

УДК _____
Інв.№ _____

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
з спеціальності G3 – «Електрична інженерія»

**на тему: “Автоматизований частотний електропривод вакуумного
насосу сталєфасоноливарного цеху ПРАТ «КЗГО»”
(наказ №251с від 18.05.2026)**

КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-23ск

Носков Ярослав Владиславович

Керівник випускової роботи

к.т.н., доц. Сьомочкин Альберт
Борисович

Нормоконтролер:

к.т.н., доц. Сьомочкин Альберт
Борисович

Гарант ОПП:

к.т.н., доц. Пересунько Ігор
Ігорович

Завідувач кафедри ЕІ:

д.т.н., проф. Сінчук Олег
Миколайович

Кривий Ріг 2026 р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:
«Автоматизований частотний електропривод вакуумного насосу
сталефасоноливарного цеху ПРАТ «КЗГО»»

КНУ.РБ.G3.26.251с-09

95 с., 40 рис., 8 табл., 9 літературних джерел

Об'єкт дослідження – ВПФЛ в СФЛЦ а саме АД (ВВН) з ПЧ

Перший розділ описує застосування вакуумно-плівкових ліній у сталефасоноливарному виробництві (СФЛЦ) та зовнішній вигляд водокільцевих вакуумних насосів (ВВН). Наведено технічні параметри насосів, необхідні для стабільного утримання форм при заливці сталі.

У другому розділі здійснена розробка системи керування АД АІР250М4 - ПЧ Veichi AC70. Налаштування ПЧ Veichi AC70, датчику розрідження Danfoss MBS 3000 Vacuum.

У третьому розділі виконано моделювання динамічних режимів роботи приводу вакуумних насосів. Визначено, що ефективність від впровадження замкненої системи приводу АД-ПЧ значно поліпшує показники якості регулювання електропривода замкненої системи порівняно з розімкненою системою АД- без ПЧ, видно що в замкненій системі частотне регулювання дає плавний пуск і стабільну роботу двигунів на протязі всього часу роботи а також автоматичну зміну потужності від частоти забезпечуючи як економічний ефект так і продовжуючи життя двигуну який при роботі в розімкненій системі без ПЧ – втричі швидше б вийшов з ладу. Порівняння вкотре довело що при правильній експлуатації обладнання – будь яка техніка навіть надпотужна - свій строк відпрацює.

Криворізький національний університет
Факультет: електротехнічний
Освітній рівень: бакалавр
Спеціальність: G3 – Електрична інженерія

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Носкова Ярослава Владиславовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: “Автоматизований частотний електропривод вакуумного насосу сталєфасоноливарного цеху ПРАТ «КЗГО»”
2. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація електроприводу вакуумного насосу. Завданнями досліджень є розробка та проектування електромеханічного комплексу вакуумного насосу на новій елементній базі
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода; II. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом; III. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Загальний вид механізму та технічна характеристика; II. Розрахунок статичних характеристик системи привода; III. Розробка системи керування ПЧ-АД; IV. Обґрунтування системи керування та побудування моделі для дослідження динаміки; V. Дослідження динаміки системи електроприводу -1; VI. Дослідження динаміки системи електроприводу -2

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Сьомочкин А.Б.		
II	Сьомочкин А.Б.		
III	Сьомочкин А.Б.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Основні відомості про вакуумний насос, загальний вид, кінематика і режими роботи	30.04.26
2	Обґрунтування і вибір системи електропривода	03.05.26
3	Розрахунок потужності і вибір електродвигуна	06.05.26
4	Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту	10.05.26
5	Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок механічних і енергетичних характеристик	13.05.26
6	Обґрунтування і вибір структури системи керування	20.05.26
7	Розрахунок параметрів елементів системи керування	24.05.26
8	Розробка алгоритмів та програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування	27.05.26
9	Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні	01.06.26
10	Аналіз якісних показників розробленої системи	05.06.26
11	Оформлення пояснювальної записки	10.06.26

Дата видання завдання 30.04.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Носков Я.В.
(ПІБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

Сьомочкин А.Б.
(ПІБ)

ЗМІСТ

Вступ.....	Помилка! Закладку не визначено.
РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок характеристик розімкненої системи привода технологічного механізму 11	
1.1 Основні відомості про автомобільний кран, загальний вид, кінематика і режими роботи.....	11
1.2 Обґрунтування і вибір системи електропривода.	155
1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.	211
1.4 Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту	255
1.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок механічних і енергетичних характеристик.....	29
РОЗДІЛ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом 455	
2.1. Обґрунтування і вибір структури системи керування електроприводом	455
2.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом	46
2.3. Розробка алгоритмів та програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування електроприводом	56
РОЗДІЛ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ 73	
3.1. Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні	73
3.2. Аналіз якісних показників розробленої системи керування	86
Висновки	94
Список використаних джерел	94

ВСТУП

Сучасний науково-технічний прогрес дозволяє автоматизувати виробництво, підвищуючи його безпеку та економічність.

Тема цієї бакалаврської роботи: «Електромеханічне обладнання ПРАТ «КЗГО». Автоматизований електропривод вакуумно-насосної станції формувальної лінії сталєфасоноливарного цеху».

Ливарне виробництво передбачає заливку розплаву у разові (піщані) або постійні (металеві) форми. Недоліки традиційного лиття в земляні форми зумовили появу спеціальних методів (кокільного, під тиском тощо). Серед них виділяється революційний V-процес (вакуумно-плівкове формування), винайдений у 1971 році в Японії (концерн Sinto). Технологія базується на використанні сухого піску, вакууму та плівки без бентоніту. Сучасні лінії ВПФ забезпечують підприємствам високу конкурентоспроможність, а одним із перших в Україні цю установку освоїло ТОВ «Дніпропромліт». У 2010 році вакуумно-плівкову формувальну лінію ввели в експлуатацію на ПРАТ «КЗГО».

Актуальність роботи зумовлена широким використанням водокільцевих вакуум-насосів завдяки їхнім перевагам: чистоті вихідного повітря, стійкості до забруднень, ізоtermічності стиснення та простоті конструкції.

У процесі вивчення технології виробництва продукції на вакуумно-плівковій формувальній лінії було встановлено, що при проектуванні лінії було допущено ряд недоліків. Людський фактор у роботі вакуумно-плівкової лінії проявляється через помилки та несвоєчасні дії персоналу, що призводять до перевитрат енергії, простоїв і збоїв обладнання. Основними проблемами є робота вакуумних насосів під час простоїв, неточний контроль параметрів вакууму, запізніле виявлення відхилень тиску, ігнорування витоків та залежність виробничих процесів від людських ресурсів.

Будь-які затримки на окремих етапах виробництва спричиняють простої всієї лінії й неефективне використання обладнання. Автоматизація із

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

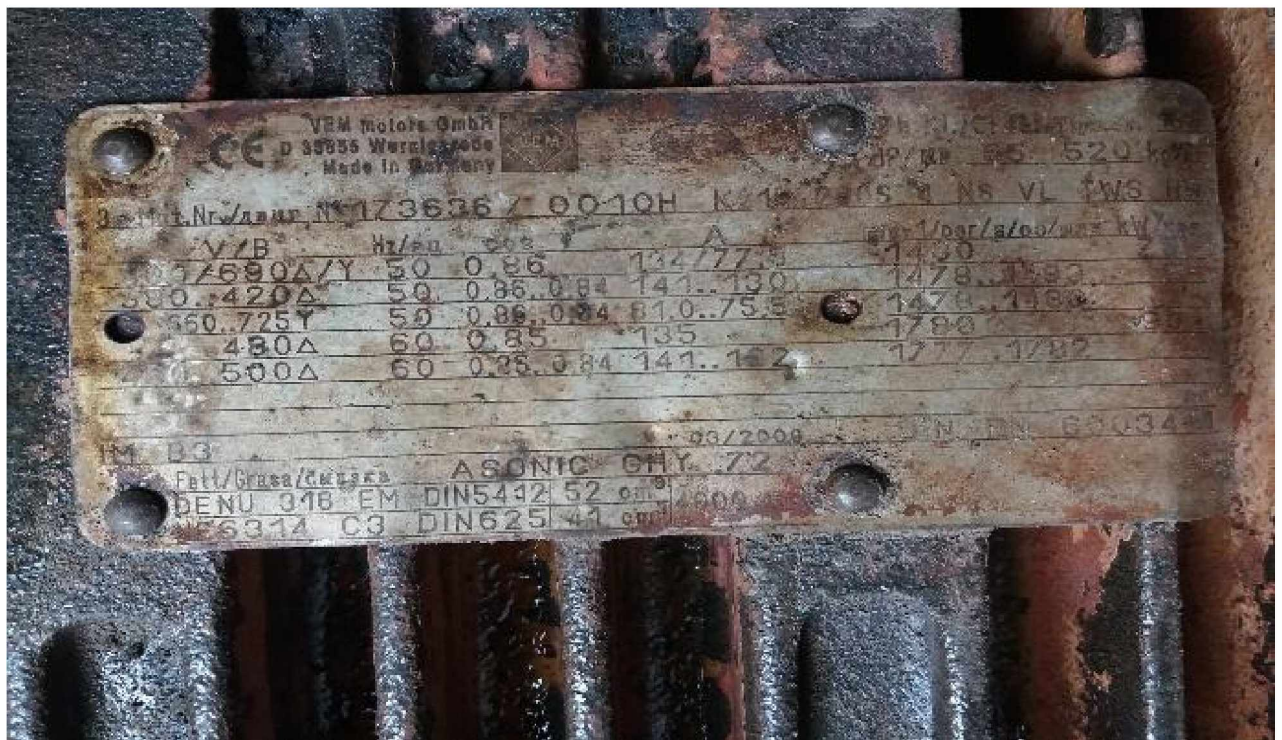
застосуванням датчиків тиску, контролерів і частотних перетворювачів дозволяє усунути ці недоліки, забезпечуючи автоматичне регулювання вакууму, стабільну роботу системи, зниження енергоспоживання та підвищення надійності технологічного процесу. Вони в процесі експлуатації впливають на якість і обсяги виробництва, а також на економічні показники й собівартість продукції, що випускається.

Автоматизація системи дозволить знизити енерговитрати, усунути людський фактор і підвищити надійність станції за рахунок автономного контролю вакууму та роботи обладнання.

Вакуум у ливарному виробництві застосовується для видалення повітря й газів із форм, запобігання пористості та раковинам, покращення заповнення складних елементів і захисту металу від окиснення. У вакуумно-плівковому формуванні (V-процес) форма створюється з сухого кварцового піску без зв'язуючих матеріалів і ущільнюється за рахунок атмосферного тиску, який підтримується вакуумними насосами. Також вакуум використовується в литті пластмас для дегазації матеріалів і видалення бульбашок, що підвищує якість виробів.

Відтак вакуумні насоси є «серцем» лінії, які працюють у важкому режимі. Запуск здійснюється в супроводі великих пускових струмів, що в свою чергу знижує їх експлуатаційні та ізоляційні властивості. За період 2018 р. вийшло з ладу 10 одиниць електродвигунів, які вплинули на показники невиконання плану виробництва, а також призвели до збільшення браку через обвалення форм під час зниження розрідження у вакуумній системі формувальної лінії. Фото шильдику наведено нижче у додатку 1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Додаток 1 - Шильдик старого двигуну насосу

Мета роботи: підвищення надійності роботи вакуумних насосів та скорочення експлуатаційних витрат вакуумно-насосної станції.

Завдання роботи:

1. Вивчити поточний стан системи захисту електродвигунів насосів формувальної лінії.
2. Удосконалити систему електроприводу вакуумних насосів. Дослідити методи покращення умов роботи, захисту та режимів пуску електродвигунів.

Важливою тенденцією в розвитку регульованого електроприводу змінного струму є використання двигунів, що живляться від перетворювачів частоти. Застосування такого електроприводу дозволяє суттєво підвищити якість технологічного процесу та зменшити споживання електроенергії як у сталому режимі, так і в перехідних процесах.

Одним із найбільш ефективних типів регульованого приводу є система «напівпровідниковий перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ - АД). Сучасні перетворювачі частоти забезпечують регулювання швидкості

асинхронних двигунів, яке за своєю якістю та точністю не поступається приводам постійного струму. Але про це трохи згодом, почнемо з основ: У сталєфасоноливарному цеху (СФЛЦ) вакуумно-плівкові лінії (ВПФЛ) застосовуються на дільницях виготовлення високоточних ливарних форм за технологією *V-процесу*. Цей метод є ключовим для отримання сталевих виливків із мінімальними припусками на механічну обробку та високою якістю поверхні (шорсткість - 40–80 мкм). Основне призначення ліній у СФЛЦ — автоматизоване формування, заливка сталі та охолодження форм, де замість хімічних сполучних для ущільнення сухого кварцового піску використовується сила вакуумного тиску. Основним технологічним оснащенням лінії є двосторонні опоки розміром **1600×1600 мм** із висотою верхньої та нижньої напівформ **400/400 мм**. Такий габаритний розмір розрахований на виготовлення середніх та великих фасонних сталевих деталей. Великий периметр ущільнення та значний внутрішній об'єм суміші в опоці даного типу потребують високої швидкості початкового відкачування повітря для миттєвої фіксації геометрії форми. А це означає що й потужність двигунів має бути відповідно підбрана з запасом, а це 75-90 кВт.

Головним вузлом центральної вакуумної станції ВПФЛ є водокільцеві вакуумні насоси (ВВН). Конструктивно ВВН являють собою горизонтальні агрегати моноблочного чи рамного виконання. Зовнішній вигляд насоса складається з циліндричного чавунного корпусу, ексцентрично розташованого ротора з лопатками (робочого колеса) та підведених трубопроводів оборотного водопостачання. Завдяки відсутності тертьових деталей у робочій зоні, насоси ВВН є стійкими до залишків кварцового пилю та ефективно охолоджують гарячі гази, що виділяються під час деструкції плівки від контакту з розплавленою сталлю.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Базові технічні параметри систем ВВН для стабільного ведення V-процесу:

- **Робоче розрідження (вакуум):** від -0,5 до -0,6 бар (забезпечує кам'яну твердість сухого піску в опоці 1600×1600 мм).
- **Продуктивність відкачування:** від 25 до 50 м³/хв (для компенсації втрат тиску та утримання групи форм на конвеєрі).
- **Температура робочої води:** не вище +20°C (контролюється за допомогою чиллерів чи градирень для запобігання зриву вакууму)

Відповідно на підприємстві ПрАТ «КЗГО» й було вже побудовано таку систему оборотного водопостачання до якої і приєднані наші насоси.

А підбір насосу для конкретної лінії - розраховується за об'ємом або габаритами однієї опоки. Ось як виглядає ця проста формула, (але її знають лише досвідчені металурги):

Загальний геометричний об'єм форми (верх + низ): (1.0)

$$1.6 * 1.6 * (0.4 + 0.4) = 2.048 \text{ м}^3$$

Тож перейдемо вже ближче до розділу 1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок характеристик розімкненої системи привода технологічного механізму

1.1 Основні відомості про вакуумний насос, загальний вид, кінематика і режими роботи

На ПРАТ «КЗГО» в СФЛЦ - сталеве лиття методом вакуумно-плівкового формування (V- process) проводиться на установці VDT-6 виробництва HEINRICH WAGNER SINTO (Німеччина), створеної за технологією Sintokogio Ltd. (Японія), з розміром опоки 1600x1600x400/400 мм.

Опока у ливарному виробництві - пристрій для утримування [формувальної суміші](#) під час виготовлення [ливарної форми](#), її транспортування та заливання рідким металом. Вигляд опоки круглої форми наведено у додатку 2.

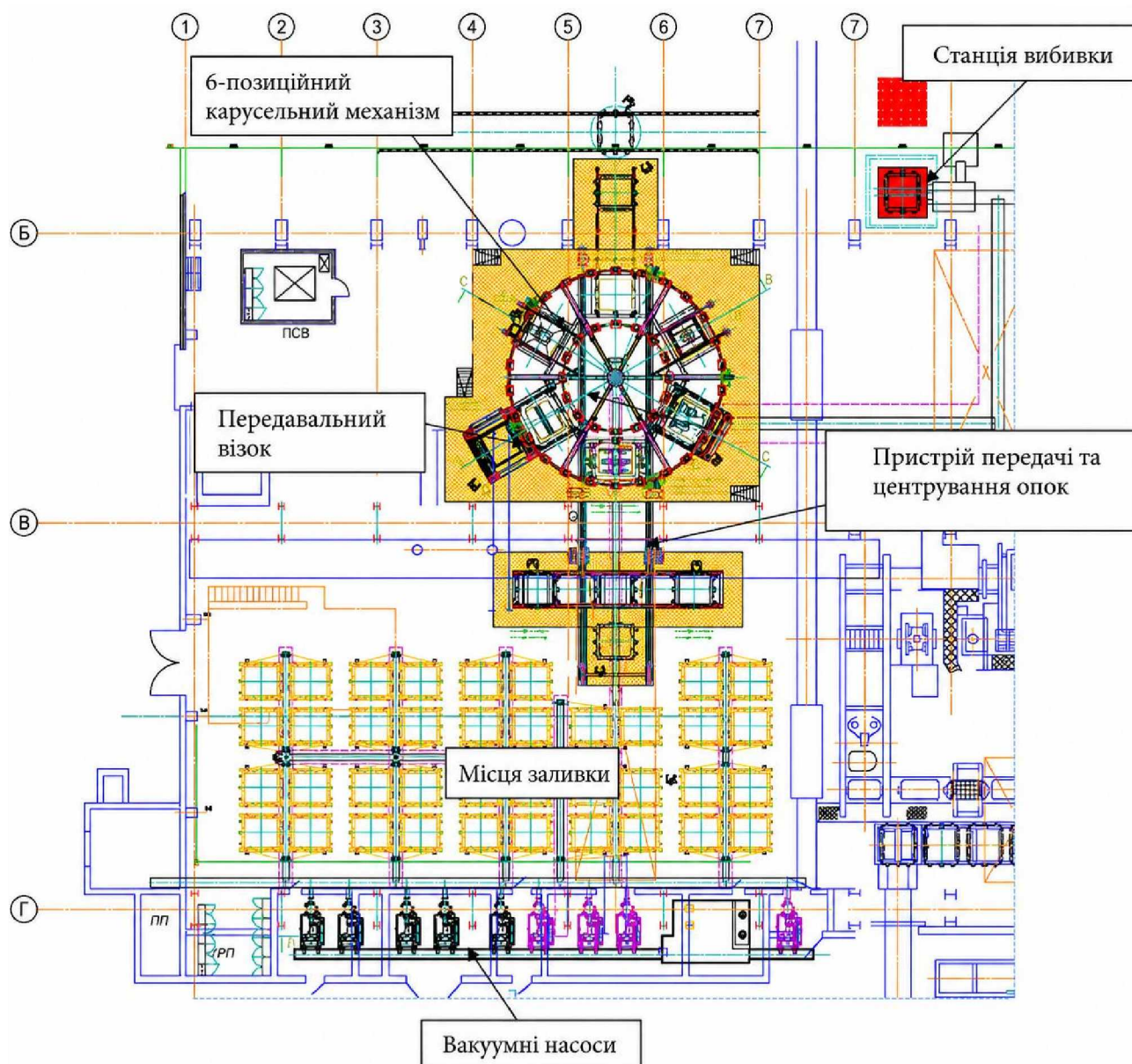


Додаток 2 - Опоки круглої форми для лиття великих [виливків](#)

Продуктивність установки HWS VDT 6 це 6-10 форм / год.

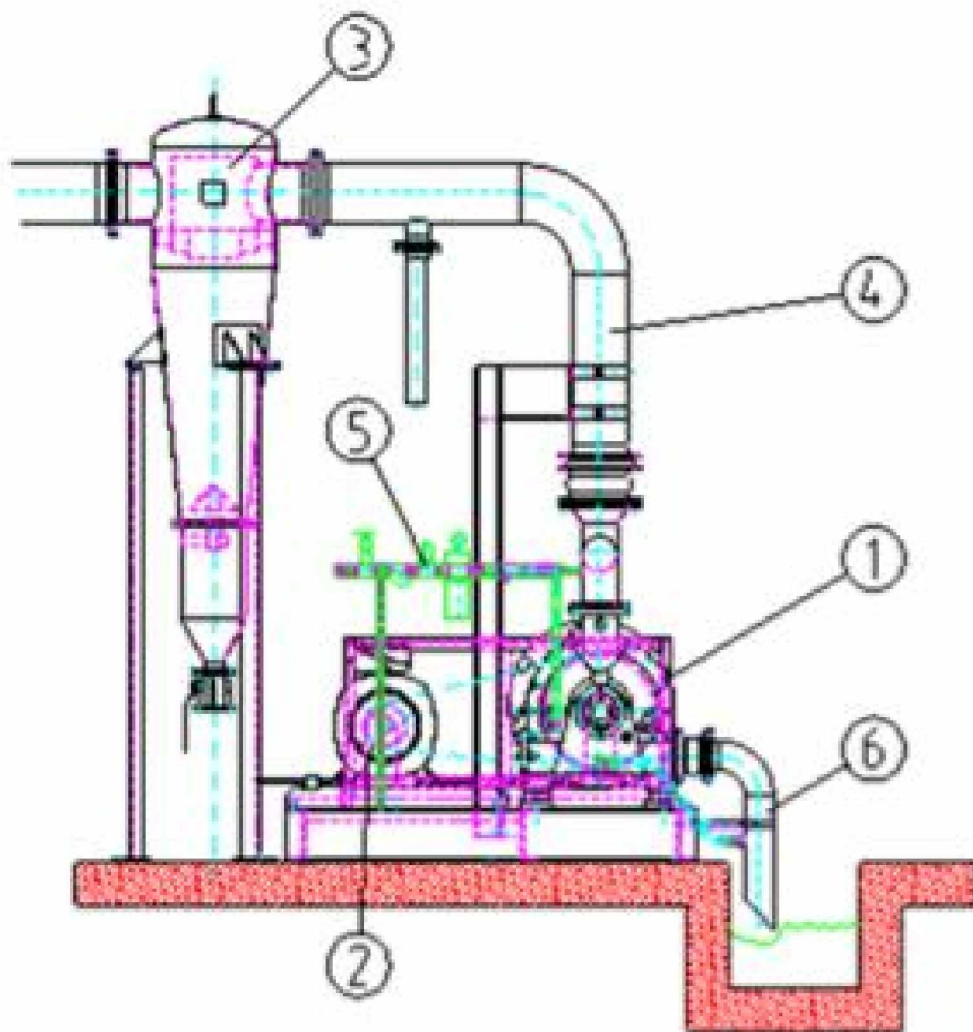
					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.Г3.26.251с-09</i>			
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат				
Розробив.	Носков Я. В.				РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода.	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів.	Сьомочкін А.Б.						11	
Рецензія.						КНУ Каф. ЕІ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.								
Затверд..	Сінчук О.М.							

У склад лінії входить 9 вакуумних насосів: 5 робочих і 4 резервні або в ремонті. Вони забезпечують безперервну подачу вакууму на всіх етапах формування, транспортування та заливки сталевих відливок до їх кристалізації. Розташування насосів наведено в додатку 3.



Додаток 3 - Схема розташування обладнання ВПФЛ

Тож щоб не описувати все це детально, перейдемо до суті - це насоси, схеми яких додані нижче.



1 – Електродвигун; 2 - Вакуумний насос; 3 - Запобіжний клапан;
4 – Циклон; 5 – Підвід води для охолодження насосу; 6 - Зливний
патрубок.

