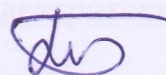


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

I. С. Білюк

« 15 » 06 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології
(назва освітньої програми)

на тему: «Автоматизація системи керування трубозгинального верстата»

Виконав: студент IV курсу, групи 4317ст3

Дубей Владислав Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

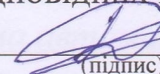
Керівник ст. викл. каф. автоматики, доц. НУК Фоменко А.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль викладач каф. автоматики, Савченко О.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц. Новоргецький С.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

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

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2026 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електротехніка та електротехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

О.Г. Васильєв
«12» 06 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ**

Дубей Владислав Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація системи керування трубозгинального верстата»
керівник роботи Фоменко Андрій Миколайович, старший викладач, доцент НУК,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22» квітня 2026 року
№ 286-УЧ.

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Двигун змінного струму з коротко замкнутим ротором з потужністю 3 кВт. Напруга живлення 380 В. Векторна система керування змінного струму. Час перехідного процесу не більш 1.15с Перерегулювання не більш 27 відсотків.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Опис верстата для гнуття труб. 2 Розробка системи керування електропривода подачі на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. 3 Vacon - пристрій для автоматизації керування привода. 4. Керування асинхронного двигуна 5 Охорона праці

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

1. Загальний вигляд верстата. 2. Загальна схема автоматизації верстату 3 Функціональна схема системи векторного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. 4 Структурна схема системи з керуванням по токозчепленню ротора. 5 Дослідження динаміки. 6 Дослідження динаміки.

6. Консультанти розділів роботи

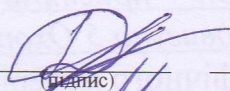
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 03 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача завдання</i>	13.02.26	
2	<i>Аналіз існуючої системи керування та техноло- гічного обладнання</i>	07.03.26	
3	<i>Обґрунтування та вибір комплект-ного елект- ропривода</i>	04.04.26	
4	<i>Розрахунок нової системи керування та аналіз дин- амики</i>	02.05.26	
5	<i>Консультація з розділу охороні праці та НС</i>	15.05.26	
6	<i>Графічна частина та підготовка до-повіді</i>	06.06.26	

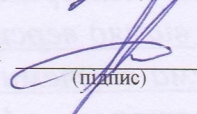
Студент


(підпис)

Дубей В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Фоменко А.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 69 с., 4 р., 20 рис., 4 табл., 1 дод., 12 джерел.

Ключові слова: двигун змінного струму, контур струму, контур швидкості, контур потокозчеплення, перехідна характеристика, керування по швидкості, привод змінного струму.

Мета роботи – . проведення автоматизації шляхом заміни існуючої системи керування на автоматизований електропривод подачі трубозгинального верстата

У кваліфікаційній роботі розглянуті питання підвищення показників якості системи керування привода подач верстату для гнуття труб.

Підвищення якості відбувається внаслідок заміни існуючої системи керування на нову систему керування змінного струму з асинхронним двигуном., яка є більш надійною.

Для забезпечення високих показників якості керування була спроектована система векторного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. Математична модель дозволяє представити цей двигун, як двигун постійного струму, і тим самим реалізувати закони керування.

У роботі також проведено моделювання спроектованої системи. В результаті чого були визначені показники які задовольняють заданим якість перехідних процесів.

Наряду з цим у проекті розглянуті питання, які пов'язані з економічним обґрунтуванням проекту, охороною праці та охороною навколишнього середовища.

Додатки містять слайди мультимедійної презентації (додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ОПИС ВЕРСТАТА ДЛЯ ГНУТТЯ ТРУБ	7
1.1 Технічні данні верстату	7
1.2 Конструкція верстату	9
1.3 Підготовка виробу до роботи і порядок роботи	12
1.4 Постановка задачі проектування	17
2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ НА ОСНОВІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕ- НИМ РОТОРОМ	19
2.1 Вибір функціональної схеми системи керування	21
2.2 Vacon - пристрій для автоматизації керування привода	29
2.3 Вибір Vacon	33
3. КЕРУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	41
3.1 Побудова математичної моделі асинхронного двигуна при керуванні ве- ктором поточозчеплення ротора	41
3.2 Результати моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном	55
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	59
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників для установки з приводом змінного струму.....	59
4.2 Розрахунок захисного заземлення установки з приводом змінного стру- му.....	63
4.3 Розробка заходів по забезпеченню безпечної експлуатації електроуста- новки з приводом змінного струму.....	66
ВИСНОВКИ.....	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69
ДОДАТОК А.....	70

ВСТУП

На підприємствах останній час з'явилась тенденція модернізації систем управління старого обладнання. Системи керування застаріли, а механічні частини обладнання залишається на достатнім рівні. До того ж бувають унікальні верстати, у яких системи керування не задовольняють необхідну якість керування. Нове обладнання коштує дуже дорого, а модернізація старого є єдиним виходом в цієї ситуації, так як основна ціна верстата приходить на механічну частину.

В дипломному проекті розглядається питання заміни базової системи керування електроприводами новою. В даному випадку залишаються механічні частини верстата, і виконується заміна систем керування електроприводами більш сучасними. Сучасна електронна промисловість має великий потенціал нових розробок в галузі автоматизованих систем керування електроприводами. При уніфікації створення автоматизованих систем останній час отримало перевагу створення комплектних автоматизованих приводів. Тім самим підвищуються показники технологічного обладнання. З'являються нові можливості, з'єднання чи керування верстатом з допомогою ЧПК та включення верстата в состав гнучких виробничих ділянок.

Для виконання даної модернізації з початку проводиться ретельний аналіз старої системи керування та механічної частини верстата. Потім на підставі зробленого аналізу з'ясовуються початкові данні для проектування. Проводиться аналіз сучасних систем керування з урахуванням отриманих початкових даних. Вибрав нову систему керування проводиться синтез та аналіз вибраної системи на відповідність при складних режимах роботи обладнання.

На підставі отриманих характеристик робиться висновок на доцільність проведення модернізації з використанням обраної нової системи керування технологічним обладнанням.

1 1. ОПИС ВЕРСТАТУ ДЛЯ ГНУТТЯ ТРУБ

1.1 Технічні данні верстату

Верстат для гнуття труб СТГ- 1С призначений для гнуття труб з нагрівом методом " намотування " труб зі сталі й кольорових сплавів.

Гнуття тонкостінних труб здійснюється з наповнювачем.

Діаметр труб, що згинають, мм:

найменший	14
найбільший: сталь, 250 мПа (25 кгс/мм ²)	45*2
кольоровий сплав	45*3
найбільший момент опору труб, що згинають, см ³	3,63
Радіус вигину, мм	35-120
Найбільший кут повороту гибочного диска, град	194
Робочий тиск, мПа (кгс/см ²), не більше	6,0(60)
Частота обертання диска для гнуття, об/хв:	
на холостому ходу, не менш	2,2
під навантаженням при гнутті сталеві труби	
с моментом опору 3,63 см ³ , не менш	1,6
Потужність електродвигуна, кВт	4
Габарити, мм:	
довжина	1270
ширина	836
висота	1100
маса (без оснащення й масла), кг	600

Склад верстата

Верстат для гнуття труб СТГ-1С складається з наступних основних частин:

Станини 1, Гідромотора 2, Притиску повзуна 3, Педального керування 4, Оснащення 5 (комплекту змінних частин).

Загальний вигляд верстата наведений на рисунку 1.1

Змінне оснащення дається для найбільш застосовуваних труб (див. табл.1) і відповідають вимогам ОСТ 5.5079-72 " Системи суднові й системи суднових енергетичних установок. Основні положення за технологією виготовлення й монтажу трубопроводів'.

Таблиця 1.1

Діаметр труб, мм	Радіус диска для гнуття, мм
14	35
18	45
22	55
25; 28	70
32;	90
36; 38	100
42; 45	120

У комплект оснащення входять гібочні диски й повзуни.

Кількість і номенклатура поставляє оснастки, що, що входить у комплект верстата, може бути зменшена за згодою замовника й відповідним зменшенням ціни при укладанні договору на поставку.

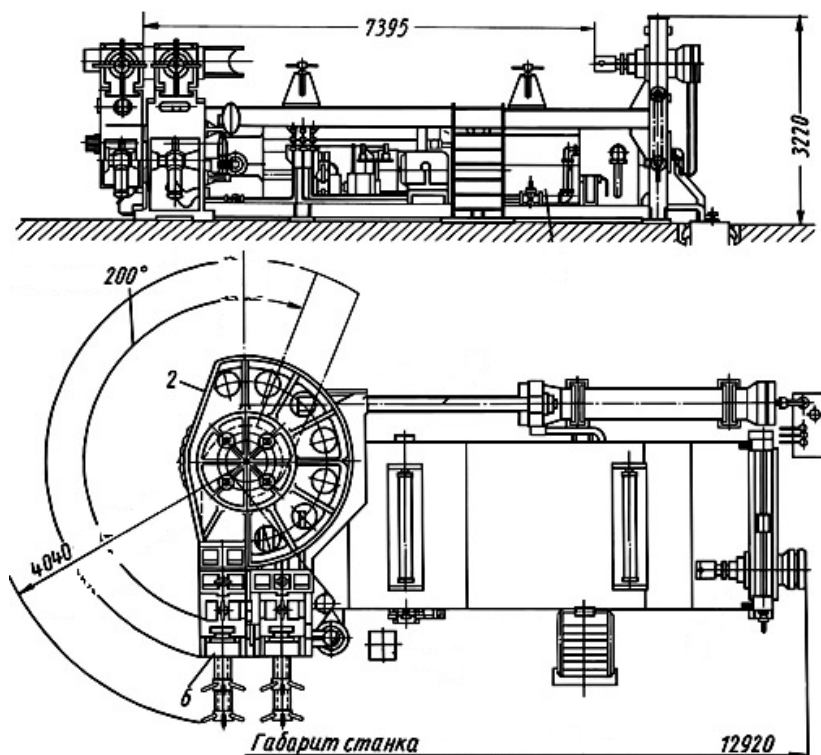


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд верстата

1.2 Конструкція верстата

В основу конструкції верстата СТГ-1С закладений метод гнуття труб з прогрівом та "намотуванням".

Станина 1 являє собою зварену конструкцію, у верхній лівій частині якої встановлений гідромотор 2 на шпинделі гідромотора монтуються змінні гибочні диски 5.

Механізм притиску повзуна 3 змонтований на корпусі гідромотора. Для здійснення лівого або правого вигину труби механізм варто повернути в необхідне положення й зафіксувати засувкою. Настроювання положення повзуна щодо труби проводяться вручну маховиком через гвинтову пару.

У нижній частині станини встановлене педальне керування 4, зв'язане тягами із золотником, що подає масло до гідромотора.

Натисканням лівої педалі здійснюється розворот гибочного диска по годинній стрілці, що відповідає правому вигину, а натисканням правої педалі - розворот диска проти вартовий стрілки. Кут гнучкі, варто контролювати по лімбі й покажчику.

Електрична шафа й електродвигун розташовані із правої сторони станини й закриті корпусом, у напрямних якого перебуває телескопічна штанга, що служить для підтримки труб.

Насос і панелі з гідравлічними апаратурами розташовані усередині станини під верхньою кришкою. На передню стінку станини уведений манометр.

Опис електричної схеми верстата. Електрична схема верстата містить у собі:

Пост керування 74.02.024.080.00;

Електродвигун 4АП2МВ6УЗ (МІ);

Мікровимикач МП2302В2 (S3).

Пост керування виконаний у вигляді металевої коробки, у якій установлені наступні настановні й комутаційні вироби:

Вимикач АЕ 2016-20НУЗ-6 (Q1)

Лампа Ц 220-10 (Н1)

Перемикач ПЕ171УХЛЗ (ключ-марка) (S1)

Пост типу ПКЕ 612-2УЗ (кнопки S2.1, S2.2) (S2)

Блок затискачів БЗН18-2721207Л00В2 (X1)

Реле РПУ-2-360023УЗ (ДО1)

Пускач ПМЕ-211УЗВ (ДО2)

Вставка плавка ВП2Б-1 (F1)

Принципова схема існуючої системи керування електродвигуном подачі наведена на рисунку 1.1.

Пост керування, мікровимикач S3 й електродвигун М1 кріпиться до станини верстата. Мікровимикач S3 має механічний зв'язок з педалями верстата.

Вимикач Q1 служить для підключення верстата до мережі змінного струму 380 У,

а також для захисту електричної частини верстата від перевантажень і короткого замикан

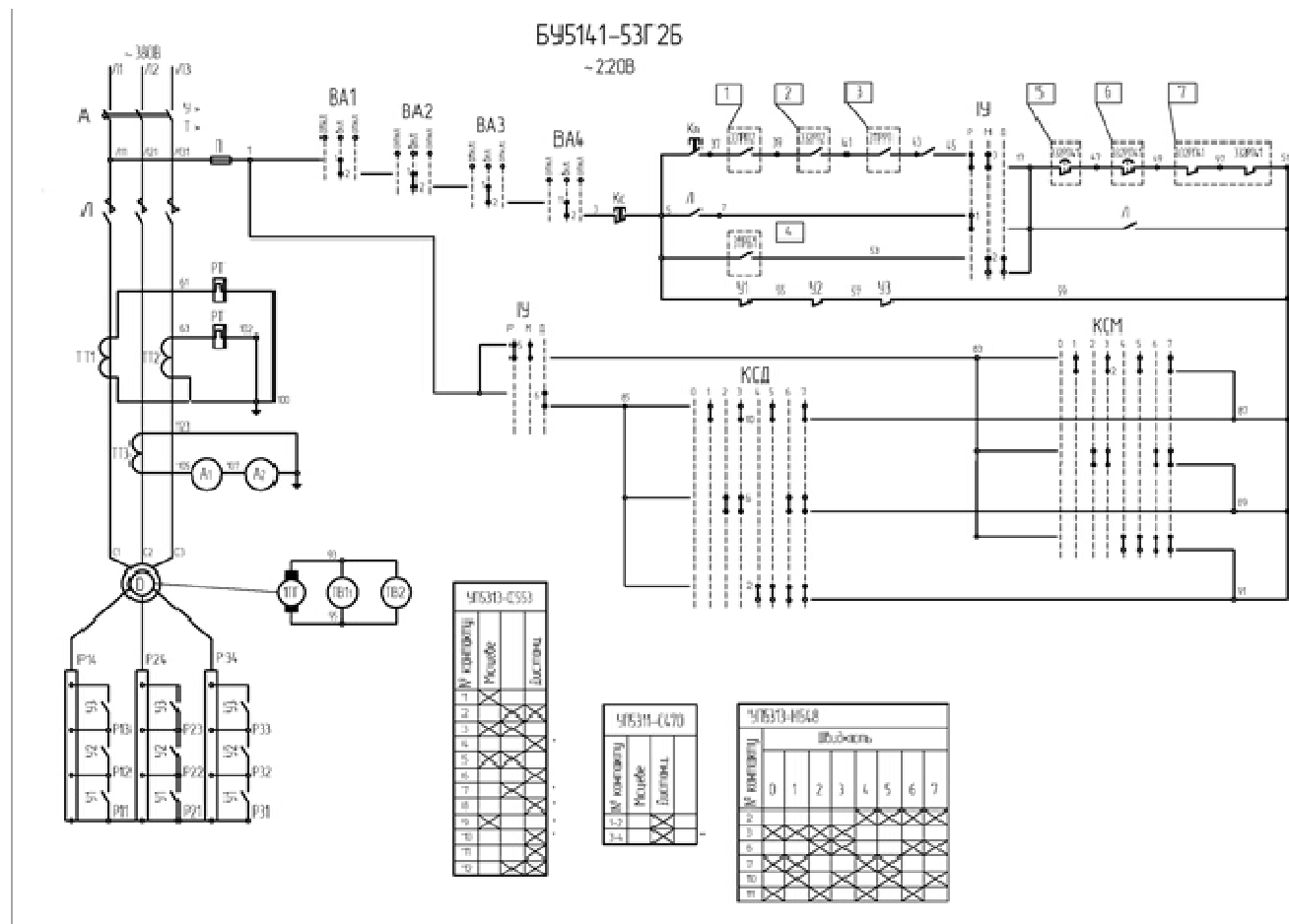


Рисунок 1.2 Принципова схема існуючої системи керування

Світіння сигнальної лампи Н1 свідчить про включення вимикача Q1.

Ключ-марка S1 дозволяє підключати за допомогою спеціального ключа ланцюг управління верстата до мережі.

Пост S2 служить тільки для перевірки гідравлічної частини верстата на холостому ході.

При включеному стані вимикача Q1 і ключа-марки S1, після натискання кнопки поста S2.2, спрацьовує реле ДО1 і стає на самоблокування.

Своїм контактом реле ДО1 підключає живлення до котушки пускача ДО2. Пускач ДО2 спрацьовує й через свої контакти подає живлення на електродвигун М1 насоса верстата (робітник орган верстата при цьому залишається в спокої).

Двигун М1 буде працювати доти, поки не натиснемо кнопку S2.1.

При натисканні кнопки S2.1 реле ДО1 зніметься із самоблокування й відключить своїм контактом живлення від котушки пускача ДО2. Пускач ДО2 відключає живлення від електродвигуна М1 насоса.

У процесі роботи при натисканні на педаль гнучкі або повернення гибочного диска спрацьовує мікровимикач S3 і підключає через свій контакт живлення до котушки пускача ДО2.

Мускатель через свої контакти підключає живлення до електродвигуна М1 насоса. Одночасно з натисканням педалі відбувається перемикання золотника, що забезпечує за допомогою гідромотора обертання гибочного диска в необхідному напрямку.

При відпусканні педалі, одночасно з відключенням гідромотора, спрацьовує мікровимикач S3 і знімає живлення із двигуна М1 насоса. Гнучка або повернення гибочного диска припиняється.

1.3 Підготовка до роботи й порядок роботи

Верстат для гнуття труб СТГ-1С повинен бути підключений до цехової мережі напругою 380 У и частотою 50 Гц.

Залийте масло И-30А ДЕРЖСТАНДАРТ 20799-75. Орієнтовна ємність бака 70 л. Рівень масла контролюється по маслоуказателю, розташованому із задньої сторони станини.

Перевірте зовнішнім оглядом справність всіх вузлів і механізмів верстата, справність оснащення, а також якість з'єднань трубопроводів гідравлічної системи. Перевірте справність заземлення.

Встановіть на верстат оснащення: гибочний диск і повзун відповідно до розмірів труби й радіусом вигину.

Поставте в положення "включено" автоматичний вимикач і ключ-марку, розташовані на передній стінці верстата й натисніть кнопку включення кнопкового поста.

Відрегулюйте по манометрі тиск у гідросистемі $P = 5,9 \text{ МПа}$ (60 кгс/див²)

Встановіть трубу на верстат.

Накиньте захват диска на трубу.

Підведіть повзун впритул до труби обертанням гвинта.

Натисканням на педаль у толчковому режимі зробіть гнбку труби на необхідний кут.

Експлуатація верстата СТГ-1С пов'язана з наявністю електроенергії напругою 380 В, і частин, що рухаються, що перебувають під тиском до 5, 9 мПа (60 кгс/см²), а також необхідністю застосування вантажопідйомних робіт і транспортних засобів.

Адміністрація підприємства, що експлуатує трубогібного верстат СТГ-1С, зобов'язана розробити й затвердити у встановленому порядку посадову інструкцію по техніці безпеки для робітників, що обслуговують верстат з урахуванням вимог даного ТЕ й місцевих умов. Інструкцію видати на руки працюючої під розписку й вивісити на робочому місці, забезпечивши постійний контроль за її виконанням. Зона гнучкi в місці установки верстата повинна бути обгороджена.

