

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Розроблення автоматизованого електропривода теплового насосу системи опалювання виробничого приміщення»

Виконав: студент 2 курсу, групи 601-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Рибка Д. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

РЕФЕРАТ

до магістерської кваліфікаційної роботи на тему:
«Розроблення автоматизованого електропривода теплового насосу
системи опалювання виробничого приміщення»

Мета роботи полягає у розробленні енергоефективної та автоматизованої системи електропривода теплового насоса для опалення виробничого приміщення з використанням низькопотенційних джерел енергії та відновлюваних ресурсів.

У роботі проведено аналіз сучасних технологій теплових насосів, визначено доцільність використання ґрунтового тепла та сонячної енергії як джерел енергії для комбінованих систем тепlopостачання. Розроблено принципову та функціональну схеми енергокомплексу, що включає тепловий насос та сонячні батареї, виконано теплотехнічний і електротехнічний розрахунки системи опалення.

Окрему увагу приділено синтезу системи автоматизованого електропривода на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і тиристорного перетворювача частоти. Спроектовано силову, керуючу та захисну частини електропривода, забезпечено стабілізацію температурного режиму та енергозбереження завдяки впровадженню системи автоматичного регулювання.

Практичний результат роботи полягає у створенні проекту автоматизованої теплотехнічної системи з високим коефіцієнтом перетворення енергії (COP), зниженою залежністю від зовнішніх енергоносіїв і можливістю інтеграції в сучасні системи «розумного» енергоменеджменту.

Ключові слова: тепловий насос, електропривод, автоматизація, перетворювач частоти, енергозбереження, система опалення, асинхронний двигун, керований випрямляч, енергоефективність.

ABSTRACT

to the master's qualification work on the topic:

"Development of an automated electric drive of a heat pump for a heating system for a production facility"

The purpose of the work is to develop an energy-efficient and automated system of an electric drive of a heat pump for heating a production facility using low-potential energy sources and renewable resources.

The work analyzes modern technologies of heat pumps, determines the feasibility of using ground heat and solar energy as energy sources for combined heat supply systems. A basic and functional diagram of an energy complex, including a heat pump and solar panels, is developed, and thermal and electrical calculations of the heating system are performed.

Special attention is paid to the synthesis of an automated electric drive system based on an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor and a thyristor frequency converter. The power, control and protective parts of the electric drive were designed, temperature stabilization and energy saving were ensured due to the introduction of an automatic control system.

The practical result of the work is the creation of a project for an automated heat engineering system with a high energy conversion coefficient (COP), reduced dependence on external energy carriers and the possibility of integration into modern "smart" energy management systems.

Keywords: heat pump, electric drive, automation, frequency converter, energy saving, heating system, asynchronous motor, controlled rectifier, energy efficiency.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
 робототехніки
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
 Рівень вищої освіти Магістр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,
 електроніки та телекомунікацій

“ _____ ” О.В. Шефер
 “ ____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ РИБЦІ Денису Віталійовичу

1. Тема проекту (роботи) «Розроблення автоматизованого електропривода теплового насосу системи опалювання виробничого приміщення»

керівник проекту (роботи) Шефер Олександр Віталійович, д.т.н., професор
 затверджена наказом вищого навчального закладу від “ ____ ” _____ 2025 року № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на насос Wilo TOP SD 80/15 DM. Відбита потужність до 200 кВт. Забезпечити перерегулювання до 10%, час регулювання не більше 0,5 с/

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз джерел низькопотенційної теплоти для теплових насосів. Особливості застосування сонячних батарей в енергозберігаючих технологіях. Розроблення принципової схеми комбінованого використання низькопотенційного тепла ґрунту і сонячної батареї. Розрахунок та вибір обладнання. Розроблення функціональної схеми електроприводу теплового насоса на базі асинхронного двигуна. Розрахунок елементів керованого випрямляча. Вибір плат керування та регулювання. Розроблення принципової схеми кіл керування, контролю та захисту. Розроблення та дослідження структурної схеми ЕП. Оцінка стійкості автоматизованого електроприводу. Висновки.

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

Мета, об'єкт та предмет дослідження. Схема теплонасосної системи збирання тепла ґрунту, з живленням від сонячних батарей. Функціональна схема живлення теплового насоса від сонячних батарей. Вольт-амперні характеристики сонячної станції. Комбінована схема системи теплопостачання (тепловий насос та система електропостачання від сонячної станції). Робочі характеристики регулювання теплового циркуляційного насосу Wilo TOP. Схема електрична принципова інвертора на IGBT-транзисторах. Діаграми напруг та струмів за різних кутів керування. Функціональна схема тиристорного перетворювача. Схема електрична принципова кіл керування та

захисту автономної системи теплопостачання виробничого приміщення. Схема електрична принципова силової частини тиристорного перетворювача. Монтажна схема електричної частини системи теплопостачання виробничого приміщення. Перехідні процеси та частотні характеристики електроприводу. Висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Аналіз джерел низькопотенційної теплоти для теплових насосів. Особливості застосування сонячних батарей в енергозберігаючих технологіях. Постановка завдань на магістерську роботу.	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Розроблення принципової схеми комбінованого використання низькопотенційного тепла ґрунту і сонячної батареї. Розрахунок та вибір обладнання.	21.10.25	I	25%	Пл. 2
3	Розроблення функціональної схеми електроприводу теплового насоса на базі асинхронного двигуна.	04.11.25		40%	Пл. 3
4	Розрахунок елементів керованого випрямляча.	11.11.25		50 %	Пл. 4
5	Вибір плат керування та регулювання.	18.11.25	II	60%	Пл. 5
6	Розроблення принципової схеми кіл керування, контролю та захисту.	25.11.25		70%	Пл. 6-8
7	Розроблення та дослідження структурної схеми ЕП. Оцінка стійкості автоматизованого електроприводу.	09.12.25		90%	Пл. 9-11
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 12-14

Магістрант _____

(підпис)

РИБКА Д. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

ШЕФЕР О. В.

(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	7
1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	9
1.1. Аналітичний огляд теплових насосів	9
1.2. Аналіз можливостей джерел низькопотенційної теплоти для теплових насосів.....	11
1.3. Застосування сонячних батарей в енергозберігаючих екологічно чистих технологіях.....	12
1.4. Висновки за розділом та бґрунтування теми магістерської роботи	15
2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	17
2.1. Розроблення принципової схеми комбінованого використання низькопотенційного тепла ґрунту і сонячної батареї.....	17
2.2. Розрахунок теплового насоса на опалення.....	19
2.3. Розрахунок навантаження і вибір сонячних батарей.....	23
2.3.1. Вибір інвертора – перетворювача.....	29
2.4. Розрахунок і вибір циркуляційного насоса	36
2.5. Розроблення функціональної схеми електроприводу теплового насоса на базі асинхронного двигуна	40
2.5.1 Вибір системи ЕП та розробка функціональної схеми ЕП з ТПЧ для теплового насоса.....	49
2.5.2 Розробка принципів схем силової частини ЕП з ТПЧ та розрахунок її елементів	53
2.6. Розрахунок елементів керованого випрямляча	57
2.6.1. Розрахунок реакторів	60
2.6.2. Розрахунок силового фільтра.....	61
2.7. Розрахунок автономного інвертора напруги (АІН)	65
2.7.1 Розрахунок кіл підзаряду.....	71
2.7.2 Вибір плат керування КВ та АІН, а також плати регулювання.....	75
2.8. Висновки за розділом.....	79
3 ДОСЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	80
3.1 Розроблення принципової схеми кіл керування, контролю та захисту.....	80
3.2 Розроблення та дослідження структурної схеми ЕП.....	85
3.3 Оцінка стійкості автоматизованого електроприводу.....	90
3.4 Висновки за розділом.....	92
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	96
ДОДАТКИ.....	98

Вступ

У сучасних умовах зростання вартості енергоресурсів, руйнівних впливів під час військових дій та посилення екологічних вимог, особливої актуальності набуває підвищення енергоефективності систем теплопостачання виробничих комплексів.

Багато промислових підприємств мають значні витрати на опалення технологічних та адміністративних приміщень, що потребує впровадження сучасних інтелектуальних систем автоматичного керування та використання високопродуктивних відновлюваних джерел тепла. Одним з найбільш перспективних технічних рішень у цій сфері є впровадження теплових насосів, які дають змогу ефективно перетворювати енергію навколишнього середовища на корисне тепло з мінімальними втратами.

Теплові насоси мають значну перевагу перед традиційними системами опалення завдяки високому коефіцієнту перетворення енергії, можливості роботи у двонаправленому режимі (нагрів–охолодження), а також адаптивності до різних кліматичних умов. Однак для промислових об'єктів із нестабільними тепловими навантаженнями стандартні системи керування, як правило, не забезпечують оптимальної роботи насосів.

Постає завдання розроблення сучасного автоматизованого електропривода компресора теплового насоса, що забезпечить інтелектуальне регулювання параметрів його роботи та мінімізацію енергоспоживання при збереженні комфортних мікрокліматичних умов у виробничому середовищі.

Розробка електропривода з можливістю плавного регулювання швидкості обертання компресора теплового насоса дає змогу реалізувати адаптивне керування на основі прогнозованих змін температурного режиму, графіка роботи підприємства, сезонних коливань та швидкості тепловтрат. Упровадження таких систем дозволяє не лише знизити витрати електроенергії на 25–40 %, але й продовжити термін служби обладнання, забезпечити

стабільне керування тепловими потоками та можливість інтеграції до інтелектуальних SCADA-систем.

Таким чином, розроблення автоматизованого електропривода теплового насоса системи опалювання виробничого приміщення є актуальною науково-прикладною задачею, спрямованою на підвищення енергоефективності, економічності та надійності систем тепlopостачання сучасних промислових підприємств.

Метою магістерської роботи є розроблення автоматизованого електропривода теплового насоса системи опалювання виробничого приміщення з адаптивним інтелектуальним регулюванням режимів роботи на основі принципів енергоефективності та прогнозного керування.

Об'єкт дослідження – система опалювання виробничого приміщення на базі теплового насоса.

Предмет дослідження – автоматизований електропривод компресора теплового насоса з сучасною системою керування.

Отримані результати можуть бути використані для модернізації існуючих систем тепlopостачання промислових підприємств, створення нових інтегрованих енергозберігаючих рішень, а також для впровадження концепцій «розумного підприємства» та «зеленої енергетики».

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналітичний огляд теплових насосів

Тарифи, що діють у даний час, на теплову енергію, у поєднанні з витратами на підключення до міських теплових мереж, примушують переходити до альтернативних способів теплопостачання. Теплонасосні системи теплопостачання є одним з найбільш ефективних альтернативних засобів вирішення проблеми. З термодинамічної точки зору схеми теплопостачання на базі теплових насосів у більшості випадків є навіть ефективнішими, ніж від ТЕЦ і індивідуальних котельних. Теплові насоси (ТН) знайшли широке застосування для теплопостачання житлових і адміністративних будівель в США, Канаді і інших країнах зі схожими з Україною кліматичними умовами.

За прогнозом Світового енергетичного комітету до 2030 р. у передових країнах частка опалення і гарячого водопостачання за допомогою теплових насосів складе 75% [1].

Теплові насоси - це компактні, економічно і екологічно чисті системи опалення, що дозволяють отримувати тепло для гарячого водопостачання і опалення приміщень за рахунок використання тепла низькопотенційного джерела, шляхом перенесення його до теплоносія з вищою температурою, а також джерело холоду для систем кондиціонування. Витративши 1 кВт електричної енергії, можна отримати 3-5кВт теплової та 12-25кВт при охолодженні, а це 60-70% потреб теплопостачання отриманих практично безкоштовно.

Принцип роботи теплового насоса витікає з робіт Карно [2]. Термодинамічний цикл Карно є фундаментальною основою для оцінки ефективності теплового насоса. Тепловий насос можна розглядати як обернену теплову машину. Теплова машина отримує тепло (рис. 1) від високотемпературного джерела і скидає його при низькій температурі,

віддаючи корисну роботу. Тепловий насос вимагає витрати роботи для отримання тепла при низькій температурі і віддачі його при більш високій.

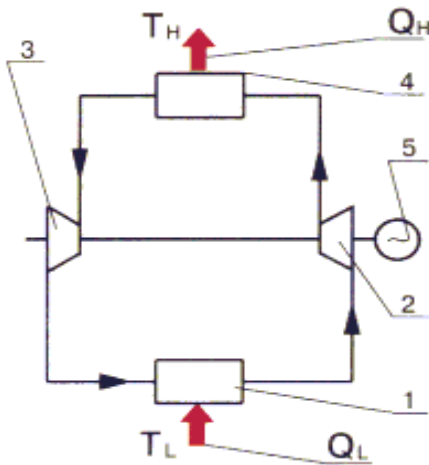


Рисунок 1.1 – Принципова схема теплового насоса: 1 - випарник; 2 - компресор; 3 - конденсатор; 4 - розширювальна машина (детандер); 5 - електропривод

Сутність роботи теплового насоса (рис.1) полягає в наступному. У випарнику теплового насоса тепло невисокого температурного потенціалу відбирається від якогось джерела низко-потенційного тепла і передається низько-киплячому робочому тілу теплового насоса (фреону). Отримана пара стискується компресором. При цьому температура пари підвищується, і тепло на потрібному температурному рівні в конденсаторі передається в систему опалення і гарячого водопостачання. Для того, щоб замкнути цикл, що здійснюється робочим тілом, після конденсатора фреон дроселює до початкового тиску, охолоджуючись до температури нижче за джерело низкопотенційного тепла, і знову подається у випарник [2].

Тепловий насос може забирати тепло з різних джерел, наприклад, повітря, води або землі. І так само він може скидати тепло в повітря, воду або землю. Середовище, що сприймає тепло, називається теплоприймачем. Залежно від типу джерела і приймача тепла випарник і конденсатор можуть виконуватися як теплообмінники типу "повітря-рідина", так і "рідина-рідина".

Таким чином при використанні ТН електроенергія споживається для перенесення теплоти від джерела низкопотенційного з порівняно низькою температурою в теплоту мережі теплопостачання з підвищеною температурою,

завдяки чому досягається економія первинного енергоресурсу. По суті, електроенергія, що витрачається в тепловому насосі, заміщує високоякісне паливо: вугілля, природний газ і рідке паливо.

1.2. Аналіз можливостей джерел низькопотенційної теплоти для теплових насосів

Ґрунт поверхневих шарів Землі фактично є тепловим акумулятором необмеженої ємності, тепловий режим якого формується під впливом сонячної радіації і потоку радіогенного тепла, що надходить із земних надр. Падаюча на земну поверхню сонячна радіація і сезонні зміни її інтенсивності впливають на температурний режим шарів ґрунту, що залягають на глибинах 10-20 метрів.

Температурний режим шарів ґрунту, розташованих нижче глибин проникнення тепла сонячної радіації, формується тільки під впливом теплової енергії, що надходить з надр Землі, і практично не залежить від сезонних, а тим більше добових змін зовнішнього середовища.

Ґрунт поверхневих шарів Землі, у зв'язку з його повсюдною доступністю і достатньо високим температурним потенціалом, є найбільш перспективним джерелом теплової енергії низького потенціалу для випарників теплового насоса.

При улаштуванні в ґрунті вертикальних або горизонтальних реєстрів труб (систем збирання низькопотенційного тепла ґрунту) з циркулюючим по них теплоносієм, що має знижену (підвищену) щодо навколишнього ґрунтового масиву температуру, відбувається відбір (скидання) теплової енергії (холоду) від ґрунту і їх відведення споживачеві.

Тепловий насос може бути встановлений поряд з водяним накопичувачем тепла в підвалі (Рис. 1.2).

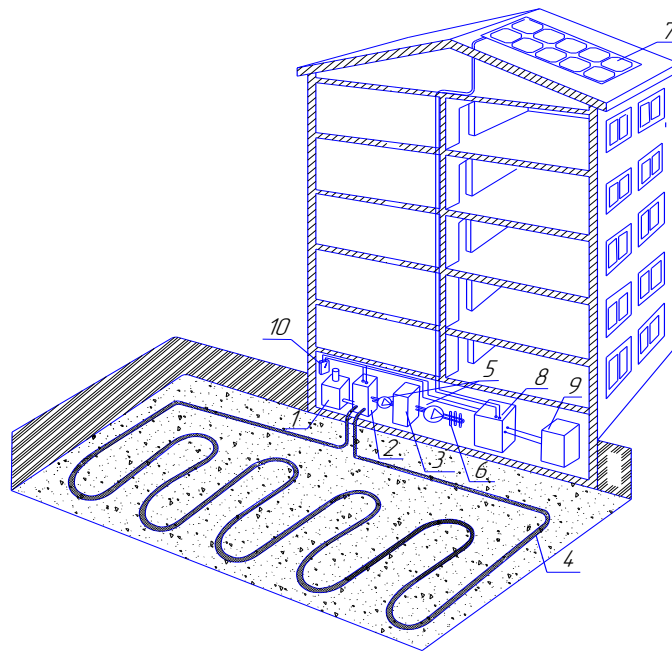


Рисунок 2.1 - Теплонасосна система збирання тепла ґрунту, з живленням від сонячних батарей: 1 - бойлер; 2 - бак акумулятор; 3 - тепловий насос; 4 – система збору тепла ґрунту; 5 – циркуляційні насоси; 6 – нагрівальні прилади системи; 7 – сонячна батарея; 8 - контролер заряду акумуляторних батарей з інвертором; 9 - акумуляторні батареї; 10 – щитова

У даному проєкті використана горизонтальна система збирання низькопотенційного тепла ґрунту, оскільки це укладання труб вимагає найменших затрат на монтаж, ніж при вертикальній конфігурації.

1.3. Застосування сонячних батарей в енергозберігаючих екологічно чистих технологіях

На сьогоднішній день індустрія, яка пов'язана з виробництвом сонячних батарей, переживає неабиякий бум. Достатньо сказати, що у 2024 році в світі було виготовлено сонячних елементів загальної потужністю більше 150 МВт, що в перерахунку на кремнієві елементи розміром $100 \times 100 \text{ мм}^2$ та потужності 1,5 Вт означає виробництво в 100 млн. штук сонячних елементів. На відміну від інших приладів мікроелектроніки, виробництво сонячних елементів у світі не

тільки не скорочується, а характеризується щорічним 15% приростом протягом останніх 6 років.

При відповідному виборі опору навантаження енергія, що виробляється сонячним елементом, може досягати 80% від добутку $U_{xx}I_{кз}$. А також на рис. 1.3 показані значення U_M та I_M – значення струму та напруги, для яких реалізується максимальна вихідна потужність $P_M=U_M I_M$. Коефіцієнт корисної дії ККД сонячного елемента визначається як відношення максимальної вихідної потужності P_M до потужності падаючого сонячного світла P_0 :

$$\text{ККД} = P_M / P_0. \quad (1.1)$$

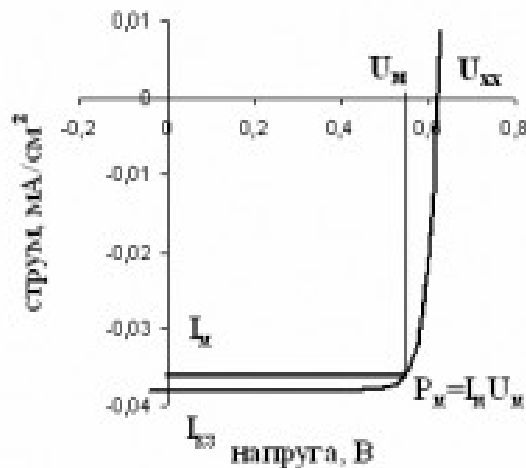


Рисунок 1.3 - Вольт-амперна характеристика сонячного елемента з р-п переходом

Метод прямого перетворення сонячного випромінювання в електрику є, по-перше, найбільш зручним для споживача, оскільки отримується найбільш вживаний вид енергії, і, по-друге, такий метод вважається екологічно чистим засобом одержання електроенергії на відміну від інших, які використовують органічне паливо, ядерну сировину чи гідроресурси.

Усі фотоелектричні системи можна розділити на два типи: автономні і сполучені з електричною мережею. Станції другого типу віддають надлишки

енергії в мережу, яка служить резервом в разі виникнення внутрішнього дефіциту енергії.

Автономна система в загальному випадку складається з набору сонячних модулів, розміщених на опорній конструкції або на даху, акумуляторної батареї, регулятора-перетворювача (контролер), потрібного для автоматичного керування процесами зарядки-розрядки акумуляторів, перемикачів навантаження сонячна батарея - акумулятор та для узгодження вихідної напруги батареї з номіналом апаратури, а також додається автоматичне включення резерву живлення (АВР). Якщо споживачеві необхідно мати змінну напругу, то до цього комплекту додається інвертор-перетворювач постійної напруги в змінну [3].

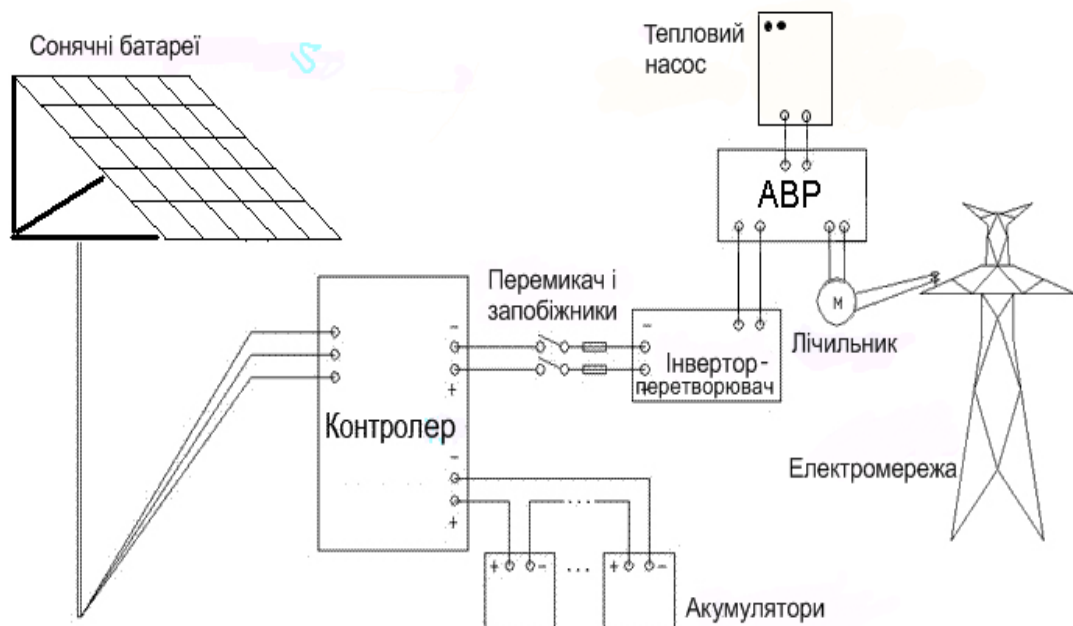


Рисунок 1.4 – Функціональна схема живлення теплового насоса від сонячних батарей

Вдень сонячні батареї живлять як електричні прилади, так і заряджають акумулятори. Вночі та в умовах недостатнього рівня освітлення джерелом живлення є виключно акумулятори або мережа (рис.1.4).

Оцінки показують, що навіть в умовах середніх широт вистачить батареї з потужністю в 2 – 3 кВт, яка може бути легко розміщена на даху, оскільки займає площу всього 20 – 30 м². Відомо, що в Україні середньорічні суми прямої та розсіяної сонячної радіації на горизонтальну поверхню змінюються від 1080 кВт·год/м² в районі Полтави. Тоді залежно від зони, така батарея вироблятиме за рік 2200-2800 кВт електроенергії.

Середньорічний коефіцієнт перетворення тепла в таких системах складає від 3 до 4, що підтверджує доцільність їх застосування як для гарячого водопостачання, так і для опалення.

Тепловий насос споживає енергію на реалізацію термодинамічного циклу (привід компресора). Коефіцієнт перетворення теплового насоса - відношення теплопродуктивності до електроспоживання - залежить від рівня температур у випарнику і конденсаторі і коливається в різних системах в діапазоні від 2,5 до 5, тобто на 1 кВт витраченій електричній енергії тепловий насос проводить від 2,5 до 5 кВт теплової енергії. Температурний рівень теплопостачання від теплових насосів 35-55 °С. Економія енергетичних ресурсів досягає 70%.

Тому використання теплового насоса для системи опалення є актуальною задачею на сьогоднішній день.

1.4.Висновки за розділом та обґрунтування теми магістерської роботи

Для розроблення системи автоматизованого електроприводу теплонасосної установки системи опалювання виробничого приміщення необхідно виконати наступне:

- розробити принципову схему комбінованого використання низкопотенційного тепла ґрунту і сонячної батареї;
- розрахувати тепловий насос на опалення;
- розрахувати навантаження і вибрати сонячні батареї;
- вибрати інвертор – перетворювача;

- розрахувати і вибрати циркуляційний насос;
- розробити функціональну схему електроприводу (ЕП) теплового насоса на базі АД з короткозамкненим ротором;
- вибрати систему ЕП та розробити функціональну схему ЕП з ТПЧ для теплового насоса;
- розробити принципову схему силової частини ЕП з ТПЧ та розрахувати її елементи;
- розрахувати елементи керованого випрямляча;
- розрахувати реактори;
- розрахувати силовий фільтр;
- розрахувати інвертор напруги (АІН);
- розрахувати ланцюги підзаряду;
- вибрати плати керування КВ та АІН, та плату регулювання;
- розробити принципову схему ланцюгів керування, контролю та захисту (ККЗ);
- розробити структурну схему ЕП;
- оцінити стійкість даної системи.

2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1. Розроблення принципової схеми комбінованого використання низькопотенційного тепла ґрунту і сонячної батареї

Тепловий насос виділяється серед інших енергозберігаючих технологій своєю екологічною чистотою, що в даний час є також не мало важливим, а також новими можливостями в області підвищення ступеня автономності систем теплопостачання.

Цей проект розширює ресурсну базу теплопостачання, робить її незалежною від постачань паливних ресурсів, що важливе в умовах дефіциту і зростаючої вартості органічного палива і електроенергії.

Ґрунтові теплообмінники систем збору низькопотенційної теплової енергії ґрунту, або систем теплосбирання, можуть укладатися в землі горизонтально, в траншеї, і вертикально, в бурові свердловини. Оскільки їх функціональні характеристики однакові, то розрізняються вони тільки за вартістю монтажу і зайнятої території.

При горизонтальній системі труби ґрунтового теплообмінника укладають в земляні траншеї завглибшки 1,5-2 м на відстані не менше 1 метра, сполучаючи гілки, послідовно або паралельно.

Принципова схема системи, що використовує комбінацію теплоти ґрунту і сонячних батарей представлена на рис. 2.1.

Існують безліч конфігурацій вертикального укладання теплообмінника, але тут велика частка витрат доводиться на бурові роботи. Тому ліпший горизонтальний спосіб, він являє собою поліетиленові труби діаметром 40 мм з добавками теплопровідного пластифікатора, горизонтально вкладену під шаром ґрунту на глибину 1-1,5 м. Головна перевага – універсальність та простота монтажу. Є багато схем укладання труби: петля, змійка, зигзаг, плоскі та гвинтові спіралі різних форм, так званий спосіб "Slinky" [5].