Додаток 4: Схема будови вакуумного насоса

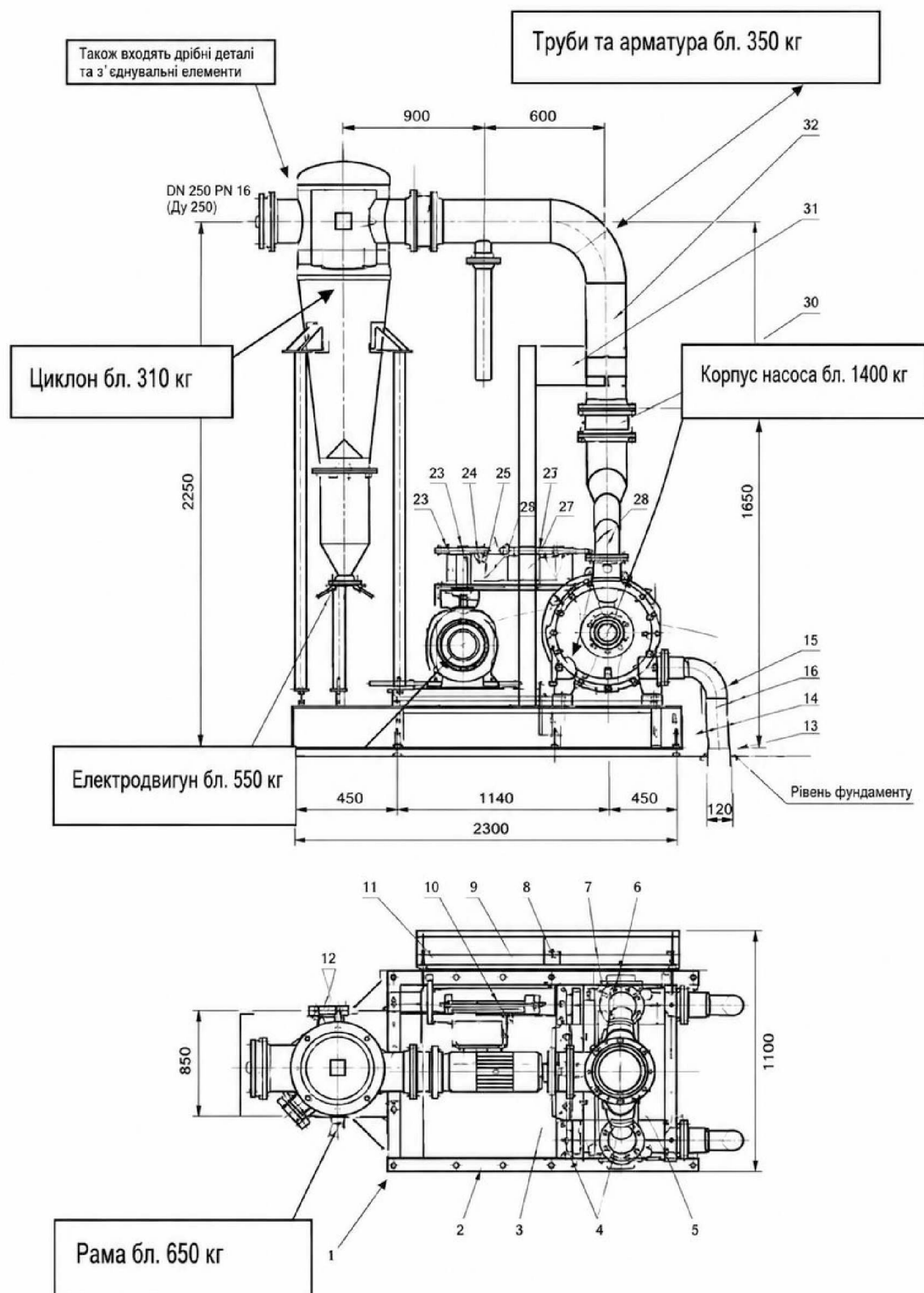
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

13

Вага частин вакуумного насоса



Додаток 5: Габарити вакуумного насоса в зборі

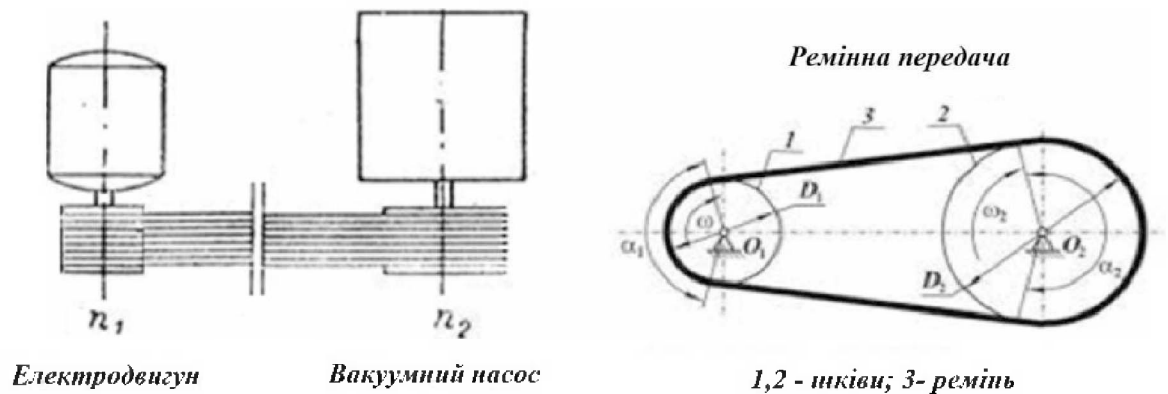
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

14

Вакуумний насос приводиться в дію за допомогою електродвигуна потужністю 75 кВт кожний, який приводить його в дію ремінною передачею як зображено в додатку 6.

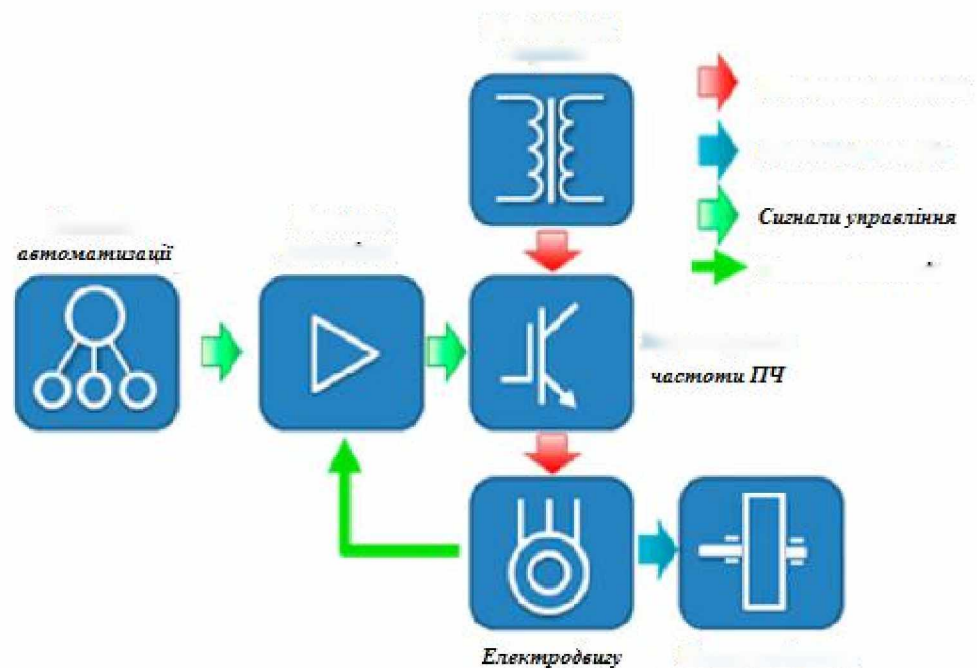


Додаток 6 - Кінематична схема приводу вакуумного насоса (передатне число ремінної передачі $u = 2$)

1.2 Обґрунтування і вибір системи електропривода.

Електропривод — це автоматизована електромеханічна система, що складається з електродвигуна, перетворювача енергії та системи керування. Він використовується для приводу більшості промислових механізмів, транспорту та побутової техніки й споживає значну частину виробленої електроенергії, забезпечуючи основу сучасного автоматизованого виробництва. Сучасні електроприводи характеризуються широким застосуванням напівпровідникових перетворювачів і мікропроцесорних систем керування. Це дозволяє точно регулювати швидкість, момент і режим роботи двигуна, забезпечувати плавний пуск, обмеження пускових струмів, реверс, підвищення енергоефективності та покращення коефіцієнта потужності. Найбільш поширеним є частотне регулювання швидкості асинхронних двигунів, яке забезпечує широкий діапазон керування без збільшення ковзання та з високою стабільністю характеристик. Частотні перетворювачі виконують випрямлення

та формування необхідної частоти живлення і можуть мати різні схеми керування. Структура сучасного електроприводу наведена в додатку 7



Додаток 7 - Структура сучасного електроприводу

Кращі в своєму класі перетворювачі частоти (ПЧ) дозволяють регулювати швидкість двигуна при підтримці номінального моменту. ПЧ також підтримують постійний момент на валу двигуна при змінному, чи постійному навантаженні.

- Пускає двигун і плавно виводить на номінальний режим;
- Обмежує зростаючий струм (скачки струму) до мінімального рівня - не вище номінального значення;
- Регулює момент під час пуску;
- Забезпечує максимальний момент як в час пуску, так і під час роботи;
- Регулює швидкість обертання двигуна;
- При необхідності забезпечує обертання в зворотному напрямку;
- Підвищує $\cos\phi$ системи ПЧ-АД до рівня 0,97 ... 0,99%;
- Енергозбереження;
- Паразитні гармоніки в спектрі споживчого з мережі струму;

Чому саме водокільцевий вакуумний насос ВВН1-90 та чому інші різні варіанти систем АД – не варіанти?

Потужність двигуна: Електродвигун АИР250М4 має потужність 90 кВт. Це надзвичайно висока потужність для вакуумних систем, яка застосовується лише у важкій промисловості (хімічна, целюлозно-паперова, цукрова, металургійна, великі централізовані вакуумні системи). У ливарних цехах цей агрегат є серцем системи V-процесу (вакуумно-плівкового формування) або великих комплексів вакуумного лиття.

Швидкість обертання: Маркування «М4» означає, що двигун є чотириполюсним із синхронною частотою обертання 1500 об/хв (фактична під навантаженням — близько 1480 об/хв). Саме на таких обертах працюють великі водокільцеві помпи (наприклад, серії ВВН1-90, ВВН2-90 або закордонні аналоги NASH).

Частотний перетворювач: ПЧ Veichi AC70 є загальнопромисловим векторним інвертором. Його встановлюють на ВВН для плавного пуску (оскільки водокільцеві насоси мають важкий запуск через наявність води в робочій камері), оптимізації енергоспоживання та точного регулювання рівня глибини вакууму в технологічному процесі.

Чому в ливарні використовують саме ВВН?

Для створення вакууму у формах потрібні особливі умови, яким ідеально відповідає водокільцевий тип насоса:

- Стійкість до пилу та піску: Під час вакуумування форми в насос разом із повітрям неминуче прориваються дрібні часточки кварцового піску, протипригарного покриття та пилу. Водокільцевий насос використовує воду як робоче тіло, тому він просто «вмиває» цей пил без

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

шкоди для внутрішніх деталей. Будь-який масляний або сухий роторний насос від піску заклинив би за кілька годин.

- Робота з гарячими газами: Під час заливки металу виділяються гарячі гази та пари від вигорання плівки чи зв'язуючих матеріалів. Вода всередині ВВН миттєво охолоджує ці гази та конденсує пари.

- Величезна продуктивність: Двигун на 90 кВт забезпечує відкачування десятків кубометрів повітря за хвилину (наприклад, насоси типу ВВН1-50 або ВВН1-90). Це необхідно, щоб миттєво створити та стабільно утримувати вакуум у великих опоках, інакше піщана форма просто розсиплеться під тиском розплавленого металу.

Роль частотника Veichi AC70 у цьому процесі

У ливарних процесах інвертор виконує надважливу технологічну роль:

1. Утримання форми: Поки метал заливається і застигає, частотник тримає стабільний розрідження (зазвичай в межах -0.5...-0.6 бар).

2. Економія між заливками: Коли нова форма ще готується, частотник знижує оберти двигуна АІР250М4 до мінімуму, щоб 90-кіловатний гігант не споживав зайву електроенергію вхолосту.

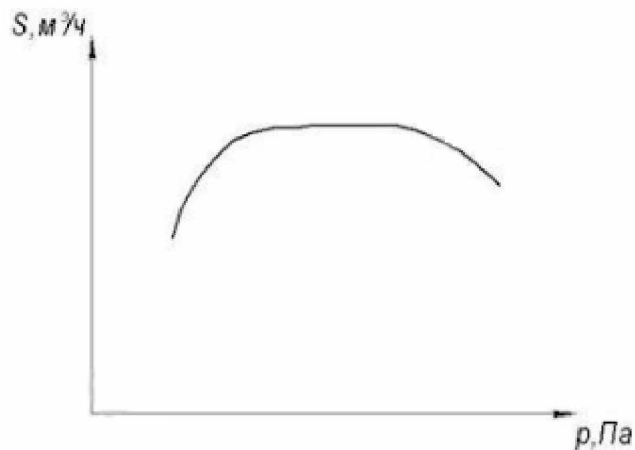
Характеристики вакуумних насосів, найчастіше представляється у вигляді графічної залежності швидкості дії насоса, від тиску на стороні всмоктування:

(1.1)

$$S = f(p).$$

Ці характеристики вакуумних насосів зображені в додатку 8.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Додаток 8 - Характеристика вакуумних насосів

Робочий тиск вакуумного насоса, це такий тиск, при якому використання насоса найбільш ефективно. Час відкачування від тиску запуску до граничного залишкового тиску.

Принцип дії водо-кільцевого вакуумного насоса

Вакуумні насоси - одноступінчасті водо-кільцеві машини - застосовуються для створення розрідження на всмоктуванні в вакуумній зоні.

У циліндричному, розташованому ексцентрично до валу корпусі обертається ходове колесо.

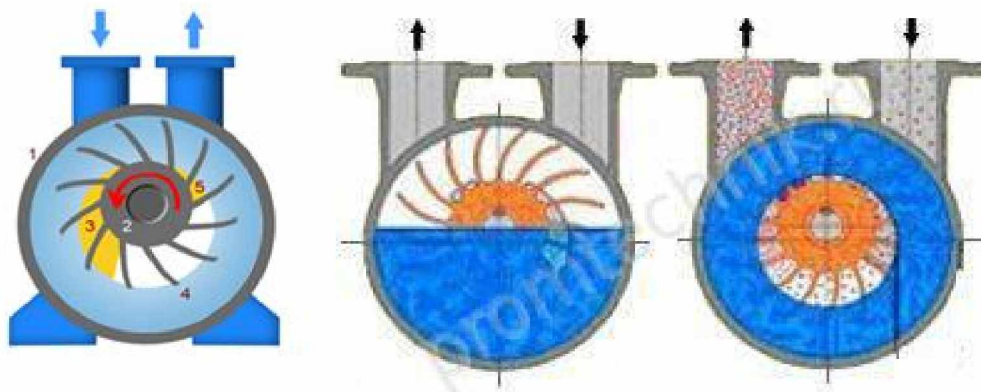
За рахунок обертання ходового колеса робоча рідина утворює в корпусі синхронно кільце, що обертається рідини, яке за допомогою поршня переміщається в осередках ходового колеса. Воно піднімається на сторону всмоктування від лопаток ходового колеса і в зростаючому обсязі забирає газ по осі через канавку всмоктування. Із напірної сторони кільце рідини знову наближається до звужуючої сторони ексцентрика і виштовхує ущільнений газ по осі через напірну канавку. Вакуумні насоси підходять для подачі сухого і рідкого газу, котрий має небезпечні властивості, а також для робочих рідин, які не є горючими, вибуховими, токсичними або агресивними. В якості робочої рідини застосовується звичайна вода або інші рідини. Разом з

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ушільненим газом також постійно витісняється робоча рідина. Тому кільце рідини має безперервно поповнюватися новою, охолодженою робочою рідиною. Крім основної робочої функції завданням кільця рідини є також відведення теплоти стиснення, ушільнення зазорів між ходовим колесом і регулювальними шайбами, а також охолодження внутрішніх частин сальника. Тому слід застосовувати якомога більш охолоджену робочу рідину.

У робочій рідині не повинно міститися твердих матеріалів, таких як, шлам та пісок, інакше насос буде схильний до сильного зносу. При наявності сторонніх домішок попередньо повинні включатися відповідні фільтри, циклони або сита.

При виникненні небезпеки вапняного осаду щодо робочої води і води гідравлічного затвора має бути вжито відповідних заходів.



1 - корпус; 2- робоче колесо; 3- всмоктувальне вікно; 4- робоча рідина; 5- нагнітаюче вікно

Додаток 9 - Будова та принцип дії вакуумних насосів

У додатку 9 показана робоча камера в розрізі, в якій ексцентрично встановлено робоче колесо з вигнутими лопатками і є два вікна для входу (всмоктування) і виходу (нагнітання) відкачуваного газу, (повітря). Так як робоче колесо встановлено не по центру камери відстань до стінок камери у колеса неоднакове по всьому периметру. У робочу камеру до певного рівня залита вода. Після того як робоче колесо починає обертатися рідина утворює рівномірний кільце по внутрішній частині робочої камери (через

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

відцентрової сили). Лопатки робочого колеса разом з рідинним кільцем утворюють осередки різного розміру, так як робоче колесо розміщено ексцентрично. Газ потрапляє в осередок із відкачувального трубопроводу через вхідний патрубок насоса і далі через вхідне вікно (всмоктування). Розмір осередку зменшується, у міру обертання колеса, в результаті чого газ всередині осередку стискається, створюється надлишковий тиск. Коли цей осередок проходить повз вікна виходу (нагнітання), стиснений газ проходить через отвір і виходить з насоса під тиском. Далі розмір осередку знову збільшується і в ній створюється розрідження, завдяки якому газ знову засмоктується через вікно входу (всмоктування) газу. Цикл повторюється. Товщина рідинного кільця пропорційна рівню вакууму і обернено пропорційна продуктивності насоса (більше вакуум - менше продуктивність).

1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.

Електропривод вакуумного насоса є основним елементом вакуумно-насосної станції вакуумно-плівкової формувальної лінії. Його призначення полягає у забезпеченні необхідної продуктивності насоса та підтриманні заданого рівня розрідження в системі формування.

Для створення вакууму використовується водокільцевий вакуумний насос типу ВВН1-90. Даний тип насосів характеризується високою надійністю, стійкістю до попадання пилу та вологи, можливістю роботи з газопаровими сумішами та стабільними характеристиками у широкому діапазоні навантажень.

Потужність приводу визначається виходячи з параметрів вакуумного насоса та необхідної продуктивності системи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.1 Методика розрахунку потужності

Ізотермічна потужність вакуумного насоса визначається за формулою:

(1.2)

$$P_{\text{із}} = p_1 Q \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

де:

- p_1 – абсолютний тиск на вході насоса, Па;
- p_2 – абсолютний тиск на виході насоса, Па;
- Q – продуктивність насоса, м³/с.

Потужність на валу насоса визначається:

(1.3)

$$P_{\text{вал}} = \frac{P_{\text{із}}}{\eta_{\text{н}}}$$

де $\eta_{\text{н}}$ – коефіцієнт корисної дії насоса.

Для компенсації втрат у передачі та забезпечення необхідного запасу потужності потужність двигуна визначається:

(1.4)

$$P_{\text{дв}} = \frac{k_3 \cdot P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{пер}}}$$

де:

- $k_3 = 1.15$ – коефіцієнт запасу;
- $\eta_{\text{пер}} = 0.95$ – ККД ремінної передачі.

На основі проведених розрахунків встановлено, що необхідна потужність приводу вакуумного насоса становить близько 82 кВт. Враховуючи стандартний ряд електродвигунів, приймається асинхронний двигун потужністю 90 кВт.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.2 Вибір та технічні характеристики електродвигуна

Для приводу вакуумного насоса обрано трифазний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором типу АІР250М4.

Технічні характеристики ел.двигуну наведені в додатку 10.

Параметр	Значення
Тип двигуна	АІР250М4
Номінальна потужність	90 кВт
Номінальна напруга	380 В
Номінальна частота	50 Гц
Номінальний струм	170 А
Номінальна швидкість	1480 об/хв
ККД	94 %
cosφ	0.89
Ступінь захисту	ІР55
Клас ізоляції	F

Додаток 10 - технічні характеристики ел.двигуну АІР250М4

1.3.3 Кінематичний розрахунок приводу

Для забезпечення необхідної частоти обертання валу вакуумного насоса використовується клинопасова передача з передатним числом:

$$u = 2$$

Розрахункова частота обертання валу насоса:

(1.5)

$$n_{\text{нас}} = \frac{n_{\text{дв}}}{u}$$
$$n_{\text{нас}} = \frac{1480}{2} = 740 \text{ об/хв}$$

Отримане значення відповідає рекомендованому режиму роботи насоса ВВН1-90.

Для передачі потужності застосовується шестипасова клинопасова передача профілю SPC.

(1.6)

Приймаємо:

$$d_1 = 315 \text{ мм}$$

$$d_2 = 630 \text{ мм}$$

$$a = 1000 \text{ мм}$$

Швидкість руху паса:

$$v = \frac{\pi d_1 n}{60000}$$

$$v = \frac{3.14 \cdot 315 \cdot 1480}{60000} = 24.4 \text{ м/с}$$

Отримане значення не перевищує допустиму межу 30 м/с.

1.3.4 Розрахунок крутних моментів

Номінальний момент двигуна:

(1.7)

$$M_{\text{ном}} = \frac{9550P}{n}$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{9550 \cdot 90}{1480} = 580.7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приймаємо:

$$M_{\text{ном}} = 581 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальний момент:

(1.8)

$$M_{\text{max}} = 2.5M_{\text{ном}}$$

$$M_{\text{max}} = 1452.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент:

(1.9)

$$M_{\text{пуск}} = 2.2M_{\text{ном}}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{пуск}} = 1278.2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номінальний момент на валу насоса:

(2.0)

$$M_{\text{нас}} = M_{\text{ном}} \cdot u \cdot \eta_{\text{пер}}$$

$$M_{\text{нас}} = 581 \cdot 2 \cdot 0.95 = 1104 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Висновок до розділу 1.3

У результаті виконаних розрахунків для приводу водокільцевого вакуумного насоса ВВН1-90 обрано трифазний асинхронний електродвигун АІР250М4 потужністю 90 кВт та частотою обертання 1480 об/хв. Передача руху до насоса здійснюється клинопасовою передачею з передатним числом $u = 2$, що забезпечує робочу швидкість валу насоса 740 об/хв. Розраховані крутні моменти підтверджують достатній запас по перевантажувальній здатності та надійну роботу приводу у всіх режимах експлуатації вакуумно-плівкової формувальної лінії.

1.4 Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту

Після вибору електродвигуна виконується вибір частотного перетворювача та елементів силової частини системи електропривода. Для вакуумних насосів характерним є квадратичний закон зміни моменту навантаження та кубічна залежність споживаної потужності від швидкості обертання.

1.4.1 Характеристики вакуумного насоса при частотному регулюванні

Для водокільцевого вакуумного насоса ВВН1-90 справедливі такі залежності:

Продуктивність:

(2.1)

$$Q = Q_{\text{ном}} \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}} \right)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вакуум:

(2.2)

$$H = H_{\text{НОМ}} \left(\frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \right)^2$$

Споживана потужність:

(2.3)

$$P = P_{\text{НОМ}} \left(\frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \right)^3$$

Момент навантаження:

(2.4)

$$M = M_{\text{НОМ}} \left(\frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \right)^2$$

де:

- $Q_{\text{НОМ}}$ — номінальна продуктивність;
- $H_{\text{НОМ}}$ — номінальний вакуум;
- $P_{\text{НОМ}}$ — номінальна потужність;
- $M_{\text{НОМ}}$ — номінальний момент;
- $f_{\text{НОМ}} = 50$ Гц.

1.4.2 Аналіз енергоефективності

1. При зменшенні частоти до 45 Гц:

(2.5)

$$P_{45} = 90 \left(\frac{45}{50} \right)^3$$

$$P_{45} = 65.6 \text{ кВт}$$

Економія електроенергії становить близько 27%.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. При зменшенні частоти до 40 Гц:

(2.6)

$$P_{40} = 90 \left(\frac{40}{50} \right)^3$$

$$P_{40} = 46.1 \text{ кВт}$$

Економія електроенергії становить близько 49%.

3. При зменшенні частоти до 35 Гц:

(2.7)

$$P_{35} = 90 \left(\frac{35}{50} \right)^3$$

$$P_{35} = 30.9 \text{ кВт}$$

Економія електроенергії становить близько 66%.

1.4.3 Вибір частотного перетворювача

Для керування електродвигуном АІР250М4 потужністю 90 кВт обирається частотний перетворювач серії Veichi AC70.

Обрана модель: **Veichi AC70-T3-075G/090P**

Основні характеристики ПЧ наведені в додатку 11:

Параметр	Значення
Напруга живлення	3×380 В
Номінальна потужність	90 кВт
Номінальний струм	170 А
Тип керування	Sensorless Vector Control
Перевантаження	110% протягом 60 с
Вбудований PID-регулятор	Так
Інтерфейс Modbus RTU	Так

Додаток 11 – характеристики ПЧ Veichi AC70

1.4.4 Вибір апаратів захисту

Для забезпечення надійної роботи електропривода приймаються такі елементи захисту.

Тепловий захист двигуна:

(2.8)

$$I_{уст} = 170 \text{ A}$$

Автоматичний вимикач на вході:

(2.9)

$$I_{авт} = 200 \text{ A}$$

Кабель живлення:

(3.0)

$$3 \times 70 \text{ мм}^2$$

Система захисту забезпечує:

- захист від короткого замикання;
- захист від перевантаження;
- захист від втрати фази;
- захист від перенапруги;
- захист від перегріву двигуна;
- захист від аварійного перевантаження насоса.

Висновок до розділу 1.4

Для керування електроприводом вакуумного насоса ВВН1-90 обрано частотний перетворювач Veichi AC70-T3-075G/090P із векторним керуванням. Аналіз характеристик насоса показав високу ефективність частотного регулювання та можливість зниження енергоспоживання до 60–65 % при роботі на часткових навантаженнях. Обрані апарати захисту та силові елементи забезпечують надійну і безпечну експлуатацію вакуумно-насосної станції у всіх режимах роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок механічних і енергетичних характеристик

Для надійної роботи електромеханічної системи необхідно, щоб максимальний момент двигуна завжди був більше моменту навантаження, тобто двигун володів би достатньою перевантажувальною здатністю. Тому при виборі співвідношення між частотою і напругою, що підводиться до статора асинхронного двигуна, найчастіше виходять з умови збереження перевантажувальної здатності асинхронного двигуна, тобто кратності критичного моменту до номінального. Для будь-якої з електромеханічних характеристик у цьому випадку має виконуватися співвідношення:

(3.1)

$$\lambda = \frac{M_{\kappa}}{M_{ном}} = const.$$

Закон частотного управління з умови збереження перевантажувальної здатності, що встановлює оптимальне співвідношення між частотою, напругою живлення і моментом навантаження асинхронного двигуна. Цей закон записується таким чином:

(3.2)

$$\frac{U_1}{U_{ном}} = \frac{f_1}{f_{ном}} \sqrt{\frac{M}{M_{ном}}},$$

де:

$U_{ном}$, $f_{ном}$ - номінальні напруга і частота мережі;

U_1 , f_1 - напруга і частота на виході перетворювача частоти (ПЧ);

$M_{ном}$, M - номінальне і поточне значення моменту АД.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прийнятими припущеннями обумовлюється сталість опорів схеми заміщення при даній частоті. Застосовується Т - подібна схема заміщення, наведена на рис. 2.1.