Для створення безпечної роботи в конструкції верстата передбачений ряд захисних пристроїв:

- Запобіжний клапан у гідросистемі верстата;
- Толчковий режим роботи педалей керування верстатом;
- Забезпечення послідовності включення електродвигуна, а потім команди "гнучка";
- Включення робочого ходу після натискання педалі на 45 мм;
- Болт заземлення з табличної для заземлення всіх металевих частин, які можуть виявлятися під напругою вище 12 В;
- Козирок, що закриває зверху педалі керування верстатом;
- Ручка вимикача червоного кольорів для аварійного відключення верстата з розташуванням у доступному й зручному місці;
- Наявність у трубогібника спеціального ключа для включення верстата.

До роботи на верстаті допускаються робітники не молодше 18 років, що пройшли спеціальне навчання й атестацію по обслуговуванню верстата й інструк-

таж з техніки безпеки на робочому місці, а також медогляд, згідно з наказом Міністра охорони здоров'я СРСР № 400 від 30.05.69.

Трубогибщики, що працюють на верстаті, повинні бути забезпечені спецодягом відповідно до встановлених галузевих норм.

Верстат СТГ-1С повинен бути встановлений на фундамент, ретельно вивірений і заземлений відповідно до встановлених норм правил пристрою електроустановок (ПУЭ) у місцях, передбачених нормам.

Перед початком експлуатації верстата необхідно уважно оглянути верстат і перевірити його роботу на холостому ході.

Установка й зняття з верстата труб і пристосувань вагою більше 16 кг необхідно робити за допомогою вантажопідйомних механізмів, які повинні бути оснащені пристосуваннями, що забезпечують надійне втримання предмета, а також зручний і безпечний підйом й установку його на верстат.

До керування піднімальними механізмами й стропальним роботам допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли відповідне навчання, атестацію й маючі кваліфікаційну групу по техніці безпеки не вище 2.

Піднімальні механізми, призначені для обслуговування верстата повинні експлуатуватися в повній відповідності з "Правилами пристрою й безпечної експлуатації вантажопідйомних кранів".

Робота на верстаті може виробляється тільки при повній його справності й при строгому дотриманні правил техніки безпеки.

При виявленні течі масла в гідравлічній системі або іншій якій-небудь несправності в роботі верстата, слід негайно припинити експлуатацію верстата надалі до усунення несправностей.

Верстат, що перебуває в роботі, повинен бути забезпечений висвітленням, що задовольняють нормам електроосвітлення й включаючи застосування переносного світильника. Електрична апаратура й сполучні струмоведучі пристрої повинні бути надійно ізольовані й укриті в корпусі верстата або в спеціальні закриті з усіх боків шафи, кожухи й т.п., як це передбачено кресленнями.

Зовнішня електропроводка верстата повинні бути добре захищені від механічного й хімічного впливу з метою недопущення ушкоджень її ізоляції.

Звільнення вигнутої труби з кулачків затискача каретки можна робити лише після того, коли вигнута труба чим-небудь підтримується (підставкою, краном і т.п.).

У процесі гнучкі, забороняється перебувати в зоні згинаємої труби. Зона повороту труби з боку проходів повинна бути обгороджена.

Перевірку конфігурації вигнутої труби варто робити тільки при нерухомому положенні механізмів верстата.

Забороняється залишати без нагляду включений верстат навіть на короткий час.

Ремонт або налагодження верстата для гнуття труб дозволяється робити тільки після повного відключення верстата від електромережі.

Забороняється робити ремонт гідравлічної системи під тиском.

Обслуговування й усунення несправностей електричних ланцюгів верстата повинен робити кваліфікований електромонтер, що має кваліфікаційну групу по техніці безпеки не нижче 3.

При огляді верстата дозволяється користуватися переносною лампою напругою не понад 12 Вольт, що має захисну сітку й проведення з надійною ізоляцією.

Пост керування 74.02.024.080.00 усередині пофарбована в червоні кольори, на кришці зображений знак "Електрична напруга".

При організації й проведенні робіт, пов'язаних з експлуатацією верстата СТГ-1С, адміністрація підприємства, крім дійсного технічного опису й інструкції для експлуатації 74.02.024.000.00 ТЕ, повинна керуватися:

- ОСТ 5. 0241-78. "Безпека праці при будівництві й ремонті судів";
- "Правилами техніки безпеки й виробничої санітарії при холодній обробці металів", затверджених постановою Президії ЦК Профспілки робочі машинобудування 12 вересня 1965 р.;

- "Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів і правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів";
- "Правилами пристрою й безпечної експлуатації вантажопідйомних кранів";
- ДЕРЖСТАНДАРТ 12.2.003-74, ССБТ, "Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки.
- Правила пристрою електроустановок, ПУЭ-76;
- гальні вимоги техніки безпеки;
- ДЕРЖСТАНДАРТ 12.2.007.7-76. ССБТ. Устаткування кузнечно-пресове. Загальні вимоги техніки безпеки.

Характерні несправності й методи їхнього усунення зведені в таблицю 1.3.

Технічне обслуговування

З метою збереження верстата й для забезпечення найбільш тривалого строку його служби необхідно:

Поводитися з верстатом дбайливо, охороняючи його від забруднень і випадкових ушкоджень.

Щоб уникнути аварійної поломки частин верстата забороняється відступ від дійсного технічного опису в інструкції для експлуатації.

Перевірка технічного стану верстата проводиться відповідно до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Що перевіряється й за допомогою якого інструмента, приладів й устаткування. Методика перевірки	Технічні вимоги
Неспіввісність струмка гибочного диска й повзуна в робочому положенні. Перевіряється за допомогою оправлення й щупа. Включення верстата при послідовному натисканні на ліву й праву педалі керування верстатом при включеному автоматі. Аварійне відключення верстата при натисканні на ручку вимикача на кнопковому пості. Тиск у гідросистемі привода гнучкі, перевіряється по манометрі при підготовці до роботи.	Неспіввісність не повинна бути більше + 0,2 мм Найбільший тиск у гідросистемі привода гнучкі повинне бути 5,9 Мпа (60 кгс/см²)

Таблиця 1.3.

Що перевіряється й за допомогою якого інструмента, приладів й устаткування. Методика перевірки	Імовірна причина	Метод усунення	Примітка
Відсутнє тиск у гідросистемі привода гнучкості. При натисканні на кнопку Не працює двигун При натисканні педалей керування верстатом не включається електродвигун	Вихід з ладу насоса Згоріла вставка плавка F1 Неправильно відрегульований штоухач важільної системи, що впливає на мікровимикач. Вийшло з ладу вставка плавка F1	Насос відремонтувати або замінити Замінити плавку вставку Відрегулювати штоухач. Замінити плавку вставку	

Періодично робити огляд всіх механізмів верстата, вчасно ремонтувати його, не допускаючи аварійного зношування деталей.

Після робочого дня робити ретельне очищення й обтирання від пилу й бруду всіх доступних частин верстата й оснащення, зовнішні незабарвлені частини змазувати.

Спостереження й догляд за електричною частиною трубогибочного верстата повинні виконуватися досвідченими фахівцями.

Варто періодично перевіряти надійність постійних контактних з'єднань електричної схеми верстата.

1.4 Постановка задачі проектування

Проаналізувавши технологічне обладнання було з'ясовано що існуюче керування виконується у ручному режимі. Відсутня можливість сполучення верстату з ЕОМ. Контроль за прогрівом труб здійснюється візуально оператором і незв'язаний з керуванням електропривода, так як електродвигун верстату керується релейною схемою з дискретною зміною швидкості. Технологічні вимоги для

технології гнуття труб передбачають точний контроль нагрівна труби і відповідно прогріву здійснення подачі останній в механізм гнуття.

Таким чином для проведення модернізації верстату пропонуються провести такі роботи:

Провести заміну релейної системи керування електропривода подачі на автоматизовану систему керування, з допомогою якої можлива плавна зміна швидкості подачі труби відповідно нагріву.

Включити до складу верстата систему числового керування, яка буде здійснювати керування всіма механізмами верстату, включаючи керування механізмом гнуття, подачі, нагріву та допоміжними механізмами.

Загальна схема автоматизації верстату наведена на рисунку 1.3

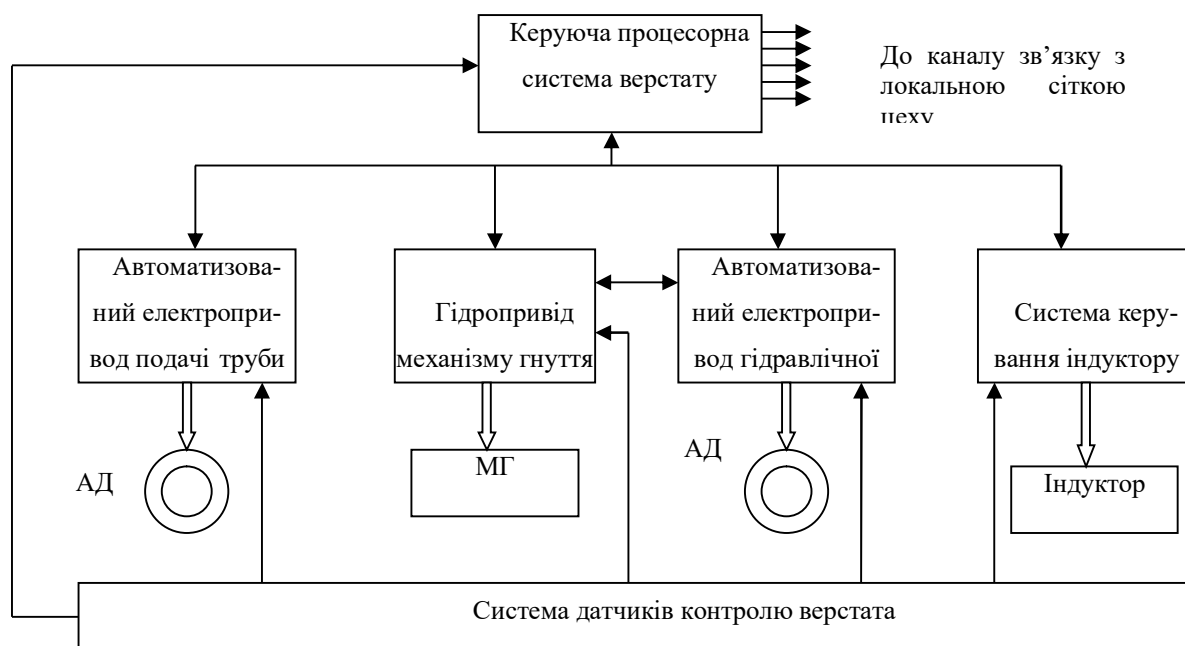


Рисунок 1.3 - Загальна схема автоматизації верстату

2 Розробка системи керування електропривода подачі на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

До промислового електропривода пред'являються наступні вимоги [4]:

- висока експлуатаційна надійність, мінімальне технічне обслуговування при мінімумі персоналу, зайнятого ремонтом і налагодженням устаткування;
- можливість оперативного переналагодження електроустаткування;
- забезпечення автоматизованого контролю функціонування устаткування за рахунок використання систем діагностики, індикації і захисту.

При розробці й створенні електропривода повинні зважуватися питання стандартизації й уніфікації конструкторських елементів, вхідних і вихідних параметрів електроавтоматики, вимірювальних пристроїв і т.п.

Електропривод повинний працювати при живленні від трифазної промислової мережі змінного струму з лінійною напругою 380 В, частотою 50 – 60 Гц.

Електропривод повинний забезпечити роботу при:

- відхиленнях напруги живильної мережі від номінального від $+10\%$ до -15% ;
- відхиленнях частоти живильної мережі на $\pm 2\%$ від номінальної;
- короткочасних провалах миттєвих значень живильного напруги;
- температурі навколишнього повітря від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- максимальної відносної вологості повітря 80% ;
- вибухонебезпечному середовищу, що не містить агресивних газів і парів, у концентраціях, що руйнує метали й ізоляцію.

Складові частини електропривода, розташовуються в окремих шафах (оболонках), повинні допускати вібрацію з частотою від 1 до 30 Гц, а встановлювані на агрегаті – вібрацію до 60 Гц. Ступінь захисту основних вузлів електропривода,

а також шаф – не менш IP54 (у деяких випадках допускається конструкція шаф із ступенем IP23). Ступінь захисту пульта керування – IP44.

Основними умовами на вибір типу привода для привода верстата є:

- підтримка постійної швидкості двигуна;
- високі динамічні показники;
- високі показники надійності (довговічність, безвідмовність, ремонтно-пригодність);
- ступінь захисту двигуна не менш IP44.

При виборі привода необхідно також враховувати, що привод працює в короткочасному режимі.

При експлуатації існуючої системи керування привода подач виникають наступні недоліки:

- існуюча система керування є системою постійного струму яка керує двигуном постійного струму в яких є колекторний механізм;
- перехід до двигуна з КЗ ротором підвищить надійність системи, спростить обслуговування верстата.

На підставі цього пропонується замінити існуючу систему керування електропривода автоматизованої системної керування з можливістю керування як автономно так і в ручному режимі.

Проаналізуємо вихідні дані двигуна:

- потужність електродвигуна 3 кВт;
- швидкість обертання до 1500 об/хв;
- момент на валу двигуна 30 кН·м.

Для системи керування привода подач вибираємо асинхронний двигун із наступними даними [5]:

типорозмір	АОД-1600-12У1
ступінь захисту	IP 54
потужність, кВт	3
число пар полюсів	6
синхронна частота обертання ротора, об/хв	1500

номінальна частота мережі, Гц	50
напруга живлення, В	380
номінальний струм, А	8
ковзання, %	0,56
ККД, %	94,5
кратність пускового моменту до номінального	1,1
кратність пускового струму до номінального	6,4
кратність максимального моменту до номінального	2,2
маса, кг	12

Напрямок обертання двигуна реверсивний. Охолоджене повітря зовнішнього циклу забирається з навколишнього простору відцентровим вентилятором з боку протилежної механізму й подається в трубки повітроохолоджувача, з яких викидається з боку механізму.

Далі зробимо вибір системи керування обраним двигуном, для цього розглянемо існуючі способи керування асинхронними машинами.

2.1 Вибір функціональної схеми системи керування

Система частотного керування асинхронним двигуном зі зворотним зв'язком по потоку

Стабілізація магнітного потоку за допомогою від'ємного зворотного зв'язку по потоку двигуна Φ (рис. 2.1) шляхом регулювання напруги на двигуні у функції частоти (за допомогою ФП) і навантаження забезпечує механічні характеристики двигуна з високою перевантажувальною здатністю і жорсткістю, що відповідає природній характеристиці [10]. Магнітний потік визначається по формулі:

$$\Phi = \frac{k_{ПУ} k_D}{1 + k_{ПУ} k_{ДФ} k_{\Phi}} U_{з\gamma}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } k_{ПУ} = U_{ном} \gamma / U \gamma; k_D = \Phi / U_{ном} \gamma; k_{\omega} = 1 / U_{зс} \cdot f_{1ном}; k_{\Phi} = U_{OC} / \Phi.$$

Починаючи з деякого великого коефіцієнта підсилення ($k \geq 100$) максимальний момент двигуна в розглянутій системі при будь-якій частоті залишається практично постійним і прагне до значення:

$$M_{\kappa(\alpha)} \rightarrow \frac{m_1 U_{\text{ном}}^2}{2\omega_{1\text{ном}} x_2'} \cdot \frac{1}{d^2 + e^2} \approx \frac{3U_{\text{ном}}^2}{2\omega_{1\text{ном}} x_2'}, \quad (2.6)$$

а критичне абсолютне ковзання:

$$\beta_{\kappa\alpha} \rightarrow R_2' / x_2'. \quad (2.7)$$

З (2.6) і (2.7) видно, що граничні значення $M_{\kappa(\alpha)}$ і $\beta_{\kappa\alpha}$ не залежать від частоти

Аналіз замкнутої системи зі зворотним зв'язком по потоці показує незначне зменшення струмів у порівнянні з розімкнутою системою (при однакових моментах навантаження), але при цьому зменшується коефіцієнт потужності (приблизно на 3 – 5 % у порівнянні з номінальним при $\alpha = 1$ і $m = 1$) [10].

Максимальний діапазон регулювання при $M = M_{1\text{ном}} = \text{const}$ можна визначити (при регулюванні униз від номінальної кутової швидкості) по формулі:

$$D_{\alpha\text{max}} \approx 2 \frac{1}{\beta_{e,ii}}, \quad (2.8)$$

де $\beta_{\kappa, \text{ном}}$ — критичне абсолютне ковзання в природній схемі включення двигуна.

Приймаючи в середньому $\beta_{\kappa, \text{ном}} = (0,1 — 0,2)$, одержуємо $D_{\alpha\text{max}} = (20 \div 10) : 1$, тому якщо є необхідність надалі розширити діапазон регулювання, то необхідно розглянуту систему доповнити негативним зворотним зв'язком по швидкості з впливом на частоту і задану напругу контуру стабілізації потоку. Можливо також використання зворотного зв'язку по швидкості й у контурі стабілізації потоку.

Керування електродвигунами перемінного струму ускладнено рядом обставин, найбільш істотними з яких є наступні:

- момент електродвигуна визначається добутком двох результуючих векторів електромагнітних параметрів статора і ротора і є функцією чотирьох перемінних;
- мається сильна взаємодія намагнічуючих сил статора і ротора, взаємний стан яких безупинно міняється при обертанні ротора;

- з метою кращого використання двигуна в різних режимах його роботи виникає задача регулювання магнітного потоку двигуна.

Роздільне керування швидкістю і потокозчепленням асинхронного короткозамкненого електродвигуна можна ефективно робити, використовуючи принцип векторного керування, що і буде розглянутий нижче.

Система векторного керування

Напруги, струми, а також потокозчеплення асинхронного двигуна можуть бути представлені у виді обертових векторів, як це показано на рис. 2.2. Координати електропривода, обмірювані в нерухомій системі координат зв'язаної зі статором, можуть бути перетворені до обертової системи координат зв'язаної з ротором, і з них можуть бути виділені постійні значення, пропорційні складової векторів в обертовій системі координат. По цих координатах і виробляється керування.

Якщо сполучити речовинну вісь обертової системи координат з вектором потокозчеплення ротора, тоді з рис. 2.2. видно, що амплітуда потокозчеплення ротора визначається проекцією струму статора на цю вісь, тобто, керуючи $I_{1\alpha}$ ми можемо керувати $|\Psi_2|$, а якщо підтримувати дійсну складову струму статора постійною, то і потокозчеплення також буде постійним, це дає можливість керувати моментом асинхронного двигуна, що є основним параметром механічного руху, що визначає прискорення, швидкість, положення об'єкта регулювання, регулюючи складову струму статора $I_{1\beta}$.

Це впливає з формули :

$$\mu = \frac{X_0}{X_2} \cdot |\psi_2| \cdot I_{1b}, \quad (2.9)$$

де $\mu = M/M_{ном}$, X_0 , і X_2 – індуктивні опори ротора і взаємної індукції при нормальній частоті у відносних одиницях [11].

насичення двигуна. При зміні β у межах до $3 \cdot \beta_{\text{ном}}$, де $\beta = s \cdot \omega_1 / \omega_{\text{ном}}$ – абсолютне ковзання ($\beta_{\text{ном}}$ відповідає номінальному моменту) збільшення Ψ_0 незначно і режим $|\Psi_2| = \text{const}$ цілком реалізований.