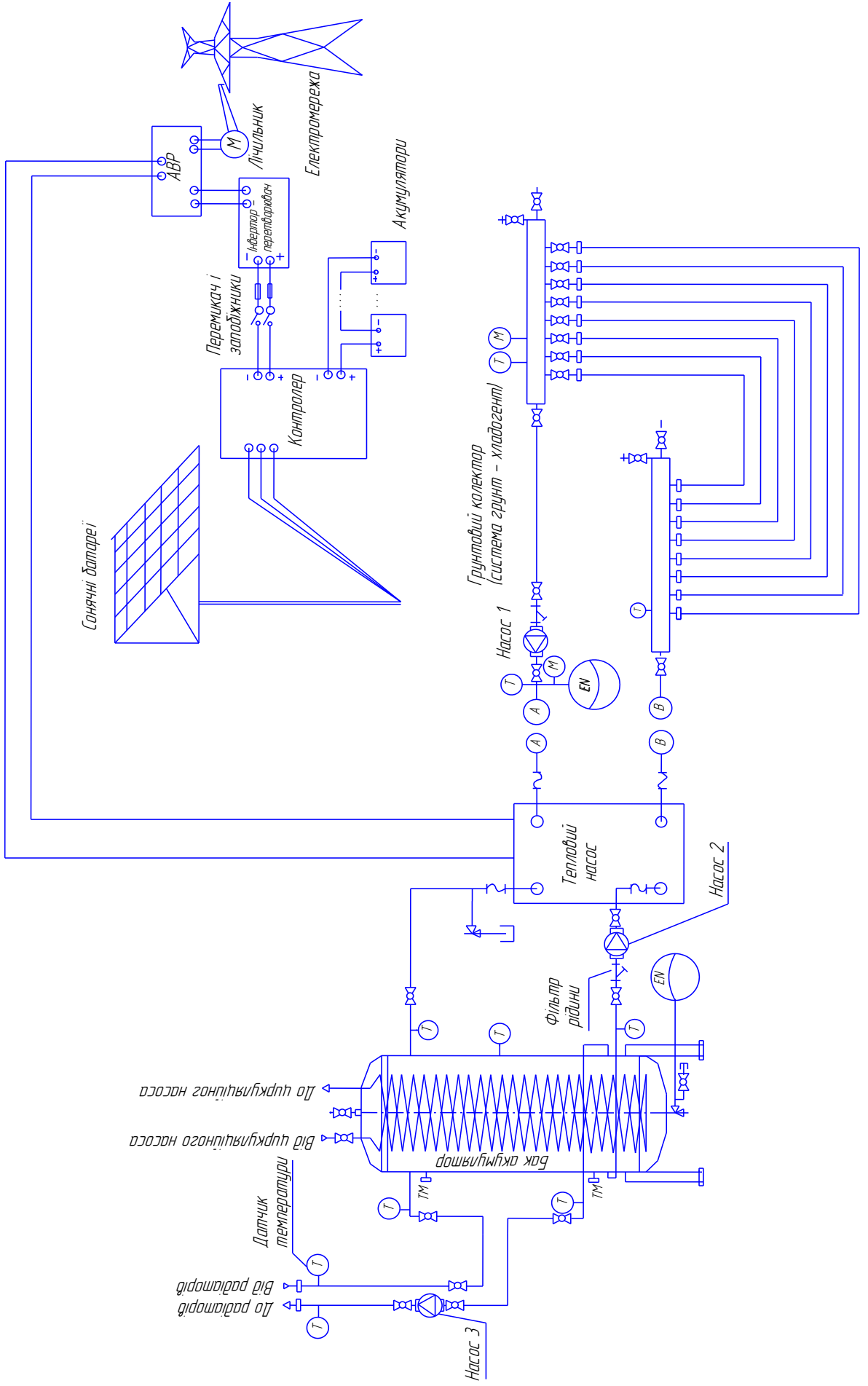


Рисунок 2.1 - Принципова схема системи, що використовує комбінацію теплоти ґрунту і енергію сонячних батарей

Довжину труби в одній петлі, причому суцільній, без з'єднань, прагнуть обмежити (не більше 600 м), в іншому випадку зросте витрата електричної енергії на циркуляційний насос ґрунтового контуру. Якщо потрібна більша потужність ґрунтового колектора, то петель роблять декілька. Вибір способу визначається теплопровідністю ґрунту та геометрією ділянки.

Теплообмінники в землі можуть працювати при температурах від -10 до +45°C. При негативних температурах необхідно використовувати незамерзаючий теплоносій.

Як незамерзаючий теплоносій можуть бути використані водні розчини хлористого кальцію, метанолу і етилгліколя. Кожна з цих рідин не вступає в реакцію з пластмасою.

Найдешевший - хлористий кальцій. Він також має якнайкращі теплообмінні характеристики, проте з ним можуть виникнути проблеми, якщо з системи не повністю відкачаний кисень. У цьому випадку може виникнути корозія металевих часток в петлях теплообмінника, якщо вони виконані, наприклад, з жовтої латуні.

Метанол проявляє себе дуже добре при мінімальних температурах, але схильний до спалаху, якщо не розбавлений водою.

Етилгліколь володіє хорошими теплообмінними властивостями і не викликає корозії, але він токсичний.

У нашій системі використаний теплоносій первинного контура хладагент R407C. Потенціал руйнування озонового шару цього хладагента близький до нуля і він не взаємодіє з металом.

2.2. Розрахунок теплового насоса на опалення

Знайдемо розрахункові витрати теплоти на опалення:

$$Q_{on} = q_o \cdot V \cdot \Delta t, \quad (2.1)$$

де q_o - питома опалювальна характеристика для вищого учбового закладу, $q_o=0,32$ ккал/м³·год·°C [6];

V - об'єм навчального корпусу "Ф", $V=29000$ м³;

Δt - різниця температури повітря між нормою (18 °C), повітря в будівлі, і найбільш холодною (- 23 °C):

$$\Delta t = 18 + 23 = 41 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2.2)$$

$$Q_{on} = 0,32 \cdot 29000 \cdot 41 = 380480 \text{ Ккал/год} = 442,39 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

До встановлення приймаємо тепловий насос австрійської компанії OCHSNER марки Industrie ISWS490ER2 [5].

Його теплова потужність при показниках теплового джерела на вході 0 °C і температури води на виході +60 °C: S0/W60.

Теплова потужність	(кВт):	473,4
Електроспоживання	(кВт):	189,4
COP (ККД, коефіцієнт перетворення тепла):		2,5
Робочий струм	(А):	312

Ця серія розроблена спеціально для великих будівель з необхідним тепловим навантаженням більше 100 кВт. Потужні теплові насоси фірми OCHSNER у даний час використовуються для опалення житлових будинків, комерційних приміщень, готелів, офісних будівель і розважальних об'єктів.

Досягненню високих поточних показників сприяє нова технологія OVI - OCHSNER Vapour Injection («Розширене уприскування пари»), що забезпечує ефективну роботу в режимі обігріву при низькій температурі навколишнього середовища.

Переваги технології OVI:

- Збільшення теплової потужності / потужності охолодження;
- Серійне застосування у потужних теплових насосах;
- Максимальна температура нагріву до 65°C.

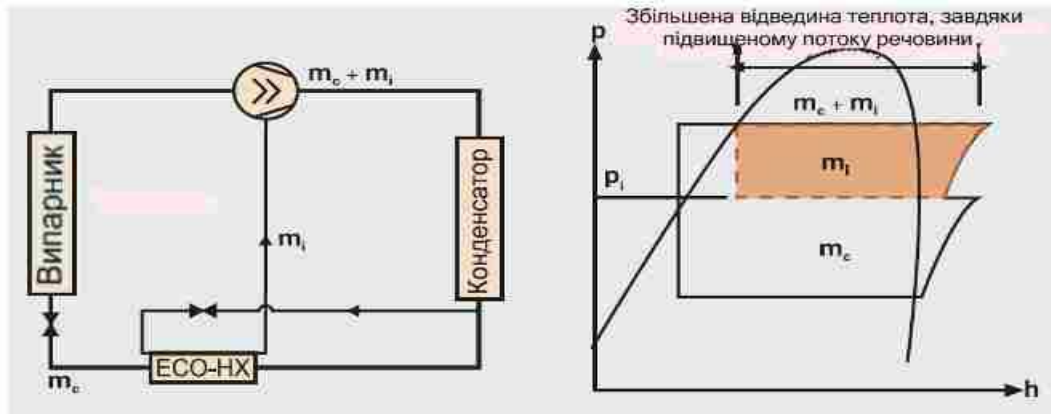


Рисунок 2.2 – OVI - Підкатегорії циклів охолодження з частковим уприскуванням пари

OVi - Виконання гвинтових компресорів:

- Унікальний еко-канал інтегрований в золотниковий клапан;
- Підвищена холодинна потужність і коефіцієнт COP завдяки додатковому холодинному колу (двоступінчатому холодинному розширенню);
- Підвищена нагрівальна потужність завдяки підвищеному потоку речовини;
- Охолодження за допомогою вдуву пари рідини.

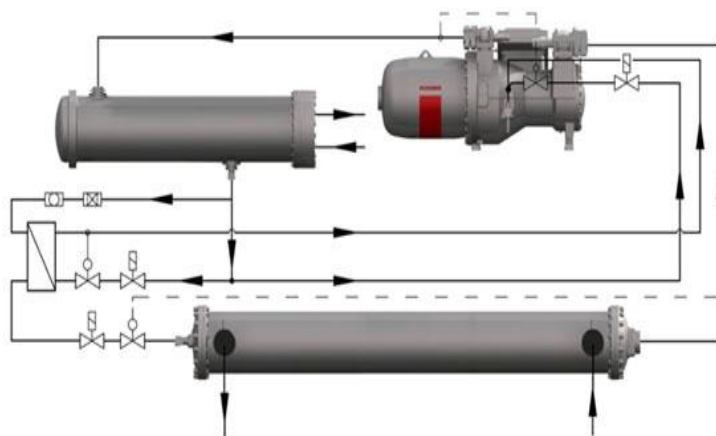


Рисунок 2.3 - OVi - Виконання гвинтових компресорів

Вирішальний вплив на ефективність роботи теплового насоса полягає у виборі оптимального компресора.

Для роботи використовується Scroll-компресор до 1 МВт - гвинтовий компресор. Базова серія забезпечується герметичним компактним гвинтовими компресорами найвищої ефективності і надійності.

Переваги гвинтового компресора:

- Максимальна теплопродуктивність, холодопродуктивність;
- Діапазон регулювання швидкістю 1650-2850 об/хв;
- Максимальна температура нагріву 65°C, хладагент R407C;
- Висока експлуатаційна надійність завдяки ефективному примусовому мастилу з 3-х смуговим, інтегрованим сепаратором;
- Механічне розвантаження запуску вирівнюванням тиску при кожному включенні компресора;
- Період безремонтного пробігу для гвинтових компресорів на порядок довше, ніж для стандартних поршневих компресорів.

Даний компресор приводиться в дію асинхронним двигуном серії 4A315S2Y3:

Потужність, кВт	160
Напруга живлення, В	380
Номінальне ковзання, %	1,9
Номінальний ККД, %	92
Номінальний коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	0,9
Синхронна швидкість обертання ОМП, об/хв	3000

Регулювання і система управління промисловим тепловим насосом здійснює:

- 16-бітовий мікропроцесор і 2 Мб флэш-пам'ять;
- Контроль і програмування опалювання зовнішнім датчиком;
- Постійно задане значення управління після регульованого конденсатора
- температура входу або температура буфера;
- Панель управління з LCD-дисплеєм 120x32 пікселі з 6 клавішами;

- Контролер обміну інформацією, з нескладною інтеграцією в системи управління будівлею.

Для живлення теплового насосу використані сонячні батареї.

2.3. Розрахунок навантаження і вибір сонячних батарей

При розрахунку фотоелектричних систем визначено номінальну потужність модулів, їх кількість, схеми з'єднання; вибір типу, умов експлуатації і ємності АКБ (акумуляторної батареї); потужностей інвертора і контролера заряду-розряду.

Потужність теплового насоса Industrie ISWS490ER2, що підключається до сонячних батарей становить 189,4 кВт.

На цьому етапі визначення ємності АКБ. Ємність АКБ вибирається із стандартного ряду ємностей з округленням у бік, більшого розрахунку.

Розрахункову ємність отримано за формулою:

$$W=P/(V \cdot \mu), \quad (2.4)$$

де P – потужність електроспоживання теплового насосу;

V – потужність АКБ;

μ – допустима глибина розряду АКБ.

Якщо потужність електроспоживання нашого теплового насоса Industrie ISWS490ER2 складає 189,4 кВт·год за добу, а допустима глибина розряду АКБ (12В) - 50 %, то розрахункова ємність складе:

$$W=189400 / (12 \cdot 0,5) = 31567 \text{ А}\cdot\text{год.}$$

При розрахунку ємності АКБ в автономному режимі необхідно брати до уваги і наявність у природі похмурих днів при яких акумулятори не встигнуть відновити свою енергію і повністю не забезпечать роботу споживача, тоді наша система за допомогою АВР переходить на живлення від електромережі.

Для сонячних батарей розроблені спеціальні, "сонячні" акумулятори. Термін їх експлуатації складає близько 20 років. Ці акумулятори дуже часто працюють за тим самим принципом, що і звичайні автомобільні батареї стартерів, проте вони спроектовані спеціально для використання в системах автономного електропостачання. Сонячні батареї мають знижене газовиділення, допускають багато циклів зарядки - розрядки, до 60% від номінальної ємності без пошкодження і значного скорочення терміну служби. Такі акумулятори випускаються як окремі банки напругою 2 В ємністю від 150 А/год і вище.

Тому вибрані китайські свинцево-кислотні акумулятори Ventura, що не потребують обслуговування.

Таблиця 2.1 - Характеристики свинцево-кислотних акумуляторів Ventura

Тип акумулятора	Термін служби (років)	Ємність (А/год)	Напруга (В)	Довжина (мм)	Ширина (мм)	Висота (мм)	Вага (кг)
MSJ 1000	20	1000	2	471	171	365	70

Визначення сумарної потужності і кількості сонячних модулів.

Модулі сонячної батареї наземного застосування як правило з'єднуються із 36 сонячних елементів, а далі збираються в модуль. Отриманий пакет обрамовують в алюмінієву раму, що полегшує кріплення до несучої (опорної) конструкції. Потужність модулів сонячної батареї може досягати 10-300Вт.

Кількість отриманої електричної енергії від сонячного елемента визначається як умовами освітлення, так і характеристиками сонячного елемента.

При роботі сонячного елемента без навантаження напруга фото ЕРС на ній складе близько 0,6 В. При підключенні навантаження, а потім при зменшенні її опору, струм в навантаженні розпочне збільшуватися. Напруга на

навантаженні при цьому розпочне знижуватися. Напруга приблизно 0,45 вольт на навантаженні є оптимальним режимом роботи сонячного елемента. При спробах збільшити відбір струму, напруга на сонячному елементі падає, а струм, який він генерує, продовжує залишатися практично незмінним. Це говорить про те, що сонячна батарея є майже ідеальним джерелом струму для зарядки акумуляторів.

З метою отримання необхідної потужності і робочої напруги модулі сполучають послідовно або паралельно. Так отримують сонячну батарею. Потужність сонячної батареї завжди нижча, ніж сума потужностей модулів - із-за втрат, обумовлених відмінністю у характеристиках однотипних модулів (втрат на розузгодження). Чим ретельніше підібрані модулі батареї (тобто, чим менше відмінність в характеристиках модулів), тим нижче втрати на розузгодження. Наприклад, при послідовному з'єднанні десяти модулів з розкидом характеристик 10% втрат складають приблизно 6%, а при розкиді 5% - знижуються до 2%.

У випадку затінювання одного модуля, або частки елементів в модулі, у сонячній батареї при послідовному з'єднанні з'являється "ефект гарячої плями" - затінений модуль (або елемент) починає розсіювати всю вироблювану освітленими модулями (або елементами) потужність, нестримно нагрівається і перестає працювати. Для усунення цього ефекту паралельно з кожним модулем (або його часткою) встановлюють шунтуючий діод. Діод потрібний при послідовному з'єднанні більше двох модулів. До кожної лінії (послідовно сполучених модулів) також підключається блокуючий діод для вирівнювання напруги ліній. Всі ці діоди як правило розміщуються в сполучній коробці самого модуля. Схема батареї приведена на рис. 2.4.

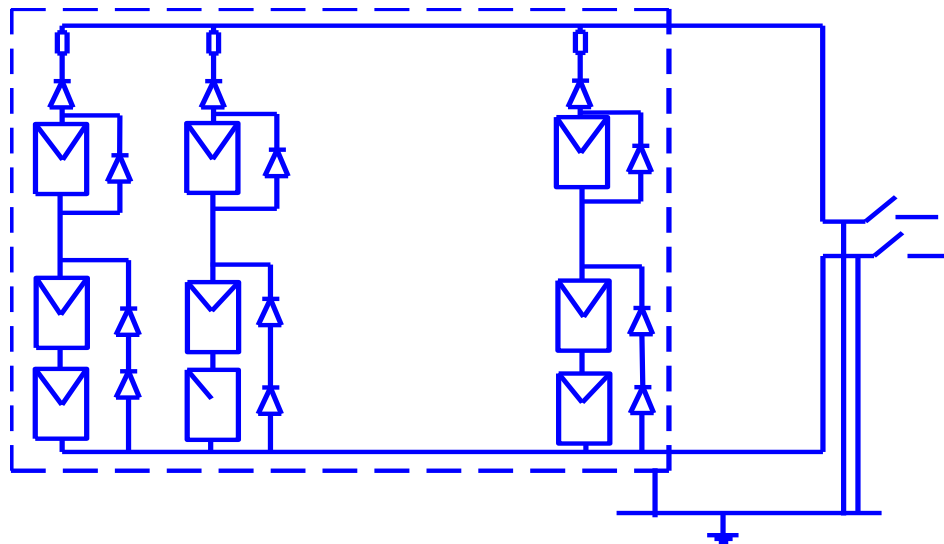


Рисунок 2.4 – Схема підключення діодів в сонячній батареї

Електричні параметри таких модулів показані на вольтамперній характеристиці (рис.2.5), визначеній за стандартних умов (тобто коли потужність сонячної радіації дорівнює 1000 Вт/м^2 , температура елементів - 25°C і сонячний спектр - на широті 45°). Точка перетину кривої з віссю напруги називається напругою холостого ходу $U_{\text{х.х.}}$, а з віссю струму - струмом короткого замикання $I_{\text{к.з.}}$. На цьому ж графіку приведена крива потужності, що отримується від сонячних елементів залежно від навантаження. Номінальна потужність модуля визначається як найбільша потужність за стандартних умов. Значення напруги, відповідне максимальній потужності називається робочою напругою U_p , а відповідний струм - робочим струмом I_p . Значення робочої напруги для модуля, що складається з 36 елементів приблизно дорівнює 16-17В (0,45-0,47В на елемент) при 25°C .

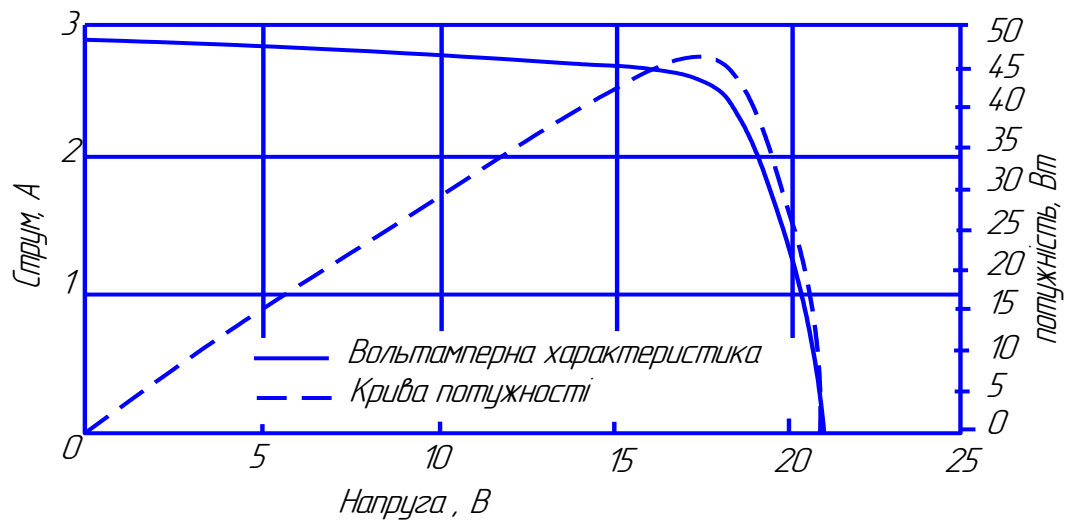


Рисунок 2.5 – Вольт-амперна характеристика сонячної батареї

Такий запас по напрузі потрібний для того, щоб компенсувати зменшення робочої напруги при розігріванні модуля сонячним випромінюванням. Напруга холостого ходу сонячного модуля мало змінюється при зміні освітленості, тоді як струм короткого замикання прямо пропорційний. ККД сонячного модуля визначається як відношення максимальної потужності модуля до спільної потужності випромінювання, падаючої на його поверхню за стандартних умов, і складає 15-40%.

Робоча точка батареї, підключеної до навантаження, не завжди збігається з точкою максимальної потужності (положення останньої залежить від умов освітленості і температури навколишнього середовища). Підключення таких навантажень, як, наприклад, електродвигун, може зрушити робочу точку системи в ділянку мінімальної або навіть нульової потужності (і двигун просто не запуститься). Внаслідок цього наступний важливий компонент сонячної батареї - перетворювач напруги, здатний узгоджувати сонячну батарею з навантаженням.

При коефіцієнті корисної дії 15% в умовах стандартизованого освітлення потужністю 1000 Вт/м^2 , сонячний спектр якого відповідає атмосферній масі 1,5 (положення Сонця під кутом 45°), такий елемент може подати на зовнішнє

навантаження напругу 0,49В ($U_{xx}=0,6В$) та струм 3А ($I_{кз}=3,3А$), тобто виділити 1,45 Вт потужності.

Елемент потужністю $P_w = 1,45$ Вт в перебігу вибраного періоду виробить наступну кількість енергії :

$$W = k P_w E / 1000, \quad (2.5)$$

де E - значення інсоляції за вибраний період для нашої території, складає 16 кВт.год./м²;

Коефіцієнт k рівний 0,5 влітку і 0,7 в зимовий період, $k=0,6$.

k робить поправку на втрату потужності сонячних елементів при нагріві на сонці, а також враховує похиле падіння променів на поверхню модулів в перебігу дня. Значення сонячної інсоляції при розрахунку потужності сонячних батарей для Європи за рік потрібно брати в межах 1,2 мВт.год./м², а якщо по місяцях, то найменша в грудні-16 кВт.год./м², а найбільша в червні місяці – 172 кВт.год./м².

$$W = 0,6 \cdot 1,45 \cdot 16000 / 1000 = 14 \text{ Вт.год./м}^2.$$

Знаходимо скільки нам потрібно елементів для живлення нашого насоса:

$$N = P / W, \quad (2.6)$$

де P – електроспоживання теплового насоса, $P=189400$ Вт;

$$N = 189400 / 14 = 13530 \text{ елементів.}$$

Тобто якщо на один модуль іде $k=36$ елементів, тоді:

$$M = N / k, \quad (2.7)$$

$$M = 13530 / 36 = 376 \text{ модулів.}$$

Знаючи, що наш елемент розміром $100 \times 100 \text{ мм}^2$, знаходимо яку площу будуть займати наші сонячні батареї:

$$S = 13530 \cdot 0,01 = 135,3 \text{ м}^2 \quad (2.8)$$

2.3.1. Вибір інвертора – перетворювача

На цьому етапі вибираємо потужність інвертора, яка має бути не менше, ніж в 1,25 рази більше розрахункової. Слід мати на увазі, що компресорний холодильник у момент запуску споживає потужність в 7 разів більше паспортної. Номінальний ряд інверторів 150, 300, 500, 800, 1500, 2500, 5000 Вт. Для потужних станцій (більш 1кВт) напруга станції вибирається не менше 48 В, оскільки на великих потужностях інвертори краще працюють з вищої початкової напруги.

Сонячний генератор може виробляти лише постійний струм. Багато споживачів використовують саме постійний струм (зарядка акумуляторів, освітлення, і так далі), але споживачів змінної напруги більше. Для перетворення постійного струму акумуляторної батареї в змінний синусоїдальної форми, використаний інвертор.

Інвертор (перетворювач частоти) - це пристрій, за допомогою якого постійний або змінний струм перетворюється в змінний заданої частоти. Під потужними інверторами розуміються перетворювальні пристрої, здатні тривалий час забезпечувати високий рівень вихідної напруги, який може досягати десятків кіловольт, а також велику потужність - до десятків мегават. У конструкції більшості сучасних потужних інверторів передбачена можливість плавної або ступінчастої зміни частоти вихідної напруги, що робить їх практично незамінними як джерела живлення різних електроустановок, що передбачають регулювання режимів роботи шляхом зміни частотних характеристик живлення. Потужні перетворювачі частоти мають досить широке застосування. Їх можна повсюдно зустріти на електротранспорті, де

вони застосовуються для живлення асинхронних електродвигунів, верстатобудуванні і багатьох інших галузях промисловості.

Потужні інвертори можуть бути побудовані як на основі ключо тиристорів, так і на IGBT-транзисторах. Сучасні потужні перетворювачі на IGBT-транзисторах здатні працювати при напрузі понад 1000 В і забезпечувати вихідну потужність більше 5 кВт. Вони застосовуються для управління асинхронними електродвигунами, в зварювальних апаратах і джерелах безперебійного живлення великої потужності. Нижче, як приклад приведена схема потужного інвертора на IGBT-транзисторах, який широко застосовується на електротранспорті і в інших галузях.

На вхід трансформатора Trafo1 подається живляча напруга контактної мережі, яка за допомогою діодного моста Bridge1 випрямляється, згладжується конденсаторами C1 і C2, а потім подається на вхід інвертора, побудованого на базі IGBT- транзисторів VT1, VT2 і VT3. Результуюча трифазна напруга необхідної частоти знімається з вторинних обмоток трансформаторів Tr1, Tr2 і Tr3.