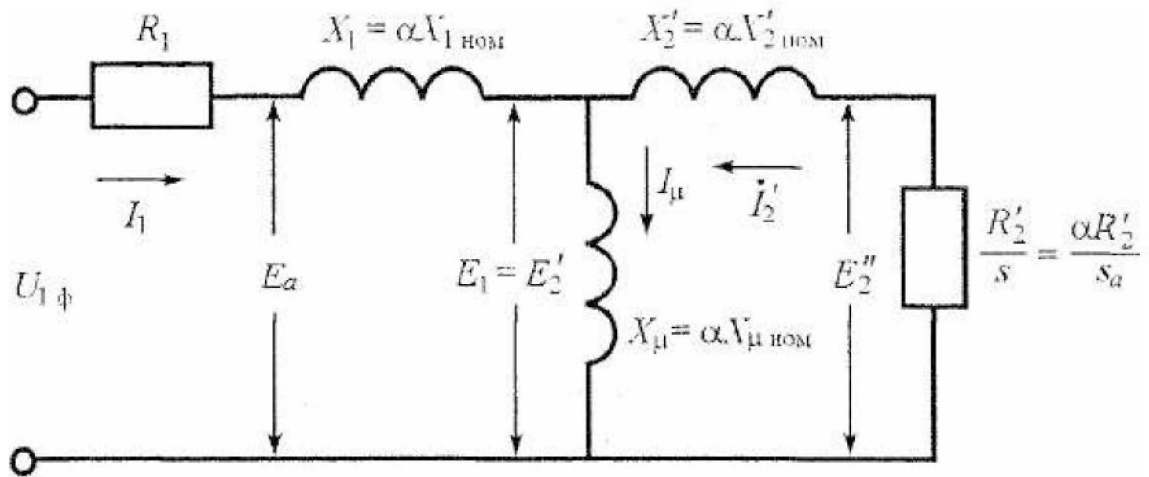


Рис. 2.1 Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

де:

R_1 - активний опір статора;

R_2' - активний опір ротора;

$X_{1ном}$ - індуктивний опір статора;

$X_{2ном}'$ - індуктивний опір ротора;

$X_{\mu ном}$ - індуктивний опір намагнічування;

s_a - абсолютне ковзання;

E - діюче значення ЕРС.

1. Розрахунок параметрів схеми заміщення (на 75 кВт)

Для математичного моделювання або програмування частотника Veichi AC70 повна Т-подібна схема заміщення (на базовій частоті 50 Гц) має такі

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

параметри:

Активний опір статора (R_1): 0.034 Ом

Індуктивний опір розсіювання статора (X_1): 0.0915 Ом

Приведений активний опір ротора (R'_2): 0.034 Ом

Приведений індуктивний опір розсіювання ротора (X'_2): 0.0915 Ом

Опір вітки намагнічування (R_m): 0.244 Ом

Головний індуктивний опір намагнічування (X_m): 4.41 Ом

Новий змінний елемент схеми — Опір навантаження ($R_{\text{нав}}$):

При роботі на 75 кВт фактичне ковзання двигуна зменшується до $s = 0.0111$ (1.11%). Опір, що моделює корисну роботу водокільцевого насоса через ремінну передачу:

(3.3)

$$R_{\text{нав}} = R'_2 \cdot \frac{1 - s}{s} = 0.034 \cdot \frac{1 - 0.0111}{0.0111} \approx 3.029 \text{ Ом}$$

2. Струми та повні опори віток

При обмеженні споживаної потужності механізму на рівні 75 кВт, повна електрична потужність з мережі (з урахуванням ККД двигуна $\eta \approx 0.935$ та $\cos\varphi \approx 0.86$ у цій точці) становитиме близько 80.2 кВт (або 93.3 кВА).

- Фазний / лінійний струм статора (I_1): ~141.7 А (замість номінальних 165.5 А).
- Струм вітки намагнічування (I_0): ~49.6 А (реактивний струм, майже не змінюється).
- Робочий струм ротора (I'_2): ~131.2 А (активна складова, що створює

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обертовий момент).

- Повний еквівалентний опір двигуна ($Z_{\text{екв}}$):

(3.4)

$$Z_{\text{екв}} = \frac{U_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot I_1} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 141.7} \approx \mathbf{1.548 \text{ Ом}}$$

3. Перерахунок під частотне регулювання (Veichi AC70)

Оскільки насос ВВН1-90 підключений через частотник, при зміні вихідної частоти (f_x) елементи схеми заміщення трансформуються за таким законом:

- Поперечна вітка (X_m) та розсіювання (X_1, X_2'): змінюються лінійно від частоти:

(3.5)

$$X(f_x) = X_{(50\text{Гц})} \cdot \frac{f_x}{50}$$

- Активні опори (R_1, R_2', R_m): залишаються сталими.
- Опір навантаження ($R_{\text{нав}}$) при падінні частоти: оскільки водокільцевий насос має квадратичний момент навантаження від швидкості ($M \sim n^2$), при зменшенні частоти ковзання s падає майже лінійно. Це призводить до стрімкого зростання значення $R_{\text{нав}}$, що математично відображає розвантаження двигуна на малих обертах.

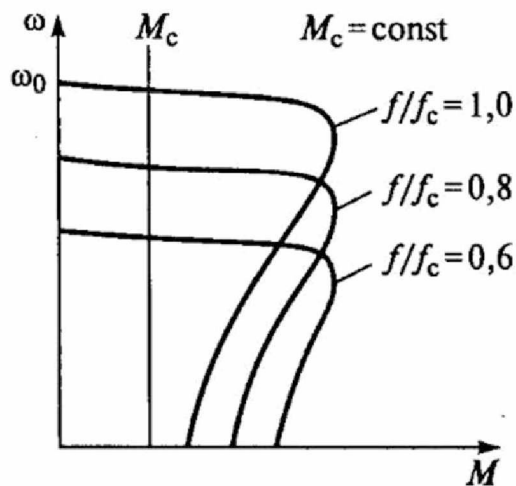
Параметр схеми заміщення	Позначення	30 Гц	40 Гц	50 Гц (базова)
Активний опір статора	R_1	0.034	0.034	0.034
Індуктивний опір статора	X_1	0.0549	0.0732	0.0915
Приведений активний опір ротора	R'_2	0.034	0.034	0.034
Приведений індуктивний опір ротора	X'_2	0.0549	0.0732	0.0915
Активний опір намагнічування	R_m	0.244	0.244	0.244
Головний індуктивний опір	X_m	2.646	3.528	4.410
Еквівалентний опір навантаження	$R_{\text{нав}}$	5.066	3.788	3.029

Додаток 12 - значення параметрів схеми заміщення (в Ом) при зміні частоти (Гц)

Фактичні оберти на валу насоса ВВН1-90:

- При 50 Гц: двигун ~1483 об/хв - насос ~741 об/хв.
- При 40 Гц: двигун ~1188 об/хв - насос ~594 об/хв.
- При 30 Гц: двигун ~892 об/хв - насос ~446 об/хв.

Управління двигуном відповідно до співвідношення (додаток 13) при ненасиченої магнітної системі дозволяє зберігати практично незмінним коефіцієнт потужності і абсолютне ковзання, при цьому ККД системи не залежить від швидкості. В цьому і полягає основна перевага частотного управління. Залежно від видів навантаження закон управління напругою і частотою має різні форми. При постійному моменті завантаження ($M_c = \text{const}$) співвідношення (додаток 13) набуває вигляду $U / f = \text{const}$. Механічні характеристики системи ПЧ-АД при постійному моменті, за умови що зберігається сталості перевантажувальної здатності двигуна, наведені в додатку 13.



Додаток 13 - Механічні характеристики приводу ПЧ-АД при постійному моменті

Таким чином, для того щоб реалізувати принцип частотного управління асинхронним двигуном, необхідно відповідно до вираження (додаток 13) і з урахуванням виду навантаження керувати напругою, що підводиться до статора двигуна взаємопов'язане зі зміною частоти живлення.

Для вибору частотного перетворювача, визначаємо параметри, необхідні для побудови природної характеристики двигуна при $f_{1н} = 50$ Гц за формулою:

(3.6)

$$\omega_0 = \frac{n_0}{9,55}$$

де n_0 – швидкість холостого ходу двигуна, об / хв;

$$\omega_0 = \frac{1500}{9,55} = 157,07 \text{ рад/с}$$

Електромагнітна потужність пов'язана з моментом асинхронної машини співвідношенням

(3.7)

$$P_s = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_0.$$

Використовуючи вираз розрахунку моменту, а також схему заміщення, отримаємо наближені рівняння для моменту асинхронної машини (Н • м):

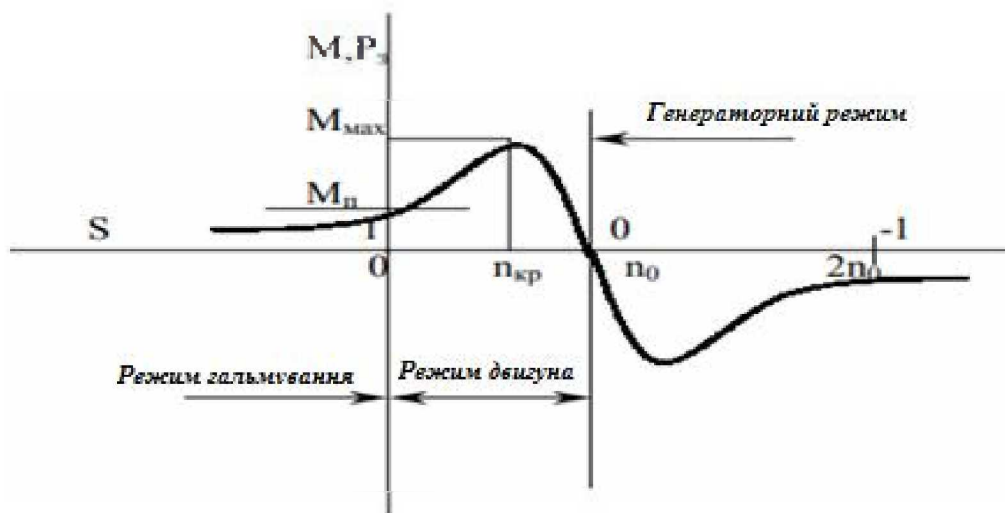
(3.8)

$$M = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{S}}{n_0 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]},$$

де:

U₁ – напруга, В;

r, x – Опір, Ом.



Додаток 14 - Механічна характеристика асинхронного електродвигуна

Для розрахунку ковзання ротору застосовуємо вираз:

(3.9)

$$S_k = (n_1 - n_2)/n_1$$

де:

n — швидкість обертання ротора асинхронного двигуна, об/хв.;

n_1 — швидкість циклічного змінення магнітного потоку статора.

$$S_k = (1500 - 1480) / 1500 = 0,0133$$

Для розрахунку критичної швидкості використовуємо формулу:

(4.0)

$$\omega_{кв} = \omega_0 \cdot (1 - S_k)$$

де:

ω_0 — швидкість холостого ходу двигуна, рад/с;

S_k — критичне ковзання;

$$\omega_{кв} = 157,07 \times (1 - 0,0133) = 154,98 \text{ рад/с}$$

Розрахуємо критичний момент за формулою:

(4.1)

$$M_{к} = \lambda \cdot M_n$$

де:

λ — перевантажувальна здатність двигуна;

M_n - момент номінальний для двигуна типу АИР250S4 - 472 Н*м;

$$M_{к} = 2,3 \times 472 = 1110,9 \text{ Н*м}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо швидкість електромагнітного поля статора при різних значеннях частоти $f = 5; 15; 30; 50; 90$ Гц

(4.2)

$$\omega_{ok} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1k}}{p}$$

де:

$\pi = 3,14$;

f_k - задана частота;

p - число пар полюсів, приймаємо за 2;

Відповідно в відносних одиницях:

(4.3)

$$\omega_{0k}^* = \frac{\omega_{0k}}{\omega_0}$$

Тож проведемо обрахунок згідно обох формул:

(4.4)

при $f_k = 5$ Гц; $\omega_{01} = 2 \times 3,14 \times 5 / 2 = 15,7$ рад/с; $\omega_{ok1} = 15,7 / 157,07 = 0,1$

при $f_k = 15$ Гц; $\omega_{02} = 2 \times 3,14 \times 15 / 2 = 47,1$ рад/с; $\omega_{ok2} = 47,1 / 157,07 = 0,3$

при $f_k = 30$ Гц; $\omega_{03} = 2 \times 3,14 \times 30 / 2 = 94,2$ рад/с; $\omega_{ok3} = 94,2 / 157,07 = 0,6$

при $f_k = 50$ Гц; $\omega_{04} = 2 \times 3,14 \times 50 / 2 = 157$ рад/с; $\omega_{ok4} = 157 / 157,07 = 1$

при $f_k = 90$ Гц; $\omega_{05} = 2 \times 3,14 \times 90 / 2 = 282,6$ рад/с; $\omega_{ok5} = 282,6 / 157,07 = 1,8$

Визначаємо значення частоти напруги в відносних одиницях

(4.5)

де:

f_{1k}^* - задана частота;

f_{1H} - стандартна частота;

$$f_{1k}^* = \frac{f_{1k}}{f_{1H}} = \frac{5}{50} = 0,1$$

$$f_{2k}^* = \frac{f_{2k}}{f_{1H}} = \frac{15}{50} = 0,3$$

$$f_{3k}^* = \frac{f_{3k}}{f_{1H}} = \frac{30}{50} = 0,6$$

$$f_{4k}^* = \frac{f_{4k}}{f_{1H}} = \frac{50}{50} = 1$$

$$f_{5k}^* = \frac{f_{5k}}{f_{1H}} = \frac{90}{50} = 1,8$$

Визначаємо максимальні моменти при різних значеннях частоти за формулою:

(4.6)

$$M_{\max k} = \frac{3 * U^2}{2 * \omega_{ок} * \left[r_1 \pm \sqrt{\left(r_1^2 + x_{кн}^2 * f_k^{*2} \right) * \left(1 + \frac{r_1^2}{x_{кн}^2 * f_k^{*2}} \right)} \right]}$$

де:

U - номінальна напруга;

$\omega_{ок}$ - швидкість електромагнітного поля;

r_1 - опір статора;

$x_{кк}$ - індукційний опір короткого замикання;

f_k^* - задана частота;

$x_{дн}$ - індукційний опір намагнічування;

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{max\ 1} = \frac{3 * 22^2}{2 * 15,7 * \left[0,1^2 \sqrt{(0,1^2 + 0,27^2 * 0,1^2)} * \left(1 + \frac{0,1^2}{0,27^2 * 0,1^2} \right) \right]} = 217,2 H^*_M$$

$$M_{max\ 2} = \frac{3 * 66^2}{2 * 47,1 * \left[0,1^2 \sqrt{(0,1^2 + 0,27^2 * 0,3^2)} * \left(1 + \frac{0,1^2}{0,27^2 * 0,3^2} \right) \right]} = 582 H^*_M$$

$$M_{max\ 3} = \frac{3 * 132^2}{2 * 94,2 * \left[0,1^2 \sqrt{(0,1^2 + 0,27^2 * 0,6^2)} * \left(1 + \frac{0,1^2}{0,27^2 * 0,6^2} \right) \right]} = 913,3 H^*_M$$

$$M_{max\ 4} = \frac{3 * 220^2}{2 * 157 * \left[0,1^2 \sqrt{(0,1^2 + 0,27^2 * 1^2)} * \left(1 + \frac{0,1^2}{0,27^2 * 1^2} \right) \right]} = 1108,5 H^*_M$$

$$M_{max\ 5} = \frac{3 * 220^2}{2 * 282,6 * \left[0,1^2 \sqrt{(0,1^2 + 0,27^2 * 1,8^2)} * \left(1 + \frac{0,1^2}{0,27^2 * 1,8^2} \right) \right]} = 359,8 H^*_M$$

Визначаємо критичні ковзання за такою формулою:

(4.7)

$$S_{kf^*} = \pm r_2 * \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{r_1}{x_{MK} * f_{k^*}}\right)^2}{r_1^2 + x_{KH}^2 * f_{k^*}^2}}$$

де: r_1 - опір статора; r_2 - опір ротора; x_{KH} - індукційний опір короткого замикання; f_{k^*} - задана частота; x_{MK} - індукційний опір намагнічення;

$$S_{k1} = 0,17 * \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,1}{0,27 * 0,1}\right)^2}{0,1^2 + 0,27^2 * 0,1^2}} = 0,18$$

$$S_{k2} = 0,17 * \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,1}{0,27 * 0,3}\right)^2}{0,1^2 + 0,27^2 * 0,3^2}} = 0,25$$

$$S_{k3} = 0,17 * \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,1}{0,27 * 0,6}\right)^2}{0,1^2 + 0,27^2 * 0,6^2}} = 0,41$$

$$S_{k4} = 0,17 * \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,1}{0,27 * 1}\right)^2}{0,1^2 + 0,27^2 * 1^2}} = 0,65$$

$$S_{k5} = 0,17 * \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,1}{0,27 * 1,8}\right)^2}{0,1^2 + 0,27^2 * 1,8^2}} = 1,14$$

Визначаємо значення швидкості обертання двигуна у відносних одиницях:

(4.8)

$$\omega_1 = \omega_{ok1}^* \cdot (1 - s_{k1}) = 0,1 \cdot (1 - 0,18) = 0,082$$

$$\omega_2 = \omega_{ok2}^* \cdot (1 - s_{k2}) = 0,3 \cdot (1 - 0,25) = 0,225$$

$$\omega_3 = \omega_{ok3}^* \cdot (1 - s_{k3}) = 0,6 \cdot (1 - 0,41) = 0,354$$

$$\omega_4 = \omega_{ok4}^* \cdot (1 - s_{k4}) = 1 \cdot (1 - 0,65) = 0,350$$

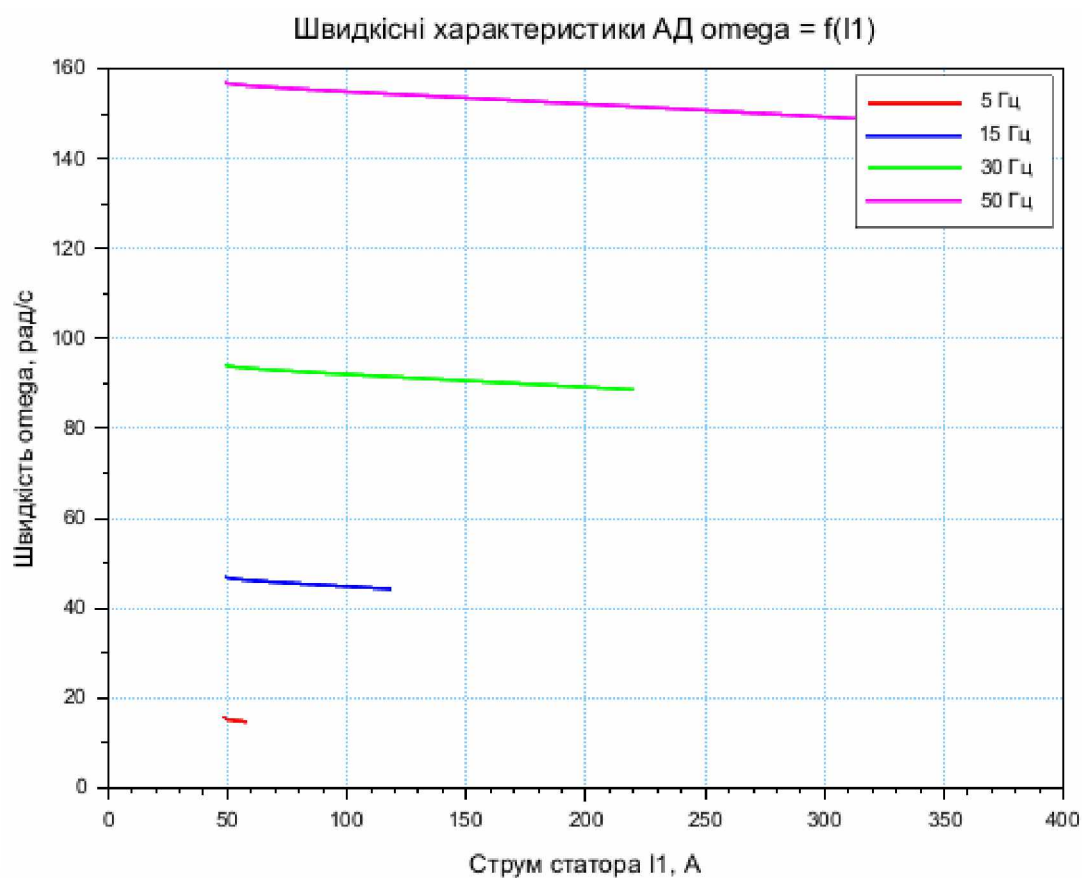
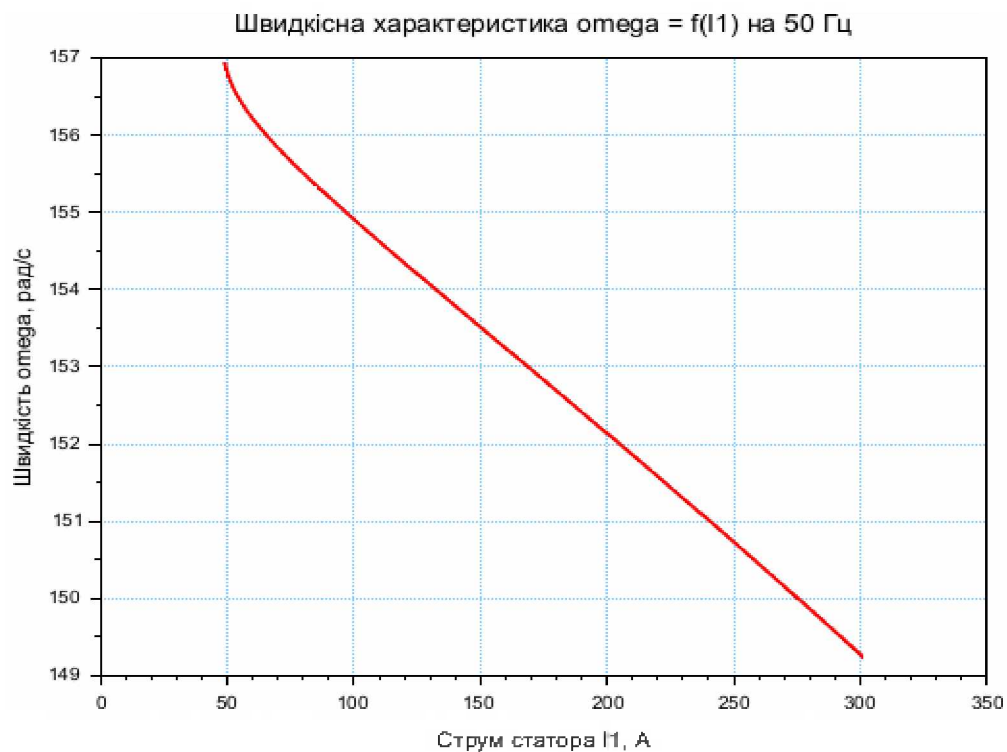
$$\omega_5 = \omega_{ok5}^* \cdot (1 - s_{k5}) = 1,8 \cdot (1 - 0,18) = 1,476$$

