

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

	<u>О. КОЛЛАРОВ</u>
(підпис)	(ініціали, прізвище)
«___» _____	2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
БАКАЛАВРА

на тему Розробка автономної фотоелектростанції для живлення
електроприводу насосного агрегату

Виконав студент 4 курсу, групи ЕЛКЗ-19
(шифр групи)

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

<u>Антон ПЕНЗЄВ</u>	
(ім'я та прізвище)	(підпис)

Керівник <u>ст. викл. каф. Е. НЄМЦЄВ</u>	
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)	(підпис)

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

Нормоконтроль:

<u>Е. НЄМЦЄВ</u>	
(підпис)	

(дата)

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

Студент _____	
	(підпис)

(дата)

ЛУЦЬК – 2023

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Антону ПЕНЗЄВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка автономної фотоелектростанції для живлення електроприводу насосного агрегату

керівник роботи Едуард НЄМЦЕВ, ст. викл. каф.

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Відцентровий насос 1Д315-71а

Подача $Q=300\text{м}^3/\text{год}$, номінальний напір 62 м, коефіцієнт корисної дії 82%, частота обертів 2900 об/хв, допустимий кавітаційний запас 6,5.

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

1. Аналітичний огляд в області автономних систем енергопостачання

2. Опис автономної фотоелектричної насосної станції

3. Визначення основних елементів електроприводу

4. Розробка фотоелектричної станції

5. Система керування електроприводом двигуна насоса

6. Моделювання електроприводу насосної установки

7. Розробка заходів з охорони праці

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

Вісім слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Пункти 4.1 – 4.6	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл. каф.		
Пункт 4.7	О. КОЛЛАРОВ зав. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл. каф.		

7. Дата видачі завдання 08 травня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Пункт 4.1	08.05.23 – 12.05.23	
2.	Пункт 4.2	12.05.23 – 16.05.23	
3.	Пункт 4.3	16.05.23 – 19.05.23	
4.	Пункт 4.4	19.05.23 – 24.05.23	
5.	Пункт 4.5	24.05.23 – 01.06.23	
6.	Пункт 4.6	01.06.23 – 07.06.23	
7.	Пункт 4.7	07.06.23 – 12.06.23	
8.			
9.			

Студент _____
(підпис)

Антон ПЕНЗЄВ _____
(ім'я та прізвище)

Керівник
роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Антон ПЕНЗЄВ. Розробка автономної фотоелектростанції для живлення електроприводу насосного агрегату / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає шість розділів, висновків, списку джерел посилання та додатків.

У першому розділі проведений аналітичний огляд автономних і гібридних систем енергопостачання.

У другому розділі проведений опис досліджуваної системи, сформульовані вимоги до електроприводу та систем автоматизації, розглянуті способи регулювання подачі насосів, досліджені питання використання регульованого приводу.

У третьому розділі здійснено розрахунок потужності і вибір електродвигуна насосної установки, вибір перетворюючого пристрою та датчика тиску.

У четвертому розділі виконана розробка фотоелектричної станції, вибрані сонячні панелі, інвертор та акумулятори.

У п'ятому розділі проведено складання структурної схеми, визначення параметрів передавальної функції об'єкта керування, синтез контуру регулювання тиску.

У шостому розділі промодельований електропривод насосної установки, отримані графіки перехідних процесів досліджуваних величин.

Ключові слова: фотоелектрична станція, насос, перетворювач частоти, електропривод, асинхронний двигун, передаточна функція, регулятор, зворотний зв'язок, тиск, напір, акумулятор, інвертор, напруга, струм

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	8
1.1 Особливості автономних систем електропостачання	8
1.2 Огляд гібридних систем енергопостачання	10
2 ОПИС АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ	16
2.1 Опис досліджуваної системи	16
2.2 Вимоги до електроприводу та систем автоматизації	19
2.3 Способи регулювання подачі насосів	20
2.4 Обґрунтування прийнятних показників якості	22
2.5 Вивчення питання доцільності використання частотно-регульованого приводу	23
3 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	25
3.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна насосного агрегата	25
3.2 Вибір перетворюючого пристрою	28
3.3 Вибір датчика тиску	29
4 РОЗРОБКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ	30
5 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДВИГУНА НАСОСА	35
5.1 Складання структурної схеми, визначення параметрів передавальної функції об'єкта керування	35
5.2 Синтез контуру регулювання тиску	53
6 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ	55
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	60
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	61
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	65

ВСТУП

Вода є однією з основних життєвих потреб людей. Майже всі людські активності залежать від доступу до достатньої кількості води, яка потрібна для виробництва харчових продуктів, задоволення побутових потреб, охорони здоров'я, виробництва електроенергії та збереження екосистем. Вода є ключовим елементом для сталого соціального і економічного розвитку суспільства.

Забезпечення водопостачання завжди було важливою технічною задачею в історії людства. Нині виникла велика та термінова необхідність у стабільному водопостачанні в бідних, сухих, сільських районах. Автономні системи електропостачання та водопостачання, базовані на них, вважаються оптимальним рішенням цієї проблеми у майбутньому.

Системи насосів з відповідним джерелом енергії є необхідними для зрошення сільськогосподарських культур, перекачування води для побутових потреб, а також для водопоя худоби. У сільських областях джерела енергії часто віддалені від джерел води. Встановлення нових ліній електропередач і трансформаторів у віддалених місцях може бути дорогавартісним. Наразі широко використовуються різні джерела енергії, засновані на двигунах внутрішнього згоряння, включаючи використання для автономних систем водопостачання. Вони мають свої переваги, такі як мобільність, простота установки, незалежність від інфраструктури, але також мають недоліки: потреба у обслуговуванні та заправці, висока вартість палива, негативний вплив на довкілля. Тому використання відновлюваної енергії стає особливо привабливим для автономних систем перекачування води в сільській та пустельній зонах багатьох країн.

Системи, що використовують сонячну енергію через фотоелементи, є одним з відновлюваних джерел енергії, яке має переваги для систем водопостачання. Це включає в себе: відносну легкість, низькі вимоги до інфраструктури, стабільність, безшумність через відсутність обертових деталей

і турбін, можливість використання безпосередньо на місці використання, простоту установки та незначне обслуговування.

Впровадження автономних сонячних водяних насосних систем повинно сприяти покращенню умов життя в віддалених районах та збереженню чистоти навколишнього середовища.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Особливості автономних систем електропостачання

Сьогодні людство стикається з постійним зростанням енергетичних потреб. Проте, вже в найближчому майбутньому, енергетичні компанії матимуть справу з дефіцитом вугілля, нафти, газу та інших природних видів палива. До того ж, використання цих ресурсів призводить до значного забруднення навколишнього середовища, а ядерна енергетика має свої власні ризики. Все це веде до необхідності знайти альтернативні джерела енергії, які були б дешевими, відновлюваними та мінімізували негативний вплив на природу. Вже сьогодні починає розвиватися так звана "чиста" енергетика, яка використовує практично безмежні ресурси.

Один зі способів надати стабільне і якісне електропостачання - розробка та впровадження автономних енергетичних систем. Вони складаються з декількох джерел електроенергії, зазвичай основного, резервного та аварійного. З обмеженим запасом органічного палива і негативним впливом традиційної енергетики на навколишнє середовище, використання відновлюваних джерел енергії в автономних системах електропостачання має великий потенціал.

Фотоелектрична система енергопостачання - це один з таких автономних рішень. Вона включає в себе ряд взаємопов'язаних компонентів, які спроектовані таким чином, щоб забезпечити надійну подачу потрібної електроенергії від невеликого пристрою до великої мережі навантаження.

Є три основних типи систем енергопостачання: підключені до мережі, автономні та гібридні. Вони можуть включати різні джерела енергії, такі як сонячні панелі, дизельні генератори та вітрові молотки. І в мережевих, і в автономних системах можуть бути використані елементи зберігання енергії, наприклад, батареї або суперконденсатори, які зберігають енергію на нічний час, коли сонця недостатньо.

Автономні системи, як правило, працюють безпосередньо з навантаженням, без підключення до мережі. Вони є дуже економічними для впровадження фотоелектричних систем, особливо в сільських районах з довгими періодами сильного сонячного випромінювання та відсутністю доступу до основної мережі. Прикладами можуть служити системи зв'язку, насосні системи, маяки, аварійні служби та військові об'єкти, де потрібні допоміжні блоки живлення.

Однак, автономні системи мають деякі обмеження. Це включає в себе компоненти зберігання енергії, які мають низьку місткість, і батареї, що володіють обмеженою ємністю, що призводить до того, що надлишки енергії розсіюються або витрачаються. Ці системи мають деякі важливі особливості:

- оскільки система не підключена до міської електромережі, необхідно мати елемент накопичення енергії, що вимагає додаткових коштів на акумулятори та накопичувачі. В іншому випадку, вироблену електричну енергію доведеться розсіювати.

- у автономних системах потужність, що генерується, має відповідати максимальному навантаженню.

Профілі споживання електроенергії та потенціал відновлюваних джерел енергії часто змінюються, тому основне обладнання автономної системи електропостачання повинно включати пристрій, здатний зберігати електричну енергію.

Щодо структури автономних сонячних та вітрових електростанцій, вони включають акумуляторні батареї як джерело живлення, які взаємодіють з автономним інвертором, розрахованим на пікову потужність навантаження. Позитивний енергетичний баланс накопичувача визначає середню потужність навантаження в певному часовому інтервалі, коли енергія, збережена з відновлюваних джерел енергії, перевищує енергію, передану навантаженню, враховуючи коефіцієнт корисної дії та ефективні режими роботи обладнання. Баластне навантаження абсорбує надлишки електричної енергії, які не використовуються акумуляторною батареєю і навантаженням в даний момент часу.

1.2 Огляд гібридних систем енергопостачання

На сьогодні стало очевидним, що гібридні енергосистеми, які використовують відновлювані джерела енергії, - це економічно вигідний спосіб електрифікації не лише в сільських районах, але також в місцях, де централізована електромережа є недоступною, ненадійною або дорогою у прокладанні, і навіть у великих містах. Все це виникає на тлі росту цін на газ та інші джерела опалення. Можна навести приклади міст, як-то Берлін, де люди ще з початку 2000-х активно встановлюють сонячні панелі для вирішення своїх енергетичних потреб.

У більшості випадків при створенні таких систем використовують конфігурацію, що включає з'єднання різних джерел енергії на стороні постійного струму. Однак, з недавніх пір, внаслідок появи надійних і відносно недорогих моделей мережевих інверторів, що використовують мікропроцесори, особливо 8- і 16-бітні мікроконтролери, стали застосовувати з'єднання різних джерел енергії змінного струму. Це дає не лише більшу гнучкість, але і високу ефективність використання енергії різних джерел за рахунок зменшення втрат в системі.

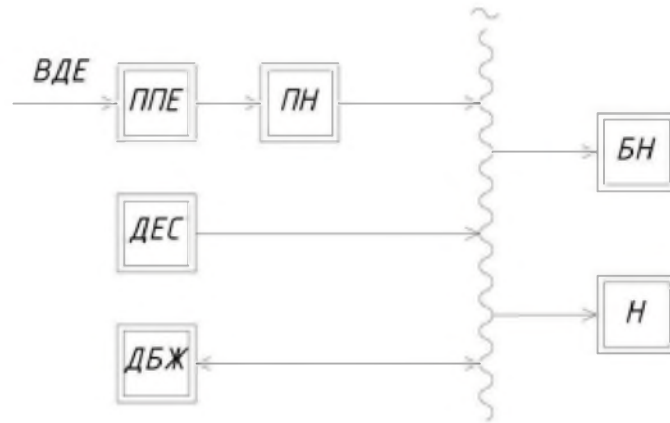
Світ зараз спостерігає певні зміни в енергетичній політиці країн. Іде йдеться про перехід від застарілої моделі енергетики, що має неефективні мережі, великих виробників, використовує викопне паливо, і при цьому є конкурентною на ринках вугілля, природного газу, електроенергії, до нової моделі, що є більш конкурентоспроможною, збалансованою щодо можливостей для розвитку, та знижує залежність від одного виду енергопостачання чи джерела енергії. У цьому контексті надається перевага використанню відновлювальних і альтернативних джерел енергії з метою підвищення енергоефективності.

Резервне електропостачання стає актуальним через старіння загальних електромереж, адже навіть короткочасне відключення електроенергії може призвести до великих втрат. Важливо відзначити, що якість електроенергії, яку виробляють автономні електрогенератори, зазвичай на рівні або навіть вище, ніж у централізованих мережах. Це критично важливо для об'єктів, оснащених обладнанням, що чутливе до якості електроенергії.

Участь відновлюваної енергії, у вигляді електротехнічних засобів, у процесі електрифікації будь-якого об'єкта, залежить від ряду важливих факторів. Серед них основними є: потреба об'єкта у енергії та потужності, економічна ефективність, потенціал відновлюваного джерела енергії і його зміни в часі, а також вимоги до надійності електропостачання. На основі цих і інших чинників визначається структура і склад автономної системи електропостачання для конкретного об'єкта.

Сучасні електроустановки для автономних систем електропостачання можуть базуватися на сонячних або вітрових електростанціях, а також на комбінованому, гібридному використанні дизельних електростанцій разом з установками відновлюваної енергетики. Варіант спільного використання передбачає використання дизельної генерації енергії як резервного джерела живлення або для спільної роботи з електроустановками, енергію для яких надає відновлюване джерело.

Важливо пам'ятати, що забезпечити неперервне електропостачання для великих споживачів, використовуючи тільки відновлювані джерела енергії, неможливо, оскільки сезонні зміни в енергоспоживанні не можуть адаптуватися до щоденних коливань потенціалу сонячного випромінювання та вітру. Тому комбіноване використання нестабільного, але відновлюваного джерела енергії з надійним джерелом, здатним витримати високі навантаження, дозволяє створити універсальні електричні системи. Вони будуть забезпечувати надійне електропостачання різних децентралізованих об'єктів і матимуть високі технічні та економічні показники. Загальну схему такої гібридної системи електропостачання можна побачити на рис. 1.1.



ВДЕ - відновлюване джерело енергії;

ДЕС - дизельна електростанція;

ППЕ - перетворювач первинного енергоресурсу;

ПН - перетворювач напруги;

ДБЖ - джерело безперебійного живлення;

Н - навантаження;

БН - баластне навантаження.