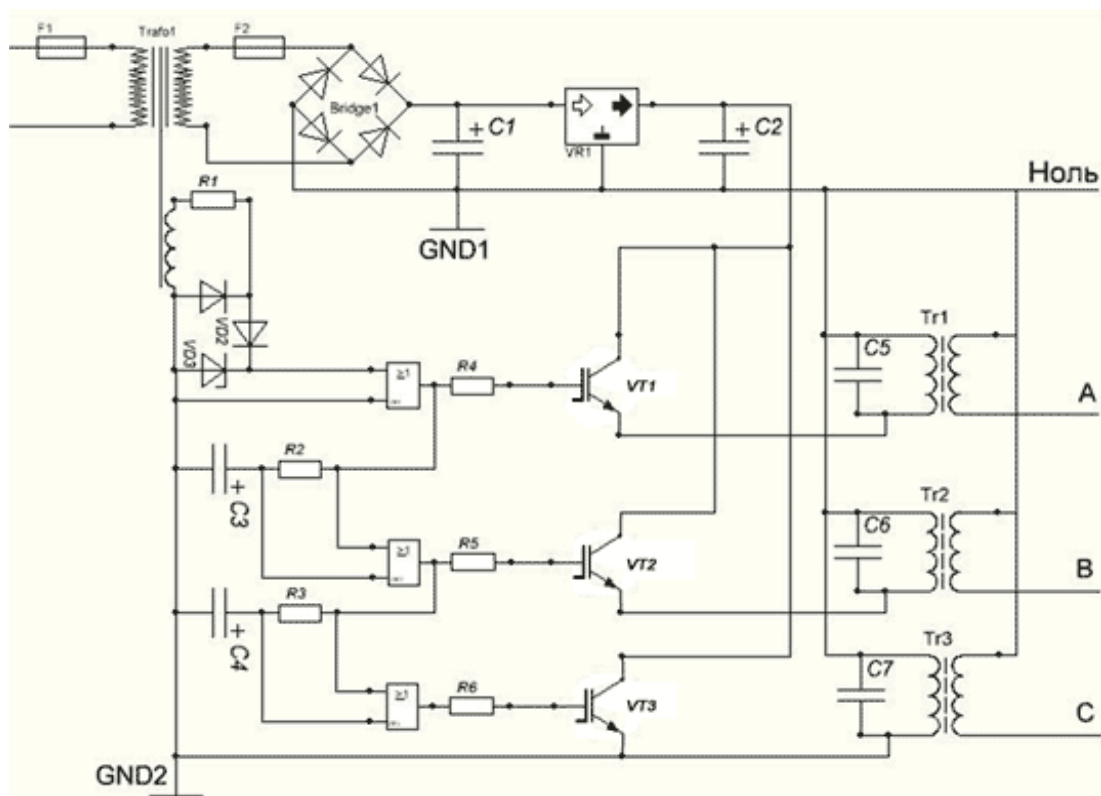


Рисунок 2.6 – Схема інвертора на IGBT-транзисторах

Перетворювачі частоти, використовувані як джерела живлення промислових електроустановок, мають ще більшу потужність, яка може досягати декілька мегават, а також робоча напругу в десятки кіловольт. Потужні інвертори тиристорів часто будуються за мостовою схемою:

Постійна напруга подається на вхід. Далі схема управління інвертором відкриває спочатку тиристори VD1 і VD4. Одночасно з цим відбувається заряд ємкості C_k до певного значення. Далі схема відкриває тиристори VD2 і VD3, а тиристори VD1 і VD4 за рахунок розряду конденсатора закриваються. Таким чином, в результаті роботи керованих ключів тиристорів, забезпечується необхідна частота напруги $U_{вих}$.

Потужні інвертори на IGBT- транзисторах мають високий коефіцієнт корисної дії, а також забезпечують дуже плавне регулювання частоти вихідної напруги, і тому чудово підходять для живлення асинхронних двигунів. Проте в порівнянні з перетворювачами тиристорів напруги вони дорожчі, а максимально досяжні потужності і напруга у них нижчі.

Працюючи в умовах високої напруги і струмів, практично всі елементи схемотехніки потужних перетворювачів частоти переносять великі навантаження. Тому вимоги, що пред'являються до них з погляду надійності і довговічності, дуже високі. Це повною мірою відноситься до фільтрових і демпферних конденсаторів, які використовуються в самих різних схемах потужних інверторів. На жаль, старі типи електричних ємкостей, що випускаються нашою промисловістю, схильні до частих пробоїв, що веде до необхідності їх періодичної заміни, і тому виробники потужних інверторів прагнуть використовувати в своїх нових розробках сучасні конденсатори, для яких не страшні високі навантаження.

З появою нових, повністю керованих, силових приладів MOSFET і IGBT, транзисторні інвертори на їх основі, почали успішно застосовуватися у складі джерел живлення установок індукційного нагріву [3]. Однією з основних схем транзисторних інверторів є інвертор напруги. При використанні у складі джерела живлення інвертора напруги, як правило, застосовується частотний

спосіб регулювання вихідної потужності і некерований випрямляч [3]. Основний недолік такої структури побудови джерела живлення це погіршення комутаційних процесів і завантаження реактивним струмом силових транзисторів інверторного моста при відхиленні від резонансного режиму. Це призводить до збільшення втрат в транзисторах, що накладає обмеження на частотний діапазон транзисторного інвертора.

Для транзисторного інвертора напруги оптимальним режимом є робота на частоті трохи більшої власної частоти резонансного контура навантаження [1, 2]. У цьому режимі забезпечується мінімальний рівень втрат в силових транзисторах. Найбільш вигідною структурою побудови джерела живлення є структура з використанням керованого випрямляча для регулювання вихідної потужності джерела, при цьому інвертор повинен завжди працювати з оптимальним розузгодженням. Основною проблемою для реалізації такої структури джерела живлення є визначення оптимального розузгодження.

Інвертори - напівпровідникові прилади. Вони можуть бути поділені на два типу відповідно до типу фотоелектричних систем:

- інвертори для автономних систем сонячних батарей;
- - інвертори для мережевого використання.

До вихідного сигналу мережевих інверторів ставлять найбільш жорсткі вимоги. Для зниження втрат на перетворення такі інвертори працюють при високій вхідній напрузі. Оскільки їх вхідні ланцюги живляться безпосередньо від сонячної батареї, інвертори мають регулювальник відбору максимальної потужності (вбудований в інвертор). Мережеві інвертори мають також блок контролю потужності сонячної батареї (і вмикаються автоматично, як тільки потужність сонячної батареї стає достатньою для формування змінного сигналу).

Вихідний каскад обох типів багато в чому схожий, а основна відзнака в схемі управління. Перший тип має генератор частоти, а другий повинен працювати синхронно з промисловою мережею (і як генератор частоти використовує саму мережу).

Для всіх типів ключовий параметр - ККД (який має бути більше 90%).

Вихідна напруга автономних інверторів, як правило, складає 220В (50/60 Гц), а в інверторах потужністю 10-100кВт можна отримувати трифазну напругу 380В. Всі автономні інвертори трансформують постійний струм акумуляторних батарей. Внаслідок цього вхідна напруга вибирається з ряду 12, 24, 48 і 120В. Чим більше вхідна напруга, тим простіше інвертор і тим вище його ККД. При великій напрузі істотно менше втрати на передачу енергії від сонячного генератора до акумуляторної батареї, регулювання зарядки і інвертора, проте при цьому ускладнюється конструкція сонячної електростанції і її експлуатація при небезпечній напрузі (вище 40 В). До форми вихідного сигналу автономних інверторів ставлять менш жорсткі вимоги.

У ряді випадків (якщо дозволяє навантаження) можливе використання інверторів з трапецієподібним вихідним сигналом. Такі інвертори коштують в 2-3 рази дешевше за інвертори з синусоїдальним вихідним сигналом.

Важливий параметр автономних інверторів - залежність ККД від потужності під'єданого навантаження. ККД не повинен значно знижуватися при під'єданого навантаження вдесятеро меншою (по споживаній потужності), ніж номінальна потужність інвертора. Разом з тим інвертор повинен витримувати перевантаження у вихідних ланцюгах (при під'єднанні електродвигунів і інших динамічних навантажень). Таким чином, до автономного інвертора ставляться наступні вимоги:

- здатність переносити без наслідків перевантаження (як короткочасні, так і тривалі);
- малі втрати при малих навантаженнях і на холостому ходу;
- стабілізація вихідної напруги;
- низький коефіцієнт гармонік;
- високий ККД;
- відсутність перешкод на радіочастотах.

Іноземні фірми пропонують широкий асортимент інверторів, спеціально розроблених для сонячних батарей. Такі інвертори мають блок регулювальника

відбору максимальної потужності, блок регулювальника заряду, а також додатковий вхід під'єднання дизель-генератора (для екстреного заряджання акумуляторної батареї). У даній системі застосовується інвертор серії FLEXIPOWER I-ПТПТ-288-400-50-УХЛ4 потужністю 200 кВт [4] рис.2.7.

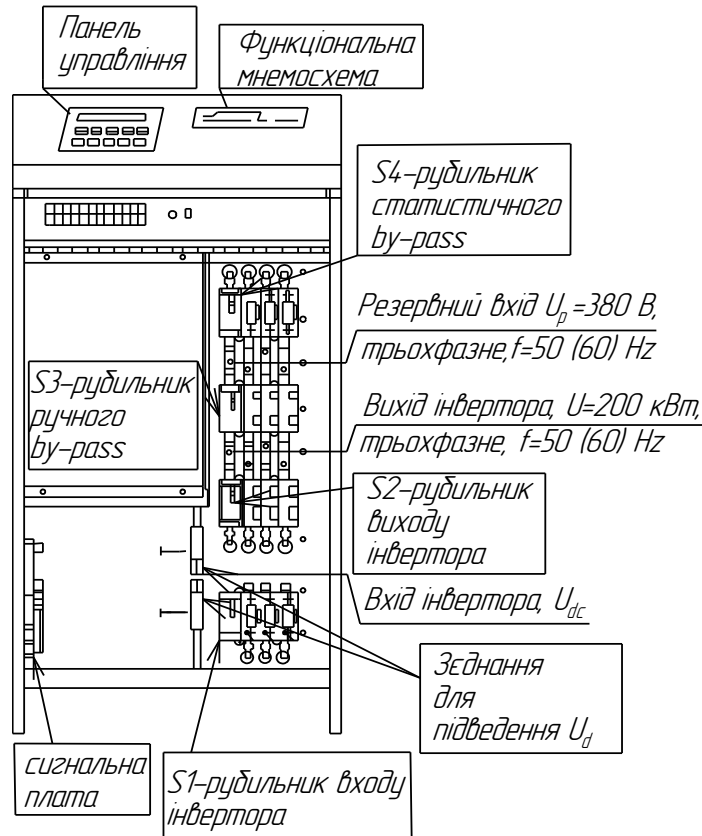


Рисунок 2.7 – Інвертор серії FLEXIPOWER I-ПТПТ-288-400-50-УХЛ4 потужністю 200 кВт

Інвертор I-ПТПТ складається з: транзисторного інвертора, статичного перемикального пристрою на тиристорах, обвідної лінії і мікропроцесорної системи контролю і управління.

Інвертор серії FLEXIPOWER I-ПТПТ-288-400-50-УХЛ4:

- перетворює постійний струм в трифазний струм високої якості для живлення навантаження;
- статичний by-pass (ЕПУ - електронний перемикальний пристрій), перемикає навантаження безпосередньо з виходу інвертора на живлення від

трифазної мережі змінного струму (резервний вхід) при перевантаженні або аварії інвертора;

- ручний by-pass (S3), що встановлюється на вимогу споживачів або організацій і виконаний у вигляді рубильника, що підключає навантаження безпосередньо до резервного входу в обхід інвертора і ЕПУ;

- рубильники S1 - підключає постійну напругу на вхід інвертора, S4- підключає напругу резервного входу на вхід ЕПУ, S2 - підключає вихід ЕПУ до виходу інвертора.

Інвертор І-ПТПТ оснащений системою автоматичного регулювання напруги і мікропроцесорним пристроєм, що здійснює контроль, управління і діагностику основних вузлів пристрою, вся інформація про роботу інвертора виводиться на рідкокристалічний дисплей. Інвертор може бути підключений через комунікаційний порт RS-232 до комп'ютерної оптоволоконної системи, що управляє OCSsystem. Система OCSsystem збирає інформацію про стан, роботу і збої в роботі всіх систем, тобто всю інформацію, що видається кожним інвертором в реальному масштабі часу.

Використання сучасних технологій дозволяє зменшити масогабаритні показники, понизити рівень шуму і збільшити ККД системи.

Інвертори І-ПТПТ можуть бути під'єднані в паралель, до 4 шт, для забезпечення вищої потужності і більшої надійності, ніж одиночний інвертор. Інвертори мають бути однієї потужності і однакового типу, із спільною обвідною лінією.

Інвертор має захист:

- від перевищення температури;
- від глибокого розряду АБ;
- від перевищення напруги на вході інвертора;
- від динамічного перевантаження інвертора по струму;
- від короткочасного перевантаження статичного by-pass по струму;
- від зовнішніх і внутрішніх КЗ статичного by-pass;

Система має регулятор зарядки і розрядки акумуляторів встановлений у контролері і призначений для захисту акумуляторів від надлишкової розрядки. Навантаження має бути вимкнена, коли напруга батареї опускається нижче за напругу відключення. Навантаження не повинне вмикатися до моменту, коли напруга не зросте до певного значення (напруга вмикання). Стандартні значення залежать від конструкції певних батарей, виробничого процесу і терміну служби акумуляторних батарей. У деяких моделях регулювальників застосовується звуковий сигнал, який повідомляє користувача про швидке вимкнення живлення.

Щоб захистити батарею від перезарядки треба обмежити зарядний струм після досягнення напруги завершення зарядки. Напруга почне знижуватися, поки не досягне іншого порогу, званого напругою відновлення заряду. Невеликі сонячні електростанції мають схильність до перевитрати енергії (а не до перезарядки) внаслідок цього допускається перезарядка, і при цьому потрібно застосовувати вищу напругу завершення заряду.

Вище викладене відноситься до регулювальників для автономних сонячних електростанцій невеликої потужності (до 1кВт). Для потужніших системах сонячних батарей функції контролю зарядки і розрядки бере на себе системний контролер (який керує також всією системою). Як правило цей пристрій зв'язаний з комп'ютером (що здійснює до того ж постійний моніторинг за роботою вузлів сонячних батарей із записом значень освітленості, температури, струму і напруги для подальшого аналізу).

2.4. Розрахунок і вибір циркуляційного насоса

Циркуляція води в системі автономного теплопостачання здійснюється відцентровим насосом. Діаметри трубопроводів в мережі рівні $d=0,05$ м.

Для вибору марки насоса необхідно знати дві величини: продуктивність насоса, і тиск, що розвивається.

Продуктивність циркуляційного насоса визначено за формулою:

$$V = \frac{Q_{on}}{c_v \cdot \rho_v \cdot \Delta t}, \quad (2.9)$$

де c_v - питома теплоємність води, ккал/кг·°С (для розрахунків приймається $c_v = 4,2$);

ρ_v - щільність води, $\rho_v = 1 \cdot 10^3$ кг/м³;

Q_{on} - витрата теплоти на опалювання;

Δt – різниця температури води на вході і виході з конденсатора.

$$\Delta t = t_1 - t_2, \quad (2.10)$$

де t_1 – температура води на вході до радіаторів опалення 60 °С;

t_2 – температура води на виході від радіаторів опалення 45 °С;

$$\Delta t = 60 - 45 = 15^\circ \text{C}.$$

Тоді:

$$V = \frac{386}{4,2 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 15} = 0,0061 \text{ м}^3/\text{с} = 21,96 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Визначення потрібного тиску насоса:

$$H_n = \frac{V}{H_m}, \quad (2.11)$$

де H_m – тиск з яким вода повинна подаватись, прийнято $H_m = 1,5$ м. вод. ст.

У замкнутій циркуляційній мережі тиск насоса повинен бути рівний або небагато перевищувати суму гідравлічних втрат мережі:

$$H_n = \frac{21,96}{1,5} = 14,64 \text{ м.вод.ст.}$$

За таблицею підбираємо насос, продуктивність якого рівна або дещо більше $V = 21,96 \text{ м}^3/\text{год} = 6,1 \text{ л/сек}$, а тиск не менше 14,64 м. вод. ст.

До встановлення приймаємо насос Wilo–TOP–E 80/1-20

Характеристики його двигуна:

Однофазний струм, 2-х полюсний – 230V, 50Hz

Номінальна потужність P_{2max} 1,1 кВт;
 Число обертів n 850-2850 об/хв;
 Споживана потужність P_1 100-1650 В;
 Струм I 0,5-7,5 А %

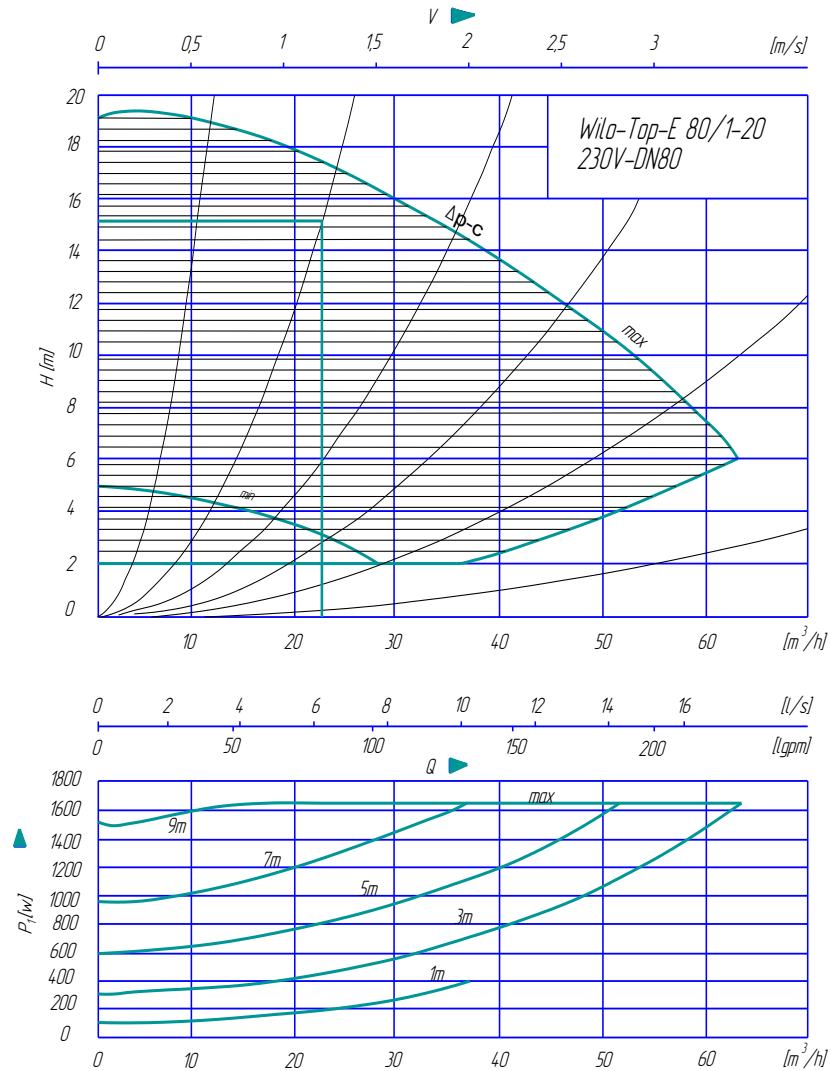


Рисунок 2.8 – Робоча характеристика регулювання Δp -constant ($\Delta p-c$) циркуляційного насосу Wilo–TOP–E 80/1-20 з мокрим ротором

Даний циркуляційні насос серії Wilo–TOP забезпечує циркуляцію води в системі опалення, і тиск до 20 м. вод. ст. Тому вибраний насос повністю підходить для нашої системи опалення.

Компактний, встановлюється безпосередньо на трубопроводі і працює практично безшумно. Підходить для систем майже всіх приміщень, не потребує

складного монтажу і має тривалий термін експлуатації. Він простий і надійний в експлуатації, працює безперервно, безшумно і споживає мало електроенергії, не потребує спеціальних, дорогих монтажних робіт - для початку роботи досить підключити насос до мережі.

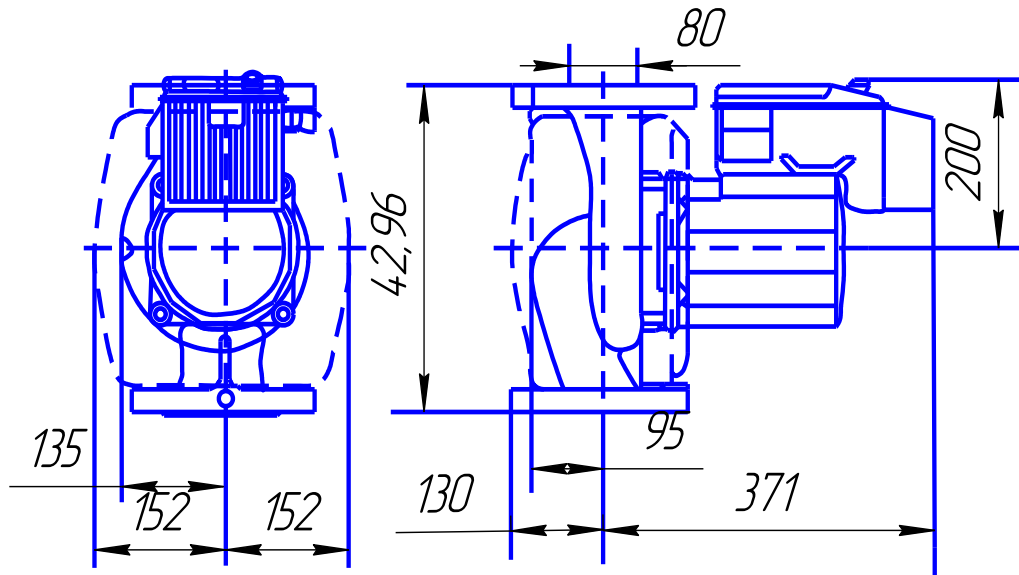


Рисунок 2.9 – Циркуляційний насос Wilo–TOP–E 80/1-20 з мокрим ротором

Будучи повністю автоматизованим, він сам підлаштовується під параметри, необхідні системі, незалежно від типу будівлі та пори року. Автоматика повністю стежить за тим, щоб витрата і напір насоса постійно коректувалася, лінійно змінювався перепад тиску який повинен підтримуватися насосом відповідно до умов, що змінюються. Wilo – перший серед виробників насосів з електрокеруванням з серійним інтегрованим дисплеєм і різьбовим з’єднанням. Має однокнопочне управління і вмонтовану функцію “нічного зниження” (“Керування:день/ніч”) з повністю автоматизованим, самонавчальним режимом пониження продуктивності насоса. Автоматичне безступінчате регулювання без зовнішнього комутаційного пристрою дає можливість:

- економити електроенергію до 50% і тим самим знизити експлуатаційні витрати;
- уникнути шумів термостатних вентилів.

Спосіб регулювання Δp -constant (Δp -с): електроніка підтримує створений насосом перепад тиску в допустимому діапазоні продуктивності на рівні заданого значення H_s .

Працює в будь-якій системі опалення.

2.5. Розроблення функціональної схеми електроприводу теплового насоса на базі асинхронного двигуна

Електропривод призначений для перетворення електричної енергії в енергію механічного руху робочих органів машин і механізмів. Для гарантування раціонального ходу технологічного процесу при їх роботі дуже часто виникає необхідність регулювання швидкості руху робочих органів.

Для регулювання швидкості руху робочого органа існують дві можливості : зміна параметрів кінематичного ланцюга механічної частини привода, тобто зміна передавального відношення механічних передач.

Реалізація останнього варіанта пов'язана з відносно складними і недостатньо надійними методами (застосування коробки швидкостей, механічного варіатора і т.п.).

У цьому випадку, як правило, не має можливості отримати необхідну плавність регулювання швидкості.

З огляду на це зараз задача регулювання швидкості руху робочих органів вирішується шляхом регулювання швидкості привідного двигуна.

Під регулюванням кутової швидкості обертання двигуна розуміють цілеспрямовану її зміну незалежно від моменту на валу відповідно до вимог, що висуваються до закону руху робочого органу механізму.

Кутова швидкість електродвигуна може змінюватись при зміні параметрів електричних ланцюгів (опорів) або джерел живлення (параметри напруги). Для оцінки якості регулювання ЕП існує ряд показників. Одним із

основних є діапазон регулювання, під яким розуміють відношення максимальної швидкості при регулюванні до мінімальної:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \quad (2.12)$$

Для пояснення цього показника необхідно розглянути зміну швидкості на графічній залежності рис. 2.10.

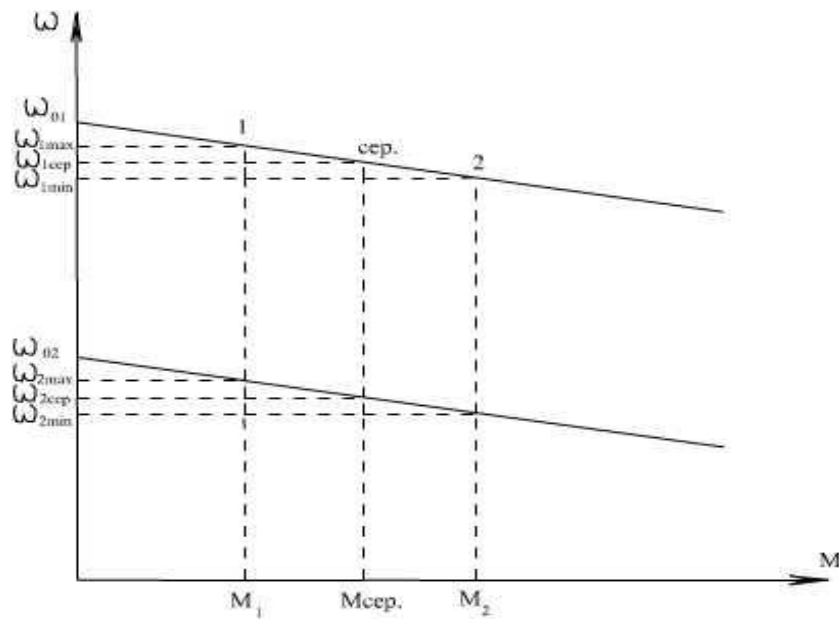


Рисунок 2.10 – Визначення діапазону регулювання

Для кожного з моментів M_1 , $M_{\text{сер}}$, M_2 може бути свій діапазон регулювання. Одним із показників, що характеризує ЕП є точність регулювання, що визначається жорсткістю механічних характеристик ЕП, або статизмом (рис.2.11.).

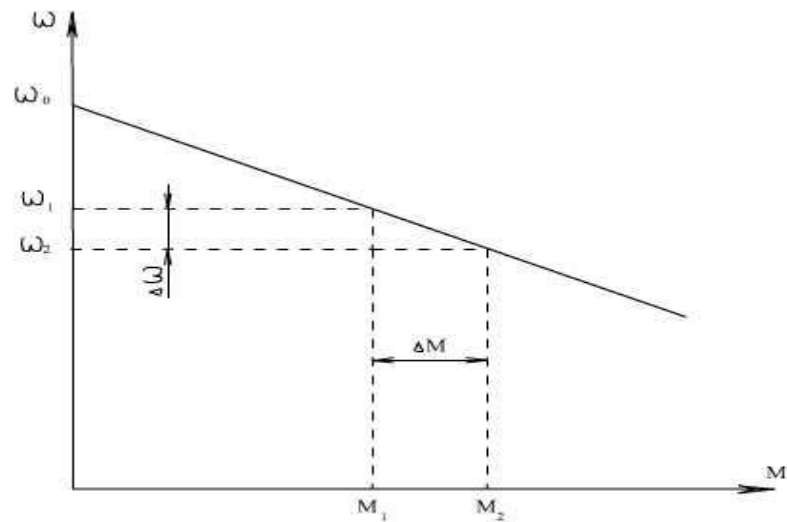


Рисунок 2.11 – Визначення жорсткості механічної характеристики

Для лінійної характеристики статизм розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta\omega}{\Delta M}, \quad (2.13)$$

де $\Delta\omega$ – приріст швидкості ;

ΔM – відповідний приріст моменту.