Вихідною інформацією для побудови системи векторного керування є інформація про миттєві значення і просторове положення вектора потокозчеплення в повітряному зазорі, миттєвих значеннях струмів чи напруг статора й швидкості ротора двигуна. Обертова система координат приймається певним чином орієнтованої щодо вектора потокозчеплення двигуна. Зручні алгоритми керування мають місце при орієнтації координатної системи щодо вектора потокозчеплення ротора.

Функціональна схема системи векторного керування показана на рис. 2.3. Система має два канали керування: модулем вектора потокозчеплення ротора і кутовою швидкістю ротора. Двоканальна система керування дає можливість здійснити незалежне регулювання модуля вектора потокозчеплення ротора й швидкості ротора при збереженні прямої пропорційності між моментом, що розвивається двигуном, і складової намагнічуючої сили статора, що знаходиться в квадратурі з хвилею потокозчеплення ротора [12].

ДТ вимірює миттєві значення струмів у трьох фазах статора i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} та перетворить їх у двофазну систему перемінних i_{1x} , i_{1y} .

Для перерахування перемінних з нерухомої системи координат у систему координат, зв'язану із потокозчепленням ротора, координатний перетворювач КП2. Координатний перетворювач КП2 являє собою матрицю з чотирьох блоків добутку і здійснює ортогональне перетворення — поворот вектора намагнічуючої сили статора на кут, рівний миттєвій фазі вектора потокозчеплення ротора в осях α - β щодо нерухомих осей – у відповідно до формул, записаними через струми статора.

$$\begin{aligned} i_{1\alpha} &= i_{1x} \cos \theta + i_{1y} \sin \theta, \\ i_{1\beta} &= -i_{1x} \sin \theta + i_{1y} \cos \theta. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Перетворення складових напруг статора u_{1a} , і u_{1b} (представлених в осях, жорстко зв'язаних із вектором потокозчеплення ротора) у складові u_{1x} и u_{1y} , нерухомих осей здійснюється відповідно до формул:

$$\begin{aligned} u_{1x} &= u_{1\alpha} \cos \theta - u_{1\beta} \sin \theta, \\ u_{1y} &= u_{1\alpha} \sin \theta + u_{1\beta} \cos \theta. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Ці перетворення виконуються в координатному перетворювачі КП1 (рис. 2.3). Далі напруги u_{1x} і u_{1y} , перетворюються за допомогою перетворювача фаз (ПФ) у трифазну систему перемінних напруг u_a , u_b , u_c , використовуваних для керування амплітудою і частотою вихідної напруги перетворювача частоти (ПЧ).

Блок компенсації (БК) здійснює розв'язку каналів керування потокозчепленням і кутовою швидкістю двигуна, це забезпечує умову автономності каналів.

У системі застосована аналогова система ідентифікації складових потокозчеплень, що використовує модель статора двигуна.

$$\frac{d}{dt} \dot{\Psi}_0 = \dot{U}_s - R_s \dot{I}_s - L_{\sigma s} \frac{d}{dt} \dot{I}_s. \quad (2.15)$$

Вимірюються миттєві значення модуля вектора напруги статора U_s і вектора струму статора I_s . Складові головного потокозчеплення $\psi_{0\alpha}$ і $\psi_{0\beta}$ виходять на виході аналогового інтегратора. Векторні перетворення, обчислення складових потокозчеплень ротора ($\psi_{2\alpha}$ і $\psi_{2\beta}$) і регулятори каналів керування кутовою швидкістю й модулем потокозчеплення ротора можуть бути реалізовані як на мікропроцесорах так і з використанням операційних підсилювачів.

Розглянувши способи керування асинхронним двигуном, вибираємо векторний спосіб керування, тому що при цьому забезпечуються необхідні регулювання режимів роботи при керуванні асинхронним двигуном. Для автоматизації керування привода подач верстата вибираємо комплектний привод типу Vacon.

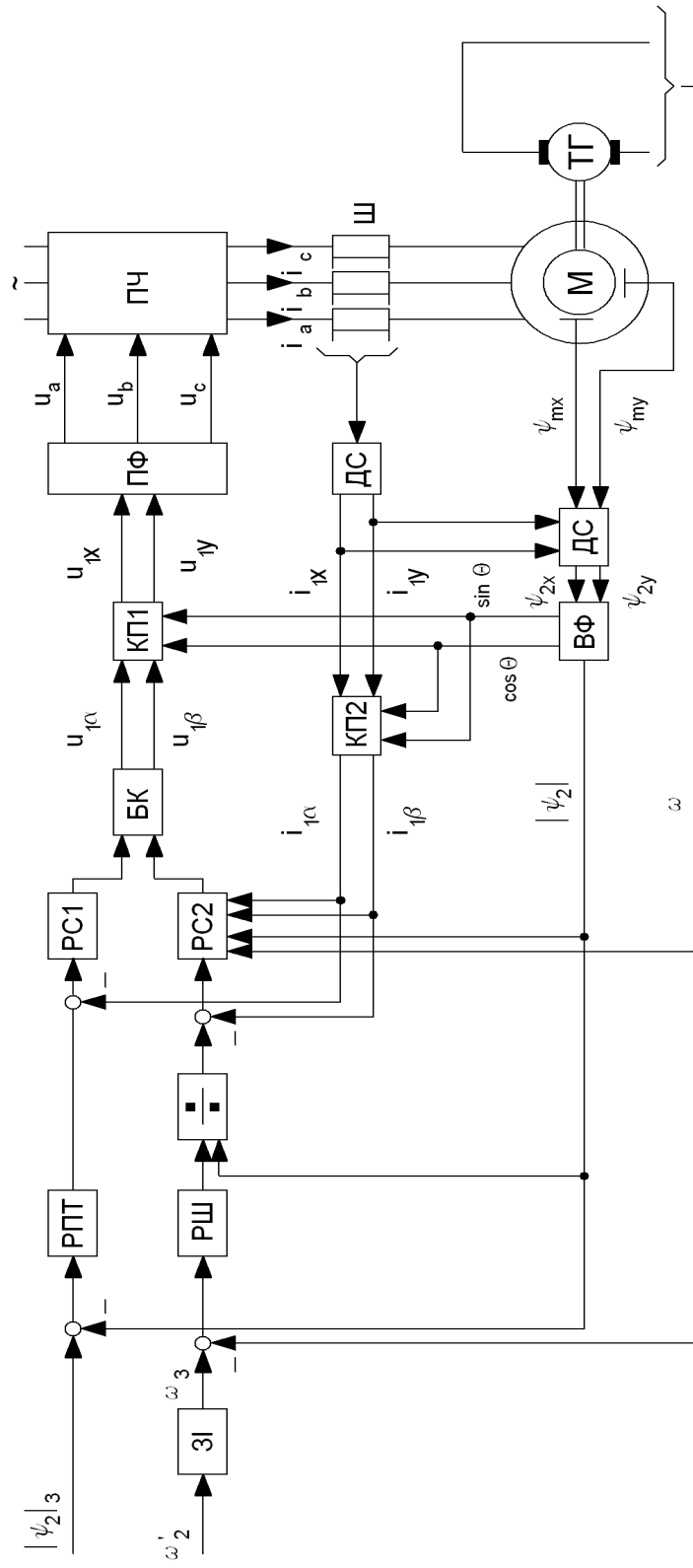


Рисунок 2.3 - Функціональна схема системи векторного керування асинхронним двигуном

2.2 Vacon – пристрій для автоматизації керування привода

З метою модернізації та покращення системи керування приводами подачі, використовується асинхронний двигун. Для використовуваного нами двигуна необхідно не тільки плавний пуск і стоп, але і необхідне керування швидкістю обертання.

Частотні перетворювачі на базі силових модулів IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) розраховані на струми до декількох десятків ампер і частоти комутації до 30 кГц і вище.

Існує два основних типи частотних перетворювачів — з безпосереднім зв'язком (частота на виході змінюється від 0 – 33 Гц) і з проміжним контуром (частота на виході змінюється від нуля до декількох тисяч герців). Для зміни швидкості обертання найбільше часто використовують принцип зміни частоти й амплітуди напруги. При регулюванні частоти вниз можна підібрати таке співвідношення f і U , при якому буде підтримуватися максимальний момент двигуна. При регулюванні частоти нагору має місце зниження магнітного потоку, тобто зменшення амплітуди напруги.

Велику роль в економії електроенергії й збільшенні ресурсу двигуна має правильний вибір режиму керування двигуном, що сильно залежить від типу навантаження. Залежність між швидкістю обертання й моментом опору неоднакова.

Багато навантажень мають постійний момент у всьому діапазоні швидкості обертання. У деяких споживана потужність залежить від куба швидкості обертання і, отже, теоретично зниження швидкості обертання на 10 % приносить економію 30 % від вихідної споживаної потужності. Найбільш точне й ефективне керування забезпечує режим векторного керування без датчиків зворотного зв'язку (SVC) [13].

Для зупинки чи для уповільнення двигуна, крім механічних способів, існують і електричні. Найпростіший — коли з двигуна знімають живлення, і він зупиняється по інерції. У цьому випадку час зупинки залежить від багатьох факторів і не піддається регулюванню. Для керування часом гальмування застосовують генераторний метод. Він полягає в тім, що частотний перетворювач зменшує вихід-

ну частоту до необхідного значення (енергія повертається в первинну мережу). При великому моменті або при швидкій зупинці, щоб уникнути перегріву й виходу з ладу внутрішнього контуру використовують зовнішній навантажувальний опір, що є недоліком даного режиму. При динамічному гальмуванні з однієї – двох фаз знімають перемінну напругу і подають постійну — при цьому способі не потрібно зовнішній опір. Але ефективність гальмування складає 30 % – 40 % у порівнянні з генераторним способом і час гальмування не регулюється. У частотних перетворювачах використовують комбінований метод, що включає в себе всі переваги вищеописаних методів.

Широка гама частотних перетворювачів Vacon, дозволяють вирішити проблеми керування двигунами з однофазною або трифазною напругою живлення й потужністю 0,25 – 3000 кВт.

Vacon одна з небагатьох фірм, що випускає частотні перетворювачі для потужних машин до 3000 кВт.

Vacon пропонує широкий спектр продукції для:

- передачі і розподілу електроенергії;
- керування в промислових процесах;
- автоматизації технологічних процесів.

Завдяки сучасним алгоритмам векторного керування і великих функціональних можливостей, перетворювачі Vacon допоможуть реалізувати одно- і багатодвигунові частотно-регульовані електроприводи для механізмів із будь-яким характером навантаження. Наявність ручного й автоматичного режимів керування від ПК, панелі оператора дозволять вмонтувати електропривод в автоматизовані системи будь-якої складності.

Частотні перетворювачі (ЧП) Vacon забезпечують плавне регулювання швидкості обертання стандартних промислових асинхронних електродвигунів потужністю від 0,25 до 3000 кВт у широкому діапазоні частот (від 0,1 до 500 Гц). Застосування ЧП дозволяє оптимізувати режим роботи (продуктивність) промислової установки чи агрегату відповідно до виробничого завдання і/чи поточними параметрами технологічного процесу. При цьому економія електроенергії досяга-

ється за рахунок роботи електропривода установки (агрегату) на знижених оборотах у тих випадках, коли виробнича програма чи процес не вимагають постійної роботи механізму, що приводиться з максимальною продуктивністю [13].

Vacon має сімейство частотних перетворювачів:

- «NXL» 0,25 – 30 кВт;
- «NXS» 0,37 – 200 кВт;
- «NXP» 0,37 – 800 кВт ($\pm$ водяне охолодження);
- «NXC» 200 – 3000 кВт.

ЧП забезпечують не тільки економію електроенергії, але і заощадження ресурсу при плавному пуску й зупинки механізмів.

Пристрої сімейства Vacon володіють рядом додаткових можливостей і переваг, включаючи:

- автоматичне регулювання обертів внаслідок зміни навантаження;
- програмований графік (цикл) зміни оборотів;
- програмувальний темп і графік прискорення/гальмування;
- захист електродвигуна від перевантажень;
- координовану роботу декількох ЧП для керування виробничими лініями й ділянками;
- зв'язок із комп'ютерами й іншими засобами автоматизації виробництва;
- можливість прямого підключення до промислової мережі Ethernet.

Функції, які виконує VACON

Vacon надійний перетворювач частоти, призначений для всіх типів трифазних асинхронних двигунів великої потужності. Він втілює в собі новітні технології й інноваційні функції (модульність), що відповідають найбільш частим застосуванням.

Перетворювач Vacon має макроконфігурації, орієнтовані на конкретні типи загальнопромислових механізмів, що містять невелике число базових параметрів. Вони набудовуються за бажанням за допомогою терміналу програмування, що дозволяє створювати додаткові функції.

Перетворювач перекриває діапазон потужностей від 0,25 до 3000 кВт для єдиної гама напруг від 380 до 690 В.

Багатофункціональність перетворювача не заважає йому залишатися простим у налаштуванні. Введення параметрів із заводської таблички двигуна й автопідстроювання достатні для одержання збільшеного моменту і відмінної якості регулювання навіть на дуже низьких швидкостях обертання ($<0,5$ Гц).

Основними функціями перетворювача частоти є:

- пуск і регулювання швидкості двигуна;
- прискорення, зупинка;
- захист двигуна й перетворювача і т.д.

Для електродвигунів із природною вентиляцією, охолодження зв'язане з їхньою швидкістю обертання. Це приводить до необхідності зниження навантаження при швидкостях, менших номінальної швидкості. Для налаштування теплового захисту двигуна бажано мати інформацію від виготовлювача про значення теплової постійної часу.

Завдяки сучасним алгоритмам векторного керування і великих функціональних можливостей, перетворювачі Vacon можуть реалізувати одно- і багатодвигунні частотно-регульовані електроприводи для механізмів із будь-яким характером навантаження [13].

До функцій ЧП входять:

- автопідстроювання до двигуна;
- автоматичне підстроювання частоти модуляції;
- енергозберігаючий режим (до 60%);
- автоматичний повторний пуск (якщо потрібен);
- підхоплення на ходу;
- переключення двигунів і блоків параметрів;
- двох- і трьохпровідне керування;
- автоматичний задавальник;
- фіксовані установки швидкості;
- S- і U- образні криві розгону-гальмування;
- переключення темпів розгону-гальмування;
- адаптація темпів розгону-гальмування;

- пропуск частотних вікон;
- покрокова робота;
- програмне керування зупинкою двигуна;
- програмне керування гальмом;
- обмеження моменту двигуна;
 - модульність усієї конструкції;
 - функція переносу параметрів між приводами;
 - безперервна система само діагностики та сигналізації.

2.3 Вибір VACON

Фірма Vacon пропонує сімейство перетворювачів частоти: «NXL» (0,25 – 30 кВт), «NXS» (0,37 – 200 кВт), «NXP» (0,37 – 800 кВт), «NXC» (200 – 3000 кВт).

Розглянув моделі перетворювачів Vacon, вибираємо перетворювач відповідно сімейства «NXL», так як він зможе керувати АД потужністю 3 кВт.

Існують різні можливості по комплектації Vacon NXC, усі вони залежать від потреби заказчика.

Обираємо NXL-19006-G5N0SSF шафного виконання, з системою охолодження та захистом IP54. Загальний вигляд перетворювача частоти серії NXC у закритому та відкритому стані показано на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 - Загальний вигляд Vacon NXC

Для обраного двигуна обираємо систему регулювання, що складається з низьковольтного перетворювача частоти Vacon NXC-19006-G5N0SSF і трансформа-

торів (двотрансформаторна схема - ДТС). Звичайне перетворення частоти виробляється на рівні напруги 690 В, при цьому використовуються стандартні трансформатори: «понижувальний» (6/0,69 кВ) і «підвищувальний» (0,67/6 кВ) (рисунок 2.5). Обов'язковим компонентом схеми є синус-фільтр, вмонтований на виході перетворювача частоти [14].

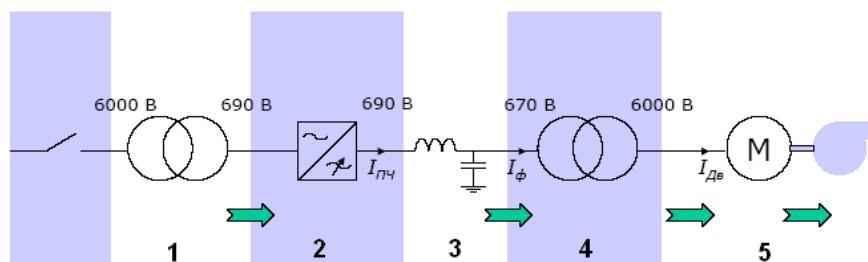


Рисунок 2.5 - ДТС

- понижувальний трансформатор 6000/690 В (1);
- перетворювач частоти (2) з вихідним синус-фільтром (3);
- підвищувальний трансформатор 670/6000 В (4);
- високовольтний електродвигун (5).

Двотрансформаторная схема має ряд переваг:

- гранична гнучкість у виборі напруги живлення двигуна (2-13 кВ);
- гальванічна ізоляція системи завдяки наявності трансформаторів;
- відсутність впливу на обмотку двигуна високочастотних складових струму (вищих гармонійних), що значно збільшує ресурс двигуна й уможливорює використання частотного регулювання для електродвигунів що вже виробили значну частину свого ресурсу;
- відсутність підшипникових струмів завдяки фільтру й гальванічній ізоляції;
- низький рівень шуму двигуна завдяки майже ідеальній синусоїдальності струму й напруги;
- можливість використання кабелю до 300 м;
- можливість роботи в «плаваючих» мережах;
- розумна ціна в порівнянні з дорогими високовольтними перетворювачами;
- використовується добре випробувана низьковольтна технологія;

- трансформатори можуть перебувати на видаленні від перетворювача частоти;

По габаритах ДТС не уступає високовольтним системам частотного регулювання аналогічної потужності. Потужність обраних трансформаторів показано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Потужність установки

I _{ДВ} , А	Потужність двигуна, кВт	Потужність понижувального трансформатора, кВт	Vacon		Потужність підвищувального трансформатора, кВт
			I _{пч} , А	I _ф , А	
8	3	16	16	16	17

Примітка: Vacon застосовує трансформатори Trafotek (Фінляндія). Дані трансформатори – сухого типу, с захистом IP23. Сам Vacon шафного виконання (NXL-19006-G5N0SSF) буде з двох секцій. В основній секції розміщується модуль перетворювача та вхідні захисні пристрої, в додатковій вихідний синус-фільтр.

Технічні дані VACON NXL-19006-G5N0SSF

Технічні дані, які вільно розповсюджує завод-виготовлювач приведені в таблиці 2.2 [3].