Рисунок 1.1 – Гібридна енергетична система з ДЕС

Коли потенціал відновлюваного джерела енергії високий, дизельний генератор вимикається. Виробництво та колювання в споживанні електричної енергії, що надходить від відновлюваного джерела, стабілізуються за допомогою акумуляторів у джерелі безперебійного живлення. Це дозволяє суттєво знизити кількість разів, коли потрібно вмикати дизельну електростанцію.

Під час окремої роботи, перетворювач первинного енергоресурсу з відновлюваного джерела енергії повинен мати достатньо високу потужність. Оскільки моментальна потужність сонячних або вітрових електростанцій може бути вищою за номінальне навантаження, передбачається використання так званого баластного навантаження, щоб спожити надлишкову електричну енергію.

У загальному балансі описаної вище системи електропостачання, відсоток електроенергії, що виробляється відновлюваним джерелом, повинен бути не менше 50%. Це пов'язано з тим, що при меншій встановленій потужності установок відновлюваного джерела енергії, навантаження на дизельну електростанцію зростає. Нижчі значення ведуть до збільшення часу роботи

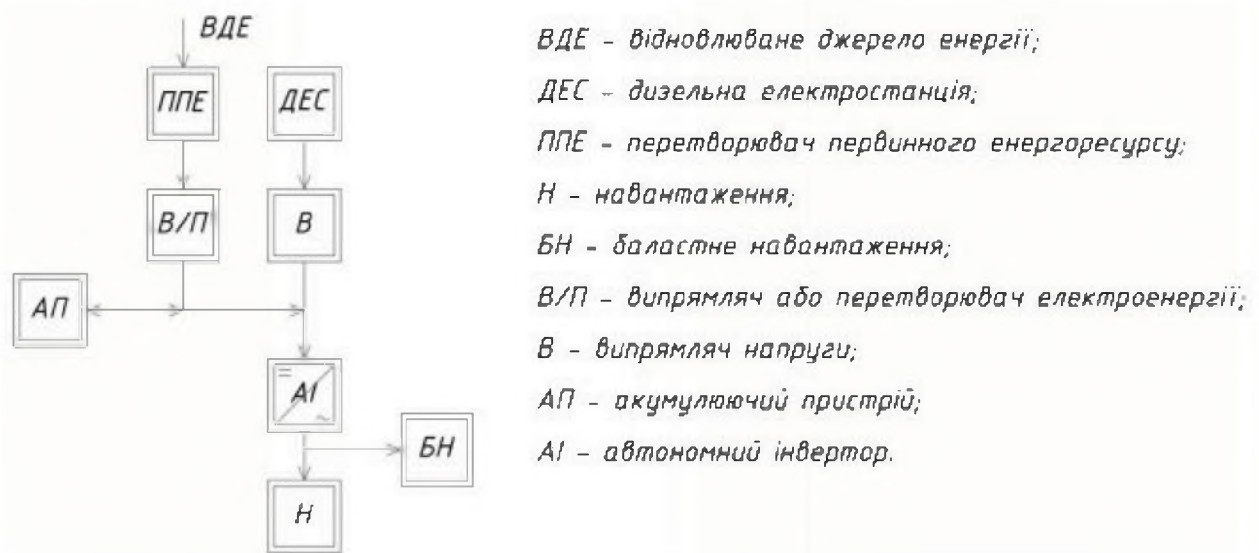


Рисунок 1.3 – Гібридний енергетичний комплекс із ланкою постійного струму

Використання змінного струму має переваги в системах з розподіленою генерацією, особливо при інтеграції установок відновлюваних джерел енергії в уже існуючі системи електропостачання.

Розглянемо гібридну енергосистему з дизельною електростанцією, яка постійно працює. Така система, як і попередні, має в своєму складі дизельну електростанцію та установки відновлюваної енергетики. Обидва типи установок працюють спільно, щоб надавати електроенергію мережі, створеній дизельною електростанцією. В цьому контексті, дизельна електростанція є основним джерелом енергії, а установки з відновлюваного джерела енергії використовуються для значної економії палива.

Забезпечення надійності та стабільності системи електропостачання вимагає, щоб миттєва потужність, що надходить від відновлюваного джерела енергії, не перевищувала 40-50% потужності, що надходить від дизельної електростанції. Структура цього комплексу відображена на рисунку 1.4.

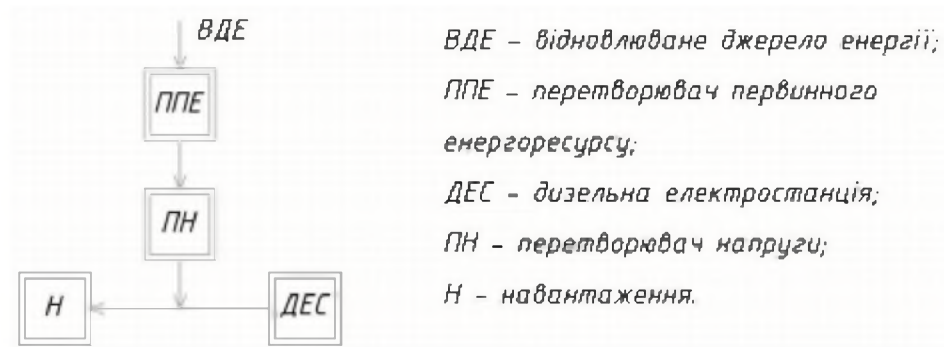


Рисунок 1.4 – Гібридна енергетична система з постійно діючою ДЕС

Однією з переваг таких систем є їх простота, що знижує початкові вкладення капіталу і зменшує обсяг обслуговування обладнання. Головним недоліком цих систем є те, що вони можуть замінити лише невеликий обсяг дизельної генерації.

2 ОПИС АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

Виробництво електроенергії з допомогою сонячних панелей є прикладом відновлюваного джерела енергії. Цей метод має багато переваг для систем водопостачання, включаючи відносну простоту використання, низькі вимоги до інфраструктури, надійність, тишу, оскільки обертові машини і турбіни відсутні, а також можливість безпосереднього використання на місці. Також до переваг можна віднести легкість установки та необхідність лише у невеликому регулярному обслуговуванні.

Автономні сонячні водяні насосні системи мають сприяти поліпшенню якості життя в віддалених регіонах та охороні довкілля.

2.1 Опис досліджуваної системи

Сонячна електростанція складається з пов'язаних між собою компонентів, які розроблені для того, щоб забезпечити необхідну кількість та якість електроенергії від джерела до використовувача. Сонячні системи можуть бути автономними або гібридними в залежності від способу їх підключення до мережі. Гібридні системи використовують різні джерела енергії, такі як сонячні панелі, дизельні генератори та вітряні турбіни. У як автономних, так і мережевих системах з використанням відновлюваних джерел енергії можуть бути використані аккумулятори або суперконденсатори для збереження енергії у дні, коли сонячне випромінювання на піку.

Автономні системи вважаються одними з найбільш ефективних для впровадження сонячних станцій, особливо у сільських і віддалених районах, де є значний періоди інтенсивного сонячного випромінювання і відсутній доступ до основної електромережі. Ці системи можна використовувати у системах зв'язку, водонасосних системах, маяках, аварійних службах та військових об'єктах.

За останні два десятиліття автономні сонячні системи водопостачання стали все більш популярними через значне зниження вартості виробництва сонячних панелей. Два основні типи насосів, які використовуються в сонячних системах, це центробіжні насоси і насоси з об'ємним робочим органом. Центробіжні насоси можуть перекачувати велику кількість води з високою ефективністю, і вони часто використовуються для водозабору зі свердловин і поверхневих водойм для задоволення середніх та великих потреб водою. Насоси з об'ємним робочим органом, зазвичай, використовуються при невеликих витратах. Центробіжні насоси, відмінно від насосів з об'ємним робочим органом, мають характеристики, які добре співпадають з характеристиками сонячних панелей, тому що їх струм майже лінійно змінюється відповідно до сонячного випромінювання.

Електроенергія, отримана від сонячних панелей, представлена у вигляді постійного струму, який поступово змінюється. Оскільки це є відносно простим режимом енергії, насоси зазвичай використовують двигуни постійного струму для ефективної роботи, оскільки вони можуть безпосередньо підключатися до масиву сонячних панелей, спрощуючи цим самим систему. Двигуни постійного струму з постійними магнітами виявилися досить популярними, оскільки вони не вимагають початкового збудження, відмінно від двигунів з електромагнітним збудженням. Однак щіткові двигуни мають свої недоліки, оскільки вони вимагають регулярного технічного обслуговування через потенційний знос та засмічення їхнього комутатора та ковзних контактів. Безщіткові двигуни постійного струму стають все більш популярними в системах сонячних насосів, оскільки вони мають порівняно високий коефіцієнт корисної дії, не потребують обслуговування і можуть працювати довго. Проте, ці системи мають вищу вартість і більшу складність у порівнянні з іншими.

Двигуни змінного струму мають ряд переваг, включаючи високу ефективність, недостатність щіток, а також простішу та більш надійну конструкцію. Наприклад, асинхронний двигун може бути найбільш доступним відносно вартості при придбанні. Але наукові дослідження, що здійснювали детальний аналіз двигунів постійного та змінного струму для водопостачання,

виявили, що двигуни постійного струму з постійними магнітами вибиваються на передову з погляду ефективності та динамічних характеристик, переважаючи асинхронні двигуни. До того ж, при використанні двигуна змінного струму виникає потреба в інверторі, що перетворює постійний струм від сонячних панелей в змінний струм. Це веде до збільшення вартості та складності цілої системи.

У випадку, коли сонячна станція використовується без акумулятора для утримання напруги на шині приблизно на сталому рівні, може бути використана система стабілізації постійної напруги. В цій системі автоматичного контролю, зворотний зв'язок від напруги фотопанелі порівнюється з фіксованою опорною напругою, а отриманий сигнал регулює коефіцієнт передачі DC-DC перетворювача, забезпечуючи тим самим збереження робочої точки масиву на максимальному рівні або наближено до нього.

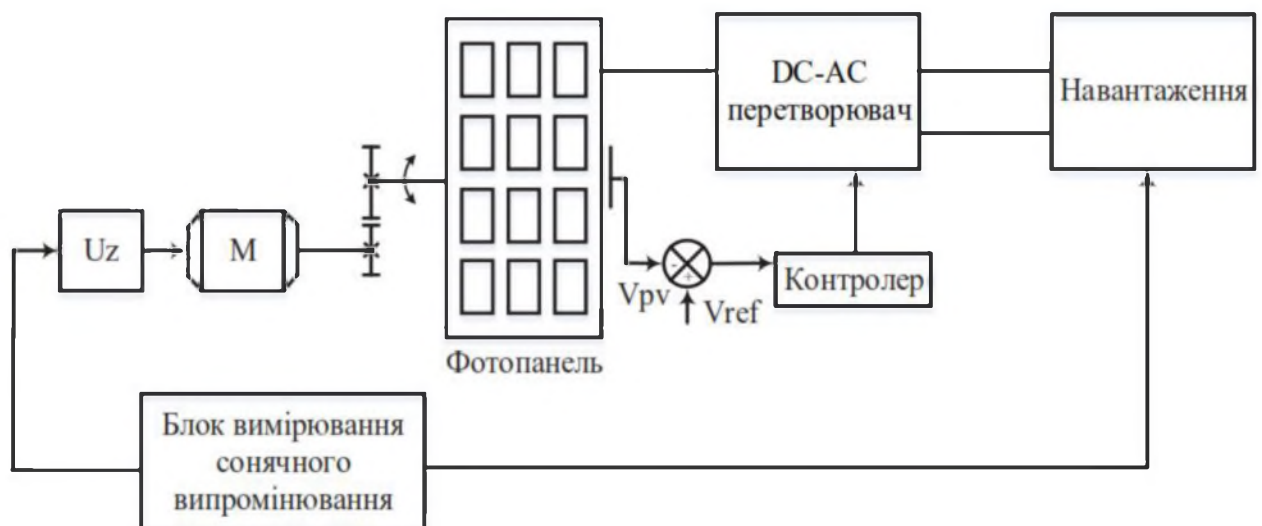


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи керування фотоелектричної станції за методом постійної напруги

Ця система включає в себе сонячну панель, слідує електромеханічний привід, який контролює положення панелі (U_z , M), перетворювач DC-AC, трифазний інвертор напруги, і асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, що в свою чергу з'єднаний з водяним насосом.

В основі фотовольтаїчної системи лежить сонячна панель, яка складається з окремих фотоелементів, об'єднаних паралельно і послідовно для збільшення вихідної напруги та потужності. Інвертор напруги, що складається з транзисторів T1–T6 IGBT типу, перетворює постійний струм на змінний, щоб живити двигун. Для оптимізації вихідної потужності сонячної панелі використовується слідкуючий електропривід М, який налаштований на визначення максимального сонячного випромінювання.

Система керування головного електроприводу має дві частини: перша – керує підсилювачем, що підтримує стабільну напругу в ланці постійного струму, друга - керує інвертором в режимі векторного управління, що дозволяє реагувати на зміни сонячного випромінювання та навантаження.

Запропонована система – це фотовольтаїчна насосна станція, яка використовує тільки один привід, яким керують через підсилювач.

2.2 Вимоги до електроприводу та систем автоматизації

Після проведеного аналітичного огляду та опису технологічної системи, розглянемо ключові вимоги, що пред'являються до електроприводу.

Головний елемент керування в цій системі – це насос, який характеризується постійним навантаженням і тривалим циклом роботи.

Залежно від принципу дії, насоси поділяють на різні види:

- лопаткові насоси, включаючи відцентрові, осьові та діагональні. В таких насосах рідина пересувається за рахунок дії лопаток робочого колеса на неї.
- струминні насоси або ежектори, де енергія іншого потоку рідини використовується для перекачування рідини.
- об'ємні насоси, що включають роторні та поршневі насоси (шиберні, гвинтові, шестеренчасті).

У досліджуваній системі вибрали відцентровий насос. Вибір насосу здійснюється на основі вимог до напору (H) та подачі (продуктивності, Q), які визначаються на основі гідравлічних розрахунків системи перекачування рідини. Вихідні дані для вибору насосу визначаються відповідно до проєкту водопостачання або каналізації.

2.3 Способи регулювання подачі насосів

Регулювання продуктивності насоса зазвичай виконується за допомогою трьох основних методів:

Дроселювання за допомогою вбудованих клапанів.

