

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення автоматизованої системи виявлення та
видалення забруднень з поверхні сонячних панелей
на базі давача розпізнання кольорів

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КА-41
спеціальності 151 «Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)

Волинська Я.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Трембач Р.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Козбур В.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Станько А.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

АНОТАЦІЯ

Метою даної кваліфікаційної роботи була розробка автоматизованої системи очищення сонячних фотоелектричних панелей від пилу, яка забезпечувала б ефективне та регулярне видалення забруднень з поверхні панелей для максимізації їх ефективності. Для досягнення цієї мети було проведено комплексне дослідження впливу пилу на сонячні панелі, розроблено структуру системи та реалізовано її апаратну і програмну частини.

У вступі було обґрунтовано актуальність теми та визначено основні завдання дослідження.

В аналітичній частині було розглянуто вплив пилу на ефективність сонячних панелей, проведено експериментальні дослідження для виявлення та очищення пилу. Розглянуто різні автоматизовані методи очищення, включаючи технологію Heliotex, електростатичне очищення та робота Sun Brush. Було проаналізовано процеси очищення фотоелектричних панелей від пилу.

У проєктній частині було розроблено структурну схему системи, описано блоки управління, фотоелектричні панелі, блок живлення, датчики пилу та кольору, вимірювальний та дисплейний блоки. Особлива увага приділялася вибору водяної помпи, системи склоочисника, привідних гвинтових систем та двигуна постійного струму. Також було здійснено проєктування та моделювання повної схеми системи, розроблено алгоритм роботи системи та проведено її тестування.

У спеціальній частині було представлено програмне забезпечення системи та детально описано процес підключення елементів.

У висновках підсумовано виконання роботи, вказано на досягнення мети даної кваліфікаційної роботи.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	7
1.1 Вплив пилу на сонячну фотоелектричну панель	7
1.2 Експериментальне дослідження впливу пилу на сонячні панелі.	10
1.3 Процеси очищення фотоелектричних панелей від пилу	20
2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА	23
2.1 Розробка структурної схеми системи	23
2.2 Основні блоки системи.....	24
2.3 Вибір датчика пилу та датчика кольору	27
2.3 Вимірювальний блок	32
2.4 Дисплейний блок.....	33
2.5 Блок очищення	33
2.6 Проєктування та моделювання повної схеми системи	42
2.7 Розробка алгоритму роботи системи та її тестування.....	43
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	48
3.1 Програмування системи	48
3.2 Підключення елементів	48
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	57
4.1 ОХОРОНА ПРАЦІ	57
4.1.1 Загальні положення по охороні праці	58
4.1.2 Вимоги безпеки перед початком робіт	59
4.1.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	62
4.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	64

4.2.1 Залежність розмірів осередків ураження від маси продуктів вибуху, (СДОР), їхнього тиску, метеоумов, і місцевості.	64
4.2.2 Оцінка хімічної обстановки	66
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	Ошибка! Закладка не определена.

ВСТУП

Сонячна панель — це пристрій, який використовується для поглинання енергії сонця з конкретною кінцевою метою — виробляти тепло або більшу частину часу — електроенергію. Її також називають фотоелектричним елементом, оскільки вона складається з численних комірок, які використовуються для перетворення сонячного світла в енергію. Основною сировиною для цих сонячних панелей є сонце. Панелі розташовані таким чином, що комірки повернуті до сонця, щоб забезпечити максимальне поглинання сонячних променів. Чим більше сонячної енергії, тим більше виробляється електроенергії.

За останнє десятиліття використання фотоелектричних (ФЕ) сонячних модулів зросло. Такі модулі успішно досягли трансформації своїх інновацій від великогабаритних лабораторних моделей до малогабаритних застосувань. Це досягнення надзвичайно збільшило комерційне виробництво і продаж фотоелектричних модулів. Наразі фотоелектричні модулі можна знайти не лише в домогосподарствах або в автономних системах. Вони також впроваджуються на мегамасштабних електростанціях, генеруючи електроенергію не тільки для районів, але й для міст у кількох місцях у світі.

За даними «Старіння населення та інтелектуальне вимірювання: польове дослідження ставлення та поведінки домогосподарств щодо використання енергії в Шотландії» [1], загальна встановлена потужність фотоелектричних станцій на кінець 2014 року становила понад 175 ГВт. Крім того, вартість виробництва енергії на основі фотоелектричних установок майже еквівалентна вартості традиційних джерел енергії [32]. У більшості країн світу останні законодавчі акти рішуче підтримують залучення механізмів відновлюваної сонячної енергетики на основі фотоелектричних установок.

Всупереч згаданим вище перевагам, існують певні недоліки, які впливають на загальну продуктивність джерел енергії на основі

фотоелектричних перетворювачів. Наявність бруду на панелях може значно знизити їх ефективність. Бруд може поглинати сонячне світло, а це означає, що до панелей досягає менше світла, внаслідок чого виробляється менше електроенергії. Деякі види бруду, такі як пил і сажа, можуть відбивати сонячне світло, це також призводить до зниження ефективності. Накопичення бруду [33,34,35] може призвести до перегріву панелей [36,37], Це може знизити їх термін служби та зробити їх більш схильними до пошкоджень.

Тому мета роботи полягає в тому, щоб забезпечити безперебійну роботу сонячних панелей за допомогою розумної системи очищення на основі датчиків розпізнавання кольорів та пилу.

Розпізнавання кольору — це метод ідентифікації фізичних змін у матеріалах на основі оцінки їх зовнішнього вигляду. Відкладення бруду на сонячних панелях може значно змінювати їх зовнішній вигляд та продуктивність. Це потребує постійного моніторингу для складання ефективного графіка очищення, зменшення непотрібних витрат та оптимізації вироблення сонячної енергії.

Традиційні методи виявлення бруду на сонячних панелях, такі як використання роботизованих камер, математичних формул та аналіз вихідного струму та напруги, можуть бути складними, дорогими та неточними.

Метод ґрунтується на використанні датчика кольору та компонентів Arduino. Підхід націлений на вимірювання кольору панелі, калібрування, процес вибору порогового значення, порівняння значень вимірювання кольору та вирівнювання подальшого калібрування у відповідь на зміну кольору сонячних панелей. Цей метод має на меті виправити інші способи виявлення бруду, що використовувалися раніше. Система також включає склоочисник, який використовується для очищення сонячної панелі. Таким чином, цей склоочисник приводиться в дію лише у разі виявлення бруду, що економить енергію та ресурси.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Вплив пилу на сонячну фотоелектричну панель

Сонячна енергія є чудовим альтернативним джерелом енергії для виробництва електроенергії, оскільки вона є відновлюваною і не утворює відходів [2]. З розвитком фотоелектричних технологій пріоритетним завданням для зменшення витрат на електроенергію стає її збереження, оскільки вона потребує лише сонячного проміння як палива [3].

Фотоелектрика (PV) - це метод виробництва електроенергії шляхом перетворення сонячного випромінювання в електричний струм постійного струму за допомогою напівпровідників, які демонструють фотоелектричний ефект. У фотоелектричній енергетиці використовуються сонячні панелі, що складаються з ряду сонячних елементів, які містять фотоелектричний матеріал. До матеріалів, які зараз використовуються для фотоелектрики, належать монокристалічний кремній, полікристалічний кремній, аморфний кремній, телурид кадмію та селеніт/сульфід міді, індію та галію.

У зв'язку зі наростаючим попитом на відновлювані джерела енергії, виробництво сонячних елементів і фотоелектричних масивів за останні роки значно просунулося вперед. Сонячна фотоелектрика є стійким джерелом енергії.

Сонячна фотоелектрика зараз є третім за важливістю джерелом відновлюваної енергії після гідро- та вітроенергетики з погляду встановленої потужності у світі. Понад 100 країн використовують сонячну енергію. Установки можуть бути наземними (а іноді інтегрованими з сільським господарством і випасом худоби) або вбудованими в дах чи стіни будівлі (інтегровані в будівлю фотоелектричні станції або просто дахові (рисунок 1)). За нинішніх технологій фотоелектричні системи відшкодовують енергію,

необхідну для їх виробництва, за 3-4 роки. Очікувані технології дозволять скоротити час, необхідний для відшкодування енергії, до 1-2 років.

Бруд на зовнішніх поверхнях сонячних панелей обмежує отримання сонячної енергії, що призводить до значного зменшення кількості електроенергії, виробленої системою сонячних панелей [4,5]. Зменшення потужності сонячних панелей також призводить до зниження ефективності системи, в той час, як деградація модулів збільшується. Рівень ефективності, що реєструється при перетворенні сонячного світла в електроенергію, є фундаментальним, і це призвело до збільшення бажання розробляти нові фотоелектричні системи. Протягом останніх шести років спостерігається підвищений інтерес до вивчення впливу накопичення пилу на продуктивність фотоелектричних панелей, особливо починаючи з 2011 року (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 - Демонстрація використання сонячних панелей на даху приватного будинку

Найбільша кількість досліджень була опублікована протягом 2016 року. Це відображає зростання використання фотоелектричних технологій як джерела відновлюваної енергії в усьому світі, що мотивує проведення подальших досліджень факторів, які впливають на їх ефективність, таких як накопичення пилу, температурні коливання та інші фактори. Пояснення, представлені на рис. 1.2, узгоджуються з тим фактом, що фотоелектрична

промисловість зміцнилася протягом 2015 та 2016 років завдяки постійній появі нових ринків та пов'язаному з цим високому світовому попиту [6,7].

