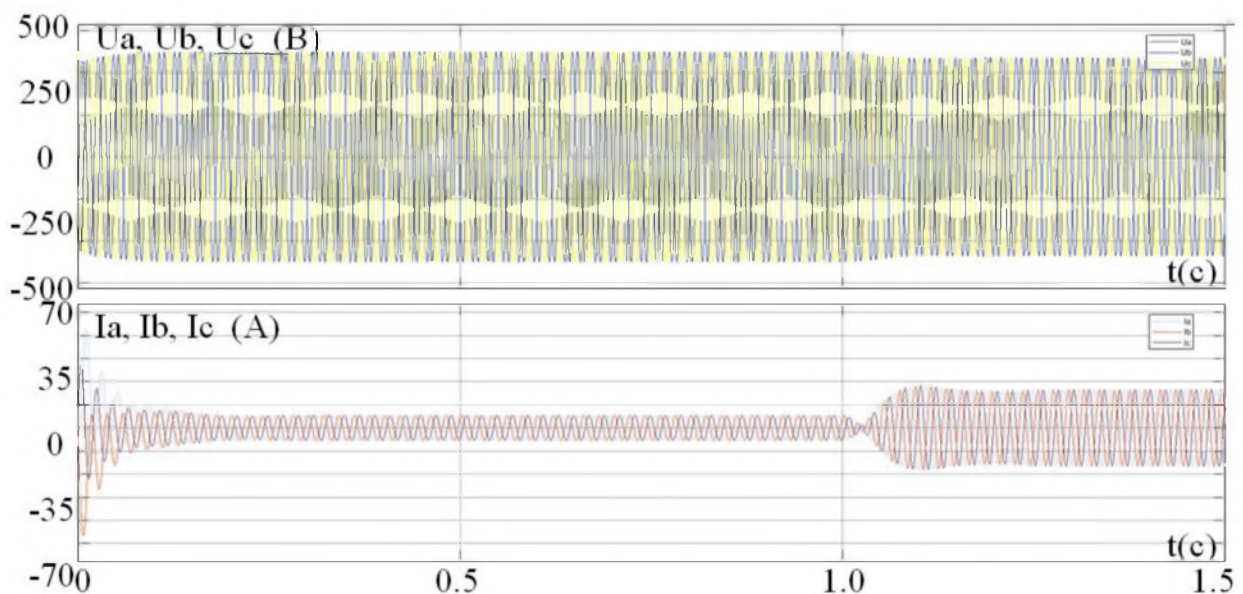


Рисунок 4.3 – Осцилограма трифазної напруги та струму ЕД

На рисунках 4.3 – 4.6 зображено відпрацювання математичної моделі так на рис. 4.3, 4.5 та 4.6 показані електричні показники виміряні у різних точках електромережі, а на рис. 4.4 представлено основні параметри АД.