Інтермітуюче регулювання, яке полягає в чергуванні періодів роботи та відпочинку насоса.

Регулювання обертальної швидкості насоса через використання налаштованого електродвигуна.

У промислових установках часто використовується дроселювання, яке досягається шляхом впровадження різних обмежувачів в насосну систему. Однак, ефективність цього методу нижча в порівнянні з методом регулювання швидкості обертання, який часто може зберегти більше ніж 50% енергії. Метод дроселювання використовується переважно для систем з низькою потужністю і обмеженим діапазоном налаштування, але його простота використання є перевагою.

На водопровідних і водоочисних об'єктах зазвичай використовується інтермітуюче регулювання. Цей метод характеризується нижчою ефективністю, частими пусками і зупинками, які можуть впливати на стан труб та обладнання, та відсутністю плавного регулювання. Хоча цей метод вимагає додаткового запасу потужності двигуна, він є економічно ефективним, оскільки відсутні додаткові втрати при налаштуванні продуктивності.

У випадку установок, що вимагають гладкого та автоматизованого контролю потоку, використовується регульований електропривід. Властивості механізмів центробіжного типу дозволяють успішно використовувати регульований електропривід, який здатен справлятися з статичними навантаженнями та забезпечує необхідний діапазон налаштування швидкості. Особливістю механічних характеристик є те, що при зниженні швидкості момент опору на валу двигуна відповідно квадратично зменшується. Це сприяє легшому термічному режиму двигуна при роботі на нижчих швидкостях. Важливо зазначити, що при відсутності статичного напору, необхідний діапазон налаштування швидкості не виходить за рамки заданого діапазону зміни потоку.

Зазвичай, для регульованих механізмів центробіжного типу, діапазон налаштування швидкості не перевищує відношення 2 до 1. Саме ці властивості, а також невеликі вимоги до механічної стійкості, дозволяють ефективно використовувати прості варіанти регульованого асинхронного електропривода.

Якщо вимоги до механічної стійкості електропривода вищі, а діапазон регулювання ширший (відношення D більше 2), тоді більш перспективним є використання транзисторного перетворювача частоти в поєднанні з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. Необхідність в електричному гальмуванні та реверсі приводу відсутня для механізмів центробіжного типу, що спрощує структуру транзисторного перетворювача частоти і дозволяє реалізувати його на основі автономного інвертора напруги і керованого випрямляча.

Найкращий спосіб регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в зміні частоти з одночасною зміною напруги за допомогою перетворювача частоти. Зазвичай, термін окупності інвестицій у таке обладнання становить від 6 до 18 місяців, в залежності від типу механізму, його режимів роботи та потужності двигуна.

Втім, варто пам'ятати, що частоту обертання можна змінювати лише до певного рівня, коли напір, який створює турбомеханізм, дорівнює статичному напору. Якщо продуктивність насоса продовжує знижуватися, напір, що створює турбомеханізм, стає недостатнім для подолання статичного напору в системі.

2.4 Обґрунтування прийнятних показників якості

При проектуванні автоматичних систем керування та регулювання необхідно враховувати широкий спектр вимог, які стосуються різних характеристик системи. Ці вимоги можна класифікувати за п'ятьма основними категоріями.

Перша категорія включає вимоги, що стосуються статичних та динамічних властивостей системи. Найістотнішими серед них є вимоги до точності, які визначають потенційні помилки в системі керування при різних умовах роботи.

Друга категорія включає вимоги до надійності системи керування та її стійкості до зовнішніх впливів. Тут особливо важливими є такі параметри, як імовірність безвідмовної роботи, діапазон робочих температур, стійкість до вібрації, тривалість роботи, а також умови зберігання системи.

Третя категорія включає вимоги, що стосуються експлуатаційних характеристик системи керування. Вони охоплюють умови обслуговування системи під час її експлуатації, рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу та можливості ремонту системи.

Четверта категорія стосується вимог до маси та розмірів системи, а також обмежень щодо споживання енергії.

П'ята категорія включає вимоги, пов'язані з технологічними аспектами виробництва системи керування.

Для нашого конкретного прикладу — системи керування електроприводом насосного агрегату — можна виділити такі ключові параметри якості: максимальна точність системи, максимальна енергоефективність, мінімальна вартість та мінімальні розміри.

2.5 Вивчення питання доцільності використання частотно-регульованого приводу

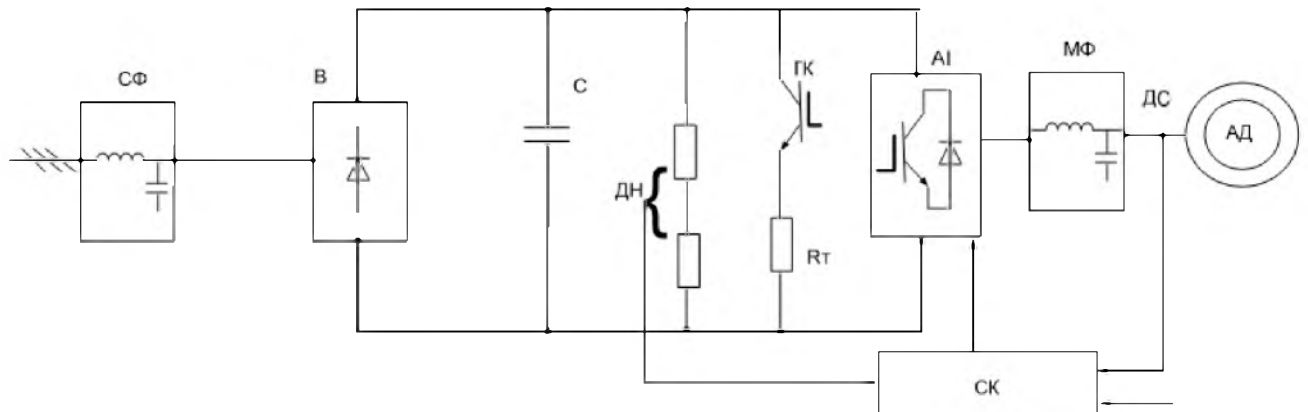


Рисунок 2.2 – Функціональна схема ПЧ з проміжною ланкою постійного струму

Умовні позначення на рисунку 2.2: СФ – мережевий фільтр для відсікання гармонік вищих порядків; В - випрямляч для регулювання напруги в колі постійного струму; ДН і ДС - датчики напруги та струму; ГК - гальмівний вентиль; АІ - автономний інвертор; МФ - мотор-фільтр, зменшення вищих гармонік на двигун; СК - система керування.

Як замикаються ключів в АІ (рис. 2.3) можуть використовуватися GTO тиристори або IGBT транзистори.

Тиристор є напівкерованим приладом: для його включення досить подати короткий імпульс на керуючий вивід, але для виключення необхідно або прикласти до нього зворотну напругу, або знизити комутований струм до нуля. Для цього в тиристорним перетворювачі частоти потрібна складна і громіздка система керування.

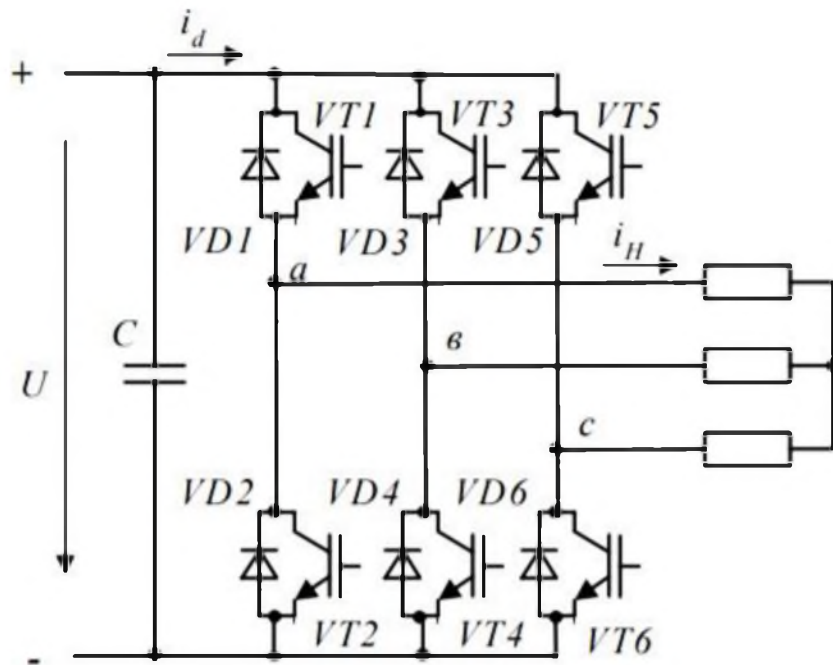


Рисунок 2.3 – Принципова схема AI

IGBT транзистори, або біполярні транзистори з ізольованим затвором, на відміну від тиристорів, мають повну керованість. Вони відрізняються простою системою управління, яка не вимагає значної енергії, а також високою робочою частотою. Завдяки цим характеристикам, перетворювачі частоти, засновані на IGBT, дозволяють збільшити діапазон управління швидкістю двигуна і покращити загальну швидкість відгуку системи приводу.

Для правильної роботи двигуна при зміні частоти потрібно також регулювати напругу. Це можна робити, змінюючи напругу в ланці постійного струму або використовуючи ШІМ (широтно-імпульсну модуляцію). Вибір пропорції між частотою і напругою зазвичай визначається умовами збереження перевантажувальної спроможності системи.

Перетворювач частоти вибирають на основі конкретних умов роботи. Отже, в результаті аналітичного огляду, для проектування вибрана система частотного регулювання швидкості, яка включає в себе транзисторний перетворювач частоти та асинхронний двигун.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна насосного агрегата

Для виконання вимог, встановлених у технічному завданні, потрібно визначити необхідну потужність обладнання і, використовуючи каталоги від різних виробників, вибрати відповідне обладнання.

Оскільки ціль проекту полягає в регулюванні напору шляхом зміни частоти обертання робочого колеса насоса, то привід, який буде використовуватись у цій системі, повинен мати можливість змінювати швидкість обертання валу двигуна.

Ключовим елементом у системі електроприводу є електродвигун. Відомо, що використання асинхронних двигунів підвищує надійність електроприводу, зменшуючи при цьому капітальні та експлуатаційні витрати.

Стосовно насосного обладнання, на насосній станції другого підйому для забезпечення високої надійності були встановлені два відцентрових насоса типу 1Д 315-71.

Відцентрові насоси двостороннього входу типу Д розроблені для перекачування води та інших рідин, властивості яких схожі на водяні за в'язкістю і хімічною активністю. Вони можуть працювати з рідинами, температура яких варіює від 1 до 85 °С (або від 274 до 358 К). Ці рідини не повинні містити твердих частинок, які б перевищували 0,05% за масою, 0,2 мм за розміром і 6,5 за мікротвердістю.

Насоси відповідають стандартам ГОСТ 27.003-90, оскільки вони відносяться до виробів загального призначення типу І (відновлювані). Вони виготовляються в двох кліматичних варіантах: УХЛ (категорія розміщення 3.1) та Т (категорія розміщення 2) відповідно до ГОСТ 15150-69. Ці насоси (або їх комплекти) не призначені для використання в місцях з підвищеною вибухо- та пожежною небезпекою.

Насос: 1Д315-71а УХЛ3.1 ТУ26-06-1510-88 1.

У таблиці 3.1 номінальні характеристики насоса.

Таблиця 3.1 - Номінальні дані відцентрового насоса 1Д315-71а.

Параметр	Позначення	Значення	Од. виміру
Подача	Q	300 (0,083)	м ³ /год (м ³ /с)
Напір	H	62,00	м
Частота обертів	n	2900 (48.4)	об/хв (с ⁻¹)
Максимальна споживана потужність	N	87,00	кВт
Допустимий кавітаційний запас	ΔH	6,5	м, не менше
Маса насоса	m	818	кг
ККД	η_n	82	%
Момент інерції	J_n	0,84	кг · м

Насоси відносять до категорії механізмів, в яких складно передбачити точне навантаження на вал двигуна в певний момент часу. Аналізуючи роботу насосів відносно водоспоживання, можна зазначити, що в більшості випадків води споживається невелика кількість. Відповідно, система регулювання знижує швидкість обертання насосів до такого рівня, щоб постійно підтримувати потрібний напір. Це веде до того, що споживання енергії з електромережі в основному залишається невеликим. Однак існують ситуації, коли споживання води, і, відповідно, швидкість насосів, можуть бути високими. Тому при виборі двигунів важливо розглядати номінальні характеристики насосів.

Обчислимо потужність на валу двигуна використовуючи відповідну формулу:

$$P_{\text{вал}} = \frac{g \cdot \rho \cdot Q_{\text{н.Н}} (H_{\text{н.Н}} + \Delta H)}{\eta_{\text{н.Н}}} = \frac{9,81 \cdot 1000 \cdot 0,083 \cdot (62 + 6,5)}{0,82} = 68 \text{ кВт}$$

Отже, двигуни, що використовуються на насосній станції, повинні мати номінальну потужність, яка перевищує 68 кВт. Ми визначимо відповідний

асинхронний двигун, використовуючи характеристики, рекомендовані виробником насоса. Виходячи з рекомендацій виробника насоса та обчисленої потужності, ми обираємо асинхронний двигун потужністю 90 кВт з серії 4А, модель 4А250М2У3. Номінальні характеристики цього двигуна представлені в таблиці 3.2.

Зовнішній вигляд двигуна 4А250М2У3 зображено на рисунку 3.1.

