Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Новицького Кирила Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.587.2
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії фотоелектричними модулями

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики
(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня К. В. Новицький
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Рибіцький Ігор Володимирович, д-р. техн. наук, доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

О. Є. Середюк
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

Освітній рівень *бакалавр*

Спеціальність *152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»*

Освітня програма *Інженерія відновлюваної енергетики*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

інформаційно-вимірювальних

технологій

О. Є. Середюк

«____» _____20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Новицькому Кирилу Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії фотоелектричними модулями*

керівник роботи *Рибіцький Ігор Володимирович, д-р. техн. наук., доцент*,

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

затверджені наказом ІФНТУНГ від "24" квітня 2024 року № 271/7

2. Строк подання студентом роботи "14" червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи _____

_____

_____

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

1.Проаналізувати перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні.

2. Дослідити існуючі рішення вдосконалення генерації електричної енергії для фотоелектричних модулів.

3. Здійснити порівняльний аналіз генерації електричної енергії стаціонарними і трекерними системами. Розрахувати необхідні енергетично-економічні показники.

4. Розробити алгоритмічно-апаратну складову автономного сонячного трекера: обрати необхідне апаратне забезпечення, розробити програмне забезпечення мікроконтролерного модуля. Розробку ПЗ здійснити на базі Arduino, відлагодження ПЗ здійснити у середовищі Proteus.

_____

_____

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

_____

_____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтролер	*доцент Яворський А. В.*		
Перевірка на плагіат	*доцент Миндюк В. Д.*		

7. Дата видачі завдання "24" квітня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	24.04.2024 р.	
2	Розроблення 1 розділу: «Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні. Аналіз існуючих рішень щодо вдосконалення генерації».	24.04.2024 – 12.05.2024 р.	
3	Розроблення 2 розділу: «Порівняльний аналіз генерації електричної енергії стаціонарними і трекерними системами».	13.05.2024 – 23.05.2024 р.	
4	Розроблення 3 розділу: «Алгоритмічно-апаратна складова автономного сонячного трекера».	24.05.2024 – 06.06.2024 р.	
5	Оформлення роботи.	07.06.2024 – 14.06.2024 р.	

Студент _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Новицький К. В. «Удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії фотоелектричними модулями». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2024.

Бакалаврська робота присвячена темі удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії фотоелектричними модулями. Вона складається із вступу, трьох розділів, висновка, переліка використаних джерел і додатка. Загальний обсяг роботи – 56 сторінок, 29 рисунків, 2 таблиці. Кількість використаних джерел – 19 од.

У роботі розглянуто потенціал використання сонячної енергії в Україні: його проаналізовано шляхом використання методу аналізу та синтезу інформації із різних наукових джерел; описано залежність генерації електроенергії фотоелектричними модулями від їх кута нахилу та кута падіння сонячних променів на площину фотоелектричних модулів; сформовано типологію автономних сонячних трекерів, зважаючи на кількість осей обертання в установці, умови експлуатації, вартість компонентів тощо; порівняно ефективність використання стаціонарних і трекерних СЕС; розраховано енергетично-економічну доцільність застосування трекерних систем у Івано-Франківському регіоні за допомогою веб-застосунку фотоелектричної географічної інформаційної системи PVGIS; розроблено алгоритми удосконалення системи визначення кута нахилу трекера: алгоритм основної програми, підпрограми виконання операцій трекера, підпрограми контролю досягнення граничних положень, підпрограми увімкнення / вимкнення двигунів трекера; здійснено обґрунтований вибір функціональних елементів установки, необхідних для її експлуатації та забезпечення автономності.

Вагомими практичними результатами виконання кваліфікаційної роботи освітнього рівня «бакалавр» є розроблення алгоритмів роботи АСТ, спрямованих на удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії ФЕМ, та створення відповідного програмного забезпечення для такої установки.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, КУТ НАХИЛУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ, ТРЕКЕРНА СИСТЕМА, АВТОНОМНИЙ СОНЯЧНИЙ ТРЕКЕР, КЕРУВАННЯ КУТОВИМ ПОЛОЖЕННЯМ, ARDUINO.

ABSTRACT

Novytskyy, K. V. “Improvement of the system for determining the angle of inclination of trackers to increase the efficiency of electricity, generated by photovoltaic modules”. Diploma work of educational level – bachelor, in the form of a manuscript. Speciality – 152 “Metrology and information and measuring equipment”. – Ivano-Frankivsk, 2024.

The bachelor’s thesis is devoted to the topic of improving the tracker angle determination system to increase the efficiency of electricity generation by photovoltaic modules. It consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The total volume of the work is 56 pages, 29 figures, 2 tables. The number of sources used is 19.

The paper considers the potential of using solar energy in Ukraine: it was analyzed by using the method of analysis and synthesis of information from various scientific sources; the dependence of electricity, generated by photovoltaic modules, on their angle of inclination and the angle of incidence of sunlight on the plane of photovoltaic modules is described; a typology of autonomous solar trackers was formed, taking into account the number of rotation axes in the installation, operating conditions, cost of components, etc.; comparing the efficiency of using stationary and tracker Solar Power Plants; the energy and economic feasibility of using tracker systems in the Ivano-Frankivsk region was calculated using the photovoltaic geographic information system web application PVGIS; algorithms for improving the system for determining the angle of inclination of the tracker were developed: the algorithm of the main program, subroutines for performing tracker operations, subroutines for controlling the achievement of limit positions, subroutines for turning on / off the tracker motors; a reasoned selection of the functional elements of the installation necessary for its operation and ensuring autonomy was made.

Key words*:* SOLAR ENERGY, PHOTOVOLTAIC MODULE, ANGLE OF INCLINATION OF THE PHOTOVOLTAIC MODULE, TRACKING SYSTEM, AUTONOMOUS SOLAR TRACKER, ANGULAR POSITION CONTROL, ARDUINO.

ЗМІСТ

Перелік основних позначень і скорочень символів 9
Вступ 10
Розділ 1. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні. Аналіз існуючих рішень щодо вдосконалення генерації 12
1.1. Потенціал використання сонячної енергії в Україні 12
1.2. Залежність ефективності ФЕМ від їх кута нахилу. Типологія АСТ ... 16
1.3. Існуючі прототипи установок АСТ. Вибір і обґрунтування напрямків дослідження 21
Розділ 2. Порівняльний аналіз генерації електричної енергії стаціонарними і трекерними системами 26
2.1. Моделювання роботи СЕС у Івано-Франківському регіоні у веб-застосунку PVGIS 26
2.2. Енергетично-економічна доцільність використання АСТ у Івано-Франківському регіоні 32
Розділ 3. Алгоритмічно-апаратна складова автономного сонячного трекера 35
3.1. Аналіз функціональних елементів АСТ 35
3.2. Розроблення алгоритмів роботи АСТ 37
3.3. Вибір апаратного забезпечення установки 42
3.4. Розроблення програмного забезпечення мікроконтролерного модуля АСТ 44
Висновки 47
Перелік використаних джерел 49
Додатки 51
Додаток А. Програмне забезпечення мікроконтролерного модуля АСТ . 51

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

DAT – Dual Axis Tracker (Трекер з двома осями обертання)

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (Пам’ять, що програмується та очищується за допомогою електрики)

HSAT – Horizontal Single Axis Tracker (Горизонтальний одновісний трекер)

ICSP – In-Circuit Serial Programming (Внутрішньосхемне програмування)

SPA – Solar Position Algorithm (Алгоритм визначення положення Сонця)

SRAM – Static Random Access Memory (Статична оперативна пам’ять з довільним доступом)

TSAT – Tilted Single Axis Tracker (Трекер з похилою віссю обертання)

UART – Universal Asynchronous Receiver / Transmitter (Універсальний асинхронний приймач / передавач)

USB – Universal Serial Bus (Універсальна послідовна шина)

VSAT – Vertical Single Axis Tracker (Вертикальний одновісний трекер)

АСТ – Автономний сонячний трекер

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач

ККД – Коефіцієнт корисної дії

СЕС – Сонячна електростанція

ФЕМ – Фотоелектричний модуль

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність роботи

Сучасні проблеми енергетичного дефіциту, з якими стикається світ, особливо країни, що розвиваються, вимагають знайти найбільш зручне для використання альтернативне джерело енергії, яке б доповнило звичайні викопні види палива. Альтернативні джерела енергії включають в себе сонячну, вітрову та гідроенергетику. Серед них найбільшого поширення набуло використання сонячної енергії.

Сонячна енергія – це енергія, що генерується завдяки використанню енергії сонячного випромінювання. Воно є найчистішим джерелом енергії, оскільки не забруднює клімат. Саме тому для кваліфікаційної роботи було обрано ідею, пов’язану із перетворенням сонячної енергії в електричну шляхом використання фотоелектричних модулів (далі – ФЕМ).

На жаль, сонячна енергетика не вирізняється високим коефіцієнтом корисної дії сонячних елементів, з яких складаються ФЕМ. Відповідно, це обмежує її застосування в регіонах, де сонячна інсоляція значно змінюється зі зміною пори року.

Постійна зміна кута падіння сонячних променів відносно землі зменшує потужність генерації енергії. Вирішити цю проблему допоможе система відстеження сонячного випромінювання – автономний сонячний трекер (далі – АСТ). Він зможе розташовувати ФЕМ якомога більш перпендикулярно до сонця протягом дня.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає у вирішенні важливої науково-практичної задачі в галузі сонячної енергетики, розробленні алгоритму роботи АСТ та удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії ФЕМ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати існуючі рішення щодо АСТ;
- обгрунтувати доцільність використання АСТ;

- обрати необхідні елементи для функціонування АСТ;
- розробити алгоритми роботи АСТ;
- створити програмне забезпечення на основі отриманих алгоритмів.

Об’єктом дослідження є спосіб удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії ФЕМ, що полягає у відслідковуванні сонячних променів та максимально ефективному позиціонуванні ФЕМ.

Предметом дослідження є потенціал позиціонування ФЕМ максимально перпендикулярно до сонячних променів та відповідне збільшення генерації електроенергії.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених в роботі задач використовувались теоретичні та емпіричні методи. До теоретичних методів належить формування типології АСТ, до емпіричних – метод аналізу та синтезу інформації під час підбору компонентів установки, розрахунковий метод під час обчислення енергетично-економічної доцільності використання АСТ у Івано-Франківському регіоні та метод моделювання установки у середовищі Proteus із відповідним описом її програмного забезпечення.

Практичне значення одержаних результатів

Вагомими практичними результатами виконання кваліфікаційної роботи є розроблення алгоритмів роботи АСТ, спрямованих на удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії ФЕМ, та створення відповідного програмного забезпечення для такої установки.

РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ГЕНЕРАЦІЇ

1.1. Потенціал використання сонячної енергії в Україні

Сумнозвісні події, що відбуваються з енергетикою України, починаючи з осені 2022 року, коли країною-ворогом було завдано перших ударів по енергосистемі нашої держави, свідчать про необхідність розвитку методів виробництва електроенергії, відмінних від традиційних. Зважаючи на вичерпність традиційних паливно-енергетичних ресурсів, ріст попиту на електроенергію та впровадження найновітніших енерговитратних технологій, проблема генерації достатньої кількості електроенергії станом на зараз є актуальною у світі та надзвичайно гострою в Україні. Події, що відбуваються зараз, є свідченням того, що забезпечення надійного енергопостачання є одним з основних стратегічних пріоритетів в XXI столітті, найважливішою умовою нормального функціонування всіх сфер економіки країн світу. Швидке зростання потреби в електричній енергії й кризовий стан енергетичної системи України зумовлюють необхідність широкого використання відновлювальних традиційних й нетрадиційних джерел енергії. Однією із альтернативних форм енергії, використання якої здобуло чи не найбільшу популярність у побутовому і промисловому використанні, є сонячна енергія.

Сонячна енергія походить з сонячного світла і тепла. Вона не лише забезпечує споживачів електроенергією та/або теплом, але й зменшує парниковий ефект й уповільнює негативні кліматичні зміни. Зазвичай така енергія генерується за допомогою сонячних електростанцій, які можуть бути розташовані на поверхні землі або дахах будинків. [14, с. 203]

На думку О. Т. Возняк, сонячне випромінювання є екологічно чистим, безвідходним, поновлюваним джерелом енергії. Запаси такої енергії величезні: щорічно на Землю надходить $1{,}05 \cdot 10^{18}$ кВт·год сонячної енергії, з яких

$2{,}0 \cdot 10^{17}$ кВт·год припадає на поверхню суші. Для перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію (ЕЕ) використовують різного виду та типу сонячні електростанції. [7, с. 5]

Важливим аргументом на користь відновлюваної та, зокрема, сонячної енергетики є катастрофічний парниковий ефект. Ю. Т. Боровик стверджує, що міжнародна спільнота дійшла єдиної думки: передумовою настільки значного збільшення вмісту вуглекислого газу в атмосфері було спалювання надзвичайно великих кількостей викопних палив. [6, с. 82]

Географічне розташування нашої держави та клімат сприяють розвитку сонячної енергетики і будівництву СЕС. А. К. Шидловський впевнений: «За ступенем інсоляції Україні випереджає визнаного європейського лідера у галузі відновлюваної енергетики – Німеччину. Однак, необхідно також враховувати стохастичні фактори: хмарність, вологість повітря, прозорість атмосфери, постійне обертання Землі навколо Сонця». [19, с. 5]

Основою для таких стверджень вченого є карта інсоляції України, наведена на рис. 1.1. За даними Flanders Investment & Trade, потенційно Україна може генерувати до 78% від власних потреб шляхом використання СЕС. [1]

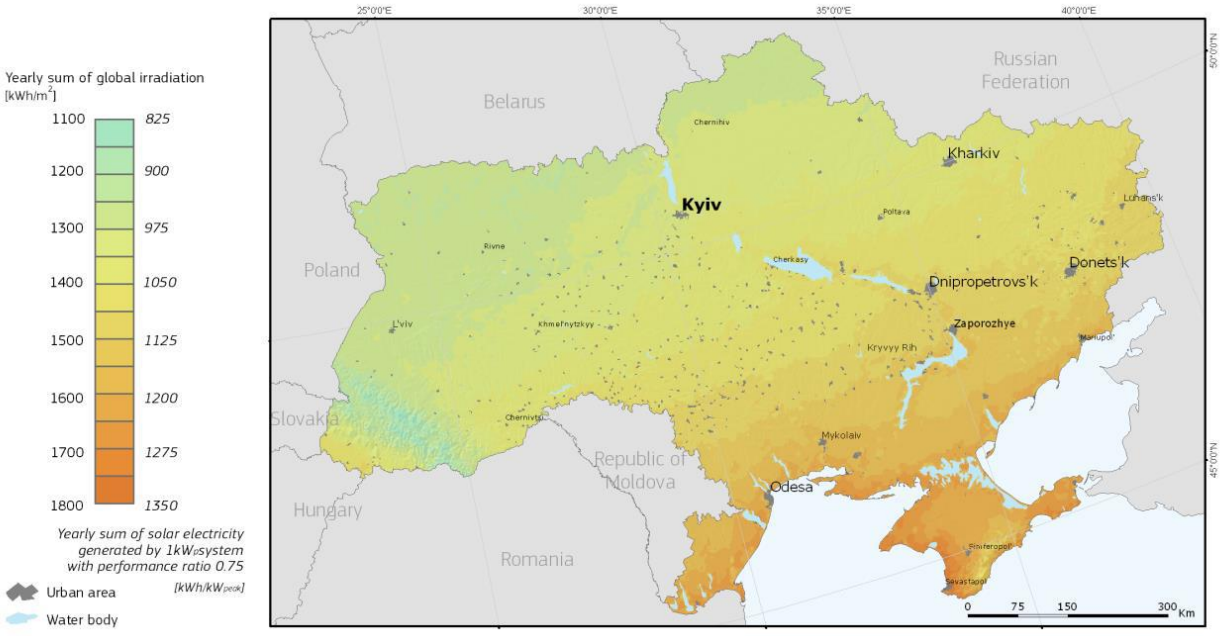

Рисунок 1.1 – Випромінювання сонячної енергії в межах України [18]

Схожі позитивні прогнози щодо розвитку сонячної енергетики в нашій державі спостерігаємо й у Атласі енергетичного потенціалу України. Цей посібник був створений С. О. Кудрею та містить дані Національної академії наук України й Держкомітету України з енергозбереження: «Оцінний потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого застосування як теплового, так і фотоелектричного обладнання практично в усіх областях. Період ефективної роботи сонячної електростанції в південних регіонах проходять сім місяців – з квітня по жовтень. В північних регіонів – на два місяці менше: з травня по вересень. Таким чином, сонячні системи в Україні працюють протягом всього календарного року, але зі змінною ефективністю». [11, с. 25]

Ще одним доказом успішної перспективи використання сонячної енергії в Україні може слугувати динаміка розвитку сонячної енергетики у періоді з 2015 по 2019 рр., наведена у звіті Голови Держенергоефективності. [15]

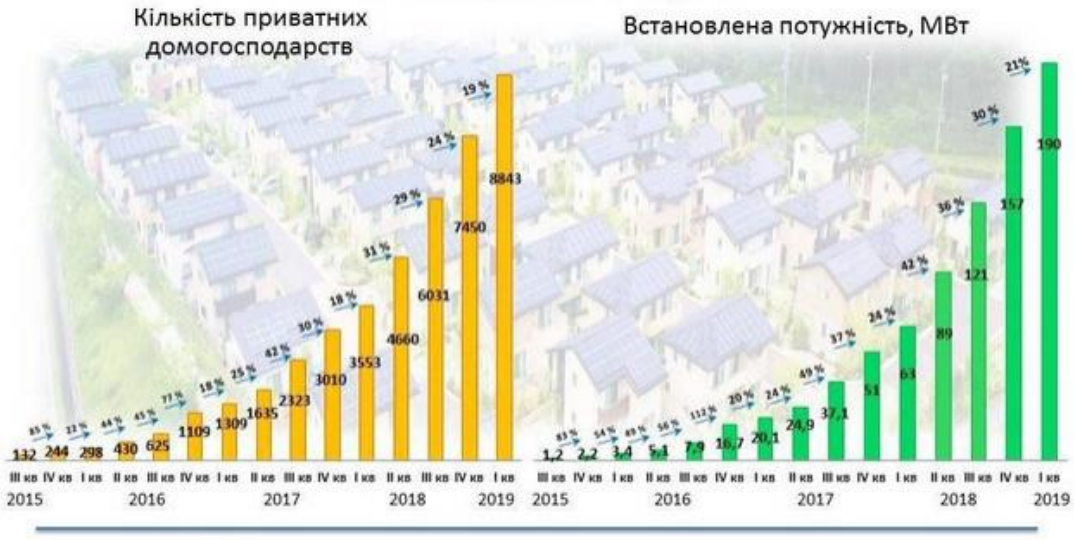

Рисунок 1.2 – Динаміка зростання кількості СЕС та встановленої потужності приватних домогосподарств [15]

А. В. Гнатов стверджує, що, незважаючи на величезну кількість сонячної енергії, яка надходить на поверхню Землі, її використання для великомасштабного отримання електричної енергії пов'язане з суттєвими проблемами. Він також зазначає: «Для різних типів СЕС ці проблеми різні.

Зазвичай вони пов’язані з такими природними факторами, як низька щільність сонячної радіації на поверхні землі, переривчастий характер її надходження тощо» [8, с. 13].

На практиці сонячна енергія може бути перетворена в електричну безпосередньо або ж опосередковано. Непряме перетворення передбачає концентрацію сонячної радіації за допомогою дзеркал у певному місці та подальше використання її для перетворення води у пару, з якої традиційними способами можна отримати електричну енергію.

Водночас, найбільш ефективним є пряме перетворення з використанням фотоелектричного ефекту. Елементи, що виготовляються зі спеціального напівпровідникового матеріалу, під час прямого сонячного опромінення виявляють різницю у вольтажі на своїй поверхні, тобто наявність електричного струму.

Використання прямого перетворення (у ФЕМ) може мати низку корисних факторів впливу. По-перше, застосування такої технології відновлюваної енергетики зменшить забруднення навколишнього середовища. По-друге, заміна викопного палива зменшує енергетичну залежність держави від імпорту / видобутку нафти і природного газу. По-третє, зниження рівня використання атомної енергетики значною мірою спрощує вирішення проблеми ядерних відходів та радіаційної безпеки світу загалом. Наостанок, ФЕМ можуть генерувати певну кількість електричну енергію навіть за несприятливих погодних умов, що визначає їх як безперебійне альтернативне джерело енергії. Безсумнівно, Україна також повинна прагнути до якомога більшої частки відновлюваної енергетики у загальній енергетичній моделі країни. Зростання цієї частки передбачено «Енергетичною стратегією України до 2035 року».

Отож, «чиста» сонячна генерація електроенергії є необхідним вектором розвитку енергетичної галузі нашої держави. Зважаючи на сприятливий клімат, географічне положення та гнучку політику Міністерства енергетики у цьому напрямку, оцінювальний потенціал використання енергії Сонця в Україні є достатньо високим для впровадження таких технологій.

1.2. Залежність ефективності ФЕМ від їх кута нахилу. Типологія АСТ

ФЕМ працюють найефективніше, коли вони спрямовані на сонце, а їх поверхня – перпендикулярна сонячним променям. Проте, ФЕМ зазвичай розташовують на даху або підтримуючій конструкції у фіксованому положенні, тож вони не можуть стежити за положенням сонця упродовж доби. Таким чином, зазвичай ФЕМ не перебувають під найбільш оптимальним кутом (90°) протягом усього дня. Графік залежності втрат від величини кута падіння сонячних променів під час виробництва електроенергії ФЕМ наведено на рис. 1.3.

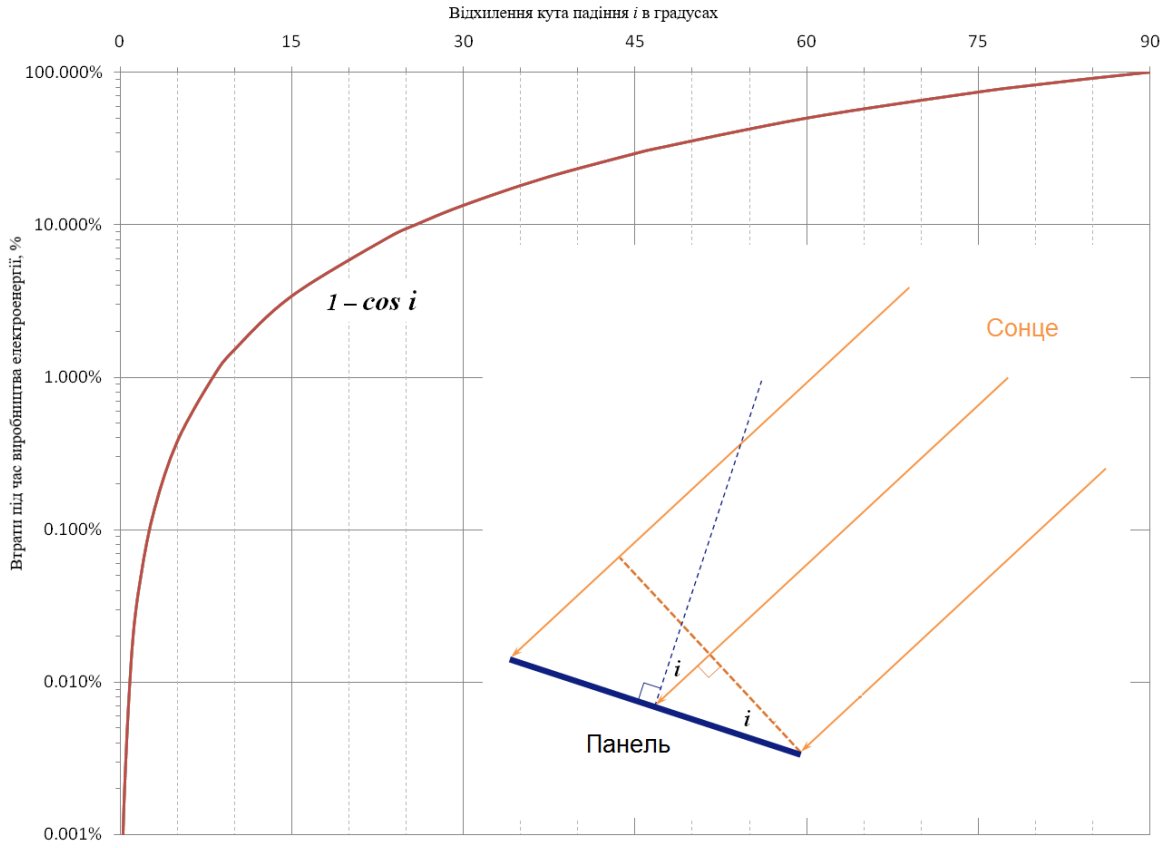

Рисунок 1.3 – Залежність величини втрат під час виробництва електричної енергії ФЕМ від величини кута падіння сонячних променів

Цей графік відображає залежність величини втрат під час вироблення електроенергії ФЕМ від величини кута відхилення від оптимального положення площини панелі. Із залежності видно, що трекер із точністю ± 5° забезпечить

вловлювання ФЕМ понад 99,6% енергії прямих променів і 100% розсіяного світла.

З огляду на особливості щоденної траєкторії руху сонця можна стверджувати, що ефективний кут повороту ФЕМ становить близько 150°. ФЕМ, зафіксований в напрямку рівно посередині між точками заходу і сходу Сонця, втрачає до 75% від максимально можливого виробітку в ранковий та вечірній час, що стає зрозумілим із рис. 1.4.

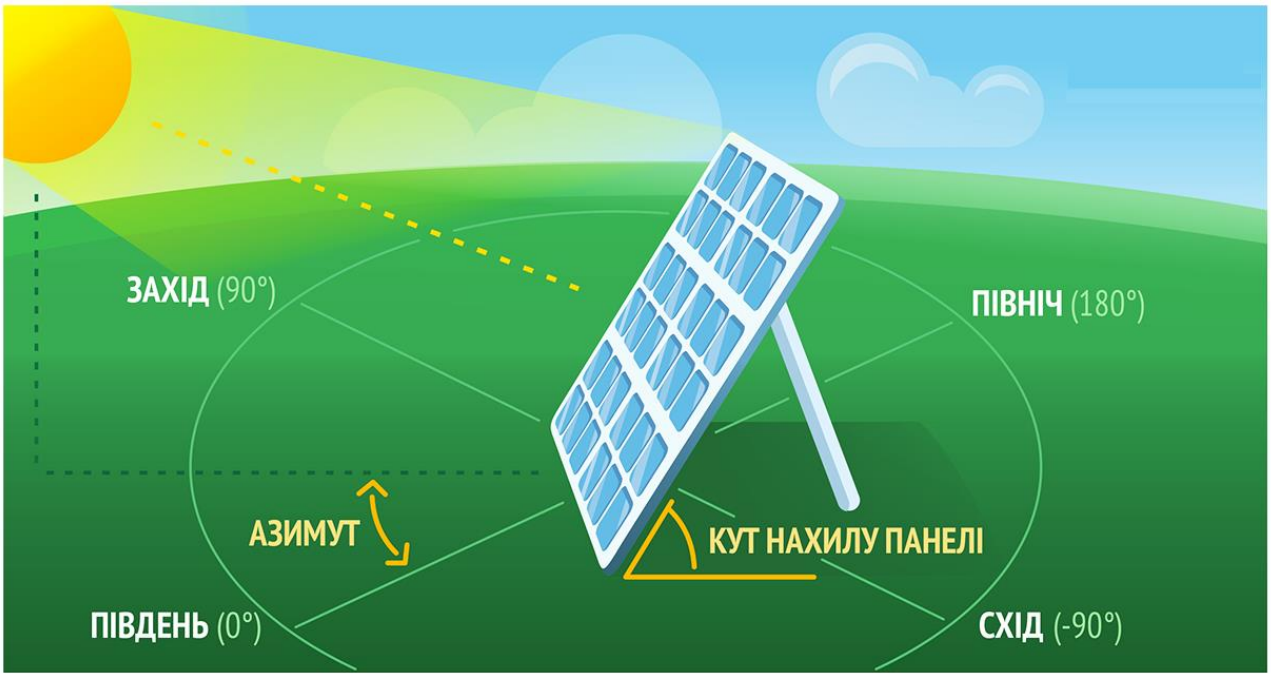

Рисунок 1.4 – Орієнтація ФЕМ за напрямом

Обертання ФЕМ зі сходу на захід для мінімізації цих втрат називають однокоординатним стеженням. Проте, окрім денного руху зі сходу на захід, сонце здійснює сезонне переміщення між північною і південною сторонами світу на 46°. Для того, аби враховувати ще ці зміни, необхідне двокоординатне стеження. Саме одно- чи двокоординатне стеження є основним принципом роботи будь-якого сонячного трекера.

Сонячний трекер – це пристрій, за допомогою якого відстежується положення Сонця і орієнтується платформа так, щоб сонячні батареї мали найбільший ККД. На трекері розміщені датчики, які дозволяють визначити

найбільш оптимальну орієнтацію сонячних панелей, а серводвигун, відповідно, повертає панель в потрібне положення. Слідкуюча система використовується для виставки сонячної панелі під таким кутом, щоб потік світла був перпендикулярний панелі. [16]

У залежності від необхідності обертання ФЕМ визначають тип АСТ. Станом на сьогодні для однокоординатного стеження існує декілька видів одновісних трекерів, а для двокоординатного – трекери з двома осями обертання (рис. 1.5) [16].

Одновісний сонячний трекер повертається зі сходу на захід протягом дня, відстежуючи азимутальний кут положення Сонця. У загальному випадку можлива орієнтація осі обертання в будь-яких координатних напрямках з використанням алгоритму SPA (Solar Position Algorithm).

SPA – це система розрахунку місцезнаходження сонця. Вона є одним із найбільш ефективних способів управління рухомими складовими трекера: маючи доступ до світового часу, програма передає до блоку управління дані щодо азимутального та зенітного кутів, враховуючи також місцезнаходження трекера. Після цього, відповідно до команд блоку управління, рухомі складові переорієнтовують трекер у відповідне положення. Такий спосіб орієнтування є відносно дешевим, проте водночас не надто точним, оскільки елементи, що використовуються у таких відносно недорогих системах, не відзначаються достатніми показниками надійності і якості.

Саме тому для бакалаврської роботи було обрано альтернативний спосіб стеження за Сонцем: за допомогою фоторезисторів, які аналізуватимуть освітленість у різних положеннях трекера та передаватимуть сигнали з блоку управління на рухомі складові до моменту, коли потік сонячного випромінювання на усіх фоторезисторах буде однаковим. Розбалансування системи внаслідок руху Землі навколо Сонця спричинить імпульс для активації нового переміщення ФЕМ у напрямку до джерела випромінювання.

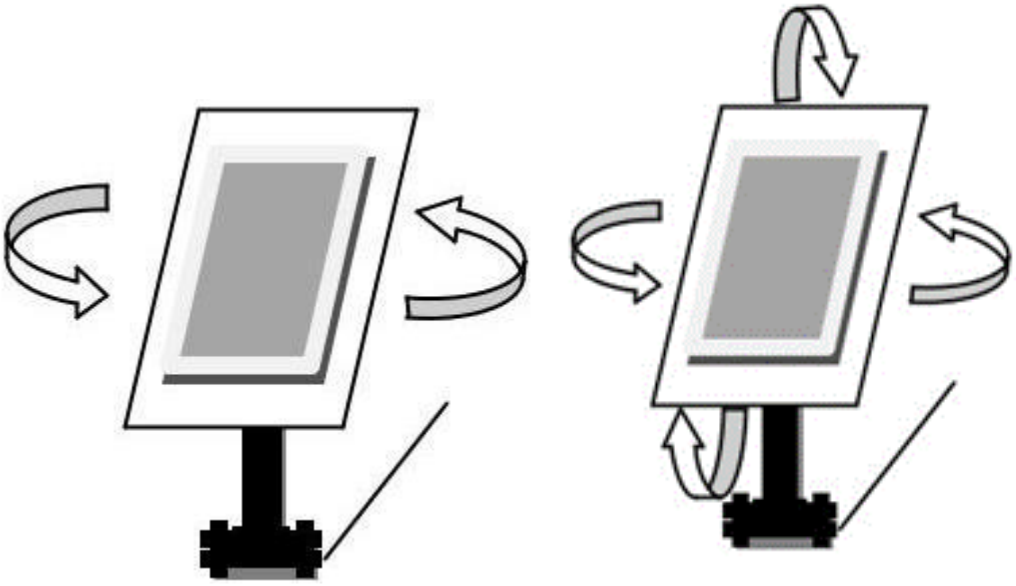

Рисунок 1.5 – Одновісний (ліворуч) АСТ та АСТ з двома осями (праворуч)

Одновісний трекер – це система, що може вільно обертатися навколо однієї осі, коли інша вісь зафіксована на визначений кут. Одноосьові трекери мають один ступінь вільності обертання навколо осі. Вісь обертання одновісного трекера, як правило, орієнтована уздовж осі дотичної до меридіана (північ-південь). З рис. 1.5 видно, що сонячна панель має нахил на кут α – фіксований кут нахилу панелі до площини горизонту.

Розрізняють декілька видів одновісних трекерів: горизонтальний одновісний, вертикальний одновісний та одновісний трекер з похилою віссю обертання.

У горизонтальному одновісному трекері (далі – HSAT (Horizontal Single Axis Tracker) вісь обертання є горизонтальною у відношенні до земного горизонту. Конструкція HSAT є дуже гнучкою. Проста геометрія HSAT вимагає, щоб всі осі обертання були паралельні один одному. Вірно підібраний інтервал між осями дозволяє максимізувати вироблення електроенергії, що залежить від рельєфу місцевості, тіні і часу доби.

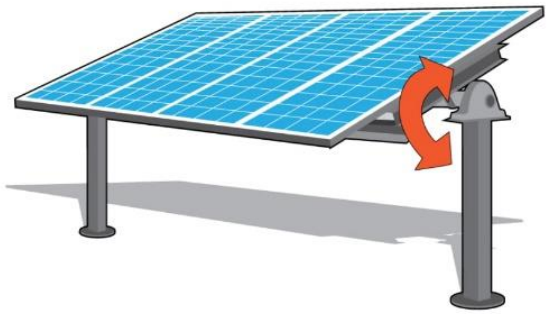

Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд конструкції HSAT [17]

Для вертикального одновісного трекера (далі – VSAT (Vertical Single Axis Solar Tracker) вісь обертання розташована вертикально відносно земного горизонту. Відповідно, такі трекери обертаються зі сходу на захід протягом доби. Конструкція більш ефективні на високих широтах, ніж HSAT. У їх конструкціях повинно бути враховано затінення від сусідніх трекерів, щоб уникнути непотрібних втрат енергії і оптимізувати землекористування. VSAT зазвичай мають робочу поверхню (з фотоелементами), нахилену під певним фіксованим кутом у відношенні до осі обертання.

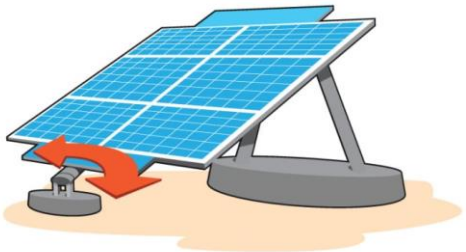

Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд конструкції VSAT [17]

Найменш поширеними є одновісні трекери з похилою віссю обертання (далі – TSAT (Tilded Single Axis Tracker). Такі трекери мають вісь обертання, орієнтовану між горизонтальною і вертикальною площинами.

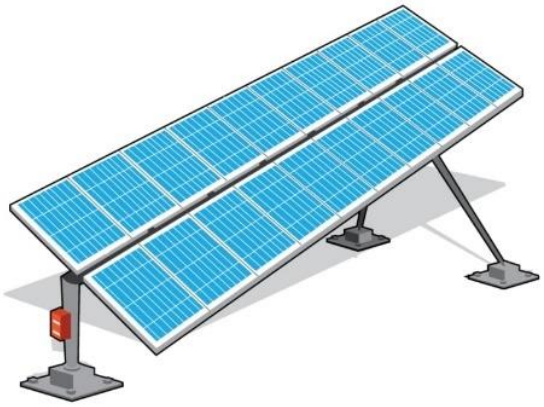

Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд конструкції TSAT [17]

Натомість, найбільшої популярності серед сонячних трекерів досягли трекери з двома осями обертання – Dual axis trackers (DAT). Вони мають два ступені вільності, які формуються осями обертання. Ці осі, як правило, не зв’язані одна з одною, але працюють разом. Вісь, орієнтація якої фіксується відносно до Землі, може розглядатися як основна вісь, тоді інша вісь є вторинною, і навпаки. [17]

1.3. Існуючі прототипи установок АСТ. Вибір і обґрунтування напрямків дослідження

Однією із визначальних переваг АСТ є його «гнучкість» відносно генерації електричної енергії. Зокрема, в межах автономних СЕС оптимальний кут нахилу ФЕМ може залежати від графіка навантаження. Наприклад, якщо у певному місяці електроенергії генерується більше, аніж потрібно, можна змінити кут на більш оптимальний та, відповідно, зменшити загальну кількість згенерованої енергії.

Саме тому визначають три основні способи контроля орієнтації АСТ: мануальний (налаштування ФЕМ перпендикулярно до Сонця виконується людиною вручну), пасивний (система обертає ФЕМ вертикально або / й горизонтально згідно з певним алгоритмом керування) та активний (система

самостійно орієнтується на максимально перпендикулярний до потоку сонячного випромінювання кут).

Перед проектуванням власної моделі АСТ нами було проведено оглядовий аналіз уже існуючих моделей та алгоритмів, узятих інженерами за основу.

У дослідженні, яке описано в роботі А. Тірмікчі [5, с. 558], був розроблений одновісний АСТ, придатний для вмонтування у стіну будинку. Конструкція такого АСТ дозволяє працювати лише у трьох фіксованих положеннях, а сам трекер складається з простої конструкції та обладнаний двигуном постійного струму для повороту монтажної рами. Операційний принцип полягає у тому, що універсальна інтегральна схема генерує часовий сигнал, який викликає поворот двигуна під заданим кутом. Функції вимірювання руху трекера, генерації сонячного перетворювача та алгоритми управління реалізовані за допомогою мікроконтролера PIC18F452.

Чіа Ліангом Лу та його колегами [2, с. 283] був створений одновісний АСТ, що складався з сонячної панелі, серводвигуна, акумулятора, зарядного пристрою, двох фоторезисторів та мікроконтролера. Розроблений трекер оперував обертанням зі сходу на захід, а його двигун було встановлено так, щоб система слідкування АСТ могла обертатися навколо однієї осі. Інтенсивність сонячного світла у цьому алгоритмі визначається за допомогою фоторезисторів, які передають сигнал на мікроконтролер для керування обертанням панелі за допомогою серводвигуна. Усі компоненти пристрою живляться від свинцево-кислотної батареї, де енергія, згенерована панеллю, зберігається за допомогою контролера заряду.

Ще один алгоритм роботи одновісного АСТ був представлений В. Суматі. Його АСТ розроблений на основі схеми автоматичного контролю положення. Плоский сонячний перетворювач або циліндричний параболічний відбивач повинні бути закріплені в оптимальному положенні по одній осі, а трекер керує поворотом по іншій осі, змінюючи кут азимута. Вчений розробили цей алгоритм для досягнення максимального рівня сонячного освітлення в кожному положенні азимутального кута від 0 до 360 градусів. Таким чином, АСТ здатний виконувати

повний оберт навколо своєї осі незалежно від географічного положенням установки. У цій системі використовується схема ступінчастого відстеження замість безперервного, що дозволяє тримати двигуни в режимі холостого ходу для ефективного енергозбереження [4, с. 42].

У дослідженні, представленому в роботі А. Кассема та М. Хамада [3, с. 20], наведено ще один принцип функціонування АСТ. ФЕМ також живить вхід зарядного пристрою, який забезпечує заряджання акумулятора постійного струму. Додатково, функція ФЕМ полягає у подачі точної напруги мікроконтролеру трекера для досягнення найефективнішої орієнтації системи і отримання максимальної кількості сонячного світла. Структура даного пристрою включає ФЕМ, серводвигун, зарядний пристрій, три фоторезистори, розташовані за схемою XOY, та акумулятор, як показано на рис. 1.9. Алгоритм роботи вказаного трекера полягає в порівнянні інформації з двох фоторезисторів X та O. Цей цикл порівнянь керує серводвигуном, поки дані з фоторезисторів не стануть подібними за значенням, досягаючи практично рівномірного розподілу світла. Фоторезистори Y та O використовуються аналогічно.

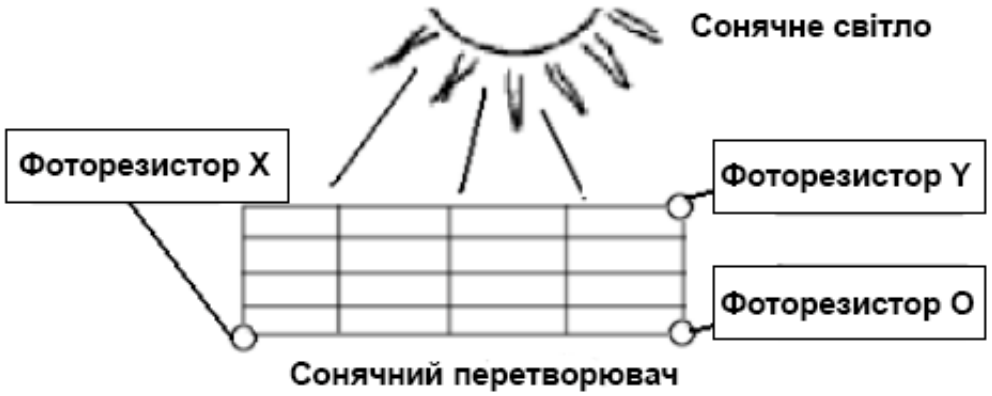

Рисунок 1.9 – Розташування фоторезисторів X, O та Y на ФЕМ [3]

На вітчизняному ринку існує доволі широкий вибір АСТ для промислового та приватного застосування. З-поміж усіх слід відзначити компанію GreenChip, яка випустила модель ST1500 (рис. 1.10). Ця установка має лише одну вісь обертання, що дозволяє використовувати лише один привідний двигун.

Водночас, вона одразу розташована під кутом 45° до поверхні землі, тож не поступається за показниками ефективності трекерам з двома осями обертання [13].

Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд трекера моделі ST1500 виробництва компанії GreenChip [13]

Отож, визначальним фактором ефективності роботи СЕС є кут падіння сонячних променів на площину ФЕМ. Між кількістю згенерованої електроенергії та його значенням є прямопропорційна залежність: чим ближчий кут падіння сонячних променів до значення у 90°, тим більше електроенергії генеруватиме система. Саме задля досягнення цього оптимального кута у 90° і застосовується об’єкт дослідження бакалаврської роботи – спосіб удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії ФЕМ, що полягає у відслідковуванні сонячних променів та максимально ефективному позиціонуванні ФЕМ.

Розуміючи важливість даного напрямку досліджень та беручи до уваги існуючі моделі установок з підвищення ефективності роботи СЕС шляхом коригування їх кута нахилу до Сонця якомога більш перпендикулярно, у наступних розділах буде проведено дослідження доцільності використання АСТ

у Івано-Франківському регіоні та розроблено алгоритми роботи такої установки. На основі створених алгоритмів буде розроблено програмне забезпечення мікроконтролерного модуля АСТ у середовищі Arduino.

Наше дослідження передбачає виконання низки етапів:

1. Моделювання роботи СЕС у Івано-Франківському регіоні у веб-застосунку PVGIS.
2. Розрахунок енергетично-економічної доцільності використання АСТ у Івано-Франківському регіоні.
3. Аналіз функціональних елементів АСТ.
4. Розроблення алгоритмів роботи АСТ.
5. Вибір апаратного забезпечення установки.
6. Розроблення програмного забезпечення мікроконтролерного модуля АСТ.

РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СТАЦІОНАРНИМИ ФЕС І ТРЕКЕРНИМИ СИСТЕМАМИ

2.1. Моделювання роботи СЕС у Івано-Франківському регіоні у веб-застосунку PVGIS

Метою розділу є здійснення порівняння ефективності генерування електроенергії стаціонарними і трекерними сонячними системи за певних географічних і кліматичних умов Івано-Франківського регіону.

Для широкого впровадження використання енергії Сонця в Івано-Франківському регіоні необхідно аргументовано оцінити потенціал такого виду генерації. Оцінка доцільності використання СЕС грунтується на принципах, аналогічних для всіх альтернативних джерел енергії. Згідно з інформацією, наведеною у розділі 1, оцінюючи потенціал використання СЕС, необхідно враховувати закономірності коливання кількості радіації, що надходить на поверхню місцевості та стохастичні зміни кліматичних умов: хмарність, вологість повітря, прозорість нижніх шарів атмосфери тощо.

Негативним фактором у роботі СЕС є непостійність у отриманні сонячної радіації – саме це стає причиною втрати значної частини потенційно згенерованої електроенергії. Хмарність є показником радіаційного режиму та відображає мінливість фізичної перешкоди потрапляння достатньої кількості енергії на фотоелектричні пластини, що спричиняє нерівномірність роботи сонячної електростанції протягом дня.

Фотоелектрична географічна інформаційна система PVGIS Інституту енергетики і транспорту (IET) Об’єднаного дослідницького інституту (JRS) при Європейській комісії розробила базу даних щодо сонячної радіації. Модель, що буде використана у ході дослідження показників СЕС у Івано-Франківському регіоні, оцінює променеві, дифузні і відбиті складові випромінювання за умов ясної погоди і для реальних умов глобальної освітленості на горизонтальних або нахилених поверхнях. [18]

Результатами роботи системи є детальні карти сонячного енергетичного потенціалу, доступні для ознайомлення безпосередньо у веб-застосунку. На рис. 2.1 наведено розподіл глобального сонячного опромінення та загальний сонячний потенціал території України для оптимально орієнтованих ФЕМ (таких, що мають максимально перпендикулярний кут падіння сонячних променів на поверхню СЕС).

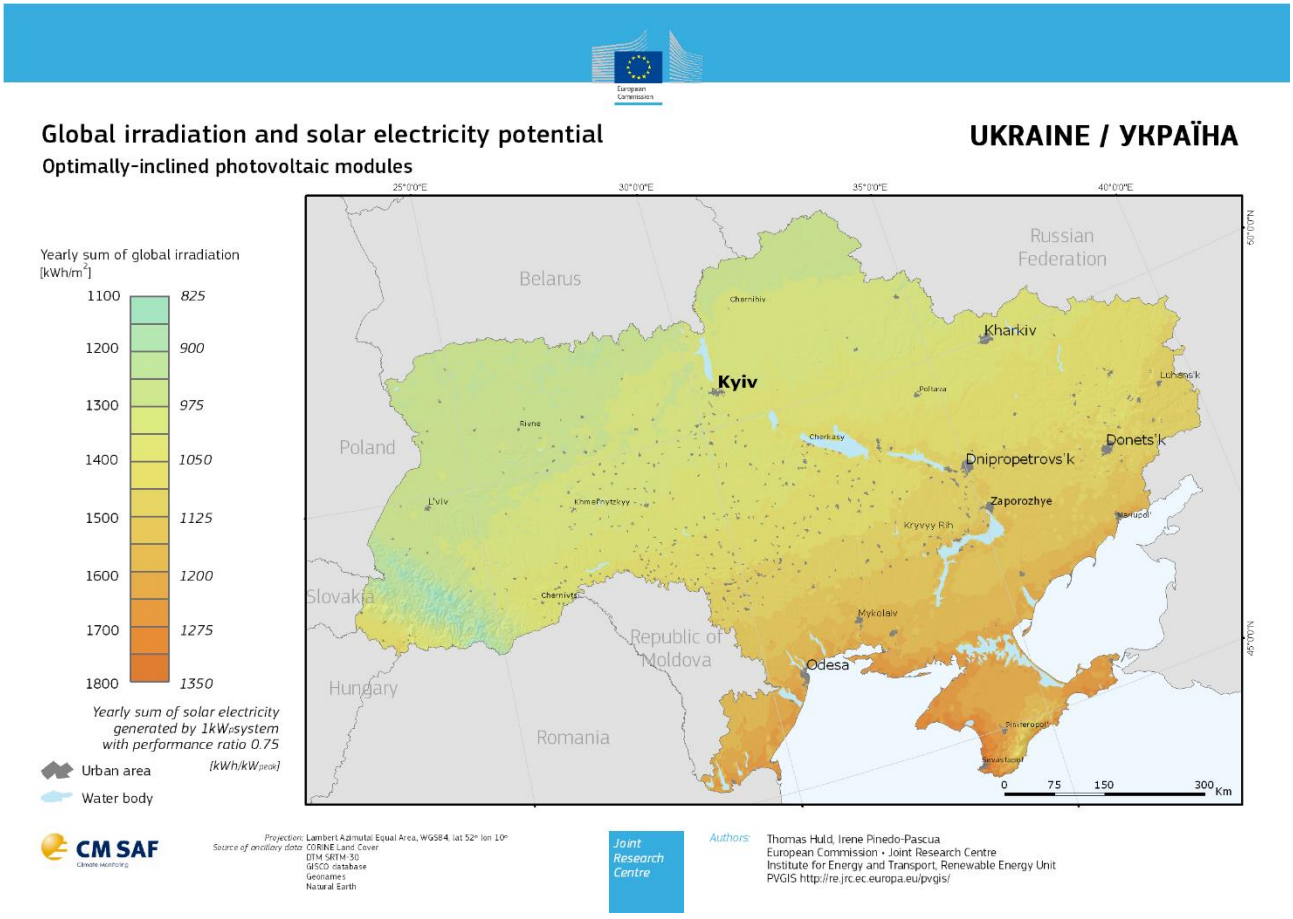

Рисунок 2.1 – Розподіл глобального сонячного опромінення та загальний потенціал сонячної енергії території України [18]

Із рис. 2.1 спостерігаємо, що показники річної суми глобального сонячного випромінювання у Івано-Франківському регіоні знаходяться в межах «жовтої зони»: 1050 – 1400 кВт / год · м^2. Це свідчить про те, що регіон має достатній потенціал для імплементації технологій генерування сонячної енергії. Зважаючи на те, що частина енергії може втрачатись через відсутність постійно перпендикулярного кута падіння сонячних променів на площину ФЕМ,

доцільним є використання АСТ: цей пристрій дозволятиме розташовувати ФЕМ якомога більш перпендикулярно до сонячних променів, а, отже, на виході генеруватиметься більша кількість електричної енергії. Задля підтвердження наведеного вище припущення, проведемо дослідження економічно-енергетичної доцільності використання трекерних установок замість стаціонарних.

Для розрахунку необхідних показників генерації майбутньої СЕС використаємо веб-застосунок PVGIS – фотоелектричну географічну інформаційну систему. [18]

Припустимо, що номінальна потужність майбутньої СЕС становитиме 100 кВт. Оптимальний кут нахилу визначатимемо при азимуті 0°.

Початкові умови задаємо таким чином:

Номінальна потужність ФЕС: 100 кВт.

Кут нахилу панелей: 20°.

Азимут: 0°.

Тип конструкції: довільна, розміщена на землі.

Втрати електричної енергії: 14%.

Проведемо розрахунки, змінюючи кут нахилу з кроком у 5° від 20° до 70°:

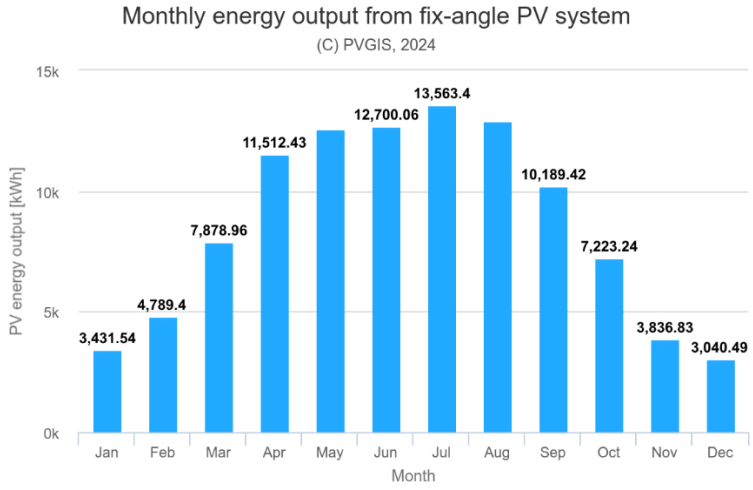

Рисунок 2.2 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 20°

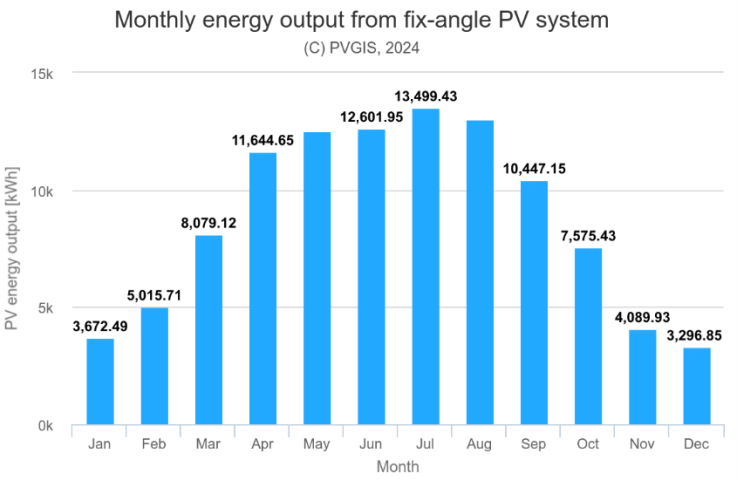

Рисунок 2.3 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 25°

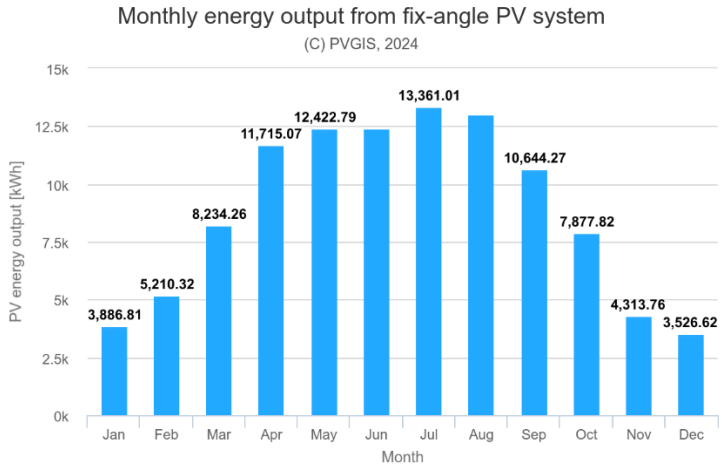

Рисунок 2.4 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 30°

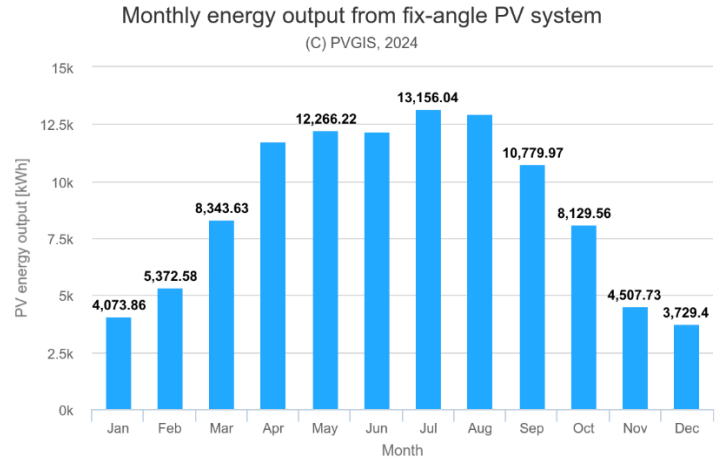

Рисунок 2.5 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 35°

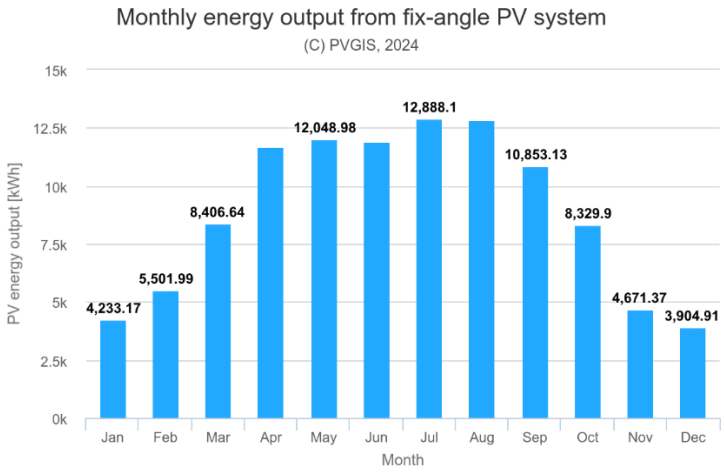

Рисунок 2.6 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 40°

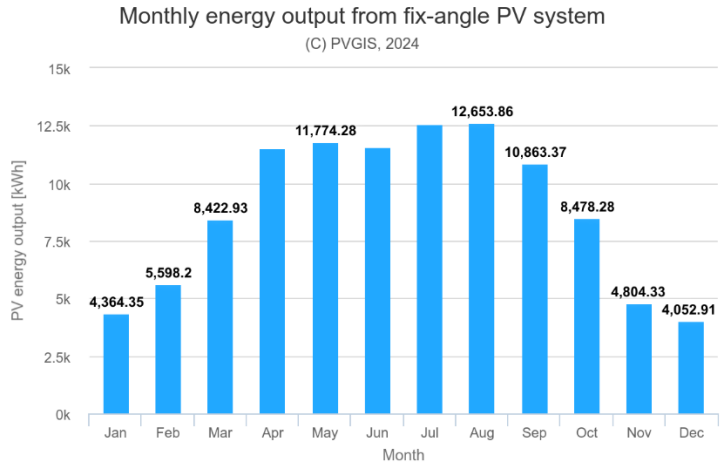

Рисунок 2.7 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 45°

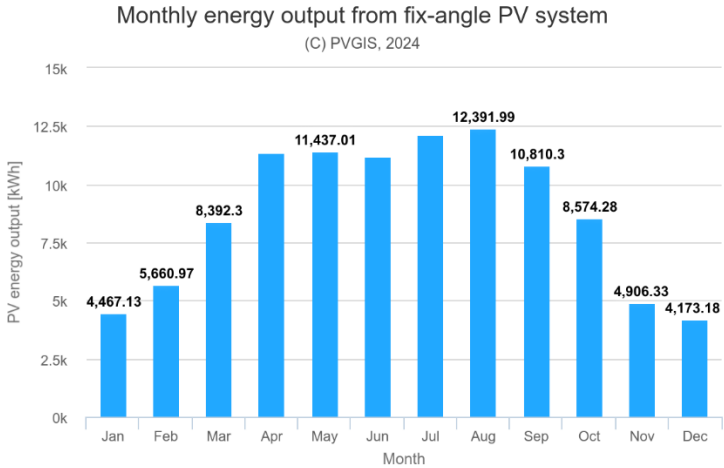

Рисунок 2.8 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 50°

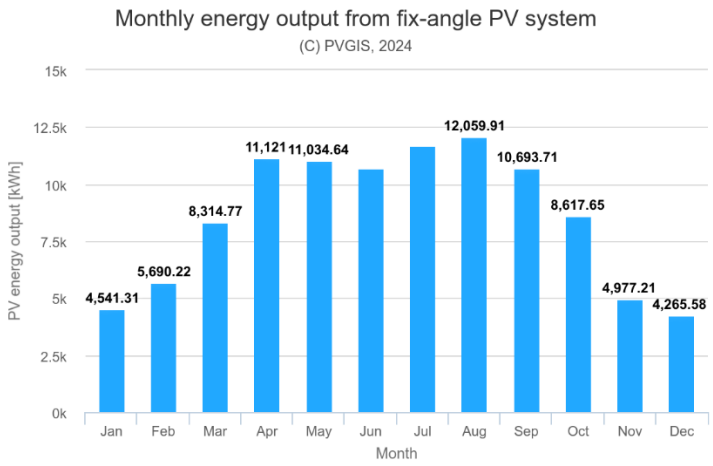

Рисунок 2.9 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 55°

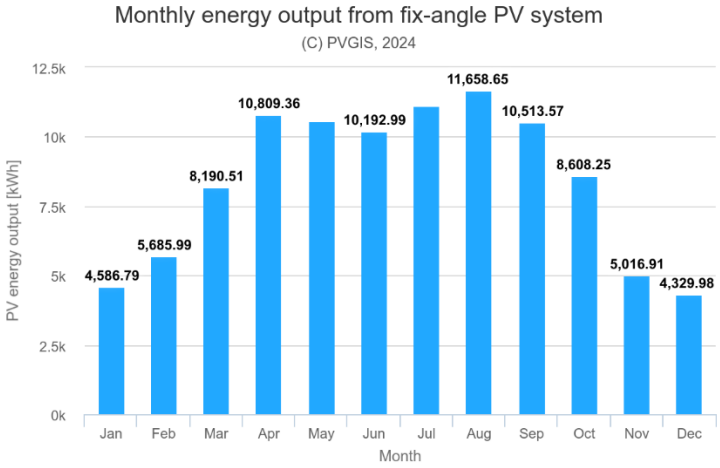

Рисунок 2.10 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 60°

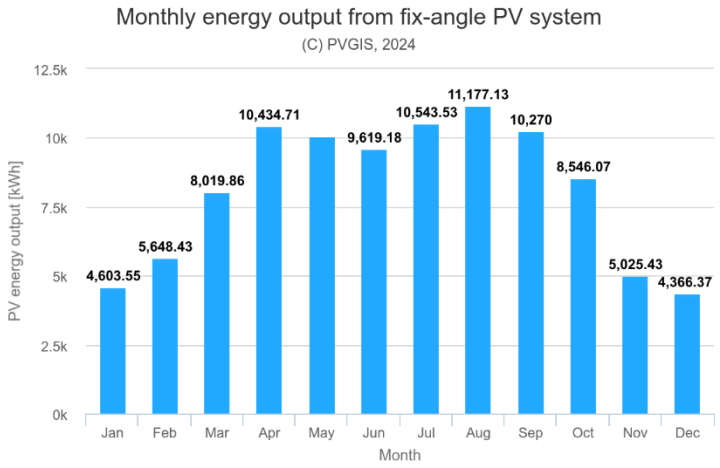

Рисунок 2.11 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 65°

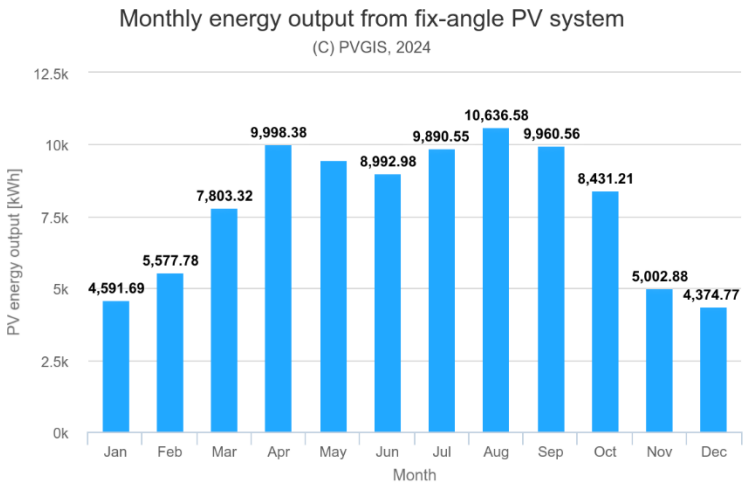

Рисунок 2.12 – Місячна генерація стаціонарною СЕС із кутом нахилу ФЕМ 70°

2.2. Енергетично-економічна доцільність використання АСТ у Івано-Франківському регіоні

З метою аналізу інформації створимо таблицю із річними показниками генерації за різних кутів нахилу ФЕМ:

Таблиця 2.1 – Сумарні річні показники генерації електричної енергії СЕС потужністю 100 кВт у Івано-Франківському регіоні за різних кутів нахилу ФЕМ

Кут нахилу, °	Генерація, кВт·год
20	103618
25	105431
30	105960
35	106711
40	107262
45	106694
50	105505
55	103710
60	101308
65	98309
70	94737

Із наведеної вище таблиці можемо зробити висновок, що найбільш оптимальним кутом нахилу ФЕМ для їх встановлення є кут у 40°. За умов розташування ФЕМ саме під таким кутом можливо досягнути генерації 107,262 МВт·год.

Для порівняння генерації стаціонарної системи із трекерною слід зазначити, що трекер здатний обертати систему на найбільш оптимальний для генерації електроенергії кут. Тому, за умови наявності трекерної системи, ми будемо щомісяця отримувати максимальний показник генерації. Оберемо для місяців із січня по грудень найбільші показники генерації, ґрунтуючись на даних, наведених на рисунках 2.2-2.12. Зведемо отримані результати у таблицю.

Таблиця 2.2 – Показники генерації електроенергії СЕС потужністю 100 кВт за умови наявності трекера

Місяць	Найбільший показник генерації ЕЕ, кВт·год	Найбільш оптимальний кут нахилу ФЕМ, °
Січень	4604	65
Лютий	5690	55
Березень	8423	45
Квітень	11723	35
Травень	12550	20
Червень	12700	20
Липень	13563	20
Серпень	13012	30
Вересень	10863	45
Жовтень	8617	55
Листопад	5025	65
Грудень	4375	70

Додавши усі отримані показники, отримуємо понад 111 МВт·год електроенергії за рік, що на 4 МВт·год більше, ніж генеруватиме стаціонарна система. За умови незмінного тарифу на електроенергію у розмірі

4,32 грн/ кВт·год, додатковий позитивний економічний ефект від встановлення трекерної системи становитиме понад 17,3 тис. грн / рік.

Отож, зважаючи на результати проведеного дослідження енергетично-економічної доцільності використання трекерних СЕС у Івано-Франківському регіоні, можна стверджувати, що освітленості на території регіону достатньо для потужного розвитку сонячної енергетики. Період ефективної експлуатації стаціонарних СЕС становить більше, ніж півроку. Натомість, використання АСТ в СЕС Івано-Франківського регіону має відчутно позитивний енергетично-економічний ефект: приріст генерації електричної енергії склав понад 4% / рік у порівнянні зі стаціонарною СЕС, що еквівалентно додатковим 17,3 тис грн / рік. Відповідно, застосування АСТ в межах СЕС відчутно збільшує генерацію та зменшує термін окупності станцій, що є сприятливим для реалізації проєктів генерації сонячної енергії в межах Івано-Франківського регіону.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМІЧНО-АПАРАТНА СКЛАДОВА АВТОНОМНОГО СОНЯЧНОГО ТРЕКЕРА

3.1. Аналіз функціональних елементів АСТ

Найбільш оптимальним технічним рішенням є забезпечення самодостатності живлення АСТ, тобто його автономності. Він повинен працювати без зовнішнього джерела живлення та без акумуляторної батареї, споживаючи енергію виключно від ФЕМ.

Найважливішою здатністю АСТ є його властивість переміщення по осях. Вона може бути забезпечена або сервоприводами, або двигуном постійного струму з черв’ячним редуктором. Оскільки сервоприводи для фіксації свого положення постійно споживають електричну енергію, слід обрати саме двигун постійного струму з черв’ячним редуктором (рис. 3.1).

Рисунок 3.1 – Двигун постійного струму з черв’ячним редуктором

Черв’ячний редуктор забезпечить високий крутний момент та низьку швидкість. Високий крутний момент гарантує низький струм двигуна, тому що приводити в дію черв’ячний редуктор він буде майже без механічного навантаження. Також черв’ячний редуктор забезпечує утримання валу в одному положенні навіть при відсутності живлення двигуна.

Наступним елементом, необхідним для функціонування АСТ, є давачі з фоторезисторами (рис. 3.2). Такі фотодавачі використовуються для позиціонування АСТ перпендикулярно до Сонця. Вони мають перегородки у вигляді хреста, по різні сторони яких розміщені фоторезистори. Коли Сонце змінить своє положення, на одні фоторезистори від перегородки буде падати тінь, а на інші – ні. Відповідно, за різницею їхньої освітленості можна визначити, куди слід обертати площину з панелями, щоб орієнтувати її якомога більш перпендикулярно до Сонця.

Рисунок 3.2 – Фоторезистор MLG4416

Для звичайного АСТ достатньо використати 4 фоторезистори (рис. 3.3). Одна пара із них орієнтуватиме ФЕМ в горизонтальному напрямі, інша – у вертикальному. В такій схемі давачів за однакової освітленості фоторезисторів, їхні опори будуть однаковими, а отже напруга на виході схеми буде рівною половині напруги живлення давача.

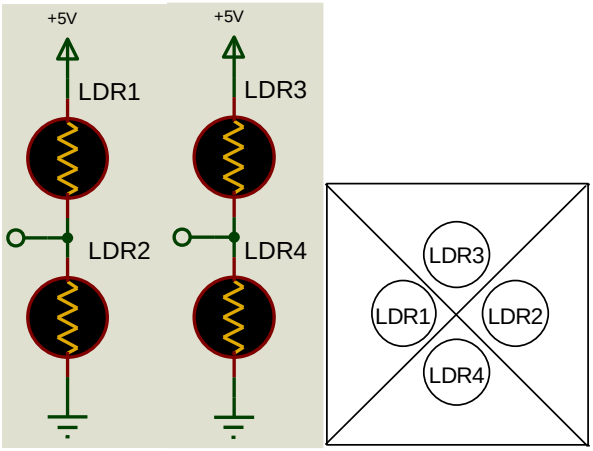

Рисунок 3.3 – Електрична схема фотодавача (ліворуч)
і розміщення фоторезисторів на ньому (праворуч)

3.2. Розроблення алгоритмів роботи АСТ

Детальний алгоритм програмного забезпечення роботи розроблюваного пристрою наведено на рисунку 3.3.

Робота пристрою розпочинається з ініціалізації периферійних пристроїв мікроконтролера блоку ARDUINO – портів вводу-виводу і блоку аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Додатково необхідно задати сигнали вимкнення двигунів обертання АСТ, щоб гарантувати однозначний початок роботи програми контролера. На входах, до яких підключені кнопки, слід задіяти підтягуючі резистори.

АСТ повинен працювати як у режимі власне трекера, так і в режимі калібрування. Режим калібрування потрібний через те, що фоторезистори мають розкид параметрів, а також фотодавач може мати певне відхилення під час виготовлення, тому навіть за однакової освітленості фоторезисторів не можна гарантувати нормальний сигнал від давача (половина напруги живлення).

Перш за все, необхідно розробити режим калібрування. Для цього має бути передбачено перемикач введення контролера в цей режим і кнопки для ручного позиціонування трекера («вгору», «вниз», «вліво», «вправо»). Записані сигнали від фотодавачів в цьому режимі будуть слугувати як зразкові, тоді як відхилення від цих значень будуть використовуватись для задавання напряму обертання АСТ. Алгоритм мікроконтролера при натисканні кнопок позиціонування є однаковим: задається напрям обертання (від нього залежить розподіл сигналів на виходах мікроконтролера, до яких підключений контролер двигуна), потім – вмикається обертання (відбувається фізична зміна сигналів керування контролером двигуна). Ці дії повторюються за умови постійного натискання на кнопку, що забезпечить приведення відповідного двигуна в дію до моменту її відпускання. За умови, коли усі кнопки відпущені, формуються сигнали вимкнення двигунів і запис показів фотодавача у відповідні змінні (ці значення власне і будуть еталонними).

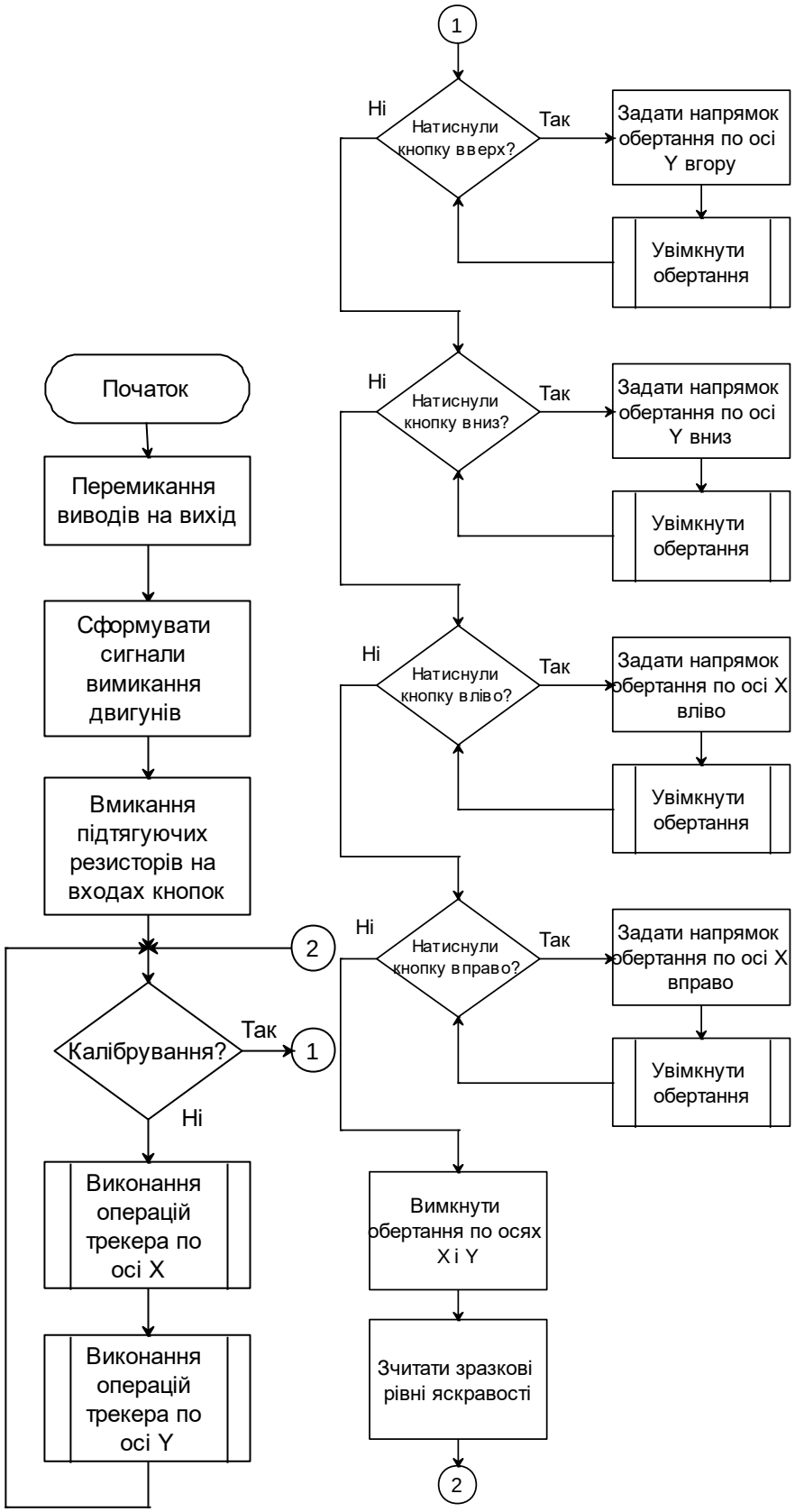

Рисунок 3.3 – Алгоритм основної програми (підпрограми setup і loop)

Окремо слід розглянути власне алгоритм АСТ (рис. 3.4). По горизонтальній і вертикальній осях алгоритм є майже однаковим, відмінність

полягає лише у задіяних виводах мікроконтролера. Спочатку необхідно зчитати рівень сигналу з фотодавача. Цей рівень слід порівняти з еталонним: розрахувати різницю між еталонним і виміряним та порівняти отримане значення цієї різниці із заданим порогом. Це має бути зроблено, щоб уникнути хибних спрацювань при незначних змінах сигналів фотодавача. Якщо різниця рівнів перевищуватиме заданий поріг, тоді необхідно порівняти: чи є виміряне значення вищим/нижчим за еталонне, щоб задати напрямок обертання. Після цього має бути увімкнено обертання двигуна АСТ. Якщо різниця між еталонним і виміряним значенням буде знаходитися в заданих межах, це означатиме, що АСТ орієнтований на Сонце, і обертання двигунів може бути вимкненим. У АСТ також необхідно використати давачі положення трекера, щоб виключити обертання на 360° (під час аналізу наукової літератури нерідко траплялися згадки про можливе намотування провідників на обертальний механізм під час обертання на 360°).

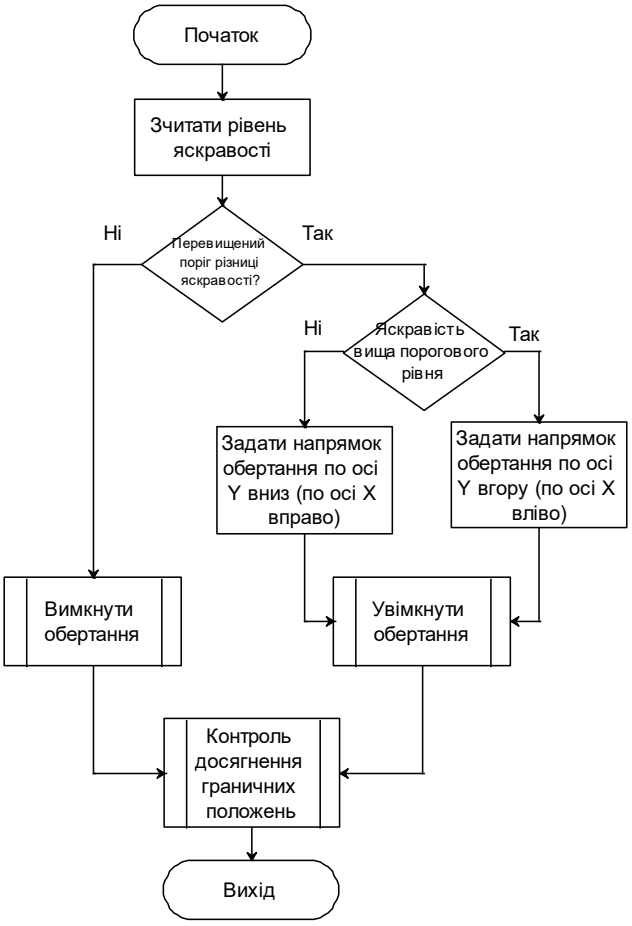

Рисунок 3.4 – Алгоритм підпрограми виконання операцій трекера (підпрограма doTrack)

Алгоритм контролю досягнення граничних положень механізму АСТ (рис. 3.5) є простим. Зчитується сигнал давача позиції, його значення порівнюється із заданим максимальним (більше) або мінімальним (менше). Якщо зчитані значення перевищують ці межі, то живлення двигуна вимикається. Під час розроблення програми доцільним буде оформити цей алгоритм як підпрограму, яка буде повертати значення «*true*», якщо обертання АСТ може здійснюватися надалі або «*false*» – вироблення сигналів увімкнення двигуна має бути припинене.

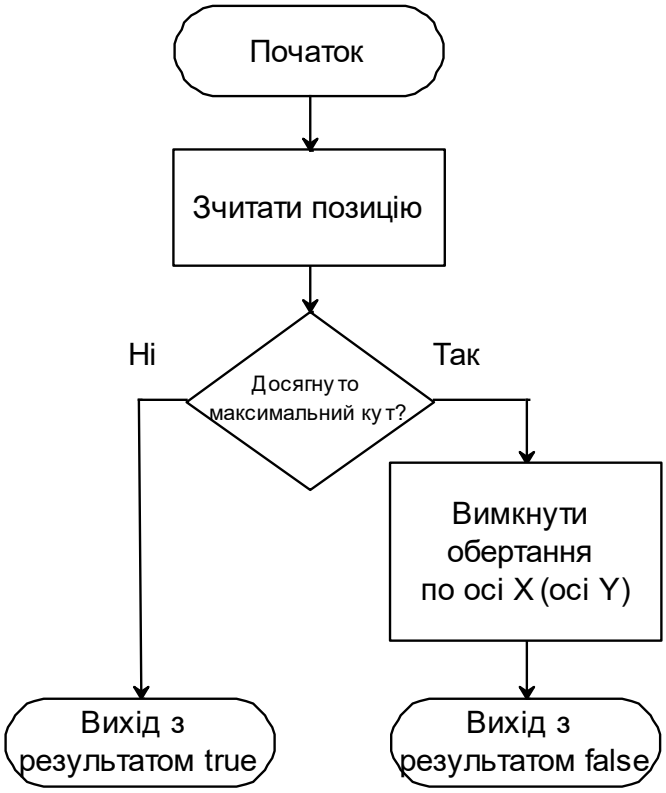

Рисунок 3.5 – Алгоритм підпрограми контролю досягнення граничних положень (підпрограма operateRotation)

Алгоритм підпрограми увімкнення/вимкнення обертання двигунів АСТ спочатку визначає, яку дію потрібно виконати (записується певне значення у змінну) і формує сигнали керування на виводах мікроконтролера. Під час формування сигналів увімкнення двигуна додатково перевіряється, чи досягнуто граничне положення механізму АСТ.

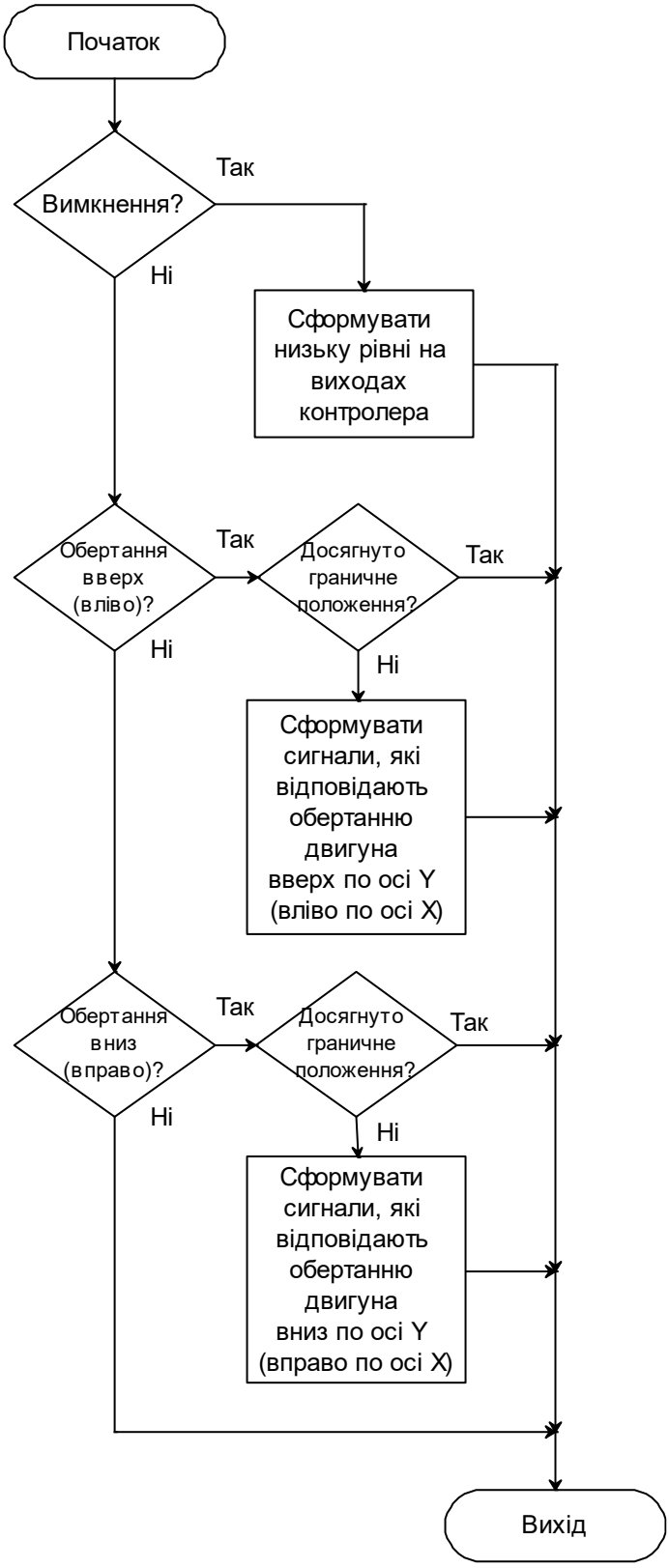

Рисунок 3.6 – Алгоритм підпрограми увімкнення / вимкнення двигунів трекерів (підпрограма doControlMotor)

3.3. Вибір апаратного забезпечення установки

Для формування специфікації на АСТ необхідно розглянути його елементну базу. До складу мікроконтролерного вимірювального блоку входитимуть такі елементи:

1. Плата Arduino MEGA 2560 R3.
2. Двигун постійного струму з черв’ячним редуктором JGY-370 2 об/хв.
3. Фоторезистори MLG4416 (90 мВт, 5-10 кОм/1.0 МОм).
4. Потенціометри 10 кОм.
5. Контролер електродвигуна L298.
6. Кнопки 4 шт.
7. Тумблер 1 шт.

Основні вимоги проекту АСТ повинен задовольняти мікроконтролерний модуль Arduino MEGA 2560 R3. Він має такі характеристики та периферію [12]:

1. 54 цифрові входи/виходи (з яких 15 можуть використовуватися як ШІМ-виходи).
2. 16 аналогових входів.
3. 4 UART (апаратних приймачів для реалізації послідовних інтерфейсів).
4. Кварцовий резонатор на 16 МГц.
5. Роз’єм USB.
6. Роз’єм живлення.
7. Роз’єм ICSP для внутрішньо-схемного програмування.
8. Кнопка скидання.
9. Робоча напруга 5В.
10. Максимальний струм одного виводу 40 мА.
11. Flash-пам'ять 256 КБ, з яких 8 КБ використовуються завантажувачем.
12. SRAM 8 КБ.
13. EEPROM 4 КБ.

Отже, вибраний модуль цілком задовольняє вимоги проекту.

Двигун постійного струму з черв’ячним редуктором JGY-370 має такі характеристики [9]:

1. Швидкість холостого ходу: 2 об/хв.
2. Максимальний крутний момент: 56 кг·см.
3. Номінальна робоча напруга: 12 В.
4. Струм холостого ходу 35 мА.
5. Струм при максимальному навантаженні 1 А.
6. Розмір валу: 6 х 15 мм.
7. Загальний розмір: 8 х 3.2 х 3.9 см.

Основними характеристиками електродвигуна є швидкість обертання, напруга живлення, струм споживання і крутний момент. Згідно наведених вище характеристик такий двигун задовольняє вимоги проекту.

Контролер електродвигуна L298 має такі характеристики [10]:

1. Здвоєний Н-мостовий драйвер двигунів постійного струму.
2. Напруга живлення силової частини драйвера від +5 до +35 В.
3. Піковий струм 2А.
4. Напруга живлення логічної частини від +5 до +7 В.
5. Максимальна споживана потужність 20 Вт.

Згідно зазначених характеристик контролер електродвигуна L298 дозволяє заживити вибраний двигун постійного струму з черв’ячним редуктором JGY-370. Наявність двох каналів дозволить використати один контролер для сонячного трекера, а Н-мостова схема живлення двигуна в контролері реалізовує також реверсний режим обертання електродвигунів.

Початкове відлагодження програмного забезпечення здійснимо віртуально в середовищі Proteus. Для цього складемо модель схеми контролера (рис. 3.7), яка містить всі необхідні елементи.

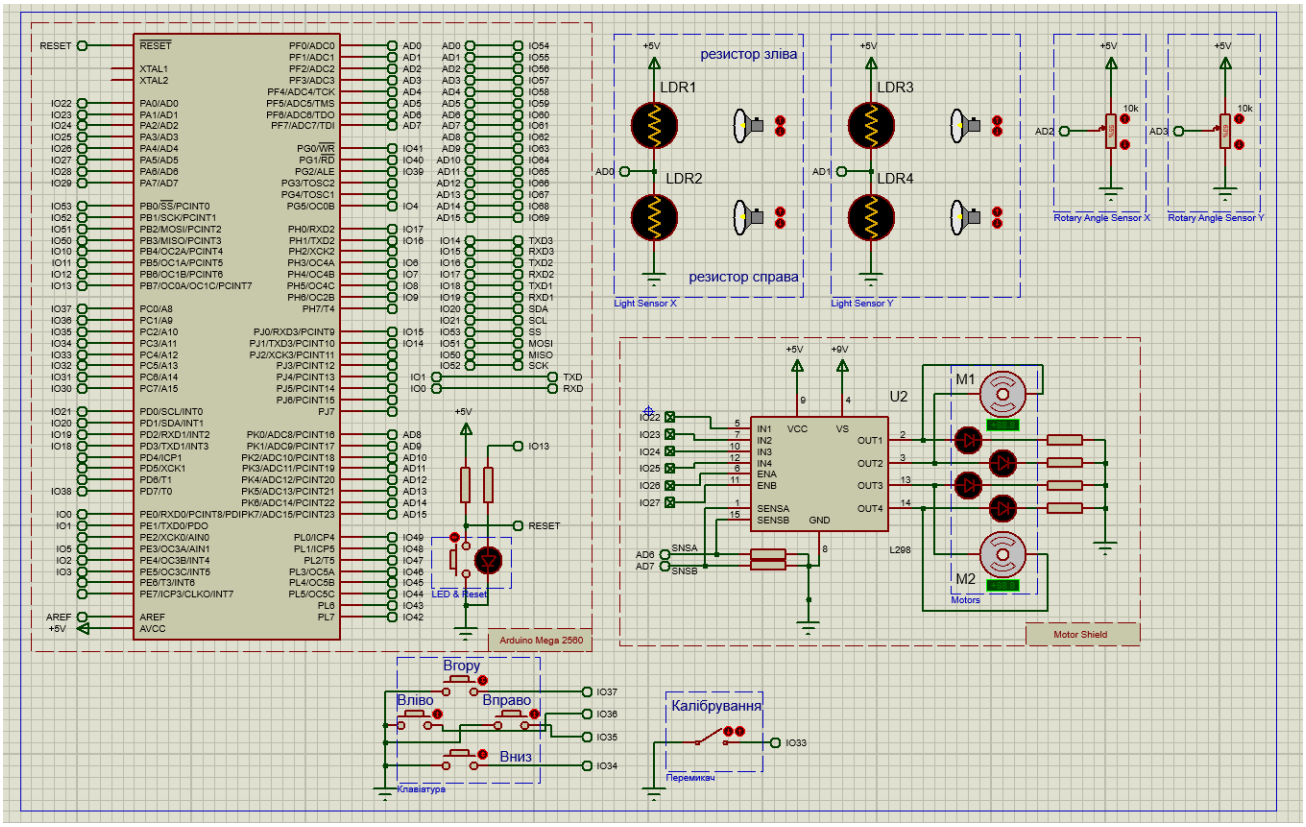

Рисунок 3.7 – Віртуальна модель контролера АСТ у середовищі Proteus

3.4. Розроблення програмного забезпечення мікроконтролерного модуля АСТ

Для покращення читання тексту програми використаємо підміни номерів виводів Arduino з підключеними до елементів схеми їх назвами:

```
//опис підключення виводів мікроконтролера в схемі
#define lightSensorX A0 /**/
#define lightSensorY A1 /**/
#define angleSensorX A2 /**/
#define angleSensorY A3 /**/
#define motorXR 22 /**/
#define motorXL 23 /**/
#define motorYR 24 /**/
#define motorYL 25 /**/
#define motorXEnable 26 /**/
```

```
#define motorYEnable 27 /**/
#define kalibrateIn 33 /**/
#define upIn 37 /**/
#define downIn 34 /**/
#define leftIn 36 /**/
#define rightIn 35 /**/
```

Також присвоїмо константам імена:

```
//граничні положення трекера в кодах АЦП
#define minY 341
#define maxY 682
#define minX 341
#define maxX 682
 //гранична різниця між зразковою і виміряною яскравістю
#define lightTreshold 30
```

Керування трекером в горизонтальному і вертикальному напрямках здійснюється однаковим алгоритмом, різниця між ними полягає лише в даних, якими оперує програма. Тому доцільно створити дві структури на мові С, які будуть описувати структуру даних трекерів:

```
//структура даних трекерів по осях
struct tracker{
  directions direction;
  byte pinMotorR,pinMotorL,pinLight,pinAngle;
  int minAngle,maxAngle,angle,kalibrateLight,light;};
```

В цьому випадку *direction* – це змінна, яка містить код напряму обертання; *pinMotorR, pinMotorL, pinLight, pinAngle* – змінні, що містять номера виводів мікроконтролера для керування електродвигуном, входи підключення фотодавача і давача положення механізму. Змінні *minAngle*, *maxAngle* та *angle* містять інформацію про граничні положення механізму і отримане положення з давача. Змінні *kalibrateLight* і *light* – еталонне і виміряне значення сигналу з

фотодавача. Значення у змінних *minAngle*, *maxAngle*, *angle*, *kalibrateLight*, *light* записуються кодами АЦП.

Для кодування напрямків обертання використаємо перелічений тип даних:

```
//перелічення дій керування двигуном
enum directions{disabled,uclockWise,clockWise};
```

Значення відповідають вимкненню обертання (*disabled*), обертання вверх/вліво (*uclockWise*) і вниз/вправо (*clockWise*).

Змінні *trackX* і *trackY* містять власне дані для опису трекерів в горизонтальному напрямі (в назві є літера X) і у вертикальному напрямі (в назві літера Y).

Алгоритми, приведені на рисунках 3.4 – 3.6 реалізовані у вигляді підпрограм, які оперують даними зі змінних відповідного трекера (вказується як параметр виклику підпрограми).

Повний текст програми наведено у додатку А.

ВИСНОВКИ

Під час виконання бакалаврської роботи нами було проаналізовано потенціал використання сонячної енергії в Україні, обґрунтовано прямопропорційну залежність ефективності ФЕМ від їх кута нахилу, досліджено типологію АСТ та описано вже існуючі прототипи таких установок. З'ясувалося, що Україна має значний потенціал для розвитку відновлюваної енергетики, та енергії Сонця зокрема. Частка електроенергії, отриманої шляхом прямого перетворення сонячного випромінювання, повинна суттєво зростати у енергетичному балансі держави, адже це зміцнить енергетичну незалежність країни, зменшить негативний вплив на довкілля традиційних видів генерації та сприятиме успішній інтеграції у європейський простір.

У другому розділі було досліджено доцільність застосування АСТ у Івано-Франківському регіоні та розраховано енергетично-економічний ефект від впровадження такої системи. Зважаючи на результати, отримані під час дослідження, можна стверджувати, що регіон має усі необхідні умови для потужного розвитку сонячної енергетики. Розраховані показники енергетично-економічної доцільності впровадження систем стеження за Сонцем становили: приріст у 4% / рік згенерованої енергії та, відповідно, позитивний економічний ефект у 17,3 тис грн / рік. Отож, застосування АСТ в межах СЕС Івано-Франківського регіону відчутно збільшує генерацію та зменшує термін окупності станцій, що є сприятливим для реалізації проєктів генерації сонячної енергії.

Найбільш вагомим практичним результатом роботи є алгоритмічно-апаратна складова системи. Вона містить аналіз функціональних елементів установки автономного сонячного трекера, алгоритм основної програми (складається з підпрограм setup і loop), алгоритм підпрограми виконання операцій трекера (підпрограма doTrack), алгоритм підпрограми контролю досягнення граничних положень (підпрограма operateRotation) та алгоритм підпрограми увімкнення / вимкнення двигунів трекерів (підпрограма

doControlMotor). На основі вищенаведених алгоритмів нами було обрано необхідне апаратне забезпечення установки та розроблено програмне забезпечення мікроконтролерного модуля у середовищі Arduino. Програмне забезпечення, наведене у бакалаврській роботі, дозволяє мікроконтролеру якомога точніше керувати трекером, що позитивно впливає на показники генерації електроенергії. Вибір апаратного забезпечення здійснено з урахуванням необхідності автономної роботи трекера навіть у випадку негативного впливу таких стохастичних факторів, як висока хмарність та вологість.

Отож, зміст бакалаврської роботи відповідає її темі щодо удосконалення системи визначення кута нахилу трекерів для підвищення ефективності генерації електроенергії фотоелектричними модулями. Усі поставлені завдання виконано, відомості, необхідні для розроблення алгоритмів та програмного забезпечення установки, описано та проаналізовано.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bloomberg New Energy Finance: UN Environment: 2019: веб-сайт. URL: https://about.bnef.com/ (дата звернення: 25.04.2024).
2. Chia Liang Lu, Jing Min Wang. Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system. Sensors. Switzerland. 2013. PP. 281-284.
3. Kassem, A., Hamad, M. A microcontroller-based multi-function solar tracking system. International Systems. №2. 2011. PP. 18-26.
4. Sumathi, Vijayan. Solar tracking methods to maximize PV system output: a review of the methods adopted in recent decade. Renewable and Sustainable Energy Reviews. №1. 2017. PP. 39-44.
5. Tirmikci, Aksoy, Yavuz, Cenk. Comparison of Solar Trackers and Application of a Sensor Less Dual Axis Solar Tracker. Journal of Energy and Power Engineering. №9. 2015. PP. 556-561.
6. Боровик Ю. Т., Єлагін Ю. В. Проблеми та перспективи розвитку альтернативної енергетики в Україні. Вісник економіки, транспорту і промисловості. №2. 2019. С. 78-89.
7. Возняк О. Т., Дацько О. С., Мисак Й. С. Сонячна енергетика: теорія та практика. Л: Вид-во Львів. політ. 2014. 340 с.
8. Гнатов А. В., Череватий В. О. Сонячна енергія – основні види та типи сонячних електростанцій. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології.* №2. 2017. С. 12-22.
9. Двигун з редуктором JGY-370: веб-сайт. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/motor-s-reduktorom-50-ob-myn-12vdc-jgy-370_181946.html (дата звернення: 28.05.2024).
10. Контролер двигуна L298: веб-сайт. URL: https://www.mini-tech.com.ua/drayver-dlya-dvigateley-l298n-mini (дата звернення: 28.05.2024).

11. Кудря С. О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. Київ: НАН України; Ін-т електродинаміки. 2001. 41 с.
12. Мікропроцесорний модуль Arduino MEGA 2560: веб-сайт. URL: https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Mega2560 (дата звернення: 28.05.2024).
13. Модель сонячного трекера ST1500: веб-сайт. URL: https://greenchip.com.ua/26-0-196-0.html (дата звернення: 25.04.2024).
14. Новицький К. В., Галай Т. М. Порівняльний аналіз ШІМ та MPPT-технологій зарядних контролерів у межах фотовольтаїчних систем. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*: матеріали XXV міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 22-24 травня 2024 р. Київ, 2024. С. 203-204.
15. Публічний звіт Голови Держенергоефективності: електронний ресурс. URL: http://saee.gov.ua/sites/default/files/2018_19 (дата звернення: 25.04.2024)
16. Словник термінів відновлюваної енергетики: веб-сайт. URL: https://alternative-energy.com.ua/vocabulary/ (дата звернення 25.04.2024).
17. Типологія одновісних трекерів та трекерів з двома осями: веб-сайт. URL: https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/ (дата звернення: 25.04.2024).
18. Фотоелектрична інформаційна система Європейського Союзу: веб-застосунок. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (дата звернення: 18.05.2024).
19. Шидловський А. К. Енергетичні ресурси та потоки. Київ: Українські енциклопедичні знання. 2021. 468 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Програмне забезпечення мікроконтролерного модуля АСТ

```
//опис підключення виводів мікроконтролера в схемі
#define lightSensorX A0 /**/
#define lightSensorY A1 /**/
#define angleSensorX A2 /**/
#define angleSensorY A3 /**/
#define motorXR 22 /**/
#define motorXL 23 /**/
#define motorYR 24 /**/
#define motorYL 25 /**/
#define motorXEnable 26 /**/
#define motorYEnable 27 /**/
#define kalibrateIn 33 /**/
#define upIn 37 /**/
#define downIn 34 /**/
#define leftIn 36 /**/
#define rightIn 35 /**/

//граничні положення трекера в кодах АЦП
#define minY 341
#define maxY 682
#define minX 341
#define maxX 682

//гранична різниця між зразковою і виміряною яскравістю
#define lightTreshold 30
```

```
        //перелічення виводів в масиві, які працюють як виходи
byte
outPins[6]={motorXR,motorXL,motorYR,motorYL,motorXEnable,motorYEnable};
        //перелічення виводів в масиві, які повинні мати підключений підтягуючий
резистор
byte pullUpPins[5]={kalibrateIn,upIn,downIn,leftIn,rightIn};

        //перелічення дій керування двигуном
 enum directions{disabled,uclockWise,clockWise};

        //структура даних трекерів по осях
struct tracker{
   directions direction;
   byte pinMotorR,pinMotorL,pinLight,pinAngle;
   int minAngle,maxAngle,angle,kalibrateLight,light;};

        //структури для опису трекерів по осях X і У
tracker
trackX{disabled,motorXR,motorXL,lightSensorX,angleSensorX,minX,maxX,0,512};
tracker
trackY{disabled,motorYR,motorYL,lightSensorY,angleSensorY,minY,maxY,0,512};

        //підпрограма керування двигуном
void doControlMotor(struct tracker &aTracker) {
        //який заданий напрямок?
switch (aTracker.direction){
   case
disabled:digitalWrite(aTracker.pinMotorR,LOW);digitalWrite(aTracker.pinMotorL,L
OW); break;
   case uclockWise:
```

```
        //не досягнуто граничного положення?
     if (aTracker.angle<aTracker.maxAngle){
        digitalWrite(aTracker.pinMotorR,HIGH);digitalWrite(aTracker.pinMotorL,LO
W);
     }//if
      break;
  case clockWise:
        //не досягнуто граничного положення?
     if(aTracker.angle>aTracker.minAngle){

digitalWrite(aTracker.pinMotorR,LOW);digitalWrite(aTracker.pinMotorL,HIGH);
     }//if
  break;
}//switch
}

        //підпрограма контролю обертання перевірка досягнення максимальних
кутів повороту
        //результат false - досягнуто граничного кута, true - ні
bool operateRotation(struct tracker &aTracker){
aTracker.angle=analogRead(aTracker.pinAngle);//зчитати позицію
        //досягнуто максимальний кут?
  if (((aTracker.angle<aTracker.minAngle)&&(aTracker.direction==clockWise))||
  ((aTracker.angle>aTracker.maxAngle)&&(aTracker.direction==uclockWise))){
        //вимкнути обертання
     aTracker.direction=disabled;
     doControlMotor(aTracker);
     return(false);
     }//if
```

```
return(true);
}//void

void doTrack(struct tracker &aTracker){
        //зчитати рівень яскравості
aTracker.light=analogRead(aTracker.pinLight);
        //перевищений поріг різниці яскравості?
if (abs(aTracker.light-aTracker.kalibrateLight)>lightTreshold){
        //який резистор освітлений менше?
  if(aTracker.light>aTracker.kalibrateLight){
    aTracker.direction=uclockWise;//задати напрям обертання
  }else{
    aTracker.direction=clockWise;//задати напрям обертання
  }//ife
  doControlMotor(aTracker);//увімкнути обертання
}else{
        //різниця освітленості менша порогу
  aTracker.direction=disabled;//вимкнуто
  doControlMotor(aTracker);//вимкнути обертання
}//ife
        //контроль досягнення граничних положень
operateRotation(aTracker);
}//void

void setup () {

        //перемикання виводів на вихід
for (byte i=0;i<6;++i){
  pinMode(outPins[i],OUTPUT);}//for
        //сформувати сигнали вимикання двигунів
```

```
doControlMotor(trackX);
doControlMotor(trackY);

        //увімкнення каналів контролера
digitalWrite(motorXEnable,HIGH);
digitalWrite(motorYEnable,HIGH);

        //вмикання підтягуючих резисторів на входах кнопок
for (byte i=0;i<5;++i){
  pinMode(pullUpPins[i],INPUT_PULLUP);}//for

analogReference(DEFAULT);
}

void loop() {
        //вхід в режим калібрування
while(!digitalRead(kalibrateIn)){
        //перевірка кнопок ручного орієнтування
        //натиснули кнопку «вгору»?
  while ((!digitalRead(upIn))&&(operateRotation(trackY))){
         trackY.direction=uclockWise;//задати напрямок обертання
         doControlMotor(trackY);//увімкнути обертання
  }//while
        //натиснули кнопку «вниз»?
  while ((!digitalRead(downIn))&&(operateRotation(trackY))){
         trackY.direction=clockWise;//задати напрямок обертання
         doControlMotor(trackY);//увімкнути обертання
  }//while
        //натиснули кнопку «вліво»?
  while ((!digitalRead(leftIn))&&(operateRotation(trackX))){
```

```
        trackX.direction=uclockWise;//задати напрямок обертання
        doControlMotor(trackX);//увімкнути обертання
  }//while
      //натиснули кнопку «вправо»?
  while ((!digitalRead(rightIn))&&(operateRotation(trackX))){
      trackX.direction=clockWise;//задати напрямок обертання
        doControlMotor(trackX);//увімкнути обертання
  }//while

      //кнопки відпущені, обертання вимкнути
  trackY.direction=disabled;doControlMotor(trackY);//вимкнути обертання
  trackX.direction=disabled;doControlMotor(trackX);//вимкнути обертання
      //зчитування зразкових рівнів яскравості
  trackX.kalibrateLight=analogRead(trackX.pinLight);
  trackY.kalibrateLight=analogRead(trackY.pinLight);
}//while режиму калібрування

      //виконання операцій трекера по осях
doTrack(trackX);
doTrack(trackY);

}//void
```