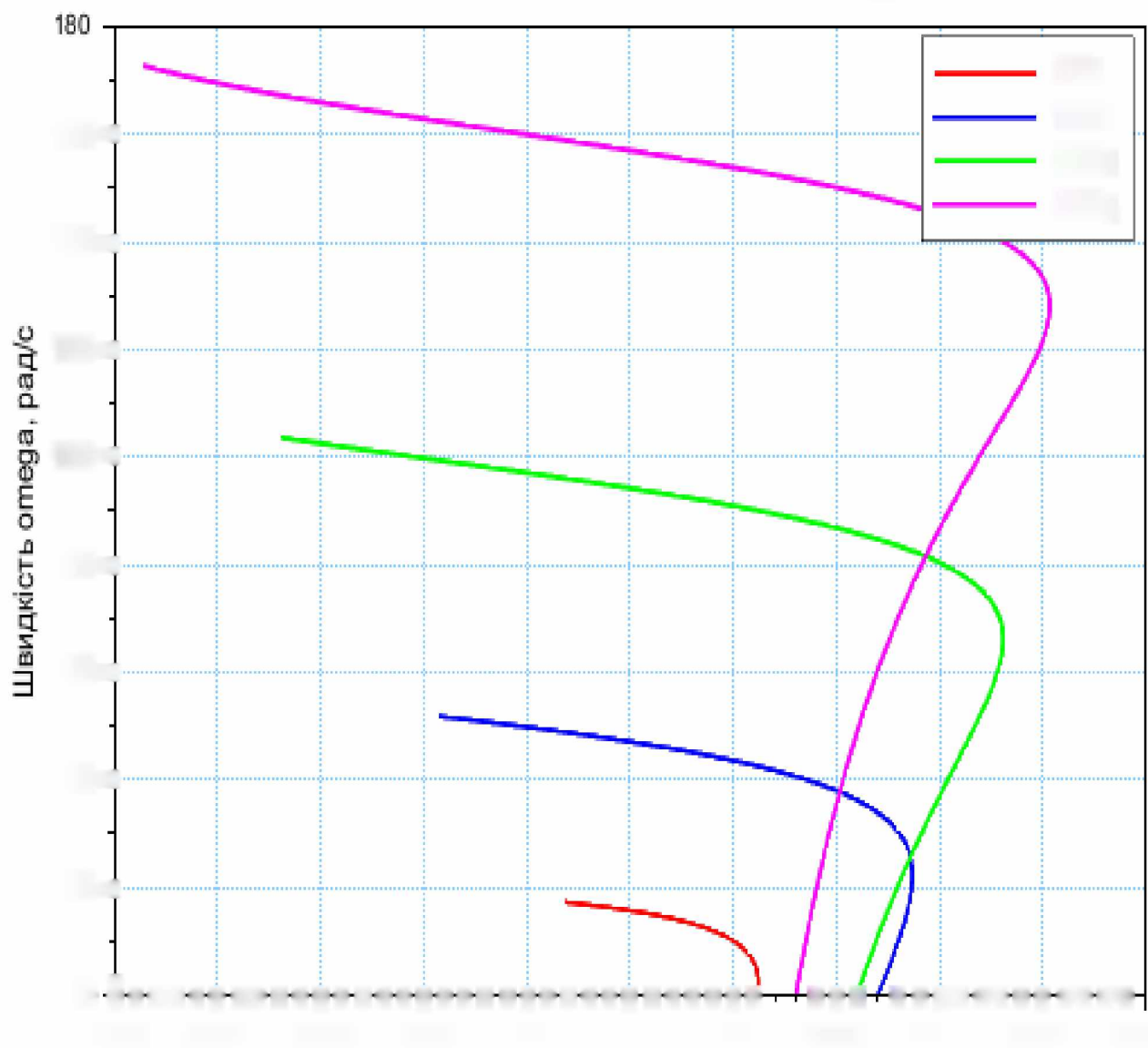
Результати розрахунку механічних характеристик заносимо в таблицю (додаток 15)

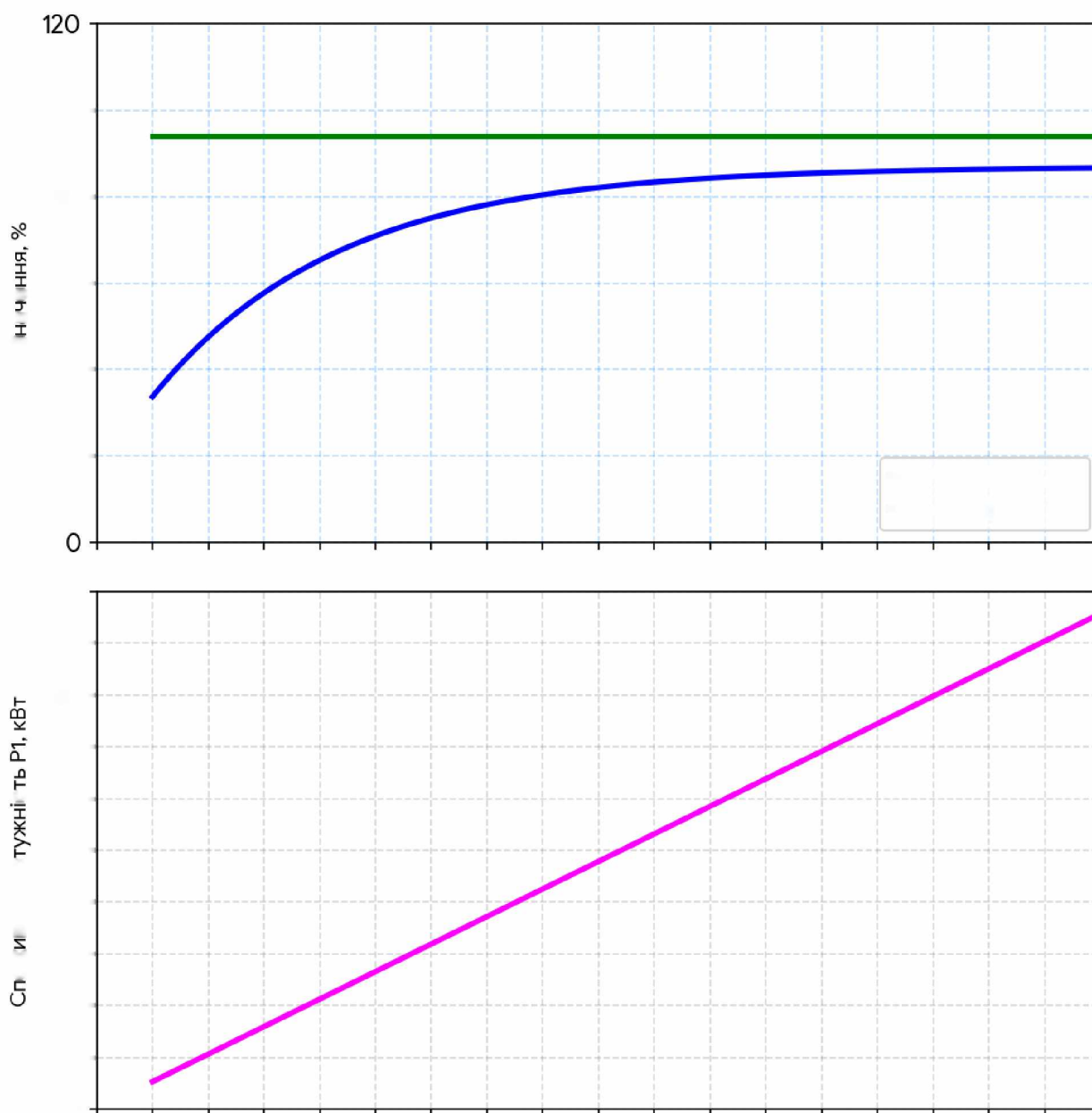
Характеристика	ω_{ok}^* , рад/с	ω_k^*	M_k , Н·м
$f_1=5$ Гц	0,1	0,082	217,2
$f_2=15$ Гц	0,3	0,225	582
$f_3=30$ Гц	0,6	0,354	913,3
$f_4=50$ Гц	1	0,350	1108,5
$f_5=90$ Гц	1,8	1,476	359,8

Додаток 15 - Механічні характеристики

Будуємо графіки в програмі за отриманими аналітичними залежностями.
Дані графіки наведено в додатку 16.







Додаток 16 - Графіки з програми: швидкісні, механічні та енергетичні графічні залежності характеристик.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

44

РОЗДІЛ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом

2.1. Обґрунтування і вибір структури системи керування електроприводом

Для модернізації існуючої вакуумно-насосної станції вакуумно-плівкової формувальної лінії пропонується впровадження автоматизованої системи керування на базі векторного перетворювача частоти **Veichi AC70-T3-075G/090P**, промислового контролера та датчика розрідження. Система забезпечує автоматичне підтримання необхідного рівня вакууму шляхом зміни частоти обертання електродвигуна вакуумного насоса залежно від технологічного навантаження.

У модернізованій системі використовується асинхронний двигун **AIP250M4** потужністю 75 кВт з номінальною частотою обертання:

(4.9)

$$n_{\text{дв}} = 1475 \text{ об/хв}$$

Передача моменту на вал вакуумного насоса здійснюється клинопасовою передачею з передаточним числом:

(5.0)

$$u = 2$$

Робоча частота обертання валу насоса:

(5.1)

$$n_{\text{нас}} = \frac{n_{\text{дв}}}{u}$$

$$n_{\text{нас}} = \frac{1475}{2} = 737.5 \text{ об/хв}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09			
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат				
Розробив.	Носков Я.В.				РОЗДІЛ 2. Обґрунтування та розробка системи керування електроприводом.	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів.	Сьомочкін А.Б.						45	
Рецензія.						КНУ Каф. ЕІ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.								
Затверд..	Сінчук О.М.							

Для реалізації автоматичного регулювання вакууму обрано перетворювач частоти **Veichi AC70-T3-075G/090P** з такими характеристиками:

- номінальна потужність – 75 кВт;
- номінальний струм – 150 А;
- перевантажувальна здатність – 120%;
- векторне керування без датчика швидкості;
- вбудований PID-регулятор;
- аналогові входи 4–20 мА та 0–10 В.

Для забезпечення автоматичного підтримання необхідного рівня розрідження у вакуумній магістралі вакуумно-плівкової формувальної лінії до складу системи керування вводиться датчик розрідження

Для контролю рівня вакууму обрано датчик розрідження **Danfoss MBS 3000 Vacuum**.

Основні характеристики датчика:

- діапазон вимірювання: -1...0 бар;
- вихідний сигнал: 4...20 мА;
- напруга живлення: 24 В;
- похибка: $\pm 0.5\%$;
- ступінь захисту: IP65;
- час реакції: не більше 4 мс.

Вибраний діапазон повністю перекриває робочий вакуум технологічної лінії:

(5.2)

$$P_{\text{роб}} = -0.5 \dots -0.6 \text{ бар}$$

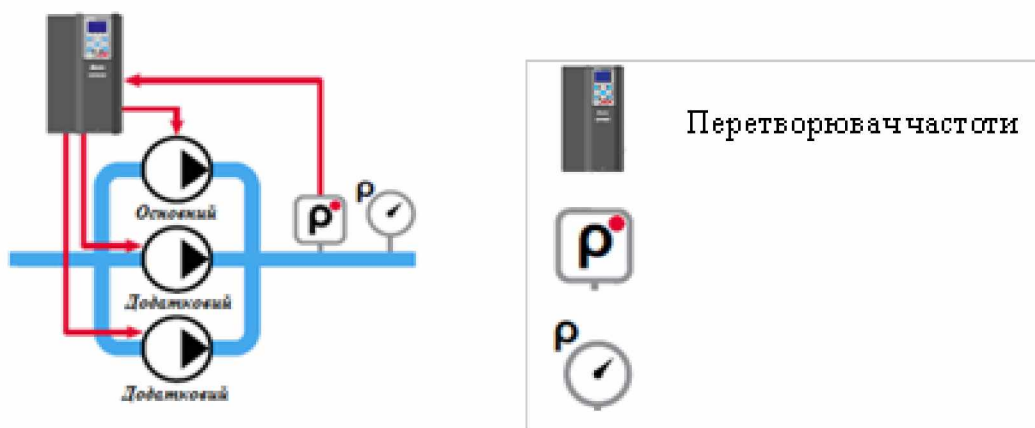
					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Структурна схема системи керування включає:

1. датчик розрідження;
2. ПЛК-контролер;
3. перетворювач частоти Veichi AC70-T3-075G/090P;
4. електродвигун AIP250M4;
5. водокільцевий вакуумний насос ВВН1-90.

Для автоматизації виробництва вакууму на формувальній лінії кожен електродвигун вакуумного насоса (АД) буде керуватися окремим частотним перетворювачем (ПЧ). Регулювання швидкості здійснюється за сигналом від вакуумметра, який визначає поточну потребу у вакуумі.

Для електродвигуна потужністю 75 кВт обрано перетворювач частоти типу AC70-T3-075G/090P, що відповідає вимогам по потужності та забезпечує надійне керування. Для адаптування перетворювач частоти в існуючу схему керування вакуумними насосами, пропонується схема управління вакуумними насосами з підтриманням вакууму, яка зображена в додатку 17.



Додаток 17 - Функціональна схема управління вакуумними насосами.

Тож обраний датчик **MBS 3000** забезпечує безперервний контроль рівня вакууму в колекторі вакуумної станції та передачу інформації до програмованого логічного контролера.

Контролер здійснює порівняння поточного значення розрідження із заданим

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

технологічним значенням та формує сигнал керування для частотного перетворювача Veichi AC70-T3-075G/090P.

Номінальний робочий вакуум у системі вакуумно-плівкового формування становить 50–60 кПа, що відповідає розрідженню 0,5–0,6 бар. Обраний діапазон вимірювання датчика повністю перекриває робочу область технологічного процесу та забезпечує необхідний запас для аварійних режимів.

Приймемо:

- заданий вакуум: **–0,55 бар**
- нижня межа регулювання: **–0,50 бар**
- верхня межа регулювання: **–0,60 бар**
- вихід датчика:
4 мА → 0 бар
20 мА → –1 бар

Тоді для робочої точки:

$$I = 4 + 16 \cdot (0,55 / 1)$$

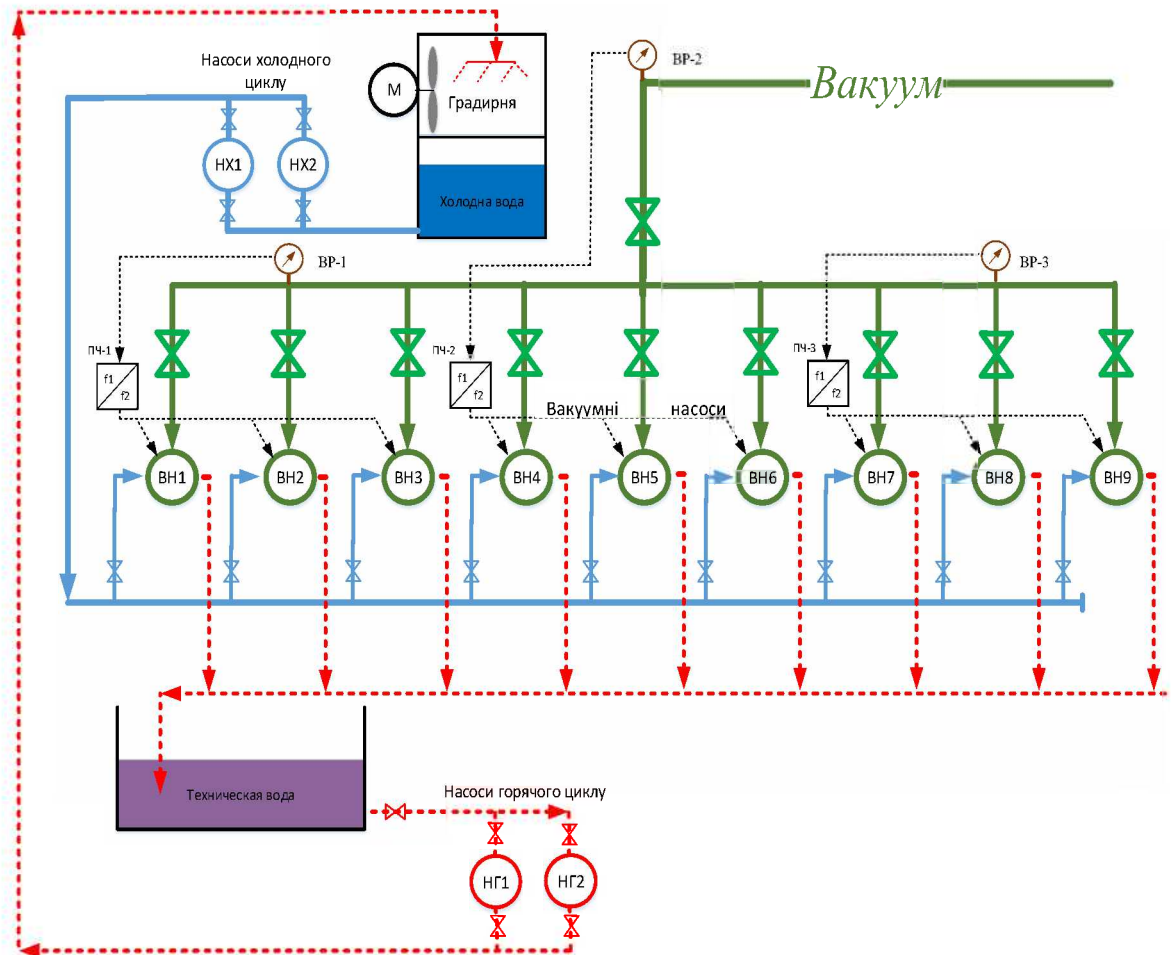
$$I = 12,8 \text{ мА}$$

В даному режимі частотний перетворювач регулює оберти одного насоса з метою підтримки розрідження. Налаштування ПЧ в системах підтримки вакууму (з ПД-регулюванням). Для датчика розрідження з вихідним сигналом 4 ... 20мА і діапазоном вимірювання 0 ... 10 бар.

Розглянемо більш детально. При частковому розборі вакууму, коли розрідження яке виробляє вакуумний насос менше значення, то частота обертання цього насоса визначається витратою вакууму і значенням необхідного розрідження. При споживанні вакууму, близькому до нульового,

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вакуумний насос працює з мінімальною частотою обертання. При подальшому збільшенні споживання вакууму і досягненні частоти обертання 100% збільшується і частота відповідно до допустимого перевантаження в 120% на 1 хв. Представлена функціональна схема вакуумно-насосної станції наведена у додатку 18.



Додаток 18 - Функціональна схема вакуумно-насосної станції

Вакуумно-насосна станція складається з дев'яти вакуумних насосних агрегатів, що з'єднуються паралельно, встановлених на загальній рамі і оснащених всім необхідним арматурою і шафою управління та виносний пульт керування. Ефективність застосування вакуумно-насосних станцій обумовлена їх компактністю, надійністю роботи, простою і зрозумілою в застосуванні автоматикою - все це здешевлює монтаж і технічне

обслуговування, знижує експлуатаційні витрати і збільшує термін служби вакуумних насосів.

Функціональні можливості:

- плавне підвищення продуктивності вакуумно-насосної станції методом каскадного введення вакуумних насосів в роботу;
- вимір і індикація основних параметрів вакуумно-насосної станції (витрата, розрідження);
- зміна параметрів автоматичного регулювання, отримання і передачі поточної інформації;
- стану вакуумно-насосної станції за допомогою засобів телекомунікації та включення її в АСУ ТП верхнього рівня (напри-заходів, RS-485);
- захист електродвигунів і технологічного обладнання вакуумно-насосного агрегату в аварійних режимах;
- вмикати або вимикати електродвигунів в ручному (пуск / стоп) і автоматичному (по таймеру) режимах;
- ручне управління і робота за програмою із завданням часу роботи і паузи за таймером;
- вимір і індикація основних параметрів електродвигуна (струм, напруга, частота);
- захист електродвигунів вакуумних насосних агрегатів від струмового перевантаження, недовантаження, неприпустимого відхилення напруги живильної мережі від номінального з подальшим програмованим автоматичним перезапуском після закінчення дії аварії;

2.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом

Розрахунок ПІД-регулятора

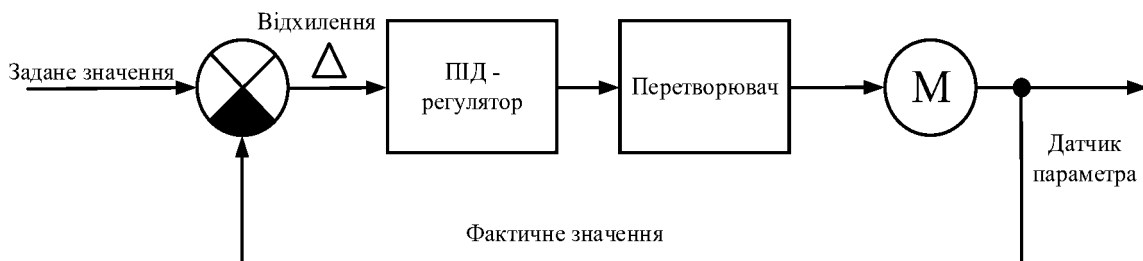
Виділяють два різних режими роботи перетворювача частоти: підтримка вихідний частоти і стабілізація зовнішнього параметра. У режимі підтримки вихідної частоти відповідне значення може вводиться з пульта оператора, входу

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потенціометра (аналогового входу) або сукупністю сигналів дискретних входів. Перетворювач аналізує сигнал завдання частоти і визначає необхідну вихідну частоту.

Сучасні ПЧ використовують векторне управління асинхронним двигуном. Цей спосіб збільшує точність частотного регулювання і застосовується там, де необхідно підтримувати момент на валу двигуна при низьких швидкостях обертання і забезпечити стабілізацію швидкості при скачках навантаження. У режимі стабілізації зовнішнього параметра система управління ґрунтується на ПІД-регуляторі, на який приходить сигнал завдання параметра (уставки) і сигнал з датчика регульованої величини. ПІД-регулятор виробляє сигнал управління для ПЧ, який при зміні швидкості обертання електродвигуна підтримує керовану величину, рівну заданої (додаток 19). ПЧ встановлюється між електричною мережею і електродвигуном для функціонування зворотного зв'язку.

На відповідний аналоговий вхід ПЛК або ПЧ надходить інформація з датчика тиску, встановленого на вакуумний трубопровід, перед вакуумно-насосною станцією. На перетворювач частоти подається сигнал завдання тиску. Система управління визначає дельту між дійсним і заданим значенням тиску і виробляє потрібний вихідний сигнал (значення вихідної частоти) відповідно до заданого параметром закону регулювання. В якості робочого параметра використовується розрідження. Значення уставки встановлюється з пульта оператора, зовнішнього аналогового входу або сукупністю сигналів на дискретних виходах .



Додаток 19 - Схема застосування ПІД – регулятора в системі управління вакуумними насосами

Основним критерієм якості регулювання є бажана передатна функція (БПФ). До заданої системи регулювання необхідно застосувати метод настройки контуру регулювання на технічний оптимум. Передавальну функцію отримаємо з виразу:

$$W_{p. \text{ жел. }}(p) = \frac{1}{2 T_{\mu} p * (2 T_{\mu} p + 1)} \quad (5.3)$$

Передавальна функція представляє собою вираз:

$$W_{рег}(p) = \frac{W_{p. \text{ жел. }}(p)}{W_{ou}(p) * W_{oc}(p)} \quad (5.4)$$

де: $W_{ou}(p)$ - передатна функція об'єкта, $W_{oc}(p)$ - передавальна функція зворотного зв'язку, $W_{p. \text{ жел. }}(p)$ - БПФ розімкнутого контуру.

$$W_{рег}(p) = \frac{\frac{1}{\frac{2 \cdot T_m \cdot p \cdot (T_m + 1)}{K_{пч-д} \cdot \frac{K_n}{T_m \cdot p + 1} \cdot K_{дд}}}}{\frac{K_n}{T_m \cdot p + 1} \cdot K_{дд}} = \frac{T_m \cdot T_n \cdot p^2 + T_n \cdot p + 1}{2 \cdot T_m \cdot K_{пч-д} \cdot K_n \cdot K_{дд} \cdot p}$$

З результату ясно, що дана передатна функція (ПФ) є ПІД-регулятором з заданими коефіцієнтами посилення.

Визначимо коефіцієнти ПІД-регулятора:

$$\begin{aligned} K_n &= \frac{T_m}{2 \cdot K_{пч} \cdot K_d \cdot K_{нзс} \cdot K_{д.н}} = \frac{0,025}{2 \cdot 3,125 \cdot 3,14 \cdot 0,693 \cdot 0,157} = 0,012, \\ K_n &= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot K_{пч} \cdot K_{нзс} \cdot K_{д.н}} = \frac{1}{2 \cdot 0,01 \cdot 3,125 \cdot 0,693 \cdot 0,157} = 14,7, \\ K_d &= \frac{T_m \cdot T_n}{2 \cdot T_{\mu} \cdot K_{пч} \cdot K_{нзс} \cdot K_{д.н}} = \frac{0,025 \cdot 0,022}{2 \cdot 0,01 \cdot 3,125 \cdot 0,693 \cdot 0,157} = 0,017, \end{aligned} \quad (5.5)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де: K_p - пропорційний коефіцієнт, K_i - інтегральний коефіцієнт, K_d - диференційний коефіцієнт, які необхідні для побудови регулятора в реальній системі регулювання тиску.

Передавальна функція PID-регулятора:

(5.6)

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

де:

- K_p – пропорційний коефіцієнт;
- K_i – інтегральний коефіцієнт;
- K_d – диференційний коефіцієнт.

Визначення електромеханічної сталої часу двигуна

Електромеханічна стала часу визначається:

(5.7)

$$T_m = \frac{J \omega_{ном}}{M_{ном}}$$

де:

- $J = 2.8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції двигуна AIP250M4;
- $M_{ном} = 485.6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – номінальний момент двигуна;
- $\omega_{ном}$ – кутова швидкість ротора.