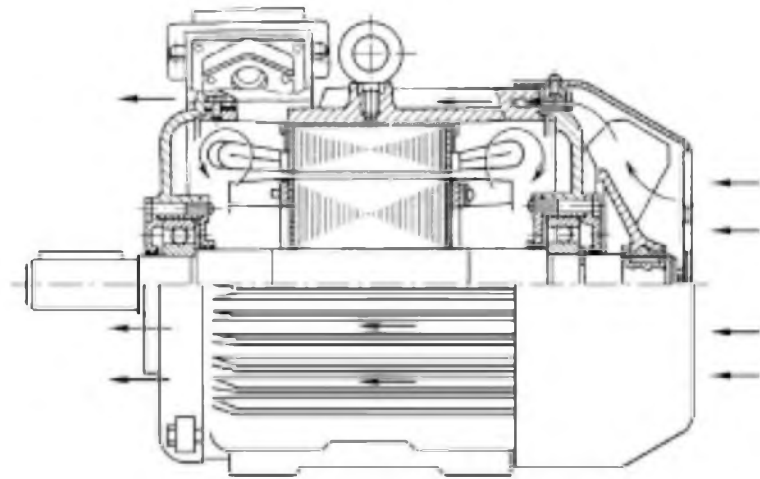


Рисунок 3.1 – Вигляд асинхронного двигуна 4А250М2У3

Таблиця 3.2 - Номінальні дані асинхронного двигуна 4А250М2У3

Тип двигуна	Номінальна потужність, кВт	Номінальна частота обертання, об / хв	Коефіцієнт корисної дії, %	Коефіцієнт потужності	Номінальний струм при 380 В А	Номінальний момент, Нм
4А250М2У3	90	2970	92,0	0,9	165	290,7
	Індекс механічної характеристики	Кратність пускового моменту	Кратність пускового струму	Кратність максимального моменту	Момент інерції ротора, кгм ²	Маса, кг
	II	1,2	7,5	2,5	0,52	530

В системах цього типу використання насосних установок просто для збільшення напору недостатньо. Установка повинна гарантувати регулювання тиску в системі водопостачання, з метою пониження енергозатрат, водоспоживання, а також для мінімізації обсягу та розмірів використовуваного обладнання для водопостачання.

3.2 Вибір перетворюючого пристрою

Функція перетворення параметрів електричної енергії від живильної мережі до необхідних значень для нормальної роботи приводу, а також функція зміни кількості електричної енергії, яка подається на двигун для контролю його швидкості, здійснюється пристроєм для перетворення. Як перетворювач було обрано пристрій, що працює на основі автономного інвертора напруги з IGBT-транзисторами і скалярною ШІМ-модуляцією.

При виборі частотного перетворювача необхідно враховувати такі ключові вимоги:

- висока надійність при різних режимах роботи;
- простота управління без зниження основних характеристик вихідного струму, напруги та функціональних можливостей перетворювача частоти;
- мінімально можлива вартість пристрою в діапазоні потужностей до 110 кВА.

В якості перетворювача електроенергії вибрано транзисторний перетворювач частоти VLT Automation Drive FC-302 від Danfoss. Цей потужний універсальний інвертор легкий в обслуговуванні пристрій, що має багато функціональних можливостей, таких як Пропорційно-Інтегральне-Диференціальне (PID) і векторне керування та режим енергозбереження.

У таблиці 3.3 наведені основні характеристики перетворювача частоти VLT Automation Drive FC-302.

Таблиця 3.3 – Номінальні дані на перетворювач FC-302

Напруга, В	380
Частота, Гц	50/60
Номінальна потужність, кВт	110
ККД	98%

3.3 Вибір датчика тиску

Вибір датчика здійснимо виходячи з робочого тиску насоса $H_{\text{ном}} = 62\text{м}$.
Тоді максимальний робочий тиск дорівнює:

$$P_{\text{макс}} = k \cdot H_{\text{ном}} = 1,2 \cdot 6,2 = 7,44 \text{ атм.}$$

Здійснення вимірювань у таких середовищах як рідини, пари, гази, включаючи газоподібний кисень і суміші газів, що містять кисень.

4 РОЗРОБКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Планується, що насосний агрегат буде працювати лише на потужність близьку до максимальної в часи найбільшого попиту: зранку та ввечері. В інший час споживання води вважатиметься незначним. З цим розрахунком потрібно обрати електричне обладнання: фотоелектричні панелі, інвертор та акумулятори для підтримання потрібного рівня енергії живлення.

Розрахуємо мінімальну необхідну потужність панелей:

$$P_{\text{ес}} = \frac{K_3 \cdot P_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}} \cdot \cos \varphi_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{інв}}} = \frac{90000}{0,925 \cdot 0,9 \cdot 0,98} = 110 \text{ кВт}$$

Візьмемо панелі CL-P60250 на стандартну потужність 250 Вт, які присутні на ринку України. Параметри модуля наведені в табл. 4.1, зовнішній вигляд на рис. 4.1. Тоді необхідна кількість модулів:

$$N_{\text{м}} = \frac{P_{\text{ес}}}{P_{\text{м}}} = \frac{165000}{250} = 660 \text{ шт.}$$



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд панелі CL-P60250

Таблиця 4.1 – Параметри фотоелектричної панелі CL-P60250

Потужність	$P_{mppt}(BT)$	250
Напруга ХХ	$U_{xx}(B)$	36,3
Струм КЗ	$I_{k3}(A)$	8,71
Напруга MPP	$U_m(B)$	30,9
Струм MPP	$I_m(A)$	8,17
ККД модуля	%	15,4
Тип фотоелемента	–	156x155 (p-Si)
Кількість комірок	шт	60(6x10)
Макс. напруга	$U_{max}(B)$	1000
Макс. струм	A	15
Темп, коефіцієнт U_{xx}	%/°C	-0,34
Темп, коефіцієнт I_{k3}	%/°C	0,06
Темп, коефіцієнт P_m	%/°C	-0,44
Робоча температура	°C	-40 ... +85
НОСТ	°C	45±2
Розподільна коробка		IP67, з діодами
Тип діода		шотки
Довжина кабелю	мм ²	900
Перетин кабелю фотомодуля	мм ²	4
Вага	кг	19

Для забезпечення сталого живлення насосного агрегата потрібно обрати акумуляторні батареї. Для цього нам підійдуть акумулятори LogicPower LP LiFePO4 BMS 200A напругою 48 В та потужністю 9,69 кВт (табл. 4.2) зовнішній вигляд акумулятора представлений на рисунку 4.2.

Необхідна кількість акумуляторів:

$$N_{\text{акб.розр}} = N_{\text{м}} \frac{I_{\text{трр}}}{I_{\text{акб max}}} = 660 \frac{8.17}{100} = 54 \text{ шт}$$

Остаточно приймемо 54 акумуляторних батарей.

Загальна встановлена потужність акумуляторних батарей:

$$P_{\text{акб.заг}} = K_{\text{зап}} \cdot P_{\text{акб}} N_{\text{акб}} = 9,69 \cdot 54 = 523,26 \text{ кВт}$$

Таблиця 4.2 – Параметри акумулятора BMS 200A

Назва параметру	Значення	Од. вим.
Тип акумулятора	LiFePO4	—
Ємність акумулятора	202(9,69)	А/год(кВт)
Кількість циклів заряду/розряду	7000	—
Напруга	48	В
Струм заряду	100	А
Струм розряду	200	А
Робоча температура	-20...60	°С
Габарити	500 x 460 x 256	мм
Маса акумулятора	72	кг
Гарантія	60	міс



Рисунок 4.2 – Загальний вигляд акумулятора BMS 200A

На розраховану потужність фотоелектричної станції обираємо інвертор потужністю 250 кВА. Паспортні дані пристрою наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри інвертора Sungrow SG250HX-V112

Назва параметру	Значення	Од. вим.
Максимальна напруга панелей	1500	В
Діапазон напруги MPPT	500 – 1500	В
Максимальний струм панелей	30*12	А
Вихідна змінна напруга	250	кВА
Максимальний вихідний змінний струм	180,5	А
Номінальна напруга	800	В
Ступінь захисту	IP66	–
Охолодження	Розумне примусове повітряне	–
Розміри	1051 x 660 x 363	мм
Вага	99	кг
Гарантія виробника	60	міс



Рисунок 4.3 – Загальний вигляд інвертора Sungrow SG250HX-V112

5 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДВИГУНА НАСОСА

5.1 Складання структурної схеми, визначення параметрів передавальної функції об'єкта керування

Для загального випадку об'єкт керування описується такою функціональною схемою (рис. 5.1).

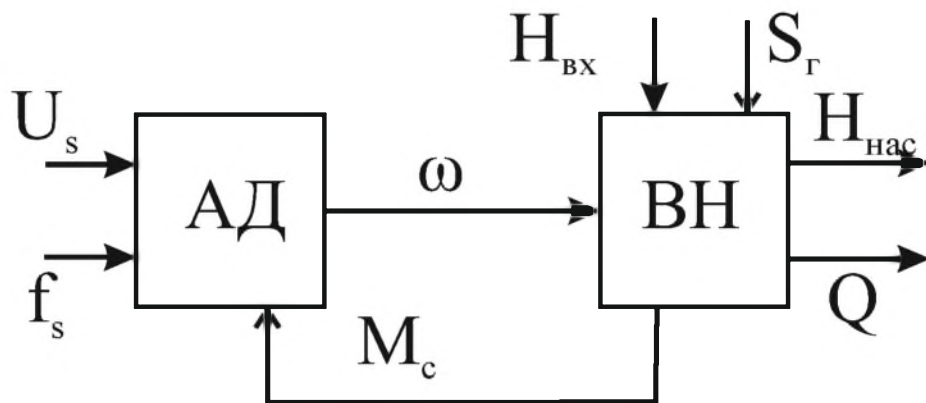


Рисунок 5.1 – Функціональна схема насосного агрегату

Відомо, що навантаження, яке створюють відцентрові та осьові насоси, вентилятори та інші подібні механізми, відоме як "вентиляторне навантаження". Статичний момент в таких пристроях прямо пропорційний квадрату швидкості обертання робочого колеса. Щоб встановити відношення між моментом опору на валу двигуна та його швидкістю обертання, потрібно врахувати математичні формули, що характеризують роботу насоса та параметри трубопроводу.

Основними показниками роботи насоса є напір і подача. Подача – це кількість рідини, яку насос перекачує за певний проміжок часу.

Описує насос заданий диференціальним рівнянням:

$$\frac{m}{\rho \cdot g} Q + s^2(a + a_{\phi})Q^2 = s^2 \cdot \frac{H_{0H}}{\omega_H^2} \omega^2 + s^2 H_{ст}$$

де m – маса води в насосі та трубопроводах; g – прискорення вільного падіння; ρ – щільність рідини.

$$H_* = \frac{H_H}{\omega_H^2} \omega_*^2 = k_2 \omega_*^2$$

де k_1, k_2 – постійні величини.

Якщо ми відкинемо інерційність частотного перетворювача і електромагнітні ланцюги двигуна, вважаючи, що вони значно менше за постійну часу технологічного об'єкта, і розглядаємо зв'язок між об'єктом і електроприводом через механічну характеристику (M_c), припускаючи, що жорсткість цієї характеристики двигуна достатньо велика, то ми можемо спростити структурну схему в разі керування H . Це може бути зроблено за допомогою лінеаризації біля номінальної точки, що призведе до більш простого вигляду, як показано на рисунку 5.3.

Якщо взяти корінь з рівняння:

$$\sqrt{H_*} = k_{\text{нас}} \omega_*$$

де $k_{\text{нас}} = \sqrt{\frac{H_H}{\omega_H^2}}$ – постійний коефіцієнт.

Насос і гідравлічна мережа виступають інерційними ланками, які можна представити як аперіодичні системи першого порядку.

$$W_{\text{нас}}(p) = \frac{k_{\text{нас}}(\omega)}{T_{\text{нас}}p + 1}$$

де $k_{\text{нас}}$ – коефіцієнт перетворення насоса,

$T_{\text{нас}}$ – стала часу насоса.

Оскільки насос є складною нелінійною системою, а ми працюємо з малими відхиленнями, ми можемо лінеаризувати його передавальну функцію.

Значення $T_{\text{нас}} = 0,001$ с. В результаті, при синтезі системи з достатньо малою часовою постійною, ми можемо ігнорувати інерцію насоса, вважаючи його безінерційним елементом $W_{\text{нас}}(p) = k_{\text{нас}}$.

Модель насоса буде виглядати так, як показано на рисунку 5.4.

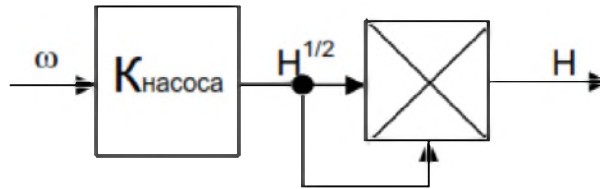


Рисунок 5.3 - Модель насоса

Тоді структурна схема системи автоматичного контролю (САК) насосної установки буде такою, як показано на рисунку 5.4.

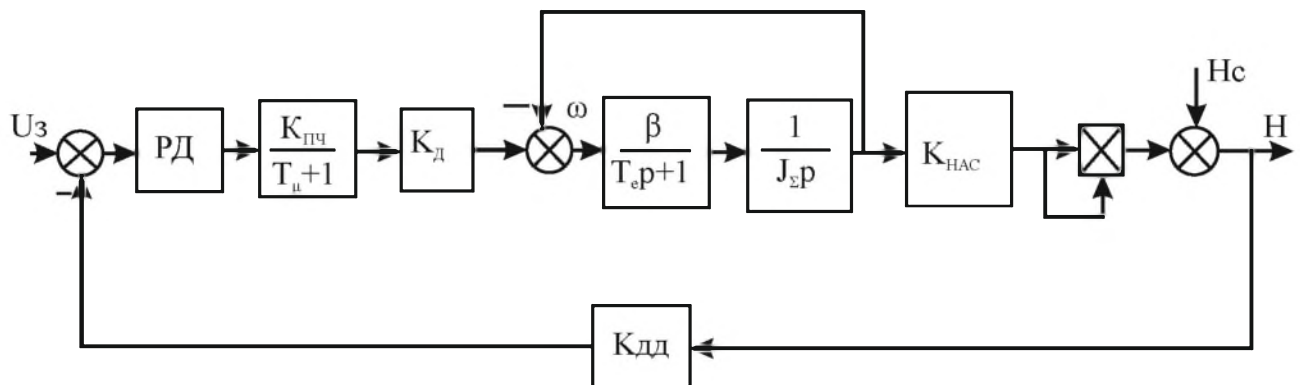


Рисунок 5.4 – Структурна схема електромеханічної системи

На рисунку 5.4 позначені наступні блоки: РД – регулятор тиску, K_d – коефіцієнт передачі швидкості двигуна, $K_{ПЧ}$ – коефіцієнт перетворювача частоти, $K_{дд}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за тиском.

$$K_d = \frac{2\pi}{p}$$

$$K_{дд} = \frac{U_3}{H_H}$$

Для асинхронного короткозамкнутого електродвигуна, на базі Т-подібної схеми заміщення (рис. 5.5) і схеми динамічної узагальненої електричної машини, проводиться математичний опис і розробка його динамічної моделі.