Таблиця 2.2 - Технічні дані Vacon NXL-19006-G5N0SSF

Підключення до мережі	Вхідна напруга U _{ВХ}	380 В; ±10 %
	Вхідна частота	45...66 Гц
	Підключення до мережі	Не більше одного разу у хвилину (нормальний режим)
Підключення двигуна	Вихідна напруга	0...U _{ВХ}
	Тривалий вихідний струм	Високе перевантаження: 160А (I _Н), температура окр. середовища макс. +50°C Мале переванта-

		ження: 190 А (I_L), температура окр. середовища макс. +40°C
	Перевантажувальна здатність	Висока: $1,5 \times I_H$ (1хв/10 хв), Низька: $1,1 \times I_L$ (1хв/10 хв)
	Максимальний пусковий струм	270 А (I_S) на 2 с кожні 20 с
	Вихідна частота	0...320 Гц; до 7200 Гц зі спеціальним ПО
Характеристики керування	Метод керування	Векторне керування з розімкнутим контуром (5-150% від номіналу швидкості): погрішність швидкості 0,5 %, динамічна 0,3 % с, моменту <2 %, наброс моменту $\square$ 5 мс. Векторне керування із замкнутим контуром (весь діапазон швидкості): погрішність швидкості 0,01 %, динамічна 0,2 % с, моменту <2 %, наброс моменту $\square$ 2 мс
	Частота комутації	1...6 кГц; За замовчуванням 1,5 кГц
	Крапка ослаблення поля	8...320 Гц
	Час розгону	0...3000 с
	Час гальмування	0...3000 с
	Режим гальмування	Постійним струмом (без гальмового резистора), гальмування потоком
Умови навколишнього середовища	Температура навколишнього середовища	-10°C (без інею)...+50°C: I_H -10°C (без інею)...+40°C: I_L
	Температура зберігання	-40°C ...+70°C
	Відносна вологість	Від 0 до 95 % RH, без утворення конденсату, не корозійна атмосфера, без води, що капає
	Якість повітря: - хімічно агресивні пари	IEC 721-3-3, прист-

	- механічні частки	рій у роботі, клас 3C2 IEC 721-3-3, прист- рій у роботі, клас 3S2
	Висота над рівнем моря	100 % навантажу- вальна здатність (без зниження потужності) до 1000 м 1% зниження поту- жності на кожні 100 м; макс. 3000 м.
	Вібрації EN50178/EN60068-2-6	5...150 Гц Амплітуда коли- вань 1мм (пік.) при 3...15,8 Гц Макс. амплітуда прискорення 1 G при 15,8...150 Гц
	Удари EN50178, EN60068-2-27	UPS Drop Test Перевезення й збе- рігання: макс. 15 G, 11 мс (в упакованні)

EMC	Перешкодозахищеність	Відповідає всім вимо- гам EMC
	Випромінювання	рівень EMC H: EN61800-3 (1996) +A11 (2000) (1-я зона, обмежене використання); EN61000-6-4, EN50081-2; EN55011 клас A. рівень EMC C: EN61800-3 (1996) +A11 (2000) (1-я зона, обмежене використання); EN61000-6-4, EN50081-1,-2; EN55011 клас B. рівень EMC L: EN61800-3 (1996) +A11 (2000) (2-я зона). рівень EMC T: для ін- формаційних мереж (може бути модифіковане з рівня H).

Безпека		EN50178 (1997), EN60204-1 (1996), EN60950 (2000), IEC61800-5, CE, UL, CUL, ГОСТ, Р.
Ланцюга керування (ОРТ-А1,-А2, або ОРТ-А1,-А3)	Аналоговий вхід (потенційний)	0...+10 В (-10 В...+10В у режимі джойстика), $R_j=200$ кОм, дозвіл 0,1%, точність ± 1 %
	Аналоговий вхід (струмовий)	0(4) ...20 мА, $R_j=250$ Ом дифференц., дозвіл 0,1%, точність ± 1 %
	Дискретні входи	6, позитивна й негативна логіка; 18...30 В
	Допоміжна напруга	+24 В, ± 15 %, макс. 250 мА
	Опорна напруга	+10 В, +3 %, макс. навантаження 10 мА
	Аналоговий вихід	0(4) ...20 мА, R_L макс. 500 Ом, дозвіл 10 біт, точність ± 2 %
	Дискретний вихід	Відкритий колектор, 50 мА/48 В
	Релейні виходи	2 програмувальних перекидних (Н0/Н3) релейних виходи (ОРТ-А3:Н0/Н3+Н0) Комутаційна здатність: 24 В=/8 А, 250 В□ /8 А, 125 В=/0,4 А. Мін. навантаження: 5 В/10 мА.
Захист	Термісторний вхід (ОРТ-А3)	Гальванически ізольований, $R_{срабат.}=4,7$ кОм
		Перенапруга, низька напруга, замикання на землю, контроль мережі, контроль вихідних фаз, свехструм, перегрів ПЧ, перегрів двигуна, недовантаження двигуна, коротке замикання джерел +24 В и +10 В.

Умови експлуатації

Робоче положення:-Вертикальне

На рисунку 2.6 та таблиці 2.3 показані габаритні розміри Vacon NXL-19006-G5N0SSF та двох трансформаторів Trafotek.

Відстані до іншого устаткування

Для забезпечення циркуляції холодного повітря на перетворювач Vacon встановлюється примусова вентиляція з чотирьох вентиляторів, розташованих нагорі шафи (продуктивність вентиляторів: 4×3600 м³/год).

Навколишня температура не повинна перевищувати максимально-припустиме значення. Якщо досягнута максимальна температура, то частота модуляції перетворювача зменшується автоматично, а якщо і цього недостатньо, то буде знижена величина обмеження максимального струму. Термін служби перетворювача зменшується з ростом температури навколишнього середовища. Не встановлюйте перетворювач поблизу джерела тепла. Необхідно:

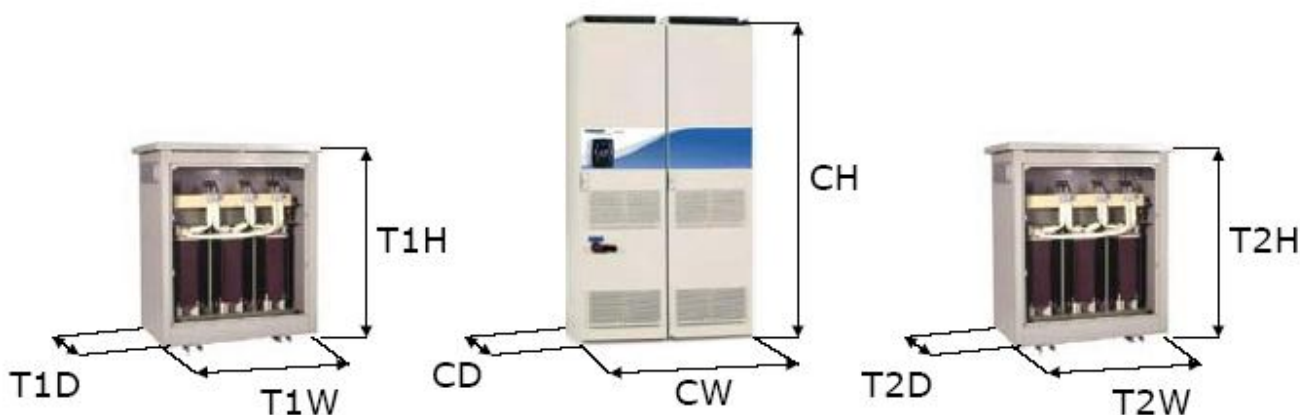


Рисунок 2.6 -. Габаритні розміри частотного перетворювача та двох трансформаторів

- забезпечити зовнішню витяжку приміщення;
- забезпечити доступ повітря з температурою навколишнього середовища;
- передбачити простір для циркуляції повітря.

Дотримуйте мінімальні відстані, що рекомендуються, особливо для вбудованого устаткування .

Попадання сторонніх предметів всередину устаткування може привести до його ушкодження: забезпечте, щоб проводи, ізоляція провідників, металева стру-

жка і пил не потрапили усередину устаткування, закриваючи його, поки воно не підключено до живлення.

На рис. 2.7. показані рекомендації по установці.

Простір з боків потрібно тільки для доступу при обслуговуванні, та візуального огляду.

Загальні положення.

Переконайтеся, що вхідна напруга (перемінна 3-х фазна) дорівнює: 525...690 В; $\pm 10\%$, 45...66 Гц.

Уникайте несприятливих навколишніх умов таких, як підвищена температура й вологість, а також пил, бруд чи корозійні пари.

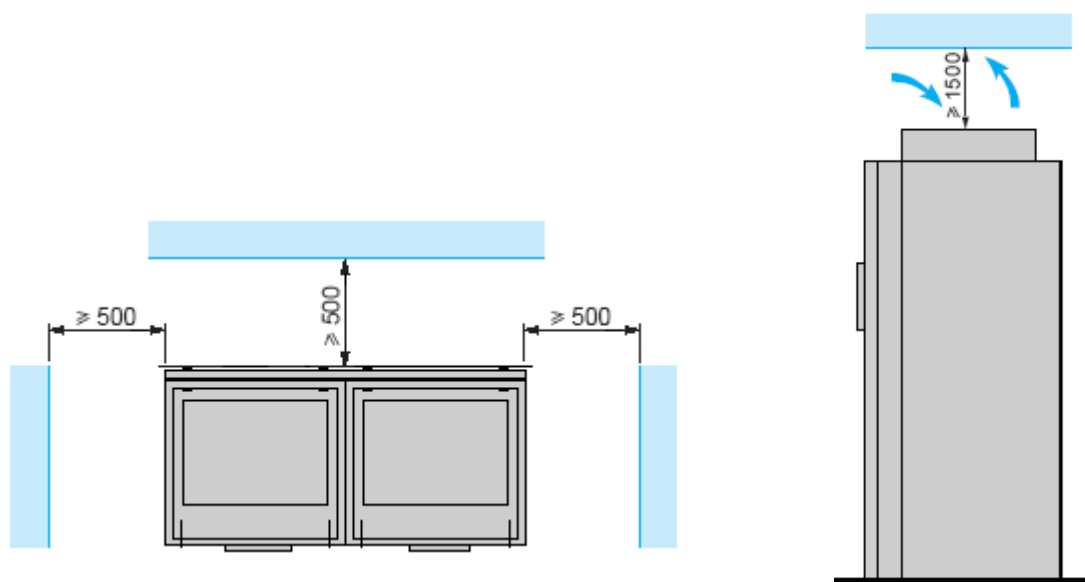


Рисунок 2.7 - Рекомендації по установці

Місце розміщення повинне добре провітрюватися й знаходитися поза прямим сонячним світлом. Установлювати устаткування на вертикальній поверхні, вогнестійкої, яка не піддається вібрації [3].

3 Керування асинхронного двигуна

Щоб оцінити показники якості реалізовані пристроєм для автоматизації керуванням привода Vacon NXL проведемо побудову й розрахунок математичної моделі векторної системи керування асинхронним двигуном.

3.1 Побудова математичної моделі асинхронного двигуна при керуванні вектором потокозчеплення ротора

При дослідженні перехідних процесів у трифазних асинхронних електродвигунах доцільно прийняти наступні допущення, що дозволяють спростити вираз основних параметрів і координат електродвигуна:

- сили обмоток двигуна розподілені синусоїдально уздовж окружності повітряного зазору;
- втрати в сталі статора і ротора відсутні;
- обмотки статора і ротора строго симетричні зі зрушенням осей обмоток на 120° ;
- насичення магнітного ланцюга відсутнє.

Рівняння рівноваги напруг для обмоток трьох фаз статора мають вид [15]:

$$\left. \begin{aligned} u_{1a} &= i_{1a} R_1 + \frac{d\psi_{1a}}{dt}; \\ u_{1b} &= i_{1b} R_1 + \frac{d\psi_{1b}}{dt}; \\ u_{1c} &= i_{1c} R_1 + \frac{d\psi_{1c}}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

відповідно для обмоток трьох фаз ротора:

$$\left. \begin{aligned} u'_{2a} &= i'_{2a} R'_2 + \frac{d\psi_{2a}}{dt}; \\ u'_{2b} &= i'_{2b} R'_2 + \frac{d\psi_{2b}}{dt}; \\ u'_{2c} &= i'_{2c} R'_2 + \frac{d\psi_{2c}}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Асинхронний електродвигун являє собою систему магніто-зв'язаних обмоток, розташованих на статорі й роторі. При обертанні ротора взаємне положення обмоток статора і ротора безупинно змінюється, відповідно змінюється і взаємна індуктивність між ними. З урахуванням прийнятих допущень можна вважати, що взаємна індуктивність пропорційна косинусу поточного кута між осями обмоток ротора і статора. Повна система рівнянь потокозчеплень в обмотках статора і ротора визначається рівняннями (3.3).

Рівняння (3.3) містить гармонійні коефіцієнти, що створює значних труднощів при дослідженні перехідних процесів. Для того щоб виключити гармонійні коефіцієнти, використовують перетворення координат. З цією метою реальні перемінні статора і ротора замінюються їхніми проекціями на взаємно перпендикулярні осі координат, що обертаються з довільною швидкістю ω_k . Таке перетворення координат відповідає приведенню трифазного електродвигуна до еквівалентного двофазного.

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$, $L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ — повні еквівалентні індуктивності фаз статора і

$$\begin{pmatrix} \psi_{1a} \\ \psi_{1b} \\ \psi_{1c} \\ \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \\ \psi_{2c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & 0 & 0 & L_{12} \cos \theta_2 & L_{12} \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) \\ 0 & L_1 & 0 & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L_{12} \cos \theta_2 & L_{12} \cos(\theta_2 - 2\pi/3) \\ 0 & 0 & L_1 & L_{12} \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L_{12} \cos \theta_2 \\ L_{12} \cos \theta_2 & L_{12} \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L'_2 & 0 & 0 \\ L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L_{12} \cos \theta_2 & L_{12} \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & 0 & L'_2 & 0 \\ L_{12} \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L_{12} \cos \theta_2 & 0 & 0 & L'_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \\ i'_{2a} \\ i'_{2b} \\ i'_{2c} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

ротора, що складаються з індуктивностей від полів розсіювання ($L_{1\sigma}$, $L'_{2\sigma}$) і головним потоком ($L_m = 3/2 L_{12}$), L_{12} — максимальна взаємна індуктивність між будь-якою обмоткою статора і будь-якою обмоткою ротора яка має місце при збігу їхніх осей; θ_2 — поточний кут між осями обмоток фаз ротора і статора.

При математичному описі трифазних асинхронних електродвигунів зручно оперувати не миттєвими значеннями координат, а їхній результуючими векторами. Якщо, наприклад, миттєві значення струмів рівні i_a , i_b , i_c то результуючий вектор струму визначається рівнянням [15]:

$$i = \frac{2}{3} (a^0 i_a + a i_b + a^2 i_c) = \frac{2}{3} (i_a + a i_b + a^2 i_c), \quad (3.4)$$

де $a^0 = e^{j0} = 1$; $a = e^{j2\pi/3}$; $a^2 = e^{j4\pi/3}$.

Аналогічно визначаються результуючі вектори напруги і потокозчеплення:

$$u = \frac{2}{3}(u_a + au_b + a^2u_c), \quad \psi = \frac{2}{3}(\psi_a + a\psi_b + a^2\psi_c).$$

Використовуючи вираз результуючих векторів, рівняння (3.1) можна записати у виді одного диференціального рівняння у векторній формі. Для цього перше рівняння з (3.1) збільшується на $2/3 \cdot a^0$, друге на $2/3 \cdot a$, третє на $2/3 \cdot a^2$. Підсумовуючи отримані добутки, одержимо:

$$\frac{2}{3}(u_{1a} + au_{1b} + a^2u_{1c}) = \frac{2}{3}(i_{1a} + ai_{1b} + a^2i_{1c})R_1 + \frac{2}{3} \frac{d}{dt}(\psi_{1a} + a\psi_{1b} + a^2\psi_{1c}), \quad (3.6)$$

$$\text{чи у векторній формі} \quad u_1 = i_1 R_1 \frac{d\psi_1}{dt}. \quad (3.7)$$

Аналогічно векторне рівняння напруг ротора:

$$u'_2 = i'_2 R'_2 \frac{d\psi_2}{dt}. \quad (3.8)$$

У цих рівняннях вектори записані відповідно в системах координат статора й ротора. Для спільного рішення рівнянь їх необхідно привести до однієї системи координат.

При дослідженні перехідних процесів в електродвигунах перемінного струму застосовують різні ортогональні системи координат, що відрізняються кутовою швидкістю обертання координатних осей ω_k , наприклад системи, осі яких нерухомі щодо ротора, чи нерухомі щодо статора, чи обертаються із синхронною швидкістю.

Рівняння асинхронного електродвигуна в системі координат, що обертається з довільною швидкістю ω_k , мають вид:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_e \psi_1; \\ u'_2 &= i'_2 R'_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_e - p_i \omega) \psi_2, \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

де ω — кутова швидкість обертання ротора; p_n — число пар полюсів.

Потокозчеплення зв'язані зі струмами через індуктивності:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= i_1 L_1 + i_2' L_m; \\ \psi_2 &= i_1 L_m + i_2' L_2' \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Звідси можливо одержати значення струму ротора: $i_2' = \frac{\psi_2}{L_2'} - \frac{L_m}{L_2'} i_1$. (3.11)

Підставив його в друге рівняння системи (3.9), і виконав необхідні перетворення з обліком того, що для електродвигуна з короткозамкнутим ротором $u_2' = 0$, а $L_m/L_2' = k_2$ одержимо

$$\frac{d\psi_2}{dt} = \frac{R_2'}{L_2'} \psi_2 + k_2 R_2' i_1 - j(\omega_e - p_i \omega). \quad (3.12)$$

Підставив в рівняння $u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_e \psi_2$, (3.13)

значення потокозчеплення статора $\psi_1 = i_1 L_1 + i_2' L_m$ і виконавши необхідні перетворення з урахуванням рівнянь (3.11) і (3.12) одержимо

$$\frac{d}{dt} i_1 = \frac{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'}{L_2''} i_1 - j\omega_e i_1 + \frac{k_2 R_2'}{L_2' \cdot L_1''} \psi_2 - j p_i \omega \cdot \frac{k_2}{L_1''} \psi_2 + \frac{1}{L_1''} u_1, \quad (3.14)$$

де $L_2'' = L_1 - (L_m^2/L_2') = L_{1\sigma} + L_{2\sigma}$.

Виразивши результуючі вектори через їх дійсні і мнимі частини, а також з огляду на формули (4.10) ортогональних перетворень, можна записати рівняння (3.11) і (3.12) у системі координат, що обертається зі швидкістю ω_k , рівної кутової швидкості обертання вектора потокозчеплення ротора $\omega_{\psi 2}$ приведеної до двополусного електродвигуна, у наступному виді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} |\psi_2| + \frac{R_2'}{L_2'} |\psi_2| &= k_2 R_2' i_{1a}; \\ (\omega_{\psi 2}' - p_i \omega) |\psi_2| &= k_2 R_2' i_{1b}; \\ \frac{d}{dt} i_{1a} + \frac{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'}{L_1''} i_{1a} &= \omega_{\psi 2}' i_{1b} + \frac{k_2 R_2'}{L_2' \cdot L_1''} |\psi_2| + \frac{1}{L_1''} u_{1a}; \\ \frac{d}{dt} i_{1b} + \frac{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'}{L_1''} i_{1b} &= -\omega_{\psi 2}' i_{1a} + p_i \omega \left(\frac{k_2}{L_1''} |\psi_2| \right) + \frac{1}{L_1''} u_{1b}, \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

де $|\psi_2| = \psi_{2\alpha}$, $\psi_{2\beta} = 0$, тому що вектор потокозчеплення ротора сполучений з дійсною віссю координатної системи.

Електромагнітний момент двигуна може бути визначений по формулі:

$$M = \frac{3}{2} p_i k_2 |\psi_2| i_{1b}. \quad (3.16)$$

Додавши до рівнянь (3.15) і (3.16) рівняння рівноваги моментів електропривода

$$M - M_c = J \cdot \frac{d}{dt} \omega, \quad (3.17)$$

одержимо систему рівнянь, що цілком характеризує перехідні процеси в електроприводі при векторному керуванні.