Якщо характеристика нелінійна, то статизм розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{d\omega}{dM}, \quad (2.14)$$

де dM – елементарний приріст моменту;

$d\omega$ – визваний ним приріст швидкості;

Жорсткість механічної характеристики - це величина обернена до статизму:

$$\beta = \frac{1}{\delta}. \quad (2.15)$$

Чим вище жорсткість характеристики, тим вище точність регулювання.

Важливим показником якості регулювання є плавність регулювання, що характеризується відношенням двох послідовних значень швидкості , які представляють собою ступені регулювання .

Плавність характеризується коефіцієнтом плавності регулювання :

$$\varphi = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}, \quad (2.16)$$

де ω_i і ω_{i-1} - значення кутових швидкостей, відповідно на i – му та $i - 1$ – му ступенях регулювання.

Застосування ДПС у приводах пристроїв дозволяє забезпечити безступінчасте регулювання швидкості в широкому діапазоні .

Зараз широке застосування отримали високомоментні ДПС із збудженням від постійних магнітів.

Застосовують також ДПС з пазовим ротором та електромагнітним збудженням, швидкодіючі із гладкими якорями, безколекторні (вентильні) ДПС.

Регулювання швидкості ДПС можна здійснювати різними методами: резисторним методом зміною потоку збудження, зміною напруги на виводах джерела живлення.

Керування ДПС у системах автоматичного регулювання здійснюється за допомогою комплектних пристроїв керування типу БТУ, БУ і т.п., що розроблені для різних потужностей привідних двигунів. До їх функціональних можливостей відносяться регулювання швидкості обертання двигуна в широкому діапазоні (від 0 до $\omega_{ном}$), реверс, динамічне гальмування .

Застосування приводів із ДПС пов'язане з досить широкими можливостями щодо регулювання швидкості, а також із великим досвідом їх використання .

Ці ЕП можуть застосовуватись для двигунів з різними механічними характеристиками та режимами роботи. Сучасні тиристорні перетворювачі забезпечують досить високу плавність регулювання швидкості.

Але помітному зменшенню використання ЕП постійного струму у вітчизняному та закордонному виробництві сприяють ряд недоліків та обмежень.

Застосування машин постійного струму обмежується, насамперед, умовами експлуатації: агресивність або вибухонебезпечність середовища, струмопровідний пил, підвищена вологість повітря робочої зони, необхідність постійного обслуговування.

Машини постійного струму мають дуже високу матеріалоемність і відносно дорогую технологію виготовлення. Тому вони мають досить високі виробничі витрати.

У зв'язку з переліченими недоліками ЕП постійного струму, все більш широке застосування отримують ЕП змінного струму з асинхронними двигунами з фазним та короткозамкненим ротором, та синхронними двигунами.

Для асинхронних двигунів з фазним ротором застосовується так званий резистивний метод регулювання швидкості, коли в коло ротора (статора) вводяться додаткові опори. Цей спосіб досить простий в реалізації і може забезпечувати безступінчасте регулювання швидкості обертання.

Але цей спосіб має ряд недоліків, які не дозволяють використовувати його для теплового насоса. До них відносять невеликий діапазон регулювання, зниження коефіцієнта потужності при зменшенні швидкості обертання.

При використанні АД з фазним ротором комутація опорів в колі ротора може здійснюватись тиристорним комутатором (рис.2.12).

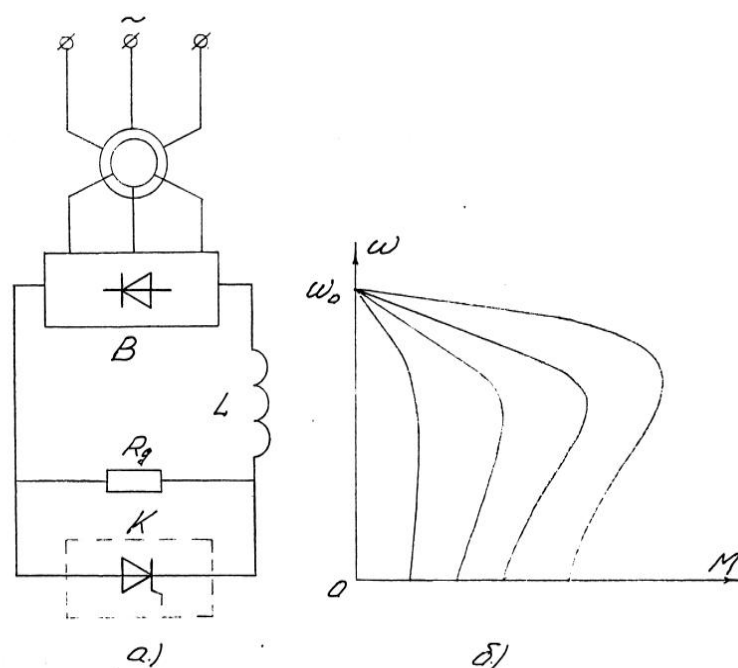


Рисунок 2.12 – ЕП з АД з фазним ротором при використанні тиристорного комутатора в ланцюзі ротора

- а) функціональна схема;
- б) механічні характеристики.

У даній схемі швидкість обертання двигуна змінюється шляхом регулювання шпаруватості імпульсної напруги, що подається на керуючий електрод комутатора зі схеми керування.

Із розгляду механічних характеристик видно, що застосування даного привода можливо за умови регулювання швидкості в невеликому діапазоні при швидкостях близьких до ω_n .

З цих причин для отримання більш широкого діапазону регулювання швидкості використовують ЕП із АД з фазним ротором, що представляє собою замкнену систему з тиристорним перетворювачем напруги в ланцюзі статора. Але в таких системах більш доцільно використовувати АД з короткозамкненим ротором.

Регулювання швидкості АД з к.з. ротором може здійснюватись зміною статичної напруги при постійному значенні частоти.

На практиці цей спосіб може здійснюватись за допомогою тиристорного регулятора напруги (ТРН), або через магнітний підсилювач, що вмикається в коло статора.

Даний спосіб може передбачати ввімкнення зворотного зв'язку по швидкості для підвищення плавності регулювання.

Описана схема достатньо зручна в експлуатації. Зворотний зв'язок дозволяє дещо збільшити діапазон регулювання. Але існує ряд недоліків цієї схеми. Зменшення напруги на статорі призводить до зменшення магнітного потоку, що призводить до збільшення струму при заданому моменті та збільшення втрат у двигуні. Схема достатньо складна в реалізації. Одним з недоліків є те, що ТРН вносить спотворення в мережу.

Реалізація даного способу показана на рис. 2.13.

Каскадні схеми вмикання АД з к.з. ротором забезпечують плавне регулювання їх жорсткості. Каскадні схеми мають можливість передачі енергії,

яка втрачається за рахунок ковзання, з передачею її в мережу або перетворенням її в механічну енергію з передачею на вал головного двигуна.

Така система має великі масо – габаритні показники, а також велику встановлену потужність ЕП.

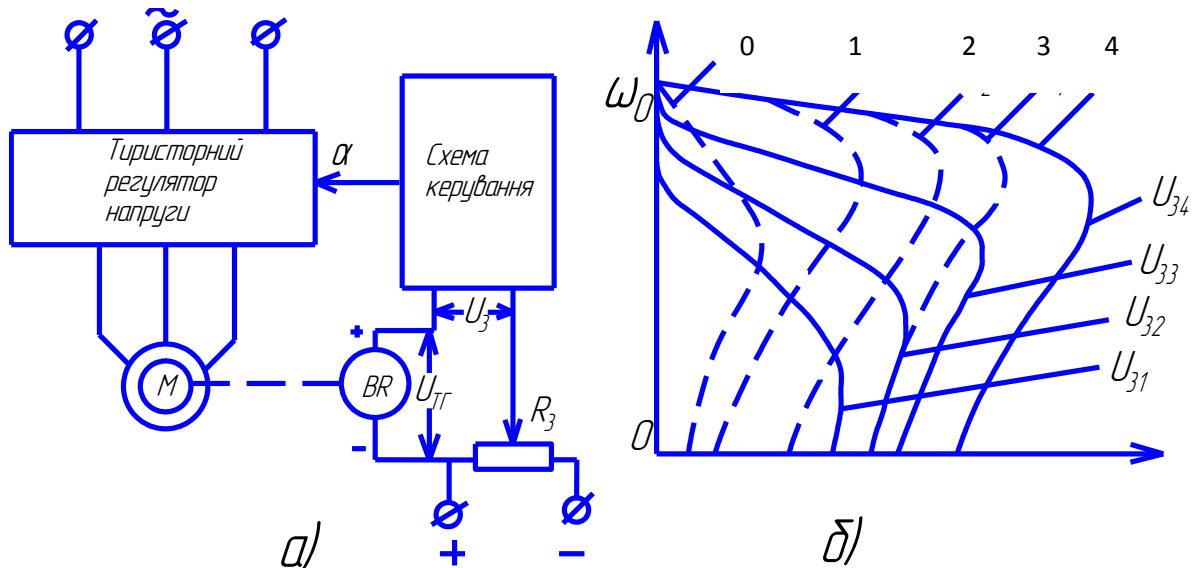


Рисунок 2.13 – ЕП з ТРН . а) функціональна схема ; б) механічні характеристики

Із аналізу статичних характеристик АД видно, що у випадку живлення від синусоїдної напруги активні опори двигуна не залежать від частоти, а реактивні пропорційні частоті живлення. Потік Φ_a магнітного поля, що обертається, в повітряному зазорі індукує в обмотках статора проти – ЕРС E_1 .

Потік Φ_a пропорційний відношенню E_1/f_1 . Для ефективного використання двигуна необхідно підтримувати потік у повітряному зазорі незмінним при всіх частотах живлення. Це досягається за рахунок підтримання відношення $E_1/f_1 = \text{const}$. Але при такому законі режим роботи двигуна при низьких частотах погіршується внаслідок підвищеного впливу активного опору обмотки статора і зменшення потоку Φ_a .

Для підтримання $\Phi_a = \text{const}$ необхідний перетворювальний пристрій, який би міг плавно регулювати частоту та напругу (ЕРС).

Тиристорні перетворювачі частоти (ТПЧ) дали можливість гнучкого та економічного регулювання частоти обертання двигуна на такому ж рівні як у систем ЕП з ДПС.

При частотному регулюванні ковзання, незалежно від діапазону регулювання, залишається порівняно невеликим. Відповідно до цього втрати в двигуні залишаються невеликими.

До цього можна додати, що АД з к.з. ротором в 2 – 2,5 рази легше та в 3 – 4 рази дешевше аналогічного двигуна постійного струму. Таким чином регулювання швидкості АД з к.з. ротором зміною частоти живлячої напруги є найбільш ефективним та економічним. Єдиним недоліком такої системи є складність та досить велика вартість схеми керування, але з розвитком електротехнічної елементної бази та новими технологіями це питання поступово вирішується.

ТПЧ можуть виконуватись із ланкою постійного струму (дволанкові) або як безпосередні перетворювачі частоти.

Перетворювачі із ланкою постійного струму в загальному випадку мають вид представлений на рис.2.14.

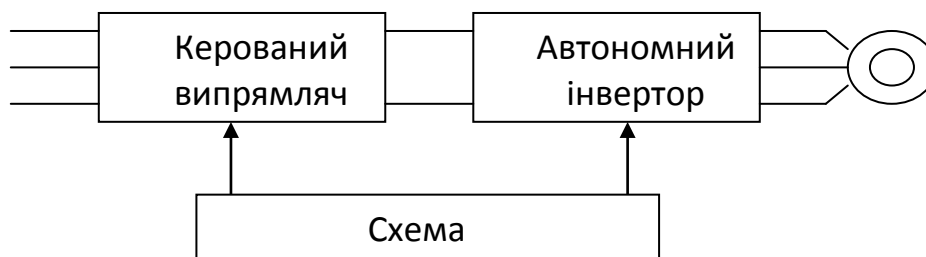


Рисунок 2.14 – ТПЧ із ланкою постійного струму

Ланка постійного струму може бути реалізована як керований випрямляч. У такому випадку амплітуда вихідної напруги регулюється випрямлячем, а частота – автономним інвертором напруги або струму.

При використанні інвертора струму в системі, допустимий момент на валу системи не перевищує 1,5 – 2,0 M_n . Існує також обмеження по діапазону регулювання швидкості.

Система асинхронного ЕП з АІН має більш складне виконання, але практично не має обмежень по експлуатаційним режимам привода, тобто вони є більш універсальними і дозволяють отримати будь-який закон регулювання швидкості.

При використанні некерованого випрямляча автономний інвертор використовується як для зміни напруги так і для зміни частоти. Це здійснюється зміною шпаруватості живлячої напруги двигуна за рахунок так званого широтно – імпульсного регулювання (ШІР) напруги.

Цей спосіб є також перспективним у відношенні плавності та діапазону регулювання.

На рис.2.1.5 зображені механічні характеристики, при підтриманні постійного моменту $M_c = \text{const}$ (рис. 2.15. а.) та при вентиляторній характеристиці механізму (рис.2.15. б.)

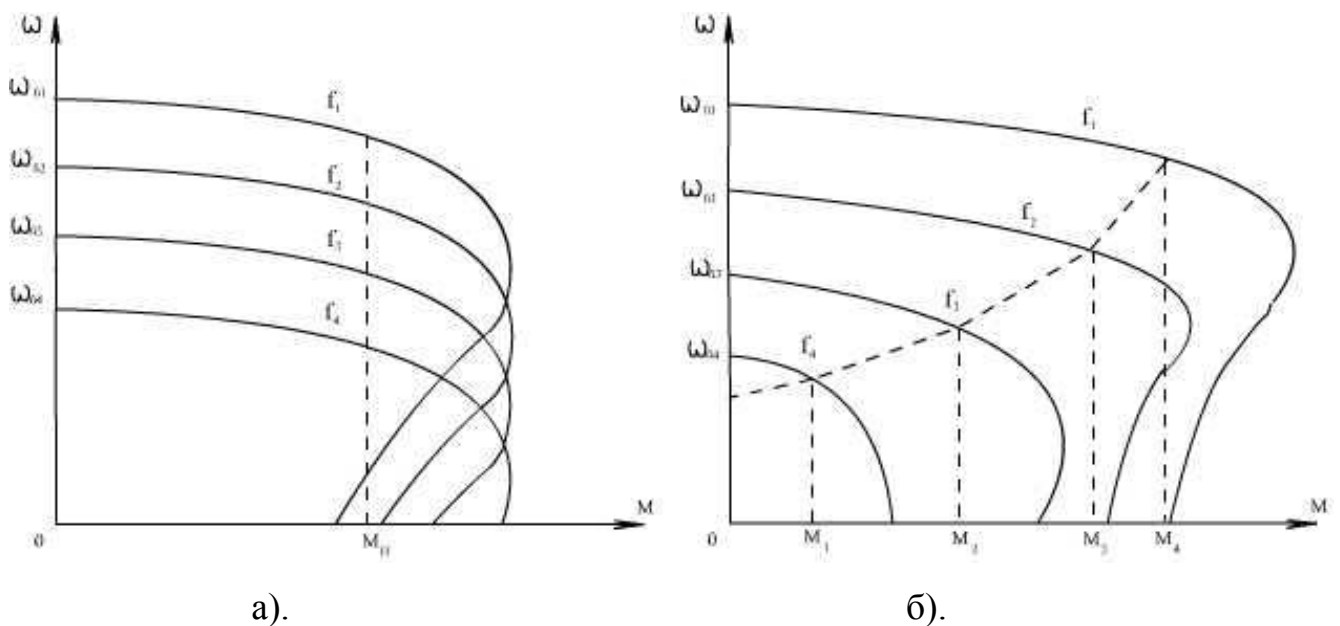


Рисунок 2.15 – Механічні характеристики ТПЧ

Перетворювачі з безпосереднім перетворенням частоти дають можливість отримувати досить високі регульовальні характеристики. Недоліками цього типу перетворювачів є обмеження верхньої межі регулювання, а також складне трансформаторне та захисне й комутаційне обладнання.

2.5.1 Вибір системи ЕП та розробка функціональної схеми ЕП з ТПЧ для теплового насоса

Беручі до уваги необхідність регулювання в діапазоні швидкостей від 1650 до 2850 об/хв, та необхідність тривалої роботи з ustalеним значенням швидкості із цього діапазону, можна зробити висновок : для приводу даної установки найбільш прийнятним є ЕП з ТПЧ на основі керованого випрямляча з АІН.

Використовуючи даний привод можна здійснювати регулювання швидкості та моменту, підтримуючи необхідну плавність і точність регулювання.

Використання такої системи ЕП дозволить отримувати економію електроенергії до 30% порівняно з іншими системами.

Цей аспект є дуже актуальним в умовах енергетичної кризи та значним підвищенням цін на енергоносії.

Система ЕП на основі ТПЧ з АІН повинна бути розроблена для двигуна теплового насоса, потужність якого повинна відповідати потужності даного електродвигуна $P = 160$ кВт.

Тиристорні перетворювачі частоти за функціональним використанням поділяються на два типи:

- дволанкові ПЧ, що здійснюють спочатку випрямлення змінного струму, а потім інвертування постійного струму;
- безпосередні ПЧ, які використовують однократне перетворення.

Порівняно з безпосередніми ПЧ схема двохланцюгового перетворювача частоти має більш просте виконання як силової частини, так і схеми керування, що обумовлює більш низьку вартість та високу надійність .

Недоліком дволанкового перетворювача є подвійне перетворення енергії, що призводить до деякого зменшення ККД.

Розробку схеми почнемо з типових вузлів перетворювача частоти.

Змінна напруга мережі живлення випрямляється керованим випрямлячем (КВ), фільтрується за допомогою фільтра (Ф) та подається на автономний інвертор.

В якості інвертора більш прийнятним є використання автономного інвертора напруги (АІН).

На відміну від автономних інверторів струму (АІС), АІН може працювати в режимі холостого ходу.

Можливість його роботи в режимі близькому до к.з. визначається комутаційними властивостями керованих вентилів та способом комутації.

АІН вносять невеликі відхилення від форми кривої та величини вихідної напруги при зміні вихідної частоти в широкому діапазоні, що особливо важливо при керуванні асинхронним електроприводом. Комутаційні процеси не дуже сильно впливають на форму кривої вихідної напруги.

Зовнішня характеристика АІН на відміну від АІС жорстка. За способом комутації АІН діляться на декілька груп: із індивідуальною, пофазною, груповою, загальною міжвентильною та міжфазною комутацією.

Комутуючі пристрої при пофазній комутації служать для почергового відпирання та запирання тиристорів двох вентильних плеч, що відносяться до однієї фази інвертора. При такому способі гармонічний склад вихідної напруги не залежить від параметрів навантаження.

При живленні інвертора від випрямляча на його вході необхідно встановити конденсатор великої потужності для забезпечення стабільності джерела постійної напруги.

Керування АІН здійснюється за допомогою системи керування інвертором (СКІ). Керування величиною вихідної напруги здійснюється системою керування випрямлячем (СКВ).

Для плавного регулювання швидкості асинхронного двигуна, а також здійснення розгону та гальмування, в схему ТПЧ необхідно включити схему автоматичного регулювання (САР). Регулювання швидкості в системі

автоматичного регулювання виконується за принципом підпорядкованого керування . САР можна реалізувати, як триконтурну систему.

Внутрішнім контуром є контур регулювання струму КВ з використанням датчика струму (ДС), контур регулювання ЕРС (напруги) двигуна реалізований за допомогою датчиків ЕРС та напруги (ДЕ, ДН). Зовнішній контур регулювання тиску пари на виході ТН повинен здійснювати підтримання цього показника на встановленому рівні з використанням датчиком тиску пари (ДП), що встановлюється на виході .

До типової СКІ включають формувач імпульсів (ФІ), задаючий генератор, а також розподільник імпульсів (І).

СКІ призначена для керування основними та комутуючими тиристорами АІН з частотою, що відповідає напрузі завдання, що надходить на задавальний пристрій (ЗП).

Керуючі імпульси поступають з ФІ. Перетворення напруги у пропорційне їй значення частоти виконує задаючий генератор (ЗГ), що працює за принципом зміни напрямку інтегрування. Для перетворення послідовності імпульсів у параметричний код, який надходить на шість виводів для керування тиристорами, в СКІ використовується розподільник імпульсів.

Сигнал завдання (U_3), що надходить на ЗП може отримуватись шляхом ручної настройки, або поступати з ДП через елемент порівняння (ЕП) та формувач завдання (ФЗ).

У процесі роботи необхідне значення тиску пари встановлюється вручну. Далі U_3 подається через канал регулювання тиску пари та система працює в автоматичному режимі .

Для регулювання роботи СКВ та СКІ використані регулятори струму (РС1, РС2), та регулятор частоти (РЧ), сигнали на які надходять від датчиків струму (ДС1, ДС2) через систему захисту та сигналізації (СЗС), та від ЗГ через датчик частоти (ДЧ).

САР забезпечує :

- формування вихідного сигналу завдання керування;

- регулювання темпу зміни завдання на частоту від 0 до 50 Гц;
- зміну вихідної напруги ЕП до номінального значення в функції частоти;
- коректування закону частотного керування ЕП:

$$\frac{E}{f} = const ;$$

де, E – діюче значення ЕРС двигуна;

f – вихідна частота.

- усунення можливих автоколивань;
- гальмування ЕП;
- роботу ЕП як в ручному так і в автоматичному режимі.

СЗС використовується для увімкнення та вимкнення ЕП в робочому та аварійних режимах.

СЗС забезпечує наступні види захисту:

- від максимального струму;
- від струму перевантаження;
- від погіршення охолодження вентилів;
- від зриву інвертора;
- від зниження напруги мережі нижче допустимої;
- від обриву фази двигуна;

Для забезпечення гальмування необхідне використання в системі пристрою гальмування (ПГ), який здійснює керуючий вплив на вузол динамічного гальмування (ВГ).

Таким чином, розроблена функціональна схема складається з наступних основних функціональних частин:

- силова частина;
- система автоматичного регулювання;
- система керування випрямлячем;
- система керування інвертором;
- система захисту та сигналізації.

2.5.2 Розробка принципів схем силової частини ЕП з ТПЧ та розрахунок її елементів

Як впливає з розробленої функціональної схеми ЕП ТН, силова частина розглядаємого ТПЧ, включає силовий керований випрямляч (КВ), згладжуючий LC – фільтр (Ф), вузол динамічного гальмування (ВГ) та автономний інвертор напруги (АІН).

КВ доцільно виконати за трифазною мостовою схемою із послідовно з'єднаних трифазних випрямляючих груп : анодної – VS2, VS4, VS6 та катодної – VS1, VS3, VS5. Навантаженням КВ є АІН , що споживає тільки активну потужність . При цьому в мостовій схемі КВ одночасно відкриті два вентиля: вентиль катодної групи з більш високим потенціалом анода та вентиль анодної групи з найбільш низьким потенціалом катода. Часова діаграма перемикання тиристорів КВ при куті керування $\alpha=0$ показана на рис.2.16.

Випрямлена напруга на виході КВ дорівнює різниці фазних напруг, що діють на відкритих вентилях. Регулювання величини випрямленої напруги здійснюється шляхом часової затримки відкривання тиристорів, яка називається кутом керування α . Діюче значення пульсуючої напруги на виході КВ зменшується при збільшенні α .

Подача відпираючих імпульсів здійснюється системою імпульсно - фазового керування випрямлячем (СІФК).

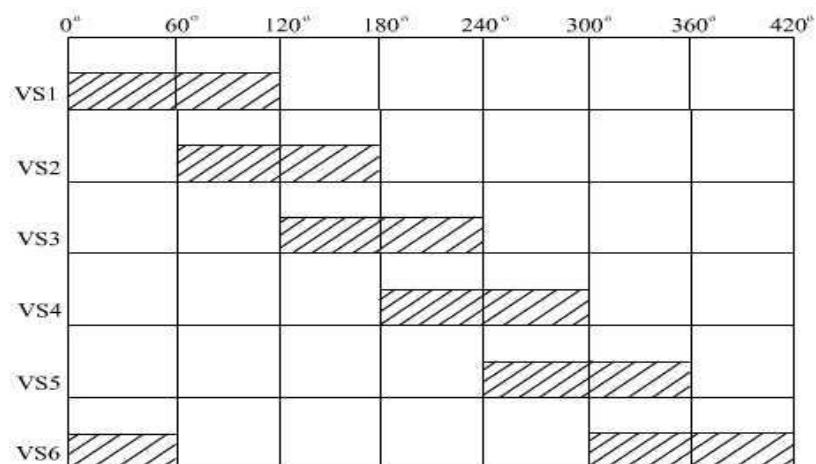


Рисунок 2.16 – Часова діаграма відкривання тиристорів КВ при $\alpha = 0$

Для живлення ТПЧ доцільно вибрати трифазну мережу живлення напругою 380В та частотою 50 Гц .

Для зменшення швидкості наростання прямого струму вентилів, обмеження струмів к.з. і зменшення спотворень напруги мережі, які можуть бути визвані комутацією тиристорів, КВ необхідно підключити до мережі через струмообмежуючі реактори.

Для подачі та зняття напруги живлення КВ можна застосувати автоматичний вимикач (А).

Фільтр (Ф), підключений до виходу КВ виконує функцію згладжування пульсацій випрямленого струму та напруги.

Трифазний автономний інвертор включає до себе міст основних тиристорів, міст комутуючих тиристорів. Для енергообміну між фазами навантаження до АІН ввімкнений міст зворотніх діодів .

Міст основних тиристорів складається з трьох симетричних плеч, в кожне з яких вмикаються два тиристора. Зустрічно – паралельно до них вмикаються, так звані, зворотні діоди.

Для нормальної роботи АІН повинні застосовуватись повністю керовані вентиля, які допускають ввімкнення та вимикання їх за допомогою ланцюгів керування, або неповністю керовані вентиля, які потребують примусового запирання через схему комутації. В якості такої схеми використовуються шість комутуючих тиристорів та комутуючі конденсатори.

Як було зазначено, у даній схемі доцільно використати пофазну двоступеневу комутацію. На першому ступені струм навантаження протікає в допоміжний ланцюг (контур) комутації. Відповідний тиристор при цьому запирається. На другому ступені струм навантаження протікає через коло відповідного зворотного діода.

Запирання тиристора проводиться за допомогою попередньо зарядженого конденсатора, який завдяки комутуючому тиристорі підключається до запираемого тиристора. Напруга конденсатора виявляється зворотною для

відповідного тиристора, струм через який зменшується до “0” і він запирається

Елементи АІН можна об’єднати в наступні групи:

- міст основних тиристорів (VS1 – VS6);
- міст комутуючих тиристорів (VS13 – VS18);
- міст зкидання енергії (VD19 – VD24);
- міст зворотних діодів (VD11 – VD16);
- комутаційні конденсатори (C14, C15, C16);
- комутуючі дроселі (L5, L6);
- роз’єднувальні діоди (VD17, VD18);
- допоміжні джерела підзаряду ($D_{п1}$, $D_{п2}$).

Часова діаграма роботи основних тиристорів АІН представлена на рис.2.17.

Роботу однієї фази АІН можна пояснити так.

Допустимо, що ввімкнені основні тиристори VS7, VS9, VS12. Комутуючий конденсатор C14 заряджений. Струм навантаження протікає по колу VS7 – VS9 – обмотки двигуна – VS8.

