

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна**  
**академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна**

Кафедра \_\_\_\_\_ АМтаЕТ \_\_\_\_\_

До захисту допущено  
**Завідувач кафедри**

(підпис)

\_\_\_\_\_ д.т.н., професор Канюк Г.І.

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_

спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
 робототехніка

освітньо-професійна програма \_\_\_\_\_

тема «Підвищення якості керування сонячною батареєю шляхом  
 удосконалення системи керування»

**Виконав (ла)**

студент (ка) групи ДЕА-23мг \_\_\_\_\_  
 (шифр групи)

\_\_\_\_\_ **КРАВЧЕНКО Ольга Олексіївна**  
 (ім'я, прізвище)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ к.т.н., Близниченко О.М.  
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

**Рецензент роботи**

\_\_\_\_\_ к.т.н., Буданов П.Ф.  
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

**Консультант** \_\_\_\_\_  
 (назва розділу)

\_\_\_\_\_ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

(підпис)

Засвідчую, що у цій роботі  
 немає цитат та вилучень з  
 праць інших авторів без відповідних  
 посилань  
 студент(ка) \_\_\_\_\_  
 (підпис)

- Актуальність теми, існуюче обладнання сонячної батареї, недоліки та переваги існуючих систем керування сонячною батареєю, порівняльний аналіз систем керування, висновки.

## 6. Консультант:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата      |                     | Оцінка<br>(бали) |
|--------|-------------|-------------------|---------------------|------------------|
|        |             | Завдання<br>видав | Завдання<br>прийняв |                  |
|        |             |                   |                     |                  |

7. Дата видачі завдання « 14 » 09 2024 р.

Керівник

  
 (підпис)

Близниченко О.М.

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

  
 (підпис)

Кравченко О.О.

(ім'я, прізвище)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної роботи

| №<br>з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання | Позначки керівника про виконання завдань |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------|
| 1        | Аналіз існуючих систем керування                                                | 14.10-28.10      | виконано                                 |
| 2        | Аналіз характеристик систем керування в різних режимах роботи                   | 28.10-05.11      | виконано                                 |
| 3        | Порівняльний аналіз                                                             | 05.11-14.11      | виконано                                 |
| 4        | Експериментальні дослідження                                                    | 14.11-28.11      | виконано                                 |
| 5        | Висновки                                                                        | 28.11            | виконано                                 |

Студент (ка)

  
 (підпис)

Кравченко О.О.

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

  
 (підпис)

Ключка Є.П.

(ім'я, прізвище)

## ЗМІСТ

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                           | 6  |
| Розділ 1. Аналіз сучасних сонячних електростанцій .....                                              | 8  |
| 1.1. Постановка проблеми.....                                                                        | 8  |
| 1.2. Система орієнтації .....                                                                        | 8  |
| 1.3. Аналіз ринку.....                                                                               | 10 |
| 1.1 Основні режими роботи сонячних електростанцій .....                                              | 12 |
| 1.4. Схема слідкуючого електроприводу сонячних електростанцій .....                                  | 12 |
| 1.6. Особливості режимів роботи сонячних електростанцій та вимоги до їх електроприводів .....        | 15 |
| 1.7. Обґрунтування вибору основної структури електроприводу сонячних електростанцій, що стежить..... | 18 |
| 1.8. Висновок у розділі .....                                                                        | 22 |
| Розділ 2. Розрахунок двигуна слідкуючого електроприводу сонячної електростанції.....                 | 23 |
| 2.1. Визначення головних розмірів та вибір електромагнітних навантажень .....                        | 23 |
| 2.2. Визначення кількості пазів та їх розмірів .....                                                 | 31 |
| 2.3. Розрахунок проти-ЕРС.....                                                                       | 41 |
| 2.4. Активні та індуктивні опори .....                                                               | 47 |
| 2.5. Втрати сталі, механічні та додаткові втрати.....                                                | 50 |
| 2.6. Висновки за розділом 2.....                                                                     | 53 |
| Розділ 3. Дослідження системи керування слідкуючого електроприводу.....                              | 54 |
| 3.1. Опис системи стеження .....                                                                     | 54 |
| 3.2. Моделювання системи стеження .....                                                              | 55 |
| 3.3. Результати моделювання системи стеження .....                                                   | 58 |

|                                                            |                                     |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 3.4. Висновок за розділом 3 .....                          | 61                                  |
| Розділ 4. Ресурсоефективність та ресурсозбереження .....   | 63                                  |
| 4.1. Аналіз технічних і конкурентних рішень .....          | 63                                  |
| 4.2. Планування комплексу робіт із створення проекту ..... | 66                                  |
| 4.3. Визначення трудомісткості робіт .....                 | 69                                  |
| 4.4. Бюджет наукового дослідження.....                     | 71                                  |
| 4.4.1. Розрахунок основної заробітної плати .....          | 71                                  |
| 4.4.2. Відрахування до позабюджетних фондів.....           | 74                                  |
| 4.4.3. Витрати електроенергії .....                        | 75                                  |
| 4.4.4. Накладні витрати .....                              | 75                                  |
| 4.5. Оцінка порівняльної ефективності дослідження.....     | 76                                  |
| 4.6. Висновок за розділом 4 .....                          | 79                                  |
| Список використаних джерел .....                           | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |

## Вступ

Вироблення достатніх запасів чистої енергії для майбутнього – одна із найскладніших проблем суспільства. Альтернативні джерела відновлюваної енергії, такі як сонячна, можуть задовольнити потреби людини в електроенергії. Покривши 0,16% поверхні Землі сонячними панелями з 10% ефективністю забезпечило б 20 ТВт потужності, що майже вдвічі перевищує світовий рівень споживання викопної енергії. Пряме перетворення сонячного світла на електрику здійснюється через сонячні елементи.

Добовий та сезонний рух Землі впливає на інтенсивність випромінювання сонячних систем. Системи позиціонування переміщують сонячні батареї, щоб компенсувати ці рухи, зберігаючи найкращу орієнтацію щодо Сонця. Хоча використання систем орієнтації не є обов'язковим, його наявність може збільшити зібрану енергію з 10 до 80% у різні періоди часу та географічні умови. Однак не рекомендується використовувати систему стеження для невеликих сонячних панелей через високі втрати енергії в приводних системах. Виявлено, що споживання енергії пристроєм відстеження становить 2-3% збільшеної енергії.

Багато систем орієнтації працюють у режимі автосупроводу чи покрокового стеження, безперервно і може розташовуватися у місцях, віддалених від населених пунктів. Подібні системи забезпечуються спеціальними електроприводами, що стежать, які відрізняються такими особливостями:

- низьким енергоспоживанням;
- можливістю автономної роботи протягом тривалого терміну експлуатації;
- безперервністю високоточного відстеження небесного об'єкта за умов його оптичної ненаблюдаемости.

У літературі зустрічається безліч робіт, які описують дану тематику [1–7].

Завдання високоточного стеження положення Сонця з використанням його координат наштовхує на ряд труднощів, пов'язані з узгодженістю кутової швидкості повороту рами сонячної батареї зі швидкістю проходження небесного об'єкта. Через непостійну орбітальну швидкість руху Сонця по еліптичній орбіті та обурювальних впливів на панель виникають відхилення швидкості повороту сонячної батареї від необхідної. Через неточності кінематики та моменти обурення електроприводу СЕС, що стежить, точної узгодженості досягти неможливо. Тому при виборі елементів системи стеження для забезпечення необхідної точності орієнтації сонячної батареї протягом дня необхідно виконувати облік найбільш істотних факторів, що впливають на точність стеження.

Об'єктом дослідження є система орієнтації сонячної батареї. У роботі розглядаються різні режими роботи систем стеження за Сонцем, проводиться моделювання.

Метою даної є моделювання та аналіз впливу на похибку роботи динамічних характеристик системи орієнтації сонячної електростанції, що здійснює стеження за переміщенням руху Сонця по еліптичній орбіті на основі його координат.

Завдання випускної кваліфікаційної роботи:

- Виконати аналітичний вибір експлуатації систем орієнтації сонячних батарей;
- Виконати огляд робіт різних типів систем орієнтації;
- Розрахувати основні параметри і провести моделювання слідкуючого електроприводу;
- Провести дослідження роботи двоосьової системи орієнтації;
- обробити отримані модельні дані;
- Описати рекомендації щодо експлуатації двоосьової системи орієнтації сонячних батарей.

## **Розділ 1. Аналіз сучасних сонячних електростанцій**

### **1.1. Постановка проблеми**

Енергія є одним із наріжних каменів нашого сучасного суспільства. Те, що ми можемо надати суспільству стільки енергії, скільки потрібно в нашому повсякденному житті, і зробити так, щоб ця енергія була вироблена без шкоди, нашій планеті є однією з найгячіших політичних тем і завдань нашого часу. Сонячна енергія є одним із рішень проблеми. Попит на ефективні відновлювані джерела енергії зростає дуже швидкими темпами, зокрема, ринок сонячних трекерів зростає на 40% на рік.

Існує багато різних способів одержання електрики від сонячної енергії. Найбільш популярними є фотоелектричні (PV) панелі, де кремнієві сонячні елементи перетворюють сонячну радіацію на електрику. Підтримка PV-панелей перпендикулярна до сонячного випромінювання, максимізує коефіцієнт корисної дії.

### **1.2. Система орієнтації**

Основна функція всіх систем стеження полягає у забезпеченні одного або двох ступенів свободи у русі. Цей рух використовується для підтримки системи, спрямованої на випромінювання, необхідним чином. Існує безліч рішень для виконання функціональних вимог. Різні технології сонячної енергії вимагають різних рішень з різною точністю та загальною рисою в тому, що визначити які системи стеження найкраще дуже складно.

Кут місця визначає висоту, на якій Сонце може бути виразно на небі. Еталонна площа, використовувана визначення кута, часто є фактичної площиною, де стоїть спостерігач. Азімутальний кут розглядає рух Сонця небом, зі сходу на захід.

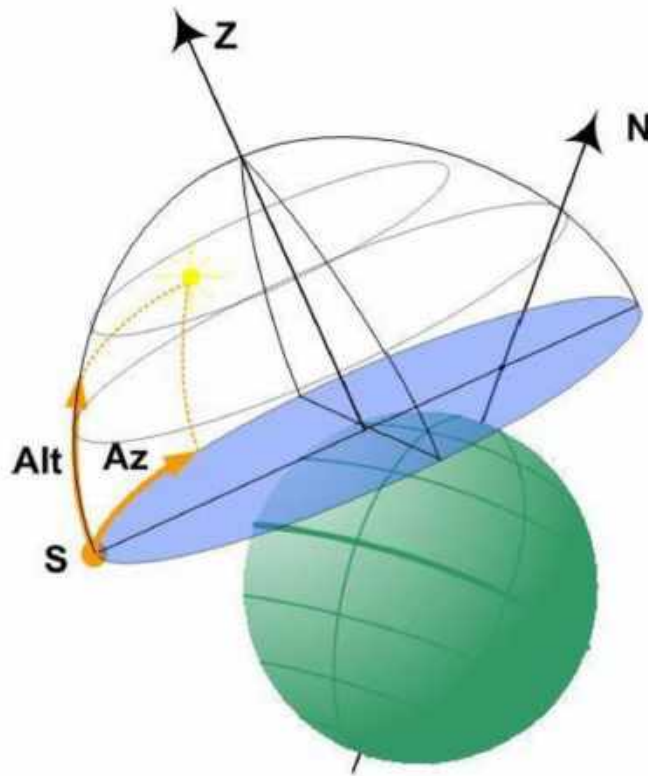


Рисунок 1.1 – Показує азимут та кут місця.

Системи одноосового стеження визначають рух або висоти, або азимуту для СЕС. PV-системи використовують відстеження висоти через брак місця.

Системи з подвійною віссю відстежують рух як у висоті, і по азимутальним осям. Ці системи стеження, звісно, забезпечують найкращу продуктивність, за умови, що це компоненти також мають досить високу точність.

Зв'язок між енергією Сонця і Землею досить складна. Шлях Землі навколо Сонця досить точно визначений і існує безліч описів його руху.

Очевидне становище Сонця залежить від того, як Земля обертається навколо Сонця і як вона обертається навколо осі. Шлях навколо Сонця не круговий, а трохи еліптичний, цей факт впливає на відстань до Сонця. Також вісь, навколо якої обертається Земля, трохи нахилена, 23,4 градуса. Нахил називається нахилом екліптики.

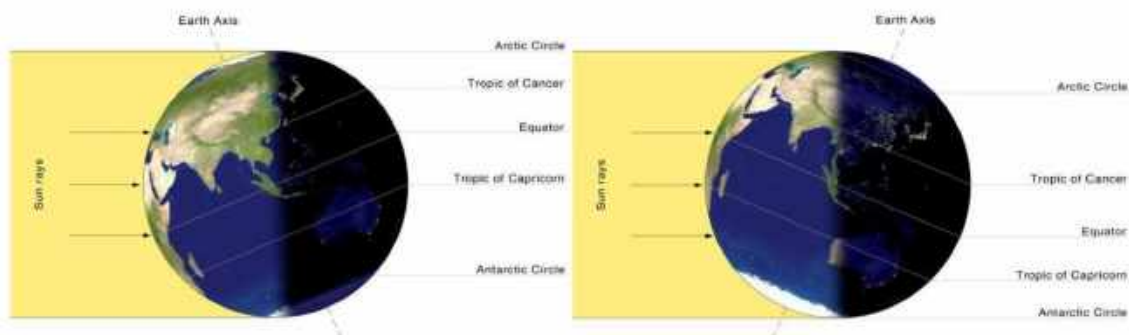


Рисунок 1.2 – Вплив схильності екліптики. Ліворуч – літній сезон, наприклад, Європа. Праворуч – літній сезон для Австралії.

У статті [8] проведені дослідження, в яких говориться, що системи орієнтації не обов'язково повинні позиціонувати площину панелі абсолютно перпендикулярно до Сонця, щоб бути більш ефективними. Якщо є відхилення на  $10^\circ$ , вихід електроенергії, як і раніше, становить 98,5% від максимального значення повного відстеження. За найнесприятливіших умов вихід енергії у річному обсязі від систем орієнтації може досягати 20%. За кращих умов, річний приріст може становити від 30 до 40%. Ефективність роботи в будь-який день може змінюватись від майже нуля до майже 100%.

### 1.3. Аналіз ринку

Аналіз ринку проводився шляхом збирання ринкових даних від журналів, галузевих експертів, інтернет-баз даних, дослідницьких інститутів ринку та енергетичних агентств. Аналіз ринку було зроблено, щоб переконатися, що дослідження зберігає тісний зв'язок з розвитком ринку і не упустив будь-яких критичних вимог ринку.

Глобальна сумарна встановлена потужність сьогодні становить приблизно 15 ГВт. Переважна більшість установок складаються з PV-модулів. Ринок сонячної енергії спостерігав величезне зростання останні п'ять років. Ринок виріс із кількох 100 МВт на початку 2000 року до сьогоднішніх приголомшливих 15 ГВт встановленої потужності. Найбільш вражаючим вкладом займається Німеччина, яка у 2000 році мала невеликий щорічний

приріст у розмірі 70 МВт, що у 2009 році зріс до 4 ГВт.

У таблиці 1 та на рис 1 представлені прогнози розвитку сценаріїв ринку сонячної енергії від Міжнародної енергетичної асоціації, Грінпіс та Європейської комісії.

Таблиця 1.1 - Сценарії майбутньої потенційної потужності МЕА, ЄС та Грінпіс.

| Рік та потужність                  | 2000<br>[ГВт] | 2010<br>[ГВт] | 2020<br>[ГВт] | 2030<br>[ГВт] | 2050<br>[ГВт] |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Greenpeace (reference scenario)    | 1             | 10            | 50            | 86            | 153           |
| Greenpeace ([r]evolution scenario) | 1             | 21            | 270           | 920           | 2900          |
| Greenpeace (advanced scenario)     | 1             | 21            | 290           | 1500          | 3800          |
| IEA Reference Scenario             | 1             | 10            | 30            | 60            | -             |
| IEA ACT Map                        | 1             | 22            | 80            | 130           | 600           |
| IEA BlueMap                        | 1             | 27            | 130           | 230           | 1150          |
| European Commission (Current)      | 1             | 8             | 125           | 920           | -             |
| European Commission (Advanced)     | 1             | 21            | 211           | 912           | -             |
| European Commission (Moderate)     | 1             | 25            | 278           | 1864          | -             |

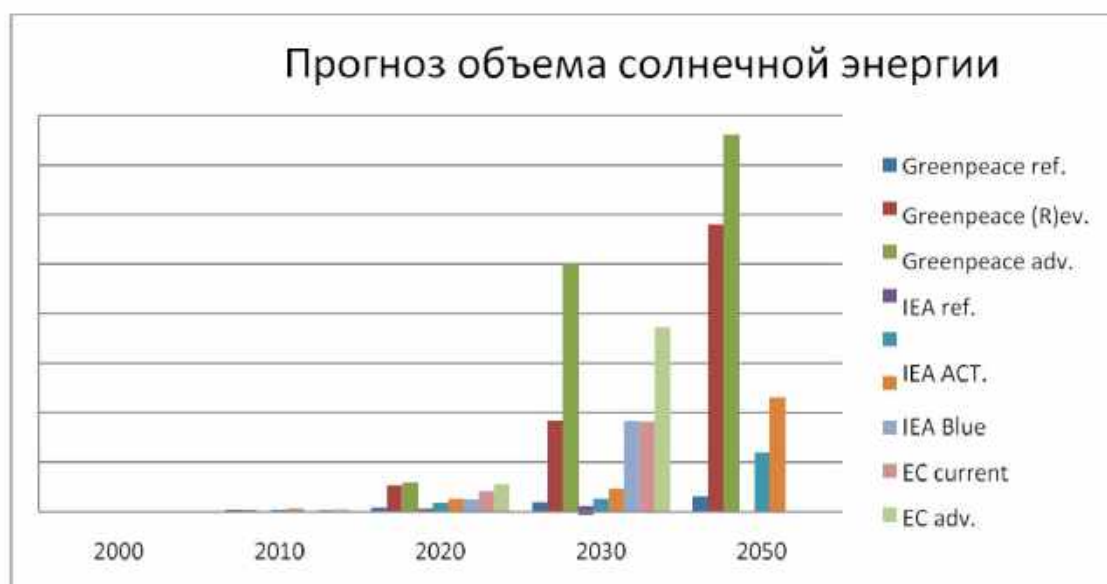


Рисунок 1.3 – Прогнозована потужність сонячної енергії.

Як видно з прогнозів, усі сценарії показують тривале зростання ринку сонячної енергії. На розвиток енергетичного ринку значною мірою впливають політичні, технічні та інші.

### **1.1 Основні режими роботи сонячних електростанцій**

Основне навантаження на електропривод СЕС складають вітрове навантаження та сили тертя у кінематичному ланцюзі. Потужність, яка поглинається силами тертя, може набагато перевищувати потужність на виході кінематичного ланцюга. Вітрове навантаження має непостійний і непрогнозований характер.