Кутова швидкість:

(5.8)

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\omega_{ном} = \frac{2 \cdot 3.1416 \cdot 1475}{60} = 154.46 \text{ рад/с}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді:

$$T_m = \frac{2.8 \cdot 154.46}{485.6} = 0.89 \text{ с}$$

Приймаємо:

$$T_m = 0.89 \text{ с}$$

Коефіцієнт передачі перетворювача частоти

Максимальна вихідна частота:

(5.9)

$$f_{\max} = 50 \text{ Гц}$$

Максимальна керуюча напруга:

(6.0)

$$U_{\text{кер}} = 10 \text{ В}$$

Коефіцієнт передачі:

(6.1)

$$K_{\text{пч}} = \frac{f_{\max}}{U_{\text{кер}}}$$

$$K_{\text{пч}} = \frac{50}{10} = 5$$

Отже:

$$K_{\text{пч}} = 5 \text{ Гц/В}$$

Коефіцієнт передачі датчика розрідження

Діапазон вимірювання:

(6.2)

$$\Delta P = 1 \text{ бар}$$

Діапазон вихідного сигналу:

(6.3)

$$\Delta I = 20 - 4 = 16 \text{ мА}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт передачі:

(6.4)

$$K_{дат} = \frac{\Delta I}{\Delta P}$$
$$K_{дат} = \frac{16}{1} = 16$$

Отже:

$$K_{дат} = 16 \text{ мА/бар}$$

Розрахунок параметрів PID-регулятора

Для вакуумних систем із значною інерційністю використовується налаштування за методом Зіглера–Ніколса.

Пропорційна складова:

(6.5)

$$K_p = 1.2T_m$$
$$K_p = 1.2 \cdot 0.89 = 1.07$$

Приймаємо:

$$K_p = 1.1$$

Інтегральна складова:

(6.6)

$$T_i = 2T_m$$
$$T_i = 2 \cdot 0.89 = 1.78 \text{ с}$$
$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$
$$K_i = \frac{1.1}{1.78} = 0.62 \text{ с}^{-1}$$

Диференційна складова:

(6.7)

$$T_d = 0.5T_m$$
$$T_d = 0.5 \cdot 0.89 = 0.445 \text{ с}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_d = K_p T_d$$

$$K_d = 1.1 \cdot 0.445 = 0.49$$

Параметри регулятора

Розраховані параметри автоматичного регулювання розрідження у додатку 20

Параметр	Значення
T_m	0.89 с
$K_{пч}$	5 Гц/В
$K_{дат}$	16 мА/бар
K_p	1.1
K_i	0.62 с^{-1}
K_d	0.49

Додаток 20 - параметри автоматичного регулювання розрідження
вбудованого PID-регулятора ПЧ Veichi AC70

Отримані параметри забезпечують стійку роботу замкненої системи автоматичного регулювання розрідження та можуть бути використані при налаштуванні вбудованого PID-регулятора перетворювача частоти Veichi AC70-T3-075G/090P.

2.3. Розробка алгоритмів та програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування електроприводом

Розрахунок вимикачів та провідників для підключення частотного приводу до діючої схеми керування

Автоматичний вимикач призначений для автоматичного відключення захисного ланцюга при коротких замиканнях або перевантаженнях, також для оперативних нечастих відключень. На відміну від високовольтних вимикачів, конструкція яких містить контактні, дугогасні і приводні системи не містять пристроїв вимірювання та контролю захисного ланцюга, автоматичні вимикачі містять спеціальні конструкції для пристроїв вимірювання та контролю заданих параметрів захисного ланцюга. Останнім часом автоматичні вимикачі

використовуються для заміни рубильників і запобіжників. Для виконання захисних функцій їх постачають тепловими, електромагнітними або комбінованими розчіплювачами. Найбільш поширені комбіновані розчіплювачі, так як вони захищають ланцюг від струму перевантаження і від струму короткого замикання. Розчіплювати пристрій представляє собою систему шарнірно-пов'язаних важелів, що з'єднує привід включення з системою рухливих контактів, які з'єднані з відключає пружиною.

Номинальний струм автомата повинен бути вище струму тривалого режиму установки, а сам апарат не повинен відключитися при передбачених технологічних перевантаженнях.

Вибір автоматичного вимикача здійснюється по пусковому струму частотного перетворювача. Номинальний струм одного частотного перетворювача визначаємо за формулою:

$$I_{\text{Ном}} = \frac{P_{\text{Ном}} \times 1000}{U_{\text{Ном}} \times \cos \varphi \times \eta \times \sqrt{3}}, \quad (6.8)$$

де $P_{\text{Ном}}$ - потужність частотного перетворювача;

$$I_{\text{Ном}} = 75\,000 / 380 \times 0,88 \times 0,96 \times 1,73 = 137,92 \text{ А}$$

Визначаємо пусковий струм частотного двигуна за формулою:

$$I_{\text{пуск}} = k \times I_{\text{ном}}, \quad (6.9)$$

де k - коефіцієнт, для розрахунку приймаємо $k = 1,8$;

$$I_{\text{пуск}} = 1,8 \times 137,92 = 248,25 \text{ А}$$

Визначаємо струм спрацювання максимально-струмового захисту:

$$I_{\text{мах}} = k \times I_{\text{пуск}}, \quad (7.0)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де k - коефіцієнт, для розрахунку приймаємо $k = 1,8$;

$$I_{\max} = 1,8 \times 940,44 = 1692,8 \text{ А.}$$

Визначаємо струм спрацювання теплового захисту:

(7.1)

$$I_{\text{т.з}} = k \times I_{\text{ном}},$$

де k - коефіцієнт, для розрахунку приймаємо $k = 1,3$;

$$I_{\text{т.з}} = 1,3 \times 138,3 = 179,8 \text{ А}$$

За каталогом вибираємо автоматичний вимикач із серії ВА 57-35, технічні характеристики вимикача приведено в додатку 21:

Найменування показника	Показник
Номинальна напруга мережі, В	400
Номинальний струм, А	160
Номинальна частота, Гц	50
Кількість полюсів	трехфазные
Стійкість контактів до зносу, циклів В/О	2500
Разовий струм КЗ ($I_{\text{сн}}$ при $U=380\text{В}$), кА	40
Разовий струм КЗ ($I_{\text{сн}}$ при $U=660\text{В}$), кА	18
Разчіплювач	електромагнітний + тепловий
Привод	ручний
Виконання	стаціонарний
Максимальна напруга, В	690
Частота струму, Гц	50
Ступінь захисту	IP20
Кліматичне виконання, категорія розміщення	УХЛ3

Додаток 21 - Характеристики вимикача ВА 57-35

Матеріалами струмоведучих частин проводів і кабелів можуть бути алюміній, мідь, їх сплави, або сталеві. Мідь - один із кращих провідників електричного струму, тому найкращі техніко-економічні показники можна отримати при

менших перетинах, ніж при проводах з інших матеріалів. Мідь добре захищена від хімічних. Алюміній має гіршу провідність (в 1,6 раз менше) в порівнянні з міддю. Однак провідність алюмінію все ж висока, що теж дозволяє його використовувати в якості жил проводів або кабелів. Однак алюміній має меншу вартість, в порівнянні з міддю.

Для вибору перерізу провідника за умовами нагріву струмами навантаження порівнюємо розрахунковий максимальний струм I_p і допустимий струм $I_{доп}$ для провідника прийнятої марки і умов його прокладки.

При цьому необхідно дотримуватися умов:

(7.2)

$$I_p \leq I_{доп}$$

Вибір кабелю, прокладеного до перетворювача частоти визначаємо розрахунковий струм кабельної лінії для двигуна потужністю 75 кВт при $U_{л} = 380$ В

(7.3)

$$I_p = \frac{P_p \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos \varphi}$$

Де: P_p – потужність двигуна, кВт;

$U_{л}$ - лінійна напруга, В;

$$I_p = \frac{75 \times 1000}{1,73 \times 380 \times 0,88} = 129,64 \text{ А}$$

Вибираємо переріз мідного кабелю типу КГ-3*50+1*35 та перевіряємо, щоб виконувалися умови:

(7.4)

$$S = 50 \text{ мм}^2$$

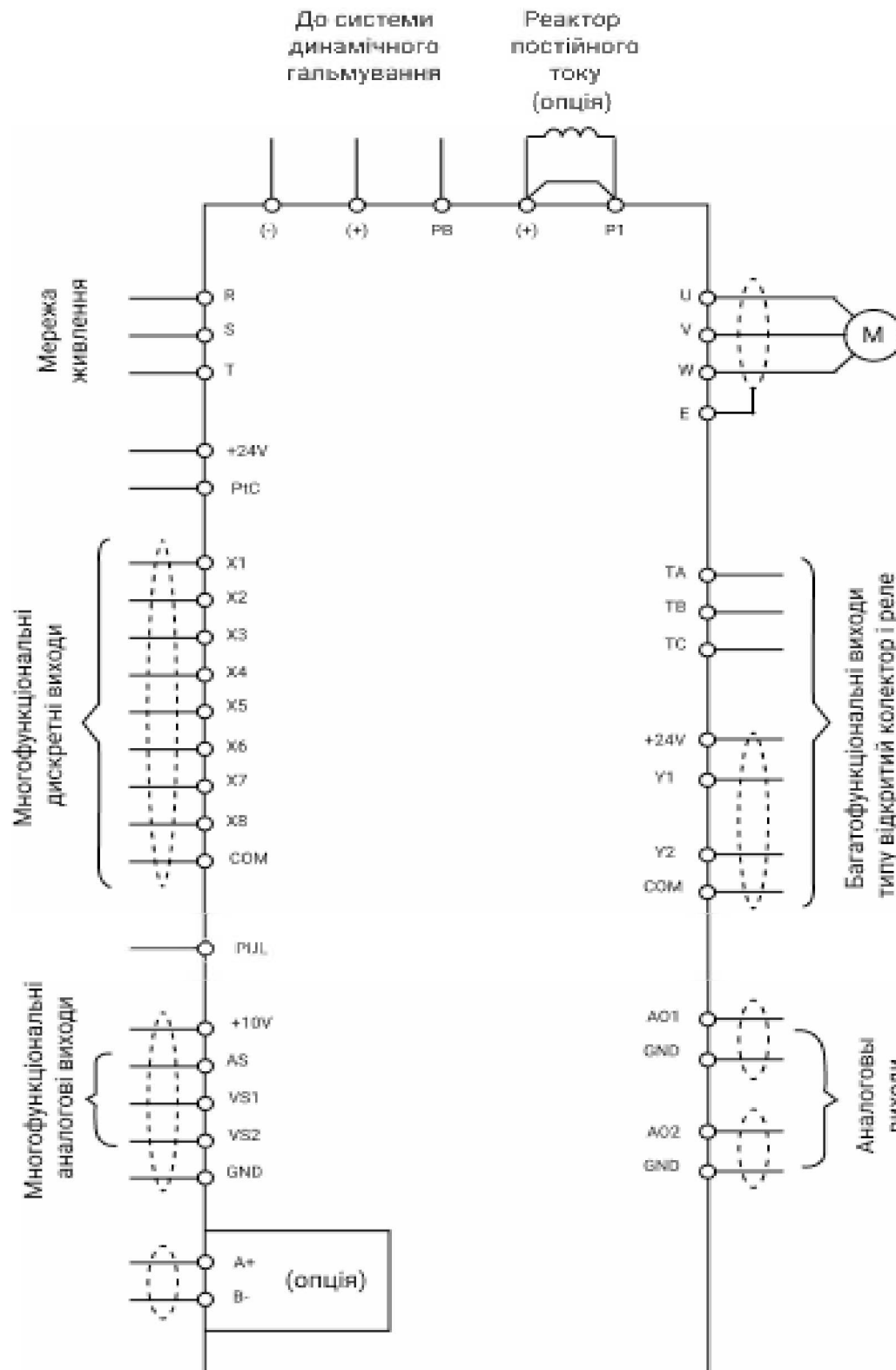
$$I_{доп.} = 160 \text{ А} > I_p = 129 \text{ А}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Розробка і опис системи керування та її елементної бази

Підключення та налаштування перетворювача частоти

В експлуатаційній документації перетворювачів частоти Veichi AC70 наведено стандартну схему підключення ПЧ у додатку 22



Додаток 22 - Стандартна схема підключення ПЧ типу Veichi AC70

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

60

При підключенні дроселя постійного струму необхідно прибрати перемичку між клемми (+) і P1. 2) Дискретні входи (X1-X6) можуть мати NPN і PNP логіку, за замовчуванням NPN (перемичка між + 24V і PLC). **УВАГА ПЕРЕД ВКЛЮЧЕННЯМ** необхідно перевірити правильність ПІДКЛЮЧЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА частоти!!!

Перетворювач з живленням від мережі 380 В, необхідно підключити електроживлення до клем R, S, T (підключення до інших клем може вивести частотний перетворювач з ладу). Далі необхідно підключити вихідні клемми U, V, W перетворювача частоти до відповідних клем U, V, W на електродвигун. ПЕРШОМУ ВКЛЮЧЕННІ необхідно повернути на заводські настройки, ввести номінальний струм і напругу двигуна, вибрати метод управління та виконати автопідстроювання:

Підключити датчик тиску (розрідження) відповідно до схеми наведеної в паспорті на ПЧ.

00 - 02 = 9 - скидання налаштувань за замовчуванням для 50 Гц

00 - 20 = 0 - джерело завдання уставки - цифровий пульт

00 - 21 = 0 - пуск / стоп з цифрового пульта

00 - 21 = 1 - якщо необхідно підключати кнопки до вхідних терміналів (пуск / стоп з зовнішніх терміналів)

00 - 25 = 0162HEX - 16 - означає відображення одиниць тиску в барах, 2 - кількість знаків після коми

00 - 26 = 10.00 - завдання і зворотний зв'язок знаходяться в діапазоні 0 ... 10,00 бар

01 - 12 = ... - необхідний час розгону в секундах

01 - 13 = ... - необхідний час уповільнення в секундах

02 - 35 = 1 - автозапуск приводу при подачі живлення або після команди скидання, якщо на дискретній вході присутній команда ПУСК.

03 - 00 = 0 - аналоговий вхід AVI1 (немає функції)

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

03 - 01 = 5 - сигнал зворотного зв'язку ПІД-регулятора (сигнал на вході АСІ)

03 - 02 = 0 - аналоговий вхід АVІ2 (немає функції)

08 - 00 = 1 - негативний зворотний зв'язок зі входу АСІ

12 - 00 = 2 - каскадне управління зі змінним майстром

12 - 01 = 3 - кількість підключаються двигунів

12 - 03 = 3.0 - тимчасова затримка підключення наступного двигуна в секундах

12 - 04 = 3.0 - тимчасова затримка перед вимиканням двигуна в секундах

12 - 05 = 10.0 - тимчасова затримка перед перемиканням двигуна на пряме живлення від мережі, в секундах

12 - 06 = 50.00 - вихідна частота при якій відбудеться перемикання в каскадному режимі, в Гц

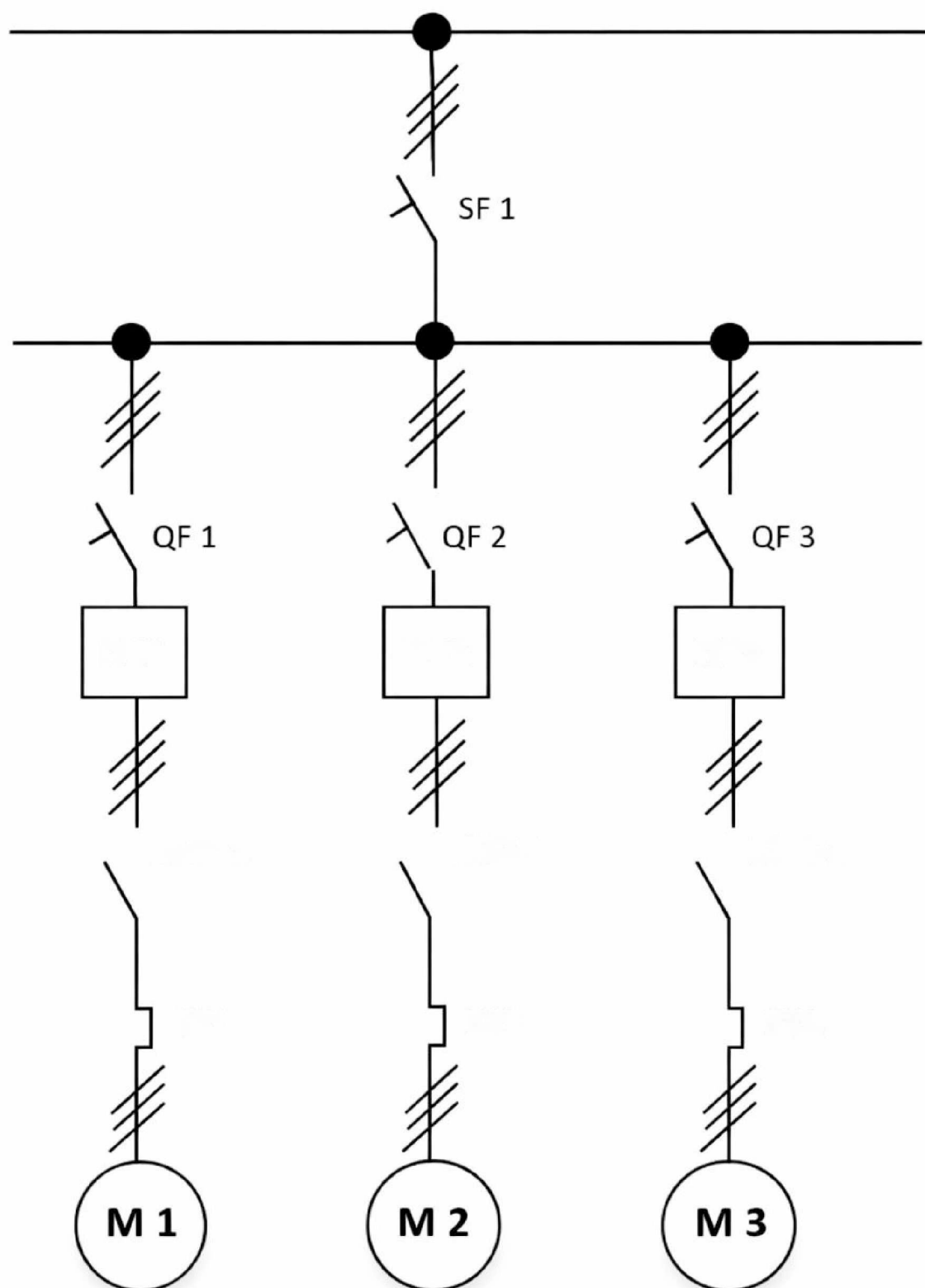
12 - 08 = 25.00 - вихідна частота ПЧ, при якій один з додаткових двигунів буде вимкнений, в Гц.

Нижче далі наведено: загальний вид ПЧ у додатку 23. А у додатках з 24 по 29 - однолінійні схеми керування ВВН, та схеми РЗА.



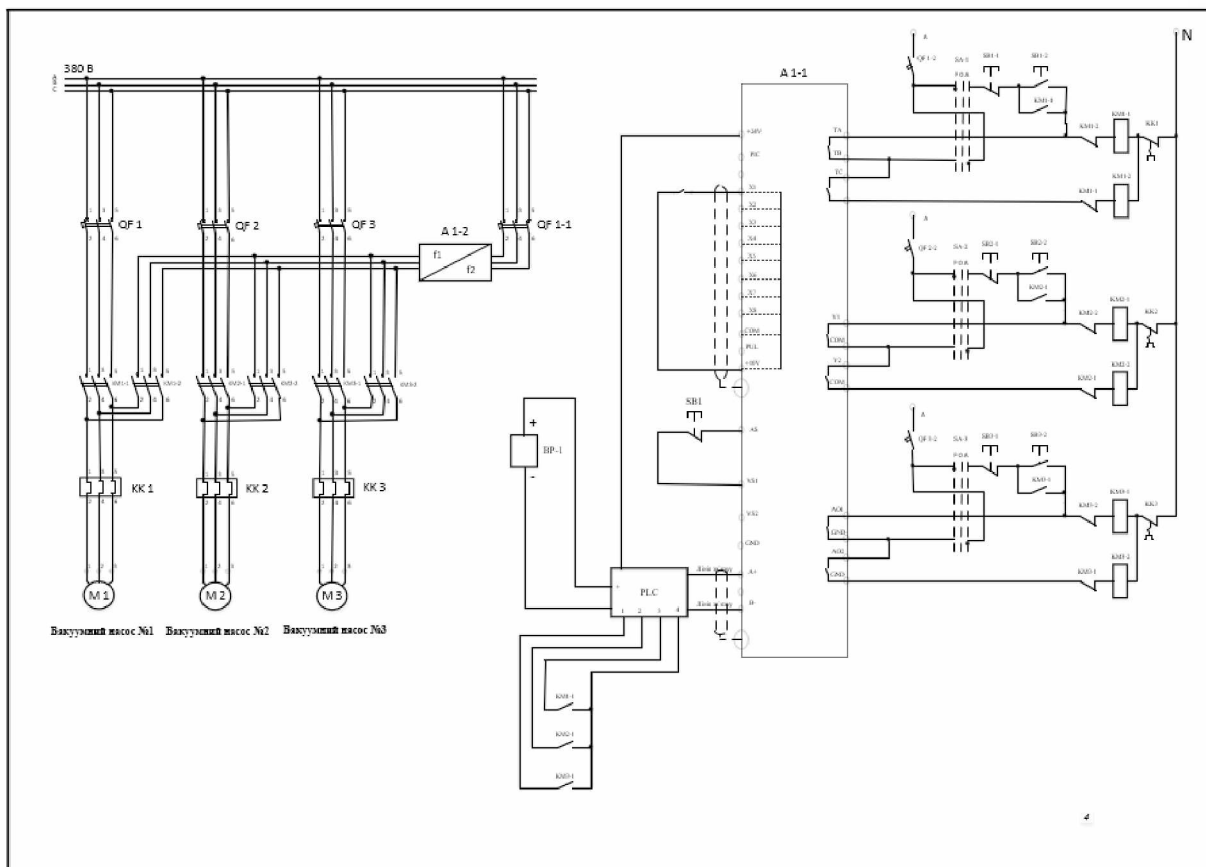
Додаток 23 – загальний вигляд ПЧ Veichi AC70

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Додаток 24 - Схема однолінійна керування ПЧ – АД (ВВН)

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63



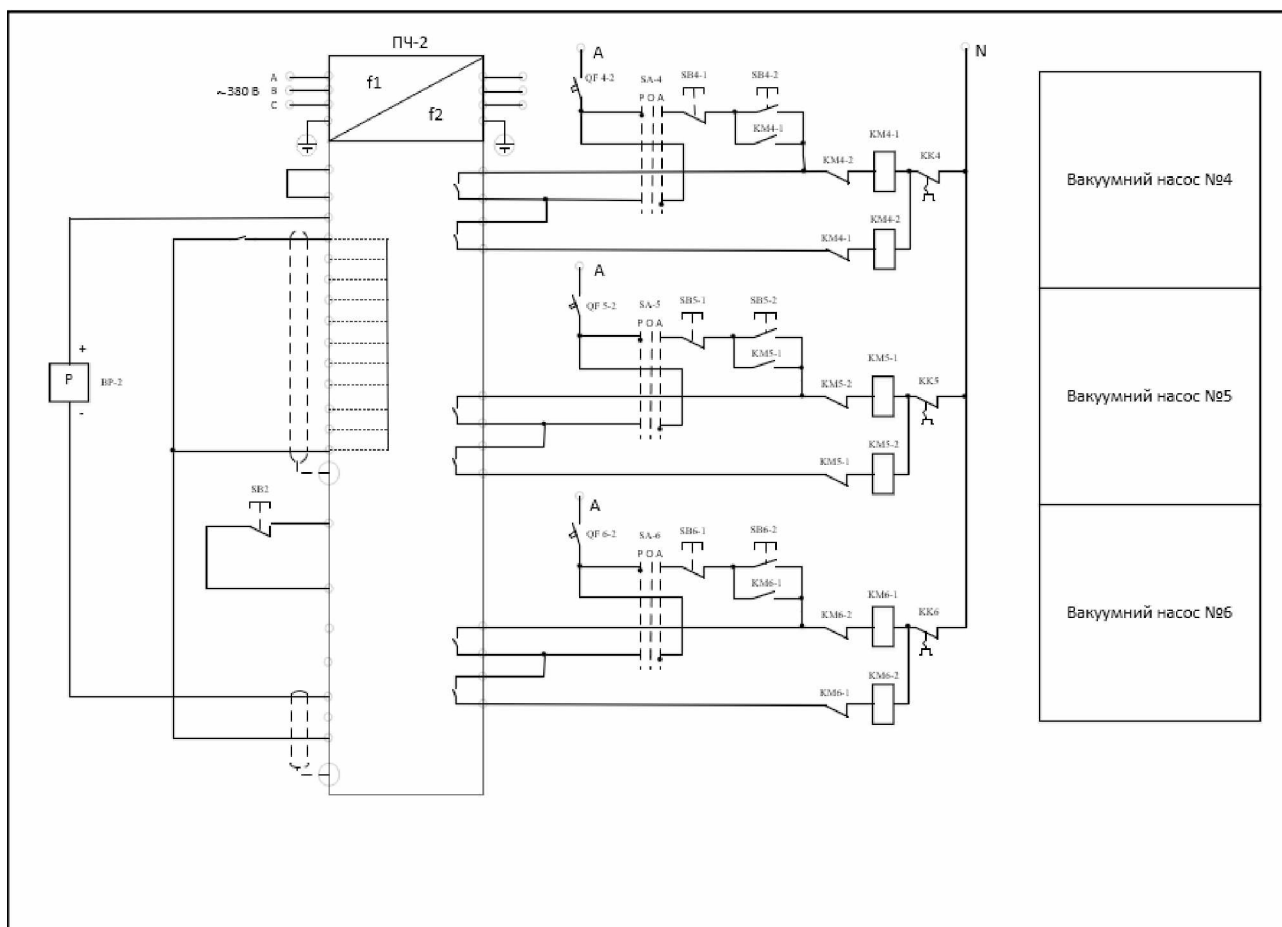
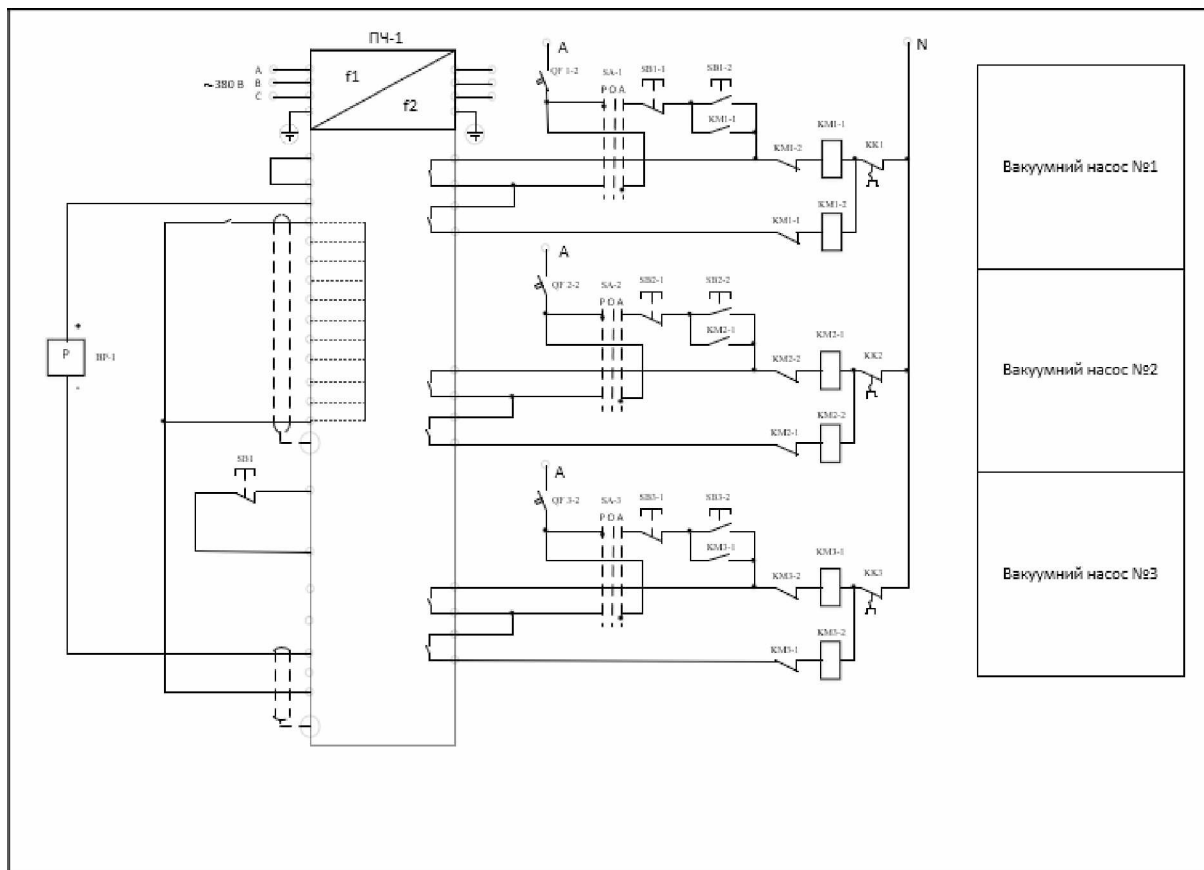
Додаток 25 - Принципова схема керування насосами частотним перетворювачем