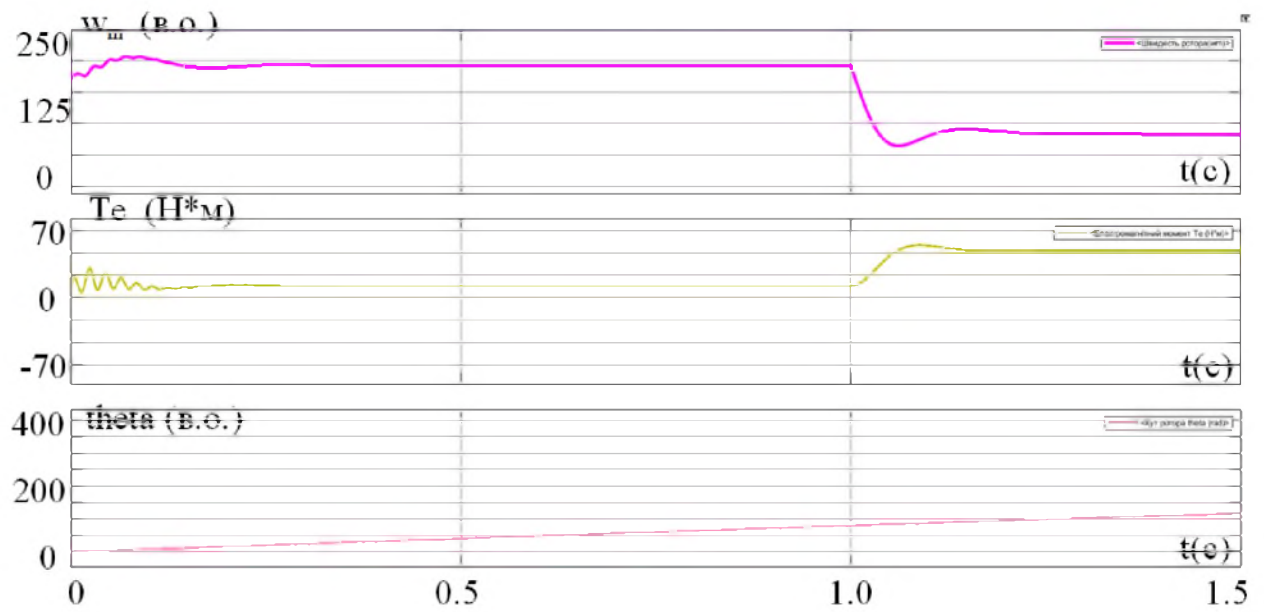


Рисунок 4.4 – Осцилограмма основных вихідних параметрів АД

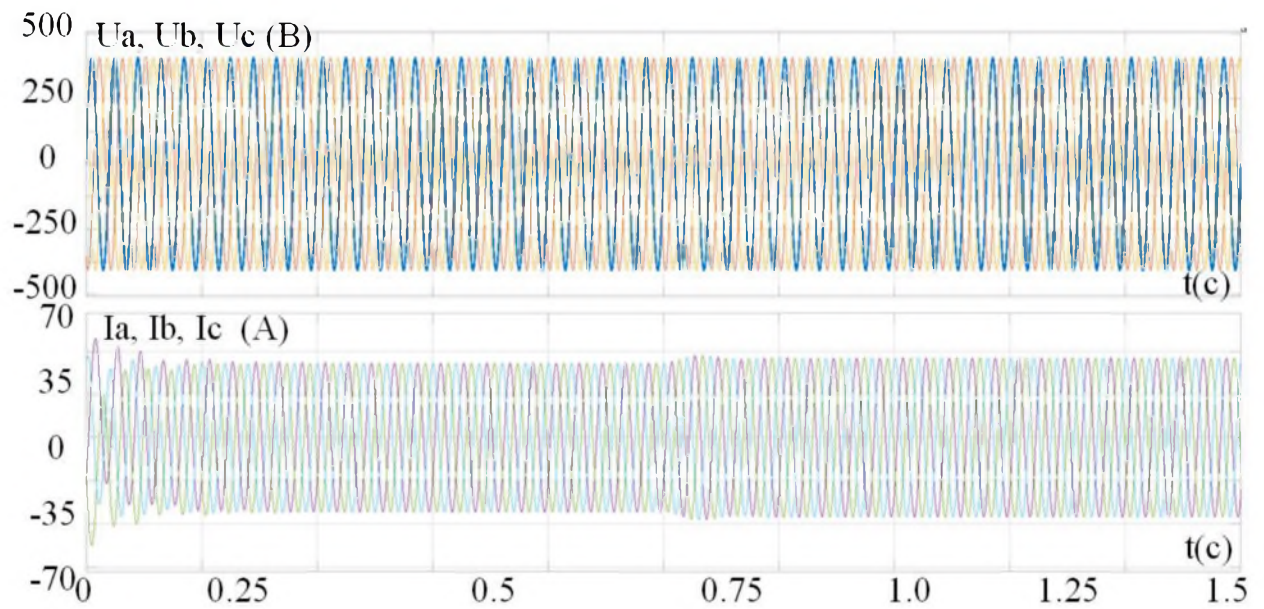


Рисунок 4.5 – Осцилограмма трифазної напруги та струму в електромережі живлення біля ДЖ – блок VA