З аналізу рівнянь (3.15) і (3.16) можна установити однозначні залежності модуля вектора потокозчеплення ротора $|\psi_2|$ від струму $i_{1\alpha}$, моменту двигуна від струму $i_{1\beta}$, а також струмів $i_{1\alpha}$ і $i_{1\beta}$ від напруг $u_{1\alpha}$ і $u_{1\beta}$, якщо компенсувати наступні складові в правих частинах рівнянь (3.15) (попередньо помноживши їх на L'_1):

$$L_1'' \cdot \omega'_{\psi 2} \cdot i_{1b} - \frac{k_2 \cdot R'_2}{L'_2} |\psi_2| - L_1'' \omega'_{\psi 2} i_{1a}, \quad (3.18)$$

— і зневажити внутрішнім зворотним зв'язком по ЕРС двигуна, що враховується членом $p_n \omega k_2 \psi_2$, аналогічно тому, як це робиться в електроприводі постійного струму.

У системі керування ця компенсація технічно реалізується шляхом застосування блоку компенсації (БК), у який уводяться координати $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, $|\psi_2|$, ω і виробляються відповідні алгебраїчні перетворення.

Кутова швидкість $\omega_{\psi 2}$ дорівнює кутовій швидкості ω_0 . Однак для простоти виконання алгебраїчних перетворень можна вважати, що $\omega_{\hat{e}} = \omega_{\psi 2} \approx p_i \omega$.

З урахуванням компенсації складових правої частини рівняння (3.15) записуються в наступному простому виді [15]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_2'}{R_2'} \frac{d}{dt} |\psi_2| + |\psi_2| &= k_2 L_2' i_{1a}; \\ \frac{L_1''}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{1a} \right) + i_{1a} &= \frac{1}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} u_{1a}; \\ \frac{L_1''}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{1b} \right) + i_{1b} &= \frac{1}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} u_{1b}. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Перетворення складових напруги статора $u_{1\alpha}$, і $u_{1\beta}$ (представлених в осях, жорстко зв'язаних з вектором потокозчеплення ротора) у складові u_{1x} и u_{1y} , нерухомих осей здійснюється відповідно до формули

$$\begin{aligned} u_{1x} &= u_{1a} \cdot \cos \theta - u_{1b} \cdot \sin \theta; \\ u_{1y} &= u_{1a} \cdot \sin \theta + u_{1b} \cdot \cos \theta. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Позначивши $R_l + k_2^2 \cdot R_2' = R_\Sigma$, $(L_1''/R_\Sigma) = T_{el1}$, $(L_2'/R_2') = T_{el2}$ і переходячи до операторной форми рівнянь (4.16), (4.19), одержимо (4.21) передатні функції, що характеризують динамічні процеси в асинхронному електродвигуні при векторному керуванні:

Структурна схема математичної моделі асинхронного двигуна складена по рівнянням (3.21), показана на рисунок 3.1.

$$\left. \begin{aligned} \frac{|\psi_2|(p)}{i_{1a}(p)} &= \frac{k_2 \cdot L_2'}{T_{el2} \cdot p + 1}; \\ \frac{i_{1a}(p)}{u_{1a}(p)} &= \frac{1/R_\Sigma}{T_{el1} \cdot p + 1}; \\ \frac{i_{1b}(p)}{u_{1b}(p)} &= \frac{1/R_\Sigma}{T_{el1} \cdot p + 1}; \\ M(p) &= \frac{3}{2} p_n k_2 |\psi_2| \cdot (p) \cdot i_{1b} \cdot (p); \\ \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} &= \frac{1}{Jp}. \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

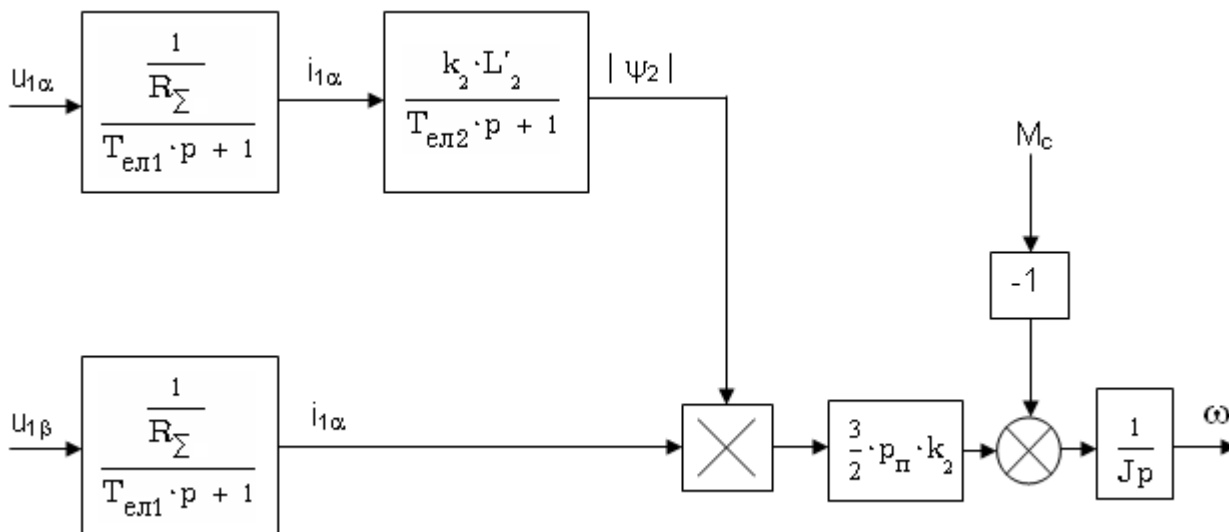


Рисунок 3.1 - Математична модель асинхронного двигуна при керуванні вектором потокозчеплення ротора

Параметри зображених на схемі ланок:

- відносна напруга статора $\gamma = \frac{u_{1\alpha}}{u_{1\alpha H}} = 1$;
- відносна частота напруги статора $\nu = \frac{\Omega_1}{\Omega_{1H}} = 1$;
- момент інерції двигуна разом із барабаном $J = 163 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- постійна часу $T_{ел1} = L_1' \cdot \frac{\gamma}{\nu} = 0,854 \text{ с}$;
- постійна часу $T_{\vec{a}e2} = \frac{L_2'}{R_2'} = 0,367 \text{ с}$;

де $k_2 = \frac{L_m}{L_2'} = 0,8362$; а $L_1' = L_1 - (\frac{L_m^2}{L_2'}) = 0,2086 \text{ Гн}$.

У незмінну частину системи також входять перетворювач частоти й блоки виміру і перетворення координат, динамічні властивості яких можуть бути спрощено, враховані введенням еквівалентної інерційної ланки з передатною функцією

$$W_{np}(p) = \frac{k_{np}}{(T_{np}p + 1)}, \quad (3.22)$$

де k_{np} — еквівалентний передатний коефіцієнт перетворювача; T_{np} — еквівалентна постійна часу перетворювача. Параметри перетворювача частоти:

$$k_{np} = 1000, \quad T_{np} = 0,0005 \text{ с [3].}$$

Підставивши в систему диференціальних рівнянь (3.21) рівняння (3.22) запишемо систему рівнянь, що описує незмінну частину розрахованої системи керування:

$$\left. \begin{aligned} \frac{|\psi_2|(p)}{i_{1a}(p)} &= \frac{k_2 \cdot L_2'}{T_{\dot{a}e2} \cdot p + 1}; \\ \frac{i_{1a}(p)}{u_{1a}(p)} &= \frac{k_{i\delta}}{T_{i\delta} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{\dot{a}e1} \cdot p + 1}; \\ \frac{i_{1b}(p)}{u_{1b}(p)} &= \frac{k_{i\delta}}{T_{i\delta} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{\dot{a}e1} \cdot p + 1}; \\ M(p) &= \frac{3}{2} p_i k_2 |\psi_2| \cdot (p) \cdot i_{1b} \cdot (p); \\ \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} &= \frac{1}{Jp}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Спираючись на систему рівнянь (4.23) розглянемо структуру, що дозволяє здійснити керування модулем потокозчеплення ротора і кутовою швидкістю ротора.

Система векторного керування з опорним вектором потокозчеплення ротора будується у виді двоканальної системи керування і містить канал керування кутовою швидкістю ротора і канал керування потокозчепленням ротора. Система побудована за принципом підлеглого регулювання.

Потокозчеплення ротора безпосередньо не залежить від складової $u_{1\alpha}$, тому канал керування $|\psi_2|$ можна будувати двоконтурним — із внутрішнім контуром керування по струму статора $i_{1\alpha}$ і з зовнішнім по модулі потокозчеплення ротора.

Канал керування кутовою швидкістю ротора також може містити два контури керування — внутрішній, по струму статора $i_{1\beta}$, і зовнішній, по кутовій швидкості ротора.

Структурна схема системи керування представлена на рис. 3.2.

У системі регулювання швидкості асинхронного електродвигуна з підлеглим зворотним зв'язком по струму $i_{l\beta}$ застосовується локальна система стабілізації потокозчеплення ротора, у якій застосований підлеглий зворотний зв'язок по струму $i_{l\alpha}$. Використанням компенсаційних зв'язків, що на структурній схемі не показані, системі стабілізації потокозчеплення ротора забезпечується умова автономності. Ця умова дає можливість виконати синтез регуляторів потоку (РП) і струму $i_{l\alpha}$ (РС1) з передатними функціями $W_{rp}(p)$ і $W_{pc1}(p)$ незалежно від координат системи стабілізації швидкості. Аналогічна умова автономності застосовна і при синтезі регуляторів швидкості (РШ) і струму $i_{l\beta}$ (РС2) з передатними функціями $W_{рш}(p)$ і $W_{pc2}(p)$.

Контури регулювання струмів $i_{l\alpha}$ і $i_{l\beta}$ є однаковими. Малої некомпенсированої постійної часу є постійна T_{np} . Регулятори РС1 і РС2 доцільно вибрати пропорційно-інтегральними. Як пропорційно-інтегральний регулятор доцільно вибрати і РП. Синтез РС у системі векторного керування виконується аналогічно тому, як це робиться в системах керування електроприводом постійного струму при двозонному регулюванні швидкості. Послідовно з РС установлюється блок розподілу, що компенсує вплив вузла добутку при формуванні електромагнітного моменту. Тим самим забезпечується сталість передатного коефіцієнта розімкнутої по швидкості системи при зміні потокозчеплення ротора.

Зробимо налаштування регуляторів на оптимум по модулю (ОМ). Розглянемо спочатку контур керування струмом намагнічування статора $i_{l\alpha}$, визначимо передатну функцію регулятора струму $W_{pc}(p)$. Передатна функція розімкнутого контуру буде мати вид:

$$W(p) = W_{pc}(p)W_{нч}(p), \quad (3.24)$$

$$\text{де} \quad W_{нч}(p) = \frac{k_{np}}{T_{np} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{ел} \cdot p + 1}. \quad (3.25)$$

У розглянутому контурі передатна функція об'єкта регулювання має вид:

$$W_o(p) = \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{ел1} \cdot p + 1}, \quad (3.26)$$

тому для реалізації настроювання на оптимум по модулю необхідно використовувати пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор з передатною функцією:

$$W_p(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p}, \quad (3.27)$$

вибираючи передатний коефіцієнт регулятора по формулі

$$\beta_p = \frac{T_{ел1}}{2T_{np} \frac{\gamma}{v} \cdot k_{np} \cdot k_{oc}}, \quad (3.28)$$

а постійну часу $\tau_p = T_{ел1}$, можна одержати передатну функцію розімкнутого контуру у виді:

$$W_{пк}(p) = \frac{1}{2T_{np} p \cdot (T_{np} p + 1)}. \quad (3.29)$$

Передатна функція замкнутого контуру відповідно до виразу:

$$W_{зк}(p) = \frac{W(p)}{[(1 + W(p)) \cdot W_{о.з}(p)]}, \quad (3.30)$$

виходить у виді:

$$W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{oc}}}{2T_{np} p \cdot (T_{np} p + 1) + 1} = \frac{\frac{1}{k_{oc}}}{2(T_{np})^2 p^2 + 2T_{np} p + 1}. \quad (3.31)$$

Таким чином, вибір регулятора відповідно до вищевикладеного приводить до того, що розглянутий контур описується передатною функцією коливальної ланки.

Тепер розглянемо настроювання регулятора потоку, передатна функція $W_{п}(p)$ представляє розімкнутий контур керування по потоку.

$$W_n(p) = W_{пн}(p) \cdot W_{нчп}(p), \quad (3.32)$$

де
$$W_{нчп}(p) = W_{зк}(p) \frac{k_2 L_2'}{T_{ел2} p + 1} \quad (3.33)$$

- передатна функція незмінної частини по контурі керування потокозчепленням.

Розглядаючи замкнутий внутрішній контур $W_{зк}(p)$ як ланку з еквівалентною малою постійною часу, параметри регулятора потрібно вибирати так, щоб виключити вплив на динаміку зовнішнього контуру еквівалентної постійної часу $T_{ел}$. При розрахунку параметрів регулятора зовнішнього контуру внутрішній замкнутий контур відповідно до викладеного вище можна замінити аперіодичною ланкою з передатною функцією

$$W_{зк}(p) \approx \frac{1}{\frac{k_{ic}}{T_{le}p + 1}}. \quad (3.34)$$

При настроюванні внутрішнього контуру на ОМ приймають $T_{ел} = 2T_{np}$. Тобто передатна функція $W_{зк}(p)$ буде мати вид:

$$W_{зк}(p) = \frac{1}{\frac{k_{oc}}{2T_{np}p + 1}}. \quad (3.35)$$

У даному випадку $2 \cdot T_{np}$ – мала некомпенсуєма постійна часу.

Для настроювання контуру на оптимум по модулі передатна функція регулятора потоку буде мати вид:

$$W_{pn}(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p}, \quad (3.36)$$

де
$$\beta_p = \frac{T_{ел2}}{2 \cdot 2 \cdot T_{np} \frac{1}{k_{oc}} \cdot k_{дн} \cdot k_2 \cdot L_2'}, \quad (3.37)$$

а $\tau_p = T_{ел2}$.

Якщо вибрати регулятор із зазначеними параметрами, то передатна функція розімкнутого контуру керування потокозчепленням ротора буде мати вид:

$$W_{рк}(p) = \frac{1}{4T_{np}p \cdot (2T_{np}p + 1) + 1}, \quad (3.38)$$

передатну функцію замкнутого каналу керування потокозчепленням ротора асинхронного двигуна запишемо у вигляді:

$$W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{4T_{np}p \cdot (2T_{np}p + 1) + 1} = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{8(T_{np})^2 p^2 \cdot 4T_{np}p + 1}. \quad (3.39)$$

Розглянемо канал керування швидкістю двигуна. Контур струму цього каналу також настроєний на оптимум по модулі, а так як незмінні частини контурів керування струмами $i_{l\beta}$ і $i_{l\alpha}$ - ідентичні, то і передатні функції регуляторів будуть виглядати однаково:

$$W_{pc2}(p) = \frac{T_{en1}}{2 \cdot T_{np} \cdot \frac{\gamma}{v} \cdot k_{np} \cdot k_{\partial c}} \cdot \frac{T_{en1}p + 1}{T_{en1}p}. \quad (3.40)$$

Відповідно передатна функція замкнутого контуру керування струмом $i_{l\beta}$ має вид:

$$W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2T_{np}p \cdot (T_{np}p + 1) + 1} = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2(T_{np})^2 p^2 \cdot 2T_{np}p + 1}. \quad (3.41)$$

Відповідно до вищевикладеного передатну функцію замкнутого контуру можна представити у виді:

$$W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2T_{np}p + 1}. \quad (3.42)$$

У контурі керування швидкістю двигуна передатну функцію

$$W_{нс}(p) = W_{зк}(p) \cdot \frac{3}{2} p_n k_2 \frac{1}{Jp}, \quad (3.43)$$

можна розглядати як передатну функцію незмінної частини зовнішнього контуру, замкнутого через власний регулятор РС. Запишемо передатну функцію розімкнутого контуру:

$$W_{рк}(p) = W_{пш}(p) \cdot \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2T_{np} + 1} \cdot \frac{3 \cdot p_n \cdot k_2}{2 \cdot Jp}. \quad (3.44)$$

Розглянута система є стабілізуючою, то щоб уникнути статичної помилки по швидкості в контурі з об'єктом у виді інтегруючої ланки, замість пропорційного

регулятора потрібно застосувати Пі-регулятор. Вибираючи β_p відповідно до звичайного настроювання, але при цьому поклавши

$$\tau_p = 4T_{ел2} \text{ (де } T_{ел2} = 2 \cdot T_{np}), \quad (3.45)$$

можна одержати передатну функцію розімкнутого контуру, настроєного на симетричний оптимум (СО):

$$W_{pk}(p) = \frac{8 \cdot T_{np} p + 1}{32 \cdot T_{np}^2 p^2 \cdot (2 \cdot T_{np} p + 1)}. \quad (3.46)$$

Передатна функція регулятора швидкості:

$$W_{pi}(p) = \frac{J}{4 \cdot T_{np} \cdot \frac{3}{2} p_n k_2 \cdot \frac{1}{k_{dc}} \cdot k_{dш}} \cdot \frac{8 \cdot T_{np} p + 1}{8 \cdot T_{np} p}. \quad (3.47)$$

Застосування такого регулятора забезпечить підвищення астатизму каналу, це приводить до того, що статична помилка дорівнює нулю, однак при настроюванні на симетричний оптимум перерегулювання при реакції системи на східчастий вхідний вплив складе 43 %, що неприпустимо, тому, для зменшення перерегулювання застосуємо задатчик інтенсивності з передатною функцією [15]:

$$W_{zi}(p) = \frac{1}{8 \cdot T_{np} p + 1}. \quad (3.48)$$

Застосування такого задатчика приведе до зменшення перерегулювання і до незначного збільшення часу перехідного процесу.

Структурна схема математичної моделі системи керування асинхронним двигуном показана на рисунку 3.2.

Зробимо підстановку коефіцієнтів в отримані формули для передатних функцій регуляторів.