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

64

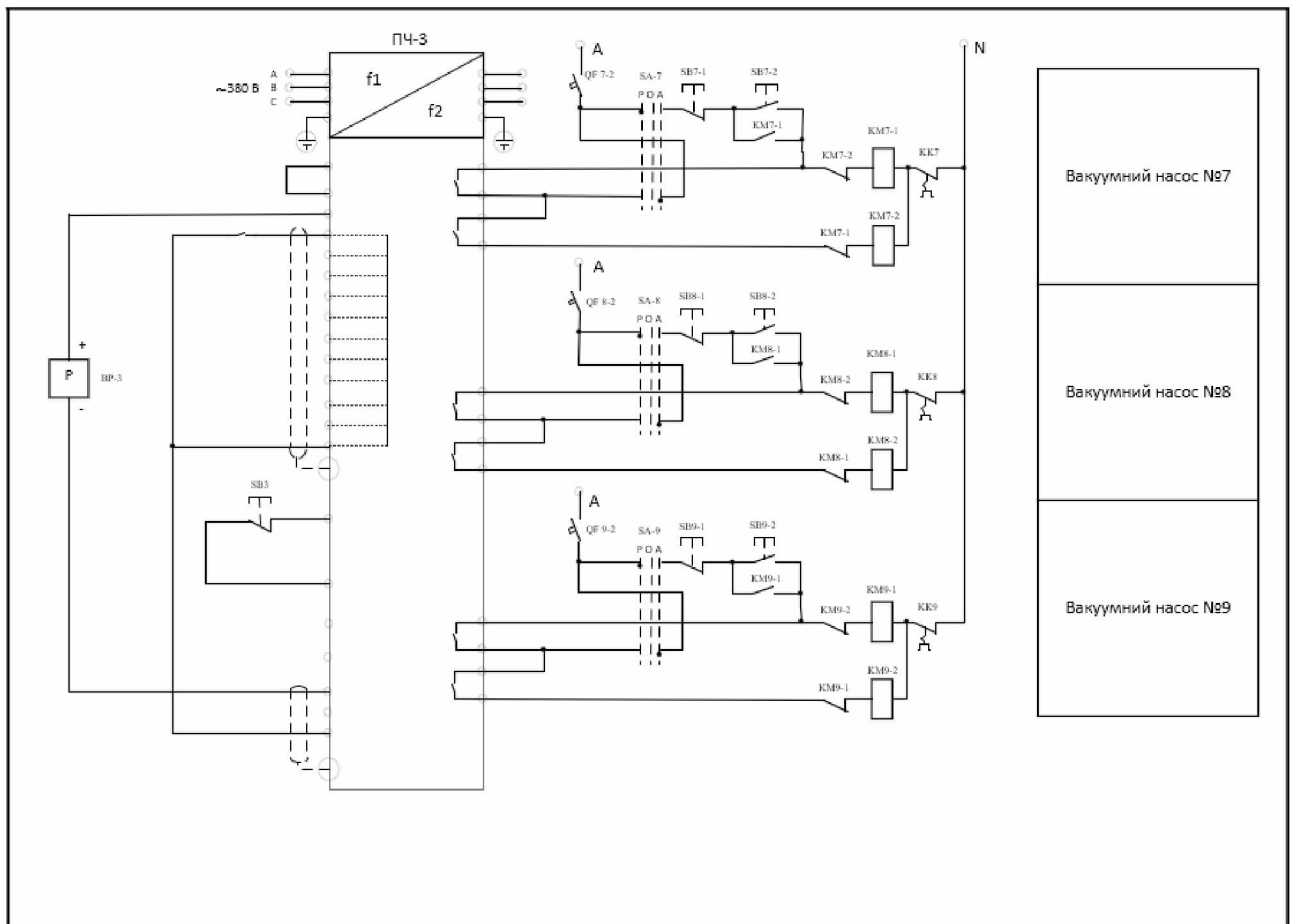


Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

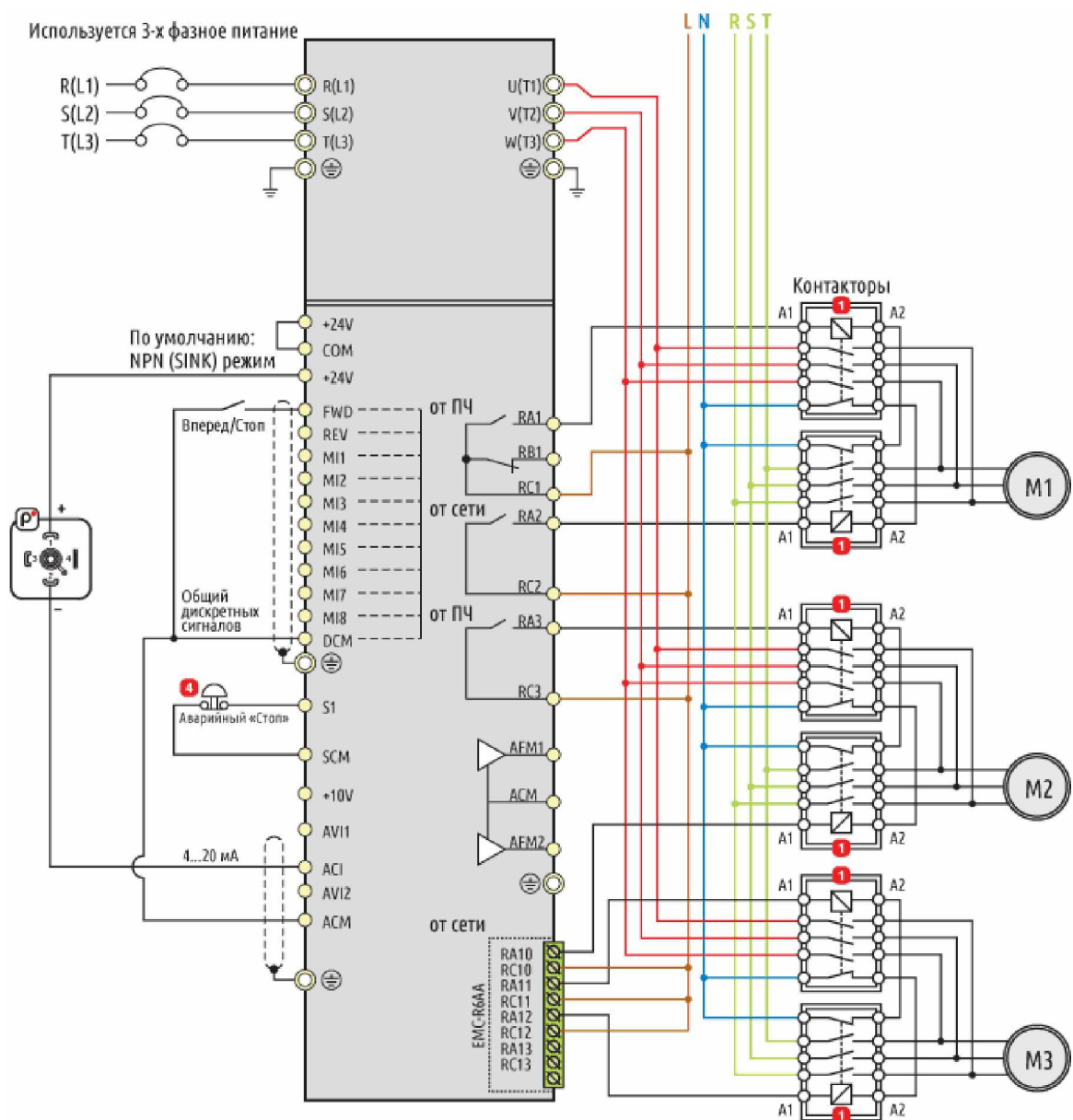
ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

65



Додаток 26 - Схеми РЗА



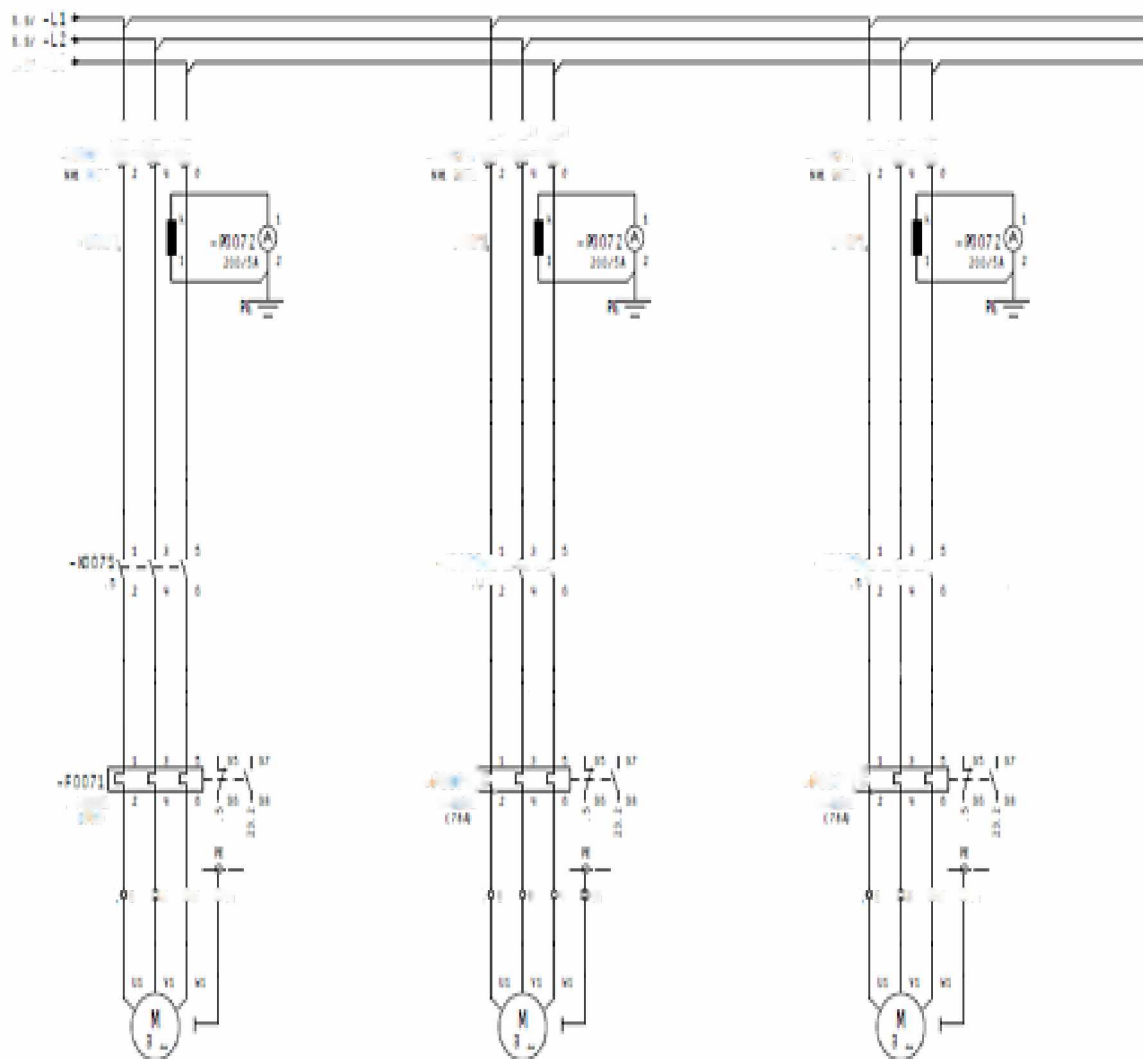
Додаток 27 - Схема керування вакуумними насосами передбачена проектом

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

67



Вакуумний насос № 1

Вакуумний насос № 2

Вакуумний насос № 3

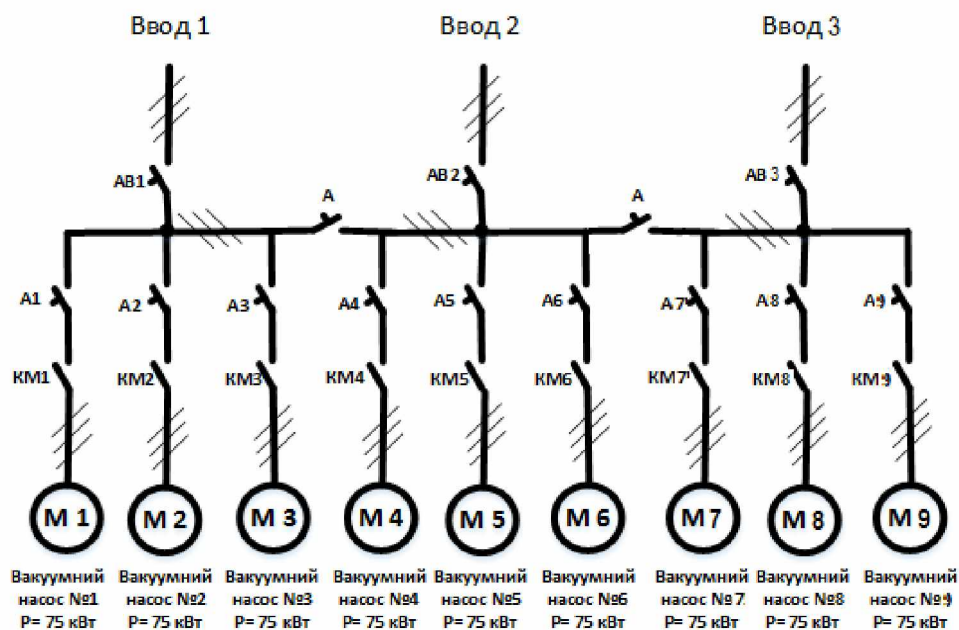
Додаток 28 - Діюча схема керування вакуумними насосами

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

68



Додаток 29 – Однолінійна схема керування насосами

Система керування вакуумно-насосною станцією формувальної лінії сталєфасоноливарного цеху побудована на основі застосування частотних перетворювачів (ПЧ) для асинхронних електродвигунів. Основним завданням системи є забезпечення стабільного рівня вакууму при мінімальних витратах електроенергії та підвищення надійності роботи обладнання.

Структура системи керування:

- Датчики тиску та вакууму – здійснюють контроль параметрів у магістралі та передають сигнали до контролера.
- Програмований логічний контролер (PLC) – обробляє інформацію від датчиків, формує команди для частотних перетворювачів та забезпечує алгоритм роботи насосів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

Арк.

69

- Частотні перетворювачі (ПЧ) – регулюють швидкість обертання роторів асинхронних двигунів залежно від потреби у вакуумі.
- Асинхронні електродвигуни вакуумних насосів – основні виконавчі механізми, що забезпечують створення вакууму.
- Панель оператора (HMI) – дозволяє персоналу здійснювати моніторинг параметрів, налаштування режимів роботи та діагностику системи.
- Система захисту та автоматики – включає автоматичні вимикачі, реле захисту від перевантажень, систему заземлення та блоки аварійного відключення.

Принцип роботи:

Система керування працює за принципом автоматичного регулювання продуктивності насосів. При зниженні рівня вакууму PLC подає сигнал на ПЧ, який збільшує частоту живлення двигуна, відповідно підвищуючи швидкість обертання ротора насоса. При досягненні необхідного рівня вакууму частота знижується, що дозволяє економити електроенергію та зменшити знос обладнання.

Елементна база системи:

- Частотні перетворювачі типу Siemens SINAMICS / ABB ACS (або аналогічні), що забезпечують плавне регулювання швидкості.
- PLC сімейства Siemens S7-1200 або Schneider Modicon, які мають достатню кількість входів/виходів для підключення датчиків та виконавчих механізмів.
- Датчики тиску WIKA або Endress+Hauser, що забезпечують точний контроль параметрів вакууму.
- Панель оператора Siemens KTP для зручності управління та відображення даних.
- Силові кабелі, автоматичні вимикачі та захисні реле відповідно до розрахованих навантажень.

Переваги системи:

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Зниження споживання електроенергії за рахунок регулювання швидкості двигунів.
- Підвищення надійності роботи вакуумно-насосної станції.
- Зменшення витрат на технічне обслуговування та ремонт.
- Можливість інтеграції у загальну систему автоматизації цеху.
- Забезпечення безпечних умов праці та захисту обладнання.

Алгоритм роботи системи керування вакуумно-насосною станцією

1. Початковий стан системи

- PLC отримує сигнал від датчиків тиску/вакууму.
- Якщо рівень вакууму відповідає заданим параметрам – система працює у режимі підтримки.

2. Зниження рівня вакууму

- Датчики фіксують падіння тиску.
- PLC формує команду на збільшення частоти живлення двигуна через ПЧ.
- Частотний перетворювач підвищує швидкість обертання ротора насоса.

3. Досягнення необхідного рівня вакууму

- PLC отримує сигнал про стабілізацію параметрів.
- Частотний перетворювач знижує частоту живлення двигуна.
- Насос переходить у режим економії енергії.

4. Робота у сталому режимі

- Система підтримує необхідний рівень вакууму з мінімальними витратами електроенергії.
- PLC здійснює постійний моніторинг параметрів.

5. Аварійні ситуації

- При перевантаженні або відхиленні параметрів система захисту відключає двигун.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- На НМІ панелі з'являється повідомлення про аварію.
- PLC переводить резервний насос у роботу (якщо передбачено).

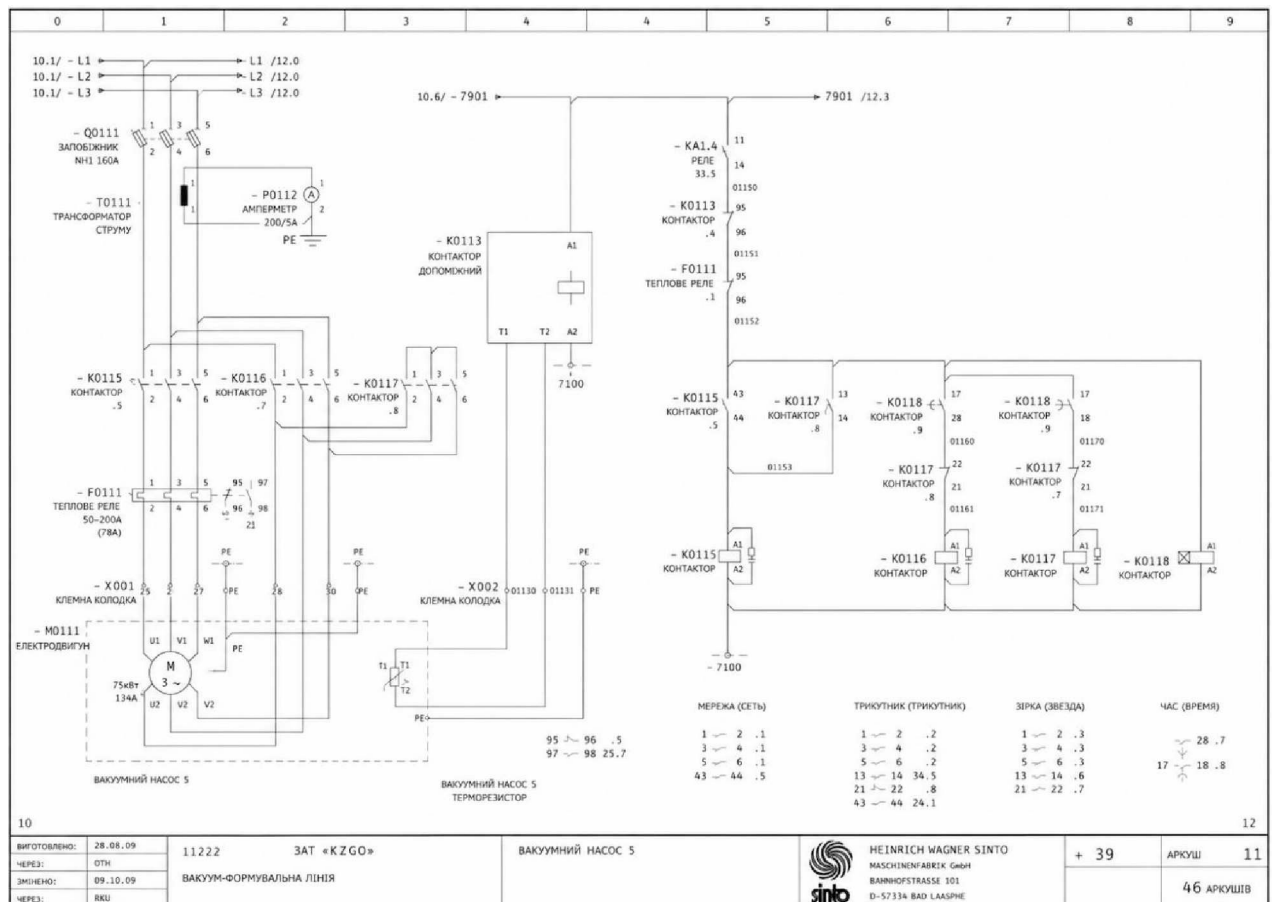
6. Завершення роботи

- PLC подає команду на плавне зниження частоти ПЧ.
- Двигун зупиняється без ударних навантажень.
- Система переходить у режим очікування.

Таким чином, алгоритм роботи забезпечує:

- Автоматичне регулювання продуктивності насосів;
- Економію електроенергії;
- Підвищення надійності та безпеки роботи обладнання;
- Можливість резервування у випадку аварії.

Оскільки решта схем схожа, а відрізняються вони лише маркуванням, то нижче до прикладу в додатку 30- наведена одна з декількох схем, нехай це буде ВН-5 у ВПФЛ



Додаток 30 - Однолінійна схема ВН-5 у ВПФЛ

РОЗДІЛ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ

3.1.Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні

1. Математичний опис елементів системи

Для побудови моделей використовуються стандартні блоки бібліотеки Simscape / Power Systems (SimPowerSystems) або структурні блоки (Transfer Functions, Gain, Integrator).

- Асинхронний двигун (АД): Моделюється в осях $d - q$ за допомогою стандартного блока Asynchronous Machine (в режимі двигуна). Рівняння руху електропривода:

(7.5)

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c$$

де J — сумарний момент інерції ротора двигуна та крильчатки насоса, ω — кутова швидкість, M_e — електромагнітний момент АД, M_c — момент опору (навантаження) насоса.

- Насосний агрегат (Момент опору): Навантаження на валу АД має вентиляторний (квадратичний) характер і залежить від швидкості:

(7.6)

$$M_c = M_0 + (M_{\text{ном}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2$$

де M_0 — момент заклинювання (сухе тертя), $M_{\text{ном}}$ — номінальний момент насоса при номінальній швидкості $\omega_{\text{ном}}$.

- Гідравлічна мережа (Тиск насоса): Вихідний тиск насоса H (напір) у першому наближенні залежить від квадрата швидкості:

(7.7)

$$H = a \cdot \omega^2 - b \cdot Q^2$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09						
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат	РОЗДІЛ 3. Моделювання приводу режиму роботи приводу механізму на ЕОМ.				Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив.	Носков Я.В.										
Перевірів.	Сьомочкін А.Б.									73	
Рецензія.									КНУ Каф. ЕІ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.											
Затверд..	Сінчук О.М.										

Для спрощення моделі замкненої системи за тиском (без детального урахування витрати Q) залежність тиску від швидкості у сталому режимі приймають як:

(7.8)

$$H \approx k_H \cdot \omega^2$$

а динаміку зміни тиску в трубопроводі описують аперіодичною ланкою першого порядку:

(7.9)

$$W_{\text{тр}}(s) = \frac{k_{\text{тр}}}{T_{\text{тр}}s + 1}$$

де $T_{\text{тр}}$ — постійна часу гідравлічної мережі (зазвичай 0.5 ... 2.0с),

$k_{\text{тр}}$ — коефіцієнт передачі.

2. Структура моделі одиночного АД з насосом (Розімкнена система)

Ця модель демонструє прямий пуск двигуна від мережі 380В, 50Гц на вентиляторне навантаження.

Елементи схеми в Simulink:

- Three-Phase Programmable Voltage Source — джерело живлення 380 В.
- Asynchronous Machine SI Units — модель АД (вибираються каталожні параметри двигуна).
- Блок навантаження (Subsystem): на вхід подається швидкість ротора w з виходу макета АД (блок Bus Selector), всередині реалізується формула:

(7.9)

$$M_c = k \cdot w^2$$

вихід підключається до входу T_m (механічний момент) АД.

- Step (Навантаження): для моделювання зміни гідравлічного опору мережі (наприклад, закриття/відкриття засувки), що змінює коефіцієнт навантаження у заданий момент часу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Структура замкненої за тиском системи ПЧ-АД з насосом

Ця модель реалізує енергоефективне керування за допомогою частотного перетворювача та контуру зворотного зв'язку за тиском.

Елементи схеми в Simulink:

Задатчик тиску (Constant / Step): задає необхідний тиск у системі:

(8.0)

$$H_{\text{зад.}}$$

Елемент порівняння (Sum): обчислює помилку регулювання:

(8.1)

$$\Delta H = H_{\text{зад.}} - H_{\text{факт.}}$$

ПІД-регулятор (PID Controller): формує сигнал завдання на частоту ПЧ.

Частотний перетворювач (ПЧ): може бути змодельований спрощено як аперіодична ланка:

(8.2)

$$W_{\text{пч}}(s) = \frac{1}{T_{\text{пч}}s + 1}$$

з обмеженням вихідної частоти (0 ... 50Гц), або детально через інвертор на IGBT транзисторах зі скалярним керуванням:

(8.3)

$$(U/f = \text{const})$$

Блок АД з насосом (аналогічно розімкненій системі).

Модель датчика тиску та трубопроводу: передавальна функція:

(8.4)

$$W_{\text{тр}}(s)$$

яка перетворює швидкість обертання двигуна у фактичний тиск:

(8.5)

$$H_{\text{факт}}$$

та передає його на елемент порівняння.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Програма проведення експериментів

У роботі необхідно навести графіки (осцилограми) для таких режимів:

Розімкнена система (Прямий пуск)

Пуск: Показати величезний кидок пускового струму ($I_{\text{пуск}} \approx 5 \dots 7 I_{\text{ном}}$) та коливання електромагнітного моменту. Процес завершується виходом на сталу швидкість.

Навантаження: У момент часу $t = 3\text{с}$ подати ступінчасту зміну моменту опору (імітація зміни положення засувки). Показати незначне просідання швидкості та збільшення робочого струму.

Замкнена система (Керування з ПЧ)

Плавний пуск: Завдяки ПІД-регулятору та темпу розгону ПЧ, струм двигуна під час пуску не перевищує номінальний або заданий рівень ($1.2 \dots 1.5 I_{\text{ном}}$). Тиск плавно досягає заданого значення без перерегулювання.

Робота при зміні навантаження: На сталій швидкості імітується зміна витрати води (наприклад, відкриття додаткових кранів споживачами — падіння тиску).

Система повинна відпрацювати це обурення: ПЧ збільшує частоту, швидкість АД зростає, тиск відновлюється до $H_{\text{зад}}$.

Гальмування: Перехід системи на нижчу уставку тиску або повна зупинка.

Показати характер зміни частоти та струму при керованому зниженні швидкості.

5. Оформлення результатів у роботі. Порівняльні характеристики динамічних режимів обох систем заносимо у таблицю (додаток 31) для наочності:

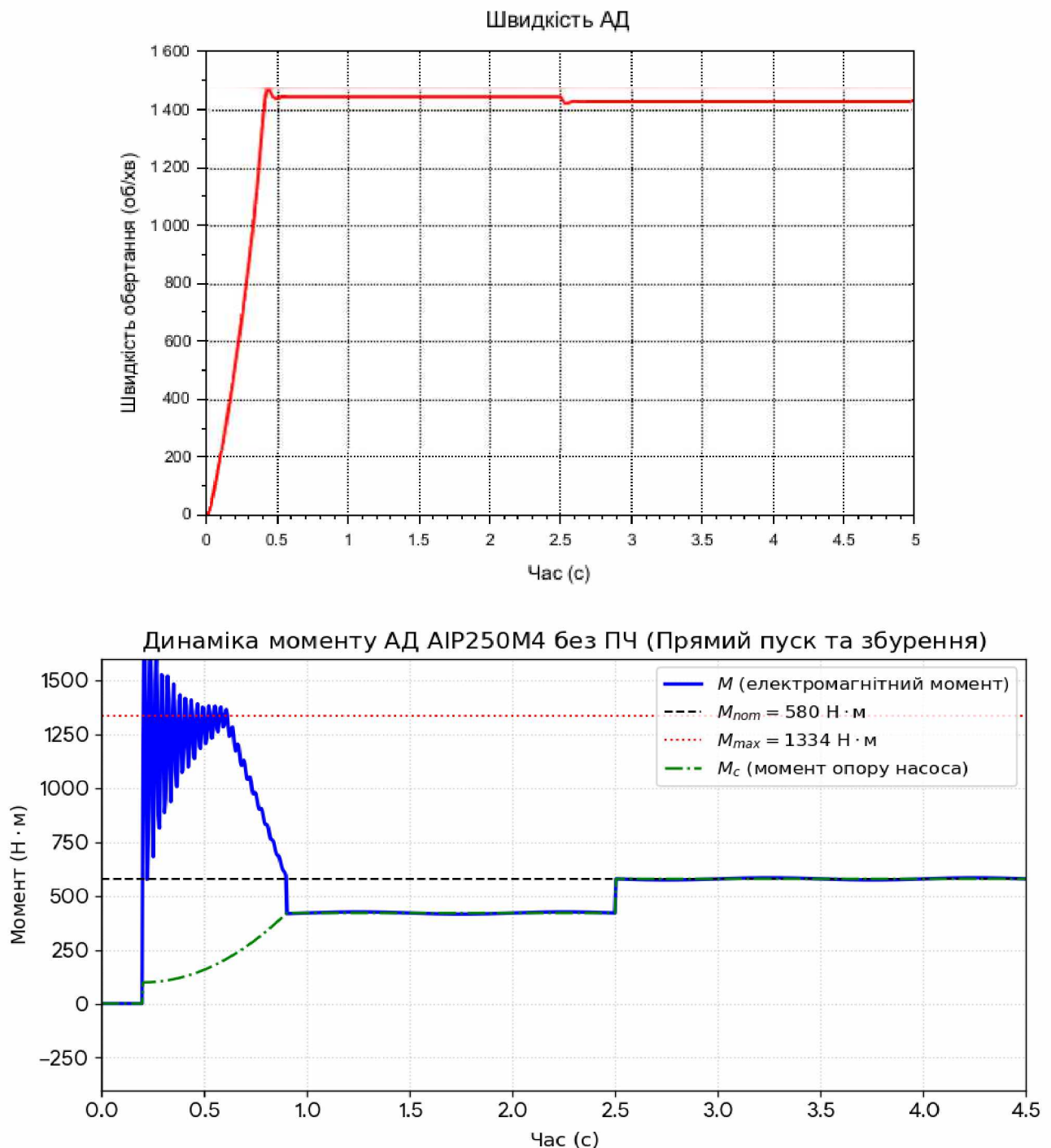
Динамічний показник	Одиночний АД (розімкнена система)	Система ПЧ–АД (замкнена за тиском)
Максимальний пусковий струм	$5.5 \dots 7.0 \cdot I_{\text{ном}}$	Повністю контрольований $1.1 \dots 1.3 \cdot I_{\text{ном}}$
Час пуску агрегату	Короткий $0.2 \dots 0.8\text{ с}$, ударний	Регульований $2.0 \dots 10.0\text{ с}$, плавний
Динамічні удари в гідромережі	Присутні (гідроудари при пуску)	Відсутні завдяки плавному зростанню тиску
Стабілізація тиску при збуреннях	Відсутня (тиск коливається залежно від витрати)	Стабільний режим (відхилення $\leq 2\text{--}5\%$ від завдання)

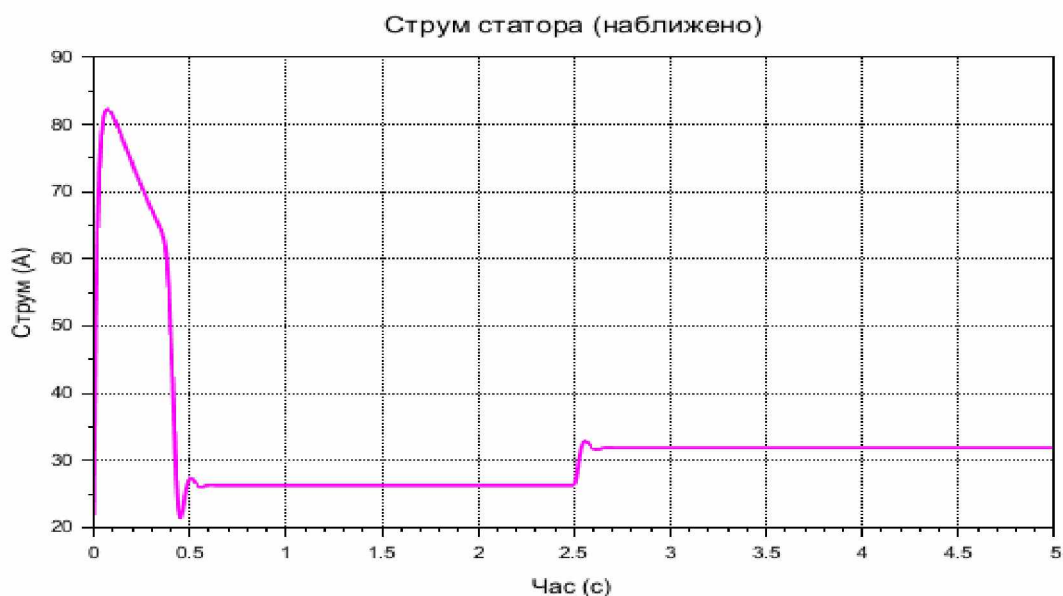
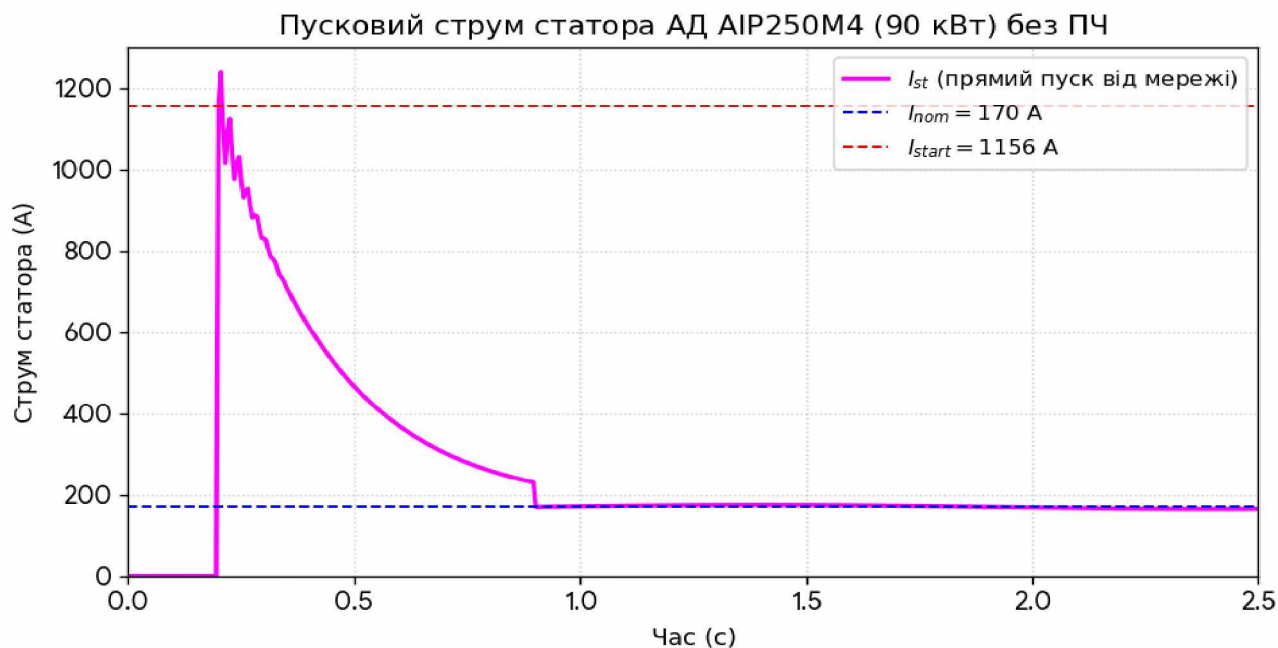
Додаток 31 - Порівняльна таблиця динамічних показників

Моделювання розімкненої системи: Одиночний АД з насосом

Ралізує прямий пуск двигуна від мережі на вентиляторне навантаження. Модель АД реалізована у спрощеній динамічній формі (електромагнітна інерція статора + механічна інерція ротора), що ідеально підходить для інженерних розрахунків гідропривода.

Побудовані графіки розімкненої системи з програми - наведено у додатку 32





Додаток 32 – Графіки розімкненої системи АД без ПЧ

Тож для розімкненої системи: при пуску без ПЧ спостерігається різкий стрибок електромагнітного моменту (ударні навантаження на крильчатку) та тривалий вихід на режим через відсутність форсування. На позначці $t=2.5 \text{ с}$ чітко видно просідання швидкості внаслідок збільшення гідравлічного опору мережі (прикриття засувки). Головною проблемою є критично великий пусковий струм понад 1000 А що створює просідання напруги в цеху та термічно руйнує ізоляцію двигуна. Крім того, це викликає ударний момент на валу, який призводить до систематичного обриву пасів ремінної передачі.

Змн.	Арк.	Не докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09

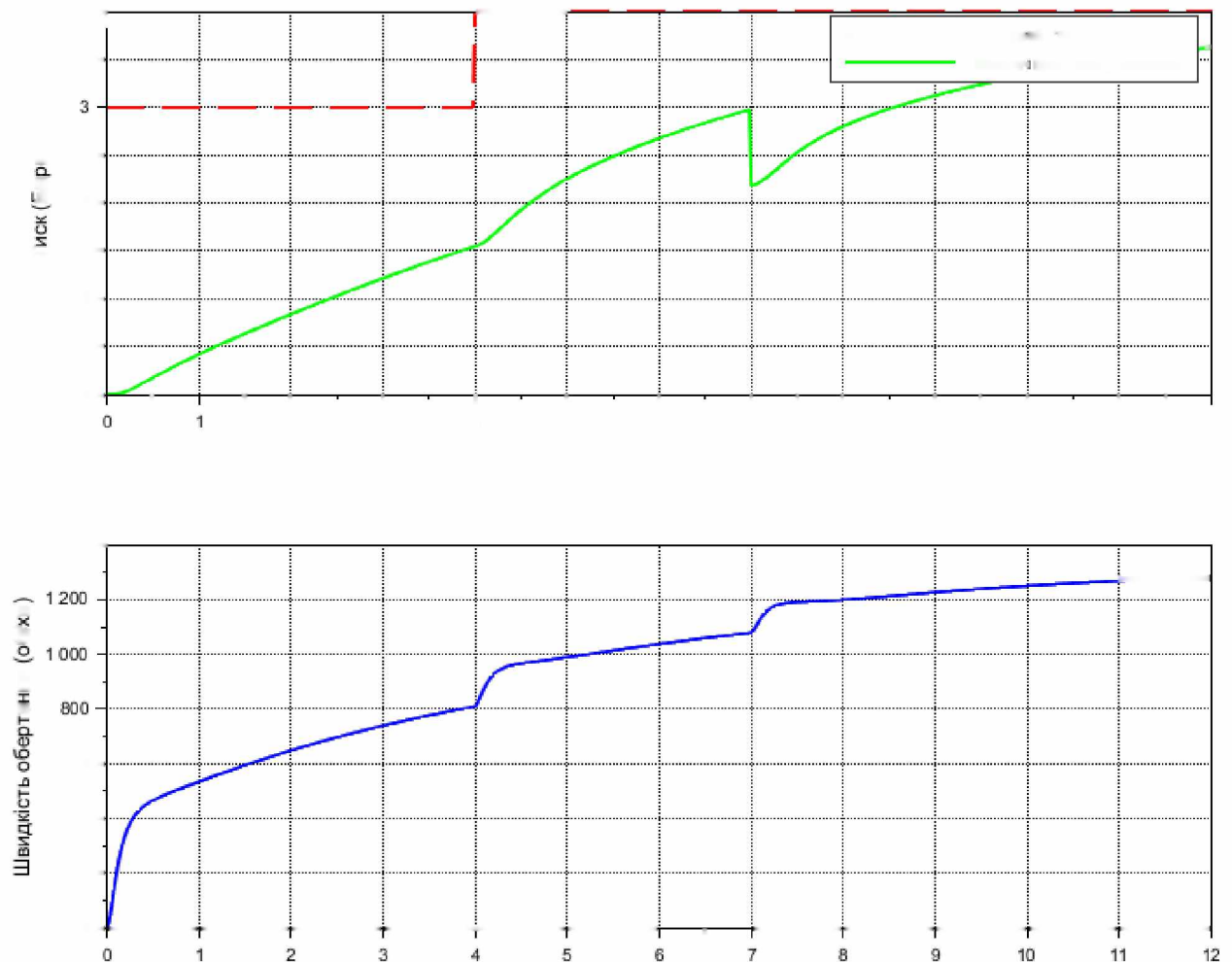
Арк.

78

Моделювання замкненої системи: ПЧ – АД – Насос із ПІД-регулятором тиску

Реалізує замкнений контур керування. Частота ПЧ змінюється не миттєво, а за допомогою ПІД-регулятора, який підтримує заданий тиск у трубопроводі, відпрацьовуючи динамічні збурення.

Побудовані графіки замкненої системи з програми - наведено у додатку 33



Додаток 33 – Графіки замкненої системи ПЧ-АД

Тож для замкненої системи: система демонструє відсутність гідроударів (тиск зростає плавно). На позначці $t=4$ с система успішно відпрацьовує нову уставку тиску. На позначці $t=7$ с (імітація прориву або різкого розбору води) тиск короткочасно падає, але ПІД-регулятор автоматично збільшує швидкість двигуна і повністю відновлює тиск до заданого рівня.

Для оцінки динамічних характеристик модернізованого електропривода вакуумно-насосної станції було виконано моделювання замкненої системи керування на ЕОМ. Метою моделювання є дослідження перехідних процесів під час пуску, гальмування та роботи привода під навантаженням, а також оцінка якості регулювання швидкості та стабілізації вакууму.

Об'єктом дослідження є електропривод водокільцевого вакуумного насоса ВВН1-90, що складається з асинхронного електродвигуна АІР250М4 потужністю 90 кВт та частотного перетворювача Veichi AC70-T3-075G/090P. Керування двигуном здійснюється за векторним законом Sensorless Vector Control із використанням вбудованого PID-регулятора. Основні параметри системи наведені в таблиці (додаток 34).

Параметр	Значення
Тип двигуна	АІР250М4
Потужність	90 кВт
Номінальна напруга	380 В
Частота мережі	50 Гц
Номінальна швидкість	1480 об/хв
Частотний перетворювач	АС70-Т3-075G/090P
Закон керування	Sensorless Vector Control

Додаток 34 - параметри системи ПЧ-АД

Механічний рух системи описується рівнянням:

(8.6)

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c$$

де:

- J — приведений момент інерції системи;
- M_e — електромагнітний момент двигуна;
- M_c — момент опору навантаження;
- ω — кутова швидкість ротора.

Для насосного навантаження момент опору визначається залежністю:

(8.7)

$$M_c = M_n \left(\frac{n}{n_n} \right)^2$$

де M_n — номінальний момент двигуна.

Номінальний момент двигуна становить:

(8.8)

$$M_n = \frac{9550P}{n}$$
$$M_n = \frac{9550 \cdot 90}{1480} = 580.7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приймаємо:

$$M_n \approx 581 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Під час моделювання досліджувалися такі режими роботи:

Пуск електропривода.

Гальмування електропривода.

Робота при номінальному навантаженні.

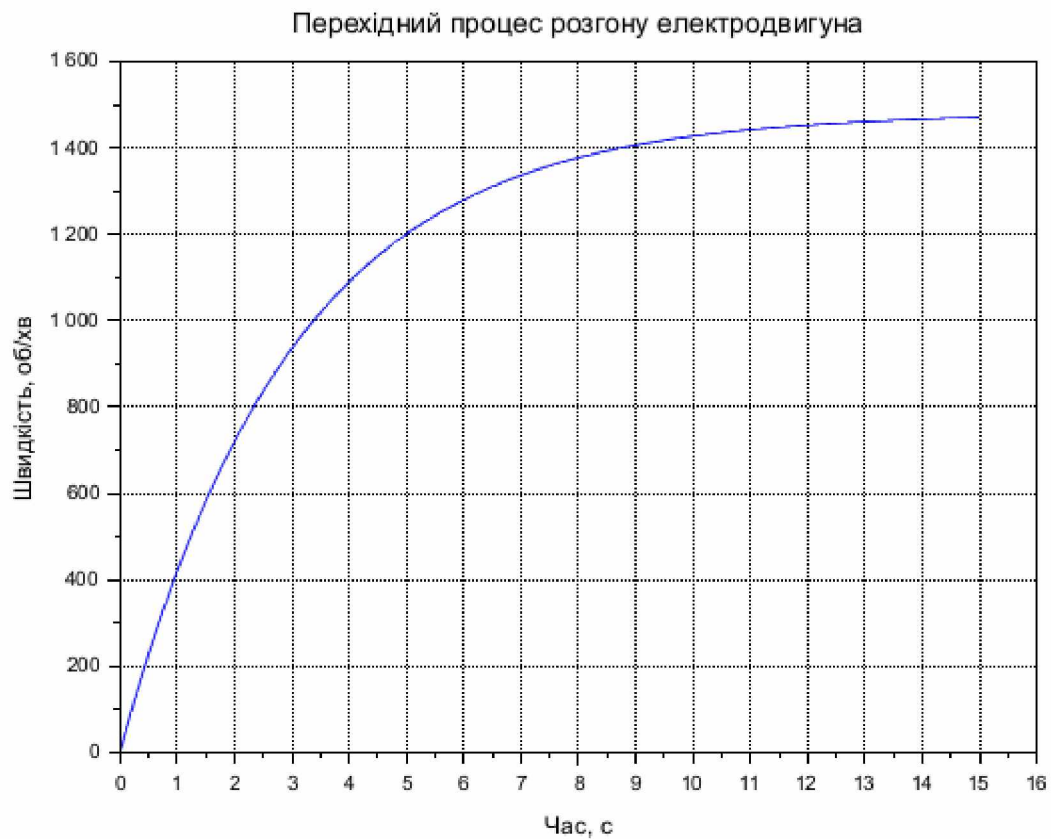
Стрибоподібна зміна навантаження.

Підтримання вакууму PID-регулятором.

Пусковий режим

Під час запуску частотний перетворювач забезпечує плавне збільшення частоти живлення двигуна від 0 до 50 Гц протягом 15 с. Завдяки цьому пусковий струм не перевищує 1,5–2 номінальних значень, що суттєво менше порівняно з прямим пуском від мережі. Кутова швидкість ротора зростає плавно без механічних ударів та коливань.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Додаток 35 – Перехідний процес розгону електродвигуна

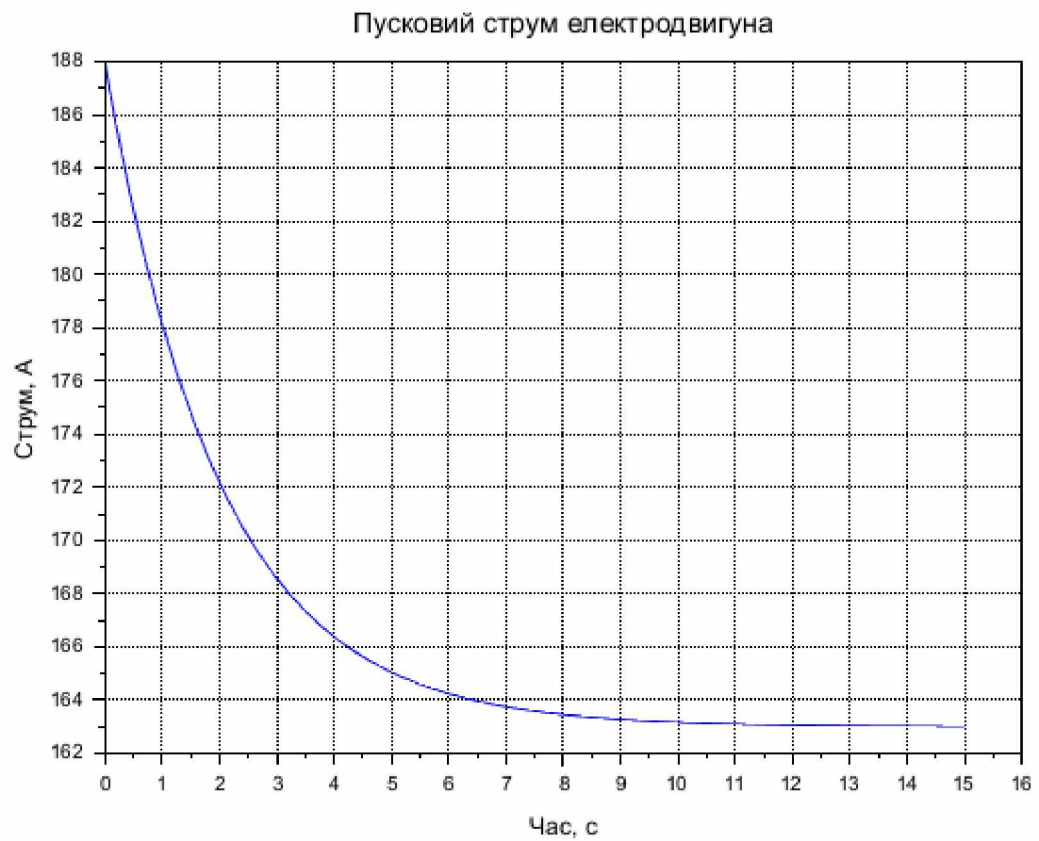
З графіка видно, що швидкість обертання плавно досягає номінального значення 1480 об/хв без перерегулювання та коливань.

Гальмівний режим

Для зупинки двигуна використовується режим керованого гальмування, реалізований засобами частотного перетворювача. Під час моделювання встановлено, що час зупинки електропривода значно менший порівняно з природним вибігом. При цьому струм гальмування не перевищує допустимих значень, що забезпечує безпечну роботу обладнання.

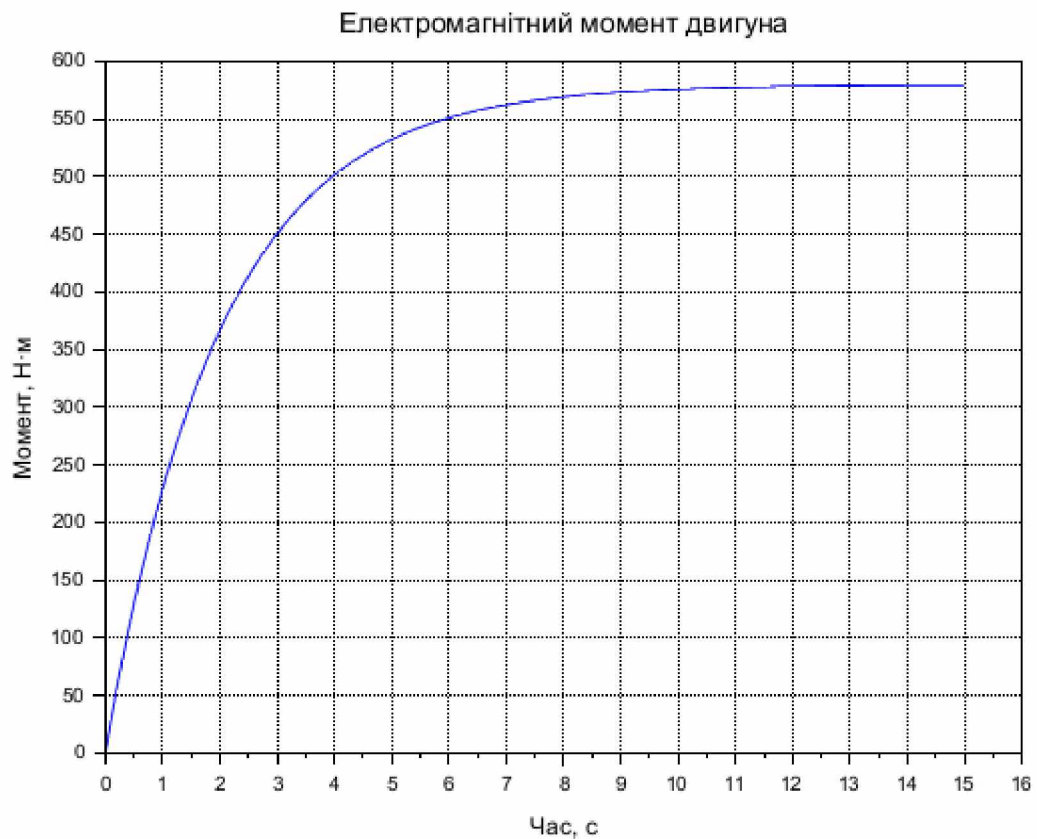
Робота при навантаженні

При зміні технологічного навантаження система автоматично компенсує відхилення шляхом зміни електромагнітного моменту двигуна. Після прикладання додаткового навантаження швидкість короткочасно зменшується, після чого регулятор відновлює заданий режим роботи.



Додаток 36 – Залежність струму двигуна від часу

Максимальне значення струму не перевищує допустимих меж, що свідчить про ефективність використання частотного регулювання.

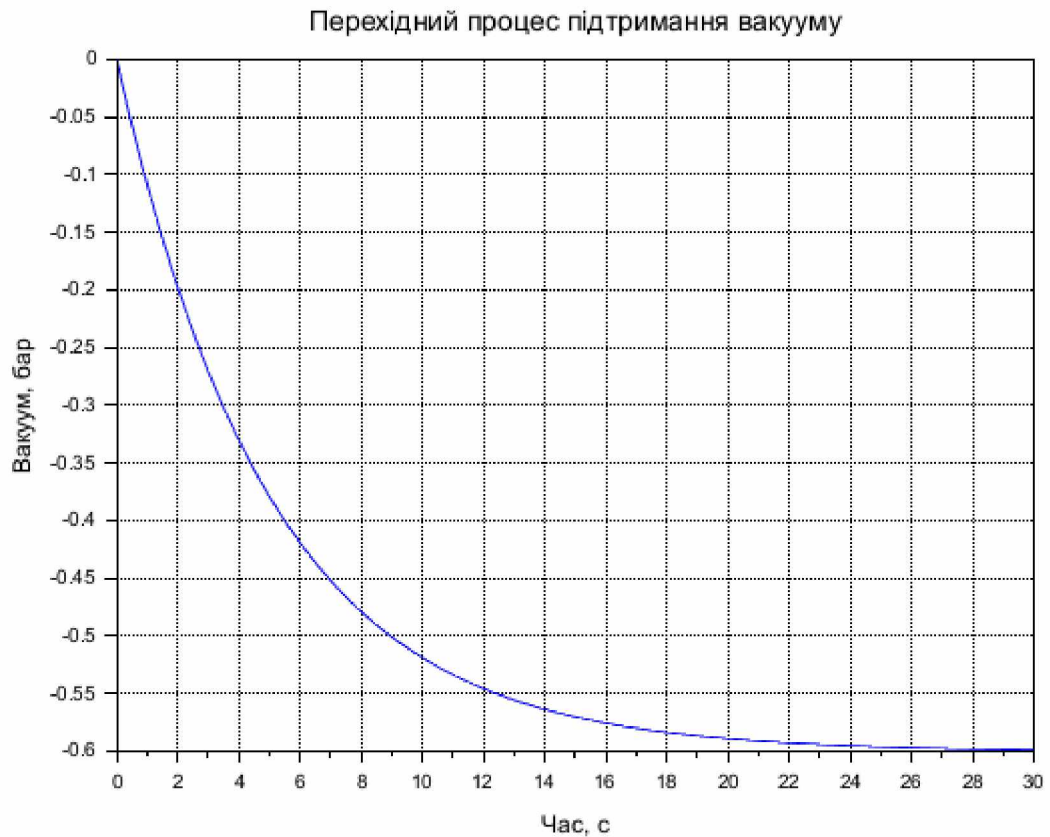


Додаток 37 – Зміна електромагнітного моменту двигуна

Під час зміни навантаження електромагнітний момент автоматично коригується та досягає номінального значення близько 581 Н·м.

Робота системи підтримання вакууму

Для стабілізації технологічного процесу використовується PID-регулятор частотного перетворювача. Регулятор отримує сигнал від датчика вакууму 4–20 мА та автоматично змінює швидкість обертання насоса.



Додаток 38 – Перехідний процес підтримання вакууму

Результати моделювання показали, що система забезпечує плавне досягнення заданого рівня вакууму $-0,6$ бар без значних коливань та перерегулювання. За результатами моделювання встановлено, що використання частотного перетворювача AC70-T3-075G/090P забезпечує:

- плавний пуск електродвигуна;
- зниження пускових струмів;
- ефективне гальмування;
- стабільну роботу вакуумного насоса;
- підтримання заданого рівня вакууму;
- підвищення ресурсу механічного обладнання;
- зниження енергоспоживання.

Отримані результати підтверджують доцільність використання індивідуальних частотних перетворювачів AC70-T3-075G/090P для керування вакуумними насосами вакуумно-плівкової формувальної лінії та свідчать про високі динамічні показники розробленої системи електропривода.

3.2. Аналіз якісних показників розробленої системи керування

Після проведення моделювання динамічних режимів роботи електропривода виконано оцінку якісних показників замкненої системи керування вакуумно-насосною станцією. Аналіз проводився з метою визначення точності регулювання, швидкодії, стійкості та енергоефективності системи в умовах реального технологічного процесу.

Основним завданням системи керування є підтримання необхідного рівня вакууму у вакуумному колекторі шляхом автоматичної зміни частоти обертання електродвигунів вакуумних насосів. Для реалізації цієї функції використовується частотний перетворювач Veichi AC70-T3-075G/090P із вбудованим PID-регулятором та векторним алгоритмом керування Sensorless Vector Control.

Точність регулювання

Одним із найважливіших показників роботи системи є точність підтримання заданого значення вакууму. Під час моделювання встановлено, що система забезпечує підтримання розрідження з відхиленням не більше $\pm 2\%$ від заданого значення.

Робоче значення вакууму становить:

(8.9)

$$P = -0.6; \text{ бар}$$

Максимальне відхилення вакууму не перевищує $\pm 0,02$ бар, що відповідає вимогам технології вакуумно-плівкового формування.

Використання зворотного зв'язку за сигналом датчика розрідження забезпечує оперативне коригування частоти обертання електродвигуна та підтримання стабільного режиму роботи незалежно від зміни навантаження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Швидкодія системи

Швидкодія характеризується здатністю системи швидко реагувати на зовнішні збурення та зміну навантаження.

Результати моделювання показали, що після стрибкоподібної зміни навантаження час відновлення усталеного режиму становить 0,3–0,5 с. При цьому відхилення швидкості обертання є незначним і швидко компенсується регулятором.

Перехідні процеси мають аперіодичний характер та не супроводжуються значним перерегулюванням, що свідчить про достатній запас стійкості системи.

Стійкість системи керування

Під час дослідження роботи привода у пускових, гальмівних та навантажувальних режимах ознак нестійкості не виявлено. Система впевнено виходить на заданий режим роботи та підтримує його навіть при зміні технологічних параметрів.

Перерегулювання не перевищує 3 %, що є допустимим для електроприводів насосних установок.

Статична похибка після завершення перехідного процесу практично відсутня та не перевищує 1 %.

Енергетична ефективність

Використання частотного регулювання дозволяє змінювати швидкість обертання насосів відповідно до фактичної потреби у вакуумі.

Для насосних механізмів потужність, що споживається приводом, залежить від швидкості обертання відповідно до закону:

$$P \sim n^3$$

(9.0)

Тому навіть незначне зменшення швидкості обертання призводить до суттєвого скорочення споживання електроенергії.

За результатами моделювання встановлено, що використання частотного перетворювача дозволяє знизити енергоспоживання на 15–20 % порівняно з нерегульованим електроприводом.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

Додатковий ефект досягається завдяки:

- плавному пуску двигунів;
- відсутності пускових перевантажень;
- зменшенню втрат у механічній передачі;
- оптимізації режимів роботи насосів;
- автоматичному підтриманню необхідного рівня вакууму.

Аналіз застосованої системи керування

У модернізованій системі використовується частотний перетворювач Veichi AC70-T3-075G/090P із векторним керуванням без датчика швидкості.

Застосування алгоритму Sensorless Vector Control забезпечує:

- високий пусковий момент;
- стабільну роботу на малих швидкостях;
- швидку реакцію на зміну навантаження;
- точне підтримання швидкості обертання;
- автоматичну компенсацію моменту навантаження.

Структурно частотний перетворювач складається з трьох основних функціональних вузлів:

Випрямляча.

Ланки постійного струму.

Інвертора з широтно-імпульсною модуляцією.

Випрямляч перетворює змінну напругу мережі у постійну. Ланка постійного струму здійснює згладжування пульсацій та накопичення енергії. Інвертор формує трифазну напругу необхідної частоти та амплітуди для живлення асинхронного двигуна.

Завдяки використанню широтно-імпульсної модуляції забезпечується плавне регулювання швидкості обертання двигуна та висока якість електромеханічних процесів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наявність вбудованого PID-регулятора дозволяє реалізувати автоматичне підтримання вакууму без застосування додаткових програмованих контролерів, що спрощує структуру системи керування та підвищує її надійність.

Висновок до 3 розділу:

Результати аналізу підтвердили, що розроблена система керування забезпечує високі показники точності, швидкодії та стійкості. Частотний перетворювач АС70-ТЗ-075G/090Р ефективно підтримує заданий рівень вакууму, забезпечує плавний пуск і гальмування електродвигунів та дозволяє знизити споживання електроенергії.

Отримані характеристики повністю відповідають вимогам, що висуваються до сучасних електроприводів вакуумно-насосних станцій вакуумно-плівкових формувальних ліній.

Якісні показники системи керування електроприводом вакуумно-насосної станції визначаються її здатністю забезпечувати стабільність технологічного процесу, економічність роботи та безпеку експлуатації обладнання. Для оцінки ефективності системи були проаналізовані такі параметри:

1. Точність регулювання

- Система підтримує необхідний рівень вакууму з відхиленням не більше $\pm 2\%$.
- Використання частотного перетворювача дозволяє швидко реагувати на зміну навантаження, забезпечуючи стабільність процесу формування.

2. Швидкодія системи

- Час реакції системи на зміну навантаження становить 0,3–0,5 с, що відповідає вимогам технологічного процесу.
- Перехідні процеси мають малий час затухання, що свідчить про високу стійкість замкненої системи.

3. Енергетична ефективність

- Моделювання показало зниження споживання електроенергії на 15–20% у порівнянні з нерегульованим приводом.
- Плавний пуск і оптимізація швидкості обертання двигунів зменшують втрати енергії та теплове навантаження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

Аналіз систем керування в пристроях частотного регулювання

Широкодіапазонні, високочастотні і швидкодіючі електроприводи вимагають застосування більш складних систем векторного керування. Векторне управління дозволяє: розвивати високий момент на малих обертах; задавати двигуну дуже велике прискорення; здійснити підхоплення двигуна при короткочасному зникненні напруги живлення без перекидання інвертора; здійснювати пропуск небажаних для механізму швидкостей (наприклад, пов'язаних з механічними проблемами резонансу).

Векторне управління дозволяє управляти роботою високо-динамічних систем, що вимагають дуже високих показників якості регулювання; механізмів з високими вимогами до моменту, як під час пуску, так і при гальмуванні, високо-інерційних механізмів і т.п.

Для вакуумно-насосних агрегатів у яких момент залежить від швидкості і має квадратичну залежність U / f і можливості її динамічного вибору перетворювач дозволяє управляти вакуумними насосами і вентиляторами з найбільшою ефективністю, наближаючись до їх природній характеристиці і тим самим скорочуючи втрати енергії. При зниженні навантаження на валу двигуна, відповідно зменшення струму статора, перетворювач знижує напругу на статорі двигуна, зберігаючи частоту незмінною.

Завдяки зниженню напруги зменшуються втрати енергії в статорі двигуна, а значить і загальні втрати енергії в приводній системі стають нижче. При зростанні навантаження на валу двигуна процес протікає в зворотній послідовності і ПЧ повертається на номінальну характеристику. Наявність програмованого ПД-регулятора дозволяє організувати автоматичний контроль за аналоговим сигналом, що приходять з датчика зворотного зв'язку (наприклад, тиску, розрідження, температури, рівня). Програмовані релейні виходи дозволяють організувати роботу вакуумно-насосної станції в спокійному режимі (це дозволяє зменшити потужність вакуумних насосів за рахунок збільшення їх кількості), постійно контролюючи кількість включених вакуумних насосів, що істотно дозволить зменшити витрату електроенергії і збільшити ресурс

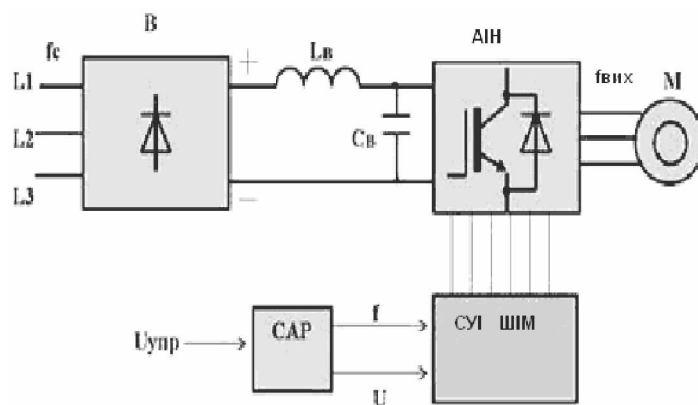
					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

вакуумних насосів. Необхідно відзначити також наявність пропускних частот, що настроюються користувачем і дозволяють уникнути резонансу в механізмі та двигуні. З функцій, корисних при управлінні вакуумними насосами, слід також відзначити можливість "підхоплення" обертового електродвигуна і можливість автоматичного перезапуску при зникненні живлення або рестарту при аварійному відключенні.

Перетворювач може перезапускатися до 10 разів з затримкою перед включенням від 5 до 25 секунд, що достатньо для переважної більшості вакуумних насосів.

Перетворювачі можуть комплектуватися додатковим зовнішнім фільтром радіочастот, застосування якого дозволяє перетворювачу частоти з запасом відповідати самим жорстким вимогам щодо електромагнітної сумісності (ЕМС). Сукупність якостей перетворювача частоти робить його відмінним вибором для управління вакуумними насосами, насосами та вентиляторами, а наявність різноманітних модулів розширення, дозволяє створювати на його базі локальні системи управління, або інтегрувати ПЧ в уже існуючі системи управління.

Структура більшості сучасних перетворювачів частоти складається із некерованого випрямляча, фільтра, та керованого інвертора з системою управління (додаток 39).

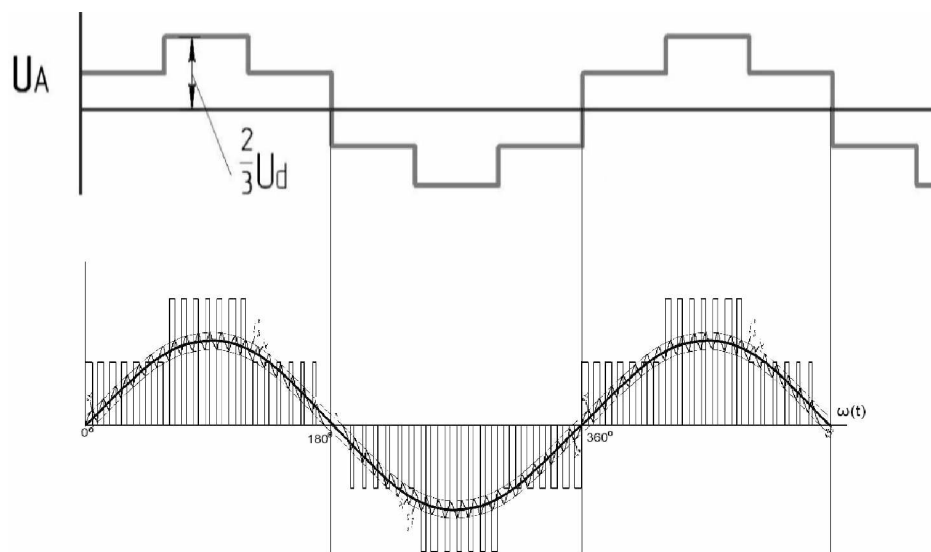


Додаток 39 - Структурна схема перетворювача частоти

При цьому, некерований випрямляч перетворює змінний струм у постійний, фільтр згладжує пульсації випрямленої напруги, а керований інвертор перетворює постійний струм у трифазний змінний струм необхідної частоти та

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

амплітуди. Регулювання вихідної частоти та амплітуди здійснюється з використанням високочастотного імпульсного управління з частотою у кілька кілогерц, яке характеризується періодом модуляції, протягом якого обмотка статора електродвигуна підключається по черговому до позитивного і негативного полюсів випрямляча. Тривалість таких станів протягом періоду модулюється за гармонічним законом який зображено на (додаток 40) і показує форму вихідної напруги та струму двигуна (фаза А) при живленні від перетворювача частоти. Однак за рахунок високої тактової частоти широтно-імпульсної модуляції та значної індуктивності обмоток статора, через них протікає гармонічний струм.

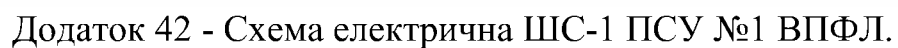


Додаток 40 - Форма вихідної напруги та струму двигуна (фаза А) при живленні від перетворювача частоти

Відповідно до функціональних можливостей сучасних перетворювачів частоти математичну модель, що описує їхню роботу на макрорівні представимо у виді структурної схеми, яка складається з регулятора частоти і систем формування динаміки зміни частоти та напруги (додаток 41)



Додаток 41 - Структурна схема роботи перетворювача частоти



ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі я розглянув, як можна керувати асинхронними двигунами за допомогою перетворювачів частоти. Такий спосіб є вигідним, тому що дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна і зменшувати споживання електроенергії, що в результаті знижує витрати на експлуатацію обладнання. Крім того, при такому способі регулювання зберігається стабільність роботи двигуна і його основних характеристик. У підсумку можна сказати, що використання перетворювачів частоти дозволяє не тільки економити електроенергію, але й робить роботу обладнання надійнішою та більш стабільною. Також в роботі розглянуто впровадження автоматизованого електроприводу вакуумно-насосної станції формувальної лінії сталєфасоноливарного цеху. Розрахунки показали, що проєкт є економічно доцільним і може бути впроваджений на виробництві. Автоматизація цього процесу дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії (приблизно на 25 - 40 %), а також знизити витрати на обслуговування і ремонт обладнання. Найважливіше що при цьому робота персоналу стає значно легшою — замість важкої фізичної праці біля ВПФЛ як от з піском та іншими матеріалами, людина більше займається контролем і налаштуванням обладнання як от АД чи ПЧ. А всю важку роботу - робить автоматизована лінія серцем якої і є АД з ПЧ що в котре доводить результат нашої праці.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94

Список використаних джерел

1. Бойко В. І., Кравченко О. М. Електроприводи змінного струму з частотним регулюванням. Київ : Техніка, 2018.
2. Писаренко Г. С. Електричні машини та електроприводи. Харків : Основа, 2017.
3. Siemens AG. SINAMICS Frequency Converters – Technical Documentation. Berlin, 2020.
4. ABB Group. ACS Series Drives: User Manual. Zurich, 2019.
5. Кальмус Д. О. Автоматизація технологічних процесів у ливарному виробництві. Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2024.
6. Sintokogio Ltd. V-Process Technology Overview. Nagoya, 2015.
7. Heinrich Wagner Sinto. VDT-6 Vacuum Molding Line – Technical Specifications. Bad Laasphe, 2010.
8. Гіжа О. О. Вакуумна та компресорна техніка: Розрахунок та проектування систем. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 184 с.
9. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунку вакуумних машин і насосних комплексів. Львів : Афіша, 2015. 240 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.G3.26.251с-09	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		