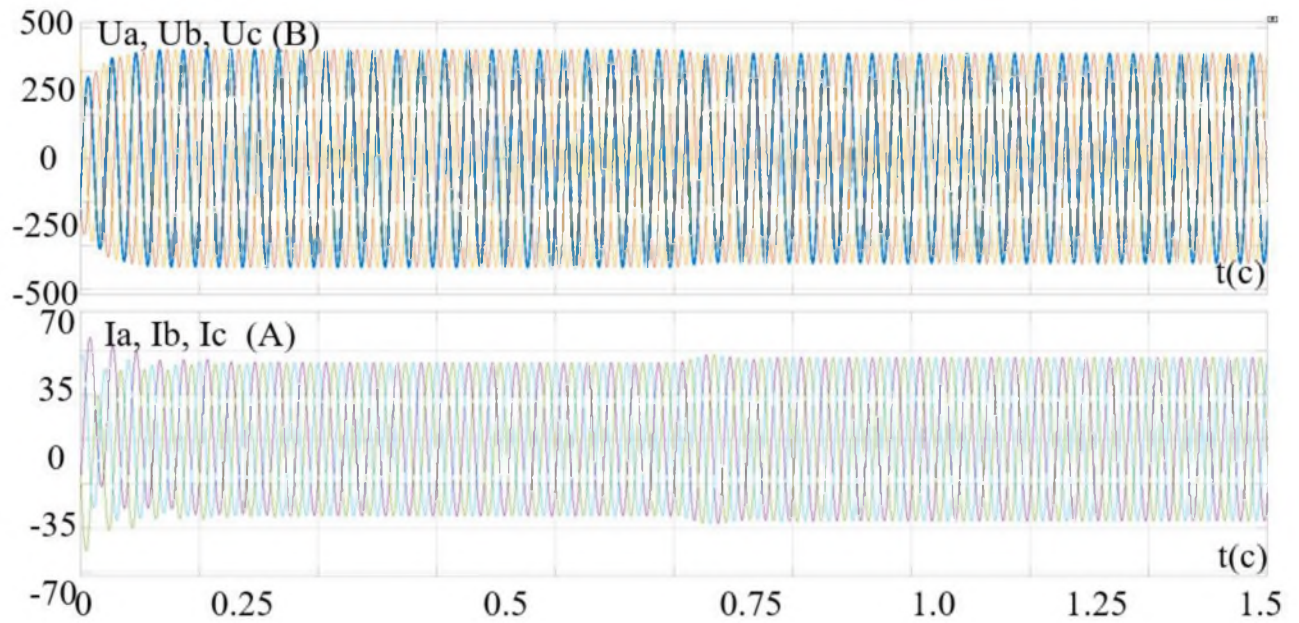


Рисунок 4.6 – Осцилограма трифазної напруги та струму в електромережі біля інвертора – блок VA1

ВИСНОВКИ

В роботі виконувалось дослідження ряду питань, котрі стосувалися модернізації електропривода металорізального верстату, його налаштування та оптимізації робочих режимів.

Передусім було проведено порівняння структури сучасних електроприводів у даній галузі промисловості України, шляхом співставлення основних переваг було обрано з усіх найбільш оптимальний з технологічної точки зору асинхронний ЕП. Розрахувавши номінально потужності було обрані певні серії двигунів для приводу головного руху, пристрої обробки та допоміжних приводів.

Приступивши до проектування електричних мереж живлення металорізального ЕП, було додатково зроблено аналіз та відбудову структурної схеми ланок освітлення, сигнального та інформаційного сповіщення.