Для регуляторів струму за формулою (3.41):

Для регулятора потокозчеплення:

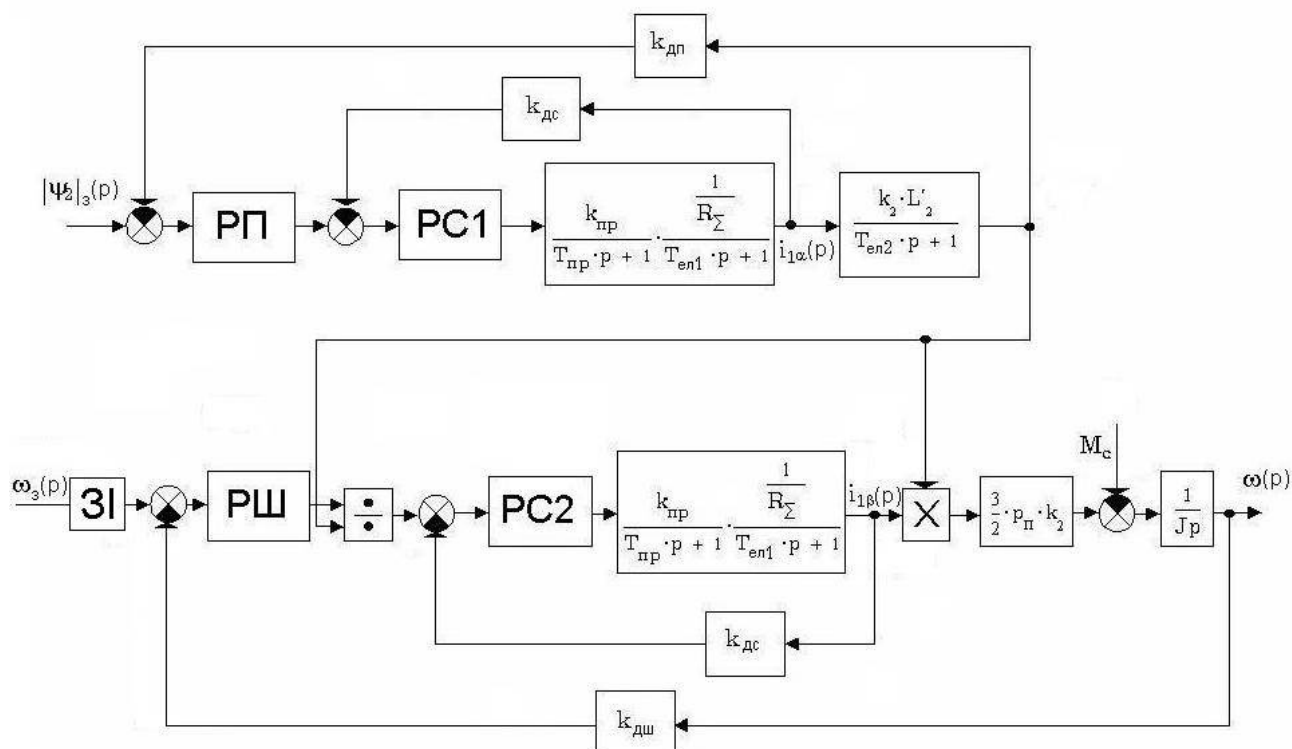


Рисунок 3.2 - Структурна схема математичної моделі системи керування асинхронним двигуном

$$W_{pn}(p) = \frac{T_{el2}}{4T_{np} \left(\frac{k_{dn}}{k_{dc}} \right) k_2 L'_2} \cdot \frac{T_{el2}p + 1}{T_{el2}p} = \frac{0,367}{4 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot 0,8362 \cdot 0,2086} \cdot \frac{0,367p + 1}{0,367p} = 1051,98 \cdot \frac{0,367p + 1}{0,367p}.$$

Для регулятора швидкості:

$$W_{pu}(p) = \frac{J}{4T_{np} \cdot \frac{3}{2} \cdot p_{\Pi} k_2 \frac{1}{k_{dc}} k_{du}} \frac{8T_{np}p + 1}{8T_{np}p} = \frac{163}{4 \cdot 0,0005 \cdot \frac{3}{2} \cdot 6 \cdot 0,8362 \cdot 1} \frac{8 \cdot 0,0005p + 1}{8 \cdot 0,0005p} = 5414,7 \frac{0,004p + 1}{0,004p}.$$

Задатчик інтенсивності для каналу швидкості:

$$W_{zi}(p) = \frac{1}{8T_{np}p + 1} = \frac{1}{8 \cdot 0,0005p + 1} = \frac{1}{0,004p + 1}.$$

Параметри системи керування й двигуна відомі, відповідно можна провести моделювання системи. Моделювання системи виконаємо на ЕОМ за допомогою пакету програм «MathCAD 11 Enterprise» та «VisSim 5.0F4».

3.2 Результати моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном

Для оцінки показників якості керування, за результатами побудови математичних моделей, проведемо моделювання. Побудова характеристик виконується за допомогою математичної обробки «MathCAD 11 Enterprise» а також програми «VisSim 5.0F4».

Знаючи всі параметри математичної моделі двигуна, а також системи керування зробимо її моделювання з метою оцінки показників якості керування.

За результатами розрахунку отримані перехідні процеси при холостому пуску, пуску під навантаженням і при стрибкоподібній зміні навантаження. Пуску і вихід на потрібну швидкість проходить повільно за допомогою Vacon, щоб не перевантажувати трансформатори. Графіки показані на рисунках 3.4. – 3.9.

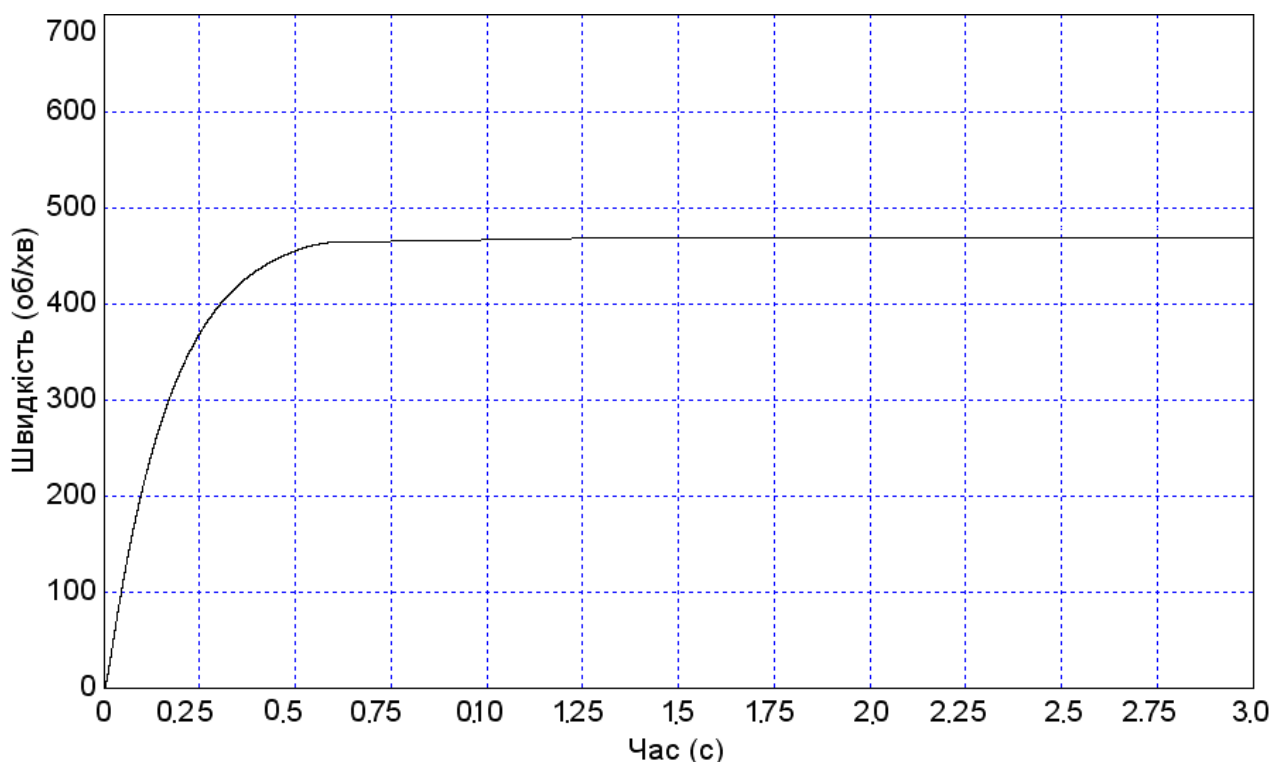


Рисунок 3.4 - Перехідний процес при холостому пуску

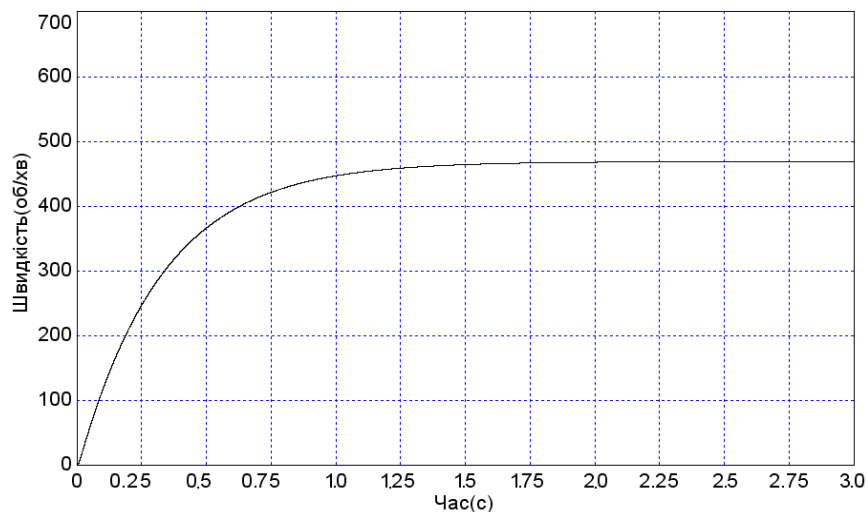


Рисунок 3.5 - Перехідний процес при пуску в навантаженому стані

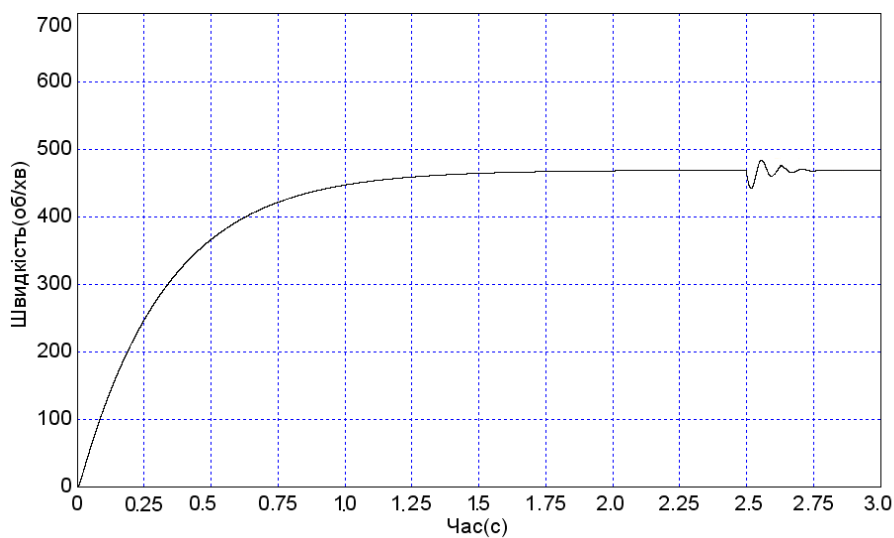


Рисунок 3.6 - Реакція системи на стрибкоподібну зміну навантаження на 20 %

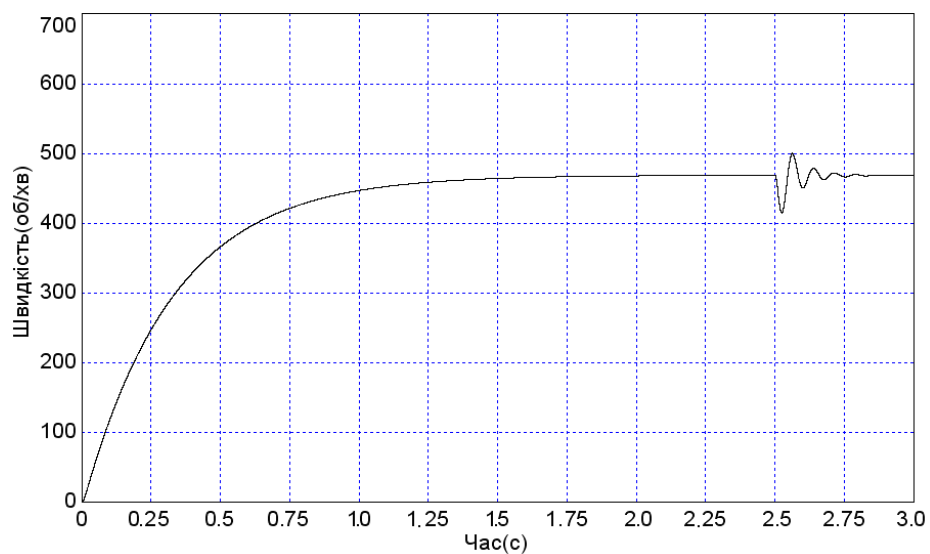


Рисунок 4.3 - Реакція системи на стрибкоподібну зміну навантаження на 40 %

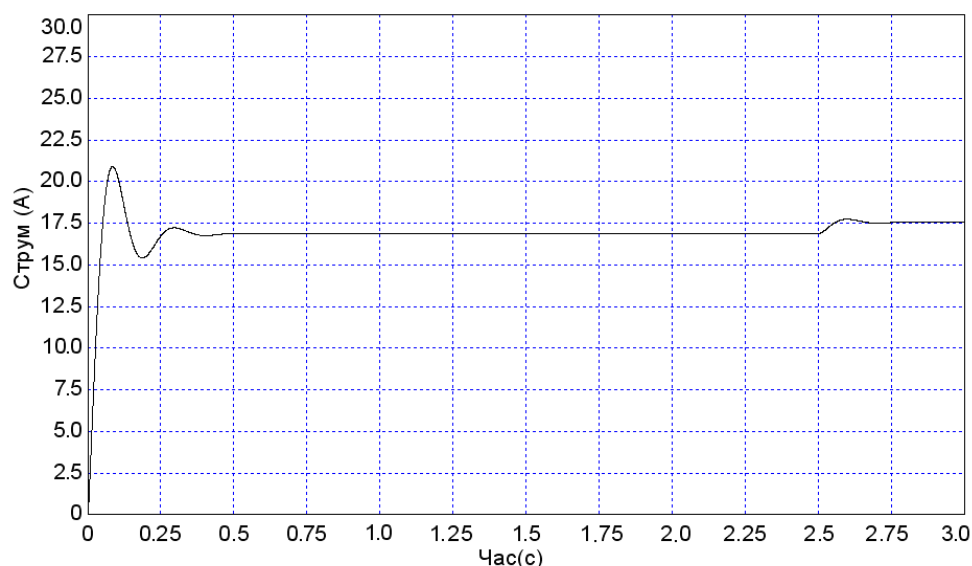


Рисунок 3.8 - Перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження на 20 %

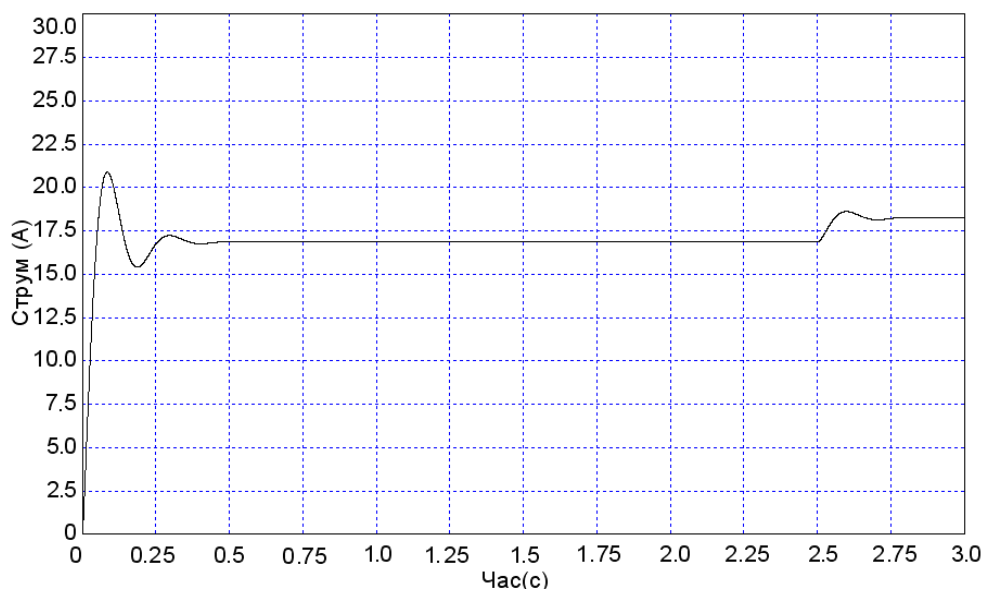


Рисунок 3.9 - Перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження на 40 %

На рисунку 3.4 показан перехідний процес при холостому пуску, як видно з графіка час перехідного процесу $T_{\max} = 0,48$ с (входження в $\pm 5\%$ від усталого значення), перерегулювання $\sigma_{\max} = 0$. Зменшувати час перехідного процесу не потрібно, щоб не було занадто великих стрибків струму.

Перехідний процес на рисунку 3.5 – перехідний процес при пуску в навантаженому стані, $T_{\max} = 1,06$ с, перерегулювання $\sigma_{\max} = 0$. Бачимо, що при пуску під навантаженням час зростає на 0,58 с.

На рисунку 3.6 – стрибкоподібна зміна навантаження на 20 %: $T_{\max} = 0,04$ с, $\sigma_{\max} = 6$ %. На рисунку 3.7 навантаження 40 %, як бачимо частотний перетворювач «шукає швидкість» за 0,08 с ($T_{\max} = 0,08$ с), $\sigma_{\max} = 12$ %.

На рисунку 3.8, перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження на 20 % . З графіку видно, що $T_{\max} = 0,24$ с, $\sigma_{\max} = 24$ % при пуску, $T_{\max} = 0$ с, $\sigma_{\max} = 1,6$ % при зміні навантаження (струм зразу заходить в ± 5 % від усталеного значення і тому перехідний процес вважаємо миттєвим). На рисунку 3.9, перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження вже на 40 % – $T_{\max} = 0,04$ с, $\sigma_{\max} = 2$ %.

З отриманих вище характеристик системи можна зробити висновок, що система забезпечує хороші показники якості керування: час перехідного процесу та перерегулювання та збільшити ресурс системи в цілому. З цього випливає наступне: можна робити заміну існуючої системи на спроектовану систему.

4 Охорона праці

Охорона праці - система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, направлених на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Повністю безпечних і нешкідливих виробництв не існує. Задачі охорони праці - звести до мінімуму вірогідність ураження або захворювання працюючого з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

Охорона праці включає:

- виробничу санітарію — систему організаційних заходів і технічних засобів, що запобігають або зменшують дію на працюючих шкідливих виробничих чинників;
- техніку безпеки - система організаційних заходів і технічних засобів, запобігаючи або зменшуючи дію на працюючих небезпечних виробничих чинників;
- пожежо - і вибухобезпечність - система організаційних заходів і технічних засобів, направлених на профілактику і ліквідацію пожеж і вибухів, обмеження їх наслідків;
- законодавство по охороні праці.

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників для установки з приводом змінного струму

Реальні виробничі умови характеризуються, як правило, наявністю певних небезпечних і шкідливих виробничих чинників. Небезпечним виробничим чинником називається такий виробничий чинник, дія якого на працюючого в певних умовах призводить до травми або до іншого раптового різкого погіршення здоров'я.

Шкідливим виробничим чинником називається такий виробничий чинник, дія якого на працюючого в певних умовах приводить до захворювання або зниження працездатності.

Між небезпечним і шкідливим чинником часто не можна провести чіткої межі. Один і той же чинник може привести до нещасного випадку.

До небезпечних і шкідливих виробничих чинників, характерних для установки асинхронного приводу, відносяться:

- небезпека ураження електричним струмом;
- небезпека виникнення пожежі;
- дія шуму на організм людини.

До основних причин ураження електричним струмом відносяться такі, як випадковий дотик або наближення на небезпечну відстань до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою; поява напруги на конструктивних металевих частинах устаткування (корпусі, кожусі) в результаті пошкодження ізоляції і інших причин; поява напруги на відключених струмоведучих частинах, на яких працюють люди, в результаті помилкового включення установки; виникнення крокової напруги на поверхні землі в результаті замикання дроту на землю.

Небезпека ураження, оцінюється величиною струму, що проходить через тіло людини, або ж напругою дотику, залежить від ряду чинників: схеми включення людини в ланцюг, напруга мережі, схеми самого ланцюга, режиму її нейтралі, ступені ізоляції струмоведучих частин від землі, також від величини місткості струмоведучих частин і т.д.

Проходячи через організм електричний струм проводить термічну, електролітичну і біологічну дію.

Термічна дія виражається в опіках окремих ділянок тіла нагріві кровоносних судин і т.п.

Електролітична дія виражається в розкладанні крові і інших органічних рідин, що викликає значні порушення їх фізико-хімічних складів.