Основні режими електроприводу СЕС можна розділити на дві категорії: допоміжні та робочі. Робочі режими можуть здійснюватись автосупроводом або стеженням, що реалізується за допомогою програмного управління. У цьому програмному управлінні відомий закон руху за об'єктом, що спостерігається, і розрахунок ведеться заздалегідь. У режимі стеження за Сонцем, отриманий сигнал управління пов'язаний безпосередньо з об'єктом, що спостерігається. До допоміжних режимів відносять: «перекидання» виконавчого валу, «захоплення» та «пошук» об'єкта стеження. Даний режим використовується при розвороті СЕС із заходу на схід, на вихідне положення після заходу Сонця або під час робіт при проведенні профілактичного обслуговування, для визначення Сонця після виходу через обрій при використанні режиму автосупроводу.

Усі елементи електроприводу СЕС повинні мати захист від різних атмосферних опадів, потрапляння вологи, а також повинні мати можливість експлуатації у всіх температурних режимах цього району.

### **1.4. Схема слідкуючого електроприводу сонячних електростанцій**

Слідчим називається електропривод, який здійснює з певним ступенем точності механічні переміщення, що задаються малопотужним вимірювальним органом, який самостійно виконати функції приводу не може переміщення. Але використовувана програма зазвичай не є заздалегідь відомою. На відміну від використання регуляторів, для електроприводу, що стежить, характерно не повністю вільний рух, визначений тільки її

параметрами, а вимушений рух.

При вирішенні питань про структуру електроприводу СЕС слід враховувати такі вимоги: простота обслуговування всієї системи, мінімальні капітальні вкладення, надійність, високий ступінь автоматизації, забезпечення допустимих точнісних показників, що передбачає тривалий час (місяці) експлуатацію СЕС без втручання людини, обмеження ударних навантажень у силовій частини приводу, енергозбереження, захист від вітрових навантажень [9].

Основною особливістю електроприводу СЕС, що стежить, є мала швидкість переміщення всіх робочих органів. Найбільша можлива швидкість стеження рухом Сонця у Харкові на широті  $50^\circ$  становить  $40^\circ/\text{год}$ . Щоб оцінити потужність виконавчого електродвигуна, можна скористатися наступною залежністю. Близько 10 Вт потужності двигуна споживаються на 1000 Вт виробленої електроенергії СЕС як постійного стеження за Сонцем. Для досить великих СЕС використовуються електродвигуни малої потужності, у яких електромагнітна постійна часу у багато разів менша від електромеханічної постійної часу. Таким чином, електродвигун має запас по динамічній стійкості і є аперіодичною ланкою другого порядку.

Переміщення сонячної панелі відповідно до повороту осі, що задає, здійснюється безпосередньо виконавчими двигунами. Наявність ізоляційного проміжку в електроприводі, що стежить, обумовлює невелику зону нечутливості. Тому динний проміжок необхідно зменшити для збільшення точності відпрацювання заданого кута. При деякому запасі кінетичної енергії можливі різні коливання електроприводу біля положення рівноваги. Тому після відключення система не може миттєво зупинитися і продовжує рухатися в тому ж напрямі. Лише після низки коливань система може перейти у стан рівноваги.

Розмір моменту електродвигуна залежить від кута неузгодженості. Якір електродвигуна відразу ж перемикається на повну напругу при замиканні щіток з півкільцем при цьому момент електродвигуна зростає, і система

починає набувати значного прискорення.

Механічну частину СЕС є двомасовою системою. Частота вільних коливань невисока і складає всього 1...2 Гц. За результатами розрахунків впливів, що обурюють, вирішується питання про необхідність застосування люфто-компенсуючих пристроїв в механічній частині системи.

Автори цієї статті [10] побудували двоосьову систему з відкритим контуром, що контролюється за допомогою ПЛК. Їх принцип роботи заснований на математичному визначенні положення поверхні, що визначається двома кутами: нахилом поверхні та азимутальним кутом. Нахил вважався рівним зенітному куту Сонця. Використовувалися два стежачі двигуна, один для з'єднання, що обертається навколо горизонтальної осі Північ-Південь, а інший для з'єднання, що обертається навколо вертикальної осі. Світловий день ділився на чотири інтервали, і під час кожного з них було визначено та запрограмовано швидкість обертання рухової системи в ПЛК. За результат

ом споживана потужність для двигунів і систем керування ледве перевищує 3% енергії, заощадженої системою стеження. На рис 1.4 показує порівняння енергії між орієнтованою системою та фіксованою, нахиленою під кутом  $32^\circ$ . Вони дійшли висновку, що використання двоосьової системи стеження призводить до збільшення сумарної добової колекції близько 35,34% порівняно із фіксованою.

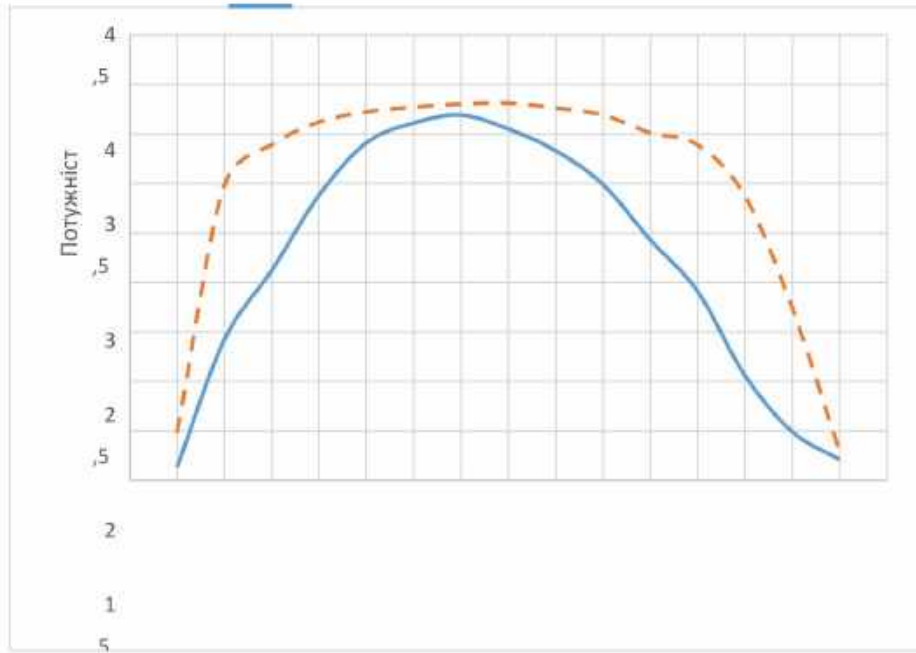


Рисунок 1.4 – Експериментальні результати дослідження

По результат виникає необхідність проектувати електропривід, що стежить, порівнюючи номінальну швидкість двигуна зі швидкістю переміщення установки в допоміжних режимах, при цьому передбачається, що робочий режим безперервного стеження буде здійснюватися при швидкості меншої номінальної. У зв'язку з цим представляється раціональнішим застосування вентильного двигуна в покроковому режимі стеження в системах релейного електроприводу.

#### **1.6. Особливості режимів роботи сонячних електростанцій та вимоги до їх електроприводів**

Щоб визначити більш достовірні та повні результати проведених досліджень необхідно обґрунтувати і вибрати розрахунковий режим роботи електроприводу СЕС, що стежить, а також характер обурювального впливу.

Дослідження електроприводу СЕС, що стежить, проводилися на основі методу комплексного планомірного експерименту. Як об'єкт використовувалася розрахункова модель узагальненого електроприводу СЕС. В результаті узагальнення всіх прийнятних для СЕС структур стежить

електроприводу та аналізу, отримано структуру розрахункової моделі.

У цій роботі було обрано робочий режим автосупроводу Сонця, точністю якого визначається якість головного технічного режиму СЕС. Порівняно з теорією автоматичного регулювання нелінійність або лінійність електроприводу, що стежить, оцінюється, з позицій робочого режиму. Теоретично автоматичного управління, нелінійність чи лінійність системи визначається залежністю присутності чи відсутності нелінійного елемента у її складі. Однак у технологічному режимі факт присутності нелінійного елемента в системі не визначає властивості системи. Залежно від різних умов і типів елемента, нелінійність об'єкта може і не позначитися на самій системі та її робочому режимі, яка при цьому не буде схожа на лінійні системи.

Кінематичний люфт є основною нелінійністю в електроприводі СЕС. Якщо знехтувати іншими нелінійностями, то під лінійним мається на увазі режим електроприводу, що стежить, коли по кінематичному ланцюгу безперервно передається крутний момент від виконавчого валу до двигуна або в зворотному напрямку, тоді тут є постійна діюча механічна напруга в кінематичному ланцюгу. При цьому величина моменту, що передається через кінематичний ланцюг, повинна бути такою, щоб не виникали автоколивання. У загальному вигляді умови лінійності електроприводу СЕС, що стежить, можна записати в наступному вигляді:

$$|M_{\text{КЦ}}| = |M_{\text{ТР}} \pm M_{\text{ВЕТР}} \pm J_{\text{ЛВ}} \frac{a\omega_{\text{ЛВ}}}{dt}| \geq M_{\text{МІН}} \quad (1.1)$$

де  $M_{\text{КЦ}}$  - крутний момент, що передається по кінематичному ланцюгу, Нм;

$M_{\text{ТР}}$  – сумарний момент сухого та в'язкого тертя на виконавчому валу, Нм;

$M_{\text{ВЕТР}}$  – момент вітрового навантаження на виконавчому валу, Нм;

$J_{\text{ЛВ}}$  – момент інерції виконавчого механізму, кг\*м<sup>2</sup>;

$\omega_{\text{ЛВ}}$  – кутова швидкість виконавчого валу, рад/с.

У кінематичному ланцюгу СЕС сумарний момент тертя виконавчого

валу є основним джерелом механічного. Складова постійного моменту вітрового навантаження може повністю або частково компенсувати цю напругу. У цьому випадку нерівність (1.1) не виконуватиметься. При цьому система електроприводу працює у нелінійному режимі.

У моменти несприятливих випадків, коли з допомогою постійної складової вітрового моменту повністю компенсується момент тертя, помилки зростатимуть із частотою вітрових навантажень. Значення середньоквадратичної помилки в порівнянні з тією ж лінійною системою зростатиме в кілька разів. Частота появи помилок може бути велика навіть якщо не повністю компенсований момент тертя.

На рис 1.5 показаний випадок, коли на виконавчому валу повністю компенсовано момент тертя. При частковій компенсації моменту, за період спостереження змінюється щонайменше число коливань. Для роботи електроприводу, що стежить, з кінематичним люфтом більш несприятливі умови на виконавчому валу створюються при скомпенсованому моменті тертя.

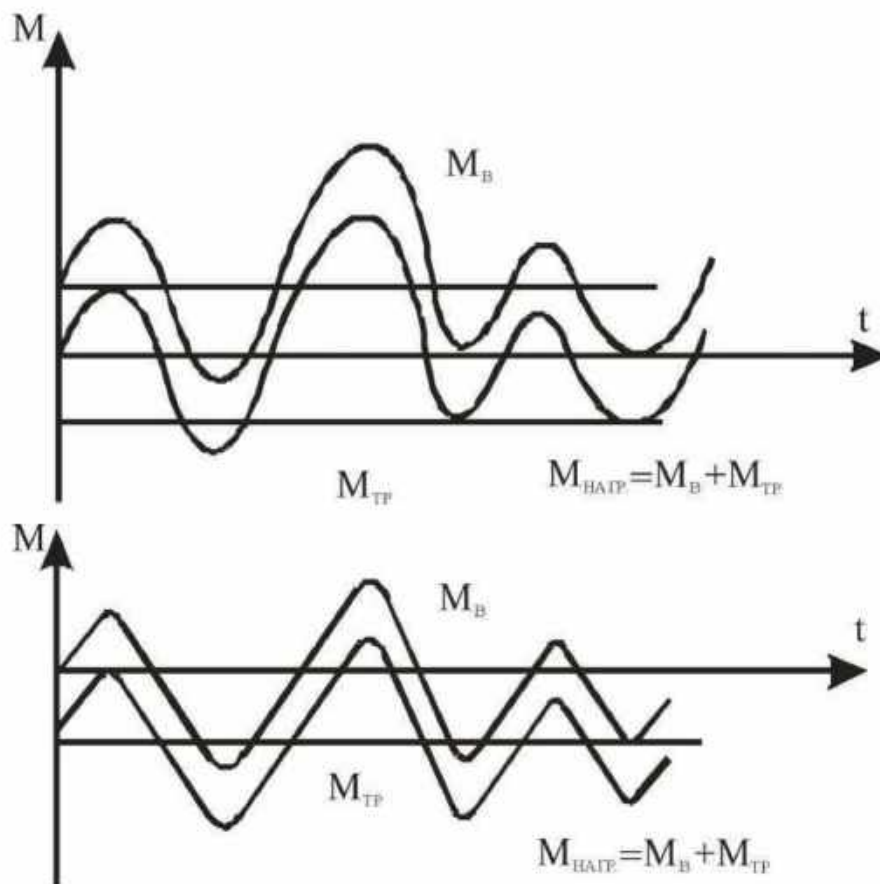


Рисунок 1.5 – Показано процеси зміни знака всього сумарного моменту навантаження, які впливають на виконавчий вал.

### 1.7. Обґрунтування вибору основної структури електроприводу сонячних електростанцій, що стежить

Структура електроприводу, що стежить, багатоконтурна. Контур – сукупність кількох ланок мають зворотний зв'язок. Отримавши широке застосування систем електроприводу з оптимізованими за методом підлеглого регулювання контурами швидкості та струму, широко застосовують у електроприводах, що слідкують, структури яких оснащені контуром кута [11].

Клас електроприводів, що розглядаються в даній роботі, характеризується порівняно малими потужностями - до 1 кВт. Такі електроприводи за рахунок підвищеної перевантажувальної здатності

елементів, які застосовуються у спеціальних двигунах малої потужності не потребують струмообмеження. Маломощные електроприводи можуть бути оснащені природним струмообмеженням, досягається це за рахунок досить великого опору якорного ланцюга. Крім того, підвищення струму в якірному ланцюзі електроприводах, що слідкують, можна обмежити за допомогою регулятора положення в контурі кута. Тому в структурі електроприводу СЕС, що стежить, немає необхідності передбачати контур струму. Достатньо лише обмежувати лише контур швидкості та кута.

Контуром швидкості забезпечується підвищена стабільність руху всієї установки в режимі низьких швидкостей, також це дозволяє збільшити смугу пропускання електроприводу, що допомагає збільшити точність електроприводу, що стежить. Необхідні динамічні властивості і необхідну точність електроприводу, що стежить, надає датчик абсолютного положення кута.

Залежно від установки потужності електроприводу, що стежить, змінюється тип керованого перетворювача напруги. Часто доцільно застосовувати для слідкуючого електроприводу СЕС щодо простоти технічної реалізації, точності та експлуатації тиристорні та транзисторні перетворювачі. З огляду на значну жорсткість усієї конструкції виконавчого механізму СЕС, можна зробити припущення, що абсолютно вся пружна податливість системи обумовлена кінематичним ланцюгом, що складається з вихідної передачі і редуктора, при цьому редуктор з'єднаний з корінним . Зважаючи на несумірність з наведеними моментами інерції виконавчого механізму і двигуна, моменти інерції елементів кінематичного ланцюга взяті рівними нулю. Це дозволило у розрахунках прийняти двомасову пружну систему механічної частини електроприводу, що відображено у структурній схемі рис 1.6.

До складу електромеханічної схеми електроприводу, що стежить, входять: регулятор положення, вимірювальний пристрій, керований перетворювач напруги, сам електродвигун і виконавчий механізм.



Слідкуюча система має астатизм другого порядку практично нечутлива до нелінійностей, ніж та ж система з астатизмом третього порядку, при цьому володіючи більшими точнісними можливостями, ніж електропривод, що стежить, з астатизмом першого порядку. У зв'язку з цим за основу прийнято структуру електроприводу, що стежить, з астатизмом другого порядку [12].

У схемі електроприводу, що стежить, зображеного на рис 1.6, астатизм другого порядку реалізується за допомогою ПД регулятора кута, передатна функція якого представлена в наступному вигляді:

$$W_{pn}(P) = \frac{U_{pn}(P)}{U_{\delta}(P)} = \frac{(T_{K1}P + 1)(T_{K2} + 1)}{T_0P} \quad (1.2)$$

де  $U_{pn}(P)$  - зображення Лапласавихідної напруги регулятора положення;

$U_{\delta}(P)$  - те ж вихідної напруги вимірювального пристрою;

$T_0, T_{K1}, T_{K2}$  - постійні часу регулятора положення.

Інтегральна складова рівняння 1.2 підвищує астатизм слідкуючого електроприводу до другого порядку забезпечуючи тим самим стійкість у системі. При цьому основна складова, що диференціює, компенсує погіршення фази від інтегрування. ПД-регулятор додатково збільшує стійкість електроприводу, що стежить, і розширює смугу пропускання [13, 14].

ПД регулятор положення може бути рекомендований всім СЕС, там, де є необхідність підвищення точності стеження. Для узагальнення можливих структур електроприводу СЕС, що стежить, частина схеми, а саме передавальна функція системи перетворювач-двигун, надалі буде змінюватися. При допущенні, що постійна часу перетворювача має малу величину, передатна функція системи, описується наступною функцією:

$$W_{n\partial}(P) = \frac{\omega_{\partial b}(P)}{U_{pn}(P)} = \frac{K_c}{T_{M1}P(T_{\partial}P + 1) + 1} \quad (1.3)$$

де  $K_c = K_n K_{\partial}$  - коефіцієнт передачі контуру швидкості, 1/ВС;

$K_n$  - коефіцієнт передачі керованого перетворювача напруги;

$K_d$  - коефіцієнт передачі двигуна 1/BC;

$T_A$  - електромагнітна постійна часу якірного ланцюга двигуна;

$T_{M1}$  - електромеханічна постійна часу двигуна, с.

У подібній простій схемі без додаткових регулюючих ланок і зворотних зв'язків практично неможливо змінювати відповідним чином співвідношення між даними постійними, особливо, якщо це пов'язано з їх зменшенням, тому в знаменнику виразу 1.3 відсутні коефіцієнти перед постійними  $T_A$  і  $T_{M1}$ .

Область застосування одноконтурних структур у електроприводі, що стежить

СЕС широка. У такій структурі технічно досить просто реалізувати точність стеження, достатньої для більшості технологічних процесів, зокрема здійснюваних за допомогою СЕС.

### **1.8. Висновок у розділі**

У цьому розділі вивчені особливості та вивчені вимоги до режимів роботи електроприводів СЕС. Основними режимами електроприводу СЕС, що стежить, є робочі та допоміжні. До робітників відносяться такий режим як стеження, до допоміжних режимів відносять «перекидання» виконавчого валу, «захоплення» та «пошук» об'єкта стеження. Система СЕС та її елементи повинні бути захищені від попадання вологи та атмосферних опадів, а також допускати експлуатацію у всьому діапазоні температур.

Досліджено основні режими роботи сонячних електростанцій. У тому випадку, якщо вітрове навантаження відсутнє і сумарний момент на виконавчому валу дорівнює нулю, то основною негативною проблемою електроприводу, що стежить, є автоколивання.

Досліджено оцінку економії енергії в електроприводі сонячної електростанції. Найкращим та оптимальним є покроковий режим стеження за Сонцем. Також електропривод досить розробити одноконтурним з негативним зворотним зв'язком по положенню.

## **Розділ 2. Розрахунок двигуна слідкуючого електроприводу сонячної електростанції**

### **2.1. Визначення головних розмірів та вибір електромагнітних навантажень**

Вентильні двигуни також відомі як електронно-комутовані двигуни, є синхронними двигунами, що живляться від постійного струму через інвертор або імпульсне джерело живлення, який виробляє електричний струм змінного струму, керуючи кожною фазою двигуна через контролер замкнутого контуру. Контролер забезпечує імпульси струму до обмоток двигуна, які керують швидкістю та крутним моментом двигуна. Конструкція безщіткової моторної системи, як правило, схожа на синхронний двигун із постійними магнітами [15].

Вентильний двигун із трьома котушками на статорі матиме шість електричних дротів (по два на кожен котушку). У більшості реалізацій три з цих проводів будуть з'єднані внутрішньо, причому три проводи, що залишилися, прокладені від корпусу двигуна. Електропроводка в корпусі ВД складніша, ніж просто підключення позитивних та негативних клем силового осередку.

Однією з великих переваг є ефективність, оскільки ці двигуни можуть безперервно керувати при максимальній обертальній силі (крутному моменті). Машинні двигуни, навпаки, досягають максимального моменту, що крутить, тільки в певних точках обертання. Для щіткового двигуна, що забезпечує такий же момент, що крутить, що і безщіткова модель, потрібно використовувати великі магніти. Ось чому навіть невеликі ВД можуть забезпечити значну потужність.

Друга велика перевага, пов'язана з першим, – це керованість. ВД можуть керуватися за допомогою механізмів зворотного зв'язку для доставки точно необхідного моменту, що крутить, і швидкості обертання. Прецизійне управління, у свою чергу, зменшує споживання енергії та тепловиділення. ВД

також забезпечують високу зносостійкість та низьке електричне шумозаглушення завдяки відсутності щіток. При використанні щіткових моторів, щітки і комутатори зношуються в результаті безперервного переміщення контакту, а також створюють іскри. Електричні шуми, зокрема, є результатом сильних іскор, які мають тенденцію виникати в областях, де щітки проходять через проміжки в комутаторі.

#### **електричні шуми.**

Метою розрахунку є проектні рішення щодо конструкції вентильних двигунів потужності 0,12 кВт та 1,0 кВт.

Вихідні дані до розрахунку.

Частота обертання вентильного двигуна в Гц.

$$f_e = n_0 \cdot \frac{1}{60}; \quad (2.1)$$

де  $n_0$  – номінальна частота обертання двигуна. Відповідно для:

$$\text{ВД-120:} \quad f_e = 25 \text{ Гц.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad f_e = 50 \text{ Гц.}$$

З технічного завдання споживана потужність ВД:

$$\text{ВД-120:} \quad P_B = 120 \text{ Вт.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad P_B = 1000 \text{ Вт.}$$

$$\text{Момент на валу двигуна обчислюється як } M_B = \frac{P_B}{2 \cdot \pi \cdot f_e}.$$

Відповідно для:

ВД-120:  $M_B = 0,76 \text{ Нм.}$

ВД-1000:  $M_B = 3,18 \text{ Нм.}$

За технічним завданням мінімальний ККД для ВД120 та ВД1000 складає  $\eta_{min} = 0,9$ .

Електроживлення ВД базового виконання має здійснюватися за рахунок внутрішньої мережі напругою 24 ст.

Вибір магнітного матеріалу ВД. Виходячи з практичних міркувань максимальна температура всередині двигуна зазвичай задається на рівні  $120^\circ\text{C}$ , що відповідає класу нагрівальностійкості ізоляції Е. Заданий температурний режим дозволяє використовувати як пазова ізоляція широко поширені синтетичні органічні плівки і встановлює для надійної роботи двигуна необхідність вибору магнітного матеріалу з робочою температурою від  $150^\circ\text{C}$ .

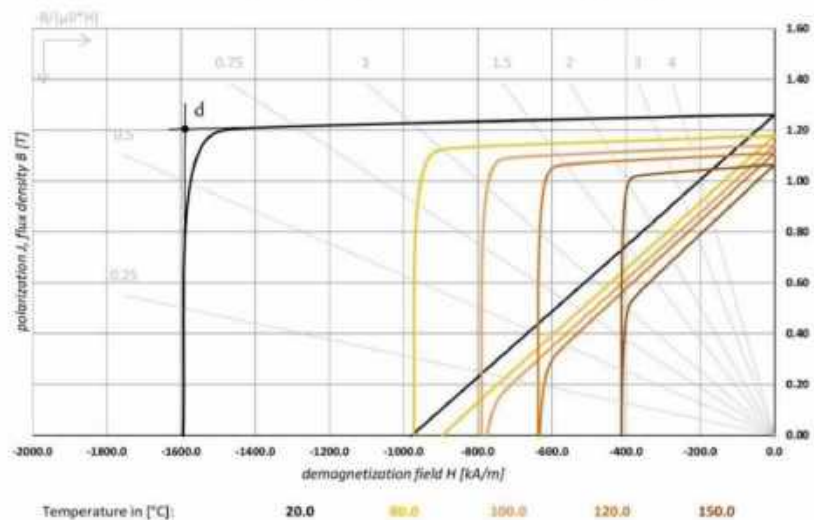


Рисунок 2.1 – Робоча діаграма магніту

Найбільший техніко-економічний ефект може бути досягнутий при використанні в ВД магнітів системи Nd-Fe-B, які мають виключно високі гістерезисні характеристики (залишковою індукцією  $B_r$  і коерцитивною силою  $H_c$ ). Робоча діаграма магніту марки 38SH з максимальною робочою температурою  $150^\circ\text{C}$  [15] наведено рис 2.1.

Основний розрахунок виконаний для  $T=25^\circ\text{C}$ . Для крайніх робочих

температур достатньо уточнити значення машинної постійної (або силу струму в обмотці якоря, при якій досягається необхідний момент), а також переконатися в наявності запасу сили, що розмагнічує, в робочому режимі.

На рисунку 2.2 визначено магнітні параметри (залишкова індукція, коерцитивна сила за намагніченістю) матеріалу НмБ 280/160 за ГОСТР 52956-2008. В результаті отримано:

Залишкова індукція -  $B_r = 125$  Тл.

Коерцитивна сила по намагніченості -  $H_{cm} = 1592 \cdot 10^3$  А/м. Магнітна постійна це фізична константа, прийнята рівною:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}; (2.2)$$

Для визначення робочої точки магніту виконано апроксимацію робочої характеристики магніту за методикою, наведеною в.

| Стандартная марка NdFeB | a) | Максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup> | Остаточная магнитная индукция $B_r$ , Тл | Коэрцитивная сила                     |                                    | Магнитная проницаемость возврата $\mu_{re}$ | Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
|                         |    |                                                                            |                                          | по магнитной индукции $H_{di}$ , кА/м | по намагниченности $H_{dc}$ , кА/м |                                             |                                      |
| НмБ 210/160             | а  | 210—250                                                                    | 1,06—1,13                                | 790—840                               | $\geq 1600$                        | От 1,05 до 1,10                             | От 7,3 до 7,6                        |
| НмБ 250/160             | а  | 250—280                                                                    | 1,13—1,21                                | 840—900                               | $\geq 1600$                        |                                             |                                      |
| НмБ 280/160             | а  | 280—310                                                                    | 1,21—1,30                                | 900—920                               | $\geq 1600$                        |                                             |                                      |
| НмБ 310/160             | а  | 310—330                                                                    | 1,30—1,32                                | 920—950                               | $\geq 1600$                        |                                             |                                      |
| НмБ 150/190             | а  | 150—170                                                                    | 0,94—0,98                                | 680—700                               | $\geq 1900$                        |                                             |                                      |
| НмБ 170/190             | а  | 170—200                                                                    | 0,98—1,06                                | 700—760                               | $\geq 1900$                        |                                             |                                      |
| НмБ 200/190*            | а  | 200—240                                                                    | 1,06—1,16                                | 750—840                               | $\geq 1900$                        |                                             |                                      |
| НмБ 240/200*            | а  | 240—260                                                                    | 1,16—1,21                                | 750—840                               | $\geq 2000$                        |                                             |                                      |
| НмБ 260/200*            | а  | 260—280                                                                    | 1,21—1,25                                | 840—900                               | $\geq 2000$                        |                                             |                                      |
| НмБ 150/240             | а  | 150—170                                                                    | 0,94—0,98                                | 680—700                               | $\geq 2400$                        |                                             |                                      |
| НмБ 170/240             | а  | 170—210                                                                    | 0,98—1,06                                | 700—760                               | $\geq 2400$                        |                                             |                                      |
| НмБ 210/240*            | а  | 210—250                                                                    | 1,06—1,20                                | 760—830                               | $\geq 2400$                        |                                             |                                      |
| НмБ 250/240*            | а  | 250—280                                                                    | 1,20—1,25                                | 830—860                               | $\geq 2400$                        |                                             |                                      |
| НмБ 150/270             | а  | 150—170                                                                    | 0,94—0,98                                | 680—700                               | $\geq 2700$                        |                                             |                                      |
| НмБ 170/270             | а  | 170—210                                                                    | 0,98—1,06                                | 700—780                               | $\geq 2700$                        |                                             |                                      |
| НмБ 210/270             | а  | 210—250                                                                    | 1,06—1,20                                | 780—830                               | $\geq 2700$                        |                                             |                                      |
| НмБ 250/270             | а  | 250—280                                                                    | 1,20—1,23                                | 830—850                               | $\geq 2700$                        |                                             |                                      |

Рисунок 2.2 – Магнітні параметри та щільність матеріалу

Залишкова намагніченість знаходиться за формулою:

$$M_r = B_r / \mu_0 \quad (2.3)$$

де  $B_r$  - залишкова індукція;

$\mu_0$  - магнітна постійна;

$$Mr = 9,95 \cdot 10^5 \text{ A/м.}$$

За графіком визначено  $Md$ ,  $Hd$  (точка  $d$  на рисунок 2.1).  $Hd$  і  $Bd$  - координатні точки, що визначають максимум питомої енергії:

$$Bd = 1,2 \text{ Тл.; } Hd = 1580 \cdot 10^3 = 1,58 \cdot 10^6 \text{ A/м.}$$

$$Md = Bd / \mu_0 \quad (2.4)$$

$$Md = 9,95 \cdot 10^5 \text{ A/м.}$$

Апроксимуючий вираз має вигляд:

$$M(H) = Mr \cdot \frac{H_{cm} - H}{H_{cm} - k \cdot H}; \quad (2.5)$$

Числовий коефіцієнт  $k$  визначений за виразом:

$$k = 2 \cdot \frac{Mr \cdot H_{cm} - Mr - H_{cm}}{\sqrt{Md \cdot Hd}}; \quad (2.6)$$

де  $H_{cm}$  – коерцитивна сила намагніченості;

$Mr$  - залишкова намагніченість.

Отже,  $k = 1$ .

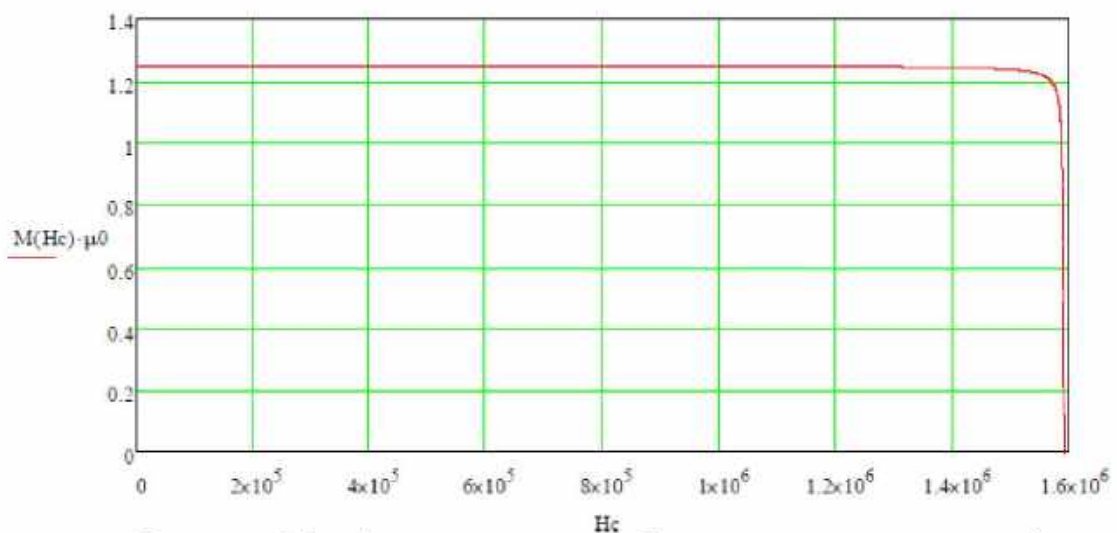


Рисунок 2.3 – Апроксимована робоча характеристика магніту

$$U_{d \min} = 24 \cdot 0,85 = 20,4 \text{ В.}; \quad (2.7)$$

Розрахунок габаритних властивостей. Зовнішній діаметр корпусу двигуна:

ВД-120:  $D_k = 98 \text{ мм.}$

ВД-1000:  $D_k = 139 \text{ мм.}$

Товщина стінки корпусу:

ВД-120:  $h_{\text{ст}} = 4 \text{ мм.}$

ВД-1000:  $h_{\text{ст}} = 5 \text{ мм.}$

Зовнішній діаметр статорного пакета визначено за формулою:

$$D_H = D_k - 2 \cdot h_{\text{ст}}; \quad (2.8)$$

ВД-120:  $D_H = 90 \text{ мм.}$

ВД-1000:  $D_H = 129 \text{ мм.}$

Довжина пакету якоря відповідно:

ВД-120:  $l_{\text{я}} = 50 \text{ мм.}$

ВД-1000:  $l_{\text{я}} = 45 \text{ мм.}$

Діаметр валу (в зоні індуктора):

ВД-120:  $D_{\text{вала}} = 12 \text{ мм.}$

ВД-1000:  $D_{\text{вала}} = 23 \text{ мм.}$

Геометричні параметри, обмежені технологічно: Повітряний зазор:

ВД-120:  $\delta = 0,5 \text{ мм.}$

ВД-1000:  $\delta = 0,7 \text{ мм.}$

Наведені нижче параметри мають однакові значення як для ВД-120, так і для ВД-1000.

Висота вусиків індуктора:

$h_y = 1,5 \text{ мм.}$

Висота ярма індуктора:

$h_j = 1,5 \text{ мм.}$

Мін. висота спинки якоря:

$$h_{a \text{ min}} = 3 \text{ мм.}$$

мін. діаметр паза якоря:

$$d_{2min} = 2 \text{ мм.}$$

Мін. ширина зубця якоря:

$$b_{z \min} = 2 \text{ мм.}$$

Висота шліцю (вусиків) якоря:

$$h_{ш} = 1 \text{ мм.}$$

Ширина шліцю:

$$b_{ш} = 1,7 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт заповнення сталлю:

$$k_c = 0,9.$$

Число фаз обмотки:

$$m_{\text{фаз}} = 3.$$

Число пазів на полюс та фазу:

$$q = 2.$$

Індукція в полюсах індуктора та зубцях якоря

$$\text{ВД-120:} \quad B_n = 1,5 \text{ Тл}; B_z = 1,5 \text{ Тл.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad B_n = 1,5 \text{ Тл}; B_z = 1,6 \text{ Тл.}$$

Коефіцієнт насичення:

$$k_\mu = 1,2.$$

Внутрішній діаметр установки магнітів (дотична):

$$D_{\text{вн}} = D_{\text{вала}} + 2 \cdot h_j; \quad (2.9)$$

$$\text{ВД-120:} \quad D_{\text{вн}} = 15 \text{ мм.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad D_{\text{вн}} = 26 \text{ мм.}$$

Геометрія магнітів. Висота магніту з умови максимуму магнітної енергії магнітів:

$$h_{m \min} = 1,3 \cdot \frac{\delta \cdot B_n}{\mu_0 \cdot H_d}; \quad (2.10)$$

де  $B_n$  - індукція в полюсах індуктора;

$\mu_0$  - магнітна постійна це фізична константа;

$\delta$  - повітряний зазор;

$H_d$  - координатна точка, що визначає максимум питомої енергії.

$$\text{ВД-120:} \quad h_{m \min} = 0,49 \text{ мм.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad h_{m \min} = 0,69 \text{ мм.}$$

Виберемо призматичні магніти із габаритними розмірами 25x15x4. При незадовільному результаті змінимо розміри магнітів та повторимо розрахунок.

Висота магнітів обох двигунів (половина останнього розміру):

$$h_m = 2 \text{ мм.}$$

Ширина магніту:

$$\text{ВД-120:} \quad b_m = 15 \text{ мм.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad h_{m \min} = 25 \text{ мм.}$$

Число пар полюсів з умови насичення полюсів (за умови максимального використання магнітного матеріалу):

$$p_{\max 1} = \frac{1,57}{\arcsin(B_d/B_n)}; \quad (2.11)$$

$$\text{ВД-120:} \quad p_{\max 1} = 1,69.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad p_{\max 1} = 1,69.$$

Максимальна кількість пар полюсів із умови розміщення магнітів:

$$p_{\max 2} = 0,785 \cdot \frac{D_{\text{вн}}}{H_m}; \quad (2.12)$$

$$\text{ВД-120:} \quad p_{\max 2} = 5,89.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad p_{\max 2} = 10,21.$$

Таким чином число пар полюсів:

$$\text{ВД-120:} \quad p = 2.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad p = 3.$$

## 2.2. Визначення кількості пазів та їх розмірів

Максимальне значення діаметра кору знаходиться з умов технологічних обмежень:

$$D_{amax} = D_H - 2 \cdot (h_{amin} + d_{2min} + h_{ш}); \quad (2.13)$$

де  $h_{ш}$  – висота шліцю (усиків) якоря;

$d_{2min}$  – мінімальний діаметр паза якоря;

$h_{amin}$  – мінімальне значення спинки якоря.

$$\text{ВД-120:} \quad D_{amax} = 78 \text{ мм.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad D_{amax} = 117 \text{ мм.}$$

Мінімальне значення діаметра кору знаходиться з умов технологічних обмежень з геометрії якоря:

$$D_{aminl} = 0,64 \cdot p \cdot q \cdot m \cdot (b_{zmin} + d_{2xв}); \quad (2.14)$$

де  $p$  – Число пар полюсів;

$m$  – число фаз

обмотки;

$q$  – число пазів на полюс та фазу;

$d_{2min}$  – мінімальний діаметр паза якоря;

$b_{zmin}$  – мінімальні значення зубця якоря.

$$\text{ВД-120:} \quad D_{aminl} = 10,24 \text{ мм.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad D_{aminl} = 15,36 \text{ мм.}$$

Діаметр ротора визначено як:

$$D_u = D_{вн} + 2 \cdot (b_m + h_y); \quad (2.15)$$

де  $b_m$  – ширина магніту;

$h_y$  – висота вусиків індуктора.

$$\text{ВД-120:} \quad D_u = 48 \text{ мм.}$$

ВД-1000:  $D_u = 79$  мм.

Діаметр якоря визначено як:

$$D_a = D_u + 2 \cdot \delta; \quad (2.16)$$

де  $\delta$  - Повітряний зазор.

ВД-120:  $D_a = 49$  мм.

ВД-1000:  $D_a = 80,4$  мм.

Полюсний поділ визначається:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2 \cdot p}; \quad (2.17)$$

де  $p$  - Число пар полюсів;

$D_a$  - діаметр якоря.

Для ВД-120:  $r = 38,48$  мм.

Для ВД-1000:  $r = 42,1$  мм.

Число пазів якоря:

$$z = 2 \cdot p \cdot m_{\text{фаз}} \cdot q; \quad (2.18)$$

де  $p$  - Число пар полюсів;

$m_{\text{фаз}}$  - Число фаз обмотки;

$q$  - число пазів на полюс та фазу.

Для ВД-120  $z = 24$  мм.

Для ВД-1000:  $z = 36$  мм.

Зубцове поділ:

$$t = \frac{\pi \cdot D_a}{z}; \quad (2.19)$$

де  $z$  - Число пазів якоря;

$D_a$  - діаметр якоря.

Для ВД-120:  $t = 6,41$  мм.

Для ВД-1000:  $t = 7,02$  мм.

Коефіцієнт повітряного зазору:

$$k_{\delta} = \frac{t + 10 \cdot \delta}{t + 10 \cdot \delta - b_{\text{ш}}}; \quad (2.20)$$

де  $\delta$  - Повітряний зазор;

$b_{\text{ш}}$  – ширина шліцю;  $t$  - зубцеве розподіл.

Для ВД-120:  $k_{\delta} = 1,18$  мм.

Для ВД-1000:  $k_{\delta} = 1,14$  мм.

Ширина міжполосного проміжку:

$$\alpha_k = t - b_{\text{ш}} = 5,32; \quad (2.21)$$

де  $b_{\text{ш}}$  – ширина

шліцю;  $t$  - зубцеве

розподіл.

ВД-120:  $\alpha_k = 4,71$  мм.

ВД-1000:  $\alpha_k = 5,32$  мм.

Порівнюються  $\alpha_k < 2hm$ . Якщо умова не виконується, тоді  $\alpha_k$  приймається як 4 мм. Ширина полюса:

$$b_n = r - \alpha_k; \quad (2.22)$$

де  $\tau$  – полюсний поділ;

$\alpha_k$  – ширина міжполосного проміжку.

ВД-120:  $b_n = 38,48$  мм.

ВД-1000:  $b_n = 38,1$  мм.

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття однаковий для обох двигунів:

$$a_{\delta} = \frac{b_n}{\tau}; \quad (2.23)$$

де  $b_n$  - ширина полюса;

$$a_{\delta} = 0,9.$$

Розрахункова ширина повітряного зазору  $b_{\delta}$  дорівнює ширині полюса  $b_n$ :

$$\text{ВД-120:} \quad b_{\delta} = b_n = 34,48 \text{ мм.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad b_{\delta} = b_n = 38,1 \text{ мм.}$$

Довжина зазору  $l_{\delta}$ , довжина магніту  $l_m$  (сумарна так як 2 магніти встановлені в ряд):

Справедливо для обох двигунів:  $l_{\delta} = l_{\alpha}$  і  $l_m = l_{\alpha}$ , де  $l_{\alpha}$  - довжина пакета якоря.

Перетин повітряного зазору на одному полюсному розподілі:

$$Q_{\delta} = b_{\delta} \cdot l_{\delta}; \quad (2.24)$$

де  $l_{\delta}$  - Довжина зазору;

$b_{\delta}$  - ширина повітряного зазору.

$$\text{ВД-120:} \quad Q_{\delta} = 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad Q_{\delta} = 1,71 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Перевірка ширини магніту:

$$b_m = 0,5 \cdot (D_{\alpha} - D_{\text{вн}}) - h_y - \delta; \quad (2.25)$$

де  $\delta$  - Повітряний зазор;

$h_y$  - висота вусиків індуктора;

$D_{\alpha}$  - діаметр якоря;

$D_{\text{вн}}$  - внутрішній діаметр установки магнітів.

$$\text{ВД-120:} \quad b_m = 0,02 \text{ м.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad b_m = 0,03 \text{ м}^2$$

Площа магнітів у нейтральному перерізі, що припадає на один полюсний поділ:

$$Q_m = 2 \cdot b_m \cdot l_m = 2,25 \cdot 10^{-3}; \quad (2.26)$$

де  $b_m$  - ширина магніту;

$l_m$  - довжина магніту;

$$\text{ВД-120:} \quad Q_m = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad Q_m = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Наведена магнітна провідність робочого зазору:

$$\lambda_\delta = \mu_0 \cdot \frac{h_m \cdot Q_\delta}{\delta \cdot k_\delta \cdot k_\mu \cdot Q_m}; \quad (2.27)$$

де  $h_m$  - Висота магніту;

$\mu_0$  - магнітна постійна це фізична константа;

$\delta$  - повітряний зазор;

$Q_\delta$  - перетин повітряного зазору на одному полюсному поділі;

$k_\delta$  - коефіцієнт повітряного зазору;

$k_\mu$  - коефіцієнт насичення;

$Q_m$  - площа магнітів в нейтральному перерізі, що припадає на один полюсний поділ.

$$\text{ВД-120:} \quad \lambda_\delta = 4,1 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad \lambda_\delta = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \text{ Н/м.}$$

Коефіцієнтом розсіювання вибирається з характеристик магнітного матеріалу, який справедливий для обох двигунів:

$$k_\delta = 1,15.$$

Повна наведена провідність:

$$\lambda = k_\delta \cdot \lambda_\delta; \quad (2.28)$$

де  $k_\delta$  - коефіцієнтом розсіювання;

$\lambda_\delta$  - наведена магнітна провідність робочого зазору.

$$\text{ВД-120:} \quad \lambda = 4,71 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad \lambda = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м.}$$

Для визначення координат робочої точки на робочій діаграмі магніту використовуються формули:

$$a_1 = \frac{1}{k} \cdot \left( H_{\text{см}} + \frac{B_r}{\lambda + \mu_0} \right); \quad (2.29)$$

$$a_2 = \frac{H_{\text{см}} \cdot B_r}{k \cdot (\lambda + \mu_0)}; \quad (2.30)$$

де  $k$  - Чисельний коефіцієнт;

$H_{см}$  - коерцитивна сила по намагніченості;

$B_r$  - залишкова індукція;

$\lambda$  - повна наведена провідність;

$\mu_0$  - магнітна стала це фізична константа.

Для ВД-120:  $a_1 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ A/м}$   $a_2 = 3,34 \cdot 10^{11} \text{ A}^2/\text{м}^2$ .

Для ВД-1000:  $a_1 = 1,94 \cdot 10^6 \text{ A/м}$   $a_2 = 5,59 \cdot 10^{11} \text{ A}^2/\text{м}^2$ .

в) магнітна напруженість у робочій точці:

$$H_p = 0,5 \cdot a_1 - \sqrt{(0,5 \cdot a_1)^2 - a_2}; \quad (2.31)$$

де  $a_1$  та  $a_2$  - координат робочої точки на робочій діаграмі магніту.

ВД-120:  $H_p = 2,09 \cdot 10^5 \text{ A/м}$ .

ВД-1000:  $H_p = 3,51 \cdot 10^5 \text{ A/м}$ .

г) індукція в робочій точці, що відповідає корисному потоку

$$B_{\delta m} = \lambda_{\delta} \cdot H_p; \quad (2.32)$$

де  $\lambda_{\delta}$  - наведена магнітна провідність робочого зазору;

$H_p$  - магнітна напруженість у робочій точці.

Для ВД-120:  $B_{\delta m} = 0,86 \text{ Тл}$ .

Для ВД-1000:  $B_{\delta m} = 0,7 \text{ Тл}$ .

Розрахункова індукція у зазорі:

$$B_{\delta} = B_{\delta m} \cdot \frac{Q_m}{Q_{\delta}}; \quad (2.33)$$

де  $B_{\delta m}$  - індукція в робочій точці, що відповідає корисному потоку;

$Q_m$  - площа магнітів у нейтральному перерізі, що припадає на один полюсний поділ;

$Q_{\delta}$  - перетин повітряного зазору на одному полюсному розподілі.

Для ВД-120:  $B_{\delta} = 0,75 \text{ Тл}$ .

Для ВД-1000:  $B_{\delta} = 0,92$  Тл.

Ширина зубця якоря:

$$b_z = \frac{\pi \cdot D_a \cdot B_{\delta}}{k_c \cdot z \cdot B_z}; \quad (2.34)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря;

$B_{\delta}$  – розрахункова індукція у зазорі;

$B_z$  – індукція в полюсах;  $z$  – число пазів якоря;

$k_c$  – Коефіцієнт заповнення сталі.

ВД-120:  $b_z = 3,55$  мм.

ВД-1000:  $b_z = 4,5$  мм.

Висота спинки  
якоря:

$$h_a = a_{\delta} \cdot \frac{z \cdot b_z}{4 \cdot p}; \quad (2.35)$$

де  $z$  – Число пазів якоря;

$b_z$  – ширина зубця якоря;  $p$  – число полюсів;

$a_{\delta}$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття.

ВД-120:  $h_a = 9,53$  мм.

ВД-1000:  $h_a = 12,21$  мм.

Порівнюються  $b_z > b_{zmin}$ . Ширина зубця більша за мінімальну ширину зубців (2 мм); умова виконується, тим самим береться значення  $b_z$ . Це справедливо для обох двигунів.

Менший діаметр паза якоря:

$$d_2 = \frac{\pi \cdot (D_a + 2 \cdot h_m) - z \cdot b_z}{z - \pi}; \quad (2.36)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря;

$h_m$  – висота шліцю (вусиків) якоря;  $z$  – число пазів якоря;

$b_z$  – ширина зубця якоря.

Для ВД-120:  $d_2 = 3,6$  мм.

Для ВД-1000:  $d_2 = 2,95$  мм.

Порівнюється умова  $d_2 > d_{2min}$ . Мінімальний діаметр  $d_{2min} = 2$  мм.

Умова виконується для обох двигунів

Діаметр кола якоря, що відповідає розташуванню центрів менших діаметрів пазів якоря:

$$D_2 = D_a + h_y + d_2 = 84,85; \quad (2.37)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря;

$h_y$  – висота вусиків індуктора;

$d_2$  – менший діаметр паза якоря.

Для ВД-120:  $D_2 = 54,1$  мм.

Для ВД-1000:  $D_2 = 84,85$  мм.

Порівнюються  $h_a$  та  $h_{amin} = 3$  мм. Умова виконується, тому що  $h_a > h_{amin}$ .

Для напівовальних пазів визначають діаметри паза, показані на рис 2.4, де '1' – більший діаметр паза, '1' – менший діаметр паза.

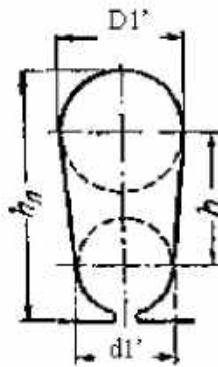


Рисунок 2.4 – Геометричні розміри паза

$$D_{1'} = D_H - 2 \cdot h_a; \quad (2.38)$$

де  $D_H$  – зовнішній діаметр статорного пакета;

$h_a$  – висота спинки якоря;

$bz$  – ширина зубця якоря.

ВД-120:  $D_{1'} = 0,07$  мм.

$$\text{ВД-1000:} \quad D1' = 104,58 \text{ мм.}$$

$$d_1' = \frac{\pi}{z} \cdot D_1' - b_z = 4,63 \text{ мм,} \quad (2.39)$$

Площа для напівовального паза:

$$Q_{\pi} = \frac{\pi \cdot (D_1'^2 - D_2'^2)}{4} + \frac{\pi \cdot d_2^2}{2} - b_z \cdot \frac{(D_1' - D_2')}{2}; \quad (2.40)$$

де  $D1'$  – діаметр напівовальних пазів;

$D2'$  – діаметр кола якоря, відповідний розташування центрів менших діаметрів пазів якоря;

$b_z$  - ширина зубця якоря;

$d_2$  - менший діаметр паза якоря.

$$\text{Для ВД120:} \quad Q_{\pi} = 4,41 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

$$\text{Для ВД1000:} \quad Q_{\pi} = 4,06 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Розрахунок магнітного ланцюга ВМД із тангенціальними постійними магнітами. Основний магнітний потік визначається як:

$$\Phi_{\delta} = 2 \cdot B_{\delta m} \cdot b_m \cdot l_m; \quad (2.41)$$

де  $B_{\delta m}$  - індукція в робочій точці;

$b_m$  - ширина магніту;

$l_m$  - Довжина магніту.

$$\text{ВД-120:} \quad \Phi_{\delta} = 1,29 \text{ Вб.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad \Phi_{\delta} = 1,58 \text{ Вб.}$$

$$\Phi_{\delta'} = 2 \cdot B_{\delta} \cdot b_n \cdot l_m; \quad (2.42)$$

де  $B$  - розрахункова індукція в зазорі;

$b_n$  - ширина полюса;

$l_m$  - Довжина магніту.

$$\text{ВД-120:} \quad \Phi_{\delta'} = 1,29 \text{ Вб.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad \Phi_{\delta'} = 1,58 \text{ Вб.}$$

Фактична індукція у спинці якоря

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot k_c \cdot h_a \cdot l_{я}}; \quad (2.43)$$

де  $\Phi$  - основний магнітний потік;

$k_c$  – коефіцієнт заповнення сталлю;

$h_a$  – висота спинки якоря;

$l_{я}$  - Довжина пакету якоря.

ВД-120:  $B_a = 1,5$  Тл.

ВД-1000:  $B_a = 1,6$  Тл.

Фактична індукція в зубцях якоря:

$$B_z = \frac{\pi \cdot D_a \cdot B_\delta}{2 \cdot k_c \cdot z \cdot b_z}; \quad (2.44)$$

де  $D_a$  – діаметр якоря;

$B_\delta$  – розрахункова індукція у зазорі;

$k_c$  – коефіцієнт заповнення сталлю;

$z$  – число пазів якоря;

$b_z$  – ширина зубця якоря.

Для ВД-120:  $B_z = 1,5$  Тл.

Для ВД-1000:  $B_z = 1,6$  Тл.

Довжина силової лінії зубцевої зони (на один полюс):

$$L_z = 0,5 \cdot (D_{1'} - D_a); \quad (2.45)$$

де  $D_{1'}$  – більший діаметр напівовального паза;  $D_a$  – діаметр якоря

Для ВД-120:  $L_z = 10,97$  мм.

Для ВД-1000:  $L_z = 12,09$  мм.

Довжина силової лінії у спинці якоря (на один полюс):

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_H - h_a)}{4 \cdot p} + 0,5 \cdot h_a; \quad (2.46)$$

де  $D_H$  - Зовнішній діаметр статорного пакета;

$h_a$  – висота спинки якоря;  $p$  – кількість пар полюсів.

ВД-120:  $L_a = 36,37$  мм.

ВД-1000:  $L_a = 36,68$  мм.

МДС повітряного зазору:

$$F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta \cdot k_\delta; \quad (2.47)$$

де  $B_\delta$  – розрахункова індукція у зазорі;

$\mu_0$  - магнітна постійна;

$\delta$  – повітряний зазор між статором та ротором;

$k_\delta$  - Коефіцієнт повітряного зазору.

ВД-120:  $F_\delta = 348,99$  А.

ВД-1000:  $F_\delta = 585,05$  А.

### 2.3. Розрахунок проти-ЕРС

Вищі гармоніки ЕРС спотворюють напругу мережі, що призводить до додаткових втрат в електроприймачах і мережі. Вищі гармоніки також є причиною шумів і вібрацій в електричних машинах. Тому в електричних машинах вживаються заходи щодо придушення вищих гармонік. Першим із таких заходів є поліпшення форми кривої розподілу самого поля. Для поліпшення форми протиЕРС обмотка виконана розподіленою з укороченням кроку [15]. Пази статора (якоря) виконана зі скосом на 1 зубець.

Величина скосу:

Для поліпшення форми кривої ЕРС обмотки та інших цілей здійснюється скіс пазів щодо магнітного поля, що біжить. Він визначається з використанням діаграми, наведеної рис 2.5.

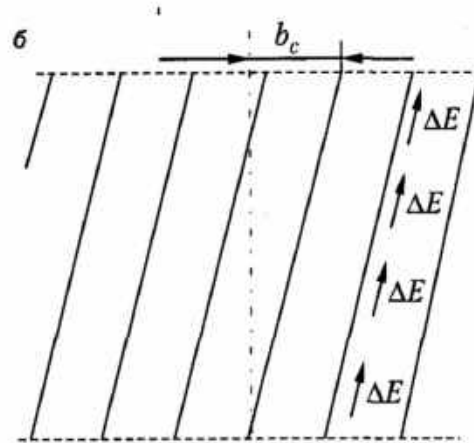


Рисунок 2.5 – ЕРС провідника при скосі пазів

$$b_c = \frac{2 \cdot p \cdot \tau}{z}; \quad (2.48)$$

де  $p$  – число пар полюсів;  $\tau$  – полюсний поділ;  $z$  – число пазів якоря.

ВД-120:  $b_c = 6,41$  мм.

ВД-1000:  $b_c = 7,02$  мм.

Коефіцієнт скосу.

$$K_c = \frac{\sin\left(\frac{b_c}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\left(\frac{b_c}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}; \quad (2.49)$$

де  $b_c$  – величина скосу;

$\tau$  – полюсний поділ.

Для ВД-120:  $K_c = 0,99$ .

Для ВД-1000:  $K_c = 0,99$ .

Кут зсуву ЕРС сусідніх катушок ( $\gamma$ ) відповідає куту зсуву катушок щодо один одного в магнітному полі (рисунок 2.6).

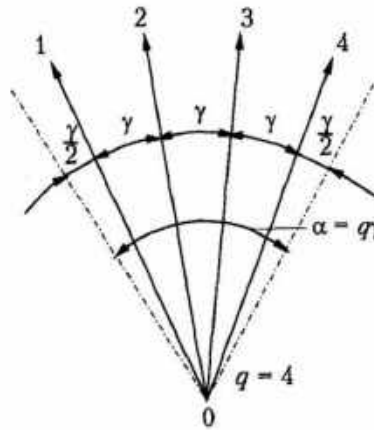


Рисунок 2.6 – ЕРС котушок катушкової групи

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{z}; \quad (2.50)$$

де  $p$  – число пар полюсів;  $z$  – число пазів якоря.

$$\text{ВД-120:} \quad \gamma = 33,07^\circ.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad \gamma = 33,07^\circ.$$

При цьому вся група з котушок  $q$  займає по колу якоря кут (електричний) званий кутом фазної зони:

$$\alpha = q \cdot \gamma; \quad (2.51)$$

$$\text{Для ВД-120:} \quad \alpha = 60^\circ$$

$$\text{Для ВД-1000:} \quad \alpha = 60^\circ$$

Коефіцієнт розподілу обмотки характеризує зменшення ЕРС катушкової групи внаслідок розподілу її витків в окремих пазах.

$$K_p = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2 \cdot q}\right)}; \quad (2.52)$$

$$\text{ВД-120:} \quad K_p = 0,97.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad K_p = 0,97.$$

Кроком обмотки по пазах називається відстань між активними сторонами котушки (рисунок 2.7).

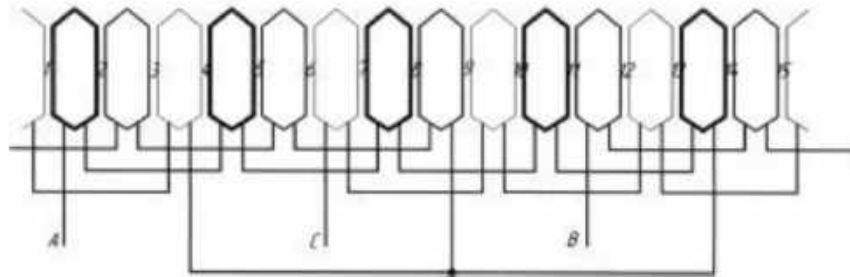


Рисунок 2.7 – Схема статора обмотки

$$y = \frac{z}{2 \cdot p} - 1; \quad (2.53)$$

де  $p$  – число пар полюсів;  $z$  – число пазів якоря.

ВД-120:  $y = 5,$

ВД-1000:  $y = 5.$

Відносний крок

$$\beta = \frac{y \cdot 2 \cdot p}{z}; \quad (2.54)$$

де  $y$  – крок обмотки;

$p$  – число пар полюсів;  $z$  – число пазів якоря.

ВД-120:  $\beta = 0,83.$

ВД-1000:  $\beta = 0,83.$

Коефіцієнт укорочення кроку обмотки:

$$K_y = \sin \frac{\beta \cdot \pi}{2}; \quad (2.55)$$

де  $\beta$  - Відносний крок обмотки.

ВД-120:  $K_y = 0,97.$

ВД-1000:  $K_y = 0,97.$

Коефіцієнт обмотки:

$$K_{\text{про}} = K_p \cdot K_y, \quad (2.56)$$

де  $K_p$  - Коефіцієнт розподілу обмотки;

$K_y$  - коефіцієнт укорочення кроку обмотки.

ВД-120:  $K_{об} = 0,93$ .

ВД-1000:  $K_{об} = 0,93$ .

ЕРС витка дорівнює геометричній різниці ЕРС провідників (рисунок 2.8)

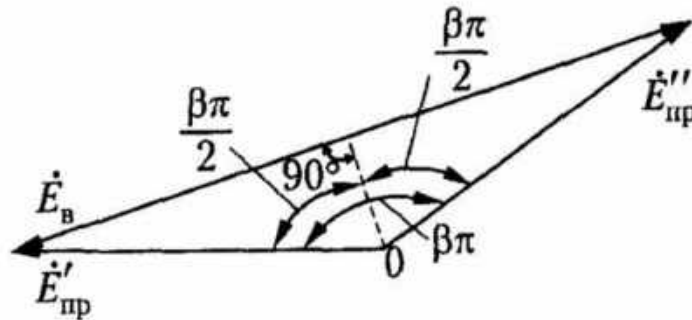


Рисунок 2.8 – Визначення ЕРС витка

$$E_{k0m} = 2 \cdot p \cdot f_B \cdot \Phi_\delta \cdot K_{про} \cdot K_c; \quad (2.57)$$

де  $f_B$  – частота обертання ВД;

$\Phi$  - основний магнітний потік;

$K_{об}$  - коефіцієнт обмотки;

$K_c$  - Коефіцієнт скосу.

ВД-120:  $E_{k0m} = 0,19$  ст.

ВД-1000:  $E_{k0m} = 0,46$  ст.

Максимальне падіння напруги на обмотці та ключах комутатора (однакове для обох двигунів):

$$\Delta U_d = 1 \text{ ст.}$$

Максимальне амплітудне значення проти ЕД з кожної обмотки, включені за схемою "зірка", як показано на рис 2.9.



Рисунок 2.9 – Схема зірка

Обмотки управляються із трифазного інвертора з векторним управлінням. Таким чином, лінійна напруга обмоток відповідає напрузі шини постійного струму мінус падіння напруги на ключах і активному опорі обмоток.

$$E_{m\_max} = \frac{U_{d\ min} - \Delta U_d}{\sqrt{3}}; \quad (2.58)$$

де  $U_{d\ min}$  - напруга живлення мінімальна;

$\Delta U_d$  – максимальне падіння напруги на обмотці та ключах комутатора.

Для ВД-120:  $E_{m\_max} = 11,2$  ст.

Для ВД-1000:  $E_{m\_max} = 11,2$  ст.

Необхідна кількість витків у розрахунку на 1 паз та 1 пару полюсів (ціле число)

$$W_n = \frac{E_{m\_max}}{E_{k0m} \cdot p \cdot q}; \quad (2.59)$$

де  $E_{m\_max}$  – максимальне амплітудне значення проти ЕРС;

$E_{k0m}$  – ЕРС витка амплітудна;  $p$  – кількість пар полюсів;

$q$  – число пазів на полюс та фазу.

ВД-120:  $W_n = 15.$

ВД-1000:  $W_n = 4.$

Уточнимо амплітудне значення протиЕРС після округлення

$$E_m = E_{k0m} \cdot p \cdot q \cdot W_n; \quad (2.60)$$

де  $E_{k0m}$  – ЕРС витка амплітудна;  $p$  – кількість пар полюсів;

$q$  – число пазів на полюс та фазу;

$W_n$  - необхідна кількість витків.

ВД-120:  $E_m = 11,19$  ст.

ВД-1000:  $E_m = 11$  ст.

Чинне значення протиЕРС (форма близька до синусоїдальної)

$$E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad (2.61)$$

де  $E_m$  – амплітудне значення протиЕРС.

ВД-120:  $E_{rms} = 7,91$  ст.

ВД-1000:  $E_{rms} = 7,78$  ст.

Чинне значення струму в обмотках

$$I_w = \frac{P_m}{E_{rms} \cdot 3}; \quad (2.62)$$

де  $E_{rms}$  – чинне значення протиЕРС;

$P_m$  - потужність ВД.

ВД-120:  $I_w = 5,06$  А.

ВД-1000:  $I_w = 42,84$  А.

## 2.4. Активні та індуктивні опори

Коефіцієнтом заповнення паза називається та частка поперечного перерізу паза, яка може бути зайнята провідниками з їхньою ізоляцією. Його величина залежить від форми паза - вона тим більше, чим закругленіший обрис паза, і зростає зі збільшенням його розмірів (отже, вище у більших

машин), але майже не залежить від діаметра провідника, і тільки при дуже значному збільшенні останнього помітно зменшується, так як дуже товсті провідники погано укладаються у паз.

На основі конструктивних особливостей пазів статора обох ВД приймемо коефіцієнт заповнення рівним  $\sum_{зп} = 0,6$ .

Коефіцієнт заповнення між лобових частин  $k_{зл} = 0,6$ .

Визначається максимальний переріз жили обмотки по заповненню:

$$S_w = \frac{Q_n' \cdot k_{зп}}{W_n}; \quad (2.63)$$

де  $Q_n$  – площа для напівовального паза;

$k_{зп}$  - коефіцієнт заповнення паза;

$W_n$  – число витків.

$$\text{ВД-120:} \quad S_w = 1,76 \text{ мм}^2.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad S_w = 6,09 \text{ мм}^2.$$

Щільність струму фактична:

$$j_w = \frac{I_w}{S_w}; \quad (2.64)$$

де  $I_w$  - Чинне значення струму в обмотках;

$S_w$  - максимальний переріз жили обмотки.

$$\text{ВД-120:} \quad j_w = 2,87 \text{ А/мм}^2.$$

$$\text{ВД-1000:} \quad j_w = 7,03 \text{ А/мм}^2.$$

Максимальний діаметр джгута в лобовій частині:

$$d_{wq} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_w \cdot W_n \cdot (2 \cdot q + 1)}{\pi \cdot k_{зл}}}; \quad (2.65)$$

де  $W_n$  – число витків;

$S_w$  – максимальний переріз жили обмотки;

$k_{зл}$  - Коефіцієнт заповнення між лобових частин;  $q$  – число пазів на

полюс та фазу.

$$\text{ВД-120:} \quad d_{wq} = 16,76 \text{ мм.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad d_{wq} = 16,08 \text{ мм.}$$

Середня довжина напіввитку обмотки якоря розраховується за формулою (2.65):

$$l_{cp} = l_{я} + 1,9 \cdot (D_a + D_1') \cdot \frac{y}{z} = 93,82; \quad (2.66)$$

де  $D_1'$  – більший діаметр напівовального паза;

$D_a$  – діаметр якоря;

$l_{я}$  – Довжина пакету якоря;  $y$  – крок обмотки;

$z$  – кількість пазів якоря.

$$\text{Для ВД-120:} \quad l_{cp} = 97,47 \text{ мм.}$$

$$\text{Для ВД-1000:} \quad l_{cp} = 93,82 \text{ мм.}$$

Сумарна довжина жили обмотки:

$$l_w = l_{cp} \cdot 2 \cdot W_n \cdot q \cdot p; \quad (2.67)$$

де  $l_{cp}$  – середня довжина піввитку обмотки якоря;  $q$  – число пазів на полюс та фазу;

$W_n$  – число витків;

$p$  – кількість пар полюсів.

$$\text{Для ВД-120:} \quad l_w = 11,7 \text{ м.}$$

$$\text{Для ВД-1000:} \quad l_w = 4,5 \text{ м.}$$

Питомий опір міді є фізичною константою:

$$\rho_M = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$$

Опір обмотки:

$$R_w = \rho_M \cdot \frac{l_w}{S_w}; \quad (2.68)$$

де  $\rho_M$  – питомий опір міді;

$S_w$  – максимальний переріз жили обмотки;

$l_w$  – сумарна довжина жили обмотки.

Для ВД-120:  $R_w = 0,12 \text{ Ом.}$

Для ВД-1000:  $R_w = 0,01 \text{ Ом.}$

## 2.5. Втрати сталі, механічні та додаткові втрати

Втрати в міді обумовлюються наявністю в проводах обмоток двигуна електричного опору.

$$\Delta P_M = I_{w2} \cdot 3 \cdot R_w; \quad (2.69)$$

де  $I_w$  – діюче значення струму в обмотках;

$R_w$  - опір обмотки.

ВД-120:  $\Delta P_M = 8,9 \text{ Вт.}$

ВД-1000:  $\Delta P_M = 71,24 \text{ Вт.}$

Втрати в сталі. Основна складова втрат - втрати в якорі.

Вибирається листова сталь марки 2412 завтовшки 0,35 мм. Щільність сталі визначається з характеристик цієї марки сталі:

$$\rho_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$$

Маса ярма якоря (спинки):

$$m_a = \frac{\pi \cdot (D_H^2 - D_1'^2)}{4} \cdot l_{я} \cdot \rho_{ст}; \quad (2.70)$$

де  $D_H$  - Зовнішній діаметр статорного пакета;

$D_1'$  - більший діаметр напівовального паза;

$l_{я}$  - Довжина пакету якоря;

$\rho_{ст}$  - щільність сталі.

ВД-120:  $m_a = 0,92 \text{ кг.}$

ВД-1000:  $m_a = 1,54 \text{ кг.}$

Маса зубців якоря:

$$m_z = \frac{(D_1' - D_a)}{2} \cdot b_z \cdot z \cdot l_{я} \cdot \rho_{ст}; \quad (2.71)$$

де  $D1'$  – більший діаметр напівовального паза;

$Da$  – діаметр якоря;

$bz$  – ширина зубця якоря;

$l_a$  – Довжина пакету якоря;

$\rho_{ст}$  – щільність сталі.

Для ВД-120:  $m_z = 0,36$  кг.

Для ВД-1000:  $m_z = 0,67$  кг.

Частота електрична:

$$f_{ел} = f_B \cdot p; \quad (2.72)$$

Для ВД-120:  $f_{ел} = 50$  Гц.

Для ВД-1000:  $f_{ел} = 150$  Гц.

Індукція у спинці якоря та зубцях (визначені раніше у формулах 2.42 та 2.43).

ВД120:  $B_a = 1,5$  Тл;  $B_a = 1,5$  Тл.

ВД1000:  $B_a = 1,6$  Тл;  $B_a = 1,6$  Тл.

Питомі втрати на частоті 50 Гц та індукції 1 Тл визначені за таблицею магнітних властивостей марки 2412 (рисунок 2.10).

| Сортамент                 | Размер | $H_c$ | $\mu_{max}$ | $P_{1.0/50}$ | $P_{1.5/50}$ | $B_{100}$ | $B_{500}$ | $B_{1000}$ | $B_{2500}$ | $B_{5000}$ | $B_{10000}$ | $B_{20000}$ |
|---------------------------|--------|-------|-------------|--------------|--------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| -                         | мм     | А/м   | МГн/м       | Вт/кг        | Вт/кг        | А/м       | А/м       | А/м        | А/м        | А/м        | А/м         | А/м         |
| Лист тонкий холоднокатан. | 0.5    |       |             | 1.3          | 3.1          |           |           | 1.35       | 1.5        | 1.6        | 1.7         | 1.95        |
| Лист тонкий холоднокатан. | 0.35   |       |             | 1.15         | 2.5          |           |           | 1.35       | 1.5        | 1.6        | 1.7         | 1.95        |

Рисунок 2.10 – Магнітні властивості сталі 2412

$P_{1.50} = 1,15$  В/кг – однаково обох двигунів, оскільки марка стали однакова.

Коефіцієнти, що враховують нерівномірність розподілу потоку за перерізами ділянок магнітопроводу та технологічних факторів. Для двигунів малої потужності прийняті рівними:

$$k_{\partial a} = 1,4.$$

$$k_{\partial z} = 1,7.$$

Для сталі марки 2412 показник залежності втрат від частоти дорівнюватиме  $\beta = 1,4$ .

Втрати у сталі:

$$\Delta P_{\text{ст}} = P_{1\_50} \cdot \left(\frac{f_{\text{эл}}}{50}\right)^{\beta} \cdot \left[\left(\frac{B_a}{1T}\right)^2 \cdot m_a \cdot k_{\partial a} + \left(\frac{B_z}{1T}\right)^2 \cdot m_z \cdot k_{\partial z}\right], \quad (2.73)$$

де  $P_{1\_50}$  – питомі втрати на частоті 50 Гц та індукції 1 Тл;

$f_{\text{ел}}$  – частота електрична;

$B_a$  – фактична індукція в спинці якоря;

$B_z$  – фактична індукція в зубцях якоря;

$m_a$  – фактична індукція в зубцях якоря;

$m_z$  – маса зубців якоря;

$k_{\partial a}, k_{\partial z}$  – Коефіцієнти, що враховують нерівномірність розподілу потоку за перерізами ділянок магнітопроводу

$$\text{Для ВД-120:} \quad \Delta P_{\text{ст}} = 4,91 \text{ Вт.}$$

$$\text{Для ВД-1000:} \quad \Delta P_{\text{ст}} = 45,29 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати:

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст}} [\text{Вт}]; \quad (2.74)$$

де  $\Delta P_{\text{м}}$  – втрати у міді;

$\Delta P_{\text{ст}}$  – втрати у сталі.

$$\text{ВД-120:} \quad \Delta P_{\text{сум}} = 13,81 \text{ Вт.}$$

$$\text{ВД-1000:} \quad \Delta P_{\text{сум}} = 116,53 \text{ Вт.}$$

Отриманий ККД:

$$\eta = \frac{P_B}{\Delta P_{\text{сум}} + P_B}; \quad (2.75)$$

Розрахований ККД однаковий для обох двигунів і дорівнює  $\eta = 0,9$ .

## 2.6. Висновки за розділом 2

У цьому розділі проведено розрахунок основних параметрів вентильного двигуна. Наведено основні переваги в порівнянні з іншими типами двигунів.

Основні технічні параметри розрахованих вентильних двигунів зведено до таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Основні параметри вентильних двигунів

| Найменування параметра                  | Двигун ВД-120 | Двигун ВД-1000 |
|-----------------------------------------|---------------|----------------|
| Частота обертання, об/хв                | 1500          | 3000           |
| Потужність споживана, Вт                | 120           | 1000           |
| ККД, %                                  | 90            | 90             |
| Напруга живлення,                       | 24            | 24             |
| Крутний момент валу, Нм                 | 0,76          | 3,183          |
| Діаметр ротора, мм                      | 48            | 80             |
| Довжина ротора, мм                      | 50            | 45             |
| Зовнішній діаметр статорного пакета, мм | 90            | 129            |
| Довжина пакету якоря, мм                | 50            | 45             |
| Повітряний зазор, мм                    | 0,5           | 0,7            |
| Кількість магнітів                      | 8             | 12             |

Розраховані в цьому розділі параметри повністю визначають конструктивні параметри двигунів та можуть бути використані для розробки РКД двигунів ВД 120 та ВД1000.

### Розділ 3. Дослідження системи керування сліdkуючого електроприводу

#### 3.1. Опис системи стеження

Досліджувана мехатронна система, представлена на рис 3.1 відноситься до електроприводу, що стежить, узгоджених поворотів сонячних батарей по двох осях кутів азимуту і місця.

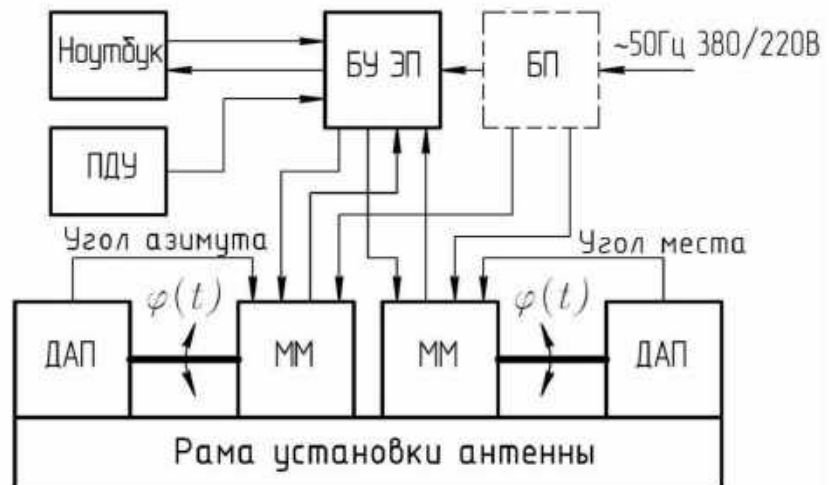


Рисунок 3.1 – Структурна схема мехатронної системи

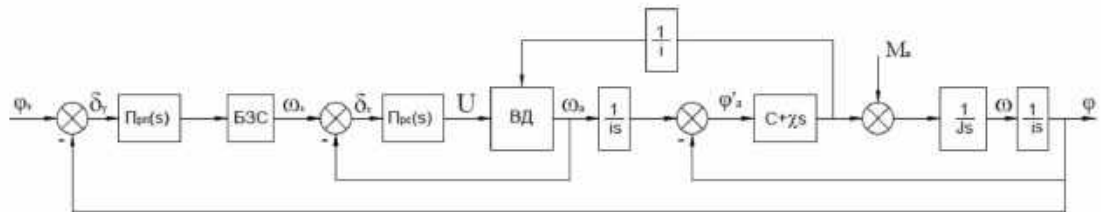
До складу цієї мехатронної системи входять такі компоненти:

- рама із встановленою на ній пристроєм стеження;
- датчик абсолютного становища;
- два мехатронні модулі, що поєднують двигун і редуктор;
- блок керування електроприводу;
- пульт дистанційного керування з ноутбуком.

Мехатронні модулі виконують рух до заданих координат по командах від блоку управління. Цей блок забезпечує узгоджені та синхронні повороти обох мехатронних модулів за допомогою електричних двигунів.

На підставу структурної схеми було складено операторно-структурна схема. Схему складено з урахуванням кінцевої жорсткості вузла з'єднання

рами сонячних батарей з вихідним валом мехатронного модуля, яка є типовою двомасовою системою слідкуючого електроприводу з пружним механічним



зв'язком (рисунок 3.2).

Рисунок 3.2 – Операторно-структурна схема системи управління СЕС.

У досліджуваній схемі стеження:  $\varphi_{\text{з}}$ ,  $\varphi$  задане та фактичне значення кута повороту однієї з осей електроприводу;  $s$  – оператор Лапласа;  $J$  – Момент інерції пристрою стеження;  $\varphi'_d$  – Кут закручування вихідного валу, викликаний його кінцевою жорсткістю;  $U$  керуюча напруга;  $C, \chi$  – коефіцієнт жорсткості та дисипативних втрат у кінематиці нежорсткого з'єднання редуктор-рама;  $\omega_d, \omega_{\text{пр}}$  – кутова швидкість валу двигуна та вихідний осі електроприводу, робоча кутова швидкість;  $\delta_y, \delta_e$  – помилки

електроприводу по куту та швидкості;  $-$  Передатне число редуктора;  $M_{\text{в}}$  – момент зовнішніх сил, зокрема, момент, спричинений вітровим навантаженням;  $P_{\text{рп}}(s), P_{\text{рв}}(s)$  – передавальні функції регулятора положення та регулятора швидкості; БЗС – блок завдання швидкості двигуна.

### 3.2. Моделювання системи стеження

Така система стеження схильна до появи в режимі автоколивань, що викликали кінцеву жорсткість конструкції кріплення рами сонячних батарей до валу електроприводу. Автоколивання зменшують динамічну точність позиціонування та її плавність руху, а також виникає постійна нецільова витрата енергії електричними двигунами [16]. Додатковими факторами погіршення основних динамічних характеристик системи орієнтації є зазор у механічній частині, викликаний люфтом редуктора. У кінематичному ланцюгу з урахуванням наявності люфта електроприводу було складено

модель серед програмування MatLab. Ця модель системи орієнтації представлена на рис 3.3. Тут як задає сигнал управління є інтерполяційне значення кута програми наведення.

Поліпшення електроприводів, що стежать, сонячних батарей подібного застосування відносять до класу автоматичних систем, алгоритми управління яких забезпечують високу точність орієнтації СЕС. У роботі проведено аналіз динамічних характеристик електроприводу, що слідує, мехатронної системи СЕС, яка здійснює стеження за переміщенням Сонця на основі його координат у небесному просторі, що задаються керуючому сигналом. На рис 3.3 показана модель системи орієнтації СЕС, розроблена в системі Simulink. У моделюванні було прийнято наступне значення параметрів кінематики електроприводу: люфт – 1 хв; жорсткість з'єднання – 1010 нм/рад; коефіцієнт дисипативних втрат у вузлі нежорсткого кріплення рами – 10 нмсек/рад; момент інерції панелі – 600 кг·м<sup>2</sup>.

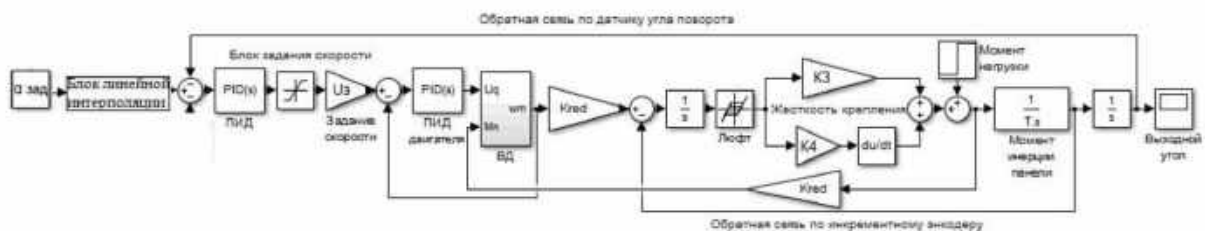


Рисунок 3.3 – Модель системи стеження.

Необхідна точність наведення пристрою сонячної батареї та зниження споживання електроенергії в покроковому режимі роботи електроприводу, що стежить, досягається за допомогою відповідного вибору параметрів датчиків положення і швидкості [16]. Як датчики положення та швидкості в системі орієнтації були обрані ізодромні регулятори. Налаштування регуляторів виконані за допомогою CHR-методу та модифікованого методу Циглера-Нікольса.

В автономних системах орієнтації СЕС найбільше придатними для обмеження споживання електроенергії є вентильний двигун. Параметри цього двигуна були розраховані раніше. Для даного типу електродвигунів конструктивно можна досягти малого споживання електроенергії за

однакових умов експлуатації. Вентильний двигун потужністю 120 Вт, при передатному відношенні редуктора рівному 21000, забезпечує розрахунковий статичний момент, що крутить, рівний 16 000 Нм. Дане рішення, хоч і забезпечує прийнятне споживання електроенергії, зменшує жорсткість кінематичних вузлів електроприводу, що стежить, викликано це малим розміром двигуна, на валу якого встановлено великих розмірів редуктор. Для того, щоб знизити вплив люфту на точність орієнтації, було обрано спеціально розроблений хвильовий редуктор для СЕС.

Для спрощення математичного опису ВД використовується система координат  $dq$  жорстко пов'язана з ротором, при цьому вісь  $d$  поєднується з напрямком магнітного поля ротора [17]. У цьому випадку операторні рівняння, якими описуються електромагнітні та електромеханічні процеси у ВД мають вигляд:

$$\begin{aligned} U_d &= R(T_d s + 1)i_d - \omega L_q i_q; \\ U_q &= R(T_q s + 1)i_q - \omega L_d i_d + \Phi_0 \omega; \\ M &= p \frac{m}{2} (\Psi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q); \\ s\omega_m &= \frac{1}{J} (M - M_H); \\ s\theta_m &= \omega_m; \quad \omega = p\omega_m. \end{aligned} \tag{3.1}$$

В рівняннях 3.1  $U_d, U_q, i_d, i_q$  – проекції напруги та струму статора на осі:

$$T_d = \frac{L_d}{R}, T_q = \frac{L_q}{R};$$

де  $L_d, L_q$  - постійні часу та індуктивність обмотки статора по поздовжній та поперечній осях;

$R$  – опір статорної обмотки;

$\omega_m$  - механічна кутова швидкість;

$M$  – електромагнітний момент;

$M_H$  – момент навантаження;

$\theta m$  – механічний кут повороту валу;

$J$  – момент інерції ротора.

За математичним описом вентильного двигуна та розрахованими параметрами у попередньому розділі складено модель, що використовується в електроприводі СЕС у середовищі MatLab, показана на рис 3.4. Особливістю даної моделі є її універсальність, маючи основні параметри двигуна, можна провести його моделювання.

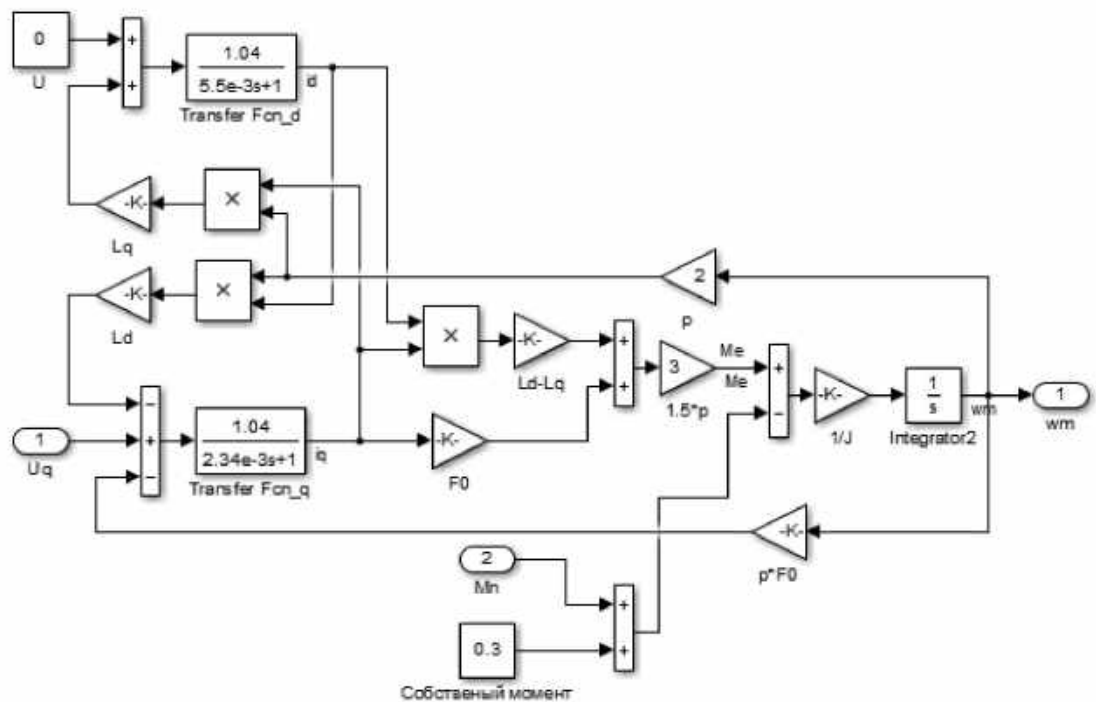


Рисунок 3.4 – Модель вентильного двигуна потужністю 120 Вт.

### 3.3. Результати моделювання системи стеження

На рис 3.5, 3,6 представлені графіки залежності помилки орієнтації та швидкості обертання електродвигуна за зміни жорсткості конструкції рами сонячних батарей. Виникаюча коливальність системи призводить до появи розсинхронізації швидкості повороту осі електроприводу, що стежить, і швидкості спостереження за Сонцем по небосхилу [18]. Можна помітити, що амплітуда коливань помилки орієнтації не змінюється зі збільшенням жорсткості конструкції, у той час як амплітуда коливань швидкості зменшується, отже, це веде до зменшення споживання електроенергії

двигуном в режимі стеження, що встановився.

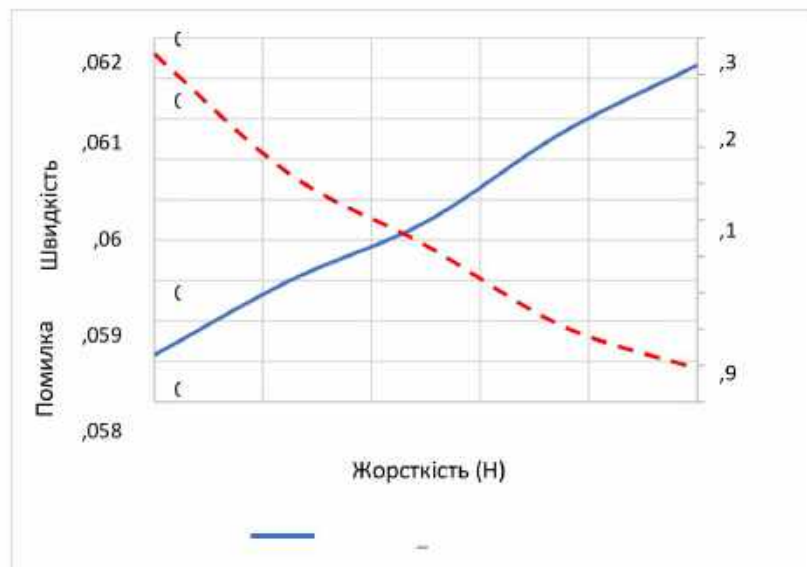
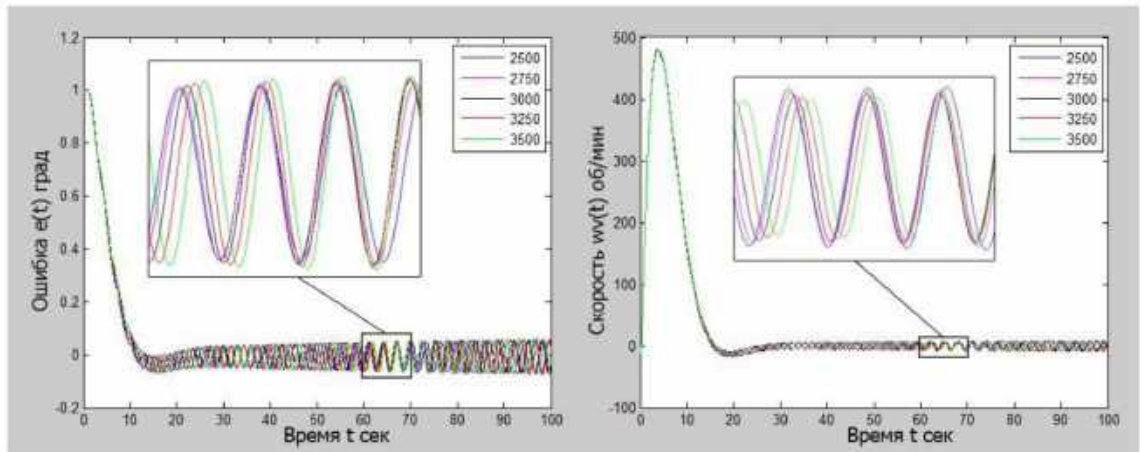


Рисунок 3.5 – Залежність помилок позиціонування та швидкості при різній жорсткості конструкції.

Рисунок 3.6 – Залежність амплітуди помилок позиціонування та швидкості при різній жорсткості конструкції.

Момент навантаження на вихідному валу електроприводу, що стежить, є ще одним фактором, що впливає на точність орієнтації. На рис 3.7, 3.8 представлені графіки залежності динамічної помилки наведення та помилки швидкості обертання електродвигуна від моменту вітрового навантаження [19, 20].

З графіка випливає, що амплітуда коливань в режимі, що встановився,

зростає зі збільшенням вітрового навантаження практично лінійним чином. Для того щоб знизити вплив навантаження на валу електроприводу, що слідує, на точність орієнтації СЕС слід використовувати класичний ізодромний регулятор швидкості і положення, що забезпечує астатизм другого порядку контурів регулювання швидкості і положення. Результати проведених досліджень підтверджують можливість зниження коливності системи та похибки позиціонування до прийнятних величин шляхом підбору основних коефіцієнтів ізодромних регуляторів швидкості та положення.

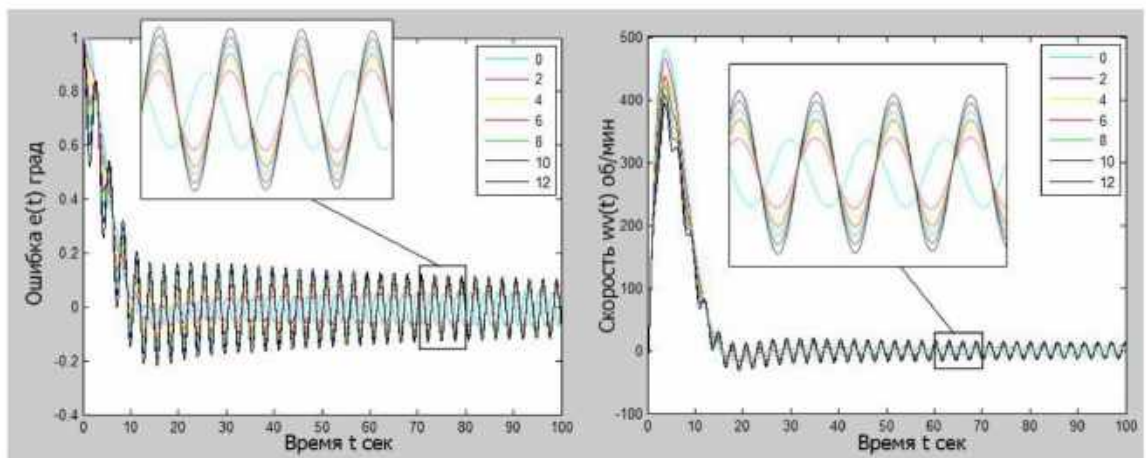


Рисунок 3.7 – Залежність помилки позиціонування та помилки швидкості двигуна за різних моментів навантаження.

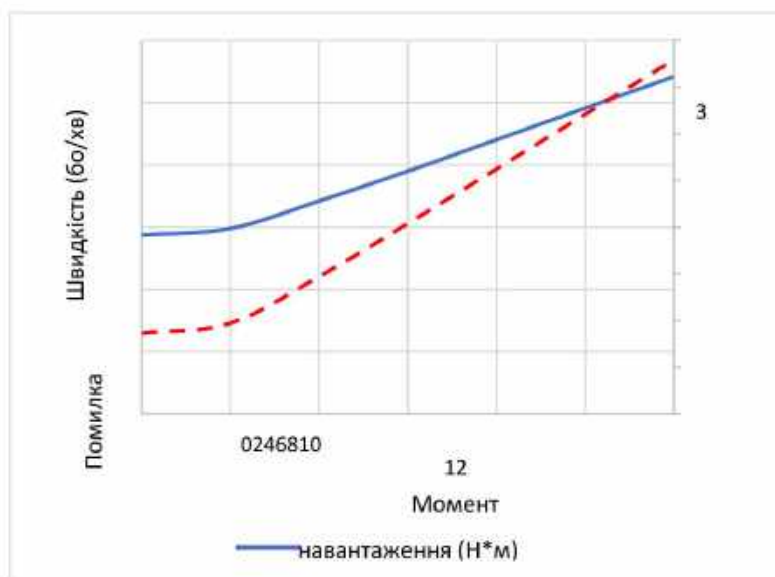


Рисунок 3.8 – Залежність амплітуди помилки позиціонування та помилки швидкості двигуна за різних моментів навантаження

У момент появи Сонця з обрію воно рухається з малою швидкістю по відношенню до спостерігача. Але з наближенням Сонця до сходження, його кутова швидкість швидко зростає щодо спостерігача. Також потрібно враховувати, що чим нижчу пролягає орбіта наростає кутова швидкість. Так як в режимі програмного наведення для керування приводом системи, що стежить, лінійна інтерполяція при прискореному переміщенні між двома сусідніми значеннями координат небесного об'єкта формується безперервна зміна завдання швидкості і кутів положення, то динаміка його зміни може вплинути на похибку стеження.

У такому разі з'являється швидкісна помилка. Тому будь-який класичний ізодромний датчик не може забезпечувати нульову статичну помилку позиціонування [21]. Це призводить до появи похибки орієнтації СЕС протягом усього інтервалу часу між заданими значеннями координат, тоді система не може досягти необхідної точності стеження. Для того, щоб усунути швидкісну помилку електроприводу СЕС, що слідує, слід використовувати ПІД-регулятор з подвійною інтегруючою складовою. Використання такого регулятора забезпечує астатизм контуру автоматичного регулювання навіть за умови постійної зміни швидкості. Але дослідити таку систему виявляється проблематичним навіть при моделювання. У зв'язку з цим було ухвалено рішення щодо зменшення часового інтервалу завдання координат Сонця до кількох секунд. Цей спосіб дозволить зменшити помилку стеження до необхідної величини.

### **3.4. Висновок за розділом 3**

Через мінливість орбітальної швидкості пересування Сонця та вітрового навантаження виникають відхилення швидкості повороту рами сонячної батареї від необхідної. Це призводить до появи помилки позиціонування по всьому інтервалі роботи системи. Для вирішення цієї проблеми було обрано регулятор швидкості, що забезпечує астатизм контурів регулювання положення сонячної батареї та швидкості електроприводу системи стеження.

Виникнення коливань швидкості слідкуючого електроприводу через кінцеву жорсткість вузла з'єднання рами сонячної батареї з редуктором і через наявність люфту в редукторі в режимі, що встановився, призводить до додаткового безперервних втрат електроенергії орієнтації СЕС, викликаним періодичним розгоном електродвигуна з. Коливання динаміки системи негативно впливають на енергоефективність роботи, частина електроенергії витрачається на непродуктивну роботу електроприводу СЕС. Дослідження роботи моделі показали, що за допомогою вибору необхідних коефіцієнтів регулятора, амплітуду цих коливань можна зменшити і тим самим забезпечити зниження споживання електроенергії електроприводом СЕС, що стежить.

Для забезпечення необхідної точності орієнтації СЕС необхідно збільшити жорсткість кінематики на валу електроприводу, а також конструктивно посилити жорсткість вузлів кріплення рами сонячної батареї, що дозволить знизити амплітуду та збільшити частоту коливань системи в режимі стеження. Останнє є обов'язковою умовою до динаміки електроприводу, що стежить, при зменшенні часового інтервалу оновлення значень координат Сонця.

## **Розділ 4. Ресурсоефективність та ресурсозбереження**

У даному розділі розглядається перспективність науково-технічного проекту, що визначається високотехнологічністю, ресурсоефективністю, ресурсозбереженням та комерційною цінністю.

Науково-дослідницька робота полягає у дослідженні та розробці автономної системи стеження за Сонцем.

Метою даного розділу ВКР є визначення перспективності та успішності науково-дослідного проекту моделювання роботи орієнтації СЕС. Дані дослідження спрямовані на покращення позиціонування сонячних батарей.

Цільовим ринком для цих досліджень є всі галузі електропостачання, де застосовується СЕС із системою орієнтацією.

Завдання розділу:

- розробка загальної економічної ідеї проекту; формування концепції проекту;
- організація робіт з науково-дослідного проекту;
- планування науково-дослідних робіт;
- оцінки комерційного потенціалу та перспективності проведення наукових досліджень з позиції ресурсоефективності та ресурсозбереження;
- визначення ресурсозберігаючої, фінансової, бюджетної, соціальної та економічної ефективності дослідження.

### **4.1. Аналіз технічних і конкурентних рішень**

Оскільки ринки перебувають у постійному русі, необхідно систематично проводити детальний аналіз конкуруючих розробок.

Завдяки такому аналізу можна вносити корективи до наукового дослідження, щоб успішніше протистояти своїм конкурентам. Важливо реалістично оцінити сильні та слабкі сторони розробок конкурентів.

Основним конкурентом в Україні можна виділити компанію

«UnitedSmartTechnologies». Яка займається постачанням, продажем, обслуговуванням та встановленням систем безперебійного живлення, енергосистем на сонячних батареях та інших альтернативних джерелах енергії, розробкою та виробництвом систем орієнтації сонячних батарей наземного розміщення та з розміщенням на інших об'єктах, включаючи дахи будівель. Проектування та монтаж енергосистем малої та середньої потужності, а також великих електростанцій на сонячних батареях з використанням трекерів власного та імпортного виробництва.

Перевагою цієї компанії є:

- займається цією сферою вже протягом 9 років;
- система стеження працює за алгоритмом сонячної позиції;
- до складу трекера входить метеостанція, що дозволяє домогтися адаптації до мінливих кліматичних умов;

Недоліками цієї компанії можна назвати таке:

- займаються лише промисловими проектами;
- найвища вартість для середнього споживача;
- не враховується можливість затінення одних сонячних панелей іншими.

В Україні є безліч компаній, що надають послуги установки збірки СЕС, але не одна з них не займаються встановленням та розробкою систем орієнтації.

Оскільки дослідження спрямовані на покращення роботи орієнтації СЕС, то основними критеріями є:

- Підвищення продуктивності виробітку електроенергії СЕС. Цей критерій є основним і досягається за рахунок точності позиціонування системи орієнтації та за рахунок малого споживання електроенергії самої системи.
- Зручність у експлуатації. Цей критерій включається можливості простого обслуговування і проведення технічних робіт з системою орієнтації.
- Автономність. Будь-які системи орієнтації СЕС можуть бути повністю автономні або частково. Цілком автономні системи не потребують

постійної присутності людини, що дозволяє використовувати їх у різних сферах діяльності.

- Безпека. Система орієнтації має відповідати вимогам безпеки. Людина повинна бути захищена від ураження електричним струмом та від отримання механічних ударів.
- Надійність. Забезпечення тривалої працездатності системи під час своєчасного проведення технічних робіт.
- Можливість віддаленого моніторингу. Автономні системи орієнтації можуть застосовуватись у місцях, віддалених від населених пунктів без обслуговуючого персоналу. Можливість віддаленого моніторингу дозволяє стежити за роботою системи.

Аналіз конкурентних технічних рішень з позиції ресурсоефективності та ресурсозбереження проводиться за допомогою оціночної картки, наведеної у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оцінювальна карта порівняння конкурентних технічних рішень

| Критерії оцінки                                        | Вага критерію | Бали |    | Конкурентоспроможність |     |
|--------------------------------------------------------|---------------|------|----|------------------------|-----|
|                                                        |               | БФ   | Бк | Ф                      | Кк  |
| Технічні критерії оцінки ресурсоефективності           |               |      |    |                        |     |
| Підвищення продуктивності виробітку електроенергії СЕС | 0,2           | 5    | 5  | 1                      | 1   |
| Зручність в експлуатації                               | 0,1           | 4    | 4  | 0,4                    | 0,4 |
| Автономність                                           | 0,1           | 4    | 4  | 0,4                    | 0,4 |
| Надійність                                             | 0,1           | 5    | 5  | 0,5                    | 0,5 |
| Безпека                                                | 0,2           | 5    | 4  | 1                      | 0,8 |
| Можливість віддаленого моніторингу                     | 0,1           | 4    | 3  | 0,4                    | 0,3 |
| Економічні критерії оцінки ефективності                |               |      |    |                        |     |
| Фінансування наукової розробки                         | 0,1           | 4    | 4  | 0,4                    | 0,4 |
| Передбачуваний термін експлуатації                     | 0,1           | 5    | 4  | 0,5                    | 0,4 |

|       |   |    |    |     |     |
|-------|---|----|----|-----|-----|
| Разом | 1 | 36 | 33 | 4,6 | 4,2 |
|-------|---|----|----|-----|-----|

Критерії для порівняння та оцінки ресурсоефективності та ресурсозбереження, наведені в таблиці 4.1, підбираються, виходячи з обраних об'єктів порівняння з урахуванням технічних та економічних особливостей розробки, створення та експлуатації. Ця технологія порівнюється з традиційними технологіями, такими як опромінення мішені потужним електронним пучком.

Аналіз показав, що як технічні, так і економічні критерії цього проекту на сьогоднішній момент розвитку можуть зацікавити потенційних покупців, серед яких наукові дослідницькі інститути, технічні ВНЗ та вузькоспрямовані компанії. Так само вдалося визначити критерії, які потребують подальшого опрацювання для найкращого впровадження на ринок.

#### 4.2. Планування комплексу робіт із створення проекту

Визначення трудомісткості та тривалості робіт здійснюється на основі галузевих нормативів, типових норм на розробку конструкторської документації, а для робіт, що мають велику невизначеність на основі ймовірнісних (експертних) методів, що широко використовуються в СПУ (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 - Лінійний графік

| Код роботи | Назва                                                                   | Тривалість, дні | Дата початку робіт | Дата закінчення робіт | Склад учасників   |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| 1          | Складання та затвердження теми та завдання НДР                          | 5               | 5.01.2024          | 10.01.2024            | Керівник, інженер |
| 2          | Вивчення поставленого завдання та літературний пошук матеріалів на тему | 15              | 10.01.2024         | 25.01.2024            | Інженер           |

|   |                                                                     |    |            |            |                   |
|---|---------------------------------------------------------------------|----|------------|------------|-------------------|
| 3 | Визначення послідовності етапів дослідження                         | 5  | 25.01.2024 | 30.01.2024 | Керівник, Інженер |
| 4 | Моделювання СЕС у програмному середовищі MATLAB                     | 15 | 30.01.2024 | 14.02.2024 | Керівник, інженер |
| 5 | Календарне планування робіт                                         | 5  | 14.02.2024 | 19.02.2024 | Керівник, інженер |
| 6 | Проведення необхідних експериментів на установці для здійснення НДР | 60 | 19.02.2024 | 20.04.2024 | Керівник, інженер |
| 7 | Діагностика та аналіз отриманих результатів                         | 15 | 20.04.2024 | 5.05.2024  | Керівник, інженер |
| 8 | Складання звіту                                                     | 20 | 5.05.2024  | 25.05.2024 | Інженер           |

На підставі перерахованих робіт для зручності було побудовано календарний план-графік (Рисунок 4.1) з тривалістю етапів у календарних днях.

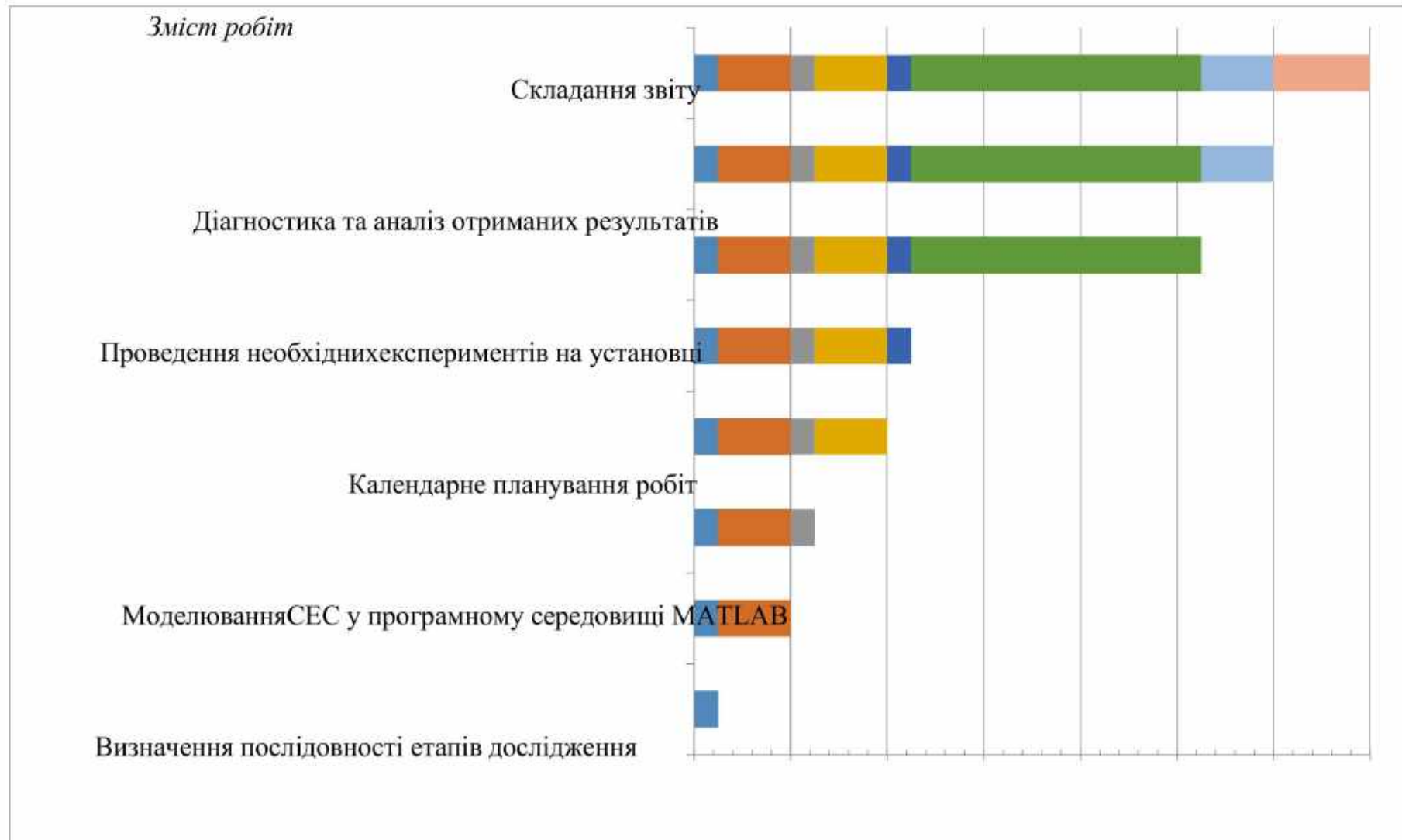


Рисунок 4.1 – Лінійний план-графік реалізації НТІ

### 4.3. Визначення трудомісткості робіт

Розрахунок трудомісткості здійснюється дослідно-статистичним методом, що ґрунтується на визначенні очікуваного часу виконання робіт у людино- днях за формулою (4.1):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}; \quad (4.1)$$

де  $t_{ож}$  – очікувана трудомісткість виконання роботи, чол.-дн.;

$t_{min}$  – мінімально можлива трудомісткість виконання заданої роботи чол.-дн.;

$t_{max}$  – максимально можлива трудомісткість виконання заданої роботи чол.-дн.

Розрахуємо значення очікуваної трудомісткості роботи:

Для встановлення тривалості роботи у робочих днях використовуємо формулу (4.2):

$$t_p = t_{ож} / Ч; \quad (4.2)$$

де  $t_p$  - Тривалість однієї роботи, роб. дн.;

$t_{ож}$  - очікувана трудомісткість виконання однієї роботи, чол.-дн.;

Ч - чисельність виконавців, що виконують одночасно одну і ту ж роботу на даному етапі, чол.

Для зручності побудови календарного план-графіка тривалість етапів у робочих днях переводиться в календарні дні та розраховується за такою формулою (4.3):

$$T_K = T_p \cdot k; \quad (4.3)$$

де  $T_K$  – тривалість виконання однієї роботи, календ. дн.;

$T_p$  – тривалість однієї роботи, роб. дн.;

k – коефіцієнт календарності, призначений перекладу робочого дня у календарне.

Коефіцієнт календарності розраховується за формулою (4.4):

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}}; \quad (4.4)$$

де  $T_{кг}$  – кількість календарних днів на рік;  $T_{вд}$  – кількість вихідних днів на рік;  $T_{пд}$  – кількість святкових днів на рік.

Визначимо тривалість етапів робочих днях і коефіцієнт календарності:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45;$$

Тоді тривалість етапів у робочих днях, слід врахувати, що розрахункову величину тривалості робіт  $T_k$  необхідно округлити до цілих чисел.

Результати розрахунків наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Тимчасові показники проведення ВКР

| №роб.    | Виконавці |                       |                       |                     |                 |               |
|----------|-----------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------|
|          |           | $t_{\min Ч}$<br>ол-дн | $t_{\max Ч}$<br>ол-дн | $t_{ож Ч}$<br>ол-дн | $T_p$<br>роб.дн | $T_{ккал.дн}$ |
| 1        | РП, ІН    | 4                     | 10                    | 4,4                 | 2,2             | 3             |
| 2        | ІН        | 14                    | 20                    | 16,4                | 16,4            | 24            |
| 3        | РП, ІН    | 4                     | 10                    | 4,4                 | 2,2             | 3             |
| 4        | РП, ІН    | 14                    | 20                    | 16,4                | 8,2             | 12            |
| 5        | РП, ІН    | 4                     | 10                    | 4,4                 | 2,2             | 3             |
| 6        | РП, ІН    | 50                    | 65                    | 46,7                | 23,35           | 34            |
| 7        | РП, ІН    | 14                    | 20                    | 16,4                | 8,2             | 12            |
| 8        | ІН        | 19                    | 25                    | 21,4                | 21,4            | 31            |
| Підсумок |           |                       |                       |                     |                 | 122           |

Таким чином, у проектній діяльності беруть участь двоє співробітників: керівник проекту та інженер.

#### 4.4. Бюджет наукового дослідження

При плануванні бюджету наукового проекту включається вартість всіх витрат, необхідних для реалізації комплексу робіт, що становлять утримання даної розробки;

##### 4.4.1. Розрахунок основної заробітної плати

До цієї статті включається основна заробітна плата наукових та інженерно-технічних працівників, робочих макетних майстерень та дослідних виробництв, які безпосередньо беруть участь у виконанні робіт з даної теми. Величина витрат із заробітної плати визначається з трудомісткості виконуваних робіт і системи оплати праці. До складу основної заробітної плати включається премія, що виплачується щомісяця із фонду заробітної плати (розмір визначається Положенням про оплату праці).

Дані для розрахунку:

- 1) Оклад: наукового керівника (Доцент) - 33664 грн.
- 2) (РК), інженера - 9489 грн.
- 3) Плановий фонд робочого дня протягом місяця – 176 годин (22 дня);
- 4) Додаткова вести.
- 5) Районний коефіцієнт (1,3).

Стаття включає основну заробітну плату працівників, безпосередньо зайнятих виконанням проекту (включаючи премії, доплати) та додаткову заробітну плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}; \quad (4.5)$$

де  $З_{осн}$  – основна плата;

$З_{доп}$  – додаткова заробітна плата.

Основна заробітна плата ( $З_{осн}$ ) керівника розраховується за наступною формулою:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}; \quad (4.6)$$

де  $Z_{\text{осн}}$  - основна заробітна плата одного працівника;

$T_{\text{рб}}$  - тривалість робіт, що виконуються науково-технічним працівником, роб.дн.

$Z_{\text{дн}}$  - середньоденна заробітна плата працівника, грн. Середньоденна заробітна плата розраховується за такою формулою:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}; \quad (4.7)$$

де  $Z_{\text{м}}$  - місячний посадовий оклад працівника, грн.;

$M$  – кількість місяців роботи без відпустки протягом року:

- при відпустці 24 роб. дня  $M = 11,2$  місяці, 5-денний тиждень;
- при відпустці 48 раб.

$F_{\text{д}}$  -дійсний річний фонд робочого часу на науково- технічного персоналу, роб. дн. (Таблиця 4).

Таблиця 4.4 - Баланс робочого часу

| Показники робочого часу             | Керівник | Інженер |
|-------------------------------------|----------|---------|
| Календарне число днів               | 365      | 365     |
| Кількість неробочих днів:           |          |         |
| – вихідні;                          | 52       | 104     |
| – святкові дні                      | 14       | 14      |
| Втрати робочого часу:               |          |         |
| – відпустка;                        | 48       | 24      |
| – невиходи через хворобу            | —        | —       |
| Справжній річний фонд робочого часу | 251      | 223     |

Місячний посадовий оклад працівника розраховується за такою формулою:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ок}} \cdot k_{\text{р}}; \quad (4.8)$$

де  $Z_{ок}$  - оклад працівника, грн.

$k_p$  - районний коефіцієнт, по місту Харків дорівнює 1,3.

Основна заробітна плата наукового керівника розраховується виходячи з галузевої оплати труда. Галузева система оплати праці ТПУ передбачає наступний склад заробітної плати:

оклад – визначається підприємством. У ТПУ оклади розподілені відповідно до займаних посад, наприклад, асистент, ст. викладач, доцент, професор.

стимулюючі виплати – встановлюються керівником підрозділів за ефективну працю, виконання додаткових обов'язків тощо.

– інші виплати: районний коефіцієнт.

Розрахуємо заробітну платню наукового керівника. Місячний посадовий оклад наукового керівника:

$$Z_m = 33664 \cdot 1,3 = 43763,2 \text{ грн.}$$

Середньоденна заробітна плата наукового керівника:

$$Z_{дн} = \frac{43763,2 \cdot 10,4}{251} = 1813,3 \text{ грн/день}$$

Основна заробітна плата наукового керівника:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 1813,3 \cdot 8 = 14506,4 \text{ грн. ;}$$

Розрахуємо заробітну плату інженера.

$$Z_m = 9489 \cdot 1,3 = 12335,7 \text{ грн.}$$

Середньоденна заробітна плата наукового керівника:

$$Z_{дн} = \frac{12335,7 \cdot 10,4}{223} = 575,3 \text{ грн/день}$$

Основна заробітна плата наукового керівника:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 575,3 \cdot 8 = 4602,4 \text{ грн. ;}$$

Витрати з додаткової зарплати виконавців теми враховують величину передбачених Трудовим кодексом РФ доплат за відхилення від

нормальних умов праці, і навіть виплат, що з забезпеченням гарантій і компенсацій.

Додаткова заробітна плата розраховується виходячи з 10-15% від основної заробітної плати працівників, які безпосередньо беруть участь у виконанні теми:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}; \quad (4.9)$$

де  $Z_{\text{доп}}$  - додаткова заробітна плата, грн.;

$k_{\text{доп}}$  - коефіцієнт додаткової заробітної плати;

$Z_{\text{осн}}$  - основна плата, грн.

Прийmemo коефіцієнт додаткової заробітної плати рівним 0,15 для наукового керівника та 0,1 для інженера. Результати розрахунку основної та додаткової заробітної плати виконавців наукового дослідження подано у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Заробітна плата виконавців дослідницької роботи

| Заробітна плата, грн. | Керівник | Інженер |
|-----------------------|----------|---------|
| Основна зарплата      | 14506,4  | 4602,4  |
| Додаткова зарплата    | 2176     | 460,2   |
| Зарплата виконавця    | 16682,4  | 5062,7  |
| Разом за статтею СЗП  | 21745,1  |         |

#### 4.4.2. Відрахування до позабюджетних фондів

Відрахування із заробітної плати визначаються за такою формулою:

$$C_{\text{позаб}} = k_{\text{позаб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.10)$$

де  $k_{\text{зовніш}}$  - коефіцієнт, що враховує розмір відрахувань із заробітної плати. Цей коефіцієнт становить 27,1% від витрат на заробітну плату і включає:

- 6) відрахування до пенсійного фонду;
- 7) на соціальне страхування;
- 8) на медичне страхування

Отже, відрахування з заробітної плати склали для наукового керівника:

$$C_{\text{зовнеб}} = 0,271 \cdot 16682,4 = 4520,9 \text{ грн.}$$

Відрахування із заробітної плати склали для інженера:

$$C_{\text{зовнеб}} = 0,271 \cdot 5062,7 = 1372 \text{ грн.}$$

Відрахування до позабюджетних фондів разом склали 5892,9.

#### 4.4.3. Витрати електроенергії

Основним джерелом витрат електроенергії є ЕОМ. Оскільки наукові дослідження переважно з моделюванням системи орієнтації.

Витрати на електроенергію розраховуються за такою формулою:

$$Z_{\text{ел}} = C_{\text{ел}} \cdot P \cdot F_{\text{про}} = 5,8 \cdot 1 \cdot 900 = 5220 \text{ грн} \quad (4.11)$$

де  $C_{\text{ел}}$  - тариф на промислову електроенергію (5,8 грн. за 1 кВт · год);

$P$  - Потужність обладнання, кВт;

$F_{\text{про}}$  - час використання устаткування, год. Витрати електроенергію склали 5220 грн

#### 4.4.4. Накладні витрати

До цієї статті включаються витрати на управління та господарське обслуговування, які можуть бути віднесені безпосередньо на конкретну тему.

Розрахунок накладних витрат ведеться за такою формулою:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}); \quad (4.12)$$

де  $k_{\text{накл}}$  - Коефіцієнт накладних витрат.

$$C_{\text{накл}} = 0,2 \cdot 24745,1 = 4349 \text{ грн.}$$

На підставі отриманих даних за окремими статтями витрат складається

калькуляція планової собівартості НТІ за формою, наведеною у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Розрахунок бюджету витрат НТІ

|  | Найменування статті                                  | сума, грн. |
|--|------------------------------------------------------|------------|
|  | Витрати по основній заробітній платі виконавців теми | 21745,1    |
|  | Відрахування до позабюджетних фондів                 | 5892,9     |
|  | Накладні витрати                                     | 4349       |
|  | Витрати електроенергії                               | 5220       |
|  | Бюджет витрат НТІ                                    | 37207      |

#### 4.5. Оцінка порівняльної ефективності дослідження

Визначення ефективності відбувається з урахуванням розрахунку інтегрального показника ефективності наукового дослідження. Його знаходження пов'язане з визначенням двох середньозважених величин: фінансової ефективності та ресурсефективності.

Інтегральний показник фінансової ефективності наукового дослідження одержують під час оцінки бюджету витрат трьох (або більше) варіантів виконання наукового дослідження (таблиця 8). Для цього найбільший інтегральний показник реалізації технічної задачі приймається за основу розрахунку (як знаменник), з яким співвідноситься фінансові значення за всіма варіантами виконання.

Інтегральний фінансовий показник розробки визначається:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}; \quad (4.13)$$

де  $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$  - інтегральний фінансовий показник розробки;

$\Phi_{pi}$  - вартість і-го варіанту виконання;

$\Phi_{\text{max}}$  - максимальна вартість виконання науково-дослідного проекту (в т.ч. аналоги).

Отримана величина інтегрального фінансового показника розробки відбиває відповідне чисельне збільшення бюджету витрат розробки в разях

(значення більше одиниці), або відповідне чисельне здешевлення вартості розробки в разях (значення менше одиниці, але більше нуля).

Оскільки технологія має одне виконання, то

$$P_{\text{финр}} = \frac{37207}{48956} = 0,76;$$

Для аналогів відповідно:

$$I_{\text{фин1}}^{a1} = \frac{41613}{48956} = 0,85; I_{\text{фин1}}^{a2} = \frac{48956}{48956} = 1;$$

Інтегральний показник ресурсоефективності варіантів виконання об'єкта дослідження можна визначити так:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i ; \quad (4.14)$$

де  $I_{pi}$ - Інтегральний показник ресурсоефективності для  $i$ -го варіанти виконання розробки;

$a_i$  - ваговий коефіцієнт  $i$ -го варіанту виконання розробки;

$b_i$  - бальна оцінка  $i$ -го варіанту виконання розробки, встановлюється експертним шляхом за обраною шкалою оцінювання;

$n$ - Число параметрів порівняння.

Розрахунок інтегрального показника ресурсоефективності представлений нижче.

Таблиця 4.7 - Порівняльна оцінка характеристик варіантів виконання проекту

| Критерії \ ПЗ                                            | Ваговий коефіцієнт параметра | Поточний проект | Аналог 1 | Аналог 2 |
|----------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------|----------|----------|
| 1. Підвищення зростання продуктивності праці користувача | 0,25                         | 5               | 4        | 4        |
| 2. Зручність в експлуатації                              | 0,2                          | 4               | 4        | 5        |

|                       |      |      |     |     |
|-----------------------|------|------|-----|-----|
| 3. Надійність         | 0,25 | 5    | 5   | 4   |
| 4. Економічність      | 0,15 | 5    | 4   | 5   |
| 5. Матеріаломісткість | 0,15 | 4    | 3   | 5   |
| РАЗОМ                 | 1    | 4,65 | 4,1 | 4,5 |

Інтегральний показник ефективності варіантів виконання розробки та аналога визначається на підставі інтегрального показника ресурсоефективності та інтегрального фінансового показника за формулою:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{финр}}^{\text{исп}}}; \quad (4.15)$$

В результаті:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{4,65}{0,76} = 6,11; I_{\text{фина1}}^{a1} = \frac{4,1}{0,85} = 4,82; I_{\text{фина2}}^{a2} = \frac{4,5}{1} = 4,5;$$

Порівняння інтегрального показника ефективності поточного проекту та аналогів дозволить визначити порівняльну ефективність проекту.

Порівняльна ефективність проекту:

$$E_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финаі}}^{aі}}; \quad (4.16)$$

Результат обчислення порівняльної ефективності проекту та порівняльна ефективність аналогів представлені у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 - Порівняльна ефективність розробки

| Показники                                          | Розробка | Аналог 1 | Аналог 2 |
|----------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Інтегральний фінансовий показник розробки          | 0,76     | 0,85     | 1        |
| Інтегральний показник ресурсоефективності розробки | 4,65     | 4,1      | 4,50     |
| Інтегральний показник ефективності                 | 6,11     | 4,82     | 4,5      |
| Порівняльна ефективність варіантів виконання       | 1        | 1,26     | 1,35     |

Таким чином, ґрунтуючись на визначенні ресурсозберігаючої, фінансової, бюджетної, соціальної та економічної ефективності

дослідження, провівши необхідний порівняльний аналіз, можна дійти невтішного висновку про перевагу виконаної розробки над аналогами.

#### **4.6. Висновок за розділом 4**

У поточному розділі було виконано таке:

аналіз та оцінка науково-технічного рівня проекту, який показав, що цей проект має середню значимість теоретичного та практичного рівня.

розроблено календарний план проекту та побудовано календарний план-графік. У проектній діяльності беруть участь двоє співробітників: керівник проекту та інженер.

визначено трудомісткість робіт, що склала 140 календарних днів  
Проведені дослідження спрямовані на ефективність роботи СЕС.

Кут потрапляння сонячних променів на поверхню панелей досить сильно впливає на коефіцієнт відображення, отже, на частку несприйнятої сонячної енергії, отже, падіння ККД, що отримується, Ефективна площа дорівнює реальній площі панелі, помножена на синус кута між площиною та напрямком потоку. Тому, якщо панель перпендикулярна потоку, її ефективна площа така сама, як і реальна. Якщо потік відхилити на  $60^\circ$ , площа становить половину реальної площі. Якщо потік паралельний панелі, то ефективна площа дорівнює нулю. В результаті видно, що відхилення потоку від перпендикуляра до панелі не просто збільшує відображення, а може знижувати ефективну площу, зумовлюючи зниження вироблення такої енергії.

## Література

1. Бучма І.М. Мікропроцесорні пристрої Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. – 236 с.
2. Sushabhan Choudhury. ZigBee and Bluetooth Network based Sensory Data Acquisition System [Електронний ресурс] / Sushabhan Choudhury, Piyush Kuchhal, Rajesh Singh. – doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.195 – P. 367-372.
3. Kyung Sup Kwak. An Overview of IEEE 802.15.6 Standard" [Electronic resource] / Kyung Sup Kwak, Sana Ullah, Niamat Ullah // 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010), 7-10 Nov., 2010. – Rome, Italy. – DOI: 10.1109/ISABEL.2010.5702867.
4. Sushabhan Choudhury. ZigBee and Bluetooth Network based Sensory Data Acquisition System [Електронний ресурс] / Sushabhan Choudhury, Piyush Kuchhal, Rajesh Singh. – doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.195 –P. 367-372.
5. IEEE 802.11 ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi / Nitsche, T., Cordeiro, C., Flores, A. B., Knightly, E. W., Perahia, E., & Widmer, J. C. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – 52 (12). – Pp. 132-141.
6. IEEE 802.11 ad: A standard for TV white space spectrum sharing / Flores, A. B., Guerra, R. E., Knightly, E. W., Ecclesine, P., & Pandey, S. // IEEE Communications Magazine. – 2013. – 51 (10). – Pp. 92-100.
7. Галай В.М. Теорія оптимальних систем автоматичного керування технологічними процесами: монографія/ В.М.Галай, К.Х.Зеленський, А.М. Сільвестров. – Полтава: ПНТУ, 2009. – 153 с.
8. Жлуктенко В. І. Економетрія/В. І. Жлуктенко, Н.К. Водзянова, С. С. Савіна, О. В. Колодінська (під ред. С. І. Наконечного). – Київ: Видавництво Європейського університету, 2005. – 550 с.
9. Зеленський К. Х. Комп'ютерні методи прикладної математики / К. Х. Зеленський, В. М. Ігнатенко, О. П. Коц. — Київ: Академперіодика, 2002. – 480 с.
10. Івахненко О. Г. Довгострокове прогнозування та керування скляними системами/О.Г. Івахненко. – Київ: Техніка, 1975. –250 с.
11. Нестеренко О.В., Ковтунець О.В., Фаловський О.О. Інтелектуальні системи і технології. Ввідний курс/ О.В.Нестеренко, О.В. Ковтунець, О.О. Фаловський. – Київ:Національна академія управління, 2017. – 90 с.
12. Островерхов М.Я. Методи дослідження електротехнічних комплексів і систем/М.Я. Островерхов, А.М. Сільвестров, К.Х. Зеленський/К.: ТАЛКОМ, 2019. - 300 с.

13. Самсонов В. В., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання/Київ, НУХТ, 2022. – 385 с.
14. Сільвестров А. М. Багатократно адаптивні системи ідентифікації / А. М. Сільвестров, О. М. Паченко. – К. : Техніка, 1983. – 110 с.
15. Антонюк В. С. Методологія наукових досліджень: Навч. посіб./В.С.Антонюк, Л. Г. Полонський, В. І. Аверченков, Ю. А. Малахов. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2015. – 274 с.
16. Бідюк П.І. Методи прогнозування/П. Бідюк, О. Меньяйленко, О.Половцев. – Т 2. – Луганськ : Альма-матер, 2008. – 305 с.
17. Важинський С.Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень: Навч. посіб. /С. Е. Важинський, Т. І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. –260 с.
18. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>
19. Дубовський С.В. Техніко-економічні оцінки перспективних природоохоронних технологій теплової енергетики України / С.В. Дубовський, В.С. Коберник // Проблеми загальної енергетики. –2013. – № 2(33). –С. 49-56.
20. Залознова Ю.С. Економічні та соціальні проблеми розвитку промисловості: монографія / Ю.С. Залознова; НАН України, Інститут економіки промисловості. –Київ, 2017. –288 с.
21. Ішук С.І., Гладкий О.В. Техніко-економічні основи промислового виробництва: навч. посібник. – К.: Академія, 2011. – 296 с.
22. Артюх С.Ф. Автоматизовані системи керування технологічними процесами в енергетиці / С.Ф.Артюх, М.А.Дуель, І.Г.Шелепов. –Харків, "Знання", –2001 р., –416 с.
23. Дуель М.О. Автоматизовані системи управління технологічними процесами енергоблоків теплових електростанцій (розробка, дослідження, впровадження): автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 / М.О. Дуель. –Харків, 1998. –36 с.
24. Савицький В. Технічні засоби автоматизації. - Львівська політехніка, 2018, -292с.
25. Ельперін І.В. Автоматизація виробничих процесів. -Ліра-К, 2017, -378с.
26. Ладанюк А. П.- Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування). Ліра-К, 2016, -312с.
27. Автоматизація технологічних процесів. Синєглазов В.М., Сергєєв І. Ю. -Київ, 2015, -444с.
28. Автоматизація виробничих процесів. Підручник. Ельперін

І.В., Пупена О.М., Сідлецький В.М. -Ліра К, 2017, -378с.

29. Основи автоматики та автоматизації, Пістун Є.П., Стасюк І.Д. - Львівська політехніка, 2018, -336с.

30. Теоретичні основи автоматики. Корчемний М.О., Клендій П.Б., Потапенко М.В. -Богдан НК, 2012, -304с.

31. Технології проектування комп'ютерних систем. Б.І. Масловський, В.І. Дрововозов, О.В. Коба. -Київ, 2015, -500с.

32. Обладнання автоматизованого виробництва Бочков В. М., Сілін Р. І., - Львівська політехніка. 2015, -404с.

33. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. - Львівська політехніка, 2020, -220с.

**ВІДГУК**

**наукового керівника кваліфікаційної роботи  
рівня вищої освіти “магістр”**

**виконаного на тему: Підвищення якості керування сонячною батареєю  
шляхом удосконалення системи керування**

**студентом (кою) КРАВЧЕНКО Ольга Олексіївна**

(прізвище, ім'я)

Студент Кравченко О.О. виконала магістерську роботу на тему “Підвищення якості керування сонячною батареєю шляхом удосконалення системи керування” повністю відповідно до завдання. Робота присвячена актуальному питанню дослідження та удосконалення систем керування сонячною батареєю та дослідженню питання їх ефективності в різних режимах роботи. Студент Кравченко О.О. працювала над роботою систематично, докладно вивчав рекомендуєму літературу, і правильно застосовував отримані знання. Графічна частина роботи виконана відповідно до норм і вимогами. Всі елементи схем в записці і кресленнях відповідають вимогам ЕСКД до розмірів умовних графічних позначень в електричних системах.

Робота має практичну значимість та наукову цінність

У цілому робота виконана грамотно, акуратно, основні цілі роботи досягнуті, а поставлені завдання виконані. Робота заслуговує оцінки “відмінно”.

**Керівник кваліфікаційної роботи**

\_\_**кт.н., доцент**\_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

\_\_**Близниченко О.М.**\_\_\_\_\_  
(ім'я, прізвище)

## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу

“\_\_Магістр\_\_” рівня вищої освіти

виконаний(у) на тему: **Підвищення якості керування сонячною батареєю шляхом удосконалення системи керування**студентом (кою) **КРАВЧЕНКО Ольга Олексіївна**\_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

Студент Кравченко О.О. виконала магістерську роботу на тему “Підвищення якості керування сонячною батареєю шляхом удосконалення системи керування” повністю відповідно до завдання.

В роботі проведено досить глибоке дослідження характеристик систем керування сонячною батареєю. Визначені основні фактори, які впливають на поліпшення основних характеристик систем керування. Визначені області застосування систем керування, а також критерії їх ефективного використання.

Робота присвячена актуальному питанню підвищення ефективності систем керування. Це питання має високу практичну значимість, тому що енергозбереження є на сьогодні основним напрямком розвитку енергетики України. Вирішення цього питання дозволяє не тільки заощаджувати кошти на додатковому виробництві електроенергії, но і поліпшити питання екології.

Робота має практичну значимість та наукову цінність.

Графічна частина роботи виконана відповідно до норм та вимог. Всі елементи схем в записці і кресленнях відповідають вимогам ЕСКД до розмірів умовних графічних позначень в електричних системах.

Робота виконана на актуальну тему і відбиває високу інженерну підготовку автора.

Па роботі є наступні зауваження:

**Бажано провести порівняльний аналіз різних типів сонячних батарей з точки зору їх систем керування**

У цілому робота виконана акуратно, грамотно та заслуговує оцінки «відмінно».

Рецензент

\_к.т.н., доцент\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

\_Буданов П.Ф.\_

(ім'я, прізвище)