Також окрім самого сучасного ЕП і його системи керування було обрано ще інвертор, кабелі живлення, вимикачі та роз'єднувачі. Окремо було приділено увагу і перевірки працездатності системи ЕП в цілому, вже переконавшись у вірності вибору пристроїв була побудована математична модель ЕД, за допомогою якою вдалось віднайти тахограми у режимах первинної, вторинної обробки, а також повернення оброблювального пристрою у початковий стан. Тут досліджувалась і діаграми навантаження в кожному режимі.

Фінальною частиною завдяки методології математичного імітаційного моделювання, стала побудова усієї системи у програмному пакеті Matlab (додаток Simulink), де існує можливість зібрати через бібліотеку електротехнічних компонентів систему із асинхронним ЕП

До складу такої моделі увійшли наступні компоненти:

- Модель АД, котра представлена в нерухомій (d та q) системі координат;
- Автоматизована підсистема векторного керування.

- Координатні перетворювачі.
- Підсистема – перетворювача частоти.

Отримані результати довели, що модернізована система ЕП є більш стійкою до зовнішнього впливу (тобто астатичною за накидом навантаження), має додаткові датчики, що в свою чергу покращує обробку заготовки, тобто відбувається краще позиціонування ЕП робочого пристрою, а також через вищий ККД заощаджує додатково кошти на електроживлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стахів П. Г., Бобало Ю. Я., Гамола О. Є., Шаховська Н. Б., Васильчишин І. І., «Електротехніка та електроніка для інтерактивного, та інклюзивного вивчення.» навч. посібник – м. Львів – видавництво. «Львівської політехніки», 2019 р. – 100 с.
2. К. М. Василів, «Експлуатація електричних станцій», – м. Львів, навч. посібник: Видавництво «Львівської політехніки», ISBN 978-966-941-703-9, 2022 р. – 236 с.
3. М. Й. Олійник, В. Г. Лисяк «Основи екології виробництва, пересилання й використання електроенергії» навч. посібник. місто Львів: вид-цтво Львівської політехніки, 2018. 192 с.
4. Букович Н. В., Міркевич Г. Н., Лисяк Г. М., Яцейко А. Я. та інші «Розрахунок струмів коротких замикань» навч. посібник місто Львів: в. Львівської політехніки, 2018 рік, 236 с.
5. Д. Б. Головка, Яненко О. П., Скрипник Ю. О., «Надвисокочастотні методи й засоби вимірювання фізичних параметрів» : навч. посібник для ВНЗ - Київ. : в. Либідь , 2004 р. - 327 с.
6. Кухарчук В. В., Володарський Є. Т., Кучерук В. Ю., Грабко В. В.. «Основи метрології й електричних вимірювань» : підручник, ВНТУ, –. м. Вінниця : 2012 р.
7. Є.С. Поліщук «Засоби і методи вимірювань неелектричних величин»: підручник для ВНЗ – м. Львів , 2008 р. - 617 с.
8. М. С. Будішев «Електротехніка, електроніка й мікропроцесорна техніка : підр. для ВНЗ неелектротехн. спеціальностей – м. Львів : видав. «Афіша» , 2001 р. – 423 с.
9. М. С. Сегеда, А. Я. Яцейко, З. М. Бахор “Проектування ліній електричних мереж” Навчальний посібник. м. Львів : вид-тво Львівської політ., 2020 рік. 200 с.

10. О. М. Василевський «Система із виміру та контролю параметрів взаємозв'язаних роторних машин» : монографія / Василевський О. М., Поджаренко В. О.. – м. Вінниця : вид. «УНІВЕРСУМ» 2007 р. – 155 с. УДК 621.313.3

11. «Асинхронні трифазні двигуни із короткозамкненим ротором, паспортні дані» – електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://khvent.com.ua/p1252290772-elektrodvigatel-air80a4-kvt.html> Дата звернення: 21.05.23

12. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів із дисципліні «Сучасні комплектні електроприводи технологічних комплексів» для студентів денної й заочної форми навчання. / виклад. Бородай Г. В. – м. Краматорськ: вид-во ДДМА, 2005 р. - 50с.