Біологічна дія є особливим специфічним процесом, властивим лише живій тканині. Воно виражається в подразненні і збудженні живих тканин організму, що

супроводжується мимовільними судорожними скороченнями м'язів, у тому числі м'язів серця і легенів. В результаті можуть виникнути різні порушення в організмі, у тому числі порушення і навіть повне припинення діяльності органів дихання і кровообігу. Подразнююча дія струму на тканини організму може бути прямою, коли струм проходить безпосередньо по цих тканинах і рефлекторним, тобто через центральну нервову систему, коли шлях струму лежить зовні цих тканин.

Результат дії електричного струму залежить від ряду чинників, у тому числі від електричного опору тіла людини, величини і тривалості протікання через нього струму, роду і частоти струму і індивідуальних властивостей людини.

Величина струму, що протікає через тіло людини, є головним чинником, від якого залежить результат ураження: чим більше струм, тим небезпечніша його дія. Людина починає відчувати протікаючий через нього струм промислової частоти (50 Гц) щодо малого значення: 0,6 — 1,5 мА. Цей струм називається пороговим відчутним струмом.

Тривалість протікання струму через тіло людини впливає на результат ураження унаслідок того, що з часом різко зростає струм за рахунок зменшення опору тіла і нагромаджуються негативні наслідки дії струму на організм.

Основними заходами захисту від ураження струмом для установки з асинхронним приводом є забезпечення недоступності струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, для випадкового дотику; захисне розділення мережі; усунення небезпеки ураження при появі напруги на корпусі, кожусі і інших частинах установки, що досягається застосуванням подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалу, захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням і др.; вживання захисних засобів; організація безпечної експлуатації установки. В процесі експлуатації установки з асинхронним приводом нерідко виникають умови, при яких навіть найдосконаліше їх виконання не забезпечує безпеки працюючого і потрібне застосування спеціальних захисних засобів - переносних приладів і пристосувань.

До захисних засобів відносяться:

- ізолюючі захисні засоби: діелектричні гумові рукавички, інструмент з ізованими рукоятками, струмошукачі, діелектричні калоші, килимки, ізолюючі підставки;
- огорожуючі захисні засоби: щити, калоші, килимки, ізолюючі накладки, тимчасові захисні заземлення;
- оберігаючі захисні засоби: захисні окуляри спеціальні рукавиці.

Пожежі на промислових підприємствах представляють велику небезпеку для працюючих і можуть заподіяти величезний матеріальний збиток. Пожежа від установки з асинхронним приводом може відбутися в результаті прояву теплової і іскрової дії електричного струму в умовах, сприятливих для запалювання горючих матеріалів електроустановки, до яких відносяться тверді і рідкі ізоляційні матеріали. Основними причинами пожеж в електроустановках є перевантаження дротів, коротке замикання, великі перехідні опори в електричних мережах, електрична дуга або іскріння. До заходів попередження виникнення пожеж відносяться вживання плавких запобіжників, автоматичних вимикачів, що здійснюють захисне відключення, а також правильний монтаж мереж, машин і апаратів відповідно до вимог правил пристрою електроустановок.

Шум надає на людину шкідливу фізіологічну дію, яка полягає не тільки в пошкодженні слухового апарату, але і в негативному впливі на нервову систему, викликаючи уповільнення психологічних реакцій. Під впливом виробничого шуму виникають різні професійні захворювання: порушується ритм серцевої діяльності, змінюється кров'яний тиск, погіршується діяльність органів дихання. Спостерігається також ослаблення пам'яті, уваги, гостроти зору. Таким чином, шум може бути причиною травматизму.

Під впливом шуму значно знижується продуктивність праці, причому знижується тим більше, чим складніше трудовий процес і чим більше в ньому елементів розумової праці.

Для зниження шуму в установці з асинхронним приводом можуть бути застосовані наступні методи:

- зменшення шуму в джерелі шляхом вдосконалення технологічних процесів і устаткування;
- зміна спрямованості випромінювання;
- раціональне планування цеху;
- акустична обробка приміщення при вживанні звукопоглинальних матеріалів;
- зменшення шуму на шляху його розповсюдження, використовуючи звукоізоляційні матеріали.
-

4.2 Розрахунок захисного заземлення установки з приводом змінного струму

Захисним заземленням називається навмисне з'єднання нетоковедущих частин, які можуть опинитися під напругою, із заземляючим пристроєм.

Корпуси електричних машин, джерел живлення, електричні апарати і інші частини, виконані з струмопровідних матеріалів, можуть опинитися під напругою при замиканні їх струмоведучих частин на корпус. Якщо корпус при цьому не має контакту із землею, дотик до нього так само небезпечне, як і дотик до фази. Якщо ж корпус заземлений, він опиниться під напругою

$$U_3 = I_3 R_3$$

де I_3 - струм замикання на землю;

R_3 - опір що заземляє пристрої.

Людина, що стосується цього корпусу, потрапляє під напругу зіткнення:

$$U_{\text{пр}} = U_3 \alpha_1 \alpha_2$$

де α_1 - коефіцієнт напруги зіткнення;

α_2 - коефіцієнт, що враховує падіння напруги в додатковому опорі ланцюга людини.

Струм через людину рівний

$$I = I_3 \cdot \frac{R_3}{R} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2$$

звідки видно, що чим менше R_3 і α_1 , тим менше струм проходить через людину, що стоїть на землі і стосується корпусу устаткування, яке знаходиться під напругою.

Розрахунок захисного заземлення має на меті визначити основні параметри заземлення: число, розміри і розміщення одиночних заземлителів і що заземляють провідників, при яких напруга дотику і кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищує допустимих значень. При цьому розрахунок проводиться звично для випадків розміщення заземлителя в однорідній землі (спосіб коефіцієнтів використання).

Найбільший допустимий опір що заземляє пристрої для електричних установок напругою до 1000 В у будь-який час року не повинно перевищувати 4 Ом.

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту з урахуванням кліматичного коефіцієнта:

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{уд}} \cdot \varphi = 601,4 = 84 \text{ Ом},$$

де $\rho_{\text{уд}}$ - питомий опір для ґрунту (для глини $\rho_{\text{уд}}=60 \text{ Ом}$);

φ - кліматичний коефіцієнт ($\varphi = 1,4$).

Опір одиночного вертикального трубчастого заземлення визначається по формулі:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \cdot \left[\text{Ln} \frac{2L}{d} + \frac{1}{2} \cdot \text{Ln} \frac{4H + L}{4H - L} \right],$$

де H , L , D - розміри заземлителя.

Як вертикальні електроди використовуємо сталеві труби з розмірами (рисунок 4.1): $d = 0,03 \text{ м}$; $L = 3,5 \text{ м}$; $H_0 = 0,8 \text{ м}$; $H = 2,3 \text{ м}$.

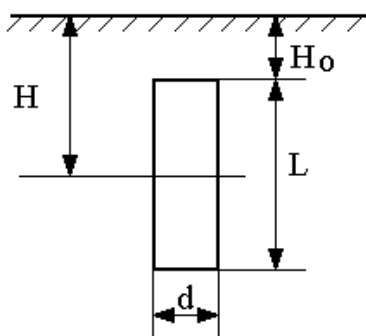


Рисунок 4.1. – Трубчатий заземлювач в ґрунті.

Опір розтікання струму одиночного стрижня:

$$R = \frac{84}{2\pi \cdot 2,5} \cdot \left[\text{Ln} \frac{2 \cdot 2,5}{0,03} + \frac{1}{2} \cdot \text{Ln} \frac{4 \cdot 2,3 + 2,5}{4 \cdot 2,3 - 2,5} \right] = 28,7 \text{ Ом.}$$

Попередня кількість вертикальних заземлителів:

$$n' = R_{\text{ст.од.}} / R_{\text{доп}} = 28,7 / 4 \approx 8 \text{ стрижнів.}$$

Вибираємо відстань між вертикальними заземлювачами: $a = 2,5 \text{ м.}$

По таблиці [11] приймаємо коефіцієнт використання вертикальних стрижнів $\eta_{\text{ст}} = 0,6$. З урахуванням цього уточнене число вертикальних заземлителів:

$$n = n' / \eta_{\text{ст}} = 8 / 0,6 \approx 14 \text{ стрижнів.}$$

Визначаємо довжину смуги, що сполучає вертикальні заземлювачі:

$$L = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 2,5 \cdot 14 = 36,8 \text{ м.}$$

Опір розтікання струму смуги магістралі (рисунок 4.2):

$$R_n = 0,159 \cdot \frac{\rho}{L} \cdot \text{Ln} \frac{2L^2}{b \cdot h},$$

де b - ширина смуги ($b = 0,03 \text{ м}$);

h - глибина смуги заземлення ($h = 0,85 \text{ м}$);

L - довга смуги;

ρ - питомий опір.

$$R_n = 0,159 \cdot \frac{84}{36,8} \cdot \text{Ln} \frac{2 \cdot 36,8^2}{0,03 \cdot 0,85} = 4,2 \text{ Ом.}$$

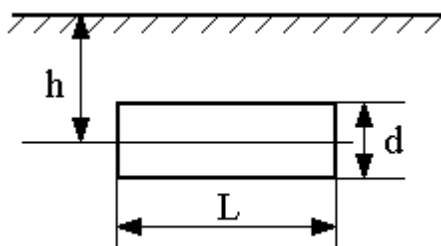


Рисунок 4.2. – Смуга в гранті

Опір розтікання струму всього пристрою:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{\eta_2}{R_n} + \frac{n \cdot \eta_1}{R_{ст.од}}} = \frac{1}{\frac{0,48}{4,2} + 14 \cdot \frac{0,6}{28,7}} = 2,45 \quad \text{Ом}$$

де η_1 - коефіцієнт використання заземлителя ($\eta_1 = 0,6$);

η_2 - коефіцієнт використання сполучної смуги [11] ($\eta_2 = 0,48$).

Оскільки одержаний опір $R_3 = 2,45$ Ом менше допустимого $R_{доп} = 4$ Ом, то заземлювач забезпечує якісне заземлення корпусу електродвигуна.

4.4 Розробка заходів по забезпеченню безпечної експлуатації електроустановки з приводом змінного струму

Досвід показує, що для забезпечення безпечної, безаварійної і високопродуктивної роботи електроустановок необхідно разом з досконалим виконанням їх і оснащенням захисними засобами так організувати їх експлуатацію, щоб виключити всяку можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу.

Основою організації безпечної експлуатації електроустановок є висока технічна письменність і свідомо дисципліна обслуговуючого персоналу, який зобов'язаний строго дотримувати організаційні і технічні заходи, а також прийоми і черговість виконання експлуатаційних операцій відповідно до Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів і Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів.

Особи, обслуговуючі електроустановки, не повинні мати каліцтв і хвороб, що заважають виробничій роботі. Для персоналу бере безпосередню участь в оперативних перемиканнях і ремонтних роботах в електроустановках, стан здоров'я встановлюється медичним оглядом при прийнятті на роботу, а потім періодично один раз в два роки.

Кожний працівник до призначення його на самостійну роботу по обслуговуванню електроустановок або при переведенні на іншу ділянку роботи зобов'язаний пройти навчання безпечним методам роботи на робочому місці і перевірку знань. Одночасно він зобов'язаний вивчити правила техніки безпеки, правила на-

дання першої допомоги. Кожний працівник до призначення його на самостійну роботу по обслуговуванню електроустановок або при переведенні на іншу ділянку роботи зобов'язаний пройти навчання безпечним методам роботи на робочому місці і перевірку і т.п. в об'ємі, відповідному вимогам його робочого місця. Перевірка знань Правил техніки безпеки проводиться кваліфікованою комісією після навчання на робочому місці.

Всі роботи по експлуатації діючої установки проводяться при обов'язковому дотриманні наступних умов:

- на роботу повинен бути видано дозвіл уповноваженою на це особою;
- робота повинна проводитися, як правило, не менше ніж двома особами;
- повинні бути виконані організаційні і технологічні заходи, що забезпечують безпеку персоналу.

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі була розглянута система керування приводом подач верстату для гнуття труб.

Проведено аналіз існуючої системи керування. За результатами аналізу зроблені висновки що до заміни існуючої системи керування постійного струму на систему змінного струму двигуном із короткозамкненим ротором.

Запропонована заміна існуючої системи електропривода на систему з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором. Використання якого, як більш простого, надійного і значно дешевого, підвищить зазначені показники системи керування.

Була розглянута система векторного керування асинхронним двигуном, що дозволяє застосувати в автоматизованому приводі подачі пристрій для автоматизації керування електропривода – частотний перетворювач Vacon «NXL». Також була застосована двотрансформаторна схема (ДТС), яка збільшує ресурс асинхронного двигуна та здешевлює всю систему в цілому.

Для того, щоб оцінити показники якості керування проекрованої системи, було проведене моделювання, результатом якого є криві перехідних процесів. Аналіз отриманих даних показує, що застосування обраної системи підвищить не тільки надійність показників приводу, але і його швидкодія, що обумовлено меншим моментом інерції ротора асинхронного двигуна. За допомогою Vacon двигун може розганятися до оптимальної швидкості повільно, не перевантажуючи трансформаторну підстанцію і збільшуючи свій ресурс.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кодра Ю. В., Стоцько З. А. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання : навчальний посібник / за ред. З. А. Стоцька. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2015. – 312 с.
2. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Лисенко В. П. Електропривод : підручник / за ред. Ю. М. Лавріненка. – К. : Ліра-К, 2009. – 504 с. – ISBN 978-966-96938-8-4.
3. Бочков В.М., Металорізальні верстати/ В. М. Бочков, Р.І Сілін, О.В. Гаврильченко. – Львів: Видавництво Національного університету Львівська політехніка, 2009. – 268 с.
4. Васильєв О.Г., Методичні вказівки до виконання курсового проекту з курсу «Системи керування електроприводами»/ О.Г. Васильєв, А.М. Фоменко, А.С. Віштакалюк. – Миколаїв: УДМТУ, 2006 р. – 65с.
5. Shetty D., Kolk R. A. Mechatronics System Design. – 2nd Edition. – Boston : Cengage Learning, 2011. – 672 p. – ISBN 978-1-4390-6198-5.
6. Sen P. C. Thyristor DC Drives. – New York : Wiley, 1981. – 307 p. – ISBN 978-0-471-06070-3.
7. Казачковський М. М., Комплектні електроприводи: Навчальний посібник/ М. М. Казачковський . – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 226с.
8. Костинюк Л. Д., Моделювання електроприводів: Навч. Посібник / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 404с.
9. Теряєв В. І. Автоматизований електропривод : навч. посібник : ч. 2 [Електронний ресурс]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.
10. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. – 738 p. – ISBN 978-0-13-016743-9.
11. Mohamed A. El-Sharkawi M. A. Fundamentals of Electric Drives. – 2nd Edition. – Boston : Cengage Learning, 2019. – 336 p. – ISBN 0-534-95222-4.
12. Попович М. Г., Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : Навч. Посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков. – К.: Либідь, 2005. – 680с

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Загальний вигляд верстата

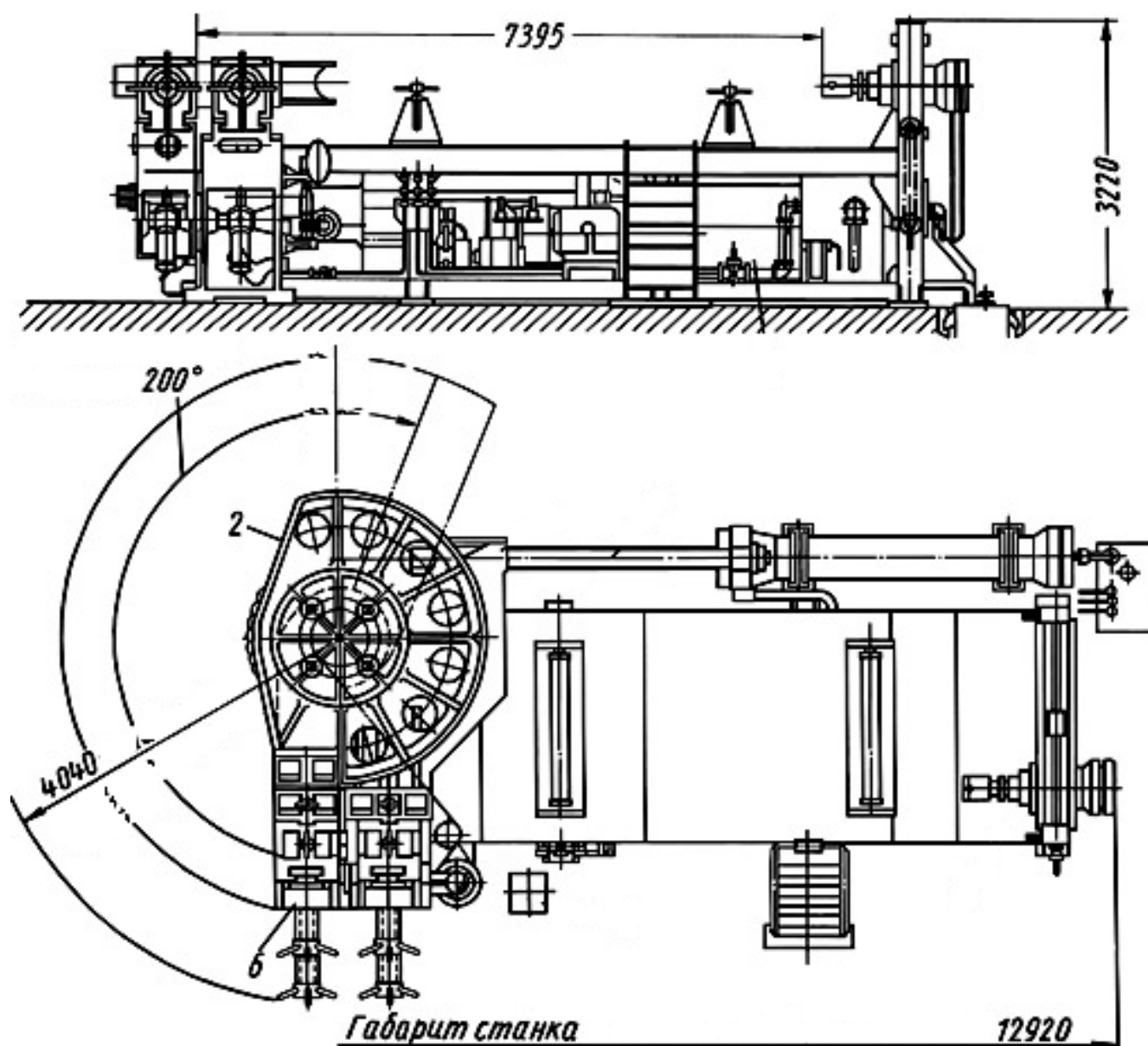


Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Загальна схема автоматизації верстату