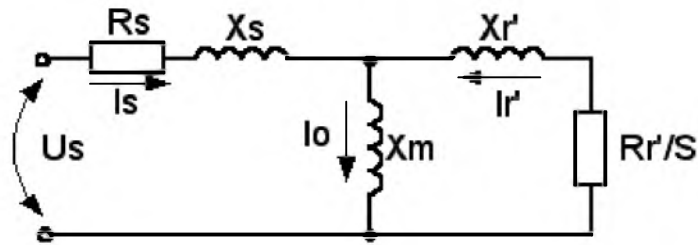


Рисунок 5.5 – Схема заміщення АД

Параметри схеми заміщення:

$$X_s = X'_s \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\phi H}}$$

$$X'_r = X''_r \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\phi H}}$$

$$R_s = R'_s \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\phi H}}$$

$$R'_r = R''_r \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\phi H}}$$

У математичному описі асинхронного двигуна, як об'єкта керування, робляться наступні припущення:

- магнітні сили обмоток двигуна розподіляються строго синусоїдально уздовж окружності повітряного зазору;
- втрати в сталі статора і ротора відсутні; обмотки статора і ротора є строго симетричними зі зсувом осі на 120 градусів;
- насичення магнітного ланцюга відсутнє.

Повна динамічна модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в статорній (a-b) системі координат представляє собою систему з п'яти диференціальних рівнянь:

$$\omega = \frac{1}{j} \left(\frac{3}{2} p_{\Pi} \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{ra} i_{sb} - \Psi_{rb} i_{sa}) - M_c \right);$$

$$\frac{di_{sa}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma} i_{sa} - \alpha \beta L_m i_{sa} + \alpha \beta \psi_{ra} + \beta \omega p_{\Pi} \psi_{rb} + \frac{U_{sa}}{\sigma};$$

$$\frac{di_{sb}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma} i_{sb} - \alpha \beta L_m i_{sb} + \alpha \beta \psi_{rb} + \beta \omega p_{\Pi} \psi_{ra} + \frac{U_{sb}}{\sigma};$$

$$\frac{d\psi_{ra}}{dt} = -\alpha\psi_{ra} - \omega p_{\pi}\psi_{rb} + \alpha L_m i_{sa};$$

$$\frac{d\psi_{rb}}{dt} = -\alpha\psi_{rb} + \omega p_{\pi}\psi_{ra} + \alpha L_m i_{sb};$$

$$\alpha = \frac{R_r}{L_r}; \beta = \frac{L_m}{\sigma L_r}; \sigma = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$$

$$L_s = L_m + L_{s\sigma}; L_r = L_m + L_{r\sigma}$$

де ω – кутова швидкість;

i_{sa}, i_{sb} – компоненти вектора струму статора;

ψ_{ra}, ψ_{rb} – компоненти вектора потокозчеплення ротора;

U_{sa}, U_{sb} – компоненти вектора напруги статора;

M_c – момент навантаження;

R_s, R_r – активні опори статора і ротора;

L_s, L_r – індуктивності статора і ротора;

L_m – індуктивність контуру намагнічування;

$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності розсіювання статора і ротора;

p_{π} – число пар полюсів;

$M = \frac{3}{2} p_{\pi} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{ra} i_{sb} - \psi_{rb} i_{sa})$ – момент, що розвивається двигуном.

Оскільки в процесі стабілізації тиску система працює в рамках невеликих відхилень від робочої точки стабілізації, це дозволяє нам використовувати лінійну модель асинхронного двигуна.

Така модель, відома як лінеаризована модель асинхронного двигуна, буде використовуватися для синтезу регуляторів системи керування. Цю структурну схему лінеаризованої моделі асинхронного двигуна можна представити у вигляді моделі, наведеної на рисунку 5.6.

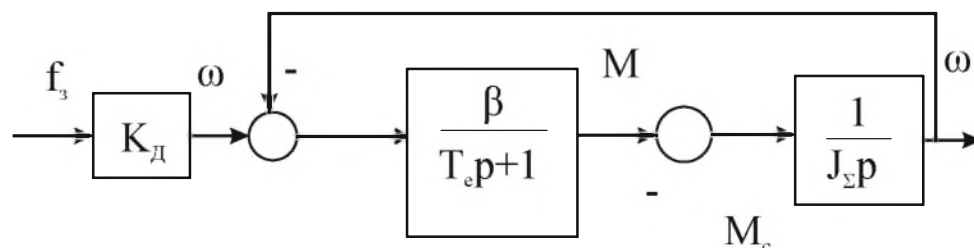


Рисунок 5.6 - Лінеаризована модель АД

Перетворювач частоти з ланкою постійного струму включає керований випрямляч, фільтр і автономний інвертор напруги. Транзисторний перетворювач - це нелінійний дискретний динамічний об'єкт з обмеженою маневреністю, однак особливості перетворювача частоти як нелінійного об'єкта не впливають істотно на роботу системи. Частота зрізу контуру регулювання, в якому він знаходиться, значно нижче частот, важливих для динаміки транзисторного перетворювача, при цьому час перехідних процесів в системі значно перевищує період дискретизації системи. Найчастіше, випрямляч представляють як аперіодичний елемент з коефіцієнтом передачі K_v і часовою постійною T_v , а інвертор - як безінерційний елемент з коефіцієнтом передачі K_i . Для синтезу регуляторів системи керування буде використовуватися лінеаризована модель перетворювача частоти.

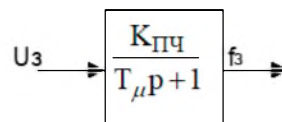


Рисунок 5.7 – Лінеаризована модель перетворювача частоти

Щоб отримати більш точне уявлення про перехідні процеси, проведемо дослідження динаміки системи перетворювача частоти-асинхронного двигуна, використовуючи еквівалентну двофазну модель двигуна у векторній формі.

Математичний опис процесів перетворення енергії в асинхронному двигуні виконується під час його роботи від мережі. Однак, це є складною задачею через сильну нелінійність рівнянь, яка обумовлена множенням змінних.

Асинхронний двигун є трифазним, що ускладнює математичний опис через збільшення кількості рівнянь. Тому процеси в багатофазних електричних машинах представляються в еквівалентній двофазній моделі цієї машини. Умовою адекватності цього представлення є незмінність потужності машини при перетворенні рівнянь. При розв'язанні цієї задачі кожна реальна змінна двигуна - напруга, струм, потокозчеплення - представляється у вигляді вектора. Напрямок цього вектора тісно пов'язаний з відповідною осі координат даної обмотки (статора або ротора).

Рівняння Кірхгофа для асинхронного двигуна має вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{U}_s &= I_s R_s + \frac{d\dot{\psi}_s}{dt} + j\omega_c \dot{\psi}_s \\ 0 &= I_r R_r + \frac{d\dot{\psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega_{\text{ел}}) \dot{\psi}_r\end{aligned}\quad (5.1)$$

де U_s – напруга статора;

I_s, I_r – струм статора і ротора;

R_s, R_r – активний електричний опір статора і ротора;

$\omega_{\text{ел}} = p_{\text{п}} \omega$ – кутова швидкість електрична;

$p_{\text{п}}$ – число пар полюсів двигуна.

Потокозчеплення статора і ротора визначаються наступними виразами:

$$\dot{\psi}_s = L_s \dot{I}_s + L_{sr} \dot{I}_r \quad (5.2)$$

$$\dot{\psi}_r = L_{sr} \dot{I}_s + L_r \dot{I}_r \quad (5.3)$$

де L_1, L_2, L_3 – індуктивність обмотки статора, ротора і їх взаємоіндуктивність.

Вектори напруги, струмів і потозчеплення представляються сумою проєкцій на осі (U, V)

$$\dot{U}_s = U_{su} + jU_{sv}$$

$$\dot{I}_s = i_{su} + ji_{sv}$$

$$\dot{I}_r = i_{ru} + ji_{rv}$$

$$\dot{\psi}_s = \psi_{ru} + j\psi_{rv}$$

З рівняння (5.3) визначається вираження для струму ротора

$$I_r = \frac{1}{L} \dot{\psi}_r - \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{I}_s \quad (5.4)$$

Після підстановки:

$$0 = \left(\frac{1}{L_r} \dot{\psi}_r - \frac{L_{sr}}{L_r \dot{I}_s} \right) R_r + \frac{d\dot{\psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega_{ел}) \dot{\psi}_r$$

в операторній формі:

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \dot{\psi}_r - \frac{L_{sr}}{L_r} R_r \dot{I}_s + p \dot{\psi}_r + j(\omega_c - \omega_{ел}) \dot{\psi}_r$$

Введемо заміну $\alpha = R_r / L_r$ тоді рівняння матиме вигляд:

$$0 = (p + \alpha + j(\omega_c - \omega_{ел})) \dot{\psi}_r - L_r \alpha \dot{I}_s \quad (5.5)$$

Урахувавши (5.4) з рівняння (5.2) знаходиться вираз для потокозчеплення статора:

$$\dot{\psi}_s = L_s \dot{I}_s + L_{sr} \left(\frac{1}{L_r} \dot{\psi}_r - \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{I}_s \right) = \frac{L_s L_r - L_{sr}^2}{L_r} \dot{I}_s + \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{\psi}_r = \sigma \dot{I}_s + \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{\psi}_r \quad (5.6)$$

$$\text{де } \sigma = \frac{(L_s L_r - L_{sr}^2)}{L_r}$$

Після того, як параметри схеми заміщення були вставлені в рівняння Кірхгофа для АД, формула для напруги приймає такий вигляд:

$$\dot{U}_s = \dot{I}_s R_s + \frac{d}{dt} \left(\sigma \dot{I}_s + \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{\psi}_r \right) + j\omega_c \left(\sigma \dot{I}_s + \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{\psi}_r \right)$$

а в операторній формі:

$$\dot{U}_s = \dot{I}_s R_s + p \sigma \dot{I}_s + p \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{\psi}_r + j\omega_c \sigma \dot{I}_s + j\omega_c \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{\psi}_r$$

і остаточно:

$$\dot{U}_s = \dot{I}_s(R_s + \sigma(p + j\omega_c)) + \frac{L_{sr}}{L_r}(p + j\omega_c)\dot{\psi}_r \quad (5.7)$$

Виконавши подібні заміни для ланцюга ротора, ми отримуємо перетворену систему рівнянь, яка характеризує динаміку процесів у асинхронному двигуні:

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= \dot{I}_s(R_s + \sigma(p + j\omega_c)) + \frac{L_{sr}}{L_r}(p + j\omega_c)\dot{\psi}_r \\ 0 &= (p + \alpha + j(\omega_c - \omega_{ел}))\dot{\psi}_r - L_r\alpha\dot{I}_s \end{aligned} \quad (5.8)$$

Перше рівняння системи рівнянь в координатній площині (u, v) має вигляд:

$$\begin{aligned} U_{su} + jU_{sv} &= (i_{su} + ji_{sv})(R_s + \sigma(p + j\omega_c)) + \frac{L_{sr}}{L_r}(p + j\omega_c)(\psi_{ru} + j\psi_{rv}) \\ U_{su} + jU_{sv} &= (R_s + \sigma p)i_{su} + j(R_s + \sigma p)i_{sv} + j\sigma\omega_c i_{su} - \sigma\omega_c i_{sv} + \\ &+ \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{ru} + j\frac{L_{sr}}{L_r}\omega_c\psi_{ru} + \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{rv} - \frac{L_{sr}}{L_r}\omega_c\psi_{rv} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Проекції вектора напруги застосовуються в такому значенні:

$$\begin{aligned} U_{su} &= (R_s + \sigma p)i_{su} - \sigma\omega_c i_{sv} + \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{ru} - \frac{L_{sr}}{L_r}\omega_c\psi_{rv} \\ U_{sv} &= (R_s + \sigma p)i_{sv} + \sigma\omega_c i_{su} + \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{ru} + \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{rv} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Аналогічно для другого рівняння системи (5.1)

$$0 = (p + \alpha + j(\omega_c - \omega_{ел}))(\psi_{ru} + j\psi_{rv}) - L_{sr}\alpha(i_{ru} + ji_{rv})$$

$$0 = (p + \alpha)\psi_{ru} + j(\omega_c - \omega_{ел})\psi_{ru} + j(p + \alpha)\psi_{rv} - (\omega_c - \omega_{ел})\psi_{rv} - \\ - L_{sr}\alpha i_{ru} - jL_{sr}\alpha i_{rv}$$

Проекції вектора вживаються в такому значенні

$$0 = (p + \alpha)\psi_{ru} - (\omega_c - \omega_{ел})\psi_{rv} - L_{sr}\alpha i_{su} \\ 0 = (p + \alpha)\psi_{rv} - (\omega_c - \omega_{ел})\psi_{ru} - L_{sr}\alpha i_{rv}$$

Тоді системи рівнянь (5.2) і (5.3) виглядатимуть:

$$U_{s\alpha} = (R_s + \sigma p)i_{s\alpha} + \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{r\alpha} \quad (5.11)$$

$$U_{s\beta} = (R_s + \sigma p)i_{s\beta} + \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{r\beta}$$

$$0 = (p + \alpha)\psi_{r\alpha} + \omega_{ел}\psi_{r\beta} - L_{sr}\alpha i_{s\alpha} \\ 0 = (p + \alpha)\psi_{r\beta} + \omega_{ел}\psi_{r\alpha} - L_{sr}\alpha i_{s\beta} \quad (5.12)$$

З цих формул ми можемо отримати обчислені значення для електричних струмів, потокозчеплення та їхніх похідних.

$$i_{s\alpha} = \frac{1}{R_s + \sigma p} \left(U_{s\alpha} - \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{r\alpha} \right)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{R_s + \sigma p} \left(U_{s\beta} - \frac{L_{sr}}{L_r}p\psi_{r\beta} \right)$$

$$\psi_{r\alpha} = \frac{1}{p + \alpha} (L_{sr}\alpha i_{s\alpha} - \omega_{ел}\psi_{r\beta})$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{1}{p + \alpha} (L_{sr}\alpha i_{s\beta} - \omega_{ел}\psi_{r\alpha})$$

$$p\psi_{r\alpha} = L_{sr}\alpha i_{s\alpha} - \omega_{ел}\psi_{r\beta} - \alpha\psi_{r\alpha}$$

$$p\psi_{r\beta} = L_{sr}\alpha i_{s\beta} - \omega_{ел}\psi_{r\alpha} - \alpha\psi_{r\beta}$$

Формула для визначення моменту асинхронного двигуна:

$$M = \frac{3}{2} p_{\pi} L_{sr} I_m (\dot{i}_s \cdot \tilde{i}_r)$$

де $\tilde{i}_r = i_{ru} - j i_{rv}$

Добуток струмів визначається як:

$$\begin{aligned} \dot{i}_s \cdot \tilde{i}_r &= \dot{i}_s \left(\frac{1}{L_r} \dot{\psi}_r - \frac{L_{sr}}{L_r} \dot{i}_s \right) = \frac{1}{L_r} \dot{i}_s \dot{\psi}_r - \frac{L_{sr}}{L_r} (\dot{i}_{su}^2 + \dot{i}_{sv}^2) = \\ &= \frac{1}{L_r} (\dot{i}_{su} + j \dot{i}_{sv}) (\dot{\psi}_{ru} + j \dot{\psi}_{rv}) - \frac{L_{sr}}{L_r} (\dot{i}_{su}^2 + \dot{i}_{sv}^2) = \frac{1}{L_r} (\dot{i}_{su} \dot{\psi}_{ru} + \dot{\psi}_{rv} \dot{i}_{sv}) + \\ &\quad + j \frac{1}{L_r} (-\dot{i}_{su} \dot{\psi}_{rv} + \dot{\psi}_{ru} \dot{i}_{sv}) - \frac{L_{sr}}{L_r} (\dot{i}_{su}^2 + \dot{i}_{sv}^2) \end{aligned}$$

через це вираз для моменту в координатній площині (u,v) виходить:

$$M = \frac{3}{2} p_{\pi} \frac{L_{sr}}{L_r} (\dot{i}_{s\beta} \dot{\psi}_{r\alpha} - \dot{i}_{r\alpha} \dot{\psi}_{r\beta})$$

Механічна складова електродвигуна описується через відоме рівняння динаміки:

$$J_s \frac{d\omega_s}{dt} = M - M_c$$

де J_s – момент інерції АД;

M_c – статичне навантаження на валу двигуна.

Рівняння (5.4) - (5.10) представляють собою двофазну математичну модель асинхронного двигуна, виражену у координатах статора. На рисунку 5.8 демонструється структурна схема цього двигуна, сконструйована на основі цих рівнянь.

Трифазний асинхронний двигун отримує живлення від мережі через симетричну синусоїдальну напругу. Для переходу до координатної системи a-b використовуються відомі відношення.

$$U_A = U_m \sin(2\pi f_s t)$$

$$U_B = U_m \sin\left(2\pi f_s t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$U_C = U_m \sin\left(2\pi f_s t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

де U_m – амплітудне значення напруги живлення, В;

f_s – частота напруги живлення, Гц.

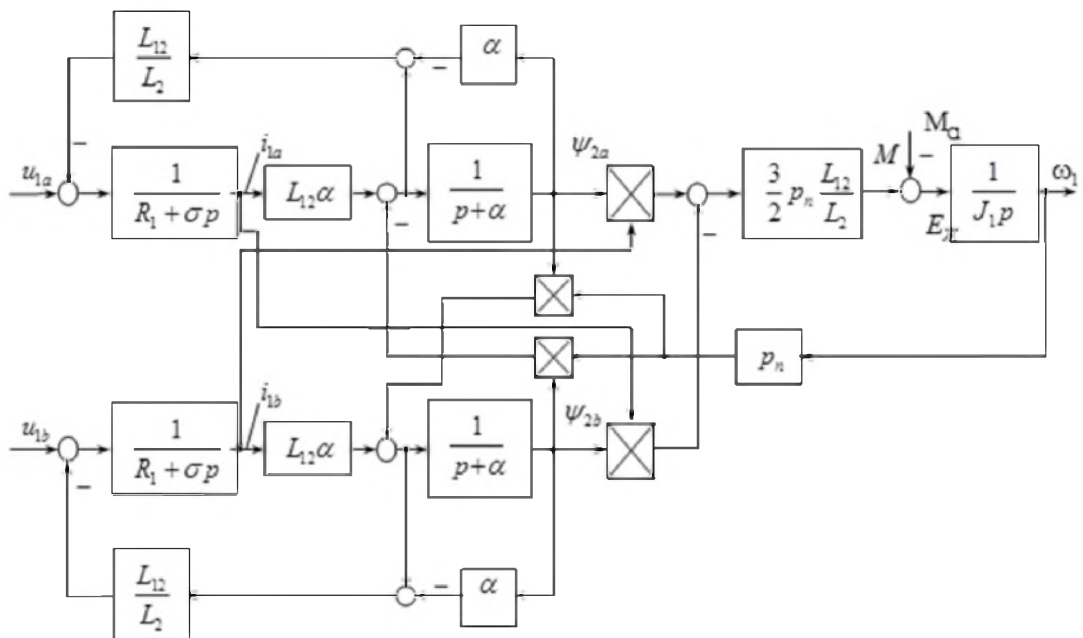


Рисунок 5.8 - Структурна схема асинхронного двигуна

Для переходу до координатної системи $(\alpha - \beta)$ використовуються відомі відношення (рис. 5.9).

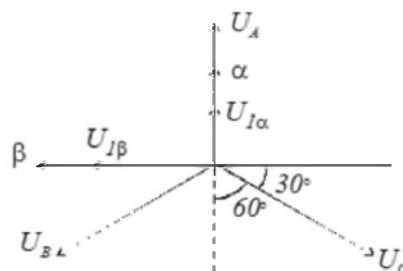


Рисунок 5.9 – Перехід від природної трифазної системи координат до двофазної

Структурна схема цього переходу відображена на рис. 5.10. При цьому, амплітуда напруги, що живить двигун, встановлюється значенням U_m , а частота напруги - значенням f_1 .

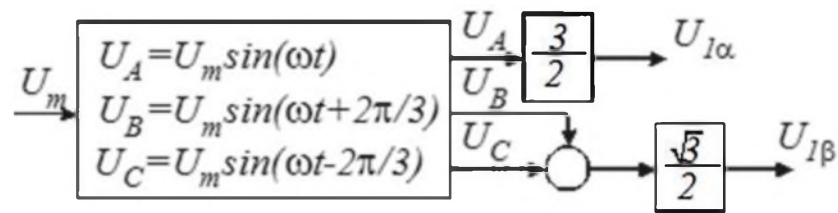


Рисунок 5.10 – Еквівалентна схема перетворення у двофазну систему напруг живлення двигуна

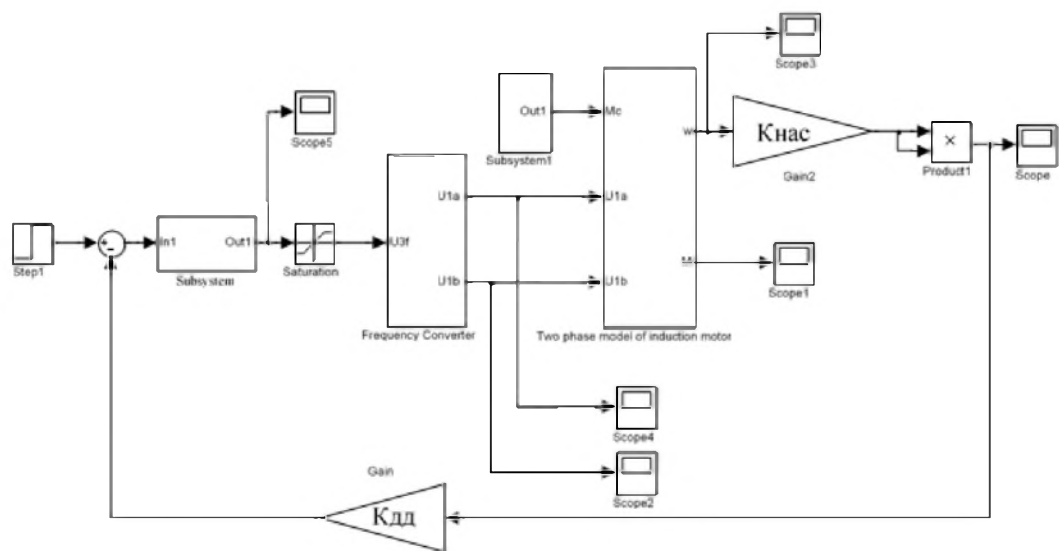


Рисунок 5.11 – Структурна схема системи ПЧ-АД на базі еквівалентної двофазної моделі двигуна в векторній формі

Під час дослідження перехідних процесів було використано пакет Simulink в середовищі MATLAB, і була створена структурна схема системи ПЧ-АД.

Розрахунки параметрів схеми заміщення обраного двигуна:

$$X_s = X'_s \frac{U_{s\phi H}}{I_{s\phi H}} = 0,077 \frac{220}{165} = 0,102 \text{ Ом}$$

$$X'_r = X''_2 \frac{U_{s\phi H}}{I_{s\phi H}} = 0,126 \frac{220}{165} = 0,168 \text{ Ом}$$

$$R_s = R'_s \frac{U_{s\phi H}}{I_{s\phi H}} = 0,02 \frac{220}{165} = 0,026 \text{ Ом}$$

$$R'_r = R''_r \frac{U_{s\phi H}}{I_{s\phi H}} = 0,016 \frac{220}{165} = 0,021 \text{ Ом}$$

$$X_{sr} = X_\mu \frac{U_{s\phi H}}{I_{s\phi H}} = 5,2 \frac{220}{165} = 6,91 \text{ Ом}$$

де $I_{s\phi H}$ – номінальний струм статора.

$$I_{s\phi H} = \frac{P_H}{3U_{s\phi H} \cos \varphi_{\eta H}} = \frac{90000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,92} = 165 \text{ А}$$

Взаємна індуктивність статора і ротора

$$L_{sr} = \frac{X_{sr}}{2\pi f_H} = \frac{6,91}{314} = 0,022 \text{ Гн}$$

Індуктивність статора:

$$L_s = \frac{X_s + X_{sr}}{2\pi f_s} = \frac{0,102 + 6,91}{314} = 0,022 \text{ Гн}$$

Індуктивність ротора:

$$L_r = \frac{X'_r + X_{sr}}{2\pi f_s} = \frac{0,168 + 6,91}{314} = 0,023 \text{ ОГн}$$

Коефіцієнт σ :

$$\sigma = \frac{L_s L_r - L_{sr}^2}{L_r} = \frac{0,022 \cdot 0,023 - 0,022^2}{0,023} = 0,000846 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт α :

$$\alpha = \frac{R'_r}{L_r} = \frac{0,021}{0,023} = 0,916$$

Коефіцієнт передачі $i_n = 1$.

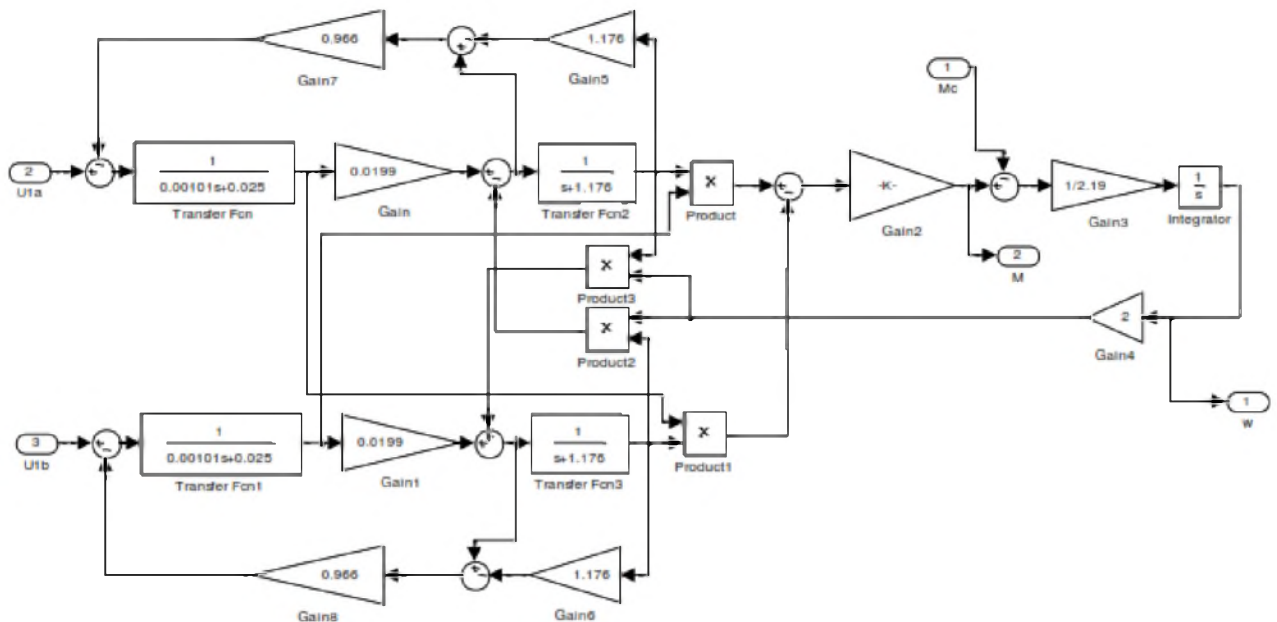


Рисунок 5.12 – Структурна схема асинхронного двигуна з введеними розрахованими параметрами заміщення

Визначення параметрів частотного перетворювача

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{K_{\text{пч}}}{T_{\mu}p + 1} = \frac{3125}{0.01 \cdot p + 1}$$

де $K_{\text{пч}}$ –

$$K_{\text{пч}} = \frac{f_{\text{н}}}{I_3} = \frac{50}{0.016} = 3,125 \cdot 10^3$$

$f_{\text{сн}} = 50$ Гц – номінальна частота напруги мережі живлення,

$I_3 = 16$ мА – струм завдання;

$T_{\mu} = 0,01$ – стала часу ПЧ.

Визначення параметрів структурної схеми насосної установки.

$p = 1$ – число пар полюсів обмотки статора двигуна;

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{\text{сн}}}{p} = \frac{314}{1} = 314 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0(1 - s_{\text{н}}) = 314(1 - 0,014) = 309.6 \text{ рад/с}$$

Коефіцієнт передачі двигуна

$$K_d = \frac{2\pi}{p} = \frac{6,28}{1} = 6,28$$

Електромагнітна постійна часу двигуна

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0ел} s_K} = \frac{1}{314 \cdot 0,1} = 0,032 \text{ с}$$

де $s_K = 0,1$

Модуль статичної жорсткості

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_0 - \omega_H} = \frac{290,7}{314 - 309,6} = 63,815$$

Сумарний момент інерції

$$J_\Sigma = J_{дв} + J_{нас} = 0,52 + 0,84 = 1,36 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Електромеханічна стала часу двигуна

$$T_m = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{1,36}{63,815} = 0,021 \text{ с}$$

На основі визначених параметрів, передавальна функція двигуна має відповідний вигляд.

$$W_{дв}(p) = \frac{\frac{\beta k_{дв}}{J_\Sigma p (T_e p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_\Sigma p (T_e p + 1)}} = \frac{\beta k_{дв}}{J_\Sigma T_e p^2 + J_\Sigma p + \beta} = \frac{k_{дв}}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1} =$$

$$= \frac{6.28}{0.00068 \cdot p^2 + 0.021 \cdot p + 1}$$

Важливим компонентом системи регулювання напору є датчик тиску, який вибирається з урахуванням номінального напору насоса.

Переводимо номінальний напір насоса у тиск:

$$P_H = g \rho_{H_2O} H_H = 9.81 \cdot 1000 \cdot 62 = 6.082 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Для того, аби покращити захист від перешкод, датчик тиску обладнаний струмовим інтерфейсом. Інформація про тиск передається у вигляді струму. Струм при максимальному тиску становить 20 мА, при мінімальному - 4 мА. Ми розраховуємо коефіцієнт передачі датчика тиску.

Максимальний напір, який датчик може виміряти, визначається.

$$H_{д. H_{max}} = \frac{10^6}{9.81 \cdot 1000} = 101,9 \text{ м}$$

Маємо коефіцієнт передачі:

$$K_{дд} = \frac{I_{д. H_{max}} - I_{д. H_{min}}}{H_{д. H_{max}} - H_{д. H_{min}}} = \frac{20 - 4}{101,9 - 0} = 0,157 \text{ мА/м}$$

Оскільки завдання напору на регулятор також буде надходити у вигляді струму, максимальне значення якого буде 20 мА, а мінімальне - 4 мА, то в каналі завдання з'явиться масштабуючий коефіцієнт, який буде дорівнювати оберненому значенню коефіцієнта передачі датчика тиску:

$$K_3 = \frac{1}{K_{дд}} = \frac{1}{0,157} = 6,64 \text{ м/мА}$$

5.2 Синтез контуру регулювання тиску

Проводити синтез контуру регулювання тиску будемо методом послідовної корекції. Налаштування контуру регулювання зробимо на модульний оптимум.

Передавальну функцію об'єкта регулювання (регулятор і датчик тиску відсутні) записуємо:

$$W_o(p) = W_{пч}(p) \cdot W_{дв}(p) W_{нас}(p)$$

$$W_o(p) = \frac{k_{пч} k_{дв} k_{нас}}{(T_{\mu} p + 1) \cdot (T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}$$

Для синтезу регулятора тиску використовують принцип задання бажаної передавальної функції відкритої системи $W_{р.бaj}(p)$. В цьому випадку, всі значні константи часу об'єкта компенсуються, що веде до їх видалення із відкритого контуру регулювання. Схожим методом можна виключити всі коефіцієнти посилення з відкритого контуру регулювання, а для усунення статичної помилки в контур вводиться інтегруючий елемент з низькою константою часу.

В результаті, первинний відкритий контур регулювання можна замінити на результуючий контур, який має загальний коефіцієнт посилення, що дорівнює $1/K_{дд}$, має астатизм першого порядку і забезпечує відчутно високу швидкодію, завдяки невеликому значенню некомпенсованих констант часу.

Отже, бажана передавальна функція відкритої системи має такий вигляд (налаштовується для модульного оптимуму)

$$W_{р.бaj}(p) = W_{рд}(p) \cdot W_o(p) = \frac{1/K_{дд}}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}$$

Тоді передавальна функція регулятора виражається наступним чином:

$$W_{рш}(p) = \frac{W_{р.бaj}(p)}{W_o(p)} = \frac{\frac{1/K_{дд}}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}}{\frac{k_{пч} k_{дв} k_{нас}}{(T_{\mu} p + 1)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}} =$$

$$= \frac{(T_{\mu}p + 1)(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}{K_{\text{дд}} 2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) \cdot k_{\text{пч}} k_{\text{дв}} k_{\text{нас}}} = \frac{(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}{2T_{\mu}p k_{\text{пч}} k_{\text{д}} k_{\text{нас}} K_{\text{дд}}}$$

де T_{μ} – мала, некомпенсована стала часу.

Як видно, ця передавальна функція є пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором (ПІД-регулятором) із відповідними коефіцієнтами посилення для пропорційної, інтегральної і диференціальної частин регулятора.

Відповідні складові ПІД регулятора тиску розраховуються:

$$k_{\text{п}} = \frac{T_m}{2k_{\text{пч}} k_{\text{д}} k_{\text{нас}} K_{\text{дд}}} = \frac{0.021}{2 \cdot 3.125 \cdot 6.28 \cdot 0.025 \cdot 0.161} = 0,132$$

$$k_{\text{і}} = \frac{1}{2T_{\mu} k_{\text{пч}} k_{\text{д}} k_{\text{нас}} K_{\text{дд}}} = \frac{1}{2 \cdot 0.01 \cdot 3.125 \cdot 6.28 \cdot 0.025 \cdot 0.161} = 620,8$$

$$k_{\text{д}} = \frac{T_m T_e}{2T_{\mu} k_{\text{пч}} k_{\text{д}} k_{\text{нас}} K_{\text{дд}}} = \frac{0.021 \cdot 0.032}{2 \cdot 0.01 \cdot 3.125 \cdot 6.28 \cdot 0.025 \cdot 0.161} = 0,421$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$W_{\text{РС}}(p) = 0,132 + \frac{620,8}{p} + 0.421p$$

Система, що розробляється є одноконтурною системою керування з одним зовнішнім контуром тиску.

Регулятор тиску реалізується за допомогою програмного універсального ПІД-регулятора, який вбудований в перетворювач частоти. Перевірка результатів синтезу регулятора здійснюється за допомогою моделювання системи в програмному пакеті MATLAB.

Важливо зазначити, що в реальному середовищі процеси, такі як запуск насосної системи чи зміна тиску в розподільчій мережі, не відбуваються раптово, але відзначаються плавністю та тривалістю. Цей розділ присвячений аналізу роботи цієї системи в критичних умовах та перевірці правильності налаштування регулятора.

Ми проводимо вивчення перехідних етапів в системі стабілізації тиску, використовуючи спрощену модель автоматичного дистанційного керування (АД) та враховуючи часові параметри роботи насоса. З метою вивчення динаміки системи, ми розробили модель насосної установки в Simulink, яка дозволяє нам провести моделювання з урахуванням або без урахування обмежень регулятора тиску, а також із можливістю подання на вхід системи різних видів завдань. Детальний опис моделі системи автоматичного керування (САК) насосної установки представлено на рисунку 6.1.

Проведемо аналіз даної системи в таких режимах без обмеження регулятора тиску та з обмеженням:

- прямий пуск на холостому ходу $M_c = 0$
- накид навантаження, що дорівнює $M_c = 0.9M_n$
- плавний пуск від ЗІ і накидання навантаження.

Для проведення моделювання системи керування насосної установки скористаємося бібліотекою SIMULINK пакета прикладного програмного забезпечення MATLAB.

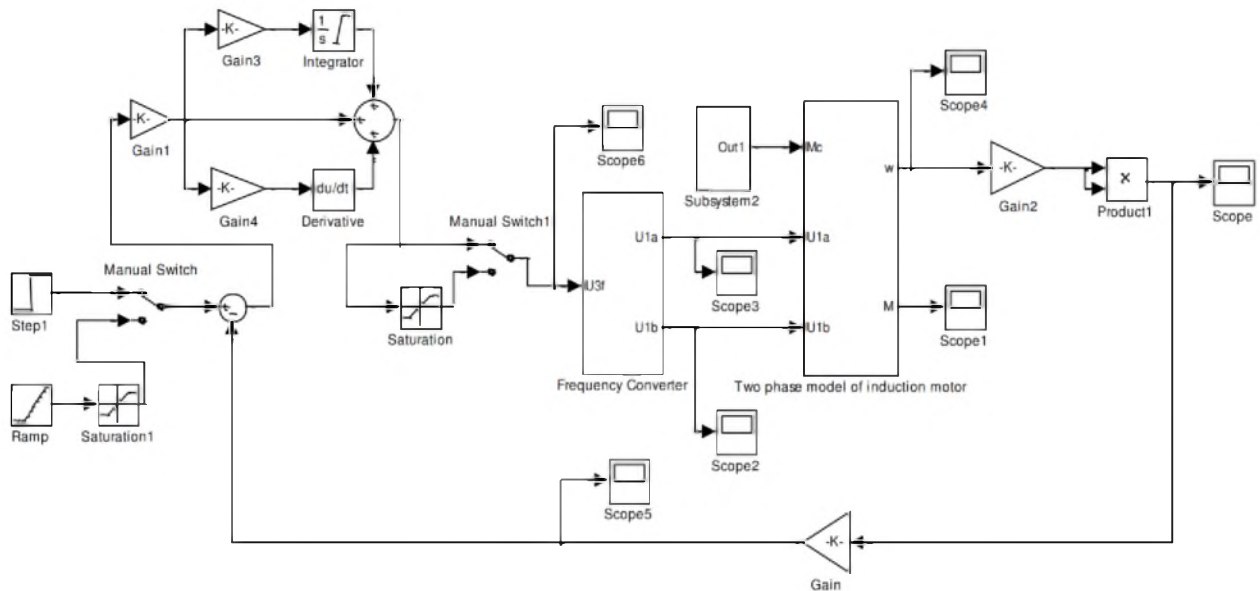


Рисунок 6.1 – Математична модель САК насосної установки в Simulink

Обмеження виконуються за допомогою блоку Saturation.

Модель системи складена з окремих блоків. Кожен блок реалізує певний елемент структурної схеми. Перетворювач частоти схований у підсистему Frequency Converter, а двигун в блок Two phase model of induction motor.

Графік зміни тиску, швидкості та моменту, при реакції на завдання у вигляді стрибка без врахування обмежень на виході регулятора тиску зображені на рис. 6.2, 6.3, 6.4.

Графік зміни тиску, що створюється насосом, при реакції на плавне наростання сигналу завдання без обмеження на виході регулятора тиску зображені на рис. 6.5.

Проведене моделювання системи керування насосної установки в бібліотеці SIMULINK MATLAB, показало правильність вибору структурної схеми насосної установки, а основні показники якості перехідних процесів говорять про правильність синтезу регулятора напору.

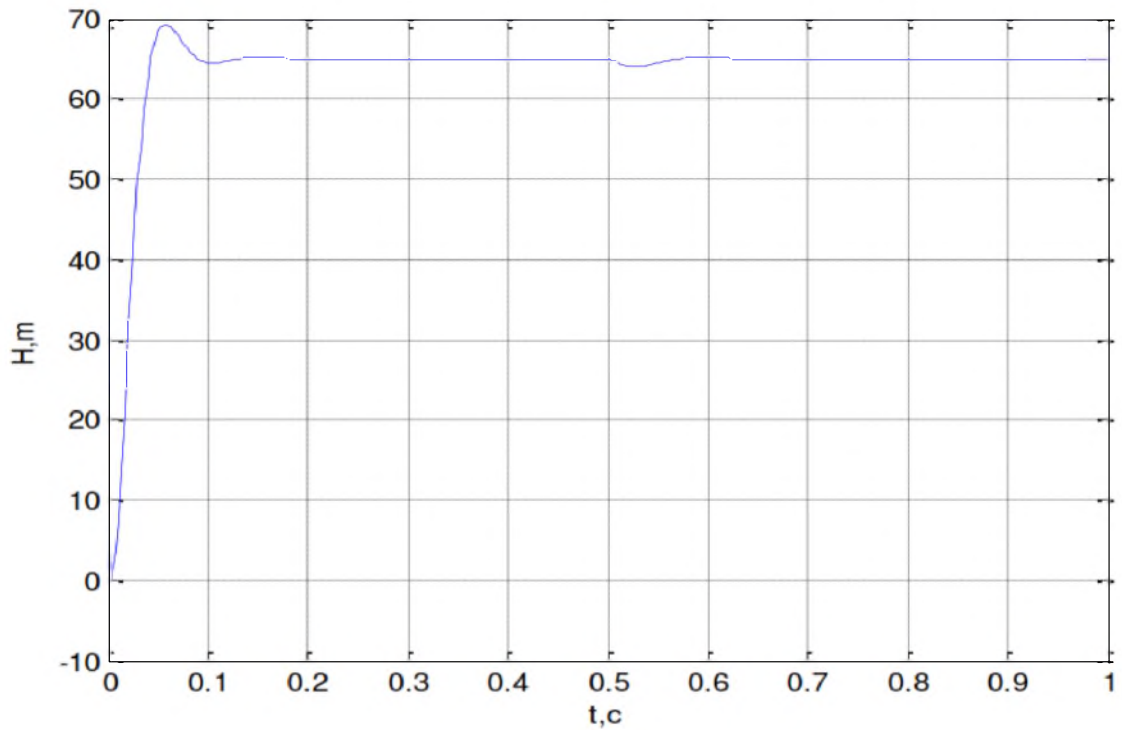


Рисунок 6.2 – Графік перехідного процесу зміни тиску при сигналі завдання у вигляді стрибку без врахування обмежень на виході регулятора тиску і накиду навантаження

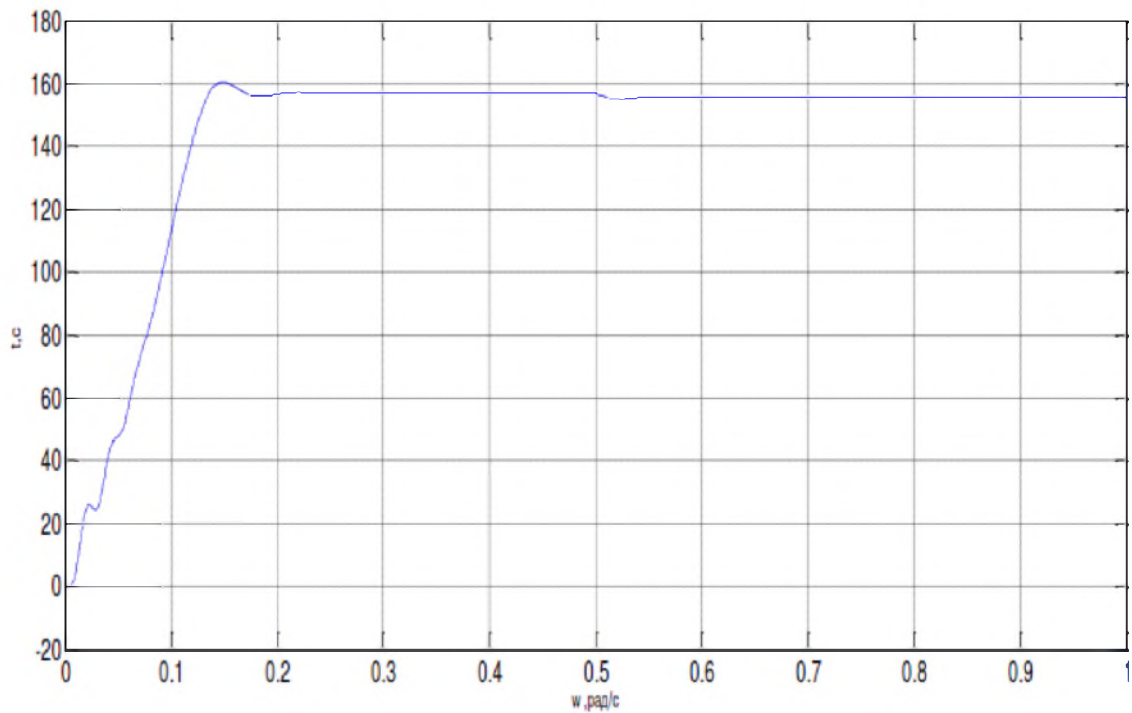


Рисунок 6.3 – Графік перехідного процесу зміни швидкості при сигналі завдання у вигляді стрибку без врахування обмежень на виході регулятора тиску і накиду навантаження

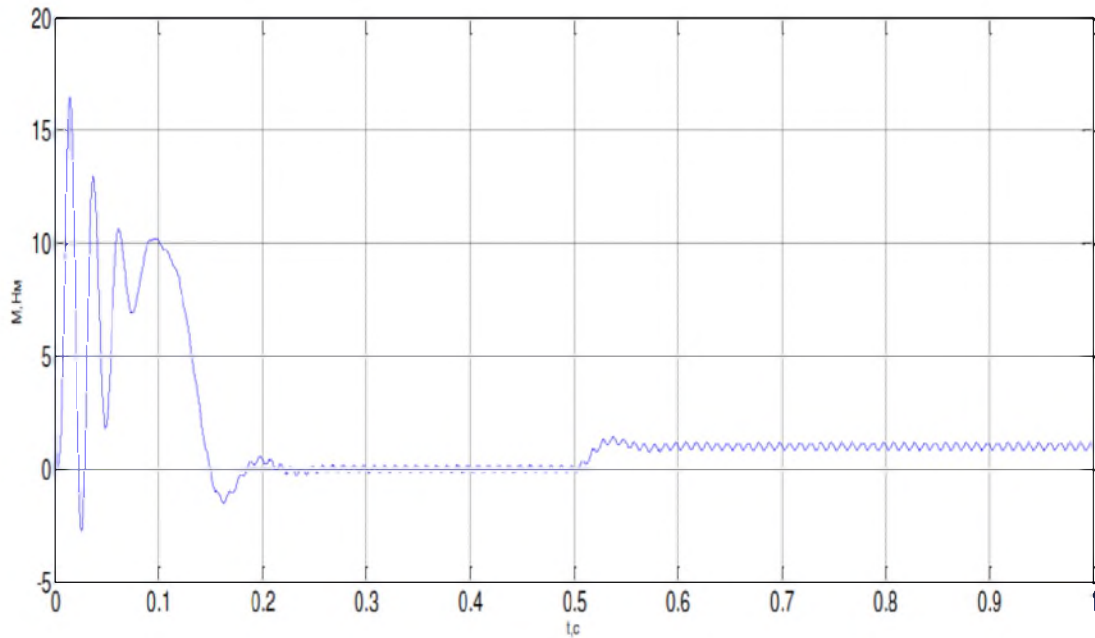


Рисунок 6.4 – Графік перехідного процесу зміни моменту при сигналі завдання у вигляді стрибку без врахування обмежень на виході регуляторної тора тиску і накиду навантаження

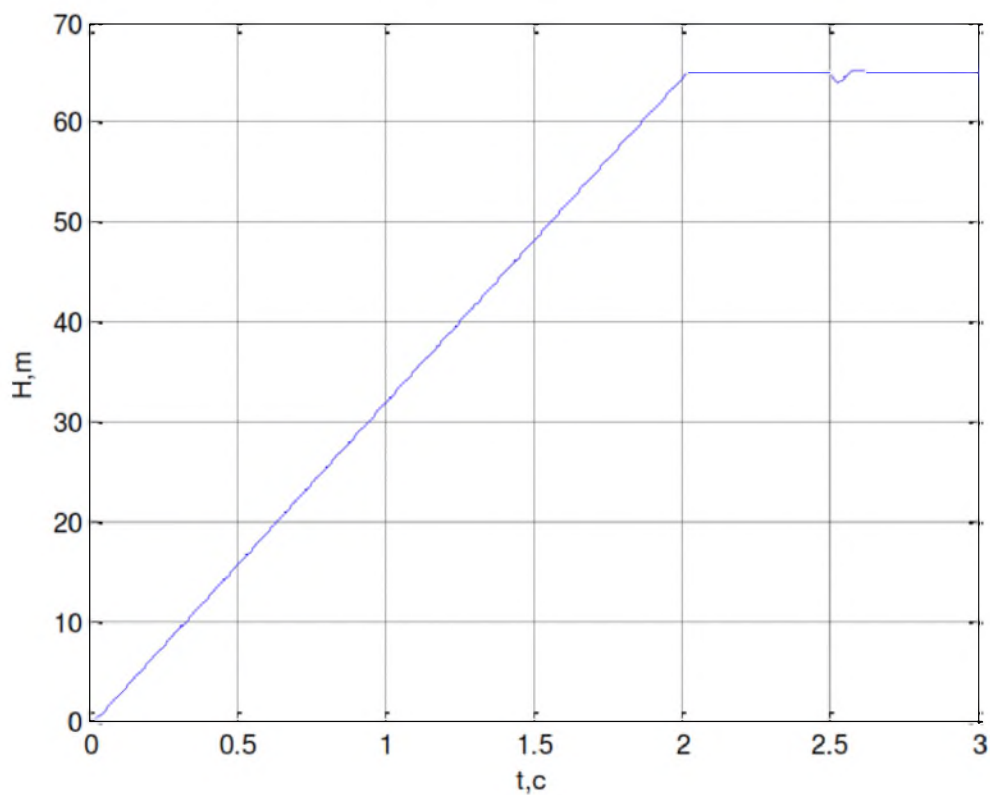


Рисунок 6.5 – Графік перехідного процесу зміни тиску при завданні у вигляді плавного наростання сигналу без врахування обмежень на виході регулятора тиску і накиду навантаження

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розроблена система автоматизації насосної установки із живленням від фотоелектричної станції.

Електромеханічною системою є підпорядкований асинхронний електропривод з частотним керуванням зі зворотним зв'язком за тиском.

Виходячи із заданих параметрів відцентрового насоса, була розрахована потужність і обраний приводного двигун типу 4A250M2Y3 і частотний перетворювач типу VLT Automation Drive FC-302 від Danfoss.

Сонячна електростанція складається з 660 шт. полікристалічних модулів Abi Solar CL-P60250. Накопичувачами енергії виступають 54 акумулятора Logic Power BMS 200A LiFePO4 загальною потужністю 523,26 кВт.

Для перетворення постійної напруги у змінну трифазну обраний інвертор Sungrow SG250HX-V112 потужністю 250 кВА.

Для забезпечення адекватного та надійного регулювання тиску на виході був проведений синтез одноконтурною системи частотного керування із застосуванням ПІД регулятора тиску.

Використовуючи бібліотеку Simulink Matlab методом цифрового моделювання проведені дослідження динамічних режимів електромеханічної системи керування відцентрового насосу.

Результати моделювання показали, що розроблена система забезпечує задані характеристики стабілізації тиску води при змінах у витраті води. Спроектований електропривод задовольняє критеріям електроприводів насосних агрегатів за якістю перехідних процесів і швидкодії.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Моделювання електромеханічних систем: підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001. – 376 с.
2. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.
3. Лозинський А.О., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Розв'язування задач електромеханіки в середовищі пакетів MathCAD і MATLAB: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 166 с.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А 90 А. 3. Кравчик, М. М. Шлаф, В.И. Афонин, Е. А. Соболенская.—М.: Энергоиздат, 1982. — 504 с., ил.
5. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудных установках. /Лезнов Б. С. // М.: Энергоатомиздат, 2006. 360с.
6. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
7. Терёхин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
8. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / учебник. – М.: Academia, 2006. – 265 с.

ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Організаційні та технічні заходи для безпечного виконання робіт на електроустановках

Для енергетичних підприємств розроблені спеціальні правила техніки безпеки та інструкції щодо охорони праці, які є обов'язковими для всього обслуженого персоналу.

Організаційні заходи щодо забезпечення робіт на електрообладнанні.

Роботи в діючих електроустановках слід виконувати за нарядами, по розпорядженню або в порядку поточної експлуатації. Роботи, які виконуються в порядку поточної експлуатації, проводять без оформлення наряду або розпорядження.

Для безпечного проведення робіт необхідно виконати наступні організаційні заходи:

- затвердити робітників, відповідальних за безпечне ведення робіт;
- видати наряди або розпорядження;
видати дозвіл на підготовку робочих місць і на допуск;
- підготувати робочі місця і допуск до роботи;
перехід на друге робоче місце;
- оформити перерви в роботі та її закінчення.

Підготовка робочого місця включає у себе виконання технічних заходів робітниками зі складу)- оперативних або оперативно-виробничих робітників.

Технічні заходи слід виконувати в наступній послідовності:

- провести необхідні відключення і прийняти заходи, перешкоджаючих помилковому або самовільному включенню комутаційної апаратури;

вивісити забороняючі плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційними апаратами. У разі необхідності струмоведучі частини слід огородити;

- приєднати до “землі” переносне заземлення;

- перевірити відсутність напруги на струмоведучих частинах, на які слід наложити заземлення. Якщо переносні заземлення планується встановити поблизу струмоведучих частин, які не входять у зону робочого місця, то їх слід відгородити до перевірки відсутності напруги і заземлення;

встановити заземлювач (включити заземлювальні ножі, приєднати до відключених струмоведучих частин переносні заземлення) відразу після перевірки відсутності напруги вивісити плакати “Заземлено” на приводах відключених комутаційних апаратів;

- відгородити, при необхідності, робочі місця або струмоведучі частини, які залишилися під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. В залежності від місцевих умов струмоведучі частини огорожують до або після їх заземлення.

Трансформатори напруги і силові трансформатори зв’язані з виділеною для роботи ділянкою електроустановки, слід відключити також і з боку напруги 1000 В для запобігання можливості оберненої трансформації.

При виконанні робіт в відсіках шаф КРУ необхідно:

- викотити візок з обладнанням;
- закрити на замок шторку відсіку, в якому струмоведучі частини залишились під напругою, повісити плакат “Стій! Напруга”;
- вивісити плакат “Працювати тут!” у відсіку, де будуть робити люди.

А.3 Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки є складовою частиною виробничої діяльності всіх працівників енергооб’єктів і покладається на керівників та уповноважених ними осіб.

На кожному енергооб’єкті залежно від кількості працівників і пожежонебезпечних об’єктів повинна бути створена служба пожежної безпеки або призначена особа, відповідальна за пожежну безпеку.

На кожному енергооб'єкті, з урахуванням пожежної безпеки, наказом (інструкцією) повинен бути встановлений відповідний протипожежний режим, а також складені інструкції з пожежної безпеки:

- загальнооб'єктна;
- для окремих цехів, дільниць, лабораторій, приміщень тощо;
- експлуатації систем водопостачання, установок виявлення і гасіння пожежі;
- проведення пожежонебезпечних видів робіт, експлуатації технологічних установок, устаткування тощо.

Інструкції повинні розроблятися на підставі чинних правил та інших нормативних актів, з огляду на специфіку пожежної безпеки будівель, споруд, технологічних процесів, технологічного та виробничого устаткування. Крім того, повинен бути складений оперативний план пожежогасіння, який розробляється спільно спеціалістами пожежної охорони Міністерства надзвичайних ситуацій і енергооб'єкта. Усі документи повинні затверджуватись у встановленому порядку.

Кожний випадок пожежі (загорання) повинен розслідуватись спеціально призначеною комісією для встановлення причин, збитків, винуватців виникнення пожежі (загорання) і розроблення протипожежних заходів для інших об'єктів галузі.

При аварії на трансформаторах з виникненням пожежі, він повинен бути відключений з усіх сторін і заземлений. Після зняття напруги, гасити пожежу слід усіма засобами (водою, повітряно-механічною піною, вогнегасниками). При наявності на трансформаторі стаціонарної установки пожежогасіння, вона повинна бути увімкненою дистанційно (вручну), якщо не увімкнулась автоматично.

Під час пожежі на трансформаторі слід захищати від дії високої температури водяними струміннями металеві опори, портали та інше обладнання сусіднього трансформатору. При цьому у зоні дії водяних струменів з ближчого обладнання та розподільчих пристроїв повинно бути знята найвища напруга та вони повинні бути заземлені.

Керівником гасіння пожежі на енергооб'єкті до прибуття першого пожежного підрозділу є особа, визначена інструкцією з пожежної безпеки.

Після прибуття першого пожежного підрозділу ця особа повинна інформувати про особливості об'єкта, на якому виникла пожежа, і про вжиті заходи з гасіння пожежі старшу посадову особу пожежного підрозділу, передати їй керівництво гасіння пожежі, видати письмовий допуск на проведення пожежогасіння та надати максимально можливу допомогу у ліквідації пожежі силами та засобами енергооб'єкта.

ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____