13. «Електротехнічна продукція, довідникові дані» – електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. https://www.avtomats.com.ua/2746-power_cable_avvg_4x25.html Дата звернення: 23.05.23

ДОДАТОК А.
«ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ»

Студентки групи ЕЛК – 19, ЄВСТРАТЕНКО Д.

Призначення документа	Документ	Умовні позначення	Зміст зауваження

Дата _____

Підпис _____

(ПІБ)

ДОДАТОК Б

«Охорона праці із електробезпеки обслуговуючого персоналу, виконання нормування та захисту.»

Б.1 Умови ураження людини електричним струмом

Вплив електричного струму на організм людини залежить від сили струму, напруги, опору тіла людини, виду й частоти струму (чинники електричного характеру). До факторів неелектричного характеру належать: тривалість дії струму, шлях проходження струму через тіло людини, індивідуальні особливості ураженого, умови довкілля тощо.

Сила електричного струму, що протікає через людину, є одним із основних факторів. Для змінного струму 50 Гц значення граничного струму фібриляції лежить в межах від 100 мА до 5А, а для постійного струму - від 300 мА до 5А. Постійний й змінний струми більше 5А викликають миттєву зупинку серця.

Сила струму, мА	Вплив на організм	
	Змінного струму частотою $f=50$ (Гц)	Постійного струму
0,6...1,5	Легке тремтіння рук	Без відчуттів
2...3	Сильне тремтіння пальців рук	Без відчуттів
5...7	Судоми рук Сверблячка,	Відчуття тепла
8...10	Руки можна «відірвати» від електродів, але важко,	Посилене відчуття тепла

	сильний біль у кистях рук	
20...25	Миттєвий параліч рук, відірватися від електродів неможливо, сильний біль у тілі, важке дихання	Посилене відчуття тепла, незначні скорочення м'язів рук
50...80	Параліч дихання, фібриляція серця	Сильне відчуття тепла, скорочення м'язів рук, важке дихання
90...100	Параліч дихання, протягом 3 (с.) та більше параліч серця	Параліч дихання

Опір різних тканин тіла має різне значення та складається з трьох послідовно включених опорів, два з яких - опір зовнішнього шару шкіри (епідермісу) й внутрішнього опору тканин тіла. Якщо шкіра зволожена, вона має менший опір, ніж суха. Тобто, при потовиділенні й забрудненні шкіри її захисна функція як діелектрика втрачається.

Опір тіла людини є змінною величиною та залежить від місця дотику електричного дроту до тіла, величини струму, що протікає по тілу, напруги, виду й частоти струму, площі дотику струмопровідної частини, тривалості протікання електричного струму й інших факторів.

Опір тіла людини залежить від фізіологічних факторів й навколишнього середовища. Так, опір тіла у жінок менший, ніж у чоловіків, у дітей менший, ніж у дорослих. У закритих приміщеннях, де менше кисню, опір тіла людини також зменшується, при цьому небезпека ураження збільшується.

Шлях електричного струму, що протікає через людину, відіграє значну роль при ураженні, оскільки під його дію можуть потрапити життєво важливі органи тіла людини – серце, легені, головний мозок й ін.

Тривалість впливу електричного струму також збільшує рівень ураження людини. Зі збільшенням часу його дії зростає величина струму, у своїй знижується захисна функція організму. Тривалий вплив великих струмів спричиняє значні опіки тіла, руйнування внутрішньої структури тканини організму й окремих органів, що призводить до смерті.

Потрібно враховувати, що людина, яка страждає на захворювання серцево-судинної системи або нервової системи, більше схильна до впливу електричного струму, ніж здорова людина.

Дослідження причин й умов ураження людини електричним струмом свідчить, що:

- однофазний дотик до проводу (фазі) справної мережі із ізольованою нейтраллю є найменш небезпечним;
- при однофазному дотику до дроту в мережі з глухозаземленою нейтраллю наслідки ураження залежать від опору статі, на якій стоїть людина й опору її взуття;
- небезпечним є двофазний дотик до проводів у будь-яких режимах нейтралі;
- у мережах напругою понад 1000 В небезпека однофазного або двофазного дотику практично однакова, з високою ймовірністю смертельного ураження.

Б.2 Засоби захисту від ураження електричним струмом.

Небезпечні струмопровідні частини електроустановки повинні бути недоступними для випадкового прямого дотику, а доступні для дотику відкриті й сторонні провідні частини повинні бути безпечними як за нормальних умов

(експлуатація електроустановки за призначенням й без пошкодження), так та при поодинокому пошкодженні.

Відповідно до пункту 1.7.55 глави 1.7 розділу 1 ПУЕ для запобігання ураженню електричним струмом за відсутності пошкодження слід застосовувати окремо або у поєднанні такі заходи захисту, як:

- ізоляція струмопровідних частин;
- огороження й оболонки;
- бар'єри;
- розміщення поза зоною досяжності;
- обмеження сили струму.

Ізолювальні електрозахисні засоби діляться на основні й додаткові.

В електроустановках напругою до 1000 В до основних електрозахисних засобів відносяться:

- ізолюючі штанги;
- ізолюючі кліщі;
- електровимірювальні кліщі;
- покажчики напруги;
- діелектричні рукавички
- інструмент із ізолюючим покриттям.

До додаткових засобів електрозахисту належать:

- ✓ діелектричне взуття;
- ✓ діелектричні килими;
- ✓ ізолюючі підставки;
- ✓ ізолюючі накладки;
- ✓ ізолюючі ковпаки;
- ✓ сигналізатори напруги;
- ✓ захисні огороження (щити, ширми)
- ✓ переносні заземлення;
- ✓ плакати й знаки безпеки;

✓ інші засоби захисту.

Додаткові електрозахисні засоби застосовуються разом з основними.

Крім наведених вище засобів захисту, слід застосовувати засоби індивідуального захисту, зокрема:

- захисні каски - для захисту голови;
- захисні окуляри й щитки - для захисту очей й обличчя;
- протигази й респіратори – для захисту органів дихання;
- рукавички - для захисту рук;
- запобіжні пояси й страхувальні канати.

Працівники, які отримали засоби захисту в особисте користування, відповідають за правильну їхню експлуатацію й зберігання, а також за своєчасне вилучення з експлуатації у разі несправності.

Б.3 Заходи захисту у разі непрямого дотику в електроустановках.

Автоматичне вимикання живлення призначене для недопущення патофізіологічного ефекту, який може виникнути в результаті наявності напруги дотику визначеної величини та тривалості дії у разі пошкодження ізоляції в електроустановці.

Вимоги до автоматичного вимикання живлення, які наведені в даних Нормах, розповсюджуються на електроустановки низької напруги змінного струму частотою від 15 до 1000 Гц й постійного струму.

Автоматичне вимикання живлення є найбільш розповсюдженим заходом захисту у разі непрямого дотику.

Якщо як захід захисту у разі непрямого дотику застосовується автоматичне вимкнення живлення, необхідно виконати систему заземлення та основну систему зрівнювання потенціалів, а також забезпечити координацію характеристик захисних пристроїв, які здійснюють це вимикання, й параметрів можливих кіл замикання на відкриті провідні частини або захисні провідники.

При використанні автоматичного вимикання живлення як заходу захисту у разі непрямого дотику захист від прямого дотику повинен бути забезпечений основною ізоляцією або огорожами чи оболонками.