Після зняття імпульса з VS7 та подачі імпульса керування на комутуючий тиристор VS13 для зникнення струму через VS7 з’являється струм розряду конденсатора C14. Амплітуда імпульсу розрядного струму через C14 – VD11 – L5 – VD17 – VS13 перевищує струм навантаження I_H , у результаті чого струм через VS7 зменшується до “0”.

Струм комутації I_K , що перевищує струм навантаження I_H , протікає через зворотний діод VD11. Після досягнення максимального значення I_K починає зменшуватися, перезаряджаючи конденсатор C14 в зворотному напрямку.

За час, коли діод VD11 проводить струм, пряме падіння напруги в ланцюгу VD11, яке є зворотним для тиристора VS7, запирає його.

Час прикладання від’ємної напруги до тиристора, який запирається визначається величиною ємності C14, індуктивністю L5 та струмом навантаження.

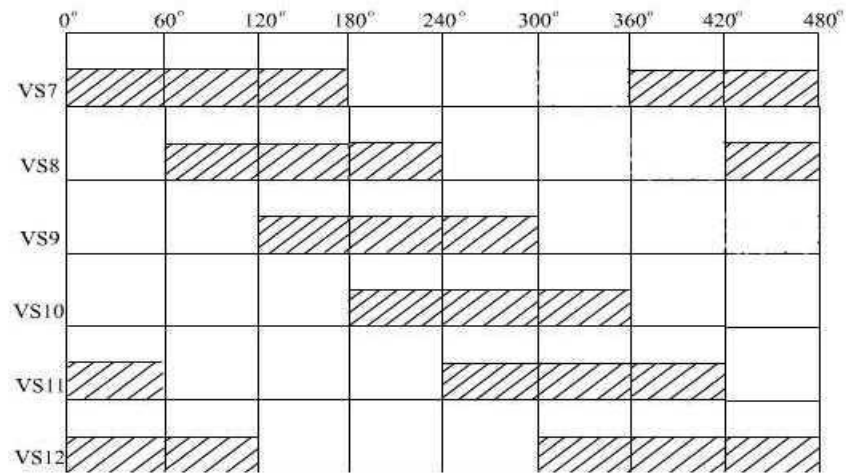


Рисунок 2.17 – Часові діаграми відкривання основних тиристорів АІН

Після закінчення перезаряду С14 вмикається VS10 і С14 дозаряджається до попереднього стану, але із зворотною полярністю від джерела підзаряду $D_{п1}$ по колу $D_{п1} - VS13 - C14 - VS10$. До тиристора VS7 знову прикладена пряма напруга.

До комутуючого тиристора VS13 прикладається зворотна напруга реактора L5 при комутації в іншій фазі та він запирається. Конденсатор С14 готовий до запирання тиристора VS10 за допомогою VS16.

При зниженні випрямленої напруги випрямляча U_d і збільшенні струму забезпечується незалежність напруги на комутуючому конденсаторі від випрямленої напруги шляхом підзаряду конденсатора від $D_{п1}$, $D_{п2}$. Вони забезпечують автоматичний безперервний дозаряд конденсатора в процесі комутації.

Робота інших двох фаз АІН здійснюється аналогічно першій фазі.

Роз'єднувальні діоди VD17 – VD18 існують для розв'язку джерела основного живлення (КВ) та джерел підзаряду.

Коло зкидання енергії, що побудоване на діодах VD19 – VD24 слугує для забезпечення стабілізації напруги на комутуючих конденсаторах і підтриманні його на рівні, що не перевищує величини напруги на $D_{п1}$, $D_{п2}$. Це пов'язане з тим, що при підвищенні струму навантаження збільшується напруга на конденсаторі. Після закінчення процесу комутації, що пов'язаний із запиранням

одного із основних тиристорів, наприклад VS7, C14, що заряджений до напруги, що перевищує напругу D_{n1} , розряджається до цієї напруги по колу: C1 – VD19 – $R_{n1,2}$ – D_{n1} – VD14 – C1.

Захист тиристорів випрямляча, комутуючих тиристорів АІН, діодів зворотного струму АІН від перенапруження здійснюється за допомогою RC – ланцюгів, основних тиристорів АІН – за допомогою VRC – ланцюгів.

У розглянутому ТПЧ для забезпечення режиму динамічного гальмування використовується вузол динамічного гальмування (ВГ), що складається із двох пар, послідовно підключених до загальної точки з'єднання тиристорів фази „В” АІН, ланцюгів, які складаються із тиристора та резистора.

При гальмуванні всі тиристори АІН продовжують вмикатися згідно робочий діаграмі, а імпульси КВ переводяться в інверторну зону. У зоні малої вихідної частоти відбувається зупинка ЗГ і гальмування двигуна здійснюється постійним струмом.

Таким чином для регулювання швидкості двигуна ТН за необхідним законом у заданих межах розроблена схема силової частини ТПЧ, що винесена на креслення.

Для забезпечення нормальної роботи привода необхідно розрахувати елементи силової частини, що була розроблена.

2.6. Розрахунок елементів керованого випрямляча

КВ ТПЧ, що розробляється виконаний на керованих вентилях, ввімкнених за трифазною мостовою схемою.

Враховуючи те, що тиристори є найбільш відповідальними елементами перетворювача у відношенні надійності його роботи, вибір тиристорів проводиться за допустимим струмом та зворотній напрузі.

Розрахунок тиристорів за напругою виконується згідно із методикою наведеною у [7].

Амплітудне значення напруги, що подається на тиристор, залежить від схеми вмикання. Тиристиори вибираються за максимальною зворотною напругою, яку повинен витримати тиристор у закритому стані.

Залежно від максимальної зворотної напруги тиристиори поділяються на 8 класів (150В, 225В, 300В, 375В, 450В, 550В, 660В, 800В).

При даній схемі ввімкнення згідно з [7]:

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \cdot U_L, \quad (2.17)$$

де U_L – лінійна напруга мережі, В. Оскільки КВ ввімкнений по безтрансформаторній схемі, то $U_L = 380В$.

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \cdot 380 = 535 В.$$

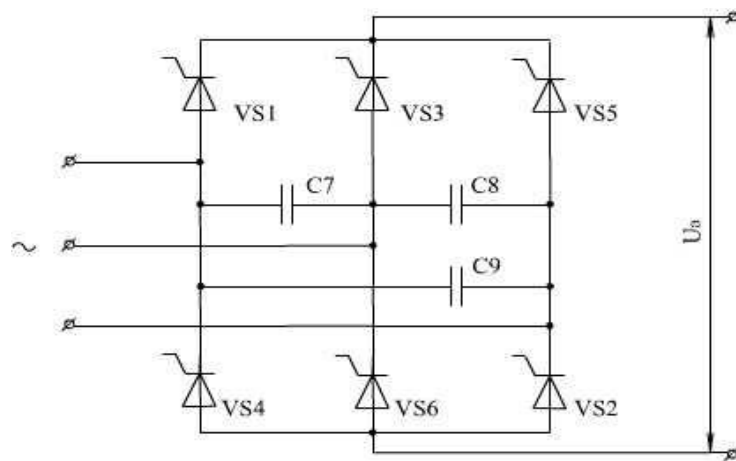


Рисунок 2.18 – Принципова схема КВ

Таким чином тиристор повинен бути не нижче 6 – го класу. Як правило, необхідно мати запас по напрузі тиристорів, для чого їх вибирають на 1 – 2 класа вище. Тому прийнятий 7 – й клас тиристорів із максимальною зворотною напругою 660 В.

Розрахунок тиристорів за допустимим струмом проводимо згідно з методикою [8]. Середнє значення струму, що протікає через тиристор визначено за формулою :

$$I_{acер} = \frac{I_d}{3}, \quad (2.18)$$

де I_d – середнє значення струму навантаження КВ, що визначається по [9]:

$$I_d = \frac{3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos\varphi}{U_d \cdot \eta_H} \quad (2.19)$$

де U_ϕ , I_ϕ – фазна напруга та струм статора двигуна В, А;

U_d – випрямлена напруга, В;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності двигуна, $\cos\varphi = 0,9$;

η_H – ККД двигуна, $\eta_H = 0,92$.

Значення U_ϕ та I_ϕ визначено по [10]:

$$U_\phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} ; \quad (2.20)$$

$$U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

$$I_\phi = \frac{P_{\text{дв}}}{3U_\phi \cdot \cos\varphi \cdot \eta_H} , \quad (2.21)$$

де $P_{\text{дв}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт; $P_{\text{дв}} = 160$ кВт;

$$I_\phi = \frac{160000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,92} = 292,78 \text{ А.}$$

Підставляючи отримані значення в формулу (2.19) отримаємо:

$$I_d = \frac{3 \cdot 220 \cdot 292,78 \cdot 0,9}{466,7 \cdot 0,92} = 405 \text{ А.}$$

U_d в формулі (2.19) визначаємо за формулою:

$$U_d = \frac{3}{\sqrt{2}} U_\phi ; \quad (2.22)$$

$$U_d = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot 220 = 466,69 \text{ В.}$$

Підставляючи значення I_d в формулу (2.18) отримано:

$$I_{\text{асер}} = \frac{405}{3} = 135 \text{ А.}$$

Діюче активне значення струму тиристора, А:

$$I_{\text{аef}} = 0,58 \cdot I_d ; \quad (2.23)$$

$$I_{ae\phi} = 0,58 \cdot 405 = 234,9 \text{ A.}$$

Враховуючи потужність пристроїв комутації, для захисту перетворювача значення діючого ефективного струму необхідно збільшити на 30 – 50%

$$I'_{ae\phi} = 1,5 \cdot I_{ae\phi} ; \quad (2.24)$$

$$I'_{ae\phi} = 1,5 \cdot 234,9 = 352,35 \text{ A.}$$

Для даної схеми КВ за своїми показниками вибрано наступний тиристор :

Тип	T133 – 400;
$I_{ae\phi}$, А	400;
$U_{обрмах}$, В	400-1600;
Напруга керування U_f , В.....	1,75 – 3,5;
Час відкривання $t_{в}$, мкс.....	25;
Час запирання t_3 , мкс	500.

2.6.1. Розрахунок реакторів

Індуктивність реакторів , що встановлюються на вході випрямляча (L1.1, L1.2, L1.3) можна розрахувати з використанням [11].

Рівняння зовнішньої характеристики випрямляча:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{3I_d \cdot X_a}{\pi} , \quad (2.25)$$

де U_{d0} – напруга холостого ходу випрямляча, В , визначається як:

$$U_{d0} = 2,34 \cdot U_{1\phi} ; \quad (2.26)$$

$$U_{d0} = 2,34 \cdot 220 = 514,8 \text{ В.}$$

α – кут керування; для для розрахунку приймається, $\alpha = 0$;

X_a – індуктивність розсіювання, Ом

$$X_a = \frac{\pi(U_{d0} \cos\alpha - U_d)}{3I_d} ; \quad (2.27)$$

$$X_a = \frac{3,14 \cdot (514,8 \cdot 1 - 466,7)}{3 \cdot 405} = 0,124 \text{ Ом} .$$

Використовуючи отримане значення індуктивного опору реактора визначено його індуктивність розсіювання :

$$L = \frac{X_a}{2\pi f} , \quad (2.28)$$

де f – частота напруги мережі, $f = 50$ Гц. Підставляючи значення в формулу (4.28) отримано:

$$L = \frac{0,124}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,949 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} .$$

Вибирано 2 реактори РТСТ-165-0,25У3(Т3):

Індуктивність, мГн0,25 мГн;

Номинальна напруга мережі, В.....410;

Номинальний струм, А (частоти 50 Гц).....165.

2.6.2. Розрахунок силового фільтра

Коефіцієнт фільтрації фільтру згідно з [12] визначено за формулою:

$$K_\phi = \frac{K}{\lambda} , \quad (2.29)$$

де K – коефіцієнт згладжування пульсації , який визначається по [12] :

$$K = \frac{K'_\Pi}{K_\Pi} , \quad (2.30)$$

де K'_Π – коефіцієнт пульсації U_d на вході фільтру ; згідно з [12] приймається $K'_\Pi = 0,057$;

K_Π – коефіцієнт пульсації на виході фільтру; згідно з [12] приймається $K_\Pi = 0,01$.

λ – коефіцієнт передачі постійної напруги фільтром; згідно [12] $\lambda = 0,97$.

Підставляючи отримані значення в (2.29) отримаємо:

$$K_{\phi} = \frac{5,7}{0,97} = 5,88$$

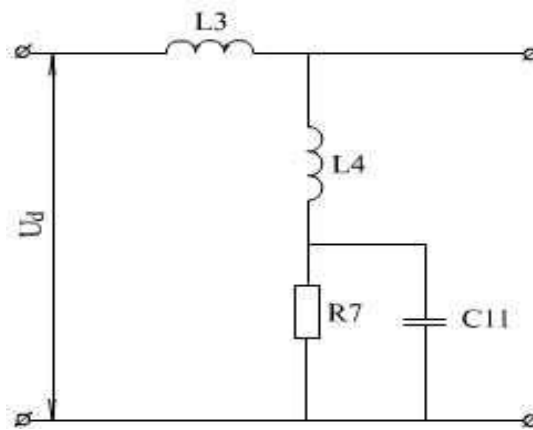


Рисунок 2.19 – Силовий фільтр

Беручи до уваги, що $K_{\phi} < 50$ вибирається одноланковий фільтр.

Ввімкненням конденсатора отримується самостійна ланка протікання змінної складової напруги U_d .

Таким чином, за допомогою конденсатора C11, що ввімкнений до фільтру, здійснюється розділення змінної та постійної складової у вихідній ланці випрямляча.

Згідно з [12] визначаємо величину LC, що характеризує фільтр:

$$LC = \frac{10(K_{\phi} + 1)}{m_n^2 \cdot \alpha^2}, \quad (2.31)$$

де L – індуктивність фільтру, Гн ;

C – ємність фільтру, мкФ;

m_n – коефіцієнт пульсації, що згідно [9] приймається $m_n = 6$;

α – коефіцієнт, що визначається згідно [9] за формулою:

$$\alpha = \frac{f_c}{50}, \quad (2.32)$$

де f_c – частота напруги мережі, Гц.

$$\alpha = \frac{50}{50} = 1$$

Після підстановки значень у (2.31) :

$$LC = \frac{10(5,88 + 1)}{6^2 \cdot 1} = 1,91 \quad \text{Гн} \cdot \text{мкФ.}$$

Мінімальна індуктивність , при якій забезпечується індуктивна реакція фільтру:

$$L_{\min} = \frac{2 \cdot R_H}{(m_n^2 - 1)m_n \cdot \omega} , \quad (2.33)$$

де R_n – опір навантаження, Ом:

$$r_H = \frac{U_d}{I_d} ; \quad (2.34)$$

$$r_H = \frac{466,7}{405} = 1,15 \quad \text{Ом.}$$

ω – кругова частота , рад /с:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_c ; \quad (2.35)$$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314,2 \quad \text{рад/с.}$$

Таким чином L_{\min} дорівнює :

$$L_{\min} = \frac{2 \cdot 1,15}{(6^2 - 1) \cdot 6 \cdot 314,2} = 0,349 \cdot 10^{-4} \quad \text{Гн.}$$

При проектуванні LC – фільтрів необхідно врахувати явище резонанса.

Для цього необхідно, щоб власна частота коливань фільтра $\omega = 1/\sqrt{LC}$ була менша ніж частота основної гармоніки пульсацій U_d і не була кратна їй.

Для розрахунку достатньо виконання умови:

$$\omega_{n(1)} L = (5 \dots 10) R_H ; \quad (2.36)$$

$$\frac{1}{\omega_{n(1)} C} = (0,5 \dots 1) R_H . \quad (2.37)$$

Звідси індуктивність фільтру:

$$L_{\phi} = \frac{(5...10) \cdot R_H}{\omega_{n(1)}} ; \quad (2.38)$$

$$L_{\phi} = \frac{(5...10) \cdot 1,15}{2 \cdot 3,14 \cdot 300} = 0,00305...0,0061 \text{ Гн} ;$$

Приймаємо $L_{\phi} = 0,006 \text{ Гн}$.

Ємність фільтру:

$$C_{\phi} = \frac{LC}{L_{\phi}} ; \quad (2.39)$$

$$C_{\phi} = \frac{1,91}{0,003} = 636,67 \text{ мкФ}.$$

Необхідно перевірити умову (2.37):

$$\frac{1}{\omega_{n(1)} \cdot C_{\phi}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 636,67 \cdot 10^{-6}} = 0,83 \text{ Ом}.$$

$$0,83 = 0,72 \cdot 1,15$$

Таким чином умова виконується. Для захисту конденсаторів фільтра та зняття з них перенапружень у схемі використовуються паралельно підключені резистори, величину опорів яких підраховано за співвідношенням:

$$U_{ост} = U_{ПС} \cdot e^{-\frac{t}{R_{\phi} C_{\phi}}}, \quad (2.40)$$

де $U_{ост}$ – остаточна напруга на конденсаторі; приймається згідно [12] :

$$U_{ост} = 0,1 \cdot U_d ; \quad (2.41)$$

$$U_{ост} = 0,1 \cdot 466,7 = 46,67 \text{ В} .$$

$U_{ПС}$ – початкове значення напруги на конденсаторі, що дорівнює :

$$U_{ПС} = 0,5 \cdot U_d ; \quad (2.42)$$

$$U_{ПС} = 0,5 \cdot 466,7 = 233,35 \text{ В} .$$

t – заряд конденсатора; приймається для даної схеми $t = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

R_{ϕ} – опір в ланцюзі розряда конденсатора, Ом;

C_ϕ – ємність конденсатора фільтру, мкФ.

В якості конденсатора С11 фільтру вибрано конденсатор типу:

ФПС-1-680 У3 із номінальною ємністю $C_H = 680$ мкФ.

Опір в ланцюзі фільтру із (2.40) виразиться співвідношенням:

$$R_\phi = -\frac{t}{C_1 \ln\left(\frac{U_{ocm}}{U_{ПС}}\right)} ; \quad (2.43)$$

$$R_\phi = -\frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{680 \cdot 10^{-6} \ln\left(\frac{46,67}{233,35}\right)} = 15,32 \text{ Ом} .$$

В якості R_ϕ вибрано стандартний блок резисторів ЯС – 3, $R_{заг} = 16$ Ом, $U=500$ В.

В якості згладжуючого реактора L3 вибрано реактор марки:

ФРОС3 – 5000 з індуктивністю 0,08 мГн.

Згідно з рекомендаціями [12] в якості демпфуючих конденсаторів випрямляча вибрано конденсатори типу: МБГЧ 0,25; $U_{ном} = 250 - 1000$ В, $C_{ном} = 0,25$ мкФ.

2.7 Розрахунок автономного інвертора напруги (АІН)

АІН, що застосовуються в розробленій схемі ТПЧ складається з 3 основних частин: міст основних тиристорів, міст комутуючих тиристорів та міст скидання надлишкової енергії.

До мосту основних тиристорів вмикаються так звані зворотні діоди. Вибір основних тиристорів АІН проводиться по середньому та діючим значенням струму, а також по величині максимальної зворотної напруги.

Для визначення середніх і діючих значень струмів тиристорів згідно з [13] користуються графічними залежностями, за якими струми визначаються з урахуванням коефіцієнта потужності навантаження та базового струму інвертора, який розраховано зі співвідношення :

$$I_0 = \frac{3I_d}{2\cos^2\varphi_H}, \quad (2.44)$$

де $\cos\varphi_H$ – коефіцієнт потужності двигуна, дорівнює $0,9$;

$$I_0 = \frac{3 \cdot 405}{2 \cdot 0,9^2} = 750 \text{ А}.$$

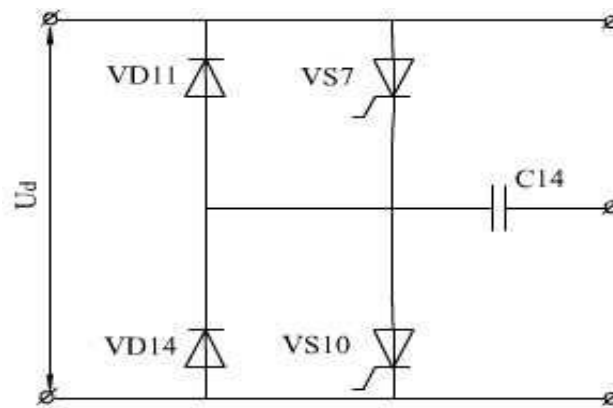


Рисунок 2.20 – Фаза А АІН

За вказаними залежностями визначено середній та діючий струм, що протікає через основні тиристри:

$$I_{сеп} = 0,29 \cdot I_0; \quad (2.45)$$

$$I_{сеп} = 0,29 \cdot 750 = 217,5 \text{ А}.$$

$$I_d = 0,48 \cdot I_0; \quad (2.46)$$

$$I_d = 0,48 \cdot 750 = 360 \text{ А}.$$

Попередньо, значення максимальної напруги, що діє на тиристри приймається рівною розрахованій раніше $U_{\max} = 535 \text{ В}$.

Максимальна зворотна напруга, що діє на основні тиристри АІН, залежить від максимальної напруги на комутуючому конденсаторі, що буде визначена пізніше.

Попередньо вибрано тиристор типу Т133 – 400.

Визначимо величину ємності комутуючого конденсатора. Контур комутації фази А зображений на рис.2.21.

Коефіцієнт, що характеризує відносне значення початкової напруги в ланцюзі комутації розраховано за формулою:

$$\varepsilon = \frac{U_{(0)} + U_K}{U_d} \quad (2.47)$$

де U_0 – початкова напруга на конденсаторі, В; згідно з [12] прийнято $U_0 = U_d = 466,7$ В;

U_K – напруга джерела підзаряду, згідно з [12] для даної схеми $U_K = 0$.

$$\varepsilon = \frac{466,7 + 0}{466,7} = 1.$$

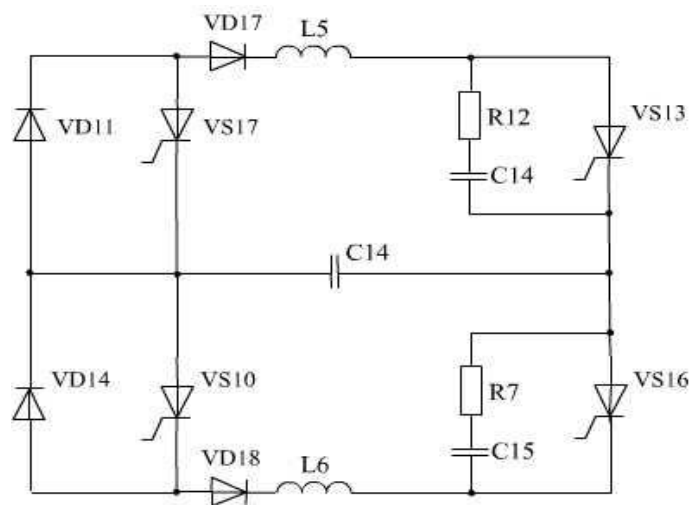


Рисунок 2.21 – Контур комутації фази А

Коефіцієнт навантаження комутуючого вузла:

$$K_{KP} = \frac{\varepsilon}{I_{CT} / I_{(0)}}, \quad (2.48)$$

де I_{CT} – амплітуда значення струму конденсатора в контурі комутації, А;

$I_{(0)}$ – струм на комутаційному інтервалі; згідно з [12] прийнято таким, що дорівнює струму навантаження безпосередньо перед комутацією $I_{(0)} = I_{\phi} = 292,78$ А.

Згідно з [12] приймається $I_{CT} / I_{(0)} = 1,15$.

$$K_{KP} = \frac{1}{1,15} = 0,87.$$

Характеристичний опір контура; Ом:

$$Z_C = X_{KP} \frac{U_d}{I_{(0)}}, \quad (2.49)$$

$$Z_C = 0,87 \cdot \frac{466,7}{292,78} = 1,387 \text{ Ом.}$$

Із комутаційної характеристики [13] визначається час запирання тиристора $\theta_{кр}$. При $\varepsilon = 1$, $K_{кр} = 0,87$ його значення буде $\theta_{кр} = 1,01$ рад.

Кутова частота контуру комутації, рад/с:

$$\omega_0 = \frac{\theta_{кр}}{K_{зап} \cdot t_b}, \quad (2.50)$$

де $K_{зап}$ – коефіцієнт запасу часу запирання тиристора; із [10] $K_{зап} = 2,0$;
 t_b – час запирання тиристора; для вибраного тиристора $t_b = 50 \cdot 10^{-6}$ с.

$$\omega_0 = \frac{1,01}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 10100 \text{ рад/с.}$$

Індуктивність комутуючого дроселя, Гн:

$$L_K = \frac{Z_C}{\omega_0}; \quad (2.51)$$

$$L_K = \frac{1,387}{10100} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Ємність комутуючого конденсатора, Ф:

$$C_K = \frac{1}{\omega_0 \cdot Z_C}; \quad (2.52)$$

$$C_K = \frac{1}{10100 \cdot 1,387} = 7,1 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$

Із [12] в якості L5, L6 вибрано дросель ДМ – 2,4 1,01 мГн.

В якості комутуючих конденсаторів С14 – С16 вибирається конденсатор типу ПСК – 0,7 – 30У2.

Максимальна напруга на конденсаторі, В: в процесі його перезаряду визначається по [13] визначається:

$$U_{CT} = U_d + Z_C \cdot I_{(0)}; \quad (2.53)$$

$$U_{CT} = 466,7 + 1,387 \cdot 292,78 = 872,78 \text{ В} .$$

Максимальна зворотня напруга на силових тиристорах згідно з [10] визначається максимальною напругою на комутуючому конденсаторі, тобто $U_{зв.мах} = U_{CT} = 872,78 \text{ В}$.

Попередньо вибраний тиристор Т133 – 400, таким чином, задовільняє дану схему в якості основного тиристора АІН.

Параметри захисних RC – ланцюгів згідно з [12] дорівнюють $C = 1 \text{ мкФ}$, $R_c = 0,1 \cdot U_{зв.мах}$, Ом; $R_c = 0,1 \cdot 872,78 = 87,3 \text{ Ом}$.

Спираючись на вибрані величини з [9] вибираються конденсатори С14 – С19 типу МБГЧ – 1 ємністю $C_H = 1 \text{ мкФ}$, робочою напругою $U_H = 1000 \text{ В}$.

В якості резисторів R12 – R17 застосовані резистори типу ПЕВ – 25 з $R_H = 91 \text{ Ом}$.

Вибір комутуючих тиристорів проводиться по максимальній напрузі на комутуючому конденсаторі та максимальному значенню його розрядного струму:

$$I = 1,15 \cdot I_{(0)} , \quad (2.54)$$

$$I = 1,15 \cdot 292,78 = 336,69 \text{ А} .$$

В якості комутуючих тиристорів VS13 – VS18 використані тиристори типу Т133 – 400, які співпадають з вибраними раніше.

Зворотні діоди вибрані за максимальною зворотною напругою $U_{зв.мах} = 872,78 \text{ В}$ та струмом, що протікає через діод:

$$I_d = I_{CT} - I_{(0)} , \quad (2.55)$$

$$I_d = 336,69 - 292,78 = 43,91 \text{ А} .$$

Для застосування в схемі в якості зворотніх діодів VD11 – VD16 вибираються діоди типу ДЛ112 – 10, $U_H = 1000 \text{ В}$, $I_H = 100 \text{ А}$.