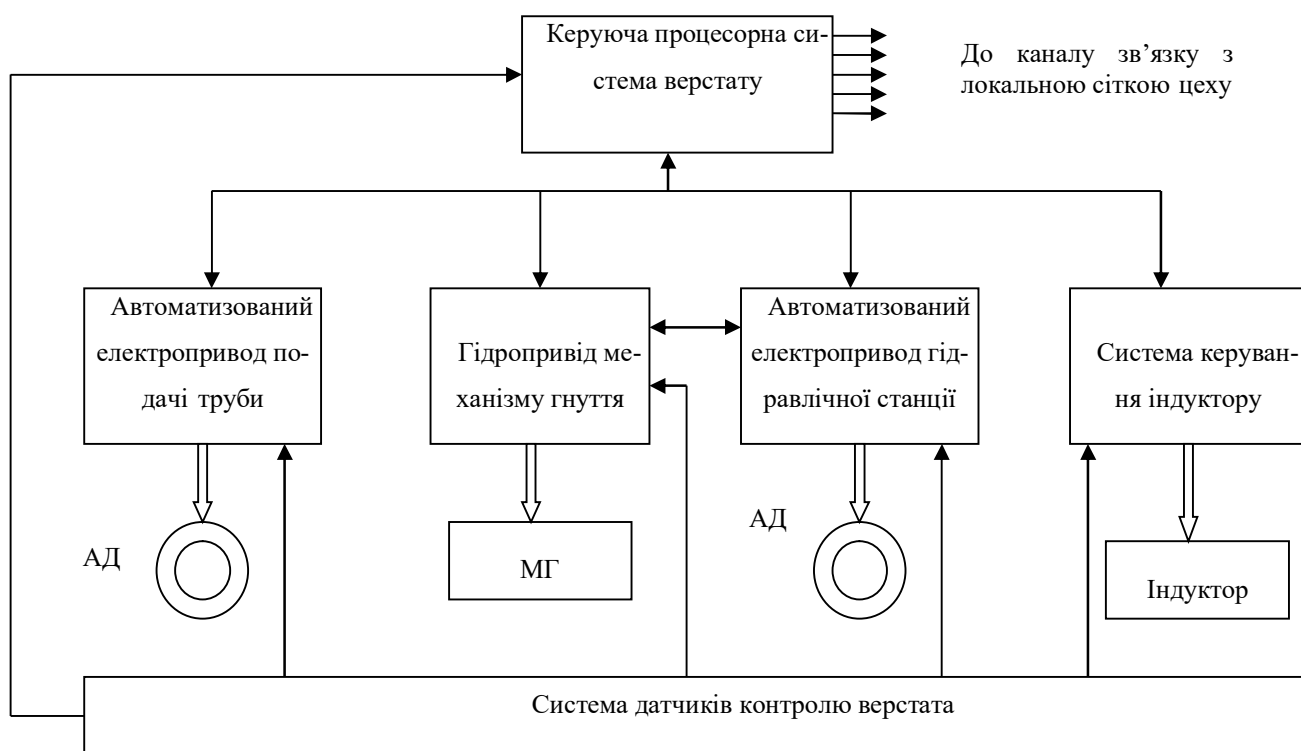


Рисунок А.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Функціональна схема системи векторного керування асинхронним двигуном з коротко-замкнутим ротором

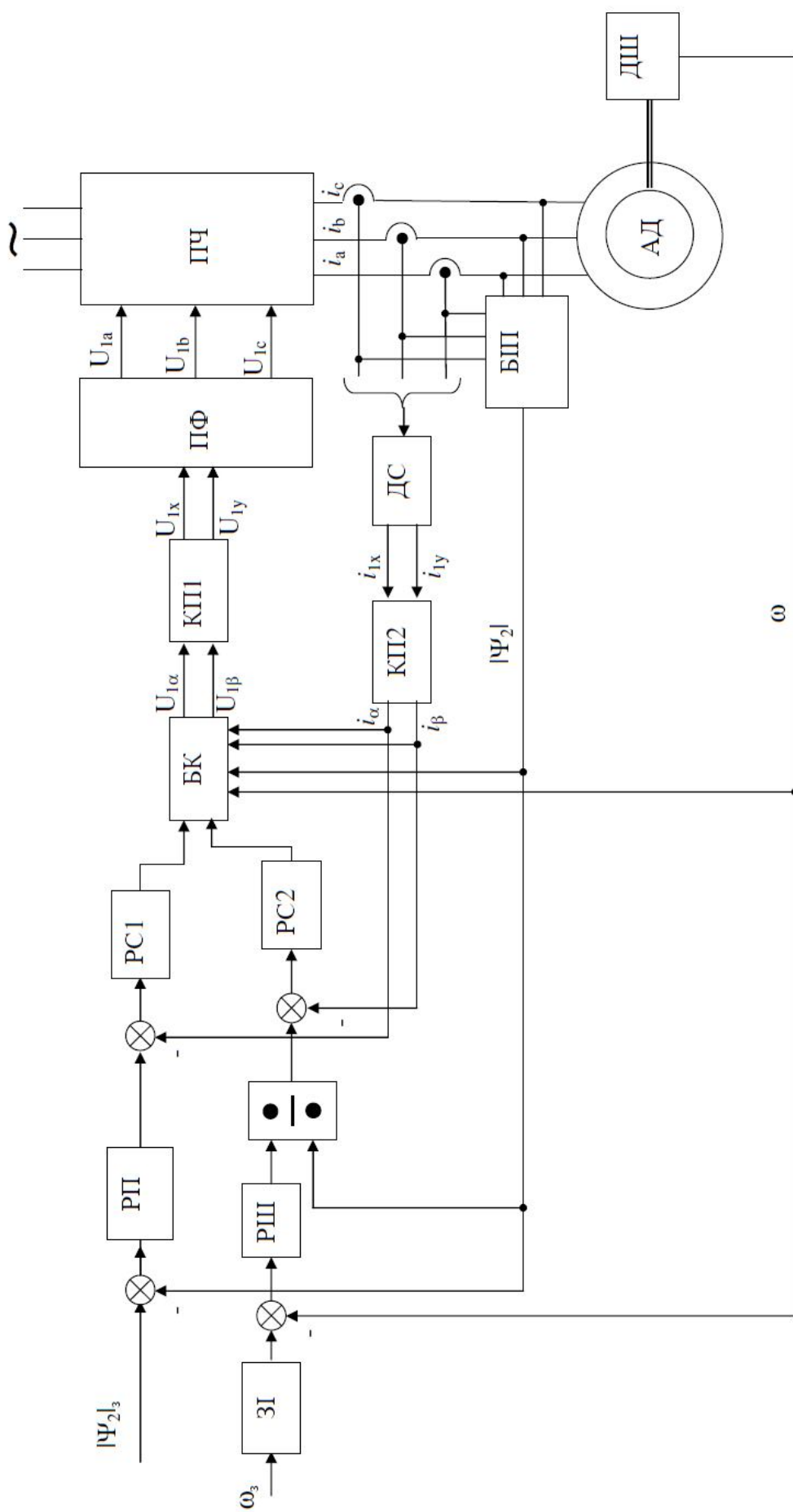


Рисунок А.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Структурна схема системи з керуванням по потокозчепленню ротора

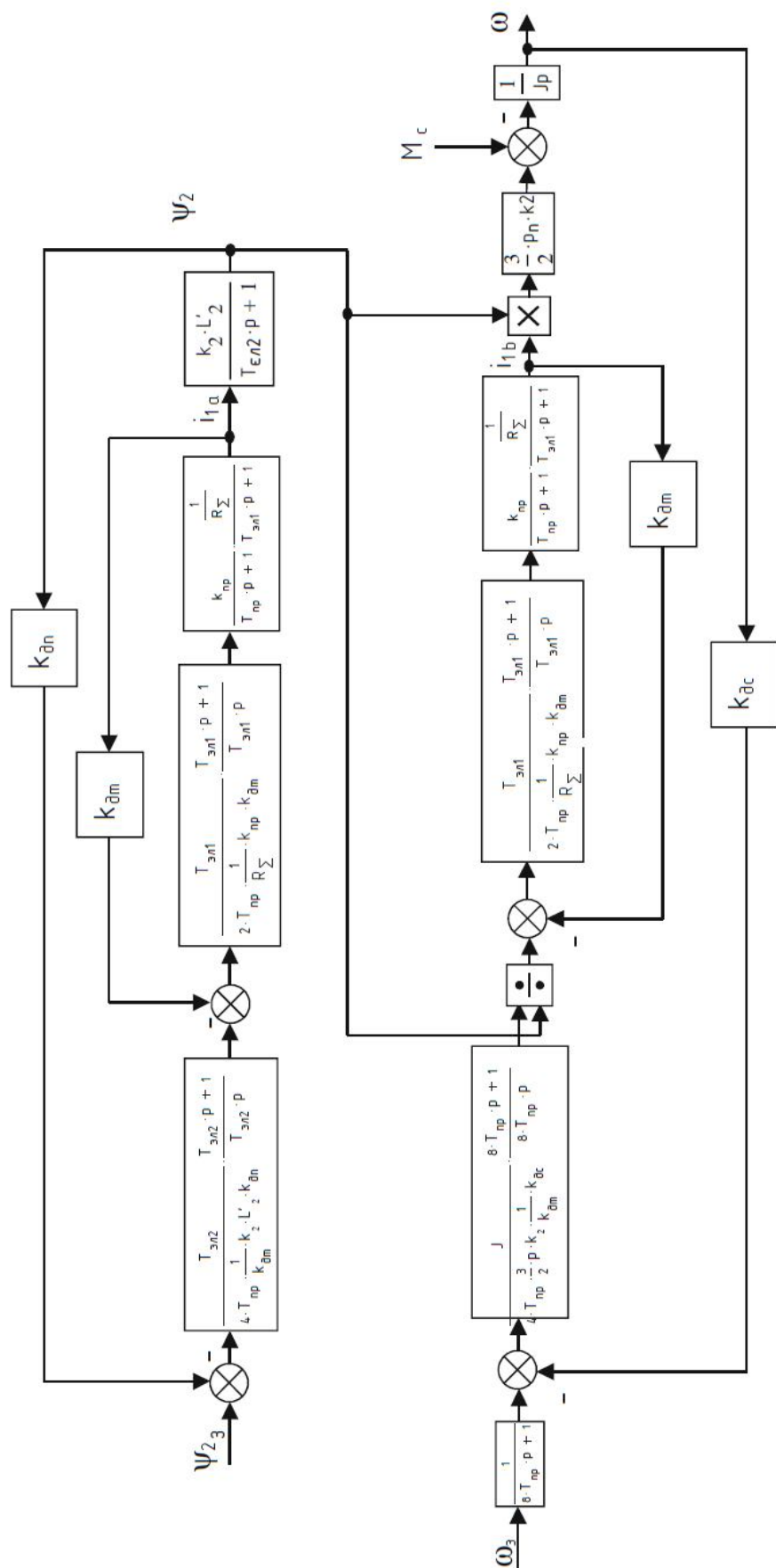
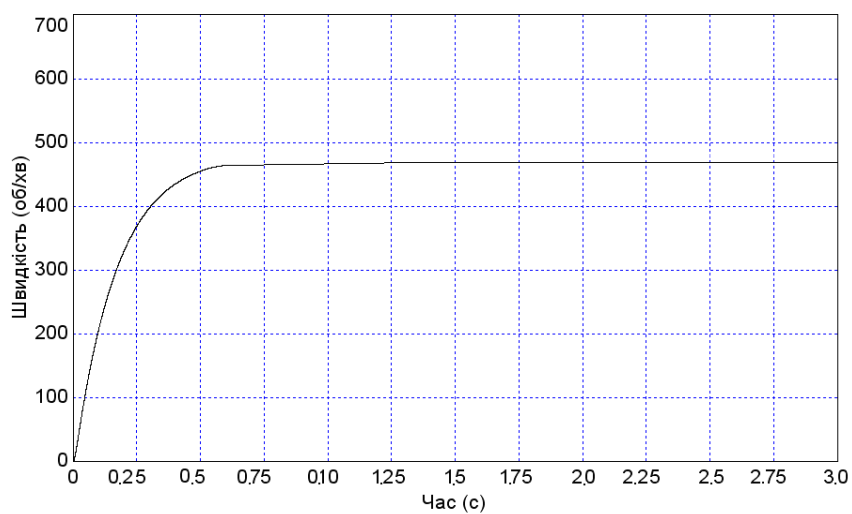
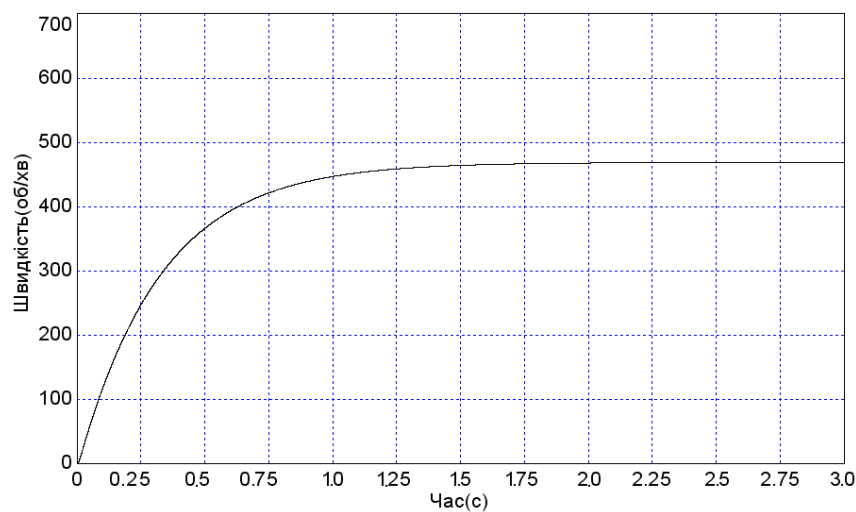


Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

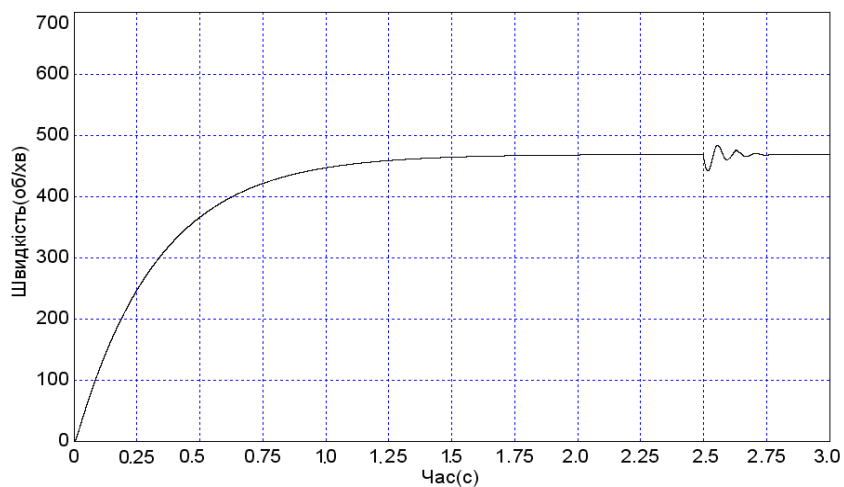
Дослідження динаміки



Перехідний процес при холостому пуску



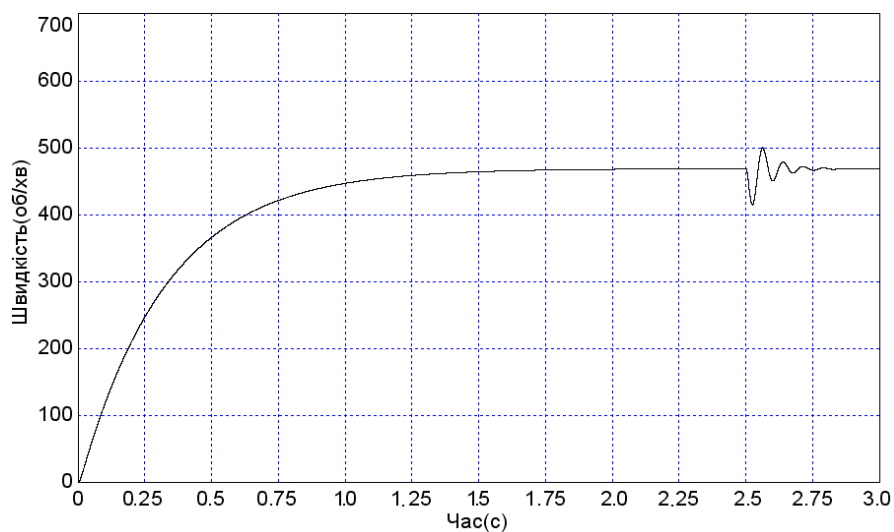
Перехідний процес при пуску в навантаженому стані



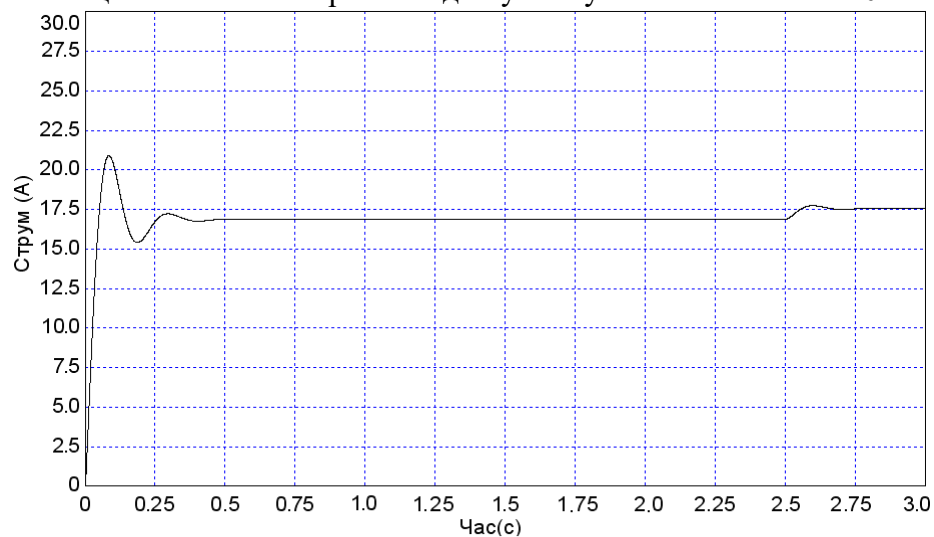
Реакція системи на стрибкоподібну зміну навантаження на 20 %

Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

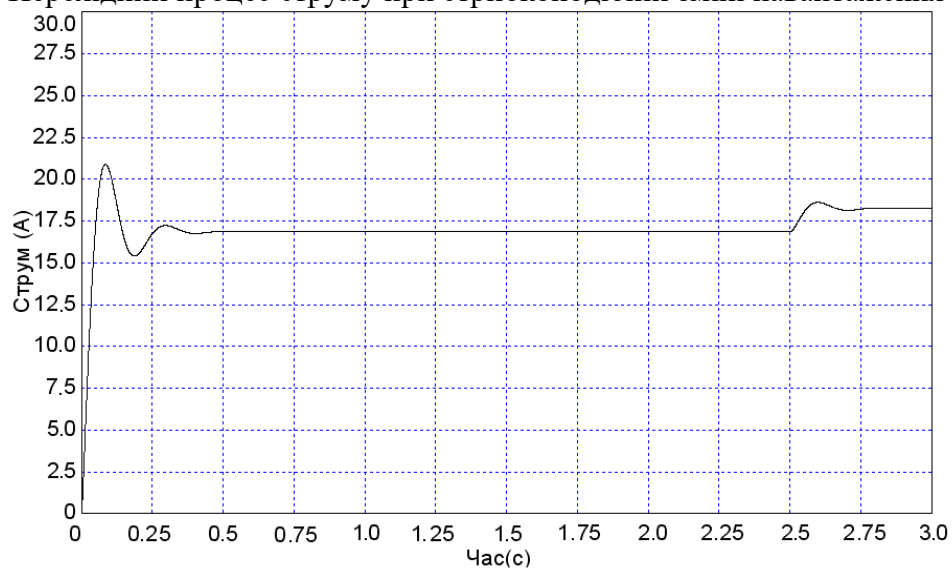
Дослідження динаміки



Реакція системи на стрибкоподібну зміну навантаження на 40 %



Перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження на 20 %



Перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження на 40 %

Рисунок А.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації