

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: «Модернізація системи керування електропривода подачі відрізного апарата»

Виконав: студент VI курсу, групи 43113
Бордюжа Ігор Павлович
(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. ка ф. 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

Завідувач кафедри, к.т.н. доцент

О.Г. Васильєв

«14» 06 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ**

Бордюжа Ігор Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Модернізація системи керування електропривода подачі відрізного апарата»

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 10.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи Напруга живлення 380 В. Система керування змінного струму. Перерегулювання не більш 27 відсотків. Автоматизований перетворювач типу «Vacon»

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Загальні відомості про апарат 2 Електрообладнання відрізного апарата 3 Vacon - пристрій для автоматизації керування привода подачі відрізного апарата 4 Керування асинхронного двигуна 6 Охорона праці

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

1 Загальний вигляд відрізного апарата, 2 Функціональна схема системи векторного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. 3 Структурна схема системи з керуванням по потокозчепленню ротора., 4 Дослідження динаміки.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 10.02.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Опис технологічного обладнання.</i>	27.02.26	
2	<i>Вибір комплектного електропривода.</i>	28.03.26	
3	<i>Розрахунок параметрів системи керування.</i>	25.04.26	
4	<i>Аналіз динамічних характеристик</i>	09.05.26	
5	<i>Охорона праці.</i>	22.05.26	
6	<i>Графічна частина</i>	20.06.26	

Студент

Бурда
(підпис)

Бордюжа І. П.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

[Підпис]
(підпис)

Фоменко А.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 70 с., 5 р., 17 рис., 4 табл., 12 джерел.

Ключові слова: електропривод змінного струму, привод подач, перехідна характеристика, векторне керування..

Мета роботи – підвищення показників якості системи привода подач відрізного апарата. Ціль роботи – розробка автоматичної системи керування приводом подач відрізного апарата.

Розглянуто загальний вигляд та кінематику відрізного апарата. Приведений опис існуючої системи керування. Виявлено основні недоліки, а також запропоновані шляхи вдосконалення даного процесу.

Виконано огляд існуючих схем керування й сформульовані технічні вимоги до нової проекрованої системи. Розроблено схему математичної моделі системи керування.

Для забезпечення високих показників автоматизації керування була спроектована векторна система керування двигуна змінного струму з короткозамкненим ротором, що дозволяє реалізувати закони керування.

У роботі також проведено моделювання проекрованої системи, результатом якого є показники стійкості та динамічні показники. Також отримані перехідні характеристики при різних типах роботи привода. Аналіз результатів моделювання показав, що така система повністю задовольняє вимогам технологічного процесу, підтримує постійну швидкість обертання і виконує задачі виробництва.

На ряду з цим у роботі розглянуті питання охорони праці.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Загальні відомості про апарат	9
1.1. Основні технічні дані та характеристики	9
1.2. Вказівки з експлуатації	11
1.3. Конструкція і робота автомата та його складових частин	13
2. Електрообладнання відрізного апарата	21
2.1. Загальні положення	21
2.2. Підготовка до першого пуску	23
2.3. Робота схеми керування змащенням	24
2.4. Захист, блокування та сигналізація	31
2.5. Постановка задачі проектування.....	33
3. Vacon - пристрій для автоматизації керування приводом подачі відрізного апарата	34
3.1. Функції, які виконує Vacon	36
3.2. Вибір Vacon	38
4. Керування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.....	43
4.1. Побудова математичної моделі асинхронного двигуна при керуванні вектором потокозчеплення	43
4.2. Результати моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном.....	56
5. Охорона праці.....	60
5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів на підприємстві.....	62
5.2. Захисне заземлення установки.....	64
5.3. Заходи щодо техніки безпеки.....	67
Висновки.....	69
Перелік посилань.....	70

ВСТУП

Особливістю сучасного етапу розвитку автоматизації виробництва є поява й масове застосування якісно нових технічних засобів, виготовлення мереж на базі автоматичних систем. Впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами здобуває особливого значення в зв'язку з ростом вимог до швидкості обчислення, переробки й видачі інформації, автоматичному контролю за процесами виробництва. Тому розробка й дослідження структур і режимів функціонування автоматизованих систем керування технологічними процесами є актуальним завданням. Використання автоматичних систем дозволяє на порядок знизити витрати, забезпечує підвищення ефективності й розширення функціональних можливостей.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматичної системи керування електроприводом подачі кругопильного відрізного автомата моделі 8Г66З.

У роботі розглядається комплексний підхід до синтезу автоматичної системи керування на прикладі керування приводом подачі відрізного автомату.

Розглядаються питання підвищення рівня автоматизації й надійності системи керування приводом даного автомата, що служить для складування та видачі по одній заготовок і труб, а також розрізання дисковими пилами чорних металів. При цьому нормалізується технологічний процес машинобудування.

Основною задачею даної системи є керування приводом подачі відрізного апарата в умовах реальної роботи протягом всього виробничого процесу. Для оптимального протікання процесу відрізання заготовок і труб необхідно регулювати та підтримувати постійну швидкість обертання привода. У ході роботи проведений оптимальний вибір двигуна, у процесі чого асинхронний двигун із фазним ротором було замінено на асинхронний двигун із короткозамкненим ротором.

Загальне завдання, що стоїть перед системою керування є регулювання і підтримка постійної швидкості обертання гвинта при спадковій, хаотичній зміні навантаження, що приводить до оптимальної підтримки технологічного процесу. Для поліпшення якісних і енергетичних показників привода обрана і розрахована

частотна система керування асинхронним двигуном. Це завдання виконується за допомогою пристрою для автоматизації керування приводом – «Vacon».

Перетворювачі «Vacon» є трифазними перетворювачами частоти для регулювання швидкості обертання двигунів змінного струму. Перетворювачі оснащуються мікропроцесорним керуванням і відрізняються найсучаснішою технологією IGBT - біполярний транзистор з ізольованим керуючим електродом. Завдяки цьому вони надійні й універсальні.

1 Загальні відомості про апарат.

1.1 Загальні технічні дані та характеристики.

Апарат відрізний круглопилний моделі 8Г663 оснащений механізованим пристроєм для складування та видачі по одній круглих заготовок і труб і автоматичним столом вивантаження, що призначається для розрізання дисковими пилами чорних металів тимчасовим опором до 1200 Н/мм^2 . Розрізка проводиться під кутом 90° до вісі заготовки, що розрізається.

Апарат призначений для використання в заготівельних цехах машинобудівних і ремонтних підприємствах. Апарат поставляється наладженим для розрізки круглого матеріалу. При розрізки матеріалу інших профілів необхідно провести переналадку. Комплект зборочних одиниць і деталей, що переналаджуються поставляються за потребою замовника. Апарат повинен експлуатуватися у виробничих приміщеннях зі штучно регульованими кліматичними умовами.

Діаметр пили, що встановлюється на автоматі, мм	800
Діаметр заготовки, мм:	
не менше	80
не більше	285
Відстань від низу основи станка до опорної поверхні для заготовки, мм	800
Регулювання швидкості подачі бабки пильного диска	безступінчасте
Найбільша величина настройки подачі бабки пильного диска, мм/хв.	800
Швидкість відводу бабки пильного диска, м/хв.	2,5
Границі частот обертання шпинделя, хв^{-1} :	
при частоті 50 Гц	2,99...16,85
при частоті 60 Гц	3,59...20,22
Кількість швидкостей шпинделя	6
Швидкість руху заготовки на розрізку, м/хв. , не менше	5
Найбільше переміщення бабки пильного диска, мм	320
Граничні розміри для заготовок, мм	20...1500

Мінімальний діаметр круглої заготовки, мм	20
Довжина заготовок, мм	20...500
Найбільший крутячий момент, кНм	7,0
Найбільша довжина заготовки, що поступає на розрізку, мм	6000
Робочий тиск у гідросистемі, МПа	3,5...5,5
Габаритні розміри автомата без окремо розташованих агрегатів, мм:	
довжина	2640
ширина	2400
висота	1585
Загальна площа автомата в плані, м ²	20,16
Маса автомата без окремо розташованих агрегатів, кг	3760
Маса окремо розташованих агрегатів, кг:	
комплектний гідропривод	390
механізований пристрій	1025
стіл вивантаження	192
тачка	115
лоток	31
Питома маса, кг/мм	4,7
Питома потужність, Вт/мм	9,3

Технічна характеристика електрообладнання

Струм мережі	змінний, трифазний
Кількість електродвигунів	5
Електродвигун привода головного руху:	
потужність, кВт	3,0
частота обертання, хв. ⁻¹ : при частоті 50 Гц	960
при частоті 60 Гц	1150
Електродвигун гідронасоса: потужність, кВт	3,0
частота обертання, хв. ⁻¹ :	
при частоті 50 Гц	955
при частоті 60 Гц	1145
Електродвигун механізму стружка вивантаження потужність, кВт	0,37

частота обертання, хв.⁻¹

при частоті 50 Гц 1365

при частоті 60 Гц 1640

Електродвигун привода насоса охолодження потужність, кВт 0,12

частота обертання, хв.⁻¹:

при частоті 50 Гц 2800

при частоті 60 Гц 3360

Електродвигун вентилятора гідроагрегата потужність, кВт 0,12

частота обертання, хв.⁻¹:

при частоті 50 Гц 2710

при частоті 60 Гц 3250

Сумарна потужність встановлених на автоматі електродвигунів, кВт 11,11

Таблиця 1.1 Характеристика механізму головного руху

Частота обертання шпинделя, хв. ⁻¹		Найбільш припустимий крутячий момент на шпинделі, кг·м	Потужність на шпиндель, кВт (по приводу)
При частоті 50 Гц	При частоті 60 Гц		
2,99	3,59	700	2,34
4,31	5,17	700	2,6
5,94	7,13	700	2,71
8,49	10,19	700	2,8
12,23	14,68	595	3
16,85	20,22	432	3

1.2 Вказівки з експлуатації.

Особливістю, що притаманна автоматам відрізним круглопильним, є наявність гідровлічного привода, який виконує в них робочі та допоміжні функції.

На джерела тиску (насоси), контрольно-регулюючу та розподільчу гідроапаратуру, що застосовуються в гідросистемах, маються паспорти їхніх заводів-виробників.

При обслуговуванні автомата наладчик повинен мати спеціальні знання з наладки гідросистем.

В умовах тривалої експлуатації виникає необхідність у періодичному регулюванні підшипників кочення, яке досягається підтяжкою гайок або винтів, що регулюються, які знаходяться на боковій стінці бабки пильного диска.

Величина зазору між направляючими бабки та станіни, а також каретки та станіни регулюється клином.

Регулювання уплотнінь, що встановлені в циліндрах, проводиться підтяжкою фланців і гайок.

Регулювання механізмів механізованого пристрою.

Всі механізми пристрою мають регулювання, які дозволяють домогтися їхньої чіткої роботи.

Усі гідроциліндри мають в штоках різьби, в яку ввернуті з'єднальні деталі та законтрені гайками. Шляхом закручування або відкручування цих деталей можна змінити положення копирів та виставляти їх в одну лінію і міняти висоту підйому приводного ролика.

Качалки з роликами трьох неприводних стоек і підтримки з роликом приводної стойки можуть регулюватися за висотою, шляхом установки необхідної кількості резинових амортизаторів і металевих шайб. Ролики повинні бути встановлені на рівні призми механізму затиску, що контролюється штангою.

Найбільш часті дефекти і поломки деталей під час експлуатації та причини, що їх викликали:

- 1) інтенсивне зношування деталей автомата, утворення на їх поверхні подряпин, задирів і ін.. є результатом поганого піклування, відсутності регулярного змащення недостатньо кропітка чистка від стружки, пилу, осаду емульсора;
- 2) поломка інструменту (пили) та деталей привода через неправильну наладку чи регулювання (перевищення припустимих подач, застосу-

вання затупленої пили, неправильна розстановка упорів і обмежувачів хода);

- 3) поломка деталей, що були раніше замінені деталями з менш прочних матеріалів або неякісно виготовленими.

Технічне обслуговування та ремонти

Враховуючи специфіку та притаманні автоматам особливості, при безумовному виконанні всіх вимог, необхідно окрему увагу приділяти наступним питанням:

- 1) виконанню всіх правил по уходу за гідроапаратурой;
- 2) чистоті та періодичності доливу та зміні робочої та охолоджуючої рідини;
- 3) стану уплотнінь трубопроводів і гідравлічних з'єднань;
- 4) відсутності течі гідросистеми;
- 5) стану дзеркала робочих і допоміжних циліндрів
- 6) стану штокових і поршневих уплотнінь;
- 7) стану направляючих станин і бабки пильного диска;
- 8) роботі системи змащування;
- 9) стану інструмента;
- 10) рівню напруги мережі.

1.3 Конструкція і робота автомата та його складових частин.

Загальний вигляд з позначеннями органів управління наведений на рисунку

1.1. Перелік органів управління наведено в табл.

Короткий опис кінематичної схеми.

Для відтворення головного та допоміжного руху в автоматі використовується наступна кінематика.

Привод сегментної пили. Шпиндель бабки має шість швидкостей, які можна отримати різноманітними комбінаціями положень двох блоків шестерень.

Таблиця 1.2 Перелік органів управління

Позиція	Органи управління та їх призначення
1	Сигнальна лампа (ввідний автомат увімкнено)
2	Вимикач ввідного автомата
3	Вимикач освітлення
4	Дросель установки величини робочої подачі бабки пильного диска
5	Сигнальна лампа (механізм затиску не налагоджений на розмір заготовки)
6	Сигнальна лампа (заготовка не затиснута)
7	Сигнальна лампа (кінець програми заданого числа розрізів)
8	Сигнальна лампа (змащення не працює)
9	Сигнальна лампа (фільтр забруднений)

Продовження таблиці 1.2 Перелік органів управління

Позиція	Органи управління та їх призначення
10	Кнопка «Розтиск механізму затиску»
11	Кнопка «Затиск механізму затиску»
12	Кнопка «Підйом механізму вивантаження виробу»
13	Кнопка «Переміщення механізму вивантаження виробу»
14	Кнопка «Рух пильного диска від оператора»
15	Кнопка «Рух пильного диска до оператора»
16	Кнопка «Затиск механізму захвата»
17	Кнопка «Розтиск механізму захвата»
18	Кнопка «Переміщення в зону різання механізму переміщення заготовки»
19	Кнопка «Переміщення із зони різання механізму переміщення заготовки»
20	Перемикач кратності подачі заготовки
21	Перемикач режимів роботи автомата
22	Кнопка «Увімкнення режимів роботи»
23	Перемикач режимів роботи системи охолодження
24	Кнопка «Увімкнення насоса гідроприводу та стружковивантаження»
25	Кнопка «Аварійний відвід пильного диска»
26	Кнопка «Увімкнення пильного диска при натиснутій кнопці»
27	Кнопка «Відключено»
28	Сигнальні лампи (контроль замикання на землю в ланцюгах управління)
29	Важелі настройки числа оборотів шпинделя
30	Кулачок зупинки бабки пильного диска в кінці різа заготовки
31	Кулачок зупинки бабки пильного диска в початковому положенні
32	Важелі регулювання призми за висотою
33	Гвинти настройки прихватів на розмір заготовки
34	Вінт кріплення пильного диска
35	Вентиль муфтового регулювання подачі охолоджуючої рідини
36	Вінт настройки клем на заданий розмір заготовки, що відрізається
37	Вінт кріплення механізму стружкоочищення
38	Важіль підйому та спуску приводного ролика
39	Важіль перевантаження матеріалу на рольганг
40	Важіль переміщення матеріалу по рольгангу
41	Обчислювальник числа розрізів

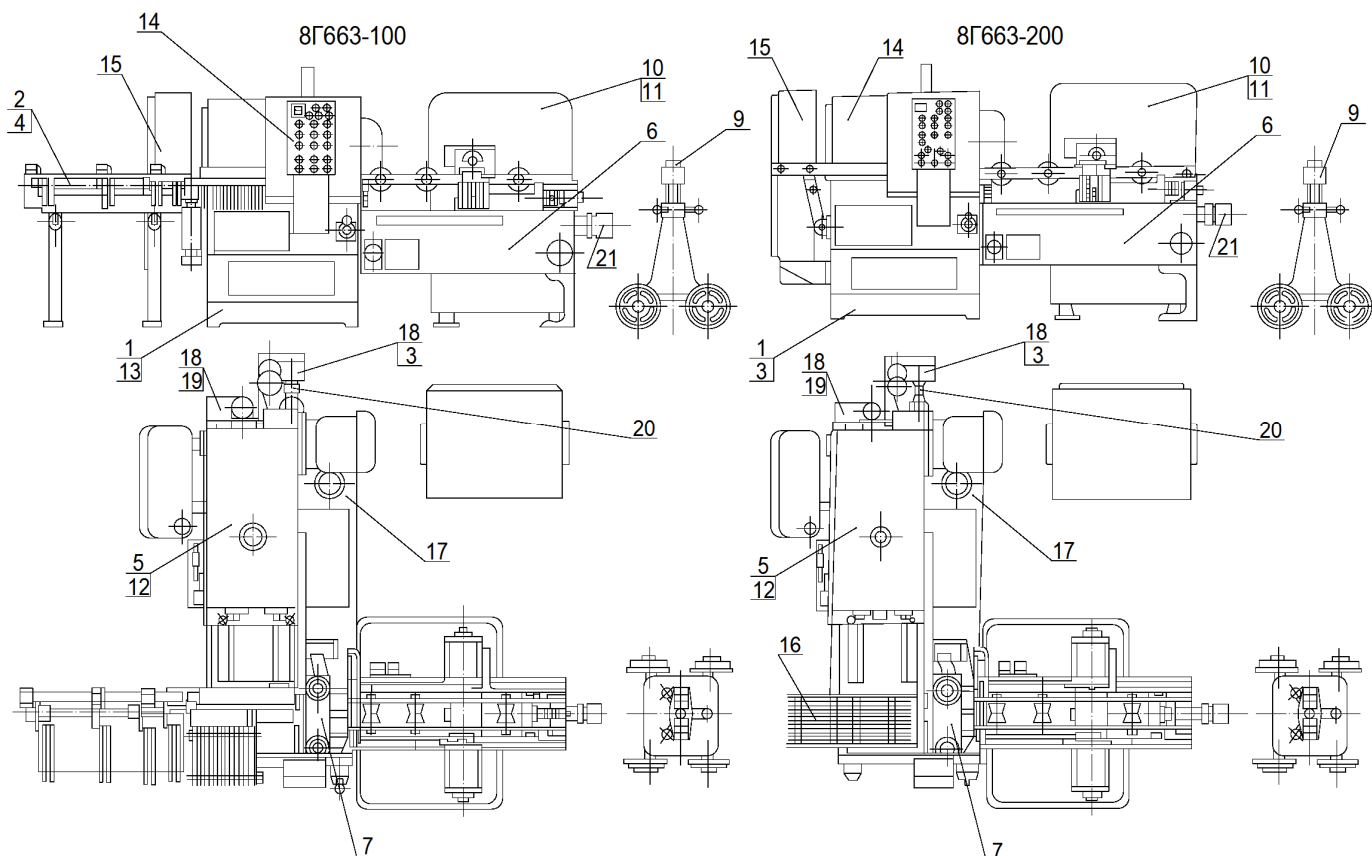


Рисунок 1.1 - Загальний вигляд з позначеннями органів керування

Рух від електродвигуна потужністю 7,5 кВт через муфту передається на вал 1. Від вала 1 через зубчасту передачу 2 і 3 рух отримує вал 2, на якому насаджені шестерні 4, 5, 6. В залежності від положення блока шестерень на 3 валу, передача на нього може виконуватися через шестерні 4, 9; 5, 8; 6, 7. Таким чином, вал 3 отримує три швидкості обертання. Вал 4 отримує рух від вала 3 внаслідок зчеплення двоступінчастого блока 10, 11 пачерці з шестернями 12 і 13, отже, вал 4 має шість швидкостей обертання. Далі рух передається на вал 5 через шестерню 15, потім через шестерні 16 і 17 обертання отримує вал 6 і через шестерні 18 і 19 шпиндель 7, на кінці якого встановлена сегментна пила.

Привод подачі бабки механізму затиску, механізму руху матеріалу відбувається за допомогою гідравліки.

Рух на гвинтовий шнек стружковивантаження передається від електродвигуна потужністю 0,4 кВт через черв'ячну пару 21, 22 і зубчасту пару 23, 24.

Привод механізованого пристрою отримується від гідроагрегата автомата.

Привод складається з гідроциліндрів і гідромотора з черв'ячним редуктором, що забезпечує обертання ролика подачі матеріалу.

Короткий опис конструкції та роботи автомата

Автомат складається з наступних основних вузлів: станини, бабки пильного диска, механізмів затиску та руху матеріалу, механізованого пристрою, автоматизованого стола вивантаження, а також гідро обладнання, електрообладнання, охолодження та змащення.

Бабка пильного диска забезпечує різання на шести швидкостях. Привод бабки пильного диска виконується з індивідуального електродвигуна. Подача ріжучого інструмента – гідравлічна, безступінчаста, затиск і розтиск матеріалу, що розрізатиметься, - гідравлічний. Конструкцією автомата передбачено обчислювальник числа розрізів.

В початковому положенні автомата бабка пильного диску знаходиться у відведеному положенні, механізм затиску розтиснутий. Каретка механізму подачі заготовки в крайньому відведеному положенні.

Автомат передбачає розрізку матеріалів на автоматичному та напівавтоматичному циклах.

Послідовність операцій, що проводиться робочим на напівавтоматичному циклі та робота механізмів виконується в наступному порядку:

- 1) перемикач встановлюється в положення, яке відповідає напівавтоматичному циклу;
- 2) від кнопки виконується затиск матеріалу прихватами каретки механізму подачі заготовки;
- 3) від кнопки виконується подача каретки на потрібну довжину.

Натиском кнопки «Пуск» виконується затиск заготовки й увімкнення робочого ходу бабки пильного диска. По закінченню розрізки заготовки бабка пильного диска автоматично відводиться в початкове положення та заготовка розтискається. Цикл повторюється.

Послідовність операцій на автоматичному циклі:

- 1) на налагоджувальному циклі від кнопок, що розташовані на пульті, всі механізми автомату встановлюються в початкове положення;
- 2) бабка пильного диска знаходиться в крайньому задньому положенні;
- 3) губа механізму затиску у верхньому положенні;

- 4) каретка механізму подачі заготовки в крайньому відведеному положенні;
- 5) прихвати каретки відведені від матеріалу;
- 6) перемикач ставиться в положення, що відповідає автоматичному циклу;
- 7) натисканням кнопки «Пуск» виконується пуск циклу, при цьому відбуваються наступні рухи: захват і подача матеріалу на потрібну довжину механізмом руху, затиск його на призмі автомата, робочий хід бабки пильного диска та відведення її в початкове положення, розтиск матеріалу.

Під час робочого ходу бабки пильного диска прихвати каретки «відпускають» заготовку, каретка повертається в початковий стан, і прихвати знову затискають заготовку. Після цього цикл повторюється.

Механізм затиску.

Привод механізму затиску – гідравлічний. Механізм затиску прямої дії складається з притискної плити, яка переміщується разом з направляючими скалками за допомогою гідроциліндра.

Механізм настройки ходу розміщений на торці плити і забезпечує постійну величину відведення притискної плити від заготовки при розтиску. Контроль за розтиском виконується шляховим перемикачем.

Відведення притискної плити в крайнє верхнє положення відбувається на налагоджувальному циклі кнопкою з пульта управління.

Механізм руху матеріалу служить для підйому матеріалу над робочою призмюю і подачі її на мірну довжину. Механізм розташований на приставній станині 1. По направляючим приставної станини за допомогою гідроциліндра 2 переміщується каретка 3. На бокових сторонах каретки 3 змонтовані кронштейни 4 з направляючими, на яких встановлені салазки 5 прихватів 6. Привод прихватів відбувається через гвинт – гайки 7, 8 і важелі 9 від гідроциліндрів 10, змонтованих у корпусі каретки 3. Прихвати 6 гвинтом налагоджуються на розмір діаметра, що розрізатиметься. Крайнє ліве положення каретки 3 визначається клемовим упором 13, який налагоджується й встановлений на штанці 14. На штанці 14 встановлена лінійка 15(0..50 мм), а на клемовому упорі 13 ноніус 16 з рисками і цифрами 1, 2 і 3.

Для відрізки заготовки довжиною до 500 мм, необхідно упор 13 встановити так, щоб риска з цифрою 1 на корпусі 16 співпадала з необхідним діленням на міліметровій лінійці 15 (довжиною заготовки, що відрізатиметься).

Для відрізки заготовок довжиною 500...1000 мм необхідно налагоджувати двократну подачу матеріалу.

- 1) риску з цифрою 2 ноніуса 16 на упорі 13 сумістити з цифрою 35 на міліметровій лінійці 15, що закріплена на штанзі 14;
- 2) Перемикач на пульті встановити в положення 2, яке відповідає подвійній подачі каретки 3;
- 3) Перемикач циклів встановити в положення «Автоматичний режим»;
- 4) Включити автомат. Відбудеться двократна подача матеріалу ($350 \times 2 = 700$) з наступною відрізкою заготовки вказаної довжини.

Для відрізки заготовок довжиною 1000...1500 мм необхідна трикратна подача матеріалу.

Перед роботою на автоматі, після установки його на фундамент, необхідно провести підналагодження штанги 14 з лінійкою.

Для цього треба відвести каретку 3 в ліве крайнє положення. Закріпити клемовий упор 13 на штанзі 14 на будь-яке ділення Б, що відповідає довжині заготовки, яка відрізатиметься. Відвести каретку 3 в праве положення до клемового упора 13. Заміряти відстань між нерухомим упором і планкою каретки. Якщо замір менше, ніж ділення установки упора ($A < B + 7, 0$), то необхідно штангу 14 змістити праворуч за допомогою гайок 17 на різницю ділення установки упора і заміру ($B + 7, 0 - A$). Якщо замір більше, ніж ділення установки упору ($A > B + 7, 0$), то необхідно відвести каретку 3 в крайнє ліве положення, і штангу 14 змістити ліворуч за допомогою гайок 17 на різницю ділення заміру і ділення установки упора 13 ($A - B + 7, 0$). Контрольними різками кількох заготовок провести завершальне підналагодження штанги з лінійкою.

Механізований пристрій для складування та видачі по одній круглих заготовок і труб складається з 4-х стійок, встановлених на фундаменті та з'єднаних між собою валами, які служать для синхронізації роботи стійок. Стійки мають од-

накову довжину, висоту, кут (4^0) похилої ділянки, на якому лежить матеріал, і однакову форму копирів для видачі по одній матеріалу на рольганг пристрою.

Застосовані стійки 3-х типів.

Перша (від автомата) стійка є приводною. На ній, окрім циліндра збросу матеріалу, встановлений ролик подачі матеріалу з циліндром підйому ролика. Середні стійки однакові. Привод копирів для зброду матеріалу на рольганг відбувається за допомогою валів від гідроциліндра крайніх стійок.

Крайня права стійка має один гідроциліндр для привода копіра.

Ролики, що створюють рольганг, встановлені на качалках, вісь яких співпадає з віссю поворотних копирів. Качалки всіх стійок, окрім першої, установлені на резинові амортизатори для пом'якшення удару при перекочуванні матеріалу на рольганг.

Автоматизований стіл вивантаження для збросу відрізаних заготовок складається із стола вивантаження й лотка вивантаження. Зброс відрізаного матеріалу забезпечується шляхом повороту рухомих призм за допомогою гідроциліндра.

Гідропривод виконує наступні операції циклу роботи автомата:

- 1) подача матеріалу, що розрізатиметься, на мірну довжину;
- 2) затиск матеріалу, що розрізатиметься;
- 3) підведення бабки пильного диска до матеріалу, що розрізатиметься; розрізка матеріалу;
- 4) зворотній хід бабки пильного диска в початкове положення;
- 5) автоматичний розтиск матеріалу.

Гідропривод автомата складається із комплектного гідропривода, на панелі якого встановлена основна гідроапаратура і гідроциліндри для відтворення привода ряду вузлів автомата (циліндра подачі бабки пильного диска, циліндрів подачі матеріалу, циліндра розтиску матеріалу, що розрізатиметься).

Комплектний гідропривод встановлений поруч з автоматом і з'єднаний з вузлами автомата трубопроводом.

Теліжка призначається для підтримки кінця заготовки при поставці автомата без механізованого пристрою. При завантаженні заготовка одним кінцем лягає

на ролики механізму руху матеріалу, а другим – на скобу теліжки. Положення скоби за висотою регулюється обертанням гвинта.

Охолодження. Подача охолоджуючої рідини на пилу при різанні виконується електронасосом через вентиль муфтовий 1, резиновий шланг 2, до розподілювача 3. Розподілювач 3 з двома трубками 4 закріплений на кожусі огороження і може встановлюватися в необхідне положення для кращого потрапляння рідини на пилу. Подача рідини регулюється вентилем муфтовим 1.

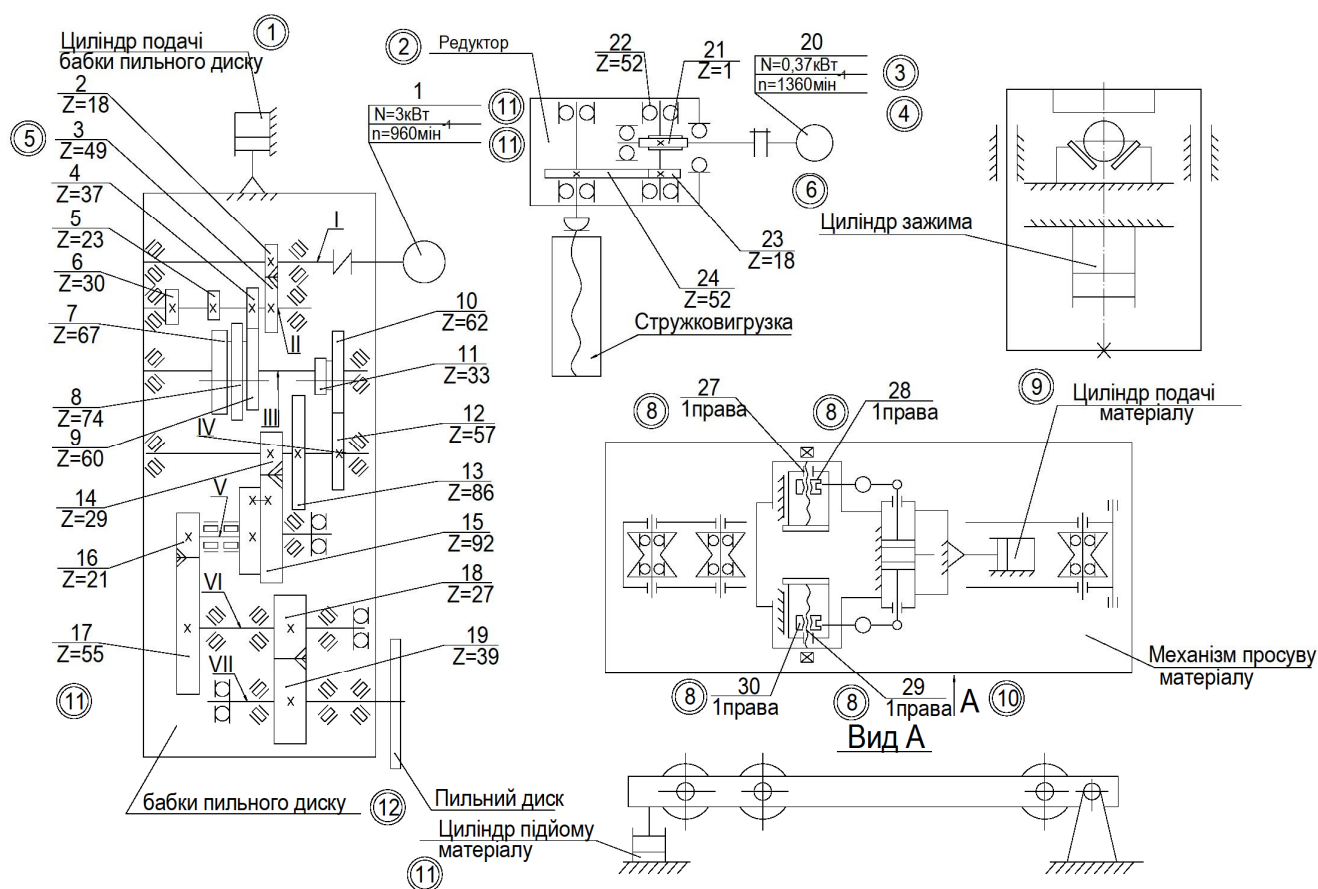


Рисунок 1.2 – Кінематична схема верстата

2 Електрообладнання відрізного апарата.

2.1 Загальні положення.

На автоматі встановлено п'ять асинхронних короткозамкнених електродвигунів (електрична схема).

М1 – електродвигун обертання пильного диска,

М2 – електродвигун гідронасоса,

М4 – електродвигун охолодження,

М5 – електродвигун стружко вивантаження,

М8 – електродвигун вентилятора.

Для контролю за положенням механізмів встановлено ряд кінцевих вимикачів.

Положення бабки пильного диска контролюється двома кінцевими вимикачами SQ2 та SQ3, які встановлені на станині автомата. Вимикач SQ2 контролює переднє (підведене) положення бабки, SQ3 – заднє (відведене) положення бабки. Кулачки, що забезпечують натискання кінцевих вимикачів, повинні бути встановлені таким чином, щоб при натисканні на вимикач SQ2 виконувалась повна відрізка заготовки, а при натисканні на SQ3 пильний диск повинен бути виведеним за границі діаметра матеріалу, який розрізається.

Кожного разу при зміні матеріалу, що розрізатиметься, необхідно переналагоджувати і положення кулачків, які забезпечують натискання на кінцеві вимикачі SQ2 і SQ3.

На механізмі затиску встановлені кінцеві вимикачі SQ1, SQ10, які контролюють відповідно розтиск і затиск матеріалу. Кулачок що діє на SQ1, забезпечує в циклах відведення губи затиску від матеріалу на сталу величину. У налагоджувальному режимі дія кінцевого вимикача SQ1 виключається, й губу затиску можна відвести у крайнє верхнє положення. Кінцевий вимикач SQ10 відроблятиме тільки в тому випадку, коли механізм затиску не налагоджений на діаметр матеріалу, що розрізатиметься, або коли під губою затиску відсутній матеріал.

Роботу змащення контролює кінцевий вимикач SQ12, який встановлений на станції змащення. Про відробку змащення свідчить зміна стану вимикача

SQ12. Якщо перед увімкненням змащення вимикач SQ12 був натиснут штоком живлення, то при відробці змащення вимикач SQ12 звільняється, і навпаки, якщо перед увімкненням змащення SQ12 не був натиснут, то в результаті відробки змащення при її увімкненні вимикач SQ12 натискається штоком живлення.

На приставній станині автомата встановлені два кінцевих вимикача SQ4 та SQ5.

Вимикач SQ4 натискається при крайньому, підведеному до пильного диску, положенні каретки механізму просунення матеріалу. Вимикач SQ5 служить для подачі команди на уповільнення руху каретки в кінці руху подачі матеріалу, а також на початку ходу каретки назад. Вимикач SQ5 натиснут протягом усього шляху уповільненого ходу.

У коробці, що встановлена на корпусі захватів, змонтовані чотири кінцевих вимикача SQ6, SQ7, SQ8, SQ11.

Кінцевий вимикач SQ6 призначений для увімкнення уповільнення руху каретки в кінці відводу та на початку підвода каретки. Протягом усього шляху уповільнення вимикач SQ6 не натиснут. Вимикач SQ7 контролює крайнє відведене положення каретки. Кінцевий вимикач SQ8 натиснут при розведених захватах. При зведенні захватів SQ8 звільняється. Вимикач SQ11 натискається при зведенні захватів тільки у випадку, коли відсутній матеріал, або коли захвати не налагоджені на діаметр матеріалу, що розрізається.

На механізмі вивантаження два кінцевих вимикача SQ14, SQ15.

Вимикач SQ14 натиснут при піднятих важелях вивантаження. Вимикач SQ15 натискається при опущених важелях вивантаження.

Електрообладнання автомата призначено для під'єднання до 3-фазної мережі змінного струму. Живлення ланцюгів управління відбувається за допомогою знижувального трансформатора ТС. Від цього трансформатора заживлені ланцюги місцевого освітлення та сигналізації.

Схема електрична принципова дозволяє роботу автомата в трьох режимах:

- 1) наладка;
- 2) напівавтоматичний цикл;
- 3) автоматичний цикл.

Необхідний режим вибирається за допомогою перемикача циклів SA1. В автоматичному циклі можливі три режими роботи механізму подачі матеріалу: однократна подача, двукратна подача, трикратна подача.

Режим роботи механізму подачі вибирається перемикачем подач SA2.

2.2 Підготовка до першого пуску.

Перед першим пуском автомата необхідно перевірити наступне:

- 1) відсутність заїдання роторів електродвигунів;
- 2) відсутність заїдання та затримок при русі якоря у електромагнітів;
- 3) цілісність і вільне переміщення рухомих систем пускачів і реле;
- 4) наявність дугогасних камер у автоматичних вимикачах;
- 5) надійність заземлення автомата і всіх механізмів, що має електрообладнання.

Величина опору між болтом заземлення та будь-якою металевою частиною автомата, що може опинитися під напругою через порушення ізоляції, не повинна перевищувати 0,1 Ом.

Пуск електродвигунів.

Для запуску електродвигунів гідронасоса, стружки вивантаження, охолодження та вентилятора необхідно натиснути на кнопку SB2. При цьому увімкнеться реле КА2, контакт якого вмикає магнітні пускачі КМ2, КМ4. Контакт пускача КМ2 шунтує контакт реле КА2, і ланцюг котушки пускача КМ2 стає на саможивлення. Пускач КМ4 вмикається одночасно з пускачем КМ2, якщо перемикач SA3 стоїть у положенні «Робота з охолодженням». Якщо перемикач SA3 перевести у положення «Робота без охолодження», пускач КМ4 відключиться. Від кнопки SB2 електродвигун обертання пильного диска не запуститься. Схема дозволяє штовхальний проворот електродвигуна обертання пильного диска. Якщо при перемиканні швидкостей важелем налагодження не відбувається зачеплення шестернів, необхідно користуватися кнопкою SB5. При натисканні на кнопку SB5 відключається магнітний пускач КМ2, нормально закритий контакт якого підготує ланцюг реле КА12 до увімкнення. Після увімкнення від кнопки SB5 пус-

кача КМ1 його контакт вмикає реле КА12, нормально відкритий контакт якого ставить котушку КА12 на саможивлення через кнопку SB5, а нормально закритий – відключає пускач КМ1. Відбулося короткочасне увімкнення електродвигуна пильного диска. Якщо це увімкнення не забезпечило можливості зчеплення шестернів, що переключаються, необхідно натиснути на кнопку SB5 повторно. Перед повторним штовхальним поворотом необхідно зробити 30-секундну перерву.

2.3 Робота схеми керування змащенням.

Змащення автомата працює періодично. За бажанням оператора змащення можна увімкнути незалежно від режиму роботи станка за допомогою кнопки SB2. При цьому необхідно, щоб реле затиску КА2 було відключене.

Кнопкою SB2 включається реле КА2, яке підключають конденсатор С2 до керуючого електроду тиристора V5. Струмом розрядження конденсатора С2 тиристор V5 відкривається і включає реле КА1. Нормальний відкритий контакт реле КА1 включає електромагніт YV8, що призводить до відробки насоса станції змащення. В результаті відробки змащення змінює свій стан вимикач SQ12. У момент переключення контактів вимикача SQ12 зникає короткочасно напруга на тиристорі V5. Тиристор закривається і вимикає реле КА1, яке в свою чергу відключає електромагніт YV8. Якщо змащення не відробило, то SQ12 не змінить свого стану, тиристор V5 залишиться закритим, реле КА1 залишиться в увімкненому стані. Електромагніт YV8 буде знаходитися в увімкненому стані до відпускання кнопки SB2. Для повторного включення змащення необхідно відпустити кнопку SB2, а потім знову натиснути.

Змащення включається також реле затиску КА6 незалежно від режиму. При увімкненому реле КА6 неможливо увімкнути змащення кнопкою SB2. У напівавтоматичному циклі змащення включається один раз за циклі, а в автоматичному – в залежності від числа подач: при однократній – один раз, при двократній – два рази, при трикратній – три рази за цикл.

У налагоджувальному режимі змащення включається всякий раз при включенні реле затиску.

Для контролю за роботою змащенні служить сигнальна лампа HL3. При увімкненні змащення кнопкою SB2 або реле КА6 лампа HL3 загоряється повним накалом і при відробленні змащення одразу ж починає горіти напівнакала, тобто при відробленні змащення лампа HL3 блимає. Якщо змащення не відробило, то лампа HL3 постійно горить повним накалом.

У напіваавтоматичному та автоматичному циклах може статися, що лампа HL3 декілька циклів горить повним накалом, а потім тухне. У цьому випадку потрібно вважати змащення справним. Змащення потрібно вважати несправним, якщо лампа HL3 горить тривало повним накалом і не потухла за шість і більше увімкнень затиску матеріалу.

Опис роботи принципової електричної схеми в режимі «Наладка».

Перемикач SA1 необхідно встановити в положення «Наладка». У цьому режимі можливість різання виключена, так як електродвигун обертання пильного диска запустити неможливо. У налагоджувальному режимі проводиться настройка роботи механізмів автомата. Управління механізмами відбувається з пульта управління за допомогою кнопок.

Для затиску необхідно натиснути кнопку SB8. При цьому включається реле КА6, яке встановлюється на саможивлення, і електромагніт YV3. Для того, щоб виконати розтиск, необхідно натиснути на кнопку SB9. Нормально закритий контакт кнопки SB9 виключає саможивлення реле КА6, після чого нормально відкритий контакт кнопки SB9 включає електромагніт YV4. Рух розтиску – рух товчків, тобто відбувається тільки при утриманні кнопки SB9 у натиснутому стані.

Увімкнення електромагніта YV1 подачі бабки пильного диска та електромагніта YV2 відведення бабки можливе тільки після затиску, так як у ланцюгах цих електромагнітів увімкнений нормально відкритий контакт реле КА6. Окрім того, гідравлічна схема також передбачає можливість руху бабки пильного диска тільки при наявності визначеного тиску в трубопроводі затиску (гідравлічна послідовність). Електромагніт YV1 включається кнопкою SB6 до тих пір, поки не буде натиснутий вимикач SQ2. Після натискання кінцевого вимикача SQ2 електромагніт YV2 включається кнопкою SB7. Рух відведення бабки пильного диска товчковий.

Захват відбувається при натисканні на кнопку SB10. При цьому включається реле КА9 і стає на саможивлення та відключає електромагніт SB11. При цьому виключається саможивлення КА9, яке своїм нормально відкритим контактом відключає електромагніт YV5.

Подача каретки виконується кнопкою SB12 і можлива тільки при відведеній бабці пильного диска (натиснуто SQ3), розтиснутому матеріалі (натиснуто SQ1), і піднятих важелях вивантаження (натиснуто SQ3). Обидва рухи каретки виконуються тільки на повільній швидкості і не залежать від положення захватів.

Механізм вивантаження управляється кнопками SB16, SB17. При натисканні на кнопку SB13 включається реле KSQ8, яке становиться на саможивлення і тримає увімкненим електромагніт YV12. Відбувається опускання важелів вивантаження. При натисканні на кнопку SB17 відключаються реле RSQ8 та електромагніт YV12. Відбувається підйом важелів вивантаження.

Опис роботи принципової електросхеми в режимі «Напівавтоматичний цикл».

Перемикач SA1 встановлюється в положення «Напівавтомат». Механізм руху матеріалу і механізм вивантаження в цьому режимі не працюють. Матеріал подається в зону різання вручну. Цикл запускається кнопкою SB3, при цьому необхідно, щоб бабка пильного диска знаходилась у відведеному положенні (натиснуто SQ8), щоб обчислювальник PCI був у початковому положенні. Із натисканням кнопки SB3 включаються і становляться на саможивлення реле КА5 і КА6, включаються: електродвигун обертання диска, електромагніт YV3 затиску матеріалу та електромагніт YV1 робочої подачі бабки пильного диска. Рух робочої подачі бабки пильного диска починається тільки після надійного затиску матеріалу в призмі, що забезпечується гідравлічною послідовністю. В кінці робочої подачі відробляє кінцевий вимикач SQ2 і включає реле КА7, яке становиться на саможивлення. Реле КА7 відключає електромагніт YV1 робочої подачі, включають електромагніт YV2 відведення бабки пильного диска, підготовлюють ланцюг реле КА6 та електромагніта YV3 до відключення, а ланцюг електромагніта YV4 до увімкнення. Відведення бабки пильного диска проходить до відробки кінцевого вимикача SQ3, який відключає реле затиску КА6 і електромагніт YV3. З відключенням реле

КА6 відключається реле КА5, електромагніт відведення бабки YV2, і включається електромагніт YV4 розтиску матеріалу. В кінці режиму натискається кінцевий вимикач SQ1 і відключає реле КА7. Реле КА7 відключає електромагніт YV4. На цьому напіваавтоматичний цикл закінчується.

При необхідності, під час різання можна провести аварійне відведення бабки пильного диска. Для цього необхідно натиснути на кнопку SB4. Реле КА5 при цьому знімається із саможивлення, відключає електромагніт YV1 Реле КА7 включає електромагніт YV2. Відведення бабки пильного диска проходить до відробки кінцевого вимикача SQ3, після чого електромагніти YV2, YV3 відключаються і включається електромагніт YV4. Виконується розтиск матеріалу. В кінці розтиску вимикач SQ1 відключає реле КА7 і електромагніт YV4.

При запуску циклу з вже затиснутим матеріалом, він починається не із затиску, а з подачі бабки пильного диска. Можна, наприклад, у налагоджувальному режимі подати матеріал і затиснути його. Потім перемикач SA1 перевести у положення «Напіваавтомат». Матеріал при цьому залишається затиснутим.

Опис роботи принципової електросхеми у автоматичному циклі.

Перемикач SA1 встановлюється у положення «Автоматичний режим». Перемикачем SA2 обирається кратність подач матеріалу: однократна, двократна або трикратна.

Для пуску циклу необхідно мати початкове положення бабки пильного диска (натиснуто SQ3) та початковий стан обчислювальника PCI. Пуск циклу не пов'язан з яким-небудь конкретним положенням механізмів захвату, каретки подачі матеріалу, затиску, проте їхнє положення к моменту пуску циклу визначає нижчеперераховані варіанти початку автоматичного циклу:

- 1) затиск увімкнений. Перемикач SA1 необхідно встановити у положення «Напіваавтомат» і натиснути кнопку пуску циклу SB3, потім повернути перемикач у положення «Автомат». Цикл починається з робочої подачі бабки пильного диска;
- 2) механізм затиску розтиснутий, захвати зведені. При будь-якому положенні каретки подачі матеріалу цикл починається з подачі матеріалу;

- 3) механізм затиску розтиснутий, захвати розкриті. При будь-якому положенні каретки подачі матеріалу цикл починається з повернення каретки на заданий упор.

Розглянемо роботу електросхеми при однократних подачах. Допустимо, що перед пуском циклу механізм затиску знаходиться в розтиснутому стані, захвати розкриті. Після натискання кнопки пуск циклу SB3 включаються реле КА5. Реле КА5 включає електромагніт відведення каретки YV7. Якщо каретка знаходилась, припустимо, на передньому упорі, то вона рухається повільно до відключення SQ5, потім після увімкнення YV11 переміщується прискорено, а у заднього упору вимикач SQ6 відключає електромагніт YV11, і каретка повільно підходить до упору. Вимикач заднього упору SQ7 включає реле часу KT1, яке з витримкою часу включає реле захвату КА9. Реле КА9 становиться на саможивлення і включає електромагніт захвату матеріалу YV5. Витримка часу на увімкнення захвату після відробки вимикача SQ7 необхідна для доведення каретки до жорсткого упору. Якщо увімкнути захват просто натисканням вимикача SQ7 (без витримки часу), то притік мастила в циліндр захвата миттєво призводить до падіння тиску в ланцюзі управління напірного золотника лінії подачі матеріалу. Напірний золотник перекриває подачу мастила в циліндр подачі матеріалу, і каретка зупиняється, не дійшовши до жорсткого упору. Зупинка каретки по кінцевому вимикачу створює похибки у довжині заготовок, що відрізаються, через нестабільність точки відробки вимикача. Ці похибки плюсуються при дво - або трикратних подачах. Таким чином, реле часу виключає похибки у довжині заготовок, що відрізаються. Після увімкнення електромагніта YV5 іде захват матеріалу. При цьому звільняється вимикач SQ8, який відключає електромагніт SV6 і реле KSQ8. Електромагніт YV6 включає подачу матеріалу, яка проходить на повільній швидкості до увімкнення вимикачем SQ6 електромагніта YV11, потім прискорено до відключення вимикачем SQ5 електромагніта YV11. До переднього упору каретка підходить на повільній швидкості. Після відробки вимикача SQ4 включається затиск матеріалу (реле КА6). На передньому упорі після відробки SQ4 витримки часу на увімкнення затиску не потрібно, так як рух затиску гідравлічно не зупиняє руху каретки, часу затиску достатньо для того, щоб каретка дійшла до жорсткого упору.

Зі сходженням затиску з вимикача SQ1 включається реле часу KT1, яке із витримкою часу включає реле КА14. Реле КА14 включає електромагніт YV12 опускання важелів вивантаження і готує до відключення реле захвата КА9. Після опускання важелів вивантаження до натискання на вимикач SQ15 включається і становиться на саможивлення реле КА4. Реле КА4 відключає реле захвата КА9 і включає реле КА10. Після розкриття захватів вимикач SQ8 включає електромагніт YV1 робочої подачі бабки пильного диска відключає реле КА14. Реле КА14 відключає електромагніт YV12. Виконується підйом важелів вивантаження. Після сходження важелів вивантаження з вимикача SQ15 включається електромагніт YV7. Виконується повільне повернення каретки до заднього жорсткого упору.

У кінці робочої подачі бабки пильного диска вимикач SQ2 включає реле КА7, яке відключає робочу подачу бабки, включає відведення бабки і захват матеріалу, а також готує до відключення ланцюг реле КА6 і до увімкнення електромагніта розтиску YV4. Після відведення бабки до відробки вимикача SQ3 електромагніт YV2 відключається. Якщо до моменту повернення бабки в початкове положення вже виконаний захват матеріалу, то затиск відключиться і включається розтиск матеріалу. Якщо ж до моменту повернення бабки в початкове положення захват матеріалу не виконаний, то затиск відключиться за допомогою реле КА14 тільки після того, як матеріал буде схоплений, а потім пройде розтиск матеріалу. Після розтиску вимикач SQ1 відключає реле КА7 і включає електромагніт подачі матеріалу YV6, тобто починається повторення циклу, що був описаний.

У випадку двократних подач після першої подачі матеріалу, затиску матеріалу (контролюється реле часу KT2) і відробки вивантаження виконується розкриття захватів з наступним поверненням каретки до SQ7. Під час повернення каретки, в момент, коли вимикач SQ6 вже вільний від натиску, а вимикач SQ7 ще не натиснутий, включається реле КА11, становиться на саможивлення і включає реле КА10. Вимикач SQ7 через реле KT1 включає захват матеріалу. Після захвату, який контролюється реле часу KT2, реле КА14 включає розтиск матеріалу. Після розтиску проходить повторна подача матеріалу, в кінці якої вимикач SQ4 дає команду на розтиск матеріалу. Після розтиску і розкриття захватів проходить робоча подача бабки. Вивантаження після другої подачі не працює. Далі цикл продовжу-

ється так само, як і при однократній подачі. Реле часу КТ2 використовується при багатократних подачах для контролю за затиском і захватом матеріалу, тому тривалість витримки повинна бути достатньою для надійного завершення кожного із рухів.

При трикратних подачах, так само як і при двократних, виконується перехват матеріалу затиском перед розкриттям захватів і навпаки, з метою не залишати матеріал вільним і тим самим забезпечити точність заготовок, що будуть відрізатися. При трикратних подачах під час повторного захвату матеріалу реле КА11 включає реле КА12, яке становиться на саможивлення. Під час третього повернення каретки реле КА11 включає реле КА10, яке становиться на саможивлення. Після закінчення третьої подачі матеріалу включається затиск матеріалу і робоча подача бабки. Далі цикл продовжується так, як і при однократній подачі.

Якщо під час автоматичного циклу закінчується пруток матеріалу, то при захваті відробляє вимикач SQ11. Якщо відроблення SQ11 припадає на час різання, то цикл завершується після відведення бабки на SQ3 і розтиску. Якщо відробка SQ11 відбувається при захваті до завершення подачі матеріалу, то цикл закінчується одразу. На пульті управління після відробки SQ11 загоряється повним накалом лампа HL2.

До передчасної зупинці циклу призводить також перевід під час різання перемикача SA1 у положення «Напівавтомат».

В автоматичному та напівавтоматичному циклах включається в роботу обчислювальник PC1.

Обчислювальник PC1 служить для задачі станку програми на відрізок визначеного числа заготовок і для зупинки циклу станка після виконання програми. Діапазон задачі кількості заготовок на обчислювальнику від 0 до 999999. Для введення програми обчислювальник має шкалу переднабору. Обчислювальник також має шкалу поточного відліку і кнопку скидання у початкове положення. У початковому положенні обчислювальника на шкалі поточного відліку індицирується нульове значення, на шкалі переднабору - потрібне число, відмінне від нуля, яке набирається вручну. В процесі відліку проходить віднімання на шкалі переднабору та сумування на шкалі поточного значення. Обчислювальник має вихідну ко-

манду у вигляді перемикаючого контакту, який змінює свій стан, коли буде відраховане задане на шкалі переднабору число. В електричній принциповій схемі за нормально відкритий контакт обчислювальника прийнято контакт, який відкритий у початковому стані обчислювальника. Коли в процесі відліку на шкалі переднабору встановиться 000000, а на шкалі поточного обліку – число, яке дорівнює заданому, нормально відкритий контакт обчислювальника замикається, а нормально закритий розмикається. Нормально закритий контакт виконує передчасний стоп циклу, а нормально відкритий контакт запалює повним накалом лампу HL4, яка сигналізує про те, що задана програма виконана.

Для продовження роботи необхідно натиснути на кнопку скидання відліку. Якщо завчасно програма, що вибирається, залишається без змін, то після скидання обліку можна знову отримати відробку обчислювальника за попередньою програмою.

2.4 Захист, блокування та сигналізація.

Максимальний захист електродвигунів від струмів короткого замикання виконується запобіжниками та автоматичними вимикачами, захист від перевантаження – тепловими реле. Захист ланцюгів управління виконується автоматичними вимикачами. Електросхема забезпечує нульовий захист, який виключає самовільне увімкнення електропривода при відновленні швидко-зниклої напруги.

Схема забезпечує ряд блокувань, за допомогою яких виключаються рухи механізмів, які можуть призвести до травматизму, поломці автомата, інструмента або пошкодженню виробу.

Блокування забезпечують:

- 1) можливість переміщення каретки тільки при початковому положенні бабки пильного диска;
- 2) можливість руху каретки вперед тільки при розтиснутому матеріалі (натиснуто SQ1) і піднятих важелях вивантаження (натиснуто SQ14);

На пульті управління встановлені сигнальні лампи HL2, HL3, HL4, HL7, HL8.

Лампа HL2 сигналізує про те, що матеріал в захватах відсутній (або захвати не налагоджені на діаметр матеріалу). Лампа HL3 сигналізує про не відроблення змащення. Лампа HL4 сигналізує про те, що програма на відрізку заготовок виконана. Лампа HL7 сигналізує про те, що затиск не налагоджений на діаметр матеріалу, а HL8 – про засмічення фільтра на гідроагрегаті.

На боковій стінці електрошафи встановлені сигнальні лампи HL1, HL5, HL6. Лампа HL1 загоряється при увімкненні ввідного автомата. Лампи HL5 і HL6 призначені для сигналізації про замикання на землю в ланцюгах управління. При замиканні на землю горить лампа HL5 або HL6 повним накалом. При нормальній роботі лампи HL5 і HL6 горять обидві внапівнакалу.

В електрошафі автомата виконано електричне блокування дверцят електрошафи з ввідним автоматом Q. Для того, щоб забезпечити можливість увімкнення автомата Q при відкритих дверях, необхідно перемикач SA4 встановити в положення «Робота з відкритими дверцятами електрошафи».

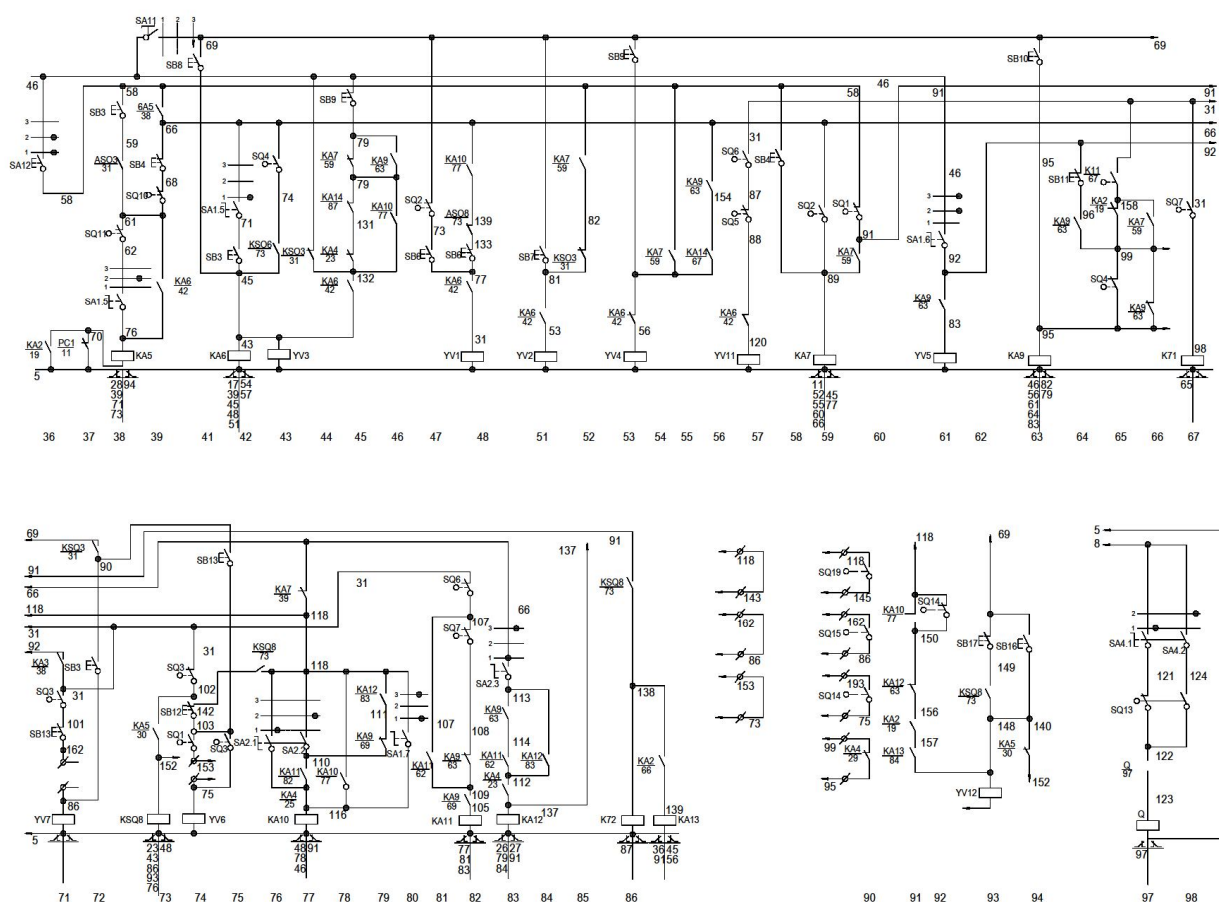


Рисунок 2.1 – Принципова схема системи керування відрізного апарату

2.5 Постановка задачі проектування.

За результатами проведеного аналізу обладнання було встановлено що привод подачі відрізного диска є гідравлічним. Гідравлічна система подачі має ряд недоліків. До них можна віднести: необхідність наявності гідравлічної станції; трубопроводи гідравлічної системи; гнучкі шланги; наявність різноманітних РТІ, то що. Кожен з цих елементів гідравлічної системи має невеликий термі служби, що пов'язано з роботою в агресивному середовищі. Наявність гідравлічної станції потребує додаткової площі розміщення обладнання і додаткових енерговитрат. Привод подачі є одним із важливих елементів верстату який відповідає за чистоту технологічного процесу.

Враховуючи все це у роботі пропонується замінити гідравлічну систему подачі на електромеханічну з передачею гвинт гайка качіння. Заміна системи дозволяє знизити вагу і габаритні розміри апарата, підвищити надійність, підвищити точність позиціонування привода подачі апарата тим самим підвищити показники якості обробки заготовок, знизити енерговитрати. Дозволить здійснювати регулювання швидкості подачі у широкому діапазоні. Підвищити точність позиціонування.

Для заміни системи додатково встановлюємо стандарту конструкцію передачі гвинт гайка качіння яка відповідає габаритним розмірам і навантаженню рухомої конструкції апарата. Наступним кроком вибираємо комплектний електропривод та робимо його розрахунок і аналіз динаміки.

3 Vacon – пристрій для автоматизації керування привода подачі відрізного апарата

З метою модернізації системи керування приводами, 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.

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

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

Для зупинки чи для уповільнення швидкості обертання 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 різних факторів і не піддається регулюванню. Для керування часом гальмування застосовують генераторний метод. Він полягає в тім, що частотний перетворювач

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

Велика різноманітність частотних перетворювачів Vacon, дозволяють вирішити питання 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 широку ланку виробів для: - передачі і розподілу електроенергії; - керування в промислових процесах; - автоматизації технологічних процесів.

Завдяки впровадженню сучасних алгоритмів 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 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 досягається за рахунок роботи електропривода установки 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 типу Vacon мають 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.

3.1 Функції, які виконує Vacon.

Vacon надійний перетворювач частоти, призначений для багатьох типів трифазних асинхронних двигунів великої потужності. Він втілює в собі сучасні технології й інноваційні функції, що відповідають найбільш частим застосуванням.

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

Перетворювач покриває діапазон потужностей від 0,25 до 3000 кВт для єдиної лінійки 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 впливає на необхідність зниження навантаження при швидкостях, менших номінальної швидкості. Для налагодження теплового захисту двигуна бажано мати інформацію від виробника 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.

3.2 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 3.1.



Рисунок 3.1 - Загальний вигляд Vacon NXC

Для обраного двигуна обираємо систему регулювання, що складається з низьковольтного перетворювача частоти Vacon NXC-19006-G5N0SSF і трансформаторів (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) (рисунку 3.2). Обов'язковим компонентом схеми є синус-фільтр, вмонтований на виході перетворювача частоти [7].

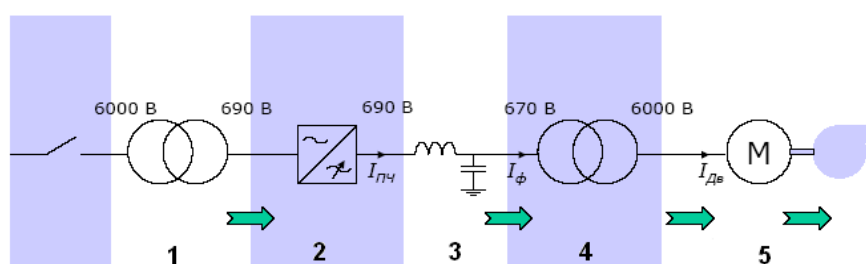


Рисунок 3.2 - ДТС

- 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 3.1.

Таблиця 3.1 - 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

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, які вільно розповсюджує завод-виготовлювач приведені в таблиці 3.2 [3].

Таблиця 3.2 - 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 перевантаження: 190 А (I _Л), температура окр. середовища макс. +40°C
	Перевантажувальна здатність	Висока: 1,5× I _Н (1хв/10 хв), Низька: 1,1× I _Л (1хв/10 хв)
	Максимальний пусковий струм	270 А (I _с) 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 %,

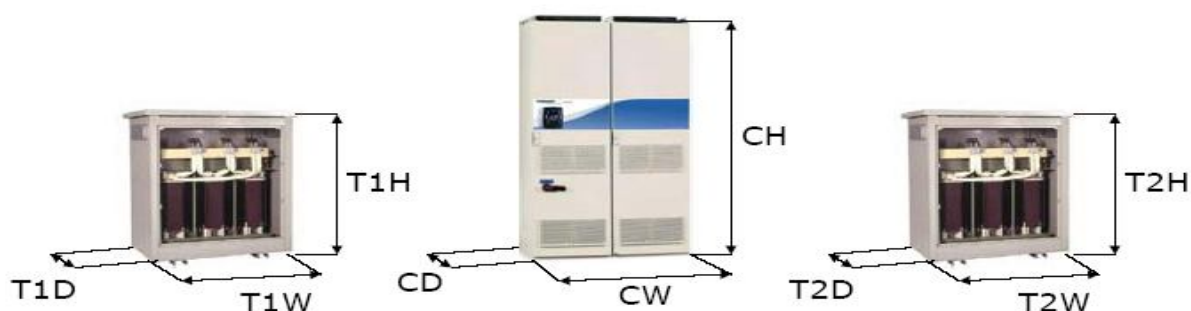
Продовж. табл. 3.2.

		динамічна 0,3 % с, моменту <2 %, наброс моменту □ 5 мс. Векторне керування із замкнутим контуром (весь діапазон швидкості): погрішність швидкості 0,01 %, динамічна 0,2 % с, моменту <2 %, наброс моменту □ 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 - механічні частки	IEC 721-3-3, пристрій у роботі, клас 3C2 IEC 721-3-3, пристрій у роботі, клас 3S2
	Висота над рівнем моря	100 % навантажувальна здатність (без зниження потужності) до 1000 м 1% зниження потужності на кожні 100 м; макс. 3000 м.
	Вібрації EN50178/EN60068-2-6	5...150 Гц Амплітуда коливань 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 зберігання: макс. 15 G, 11 мс (в упакованні)
EMC	Перешкодозахищеність	Відповідає всім вимогам 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 В. рівень EMC L: EN61800-3 (1996) +A11 (2000) (2-я зона). рівень EMC T: для інформацій- них мереж (може бути модифіко- ване з рівня Н).
Безпека		EN50178 (1997), EN60204-1 (1996), EN60950 (2000), IEC61800-5, CE, UL, CUL, ГОСТ, Р.
Ланцюга керуван- ня (OPT-A1,-A2, або OPT-A1,-A3)	Аналоговий вхід (потен- ційний)	0...+10 В (-10 В...+10В у режимі джойстика), $R_j=200$ кОм, дозвіл 0,1%, точність ± 1 %
	Аналоговий вхід (струмо- вий)	0(4) ...20 мА, $R_j=250$ Ом диффе- ренц., 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 (OPT- A3:Н0/Н3+Н0) Комутаційна здатність: 24 В=8 А, 250 В□ /8 А, 125 В=0,4 А. Мін. навантаження: 5 В/10 мА.
	Термісторний вхід (OPT- A3)	Гальванічески ізольований, $R_{срабат.}=4,7$ кОм
Захист		Перенапруга, низька напруга, за- микання на землю, контроль ме- режі, контроль вихідних фаз, све- рхструм, перегрів ПЧ, перегрів двигуна, недовантаження двигу- на, коротке замикання джерел +24 В и +10 В.

Робоче положення: -Вертикальне

На рисунку 3.3 та таблиці 3.3. показані розміри Vacon NXL-19006-G5N0SSF та двох трансформаторів Trafotek.



Рисунку 3.3 - Габаритні обладнання

Відстані до іншого обладнання

Для забезпечення циркуляції прохолодного повітря на перетворювач Vacon встановлюється примусова вентиляція з 4 вентиляторів, які знаходяться нагорі шафи (продуктивність вентиляторів: $4 \times 3600 \text{ м}^3/\text{год}$).

Навколишня температура не повинна перевищувати максимально-припустиме значення. Як що встановилася максимальна температура, то частота модуляції привода знизиться автоматично, а як що і цього недостатньо, то буде знижена обмеження максимального струму. Термін служби перетворювача зменшується з ростом температури навколишнього середовища. Необхідно:

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

Необхідно дотримуватись мінімальні відстані, що рекомендуються, особливо для вбудованого устаткування .

Поява сторонніх предметів всередину устаткування може привести до його ушкодження: забезпечте, щоб проводи, ізоляція провідників, металева стружка і пил не потрапили усередину устаткування, закриваючи його, поки воно не підключено до живлення.

4 Керування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

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

4.1 Побудова математичної моделі асинхронного двигуна при керуванні вектором потокозчеплення.

При дослідженні перехідних процесів у трифазних асинхронних електродвигунах приймемо допущення, для спрощення виразу 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 [15]:

$$\left. \begin{aligned} u_{1a} &= i_{1a} R_1 + \frac{d\psi_{1a}}{dt}; \\ u_{1b} &= i_{1b} R_1 + \frac{d\psi_{1b}}{dt}; \\ u_{1c} &= i_{1c} R_1 + \frac{d\psi_{1c}}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

відповідно для обмоток трьох фаз ротора:

$$\left. \begin{aligned} u'_{2a} &= i'_{2a} R'_2 + \frac{d\psi_{2a}}{dt}; \\ u'_{2b} &= i'_{2b} R'_2 + \frac{d\psi_{2b}}{dt}; \\ u'_{2c} &= i'_{2c} R'_2 + \frac{d\psi_{2c}}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

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 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 (4.3).

Рівняння (4.3) містить гармонійні коефіцієнти, що створює значних труднощів при дослідженні перехідних процесів. Для того щоб виключити гармонійні коефіцієнти, використовують перетворення координат. Для цього 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.

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

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$, $L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ — повні еквівалентні індуктивності фаз статора і 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 можна оперувати не миттєвими значеннями координат, а результуючими векторами. Якщо, миттєві значення струмів рівні i_a , i_b , i_c то результуючий вектор струму визначається рівнянням [9]:

$$i = \frac{2}{3} (a^0 i_a + a i_b + a^2 i_c) = \frac{2}{3} (i_a + a i_b + a^2 i_c), \quad (4.4)$$

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

Так само 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 (4.1) запишемо у виді одного диференціального рівняння у векторній формі. Для цього перше рівняння з (4.1) збільшується на $2/3 \cdot a^0$, друге на $2/3 \cdot a$, третє на $2/3 \cdot a^2$. Підсумовуючи отримані добутки, одержимо:

$$\frac{2}{3}(u_{1a} + au_{1b} + a^2u_{1c}) = \frac{2}{3}(i_{1a} + ai_{1b} + a^2i_{1c})R_1 + \frac{2}{3}\frac{d}{dt}(\psi_{1a} + a\psi_{1b} + a^2\psi_{1c}), \quad (4.6)$$

чи у векторній формі

$$u_1 = i_1 R_1 \frac{d\psi_1}{dt}. \quad (4.7)$$

Аналогічно векторне рівняння напруг ротора:

$$u'_2 = i'_2 R'_2 \frac{d\psi_2}{dt}. \quad (4.8)$$

У 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 змінного струму застосовують різні 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:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_e \psi_1; \\ u'_2 &= i'_2 R'_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_e - p_r \omega) \psi_2, \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

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

Потокозчеплення зв'язані зі струмами через індуктивності:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= i_1 L_1 + i'_2 L_m; \\ \psi_2 &= i_1 L_m + i'_2 L'_2. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Звідси можливо одержати значення струму ротора:

$$i_2' = \frac{\psi_2}{L_2'} - \frac{L_m}{L_2'} i_1. \quad (4.11)$$

Підставив його в друге рівняння системи (4.9), і виконав необхідні перетворення з обліком того, що для електродвигуна з короткозамкнутим ротором $u_2' = 0$, а $L_m/L_2' = k_2$ одержимо

$$\frac{d\psi_2}{dt} = \frac{R_2'}{L_2'} \psi_2 + k_2 R_2' i_1 - j(\omega_e - p_i \omega). \quad (4.12)$$

Підставив в рівняння

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_e \psi_2, \quad (4.13)$$

значення потокозчеплення статора $\psi_1 = i_1 L_1 + i_2' L_m$ і виконавши необхідні перетворення з урахуванням рівнянь (4.11) і (4.12) одержимо

$$\frac{d}{dt} i_1 = \frac{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'}{L_2''} i_1 - j\omega_e i_1 + \frac{k_2 R_2'}{L_2' \cdot L_1''} \psi_2 - j p_i \omega \cdot \frac{k_2}{L_1''} \psi_2 + \frac{1}{L_1''} u_1, \quad (4.14)$$

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, запишемо рівняння (4.11) і (4.12) у системі координат, що обертається зі швидкістю ω_k , рівної кутової швидкості обертання вектору потокозчеплення ротора $\omega_{\psi 2}$ приведеної до дво полюсного електродвигуна, у наступному виді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} |\psi_2| + \frac{R_2'}{L_2'} |\psi_2| &= k_2 R_2' i_{1a}; \\ (\omega_{\psi 2}' - p_i \omega) |\psi_2| &= k_2 R_2' i_{1b}; \\ \frac{d}{dt} i_{1a} + \frac{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'}{L_1''} i_{1a} &= \omega_{\psi 2}' i_{1b} + \frac{k_2 R_2'}{L_2' \cdot L_1''} |\psi_2| + \frac{1}{L_1''} u_{1a}; \\ \frac{d}{dt} i_{1b} + \frac{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'}{L_1''} i_{1b} &= -\omega_{\psi 2}' i_{1a} + p_i \omega \left(\frac{k_2}{L_1''} |\psi_2| \right) + \frac{1}{L_1''} u_{1b}, \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

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

Електромагнітний момент двигуна визначаємо по формулі:

$$M = \frac{3}{2} p_i k_2 |\psi_2| i_{1b}. \quad (4.16)$$

Додавши до рівнянь (4.15) і (4.16) рівняння рівноваги моментів електропривода

$$M - M_c = J \cdot \frac{d}{dt} \omega, \quad (4.17)$$

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

З аналізу рівнянь (4.15) і (4.16) можна визначити 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 (4.15) (попередньо помноживши їх на L_2''):

$$L_1'' \cdot \omega_{\psi 2}' \cdot i_{1b} - \frac{k_2 \cdot R_2'}{L_2'} |\psi_2| - L_1'' \omega_{\psi 2}' i_{1a}, \quad (4.18)$$

— 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 знаходять відповідні алгебраїчні перетворення.

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

З урахуванням компенсації складових правої частини рівняння (4.15) записуються в наступному простому виді [15]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_2'}{R_2'} \frac{d}{dt} |\psi_2| + |\psi_2| &= k_2 L_2' i_{1a}; \\ \frac{L_1''}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{1a} \right) + i_{1a} &= \frac{1}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} u_{1a}; \\ \frac{L_1''}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{1b} \right) + i_{1b} &= \frac{1}{R_1 + (k_2)^2 \cdot R_2'} u_{1b}. \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

Перетворення складових напруги статора $u_{1\alpha}$, і $u_{1\beta}$ у складові u_{1x} і u_{1y} , нерухомих осей здійснюється відповідно до формули

$$u_{1x} = u_{1a} \cdot \cos \theta - u_{1b} \cdot \sin \theta; u_{1y} = u_{1a} \cdot \sin \theta + u_{1b} \cdot \cos \theta. \quad (4.20)$$

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 операторної форми рівнянь (4.16), (4.19), одержимо (4.21) передатні функції, що характеризують динамічні процеси в асинхронному електродвигуні при векторному керуванні:

$$\left. \begin{aligned} \frac{|\psi_2|(p)}{i_{1a}(p)} &= \frac{k_2 \cdot L_2'}{T_{el2} \cdot p + 1}; \\ \frac{i_{1a}(p)}{u_{1a}(p)} &= \frac{1/R_\Sigma}{T_{el1} \cdot p + 1}; \\ \frac{i_{1b}(p)}{u_{1b}(p)} &= \frac{1/R_\Sigma}{T_{el1} \cdot p + 1}; \\ M(p) &= \frac{3}{2} p_n k_2 |\psi_2| \cdot (p) \cdot i_{1b} \cdot (p); \\ \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} &= \frac{1}{Jp}. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

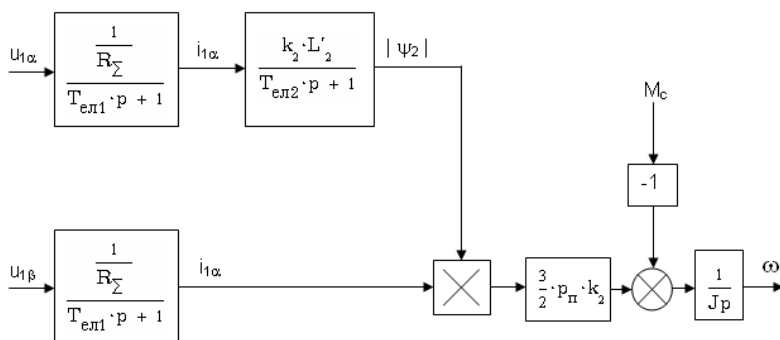


Рисунок 4.1 - Математична модель асинхронного двигуна при керуванні вектором потокозчеплення ротора

Структурна схема математичної моделі асинхронного двигуна створена по рівняннях (4.21), наведена на рисунку 4.1.

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 $J = 163 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- постійна часу $T_{\dot{\alpha}e1} = L_1' \cdot \frac{\gamma}{\nu} = 0,854 \text{ с}$;
- постійна часу $T_{\dot{\alpha}e2} = \frac{L_2'}{R_2} = 0,367 \text{ с}$;

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

В 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

$$W_{np}(p) = \frac{k_{np}}{(T_{np}p + 1)}, \quad (4.22)$$

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

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

Підставивши в систему диференціальних рівнянь (4.21) рівняння (4.22) запишимо систему рівнянь, що описує незмінну частину розрахованої системи керування (4.23).

Враховуючи 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 вигляді двоканальної системи керування і містить канал керування кутовою швидкістю ротора і канал керування потокозчепленням ротора.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{|\psi_2|(p)}{i_{1a}(p)} &= \frac{k_2 \cdot L_2'}{T_{en2} \cdot p + 1}; \\
 \frac{i_{1a}(p)}{u_{1a}(p)} &= \frac{k_{np}}{T_{np} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{en1} \cdot p + 1}; \\
 \frac{i_{1b}(p)}{u_{1b}(p)} &= \frac{k_{np}}{T_{np} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{en1} \cdot p + 1}; \\
 M(p) &= \frac{3}{2} p_n k_2 |\psi_2| \cdot (p) \cdot i_{1b} \cdot (p); \\
 \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} &= \frac{1}{Jp}.
 \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

Потокозчеплення ротора 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 може містити два контури керування – внутрішній, по струму статора $i_{1\beta}$, і зовнішній, по кутовій швидкості ротора.

Структурна схема системи керування наведена на рисунку 4.2.

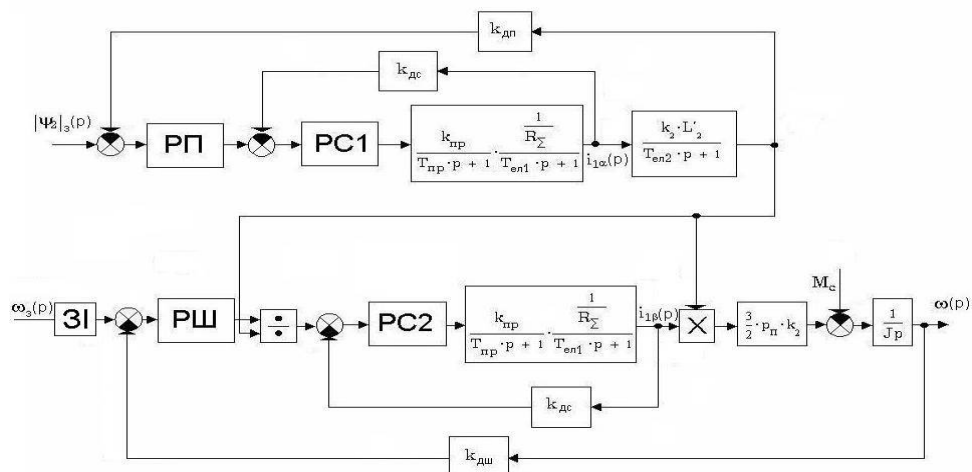


Рисунок 4.2. Структурна схема математичної моделі системи керування асинхронним двигуном

У системі регулювання швидкості асинхронного електродвигуна з підлеглим зворотним зв'язком по струму $i_{1\beta}$ застосовується локальна система стабілізації

потокосцеплення 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 потокосцеплення ротора забезпечується умова автономності. Данна 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 не компенсуємою постійної часу є постійна T_{np} . Регулятори РС1 і РС2 доцільно вибирати 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 потокосцеплення 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:

$$W(p) = W_{pc}(p)W_{nc}(p), \quad (4.24)$$

$$\text{де} \quad W_{nc}(p) = \frac{k_{np}}{T_{np} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{el1} \cdot p + 1}. \quad (4.25)$$

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

$$W_o(p) = \frac{\frac{\gamma}{v}}{T_{el1} \cdot p + 1}, \quad (4.26)$$

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

$$W_p(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p}, \quad (4.27)$$

знаходимо передатний коефіцієнт регулятора по формулі

$$\beta_p = \frac{T_{ел1}}{2T_{np} \frac{\gamma}{\nu} \cdot k_{np} \cdot k_{oc}}, \quad (4.28)$$

а постійну часу $\tau_p = T_{ел1}$, отримуємо передатну функцію розімкнутого контуру у вигляді:

$$W_{pk}(p) = \frac{1}{2T_{np} p \cdot (T_{np} p + 1)}. \quad (4.29)$$

Передатна функція замкнутого контуру:

$$W_{зк}(p) = \frac{W(p)}{[(1 + W(p)) \cdot W_{о.з}(p)]}, \quad (4.30)$$

$$\text{отримуємо у вигляді: } W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{oc}}}{2T_{np} p \cdot (T_{np} p + 1) + 1} = \frac{\frac{1}{k_{oc}}}{2(T_{np})^2 p^2 + 2T_{np} p + 1}. \quad (4.31)$$

Вибір регулятора відповідно приводить до того, що розглянутий контур описується передатною функцією коливальної ланки.

Тепер розглянемо налаштування регулятора потоку, передатна функція

$W_n(p)$ є розімкнутий контур керування по потоку.

$$W_n(p) = W_{pn}(p) \cdot W_{нчп}(p), \quad (4.32)$$

де
$$W_{нчп}(p) = W_{зк}(p) \frac{k_2 L_2'}{T_{ел2} p + 1} \quad (4.33)$$

- 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 замкну-

тий контур відповідно можна замінити аперіодичною ланкою з передатною функцією

$$W_{зк}(p) \approx \frac{1}{\frac{k_{ic}}{T_{le}p+1}}. \quad (4.34)$$

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

$$W_{зк}(p) = \frac{1}{\frac{k_{dc}}{2T_{np}p+1}}. \quad (4.35)$$

У цьому випадку $2 \cdot T_{np}$ – мала не компенсована постійна часу.

Для налаштування контуру на оптимум по модулі передатна функція регулятора потоку буде мати вигляд:

$$W_{pn}(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p}, \quad (4.36)$$

де

$$\beta_p = \frac{T_{el2}}{2 \cdot 2 \cdot T_{np} \frac{1}{k_{dc}} \cdot k_{dn} \cdot k_2 \cdot L_2'}, \quad (4.37)$$

а $\tau_p = T_{el2}$. Якщо вибрати регулятор із зазначеними параметрами, то передатна функція розімкнутого контуру керування потокозчепленням ротора буде мати вигляд:

$$W_{pk}(p) = \frac{1}{4T_{np}p \cdot (2T_{np}p+1)+1}, \quad (4.38)$$

передатну функцію замкнутого каналу керування потокозчепленням ротора асинхронного двигуна зазначемо у вивигляді:

$$W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{dc}}}{4T_{np}p \cdot (2T_{np}p+1)+1} = \frac{\frac{1}{k_{dc}}}{8(T_{np})^2 p^2 \cdot 4T_{np}p+1}. \quad (4.39)$$

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

$$W_{pc2}(p) = \frac{T_{ел1}}{2 \cdot T_{np} \cdot \frac{\gamma}{\nu} \cdot k_{np} \cdot k_{\partial c}} \cdot \frac{T_{ел1}p + 1}{T_{ел1}p} \quad (4.40)$$

Відповідно передатна функція замкнутого контуру керування струмом $i_{I\beta}$ має вигляд:

$$W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2T_{np}p \cdot (T_{np}p + 1) + 1} = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2(T_{np})^2 p^2 \cdot 2T_{np}p + 1} \quad (4.41)$$

Відповідно передатну функцію замкнутого контуру можна представити у вигляді:

$$W_{зк}(p) = \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2T_{np}p + 1} \quad (4.42)$$

У контурі керування швидкістю двигуна передатну функцію

$$W_{нс}(p) = W_{зк}(p) \cdot \frac{3}{2} p_n k_2 \frac{1}{Jp}, \quad (4.43)$$

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

$$W_{рк}(p) = W_{рш}(p) \cdot \frac{\frac{1}{k_{\partial c}}}{2T_{np} + 1} \cdot \frac{3 \cdot p_n \cdot k_2}{2 \cdot Jp} \quad (4.44)$$

Система є стабілізуючою, то щоб уникнути статичної помилки по швидкості у контурі з об'єктом у вигляді інтегруючої ланки, замість пропорційного регулятора необхідно застосувати Пі-регулятор. Вибираючи β_p відповідно до звичайного налаштування, але при цьому поклавши

$$\tau_p = 4T_{ел2} \text{ (де } T_{ел2} = 2 \cdot T_{np}), \quad (4.45)$$

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

$$W_{рк}(p) = \frac{8 \cdot T_{np}p + 1}{32 \cdot T_{np}^2 p^2 \cdot (2 \cdot T_{np}p + 1)} \quad (4.46)$$

Передатна функція регулятора швидкості:

$$W_{pi}(p) = \frac{J}{4 \cdot T_{np} \cdot \frac{3}{2} p_n k_2 \cdot \frac{1}{k_{\partial c}} \cdot k_{\partial u}} \cdot \frac{8 \cdot T_{np} p + 1}{8 \cdot T_{np} p} \quad (4.47)$$

Використання такого регулятора забезпечить підвищення астатизму каналу, це приводить до того, що статична помилка дорівнює нулю, однак при налаштуванні 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 [9]:

$$W_{zi}(p) = \frac{1}{8 \cdot T_{np} p + 1} \quad (4.48)$$

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

Структурна схема математичної моделі системи керування асинхронним двигуном показана на рис. 4.2. [9]

Підставимо коефіцієнти в отримані формули для передатних функцій регуляторів.

Для регуляторів струму за формулою (4.41):

$$W_{pc1}(p) = W_{pc2}(p) = \frac{T_{el1}}{2T_{np} \left(\frac{\gamma}{V}\right) k_{np} k_{\partial c}} \cdot \frac{T_{el1} p + 1}{T_{el1} p} = \frac{0,854}{2 \cdot 0,0005 \cdot 1000 \cdot 1} \cdot \frac{0,854 p + 1}{0,854 p} = 0,854 \cdot \frac{0,854 p + 1}{0,854 p}.$$

Для регулятора потокозчеплення:

$$W_{pn}(p) = \frac{T_{el2}}{4T_{np} \left(\frac{k_{\partial n}}{k_{\partial c}}\right) k_2 L_2} \cdot \frac{T_{el2} p + 1}{T_{el2} p} = \frac{0,367}{4 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot 0,8362 \cdot 0,2086} \cdot \frac{0,367 p + 1}{0,367 p} = 1051,98 \cdot \frac{0,367 p + 1}{0,367 p}.$$

Для регулятора швидкості:

$$W_{pi}(p) = \frac{J}{4T_{np} \cdot \frac{3}{2} \cdot p_n k_2 \cdot \frac{1}{k_{\partial c}} \cdot k_{\partial u}} \cdot \frac{8T_{np} p + 1}{8T_{np} p} = \frac{163}{4 \cdot 0,0005 \cdot \frac{3}{2} \cdot 6 \cdot 0,8362 \cdot 1} \cdot \frac{8 \cdot 0,0005 p + 1}{8 \cdot 0,0005 p} = 5414,7 \cdot \frac{0,004 p + 1}{0,004 p}.$$

Задатчик інтенсивності для каналу швидкості:

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

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

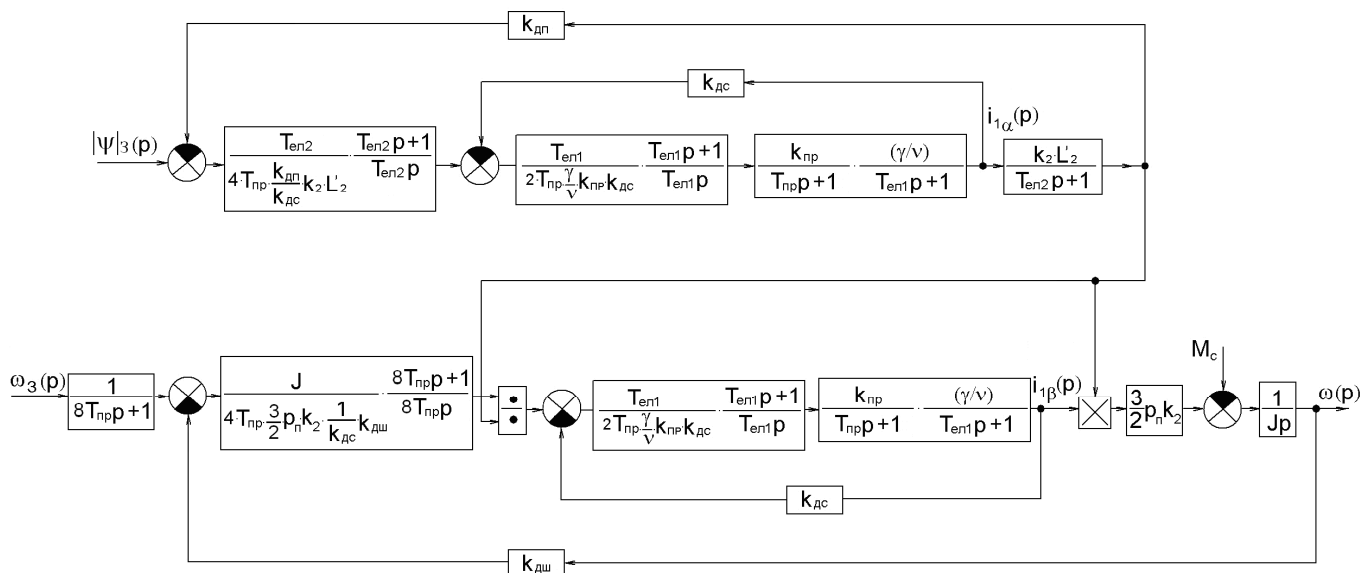


Рисунок 4.3 - Структурна схема математичної моделі системи керування асинхронним двигуном

4.2. Результати моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном.

Побудова характеристик виконується за допомогою математичної обробки «MathCAD Enterprise» а також програми «VisSim».

Маючи 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 Vасоп, щоб не перевантажувати трансформатори. Графіки показані на рисунках 4.4. – 4.9.

На рисунку 4.4 наведений перехідний процес при холостому пуску, він має такі параметри, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,48$ с (входження в ± 5 % від усталого значення), перерегулювання $\sigma_{\max} = 0$. Зменшувати час перехідного процесу не потрібно, щоб не було занадто великих стрибків струму. Перехідний процес на

рис. 4.5 – перехідний процес при пуску в навантаженому стані, $T_{\max} = 1,06$ с, перерегулювання $\sigma_{\max} = 0$. Видно, що при пуску під навантаженням час зростає на 0,58 с.

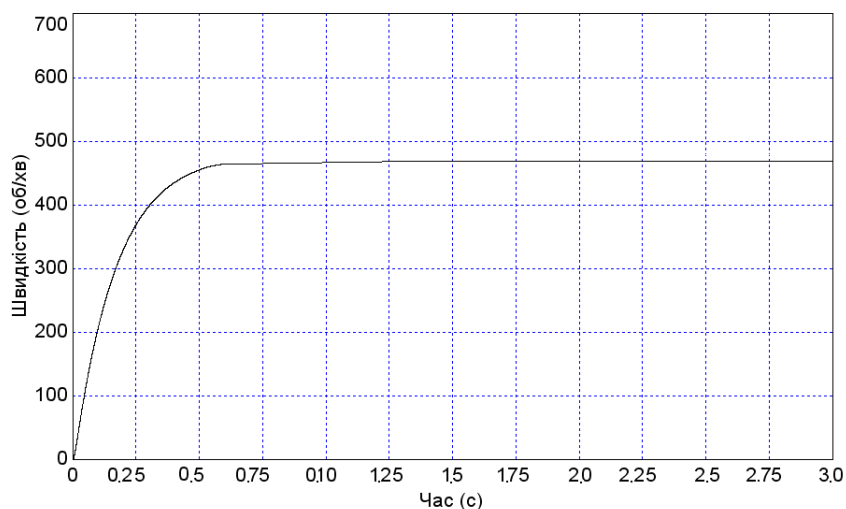


Рисунок 4.4 - Перехідний процес при холостому пуску

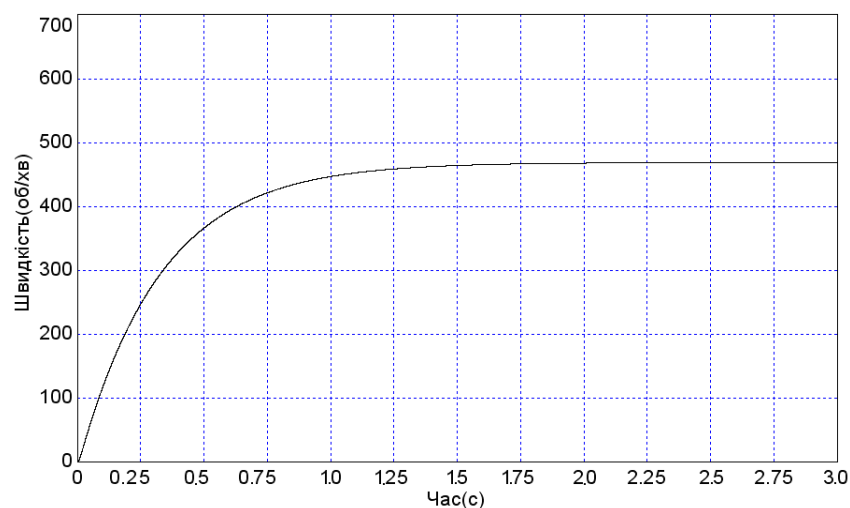


Рисунок 4.5 - Перехідний процес при пуску в навантаженому стані

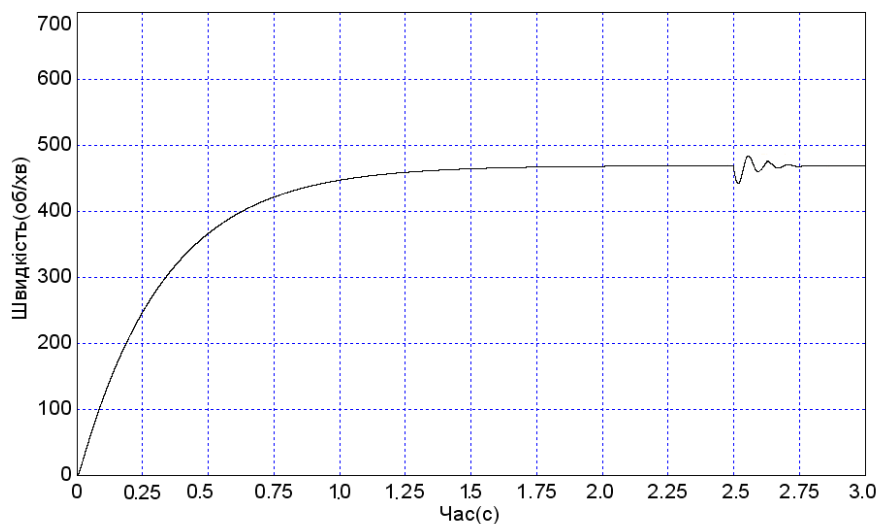


Рисунок 4.6 - Реакція системи на стрибкоподібну зміну навантаження на 40 %

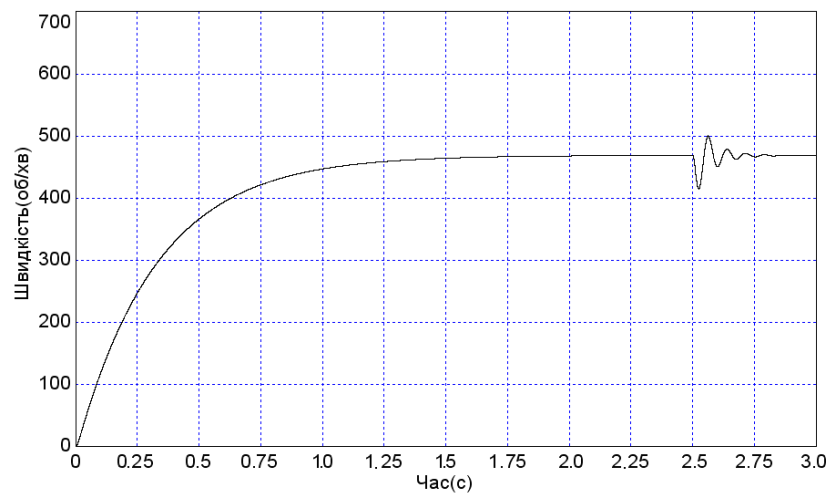


Рисунок 4.7- Реакція системи на стрибкоподібну зміну навантаження на 75 %

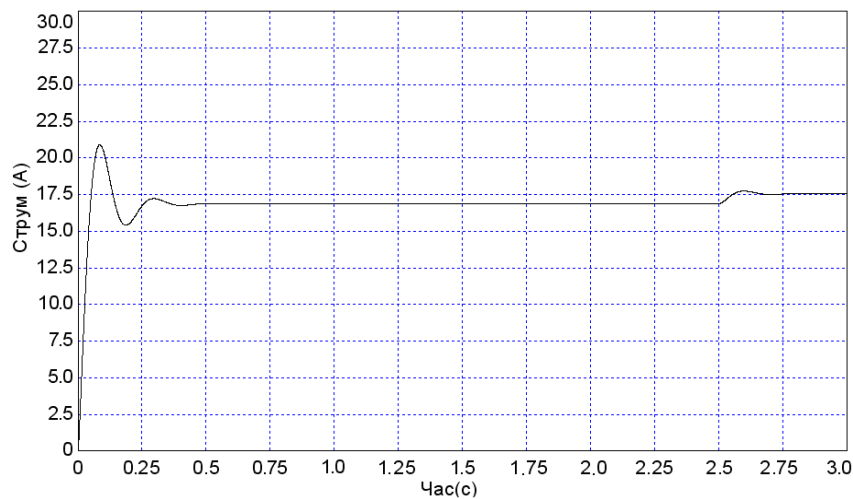


Рисунок 4.8 - Перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження на 40 %

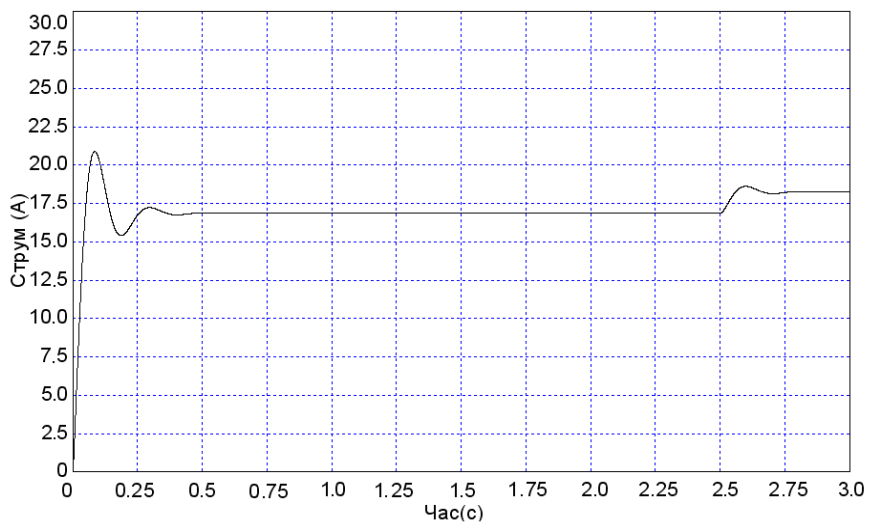


Рисунок 4.9 - Перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження на 75 %

На рисунку 4.6 – стрибкоподібна зміна навантаження на 20 %: $T_{\max} = 0,04$ с, $\sigma_{\max} = 6$ %. На рисунку 4.7 навантаження 40 %, як бачимо частотний перетворювач «шукає швидкість» за 0,08 с ($T_{\max} = 0,08$ с), $\sigma_{\max} = 12$ %.

На рисунку 4.8, 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 4.9, перехідний процес струму при стрибкоподібній зміні навантаження вже на 40 % – $T_{\max} = 0,04$ с, $\sigma_{\max} = 2$ %.

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

5 Охорона праці

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

В Україні систематично проводиться робота зі створення здорових і безпечних умов праці: розробляються і впроваджуються санітарні норми, правила техніки безпеки, система стандартів безпеки праці (ССБП), правила пристрою електроустановок (ПУЕ), правила технічної експлуатації (ПТЕ), правила техніки безпеки (ПТБ), норми і правила пожежної безпеки і вибухової безпеки, норми радіаційної безпеки й ін.

Знання нормативних документів і основних законодавчих актів про охорону праці: Конституції України; Закон України про охорону праці; Закон України про охорону здоров'я; Про пожежну безпеку; Кодексів законів про працю й інших документів, виконання відповідних правил забезпечать безпечні умови праці, що дуже важливо в справі збереження здоров'я трудящих.

Комплекс організаційних і технічних заходів і засобів, що запобігають нещасливим випадкам на виробництві, називається технікою безпеки.

Була створена Система стандартів по безпеці праці, що являє собою комплекс великого числа взаємозалежних стандартів, спрямованих на забезпечення безпеки праці, вона має велике значення в створення здорових і безпечних умов праці. Ця система встановлює: загальні вимоги і норми по видах небезпечних і шкідливих виробничих факторів; загальні вимоги безпеки до виробничого устаткування і процесів; вимоги до засобів захисту працюючих; методи оцінки безпеки праці.

Підвищення безпеки виробництва і поліпшення умов праці приводять до зниження виробничого травматизму, професійних захворювань, інвалідності, що зберігає здоров'я робочому персоналу й одночасно приводить до зменшення витрат на оплату пільг і компенсації за роботу в несприятливих умовах праці, на оплату наслідків такої роботи, на лікування.

Організація охорони праці на підприємстві є однією з найважливіших задач і обов'язків адміністрації. Адміністрація підприємств, установ зобов'язана забезпечувати належне технічне устаткування всіх робочих місць і створювати на них умови роботи, що відповідають правилам по охороні праці.

Діюче трудове законодавство встановлює, що відповідальність за організацію праці в цілому по підприємству несуть його директор і головний інженер. По окремих підрозділах така відповідальність покладена на відповідних керівників цих підрозділів (начальників цехів, ділянок, майстрів і т.д.). Вони зобов'язані стежити за протипожежним станом виробничого устаткування, а також за своєчасним збиранням із приміщення спалених відходів виробництва, за відключенням непрацюючих електроприймачів.

Охорона праці (ОП) являє собою систему законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, що забезпечують безпеку роботи, схоронність здоров'я й працездатності людини (робітника) у процесі праці.

Охорона праці охоплює велике коло питань:

- Правових – по трудовому законодавству;
- Технічних – по техніці безпеки роботи й пожежної безпеки;
- Санітарних – по гігієні праці й промисловій санітарії;
- Організаційних – методів безпечної роботи, що забезпечують постановку, і контролю за виконанням заходів щодо ОП і ін.

Техніка безпеки - система організаційних і технічних заходів і засобів, що запобігають впливу на працюючих небезпечних виробничих факторів. Це поліпшення технічних процесів, впровадження нових машин і механізмів, інструментів, автоматизація виробничих процесів, індивідуальний захист.

Техніка безпеки вивчає виробниче устаткування, умови роботи й поведінку людей на роботі (психологія праці).

Пожежна безпека включає комплекс заходів щодо попередження пожеж, підвищенню пожежної безпеки в технології виробництва.

Гігієна праці вивчає вплив умов праці на здоров'я людини й розробляє заходи щодо створення нормальних умов повітряного середовища, освітленості, знижен-

ню шуму й вібрації й інше, з метою зниження негативних впливів на здоров'я людей.

Виробнича санітарія - система гігієнічних і санітарно-технічних заходів і засобів шкідливих факторів, що запобігають вплив, на працюючих.

На здоров'я людини, її життєздатність і життєдіяльність великий вплив мають небезпечні і шкідливі фактори. Небезпечний фактор – це дія на людину, що в певних умовах призводить до травми, а в окремих випадках – до раптового погіршення здоров'я або до смерті. Шкідливий фактор – це фактор дії на людину, який в певних умовах призводить до захворювань або зниження працездатності. До визначаючих ознак небезпечних і шкідливих факторів відносяться: можливість безпосередньої негативної дії на організм людини; ускладнення нормального функціонування органів людини; можливість порушення нормального стану елементів виробничого процесу, в результаті якого можуть виникнути аварії, вибухи, пожежі, травми.

5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів на підприємстві

Небезпечні і шкідливі фактори на підприємстві, за впливом на людину поділяються на три групи: 1) активні; 2) пасивно-активні; 3) пасивні.

До активних належать фактори, що можуть вплинути на людину завдяки своїй енергії. Вони діляться на такі підгрупи:

- механічні фактори, що характеризуються кінетичною і потенціальною енергією і механічним впливом на людину: кінетична енергія рухомих елементів робота, шум, вібрація, прискорення, гравітаційне тяжіння, невагомість, статичне напруження;

- термічні фактори, що характеризуються тепловою енергією та аномальною температурою: температура нагрітих і охолоджених предметів і поверхонь, температура відкритого вогню і пожежі, температура хімічних реакцій і інших джерел.

- електричні фактори: електричний струм, статичний електричний заряд;
- психофізіологічні: стрес, втома, незручна поза та інші.

- хімічні фактори: порушення природного газового стану повітря, наявність шкідливих домішок у повітрі; газоповітряні викиди, у яких міститься пил бокситу, пил вапняку, аерозолі луку, окисі вуглецю, азоту та інше;

У процесі діяльності підприємства в атмосферне повітря викидається, в середньому, близько 4,5 тис. тонн забруднюючих речовин. Основні забруднюючі речовини: тверді - пил бокситу, вапняку, цементу, газоподібні - окисли азоту, вуглецю, аерозолі луку;

До пасивно-активної групи належать фактори, що активізуються за рахунок енергії, носіями якої є людина або обладнання: гострі нерухомі предмети, малий коефіцієнт тертя, нерівність поверхні, по якій переміщується людина і машина, а також нахил і підйом.

До пасивних належать ті фактори, які впливають опосередковано: небезпечні властивості, що пов'язані з корозією матеріалів, накипом, недостатньою міцністю конструкцій, підвищеними навантаженнями на механізми і машини та інше. Формою прояву цих факторів є руйнування, вибухи та інші види аварій.

Фактори характеризуються потенціалом, якістю, часом існування або дії на людину, імовірністю появи, масштабами зони дії.

Акустичне середовище є важливим компонентом в загальному середовищі буття: людина існує в світі звуків. Екстремальні умови в акустичному середовищі створюються в основному при наближенні звукового тиску до больового порогу, або при таких рівнях шуму, що ускладнюють сприйняття звукових сигналів. Больовий поріг звукового тиску складає приблизно 130 дБ. Одна вже при 100 дБ шум викликає загальну втому, знижує працездатність і якість роботи, а при 110-120 дБ діє гнітюче. При рівні шуму 110 дБ неможливе безпосереднє спілкування.

В проектуванні робочих місць необхідно виходити з того, що недопустимий рівень шуму сягає вище 80 дБ і він потребує використання засобів індивідуального захисту працівників. Захисні заходи передбачають створення звукоізоляції виробничих приміщень, використання звукопоглинаючих матеріалів і індивідуальних засобів захисту (заглушки для вух, і т. п.).

5.2 Захисне заземлення установки

Для захисту людей від ураження електричним струмом при пошкодженні робочої ізоляції в електроустановках і переході напруги з струмоведучих частин на металеві не струмоведучі частини застосовується захисне заземлення. Захисне заземлення - навмисне електричне з'єднання із землею або її еквівалентом металевих не струмоведучих частин електричного встаткування, які можуть виявитися під напругою.

Призначення захисного заземлення - усунути ураження людей електричним струмом з появою напруги на конструктивних частинах електричного устаткування. Захисне заземлення слугує для зниження виникаючого на металевих частинах устаткування електричного струму до безпечної величини. Принцип його дії полягає в тому, що між заземленим корпусом устаткування й землею створюється металеве з'єднання великої провідності, тому струм, що проходить через тіло людини, стає не небезпечним для життя.

Заземлювач — провідник (електрод), або декілька металевих провідників, з'єднаних між собою, які з'єднані із землею. Заземлювачі бувають природні, які з'єднані із землею (струмоведучі частини комунікацій, споруд промислового або іншого призначення), які використовують для заземлення, та штучні — які спеціально виконані з метою заземлення.

Заземлюючий провідник — провідник, який з'єднує заземлюючі частини із заземлювачем. Якщо заземлюючий провідник має два або більше відгалужень, його називають магістраллю заземлення.

Вихідні дані для розрахунку захисного заземлення привода робота:

- напруга заземлюючої установки $U = 380 \text{ В}$;
- допустимий опір заземлюючого пристрою: $R_d = 4 \text{ Ом}$;
- тип заземлювача: металевий кут;

Розміри заземлювача:

- довжина кута: $l = 2,5 \text{ м}$;
- глибина закладання кута від поверхні $t_0 = 0,6 \text{ м}$;
- ширина кута: $b = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

- з'єднувальна полоса: протяжна круглого перерізу;
- діаметр $d = 25 \cdot 10^{-3}$ м.

Існує два методи розрахунку захисного заземлення:

- метод коефіцієнту використання електродів (враховує одношарову структуру ґрунту та використовується для розрахунку простих заземлювачів);
- метод наведених потенціалів (враховує багатошарову структуру ґрунту та використовується для розрахунку складних заземлювачів).

Для подальшого розрахунку будемо користуватись методом використання електродів.

1) Визначаємо допустимий опір заземлюючого пристрою для установки до 1000 В ($U = 380$ В) – $R_d = 4$ Ом.

2) Визначаємо питомий опір ґрунту:

$\rho = 30$ Ом·м – для заданого типу ґрунту – чорнозем;

3) Визначаємо розміри та матеріал заземлювача: обираємо кутовий заземлювач, який закладається у землю.

4) Для обраного типу заземлювача знаходимо опір розтіканню одного заземлювача, Ом:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2,1 \cdot l}{b} + \frac{1}{2} \ln \frac{4,2t+l}{4,2t-l} \right) = \frac{30}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \left(\ln \frac{2,1 \cdot 2,5}{40 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4,2 \cdot 1,85 + 2,5}{4,2 \cdot 1,85 - 2,5} \right) = 9,952 \text{ Ом.}$$

$$t = t_0 + \frac{l}{2}, \quad t = 1,85 \text{ м, глибина закладання, яка дорівнює відстані від поверхні}$$

землі до середини заземлювача.

Так як $R_1 > R_d$ – прийняття одного штучного заземлювача неприпустимо, тому необхідно приймати декілька штучних заземлювачів, які з'єднано паралельно.

5) Визначаємо необхідне число паралельних з'єднань:

$\eta_b = 1$ - коефіцієнт використання заземлювачів, який враховує взаємне екранування.

$$n' = \frac{R_1}{\eta_b \cdot R_d} = \frac{9,952}{1 \cdot 4} = 2,488.$$

округлюємо, $n = 2$ – число електродів.

Визначаємо фактичний коефіцієнт використання заземлювачів, який враховує їх взаємне екранування.

$$\eta_0 = 0,81.$$

6) Визначаємо фактичний опір вертикально закладених заземлювачів, Ом:

$$R_{\dot{A}0} = \frac{R_1}{n \cdot \eta_0} = \frac{9,952}{2 \cdot 0,81} = 6,143 \text{ Ом.}$$

Для зв'язку вертикальних заземлювачів використовуємо з'єднувальну полосу. Опір розтіканню з'єднувальної полоси визначаємо як опір розтіканню протяжного круглого заземлювача, розташованого в землі.

7) Визначаємо довжину полоси, яка з'єднує вертикальні заземлювачі:

$a = 1 \cdot l$ м., - відстань між заземлювачами.

$$l' = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 2,5 \cdot 2 = 5,25 \text{ м.}$$

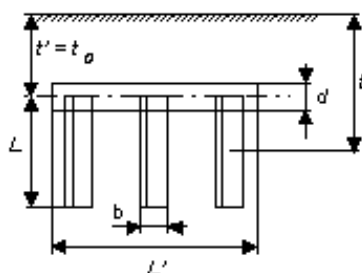


Рисунок 5.1 - Розташування заземлювача в землі

$$t' = t_0 = 0,6 \text{ м.}$$

Визначаємо опір розтіканню полоси:

$$R_{l'} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l'} \cdot \ln\left(\frac{l'^2}{d \cdot t'}\right) = \frac{30}{2 \cdot 3,14 \cdot 5,25} \cdot \ln\left(\frac{5,25^2}{25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6}\right) = 6,836 \text{ Ом.}$$

Визначаємо коефіцієнт використання полоси:

$$\eta_I = 0,82.$$

8) Визначаємо опір полоси:

$$R_I = \frac{R_{l'}}{\eta_I} = \frac{6,836}{0,82} = 8,336 \text{ Ом.}$$

9) Визначаємо фактичний опір заземлюючого пристрою, яке складається з двох вертикальних заземлювачів та з'єднувальної полоси:

$$R_C = \frac{R_{AO} \cdot R_I}{R_{AO} + R_I} = \frac{6,143 \cdot 8,336}{6,143 + 8,336} = 3,537 \text{ Ом.}$$

Порівнюємо: $R_C < R_d$, $3,537 \text{ Ом.} < 4 \text{ Ом.}$

Висновок: розрахований заземлюючий пристрій задовольняє умовам.

5.3 Заходи щодо техніки безпеки

На підприємстві проводять заходи для усунення наступних шкідливих факторів: вібрація, шум, викид пилу у повітря.

Ослаблення вібрацій досягають наступними конструктивними й технологічними мірами: врівноваженням, балансуванням обертових частин для забезпечення плавності роботи машини; усуненням дефектів і розхитаності окремих частин; використанням динамічних гасителів вібрацій; пружною підвіскою агрегатів і амортизацією (включенням проміжних пристроїв між машиною й підставою). Амортизатори виконують у вигляді сталевих пружин, ресор, прокладок з гуми і т.п.

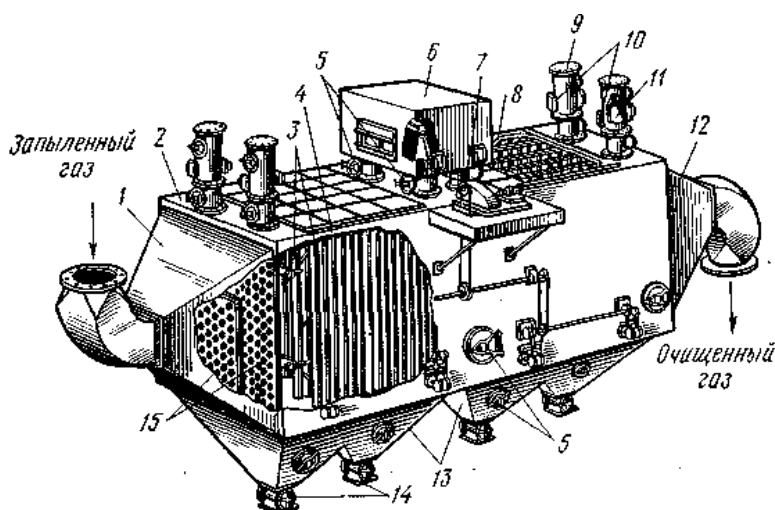
Загальні технологічні процеси супроводжуються виділенням великої кількості пилу. Відповідно припустима концентрація пилу у повітрі не повинна перевищувати 6 мг/м^3 , а запиленість газів та аспираційного повітря – не більше 80 мг/м^3 .

Електрофільтр (рисунки 5.2) – один з найбільш ефективних пилоочисних апаратів. Принцип очищення газу в електрофільтрі заснований на придбанні зваженими в газі частками електричного заряду при впливі електричного поля високої напруги (до 100000 В).

Очищення газів від пилу в електрофільтрах відбувається в такий спосіб.

Між двома різнойменно зарядженими електродами (позитивно зарядженим анодом і негативно зарядженим катодом) пропускається газовий потік, що містить частки пилу. Під впливом електричного поля високої напруги молекули газу або повітря іонізуються, тобто здобувають електричний заряд. Іонізовані молекули переміщуються від одного електрода до іншого, у результаті чого відбувається

електричний розряд у газі й утвориться замкнутий електричний ланцюг між електродами.



1 – дифузор, 2 – корпус, 3 – коронуючі електроди, 4 – осаджуючі електроди, 5 – люки, 6, 9 – ізоляторні коробки, 7 – привод струшуючих механізмів, 8 – кришка монтажного люка, 10 – елементи електричного обігріву ізолятора, 11 – опорно-прохідний ізолятор, 12 – конфузор, 13 – бункери для пилу, 14 – секторні затвори, 15 – газорозподільні решітки.

Рисунок 5.2 – Горизонтальний електрофільтр

Частки пилу під бездіяльністю електричного поля здобувають негативний заряд і під впливом сил притягання переміщуються до поверхні позитивно зарядженого електрода, де осаджуються. Цей електрод називається осаджуючим, а другий — коронуючі. Коронуючі електроди ізольовані від осаджуючих, які заземлюються. Осілий на електродах пил періодично або безупинно струшується в бункер за допомогою вібраторів.

Залежно від напрямку руху запиленого газового потоку електрофільтри підрозділяються на горизонтальні та вертикальні. Електрофільтр одержує живлення від агрегату, що перетворює змінний електричний струм у постійний. Витрата електроенергії в електрофільтрах на очищення 1000 м^3 газу становить $0,13 - 0,2 \text{ кВт/год}$. Продуктивність електрофільтрів по газу від 20000 до $500000 \text{ м}^3/\text{г}$.

Висновки

У кваліфікаційній роботі була розглянута система керування приводом відрізного апарата.

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

Запропонована заміна існуючої системи електропривода подачі 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 здешевшує 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 проекрованої системи підвищить не тільки покращує показники приводу, але і його швидкодія, що обумовлено меншим моментом інерції ротора асинхронного двигуна. За допомогою Vacon двигун може розганятися до оптимальної швидкості повільно, не перегружаючи трансформаторну подстанцію і збільшуючи свій ресурс.

Були розглянуті питання по охороні праці на виробництві, а так само проаналізовані питання охорони навколишнього середовища.

Перелік посилань

1. Peray K. E. Cement Manufacturer's Handbook. – 3rd ed. – Houston : Chemical Publishing Company, 1979. – 784 p. – ISBN 0-8206-0245-0.
2. VACON AC Drives Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/documentation/> (дата звернення: 01.06.2026).
3. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives : Fundamentals, Types and Applications. – 5th ed. – Oxford : Newnes, 2019. – 511 p. – ISBN 978-0-08-102615-1.
4. High-Power Induction Motors [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.siemens.com/global/en/products/drives/electric-motors/high-voltage-motors.html> (дата звернення: 01.06.2026).
5. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p. – ISBN 978-0-13-016743-9.
6. Darta V. A., Rudakov V. V. Vector Control of AC Machines // Proceedings of Leningrad Mining Institute. – 1976. – Vol. LXX, Issue 1. – P. 48–56.
7. Danfoss VACON 100 AC Drives User Manual [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://manuals.plus/danfoss/vacon-100-ac-drives-manual> (дата звернення: 01.06.2026).
8. High Voltage Drives and Motor Control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.danfoss.com/en/products/dds/low-voltage-drives/> (дата звернення: 01.06.2026).
9. 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.
10. Бойко В. А., Голінько В. І., Фрундін В. Є. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та навколишнього середовища» в дипломних проєктах. – Дніпропетровськ, 1986. – 50 с.
11. National Electrical Code Handbook. – Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2014. – 1279 p. – ISBN 978-1-455-90674-1.
- 12.** IEC 60812:2018. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA). – Geneva : International Electrotechnical Commission, 2018. – 165 p. – ISBN 978-2-8322-5915-3.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД ВІДРІЗНОГО АПАРАТА

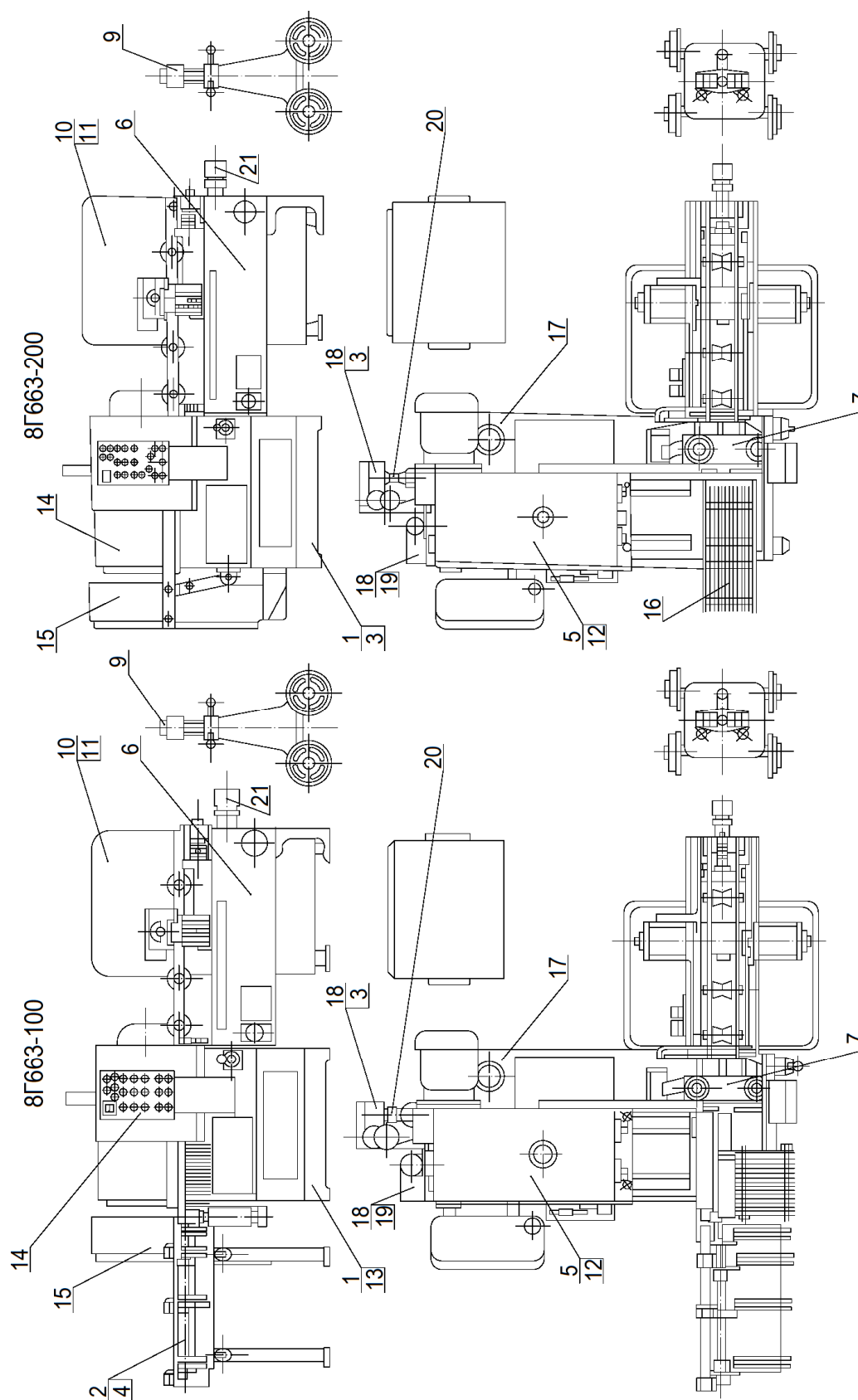


Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

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

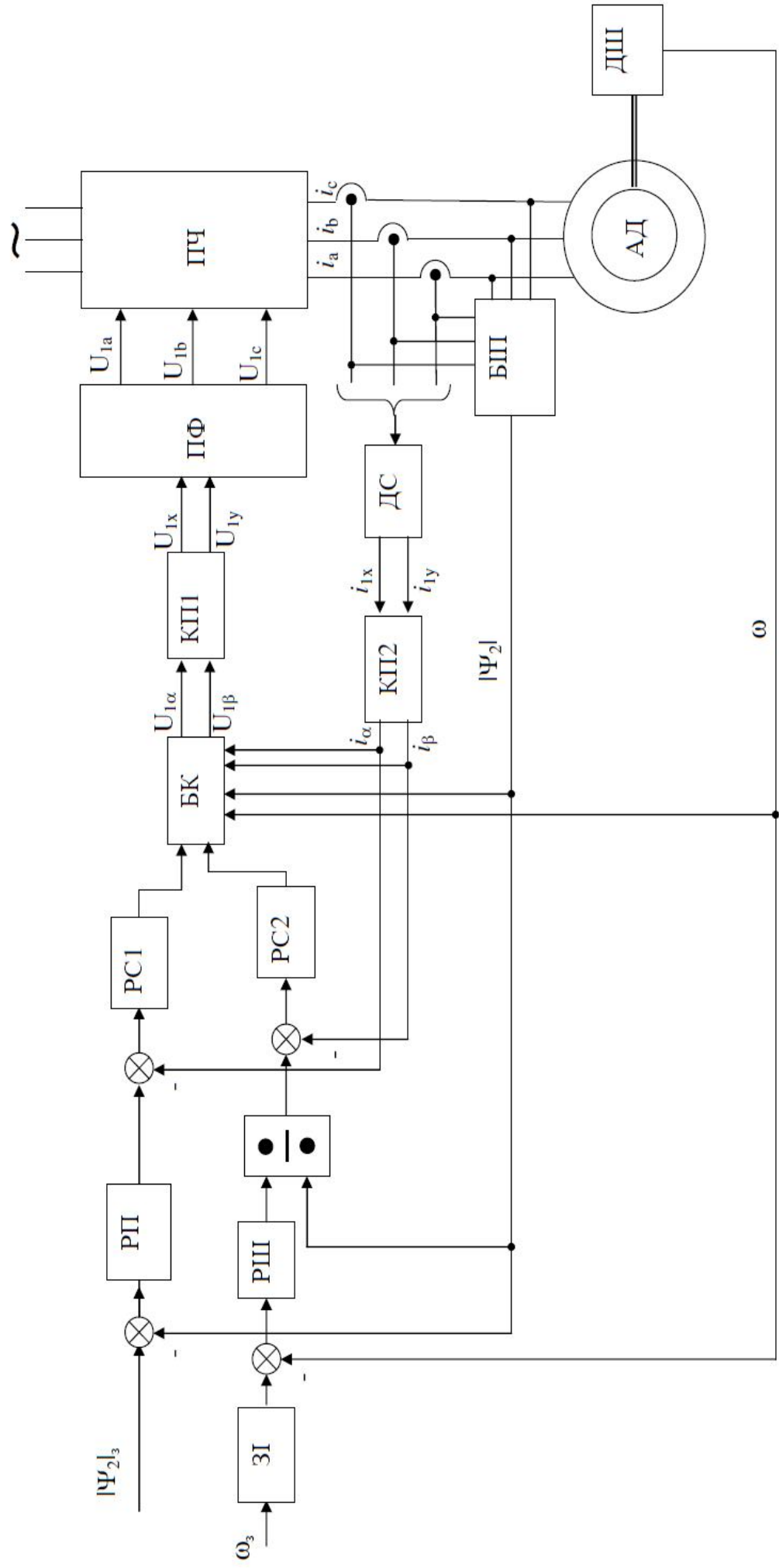


Рисунок А.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Структурна схема системи з керуванням по потокозчепленню ротора

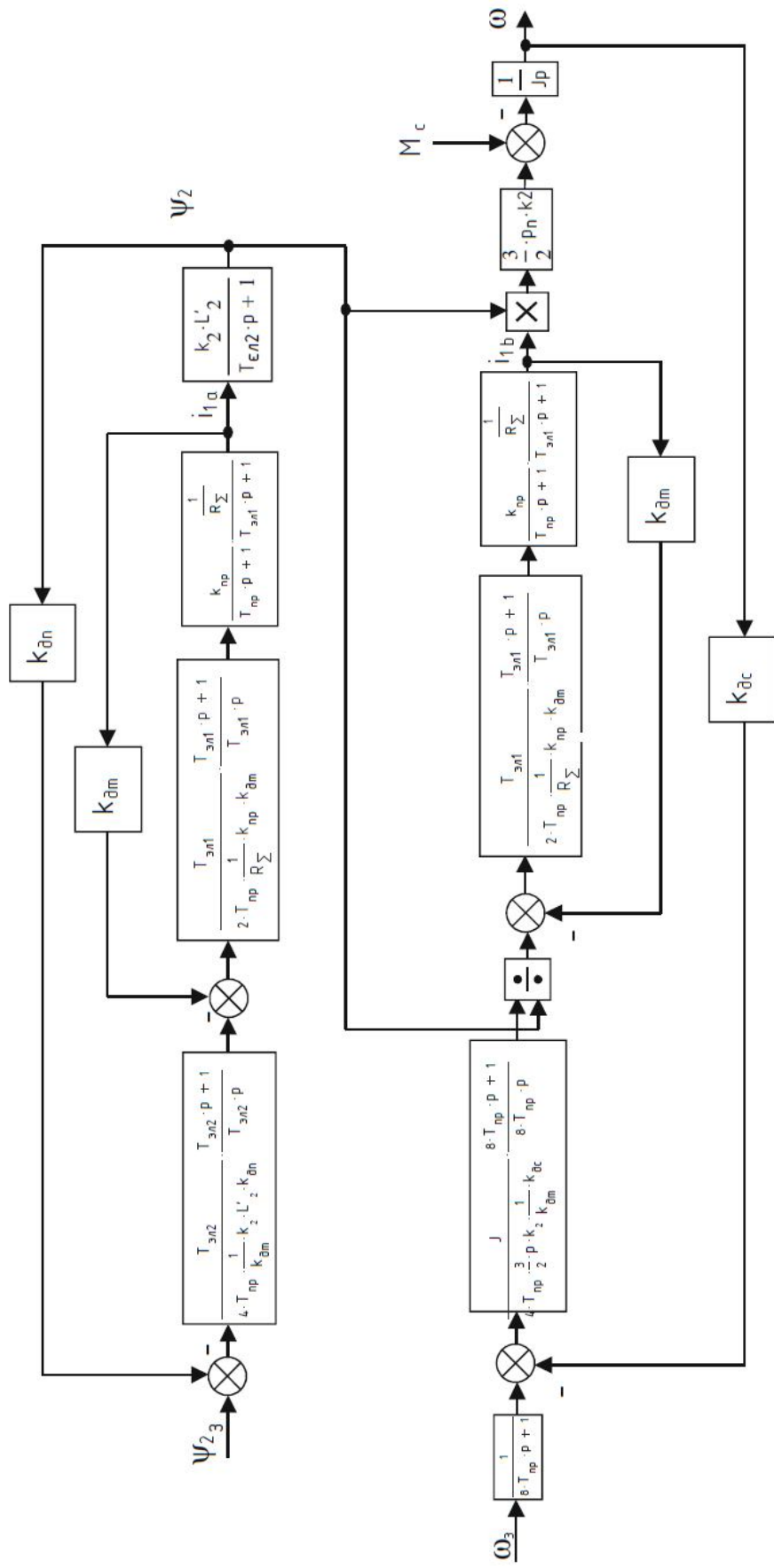
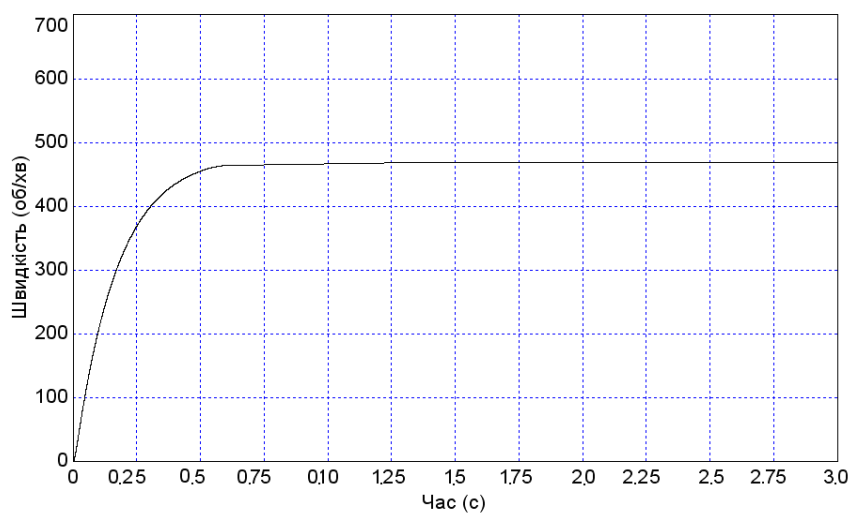
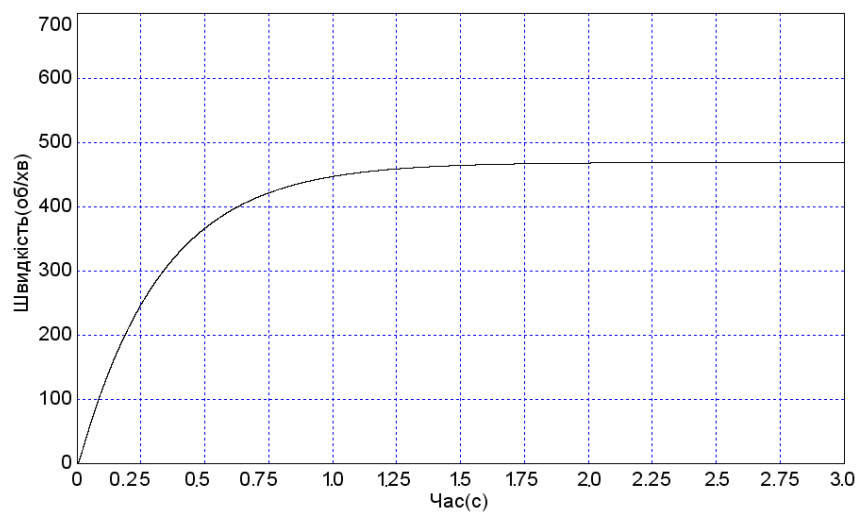


Рисунок А.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

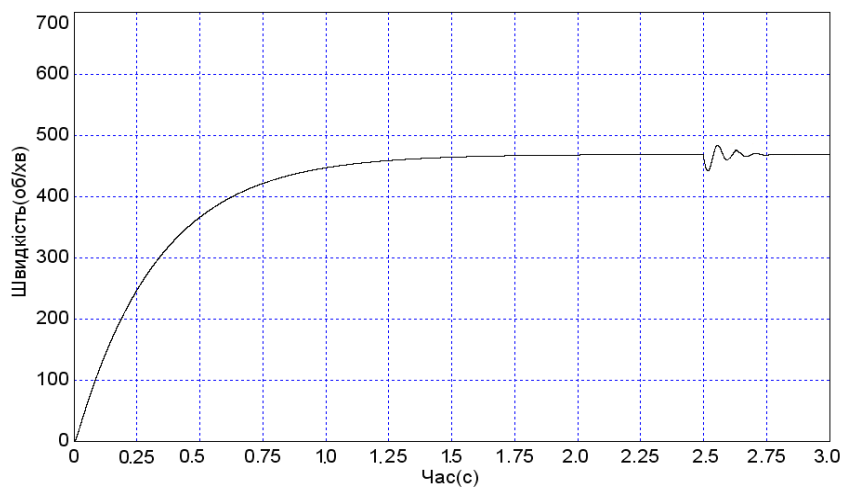
Дослідження динаміки



Перехідний процес при холостому пуску



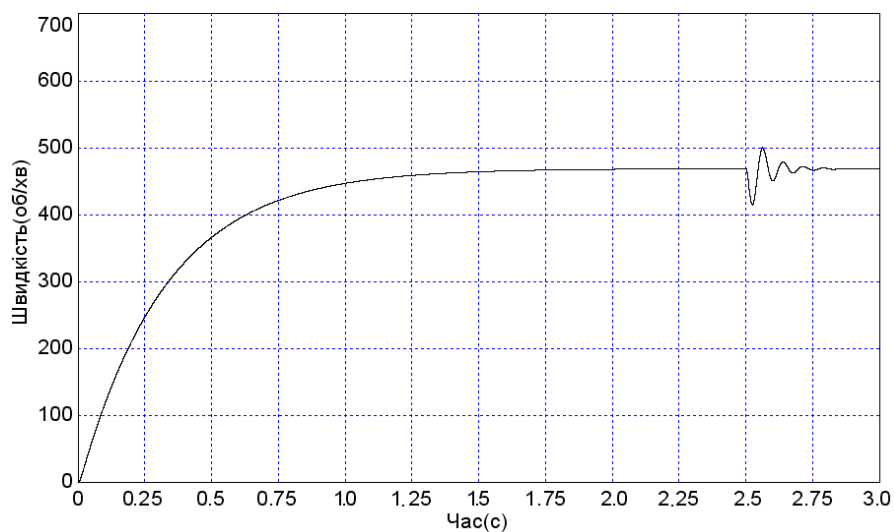
Перехідний процес при пуску в навантаженому стані



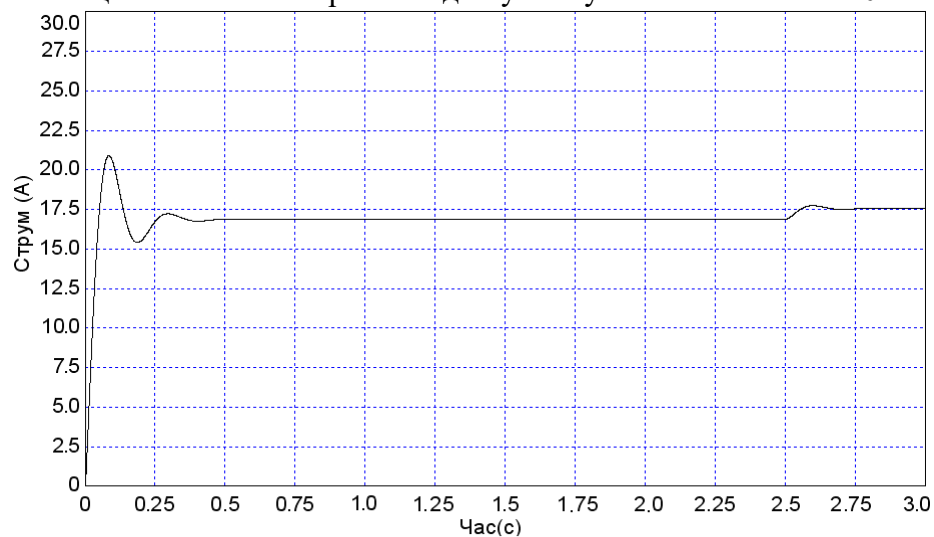
Реакція системи на стрибкоподібну зміну навантаження на 20 %

Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

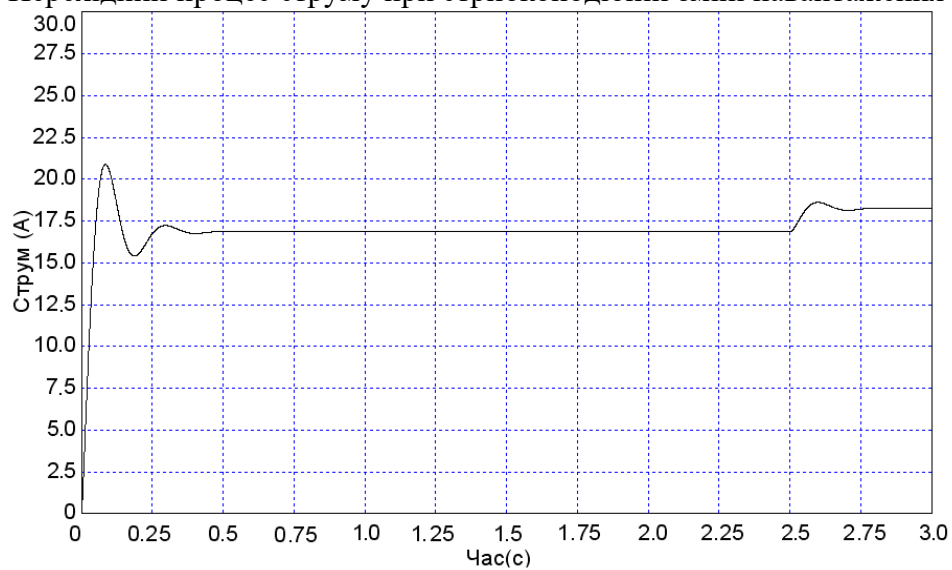
Дослідження динаміки



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