Згідно з [13] опір в ланцюзі зкидання енергії визначено за співвідношенням:

$$R_3 = 4,5 \cdot Z_C ; \quad (2.56)$$

$$R_3 = 4,5 \cdot 1,387 = 6,24 \text{ Ом.}$$

Максимальна потужність розсіювання на резисторах:

$$P_3 = \frac{f_K \cdot C_K}{2} (U_{CT} - U_d)^2, \quad (2.57)$$

де f_K - частота проходження комутаційних процесів, $f_K = 50$ Гц.

$$P_3 = \frac{50 \cdot 7,1 \cdot 10^{-5}}{2} (872,78 - 466,7)^2 = 292,7 \text{ В.}$$

В якості резисторів зкидання енергії $R_{n1,2}$, $R_{n2,2}$ із [12] вибрані резистори типу ПЕВ- 7,5, $R_H = 7,5$ Ом.

Середнє значення струму, що протікає через зкидаючі діоди:

$$I_{сер} = \frac{U_{CT} - U_d}{R_3}, \quad (2.58)$$

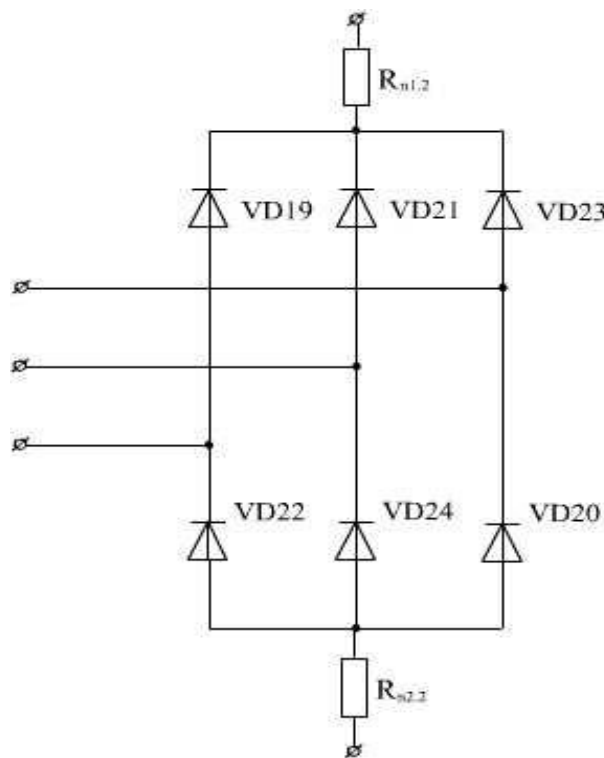


Рисунок 2.22 – Кола зкидання енергії

$$I_{сер} = \frac{872,78 - 466,7}{7,5} = 54,14 \text{ А.}$$

Зворотня максимальна напруга згідно [12] розрахована так:

$$U_{зв.маx} = 2 \cdot U_d, \quad (2.59)$$

$$U_{зв.мах} = 2 \cdot 466,7 = 933,4 \text{ В.}$$

По [12] в якості зворотних діодів вибрані діоди типу: ДЛ – 122 – 60 – 10 , $U_{зв} = 1000 \text{ В}$, $I_H = 60 \text{ А}$.

2.7.1 Розрахунок кіл підзаряду

Тривалість розряду комутуючого конденсатора. Згідно [13] вона дорівнює :

$$t_{розр} = \frac{C_K (U_{(0)} + U)}{I_{(0)}}, \quad (2.60)$$

де $U_{(0)}$ – початкова напруга на конденсаторі, $U_{(0)} = U_d = 466,7 \text{ В}$;

U – залишкова напруга на конденсаторі, згідно з [13] $U = 0$.

$$t_{розр} = \frac{7,1 \cdot 10^{-5} \cdot (466,7 + 0)}{292,78} = 113,18 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Потрібний струм підзаряду конденсатора:

$$I_{зар} = \frac{t_{розр} \cdot I_{см}}{T - t_{розр}}, \quad (2.61)$$

де T – міжкомутаційний період, с. Визначається за формулою:

$$T = \frac{1}{f_c}, \quad (2.62)$$

$$T = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с.}$$

Тоді струм підзаряду визначиться як :

$$I_{зар} = \frac{113,18 \cdot 10^{-6} \cdot 336,69}{0,02 - 113,18 \cdot 10^{-6}} = 1,916 \text{ А.}$$

Згідно із [13] випрямлена напруга джерела підзаряду $U_{d1} = U_{(0)} = 466,7 \text{ В}$.

Діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора по [10]:

$$U_2 = 0,71 \cdot U_{d1} = 0,71 \cdot 466,7 = 331,35 \text{ В} \quad (2.63)$$

Діюче значення струму у вторинній обмотці згідно [10]:

$$I_2 = 0,83 \cdot I_{d1}, \quad (2.64)$$

де I_{d1} – струм підзаряду, $I_{d1} = I_{зар} = 1,916 \text{ A}$;

$$I_2 = 0,83 \cdot 1,916 = 1,59 \text{ A.}$$

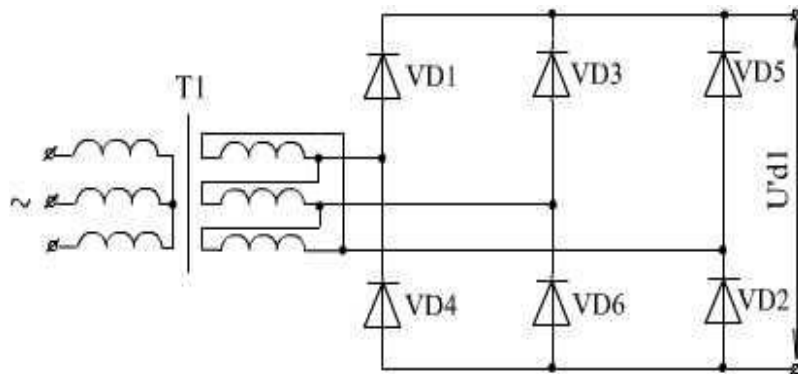


Рисунок 2.23 – Випрямляч кіл підзаряду

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$n_{TP} = \frac{U_1}{U_2} ; \quad (2.65)$$

$$n_{TP} = \frac{220}{331,35} = 0,664.$$

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора :

$$I_1 = \frac{I_2}{n_{TP}} ; \quad (2.66)$$

$$I_1 = \frac{1,59}{0,664} = 2,39 \text{ A.}$$

Розрахунок потужності первинної обмотки:

$$S_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1, \quad (2.67)$$

де m – число ефективних фаз, $m = 3$.

$$S_1 = 3 \cdot 220 \cdot 2,39 = 1577,4 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Розрахункова потужність вторинної обмотки:

$$S_2 = m \cdot U_2 \cdot I_2 ; \quad (2.68)$$

$$S_2 = 3 \cdot 331,35 \cdot 2,39 = 2375,8 \text{ В} \cdot \text{А} .$$

Типова потужність трансформатора, В·А:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2}; \quad (2.69)$$

$$S_T = \frac{1577,4 + 2375,8}{2} = 1976,6 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

В якості Т1 вибирається трансформатор типу ТСЗП – 160, Р_Т=134кВА.

Вибір вентилів випрямляча проводиться за допустимим струмом та максимальною зворотною напругою.

Середнє значення струму вентиля згідно [10] визначається:

$$I_{a.сep} = \frac{I_{d1}}{3}; \quad (2.70)$$

$$I_{a.сep} = \frac{1,916}{3} = 0,639 \text{ А}.$$

Ефективне значення струму, що проходить через діод :

$$I_{a.эф} = 0,65 \cdot I_{d1}; \quad (2.71)$$

$$I_{a.эф} = 0,65 \cdot 1,916 = 1,2454 \text{ А}.$$

Максимальна зворотня напруга:

$$U_{зв.мах} = 1,05 \cdot U_{d1}; \quad (2.72)$$

$$U_{зв.мах} = 1,05 \cdot 466,7 = 490,025 \text{ В}.$$

З урахуванням коливань напруги мережі $U_{зв.мах}$ необхідно збільшити на 30...50 %

$$U'_{зв.мах} = 1,5 \cdot 490,025 = 735,04 \text{ В}$$

Із [12] для схеми яку розглянуто, в якості діодів VD1 – VD6 вибрані діоди типу ДЛ 112 – 10 – 8, $U_{зв} = 800 \text{ В}$, $I_H = 10 \text{ А}$.

Значення індуктивності в ланцюзі підзаряду згідно [13]:

$$L = (0,1...1)L_K; \quad (2.73)$$

Підставивши значення L_K у формулу (2.73) можна отримати:

$$L = 0,8 \cdot 1,37 \cdot 10^{-4} = 0,11 \text{ мГн}.$$

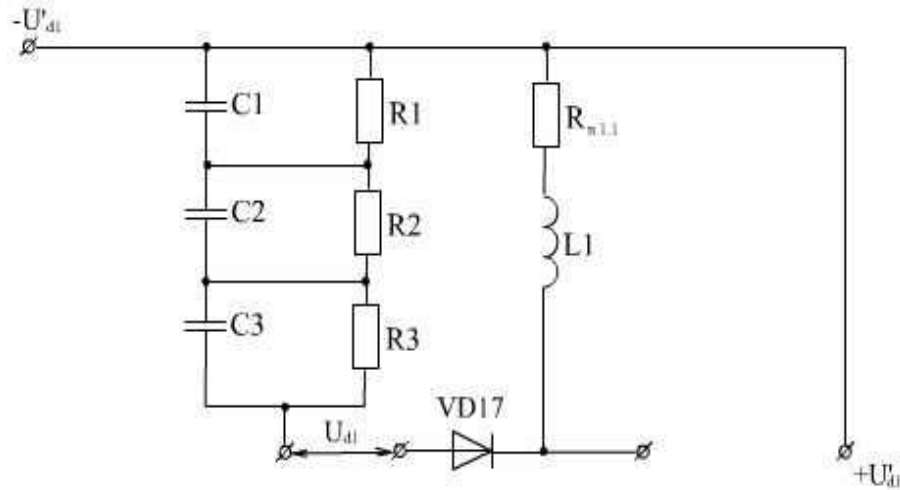


Рисунок 2.23 – Кола підзаряду

Вибір роз'єднувальних діодів проведено згідно допустимих значень напруги та струму.

Допустима зворотна напруга:

$$U_{зв.мах}^P = U'_{зв.мах} = 735,04 \text{ В}$$

Середнє значення струму вентиля:

$$I_{сер} = I_{d1} = 1,916 \text{ А}$$

В якості роз'єднувальних діодів (VD17) використані діоди типу ДЛ – 112 – 10 – 8.

Значення ємності фільтруючого конденсатору (C1, C2, C3) згідно з [10] дорівнює:

$$C_{\phi} = \frac{1}{2 \cdot K_n \cdot \omega \cdot R_{d1}} ; \quad (2.74)$$

де K_n - коефіцієнт пульсації випрямленої напруги на виході фільтра і згідно з [13] приймається $K_n = 0,01$;

R_{d1} - опір навантаження, Ом . Згідно з [10] визначено за формулою:

$$R_{d1} = \frac{U_{d1}}{I_{d1}} ; \quad (2.75)$$

$$R_{d1} = \frac{466,7}{1,916} = 2,436 \cdot 10^2 \text{ Ом.}$$

ω – кутова частота, $\omega = 314,2$ рад/с.

Після підстановки значень у формулу (2.74):

$$C_{\phi} = \frac{1}{2 \cdot 0,01 \cdot 314,2 \cdot 2,436 \cdot 10^2} = 65,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$

По [12] вибрано конденсатор типу К50 – 7 ємністю $C_{\phi 1} = 200$ мкФ та $U_H = 250$ В. Для отримання потрібної ємності необхідно ввімкнути послідовно три конденсатори (на схемі С1 – С3).

Отримана ємність буде $C_{\phi} = 67$ мкФ. Розрахунок опору фільтра проведено за формулою (2.43) для ємності $C_{\phi 1}$, та часу заряду конденсатора, який приймається $t = 0,001$ с. для даної схеми. Значення $U_{ост} = 46,67$ В, $U_{сп} = 233,35$ В.

$$R_{\phi} = \frac{0,001}{200 \cdot 10^{-6} \ln\left(\frac{46,67}{233,35}\right)} = 32,57 \text{ Ом.}$$

По [12] вибираються резистори типу ПЕВ200 $R_H = 33$ Ом. Для отримання потрібного опору необхідно послідовно ввімкнути 3 резистори (на схемі R1...R3).

Опір $R_{n1.1}$ у ланцюзі підзаряду дорівнює опору $R_{n1.2}$ вибраному раніше, в якості якого застосовується резистор типу ПЕВ – 7.5 $R_H = 7,5$ Ом.

Були розраховані всі основні елементи силової частини ТПЧ, що розробляється. З довідникової літератури, були виписані відповідні типи та марки розрахованих елементів на базі тих, що зараз випускаються вітчизняною промисловістю.

2.7.2 Вибір плат керування КВ та АІН, а також плати регулювання

Розроблена схема силової частини ТПЧ потребує застосування відповідної схеми керування (СК) для здійснення регулювання швидкості обертання привідного двигуна відповідно.

Беручи до уваги розроблену функціональну схему для даного ТПЧ, СК може включати наступні складові частини:

- плата керування КВ (ПКВ);
- плата керування АІН (ПКІ);
- плата регулювання (ПР);
- ланцюги керування, контролю та захисту (ККЗ).

ПКВ повинна виконувати функцію формування керуючих імпульсів випрямляча залежно від задаючої напруги.

ПКІ необхідна для вироблення імпульсів керування мостом основних та комутуючих тиристорів АІН.

ПР – необхідна для формування лінійно – змінного сигналу з регульованим темпом зростання чи зпадання для керування розгоном, гальмуванням та зупинкою двигуна; для формування сигналів зворотного зв'язку за струмом, частотою, напругою, та вихідній координаті ЕП; для формування перехідних процесів, регулювання напруги, частоти та вихідної координати.

Згідно з потребами стандартизації та уніфікації нового обладнання, в приводі, що розробляється в якості ПКВ, ПКІ, ПР доцільно було б використати стандартні розроблені вузли вітчизняного виробництва, що відповідають вимогам сучасності.

У розробленій схемі ТПЧ в якості силових тиристорів КВ , основних та комутуючих тиристорів АІН використовуються силові тиристири типу Т133-400 із напругою на електроді керування $U_f = 1,75 - 3,5$ В.

Враховуючи це в якості зазначених плат використані ПКВ, ПКІ та ПР комплектного тиристорного ЕП серії ЕКТ2Д вітчизняного виробництва.

Ланцюги керування, контролю та захисту повинні виконувати зв'язок між силовою частиною ТПЧ та ПКВ, ПКІ та ПР, функції вмикання та вимикання ЕП, забезпечення його захисту, сигналізації, автоматичного повторного ввімкнення після короткочасного зменшення напруги, а також повинні включати органи керування ЕП.

2.8 Висновки за розділом

У другому розділі магістерської роботи виконано комплексний інженерний синтез та повне теплотехнічне й електротехнічне обґрунтування комбінованої енергоефективної системи опалення виробничого приміщення на базі теплового насоса з використанням низькопотенційного тепла ґрунту та сонячної генерації. На основі результатів попереднього теоретичного аналізу розроблено принципову структурну схему комбінованого джерела тепlopостачання, яка поєднує відновлювані й незалежні енергетичні ресурси у єдину інтегровану систему з можливістю автоматизованого керування режимами роботи.

Розрахунок теплового насоса з урахуванням теплового навантаження виробничого приміщення дав змогу визначити оптимальні параметри холодильної машини, коефіцієнт перетворення (COP), а також оцінити його сезонну ефективність за умов реальних коливань температури ґрунту. Доведено, що використання ґрунтового тепла як базового джерела забезпечує стабільність тепlopостачання, незалежність від коливань зовнішньої температури повітря та скорочення експлуатаційних витрат порівняно з традиційними системами електричного чи газового опалення.

Проведено детальний розрахунок навантаження сонячних батарей, на основі якого здійснено вибір оптимальної фотогальванічної конфігурації та проаналізовано її здатність частково або повністю компенсувати енергоспоживання системи, особливо в денний період найвищої інсоляції. Підібрано інвертор-перетворювач, що забезпечує якісне перетворення постійної напруги сонячних панелей у змінну з необхідними параметрами для живлення електропривода теплового насоса та для потенційної роботи в автономному або гібридному з мережею режимі.

Виконано розрахунок та обґрунтований вибір циркуляційного насоса, що забезпечує необхідний тепловий потік і стабільність теплоносія в контурі теплового насоса, враховуючи гідравлічний опір трубопроводів і теплотехнічні

втрати. Отримано параметри, що гарантують мінімальні енергетичні втрати та відповідність вимогам до надійності експлуатації.

Особливу увагу приділено електротехнічній складовій системи. Розроблено функціональну схему електропривода теплового насоса на базі асинхронного двигуна та високоефективної системи керування з використанням транзисторного перетворювача частоти.

Проведено розроблення принципової силової схеми, включно з керованим випрямлячем, реакторами згладжування, силовим фільтром та автономним інвертором напруги.

Виконані розрахунки основних електричних параметрів підтвердили електромагнітну сумісність, енергоефективність та запас динамічної стійкості системи при змінності навантажень.

Окремо обрано плати керування та регулювання, що забезпечують реалізацію інтелектуальних алгоритмів адаптивного керування тепловим насосом з можливістю інтеграції в систему автоматизації промислового рівня.

Доведено технічну та енергетичну доцільність використання комбінованої системи на базі теплового насоса та сонячної генерації, а також підтверджено працездатність розробленого електропривода й усіх його силових і керуючих підсистем.

3 ДОСЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розроблення принципової схеми кіл керування, контролю та захисту

Кола керування, контролю та захисту складаються з наступних функціональних вузлів:

- вузла струмового захисту (В1);
- вузла вмикання / вимикання (В2);
- вузла вмикання охолодження вентилів (В3);
- вузла контролю температури пари (В4);
- вузла живлення (В5);
- вузла автоматичного повторного вмикання (АПВ) (В6);
- вузла захисту від обриву фази двигуна (В7).

До схеми ланцюгів ККЗ також відноситься блок живлення розроблений на основі стандартного блока живлення для ЕКТ2Д, та ланцюги датчиків, індикації та ручного керування.

Схема принципова ланцюгів ККЗ зображена на кресленні. Вузол струмового захисту складається з наступних пристроїв:

- 1) пристрою захисту від максимального струму, що виконаний на мікросхемах А1, DD1.1, DD1.2, DD2;
- 2) пристрою захисту від перевантаження на А2, А3, А4, DD3.1, DD3.2, DD2;
- 3) пристрою захисту від зниження напруги більше 15% та при її зникненні, що виконаний на мікросхемі А6.

Вузол вмикання / вимикання має наступні складові:

- 1) основний пристрій вмикання / вимикання на DD13.1, DD13.2;
- 2) каналу вимикання на DD14, DD12 та вмикання на DD14, DD15, DD16 при зниженні напруги мережі більше 15%;

- 3) канал вимкнення ЕП на DD8, DD10, DD11, DD12 при спрацюванні захисту від максимального струму, струму перевантаження та обриву фази двигуна;
- 4) пристрій вимкнення ЕП при натисканні кнопки „Вмикання” на DD13.1, DD13.2;
- 5) пристрій вимкнення ЕП при зниженні та зникненні напруги мережі на DD13.1, DD13.2;
- 6) каналу вмикання вимикача на DD8; DD9; DD13.1, DD13.2; DD6; DD7; VT3 .

Вузол вмикання охолодження вентилів складається із пристрою вмикання двигуна вентилятора при перевищенні допустимого значення температури вентилів на A5, DD17, VT4.

Вузол живлення призначений для отримання стабілізованого значення напруги живлення всіх зазначених вузлів.

Вузол контролю тиску пари складається з датчика тиску пари, що виробляє аналоговий сигнал $U_{датч}$, пристрою завдання опорної напруги $U_{оп}$ та пристрою порівняння, який реалізований так:

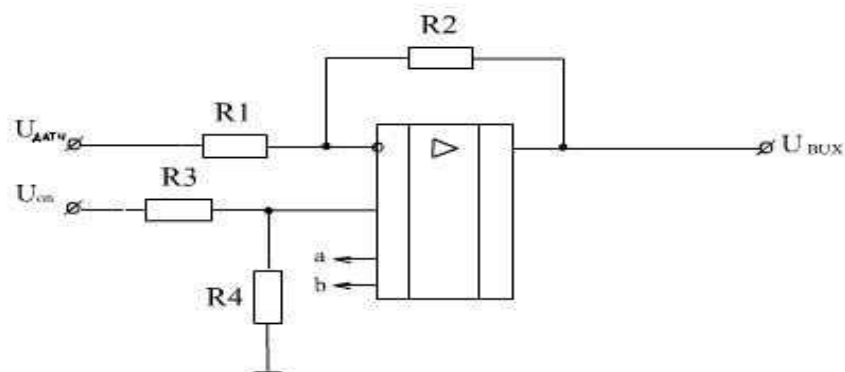


Рисунок 3.1 – Пристрій порівняння вузла контролю тиску пари

Вузол повторного автоматичного вмикання (АПВ) призначений для вмикання ЕП через встановлений час після вимкнення в разі короткочасного зменшення напруги живлення ЕП або зриву інвертора.

Вузол захисту від обриву фази призначений для аварійного відключення ЕП при обриві однієї з фаз двигуна.

При натисканні кнопки „Вмикання” на пульті керування ЕП логічний „0” надходить на DD13.2 на його виході з’явиться логічна „1”, що призводить до:

- подачі сигналу „Вмикання вимикача” через DD6, DD7, VT3 (B2);
- вмикання автоматичного вимикача головних ланцюгів через V2 (БЖ);

При натисканні кнопки „Вимикання” логічний „0” переключає тригер DD13 у стан „1” по виходу DD13.1, що призводить до:

- подачі сигналу „Вмикання розчеплювача” через DD5, VT1;
- вмикання розчеплювача через V1 (БЖ) та відключення вимикача;
- вмикання сигналу „Вимкнення” через DD4;
- вмикання сигналу „відкривання вентилів” через DD6, VT2.

Захист від максимального струму повинен забезпечуватись при струмі на вході ЕП більше $(3,5...4) I_H$.

Для отримання сигналу пропорційного струму на вході ЕП застосовується трансформатор струму ТА1 та трифазний мостовий випрямляч.

При появі аварійного струму вище установки компаратора А1, на його виході отримується логічний „0”, що встановлює тригер DD1.1, DD1.2 в стан логічного „0”. Загорається сигнальна лампа „Максимальний струмовий захист”.

Логічний „0” з виходу DD1.1, DD1.2 через DD8 призводить до:

- вмикання розчеплювача через DD9, DD5, VT1 (B1) та V2 (БЖ);
- вмикання всіх основних тиристорів АІН;
- знеструмлення котушки вимикача через DD9, DD6, DD7, VT3 (B2);
- вмикання сигналізації „Вимкнено” через DD13.1 (B2);

Захист від струму перевантаження забезпечується при струмі на вході ЕП більше $(1,3...1,4) I_H$.

При появі струму вище уставки струмового перевантаження спрацьовує компаратор А2 (B1).

При збільшенні напруги на виході інтегратора А3 (B1) до рівня, що визначається резистором R20 спрацьовує компаратор А4. При цьому DD3.1,

DD3.2 встановлюється в стан логічного „0” , що призведе до загоряння сигнальної лампи „Перевантаження”.

Логічний „0” на виході тригера DD3.1, DD3.2 призводить до спрацювання ланцюгів аналогічно спрацюванню максимального струмового захисту.

Для захисту від зниження напруги мережі більше 15% або її зникнення використовується компаратор А6 (В1), канал вимкнення ЕП DD14, DD12 та канал ввімкнення DD14, DD15, DD16.

При зменшенні напруги на R31 більше ніж на 15% від опорної напруги стабілітрона V1 (В1) на виході А6 з’явиться логічна „1”, що через канал вимкнення DD14, DD12 змінить стан тригера DD13.1, DD13.2 (В2), що призведе до вимкнення ЕП.

Для повторного ввімкнення ЕП, якщо напруга мережі нормалізується, застосовується АПВ.

Захист силових тиристорів від перегрівання здійснюється на А5, DD17, VT4 (В3).

При підвищенні температури вище допустимої і появи напруги вимірювального моста вище установки компаратора А5 на його виході отримується логічна „1” , яка відкриває транзистор VT4, через який проходить ланцюг живлення контактора вимикача двигуна вентилятора . Вмикається двигун , загоряється сигнальна лампа „Охолодження вентилів”. При зменшенні температури двигун вентилятора відключається.

Регулювання напруги уставки А5 проводиться шляхом підстроювання змінних опорів R26, R29.

Для захисту від обриву фази двигуна (ТН) застосовується вузол (В7).

З датчиків струму ТА2, ТА3, ТА4 , що встановлені в ланцюгах вихідних фаз двигуна сигнали поступають на (В7).

При обриві однієї з фаз двигуна відбувається вимкнення двигуна та загоряється сигнальна лампа „Обрив фази двигуна”.

Для отримання сигналу напруги на виході ТПЧ використовується трансформатор ввімкнений у вихідні фази перетворювача. Сигнал з трансформатора напруги надходить на плату регулювання.

Для контролю за струмом та напругою двигуна з боку оператора у вихідні ланцюги ввімкнений амперметр А1, а на виході випрямляча – вольтметр V1.

Регулювання швидкістю компресора здійснюється так. Спочатку необхідне значення тиску пари встановлюється вручну зміною швидкості обертання двигуна. Це проводиться установкою сигналу завдання $U_{завд}$ змінними резисторами R41 та R40 грубого і точного регулювання швидкості. Візуальне спостереження за сигналом датчика тиску проводиться по вольтметру V2 „Тиску пари”, що винесений на панель керування.

Після встановлення необхідного значення V1 перемикачем S3 встановлюється автоматичне завдання швидкості. Сигнал зворотного зв'язку по тиску пари, що надходить з датчика порівнюється на пристрої порівняння з опорною напругою $U_{оп}$, що була встановлена при ручному регулюванні. При автоматичному регулюванні тиску пари на виході (ТН) утворюється сигнал $U'_з$, який зменшується із зменшенням напруги $U_{датч}$ на датчику тиску пари, і відповідно збільшується із його збільшенням, зменшуючи чи збільшуючи швидкість двигуна. Тим самим здійснюється підтримання значення тиску пари на виході (ТН) з достатньою точністю, і забезпечується потрібна температура пари у системі.

Таким чином була розроблена схема ланцюгів ККЗ, які складаються з вузлів струмового захисту, захисту від падіння напруги, захисту від обриву фази привідного двигуна, захисту від зриву інвертора та ланцюгів автоматичного і ручного керування. Засоби індикації і контролю доцільно винести на окрему панель керування разом з органами ручного управління.

3.2 Розроблення та дослідження структурної схеми ЕП

Схема з'єднань визначає конструктивне виконання електричних з'єднань в ЕП. На схемі зображені всі пристрої та елементи, що входять до складу виробу, всі їх вхідні та вихідні елементи та з'єднання між ними.

До розробленого ЕП входять наступні елементи:

- силова частина ТПЧ;
- блок живлення (БЖ);
- плата керування випрямлячем (ПКВ);
- плата керування інвертором (ПКІ);
- плата регулювання (ПР);
- ланцюги керування, контролю та захисту (ККЗ).

Елементи, що складають ЕП, доцільно показати окремими блоками у вигляді прямокутників без значення їх внутрішніх з'єднань. При цьому в прямокутниках розміщені таблиці з характеристиками вхідних і вихідних ланцюгів, а зовні прямокутника – таблиці з адресами зовнішніх з'єднань пристрою.

Пристроєм, що зображені у вигляді прямокутників на схемі присвоєні позиційні позначення: А1.1, А1.2 – БЖ; А2 – ПКІ; А3 – ланцюги ККЗ; А4 – силова частина; А5 – ПКВ; А6 – ПР.

Кожній таблиці в схемі присвоєно позиційне позначення. Таблиці позначені Х1 – Х17.

Характеристики та номери контактів для пристроїв, електричні принципові схеми яких були розроблені в рамках цього дипломного проекту, співпадають на принципових схемах та схемі з'єднань .

Для вибраних стандартних пристроїв ПКВ, ПКІ, ПР на схемі показані тільки ті контакти, які використовуються для підключення в розробляемому ЕП.

Таким чином, була розроблена схема електрична з'єднань ЕП, за допомогою якої були поєднані всі окремі елементи системи. Стало можливим представлення ЕП, як цілісного виробу.

Прийнявши ряд допущень систему ТПЧ з АД як САР можна показати спрощено, як двохконтурну систему підпорядкованого керування, що винесена на креслення. Вона включає в себе внутрішній контур регулювання напруги та зовнішній контур регулювання тиску пари на виході. Контур регулювання напруги показаний на рис.3.2.

Контур регулювання напруги складається з керованого випрямляча (КВ), фільтра (Ф), автономного інвертора напруги (АІН), кола зворотного зв'язку з датчиком напруги та регулятором напруги.

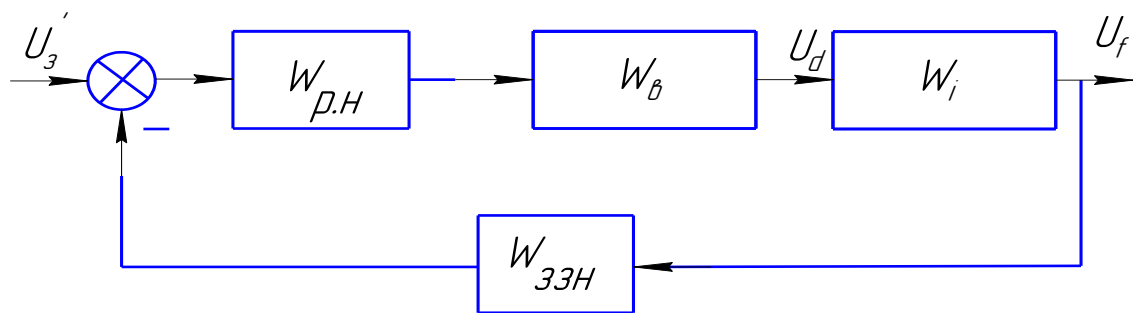


Рисунок 3.2 - Структурна схема контуру регулювання напруги

Зворотній зв'язок в контурі використовується для підвищення жорсткості вихідної напруги. Напруга завдання U_3' подається на вхід контура, порівнюється із сигналом зворотного зв'язку по вихідній напрузі контура U_f' . Сигнал розузгодження відпрацьовується регулятором напруги, надходить на КВ. Випрямлена напруга U_d перетворюється в АІН у напругу змінної частоти U_f .

Керований випрямляч разом із згладжуючим фільтром спрощено можна представити безінерційною ланкою із коефіцієнтом перетворення K_B . Згідно з [14] K_B приймає значення, $K_B = 2,34$.

АН представлений аперіодичною ланкою 1 – го порядку із передавальною функцією:

$$W_i = \frac{1}{T_e p + 1}, \quad (3.1)$$

де T_e – еквівалентна стала часу інвертора; згідно з [4] приймається $T_e = 0,04$ с.

$$W_i = \frac{1}{0,04p + 1}.$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за напругою:

$$W_{3.3.H} = \frac{U_{д.н}}{U_f}, \quad (3.2)$$

де $U_{д.н}$ – напруга датчика напруги, при відповідній напрузі U_f , В;

U_f - вихідна напруга контура, В.

При U_f рівному мінімальному значенню $U_f = 380$ В, напруга датчика напруги по [14] $U_{д.н} = 19$ В.

Тоді передавальна функція зворотного зв'язку :

$$W_{3.3.H} = K_{3.3.H} = \frac{19}{380} = 0,05.$$

В якості регулятора напруги використано ПІ – регулятор напруги із передавальною функцією :

$$W_{P.H} = \frac{K_{P.H}}{T_{P.H} p}, \quad (3.3)$$

де $K_{P.H}$ – коефіцієнт передачі регулятора; згідно [14] $K_{P.H} = 2,86$;

$T_{P.H}$ – постійна часу регулятора напруги; по [14] $T_{P.H} = 0,01$ с.

Передавальна функція регулятора напруги:

$$W_{P.H} = \frac{2,86}{0,01p} = \frac{1}{0,0035p}.$$

Передавальна функція одноконтурної системи:

$$W_{KH} = \frac{W_{np}(p)}{1 + W_{np}(p) \cdot W_{3.3.H}(p)}, \quad (3.4)$$

де $W_{np}(p)$ - передавальна функція прямого каналу контуру регулювання напруги :

$$W_{np}(p) = W_{p.H}(p) \cdot W_{\epsilon}(p) \cdot W_i(p). \quad (3.5)$$

Після підстановки значень в формулу :

$$W_{np}(p) = \frac{1}{0,0035} \cdot 2,34 \cdot \frac{1}{0,04p+1} = \frac{2,34}{0,00014p^2 + 0,0035p}.$$

Підставляючи отримані значення в формулу (3.5) :

$$W_{KH} = \frac{\frac{2,34}{0,00014p^2 + 0,0035p}}{1 + \frac{2,34}{0,00014p^2 + 0,0035p}} = \frac{2,34}{0,00014p^2 + 0,0035p + 0,117}.$$

Якщо контур регулювання напруги показати аперіодичною ланкою з передавальною функцією $W_{KH}(p)$ то систему ЕП можна представити як одноконтурну, що показана на рис.3.3.

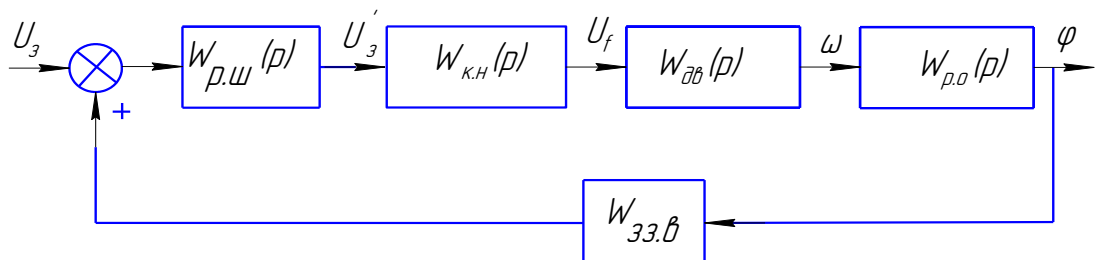


Рисунок 3.3 - Спрощена структурна схема системи ТПЧ з АД

Система складається з контуру регулювання напруги, асинхронного електродвигуна та робочого органа.

Асинхронний двигун можна представлений аперіодичною ланкою 1 – го порядку:

$$W_{\delta\epsilon}(p) = \frac{K_{\delta}}{T_{\delta}p + 1}, \quad (3.6)$$

де K_{δ} - коефіцієнт передачі двигуна [14]:

$$K_{\delta} = \frac{\omega_H}{U_{fH}}, \quad (3.7)$$

де ω_H - номінальна кутова швидкість обертання вала двигуна:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60}; \quad (3.7)$$

де n_2 - номінальна швидкість обертання вала:

$$n_2 = n_1(1 - S); \quad (3.8)$$

де n_1 - синхронна швидкість обертання ОМП:

$$n_2 = 3000(1 - 0,019) = 2943 \text{ об/хв.}$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2943}{60} = 308,03 \text{ с}^{-1}.$$

$U_{\text{фн}}$ – номінальна напруга живлення двигуна ; $U_{\text{фн}} = 380 \text{ В.}$

$$K_\delta = \frac{308,03}{380} = 0,81 \text{ рад / В} \cdot \text{с.}$$

T_d – постійна часу двигуна; по [14] для асинхронного двигуна 0,096 с.

Після підстановки значень:

$$W_{\delta}(p) = \frac{0,81}{0,096p + 1}.$$

Робочий орган представлений зворотною безінерційною ланкою:

$$W_{P.O}(p) = \frac{1}{K_{P.O}}, \quad (3.9)$$

де $\frac{1}{K_{P.O}}$ - коефіцієнт передачі робочого органа:

$$\frac{1}{K_{P.O}} = \frac{\varphi_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}},$$

де φ_{max} - максимальне значення температури пари на виході (ТП), $^{\circ}\text{C}$;

$$\varphi_{\text{max}} = 60^{\circ}\text{C};$$

ω_{max} - значення швидкості , при якій стиснена пара досягає значення

$$\varphi_{\text{max}}, \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{\text{max}} = 308,3 \text{ с}^{-1}.$$

$$\frac{1}{K_{P.O}} = \frac{60}{308,3} = 0,25.$$

В якості регулятора швидкості використано безінерційну ланку із коефіцієнтом передачі $W_{рш} = K_{рш} = 0,02$ згідно з [14].

Зворотний зв'язок, реалізований за допомогою датчика температури пари на виході, представлений пропорційною ланкою з коефіцієнтом передачі $W_{3.3.6} = K_{3.3.6} = 0,5$ по [14].

Передавальна функція системи, відповідно з рис.3.3. розраховується за формулою:

$$W_c(p) = \frac{W_{\text{пр}}(p)}{1 - W_{\text{пр}}(p) \cdot W_{3.3.6}(p)}, \quad (3.10)$$

де $W_{\text{пр}}(p)$ - передавальна функція прямого каналу системи:

$$W_{\text{пр}}(p) = W_{KH}(p) \cdot W_{\text{дс}}(p) \cdot W_{PO}(p) \cdot W_{PII}(p); \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{пр}}(p) &= \frac{2,34}{0,00014p^2 + 0,0035p + 0,117} \cdot \frac{0,81}{0,096p + 1} \cdot 0,25 \cdot 0,02 = \\ &= \frac{0,0095}{(0,00014p^2 + 0,0035p + 0,117)(0,096p + 1)}. \end{aligned}$$

Підставляючи значення $W_{3.3.6}(p)$ та $W_{\text{пр}}(p)$ в формулу (3.11) отримується:

$$W_c(p) = \frac{0,0095}{1,34 \cdot 10^{-5} p^3 + 4,76 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,0145p + 0,1156}.$$

3.3 Оцінка стійкості автоматизованого електроприводу

За отриманою передавальною функцією системи з використанням програми „MathCad” побудовані логарифмічні амплітудочастотна та фазочастотна характеристики системи.

З урахуванням передавальних функцій окремих ланок структурна схема системи має вигляд:

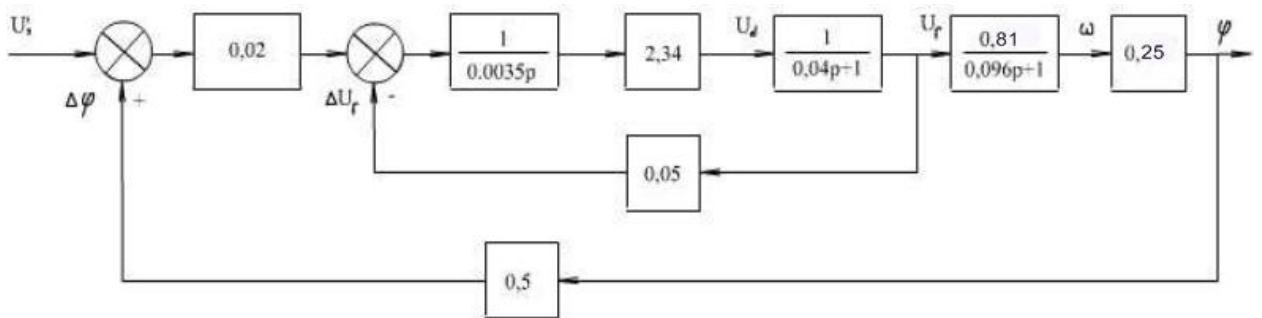


Рисунок 3.4 - Структурна схема ТПЧ з АД

Для визначення стійкості системи необхідно побудувати АФХ або логарифмічні амплітудну й фазову характеристики $L(\lambda)$ і $\varphi(\lambda)$.

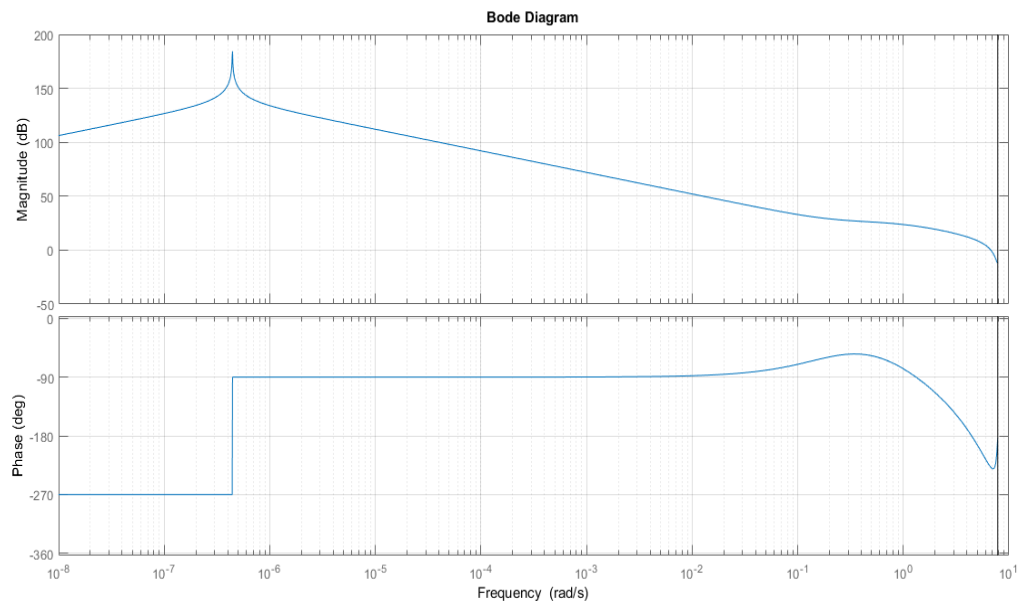


Рисунок 3.5 - Амплітудна і фазова характеристики системи

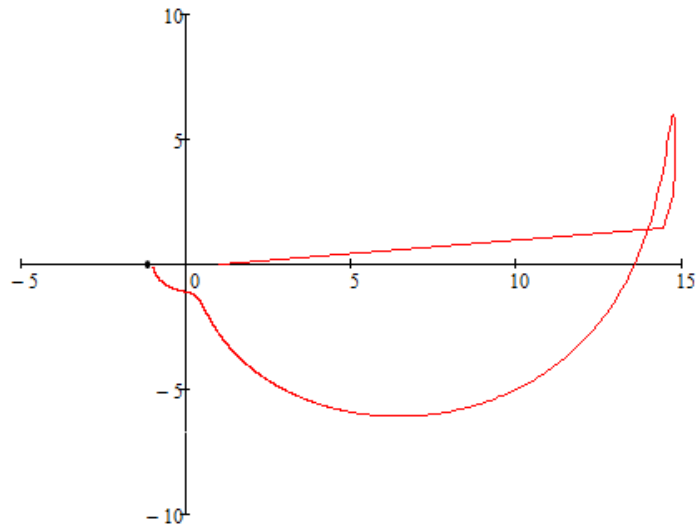


Рисунок 3.6 - Критерій Найквіста

Висновок - система стійка оскільки характеристика не охоплює точку з координатами $(-1;0)$

Аналіз логарифмічних частотних характеристик та графіків перехідних процесів показує, що стійкість системи забезпечується.

3.4 Висновки за розділом

У третьому розділі магістерської роботи виконано дослідно-конструкторське опрацювання автоматизованого електропривода теплового насоса, спрямоване на забезпечення його надійності, функціональної гнучкості та стійкості в експлуатаційних режимах. На основі результатів попереднього розділу було розроблено, структурно деталізовано та досліджено повний комплекс схем керування, контролю й захисту електропривода з урахуванням специфіки теплотехнічного навантаження та необхідності енергоощадної роботи системи.

Побудовано принципову схему кіл керування, контролю та захисту, що забезпечує реалізацію багаторівневої системи безпеки з автоматичним реагуванням на критичні режими за напругою, струмом, температурою, перевантаженням і відмовами силової електроніки. Забезпечено можливість

авторестарту та пріоритетної логіки керування для збереження безперервності теплопостачання.

Виконано розробку та дослідження структурної схеми електропривода з чітким розподілом функцій між силовою, керуючою та датчиковою підсистемами. Проведено аналіз функціональної взаємодії елементів системи, підтверджено адекватність алгоритмів керування динамічним змінам теплового навантаження, а також узгодженість системи керування з вимогами енергоефективності та автономності роботи в умовах гібридного енергопостачання.

Проведено оцінку стійкості автоматизованого електропривода в різних режимах роботи, включаючи пускові, перехідні та стаціонарні стани. Доведено, що обрана структура системи керування забезпечує стійкість по моменту та частоті обертання, мінімізує коливальні процеси та гарантує швидке повернення до номінального режиму після зовнішніх збурень. Підтверджено, що система відповідає вимогам автоматизованих енергоощадних електроприводів виробничого призначення.

Отже, результати проведених дослідно-конструкторських робіт підтверджують практичну реалізованість, надійність і стабільність функціонування розробленого автоматизованого електропривода теплового насоса.

ВИСНОВОКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на підвищення енергоефективності систем опалення виробничих приміщень шляхом розроблення автоматизованого електропривода теплового насоса із комбінованим використанням низькопотенційного тепла ґрунту та енергії сонячної батареї.

На основі проведеного аналітичного огляду встановлено, що теплові насоси є одним із найбільш перспективних напрямів енергозберігаючих технологій, які дозволяють зменшити споживання традиційних енергоносіїв. Показано доцільність використання саме ґрунтового тепла як стабільного джерела низькопотенційної енергії, а також підтверджено високу ефективність інтеграції сонячних фотоелектричних систем для компенсації електроспоживання теплового насоса.

У конструкторсько-розрахунковій частині розроблено принципову схему комбінованого енергокомплексу «тепловий насос – сонячна батарея». Проведено повні розрахунки теплового навантаження на систему опалення та обґрунтовано вибір теплового насоса необхідної продуктивності. Визначено потужність та кількість сонячних панелей, підібрано інвертор, елементи схеми живлення та електронних перетворювачів.

На основі аналізу режимів роботи здійснено вибір і синтез системи електропривода теплового насоса на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та тиристорного перетворювача частоти. Розроблено функціональну і принципові схеми силової та керуючої частин ЕП, виконано розрахунок керованого випрямляча, реакторів, фільтра та автономного інвертора напруги. Обґрунтовано вибір плат керування й регулювання, а також запропоновано структурну схему системи автоматизованого керування та захисту.

Практична цінність роботи полягає в тому, що представлена система забезпечує стабільну теплоподачу з мінімальним енергоспоживанням та

можливістю автоматизованого контролю параметрів. Запропоноване рішення поєднує екологічність, надійність та адаптивність до реальних умов експлуатації.

Отримані результати підтверджують ефективність розробленої енергоощадної комбінованої теплотехнічної системи та створюють передумови для її впровадження в сучасних промислових і аграрних об'єктах з метою скорочення витрат на енергоресурси та підвищення автономності енергозабезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Андрійчук В. Г. Енергоефективні теплотехнічні системи: монографія. – Київ: Наукова думка, 2020. – 314 с.
- 2) Бойко І. І., Сидоренко О. М. Теплові насоси та їх застосування в системах опалення: навч. посіб. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2019. – 256 с.
- 3) Гончарук О. В. Автоматизовані системи керування енергетичними установками: навч. посіб. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 212 с.
- 4) Дьяків О. П. Енергоефективність електроприводів теплогенеруючих установок : монографія. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2022. – 188 с.
- 5) Кучеренко С. О. Відновлювані джерела енергії в теплопостачанні: навч. посіб. – Полтава: ПолтНТУ, 2018. – 228 с.
- 6) Савчук О., Мельник Л. Сонячна енергетика: сучасний стан і перспективи: монографія. – Суми: СумДУ, 2021. – 340 с.
- 7) Плешаков Г. Г. Системи автоматичного керування в енергетиці: навч. посіб. – Київ: Ліра-К, 2020. – 272 с.
- 8) Погорілий А. М. САД/САМ/САЕ-технології у проектуванні енергоефективних систем. – Львів: ЛНУ, 2023. – 198 с.
- 9) Козловський В. М. Автоматизовані електроприводи : теорія і проектування : підруч. – Київ : КПІ, 2020. – 376 с.
- 10) Нікітченко І. П. Теплопостачання та відновлювана енергетика: навч. посіб. – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 244 с.
- 11) IEEE Std 1566-2015. Adjustable Speed AC Drive Systems: standard. – IEEE, 2015. – 56 p.
- 12) IEC 61800-3:2022. Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: normative document. – IEC, 2022. – 142 p.
- 13) European Heat Pump Association (EHPA). Annual Report 2024 [Електронний ресурс]. – Brussels, 2024. – Режим доступу: <https://www.ehpa.org>

- 14) Energy Efficiency Directive (EU) 2023/1791 [Електронний ресурс]. – European Parliament, 2023. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu>
- 15) Lund J., Boyd T. Geothermal Heat Pumps: State of the Art Review. – Renewable Energy, 2023. – 48 p.
- 16) Beausoleil-Morrison I. Principles of Heat Pumps for Heating and Cooling. – Amsterdam: Elsevier, 2023. – 412 p.
- 17) Müller T., Keller S. Power Electronics for Renewable Energy Sources. – Chichester: Wiley, 2021. – 358 p.
- 18) Vas P. Vector Control of AC Machines. – Oxford: Oxford University Press, 2020. – 408 p.
- 19) Bollen M., Hassan F. Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems. – New York: Wiley, 2022. – 370 p.
- 20) Datta A., Chakraborty C. Power Electronics for Solar and Wind Systems. – Berlin: Springer, 2023. – 286 p.
- 21) Bottaro G. Solar-Assisted Heat Pump Systems. – London: Taylor & Francis, 2022. – 296 p.
- 22) Calderon A. Intelligent Control in Energy Systems. – Boca Raton: CRC Press, 2021. – 264 p.
- 23) Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Аналітичний огляд стану ВДЕ в Україні, 2024 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ive.org.ua>

ДОДАТКИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ
КОНДРАТЮКА»

КАФЕДРА АВТОМАТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**Розроблення автоматизованого електропривода
теплового насосу системи опалювання виробничого
приміщення**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Д. В. РИБКА

Керівник:

д.т.н., професор

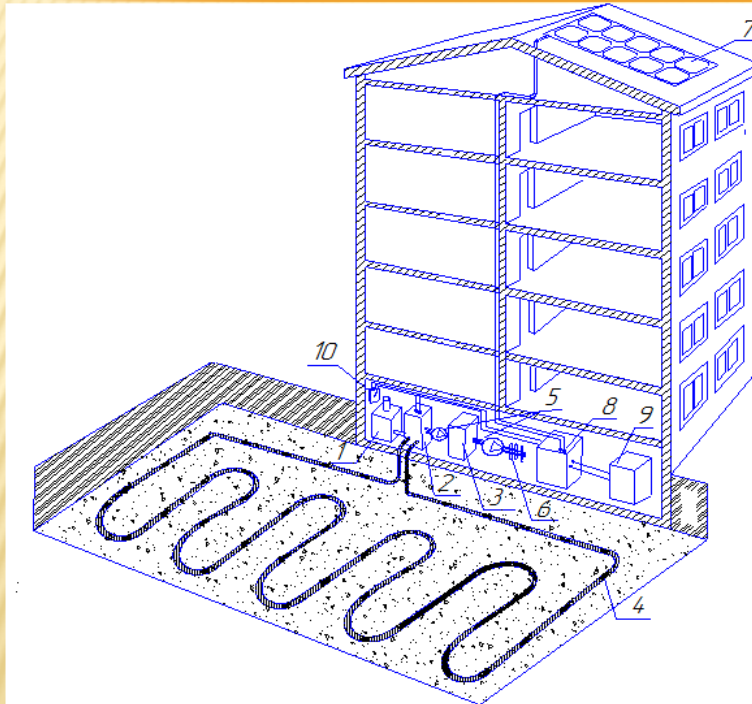
О. В. ШЕФЕР

Полтава 2025

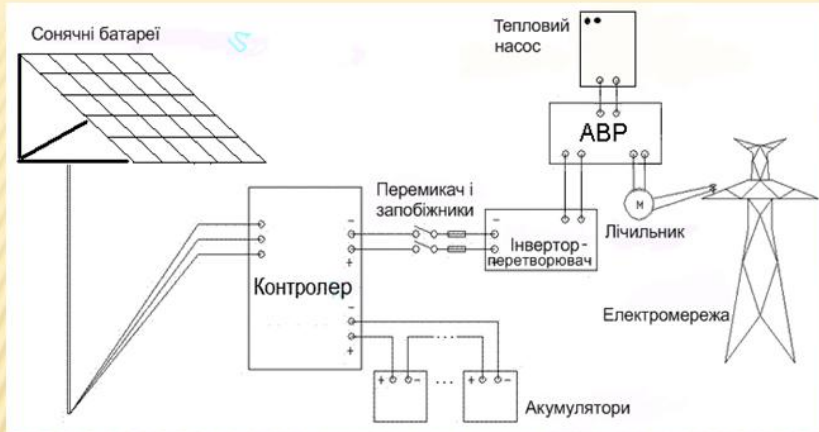
Метою магістерської роботи є розроблення автоматизованого електропривода теплового насоса системи опалювання виробничого приміщення з регулюванням режимів роботи на основі принципів енергоефективності та прогнозного керування.

Об'єкт дослідження – система опалювання виробничого приміщення на базі теплового насоса.

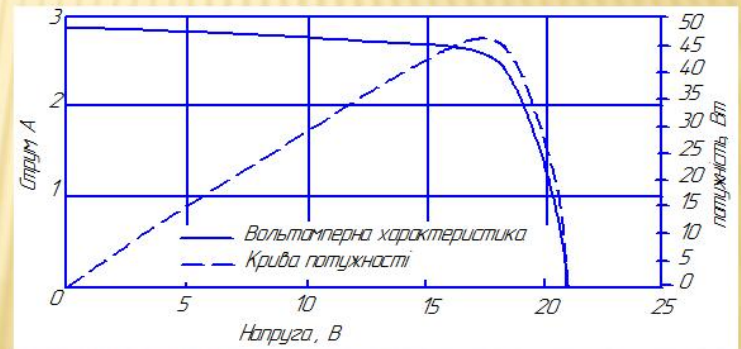
Предмет дослідження – автоматизований електропривод компресора теплового насоса з сучасною системою керування.



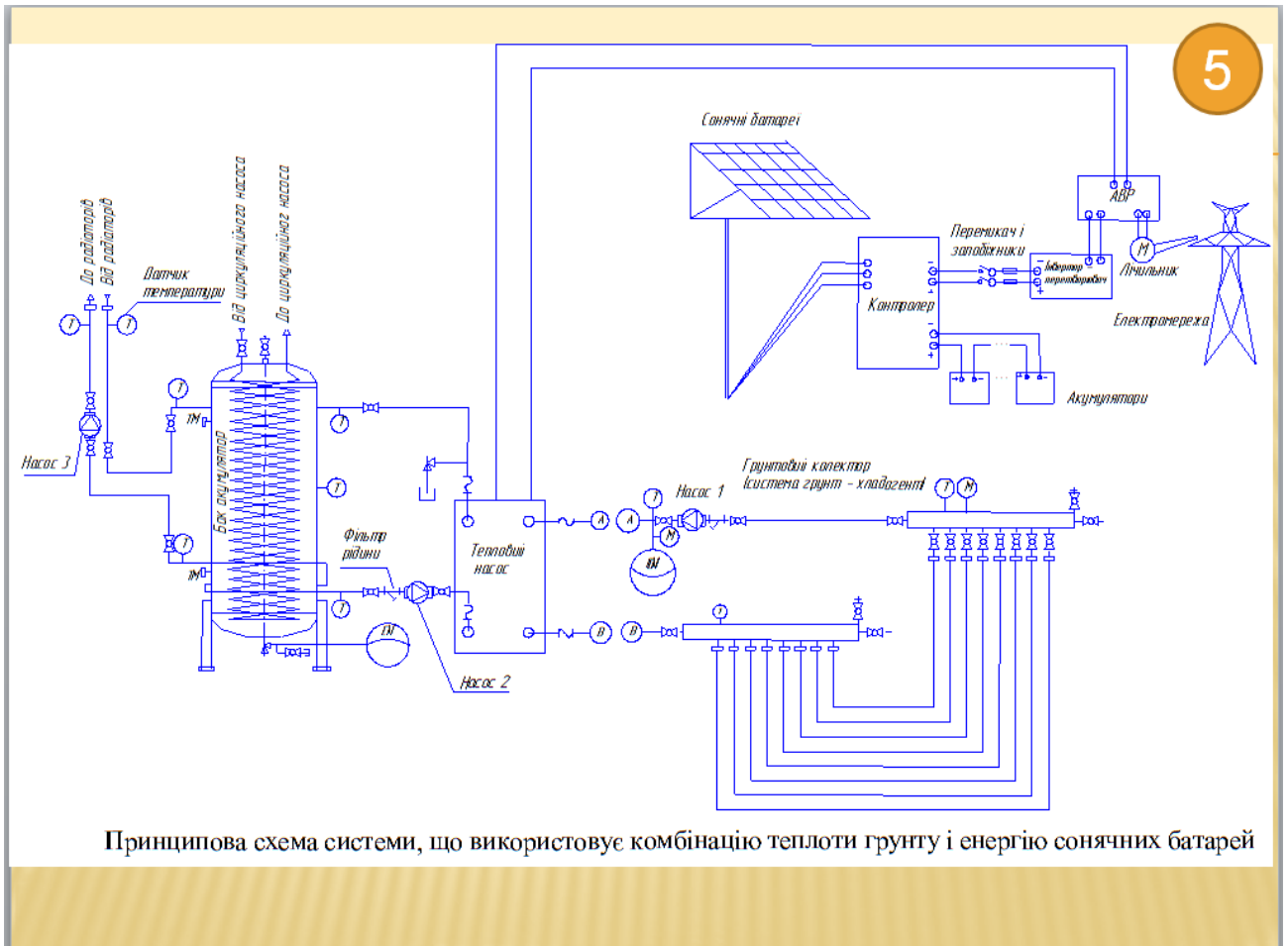
Теплонасосна система збирання тепла ґрунту, з живленням від сонячних батарей: 1 - бойлер; 2 - бак акумулятор; 3 - тепловий насос; 4 - система збору тепла ґрунту; 5 - циркуляційні насоси; 6 - нагрівальні прилади системи; 7 - сонячна батарея; 8 - контролер заряду акумуляторних батарей з інвертором; 9 - акумуляторні батареї; 10 - щитова

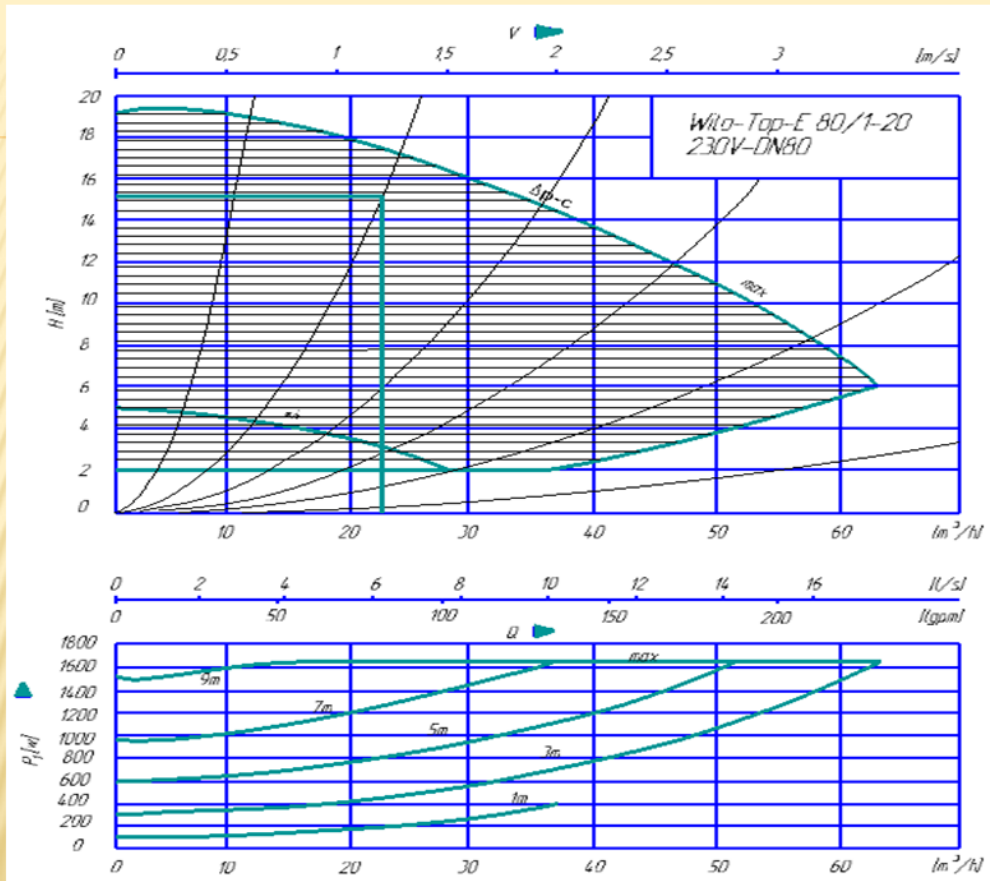


Функціональна схема живлення теплового насоса від сонячних батарей



Вольтамперна характеристика сонячної станції





Робочі характеристики регулювання теплового циркуляційного насосу Wilo TOP E81

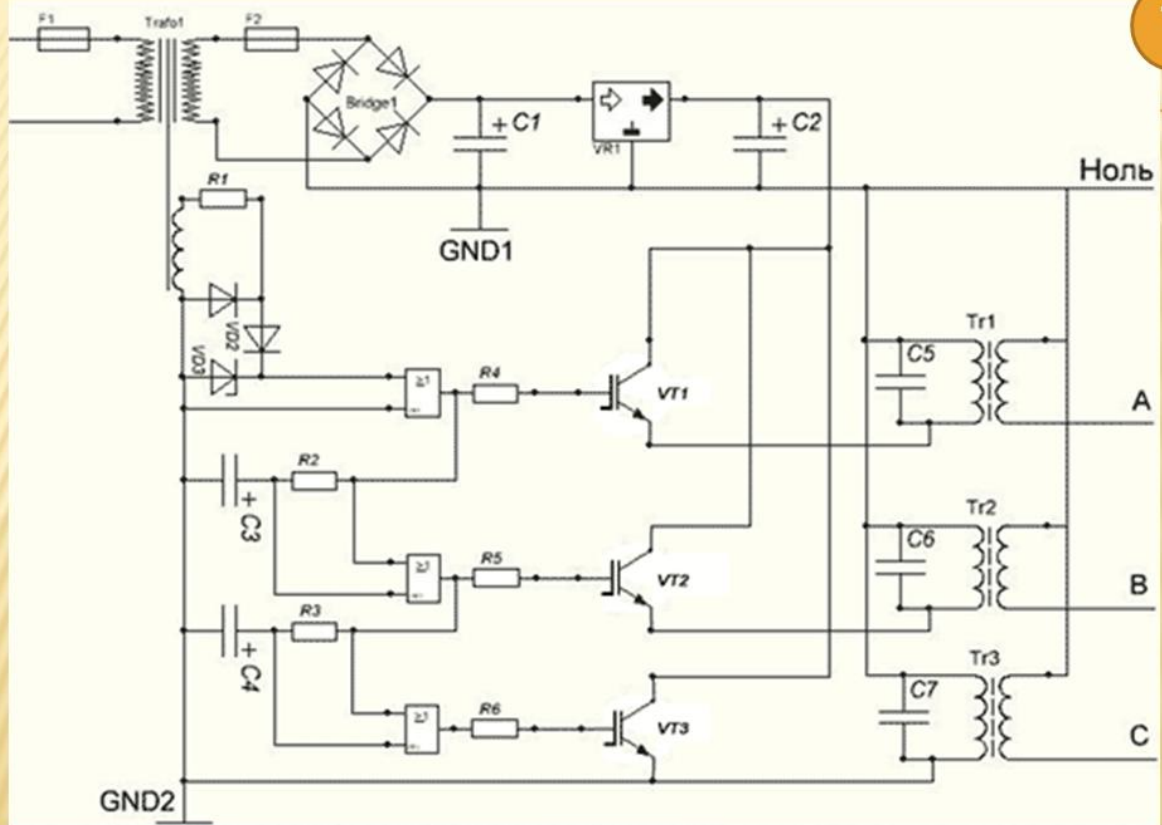
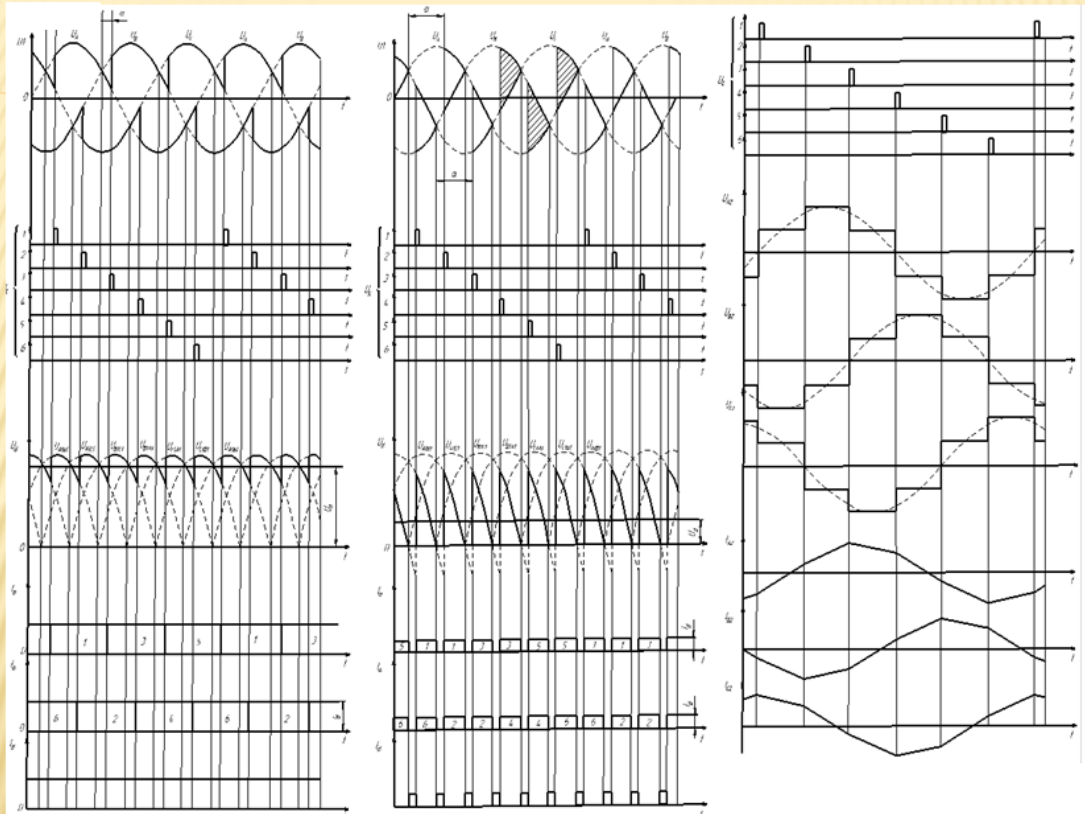
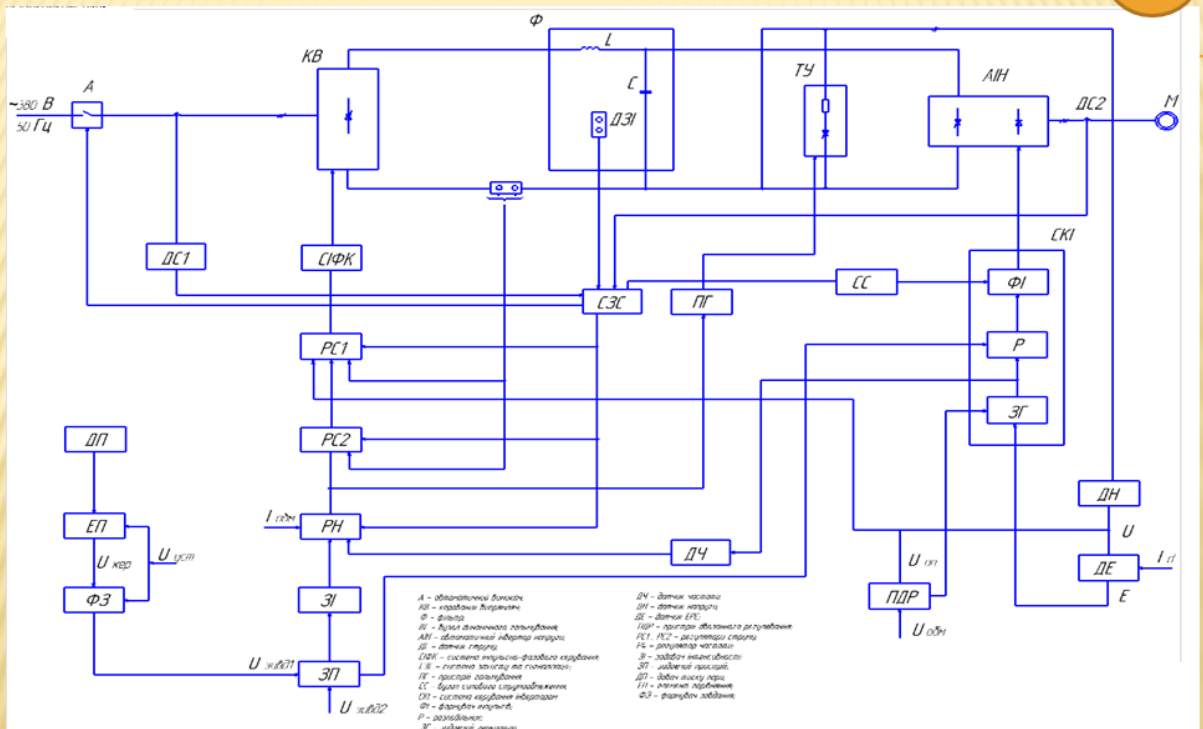


Схема інвертора на IGBT-транзисторах



Діаграми напруг та струмів за різних кутів керування $0 < \alpha < 60$



Функціональна схема тиристорного перетворювача

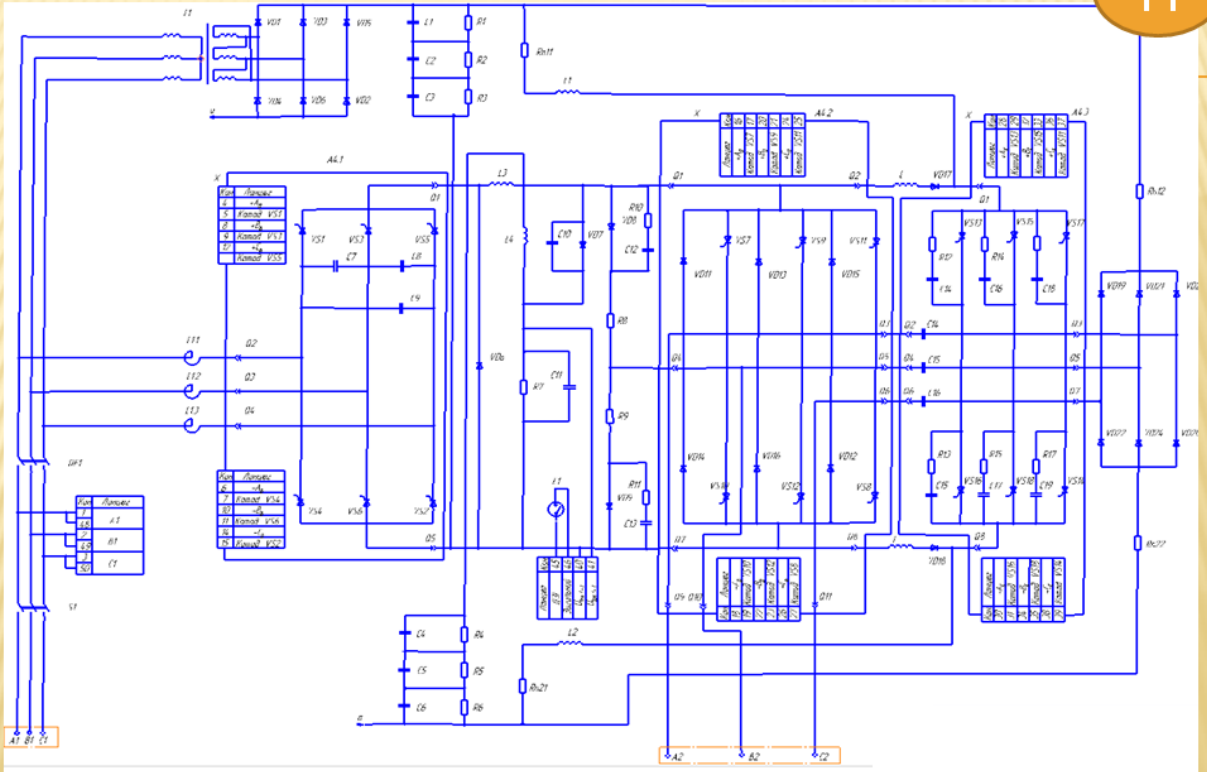
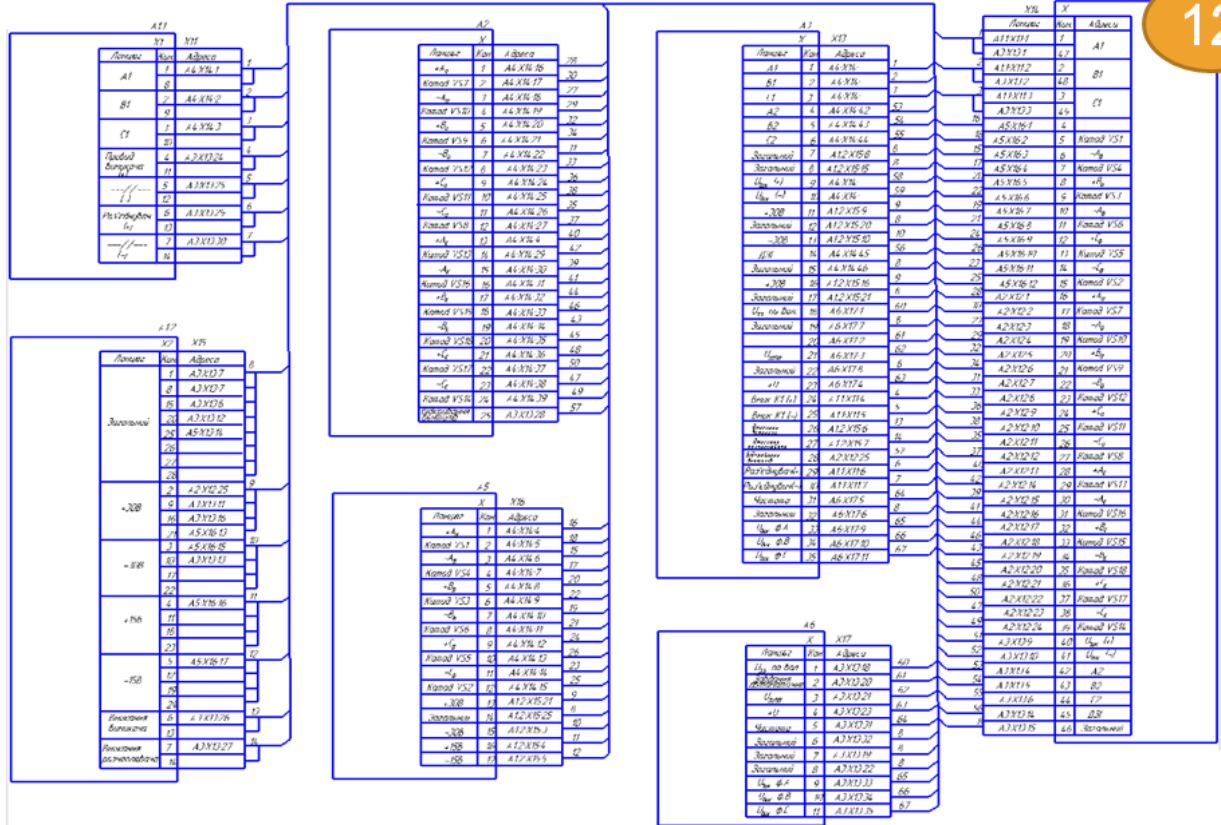
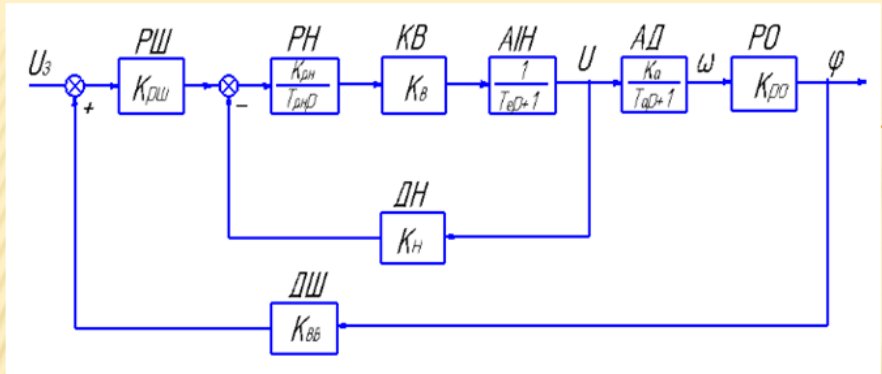


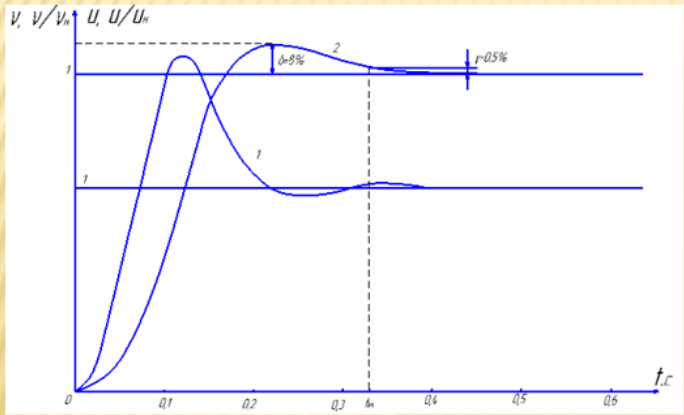
Схема електрична принципова силової частини тиристорного перетворювача



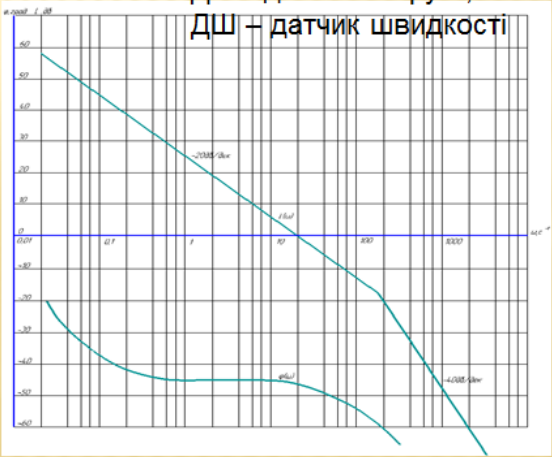
Монтажна схема електричної частини системи тепlopостачання виробничого приміщення



РШ – регулятор швидкості;
 РН – регулятор напруги;
 КВ – керований випрямляч;
 АИН – автономний інвертор напруги;
 АД – асинхронний двигун;
 ДН – датчик напруги;
 ДШ – датчик швидкості



1 – перехідний процес зміни напруги в часі;
 2- перехідний процес зміни тиску в системі теплостачання в часі.



Частотні характеристики електроприводу

Висновки

14

Основні результати кваліфікаційної роботи магістра полягають у наступному:

- ✘ На основі проведеного аналітичного огляду встановлено, що теплові насоси є одним із найбільш перспективних напрямів енергозберігаючих технологій, які дозволяють зменшити споживання традиційних енергоносіїв. Показано доцільність використання саме ґрунтового тепла як стабільного джерела низькопотенційної енергії, а також підтверджено високу ефективність інтеграції сонячних фотоелектричних систем для компенсації електроспоживання теплового насоса.
- ✘ У конструкторсько-розрахунковій частині розроблено принципову схему комбінованого енергокомплексу «тепловий насос – сонячна батарея». Проведено повні розрахунки теплового навантаження на систему опалення та обґрунтовано вибір теплового насоса необхідної продуктивності. Визначено потужність та кількість сонячних панелей, підібрано інвертор, елементи схеми живлення та електронних перетворювачів.
- ✘ На основі аналізу режимів роботи здійснено вибір і синтез системи електропривода теплового насоса на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та тиристорного перетворювача частоти. Розроблено функціональну і принципові схеми силової та керуючої частин ЕП, виконано розрахунок керованого випрямляча, реакторів, фільтра та автономного інвертора напруги. Обґрунтовано вибір плат керування й регулювання, а також запропоновано структурну схему системи автоматизованого керування та захисту.
- ✘ Практична цінність роботи полягає в тому, що представлена система забезпечує стабільну теплоподачу з мінімальним енергоспоживанням та можливістю автоматизованого контролю параметрів. Запропоноване рішення поєднує екологічність, надійність та адаптивність до реальних умов експлуатації.
- ✘ Отримані результати підтверджують ефективність розробленої енергоощадної комбінованої теплотехнічної системи та створюють передумови для її впровадження в сучасних промислових і аграрних об'єктах з метою скорочення витрат на енергоресурси та підвищення автономності енергозабезпечення.