Захисний пристрій, який призначений для забезпечення автоматичного вимкнення живлення, у разі замикання на відкриту провідну частину чи захисний провідник повинен виконати це вимикання так, щоб обмежити в часі існування напруги дотику, величина якої може перевищити значення допустимої напруги дотику.

Нормовані значення допустимого часу автоматичного вимикання живлення залежно від типу системи заземлення та номінальної напруги електроустановки.

Для звичайних (неспеціальних) електроустановок будинків та споруд допустимою напругою дотику вважається величина 50 В (змінний струм) й 120 В (постійний струм).

Для спеціальних електроустановок будинків та споруд або їх частин нормативні документи, які стосуються цих електроустановок (їх частин), можуть вимагати більш низькі значення допустимої напруги дотику та допустимого часу автоматичного вимикання живлення

Відкриті провідні частини електроустановки за допомогою захисних провідників повинні бути приєднані до системи заземлення з врахуванням специфічних особливостей, які властиві застосованому типу системи заземлення.

Характерні особливості типів систем заземлення (TN, TT та IT), які використовуються в електроустановках низької напруги.

Доступні одночасному дотику відкриті провідні частини індивідуально, групами або всі разом повинні бути приєднані до однієї системи заземлення.

З погляду забезпечення електробезпеки системи заземлення TN, TT та IT, як правило, можна вважати рівноцінними. Вирішальними факторами при виборі того чи іншого типу системи заземлення для використання в конкретній електроустановці є існуючі традиції (досвід експлуатації), умови експлуатації,

вимоги до надійності електропостачання, електромагнітної сумісності, пожежогото вибухобезпеки й вартість виконання системи.

У разі відсутності з боку власника електроустановки або експлуатуючої організації або нормативного документа, який стосується цієї електроустановки, вимог до застосування того чи іншого типу системи заземлення рекомендується, як правило, застосовувати систему TN. При цьому перевагу слід віддавати застосуванню систем TN-S та TN-C-S.

У будинках (спорудах) з вбудованими або прибудованими трансформаторними підстанціями слід, як правило, застосовувати систему TN-S.

У разі застосування системи TN-C-S поділ PEN-провідника на захисний та нейтральний провідники повинен, як правило, виконуватися на вводі лінії живлення в будинок (споруду).

Систему TT рекомендується застосовувати, коли значні струми замикань на землю (такі, як при використанні системи TN) є джерелом підвищеної небезпеки для людей, тварин, збереження майна та навколишнього середовища, наприклад, якщо вони можуть бути причиною виникнення пожежі або вибуху (нафтохімічні підприємства, приміщення для фарбування виробів тощо).

Крім того, систему TT рекомендується застосовувати, коли в процесі експлуатації має місце суттєва імовірність неконтрольованої реконструкції або розширення системи електропостачання (наприклад, шляхом підключення до неї додаткових електроприймачів) без належної перевірки виконання вимог, які ставляться до автоматичного вимикання живлення (мережі індивідуальних дачних будівель, торговельних точок тощо).

Систему IT за можливості швидкого усунення першого замикання на землю рекомендується застосовувати в електроустановках з підвищеними вимогами щодо безперебійності живлення електроприймачів, а також у випадках, коли значні струми замикань на землю можуть бути джерелом підвищеної небезпеки для людей, тварин, збереження майна та навколишнього середовища.

У разі застосування системи ІТ, яка зв'язана через трансформатор живильної підстанції з мережею високої напруги, між нейтральною точкою трансформатора або його лінійним виводом (коли нейтральна точка відсутня) на стороні низької напруги та заземлювачем заземлювального пристрою відкритих провідних частин підстанції повинен бути установлений пробивний запобіжник.

Величини опору заземлювальних пристроїв трансформаторних підстанцій високої напруги, які живлять електроустановки низької напруги, повинні також забезпечувати виконання вимог.

Вибір та монтаж захисних провідників й складових частин заземлювальних пристроїв повинні виконуватися згідно з вимогами.

Захисне та функціональне заземлення в будинку (споруді), а також заземлення системи блискавкозахисту цього будинку (споруди) слід здійснювати за допомогою одного спільного заземлювального пристрою, якщо це не забороняється вимогами виготовлювача (розробника) обладнання, яке підлягає функціональному заземленню, або (для деяких об'єктів) вимогами нормативних документів, що стосуються виконання блискавкозахисту.

Примітка. Якщо для заземлення відкритих провідних частин інформаційного або іншого чутливого до дії завад обладнання застосовується заземлювач, який є електрично незалежним від заземлювача захисного заземлення, автоматичне вимикання живлення не може використовуватись як єдиний захід захисту у разі непрямого дотику в колах цього обладнання та повинен бути застосований інший або додатковий захід захисту (наприклад, подвійна або посилена ізоляція).

У кожному будинку (споруді) повинна бути виконана основна система зрівнювання потенціалів, яку слід реалізувати шляхом приєднання до головної заземлювальної шини електроустановки таких провідних частин :

- захисних провідників;

- заземлювальних провідників пристроїв захисного, функціонального й блискавко-захисного заземлень, якщо такі пристрої в електроустановці будинку (споруди) передбачені;
 - металевих труб комунікацій, які входять у будинок (споруду) зовні: холодного та гарячого водопостачання, каналізації, опалення, газопостачання (у разі наявності ізолюючої вставки на вводі в будинок приєднання здійснюється після неї з боку будинку) тощо;
 - металевих частин каркаса будинку (споруди) та металевих конструкцій виробничого призначення;
 - металевих частин систем вентиляції та кондиціювання;
 - основних металевих частин для підсилення будівельних конструкцій таких, як сталева арматура залізобетону, якщо це можливо;
- металевих покриттів (оболонок, екранів, броні) телекомунікаційних кабелів (при цьому слід прийняти до уваги вимоги власника зазначених кабелів або організації, яка обслуговує ці кабелі, щодо такого приєднання).

Провідні частини, які входять у будинок (споруду) зовні, повинні бути з'єднані з провідниками основної системи зрівнювання потенціалів якомога ближче до точки вводу цих частин в будинок (споруду).

Використання додаткової системи зрівнювання потенціалів не виключає необхідності застосування автоматичного вимикання живлення за інших, не пов'язаних із загрозою ураження електричним струмом причин, наприклад, для запобігання виникненню пожежі, температурних перенавантажень електрообладнання тощо.

У системі TN всі відкриті провідні частини електроустановок споживачів електроенергії за допомогою захисних провідників повинні бути приєднані до точки мережі, яка заземлюється безпосередньо біля або на невеликій відстані від джерела живлення.

Точкою мережі, яка заземлюється, повинна бути нейтральна або середня точка джерела живлення. Якщо нейтральна або середня точка відсутня або недоступна, заземлюється лінійний провідник.

Якщо існують інші точки надійного зв'язку з землею, для наближення у разі замикання на землю значень потенціалів на захисному провіднику до потенціалу землі рекомендується виконувати приєднання цього захисного провідника (там, де це можливо) до зазначених точок (повторні заземлення).

Особливо ефективним з погляду електробезпеки є таке повторне заземлення на вводі в електроустановку будинку або споруди (в більшій мірі у разі живлення електроустановки повітряною лінією електропередачі).

Повторне заземлення на вводі лінії живлення в електроустановку будинку (споруди) в більшості випадків забезпечується основною системою зрівнювання потенціалів, до якої приєднані провідні частини, що мають контакт із землею.

1. Функції захисного та нейтрального провідників може виконувати один провідник (PEN-провідник).

2. Характеристики захисних пристроїв та повні опори кіл замикання (петлі "фаза-нуль") повинні бути такими, щоб при незначному опорі в місці замикання між лінійним провідником та відкритою провідною частиною або захисним провідником була виконана умова.