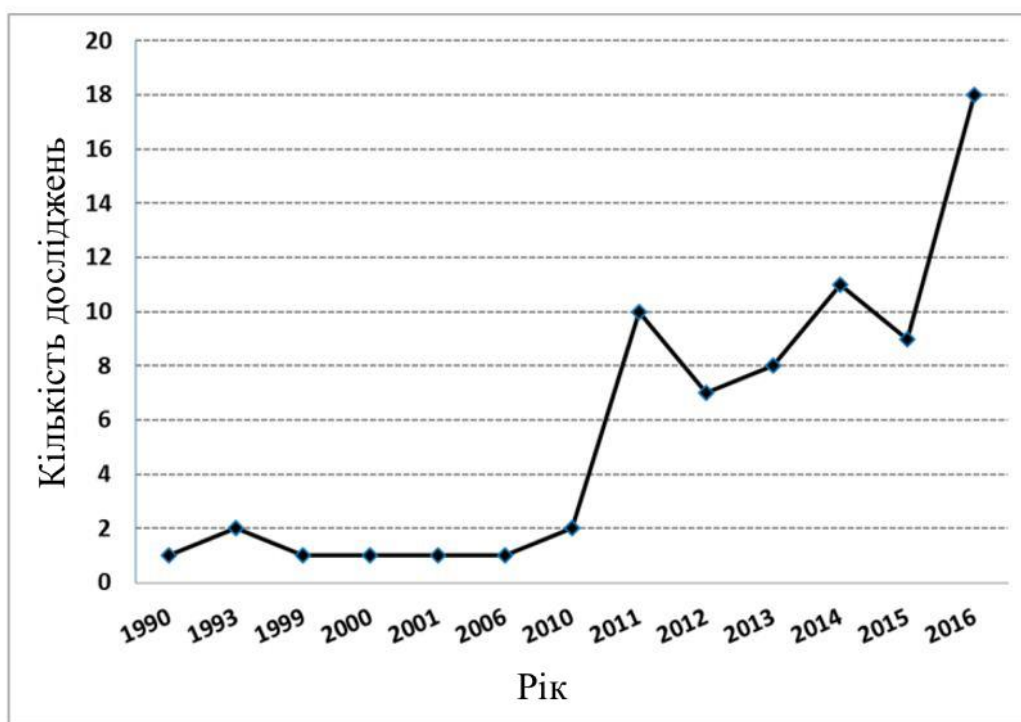


Рисунок 1.2 - Демонстрація наростаючого інтересу до вивчення впливу накопичення пилу на продуктивність фотоелектричних систем.

Згідно з дослідженням [8], щорічні втрати потужності, спричинені осадженням пилу, зазвичай становлять від 5% до 30%. На місцях встановлення сонячних панелей відкладення бруду є періодичним і непередбачуваним, що ускладнює контроль швидкості відкладення бруду [9]. Залежність від природних очищувачів, таких як сніг, вітер і дощ, є ненадійною і менш ефективною. Крім того, видалення відкладень бруду на сонячних панелях через незаплановане технічне обслуговування призводить до значних грошових втрат [10]. Тому постійна перевірка стану пилу на сонячних панелях має важливе значення для забезпечення найкращої генерації електроенергії [4].

1.2 Експериментальне дослідження впливу пилу на сонячні панелі

Було проведено кілька досліджень для спостереження та аналізу ефектів відкладення пилу. Більшість, якщо не всі, погоджуються з тим, що пил знижує ефективність фотоелектричної панелі. Експериментальне дослідження [11], зосереджене на аналізі електричних характеристик фотоелектричних модулів з пилом на них. В ньому розглядаються різні параметри, такі як конструкція і розмір системи фотомодулів, кількість випромінювання і стратегії експлуатації. Автори дійшли висновку, що пил дійсно знижує електричні характеристики фотоелектричних модулів. В іншому дослідженні [12] розглядається вплив навколишнього середовища на продуктивність фотоелектричних панелей і робиться висновок, що щоденні втрати енергії протягом одного року становлять близько 4,4% через осадження пилу. Щобільше, підтверджено, що щоденні втрати енергії можуть сягати понад 20% в районах, де тривалий час не випадає дощ. Крім того, автори роботи [13] дійшли висновку, що зменшення кількості енергії, що генерується фотоелектричними системами, залежить від місця, де вони встановлені.

Хоча країни Близького Сходу більш схильні до піщаних бур, Саудівська Аравія є однією з найбільш постраждалих країн через великі піщані незабудовані землі. Відкладення пилу на поверхні фотоелектричних модулів зменшує кількість отриманої енергії, оскільки пил зменшує кількість сонячних променів, що потрапляють на фотоелементи, і створює ефект затінення.

Результати, представлені на рис. 1.3, показують, що осадження кожного забруднювача спричиняє абсолютно різний вплив на продуктивність фотоелектричних установок. Зокрема, кількість лише $0,35 \text{ г/м}^2$ червоного ґрунту може спричинити падіння виробництва енергії майже на 7,5%, тоді як приблизно така ж щільність осадження вапняку ($0,33 \text{ г/м}^2$) спричиняє падіння майже на 4%. Що стосується впливу золи, то при подвоєнні маси до ($0,63 \text{ г/м}^2$) вироблена енергія зменшується на 2,3%. У своєму дослідженні Калделіс і

Капсалі [46] розробили математичну модель для отримання правдивих результатів аналізу для розрахунку точного впливу регіонального забруднення повітря на продуктивність фотоелектричних установок. Забруднення повітря в цьому дослідженні представлено червоним ґрунтом, вапняком і вуглецевим матеріалом. Отже, чим більше пилу, тим менше виробляється електричної енергії [14].

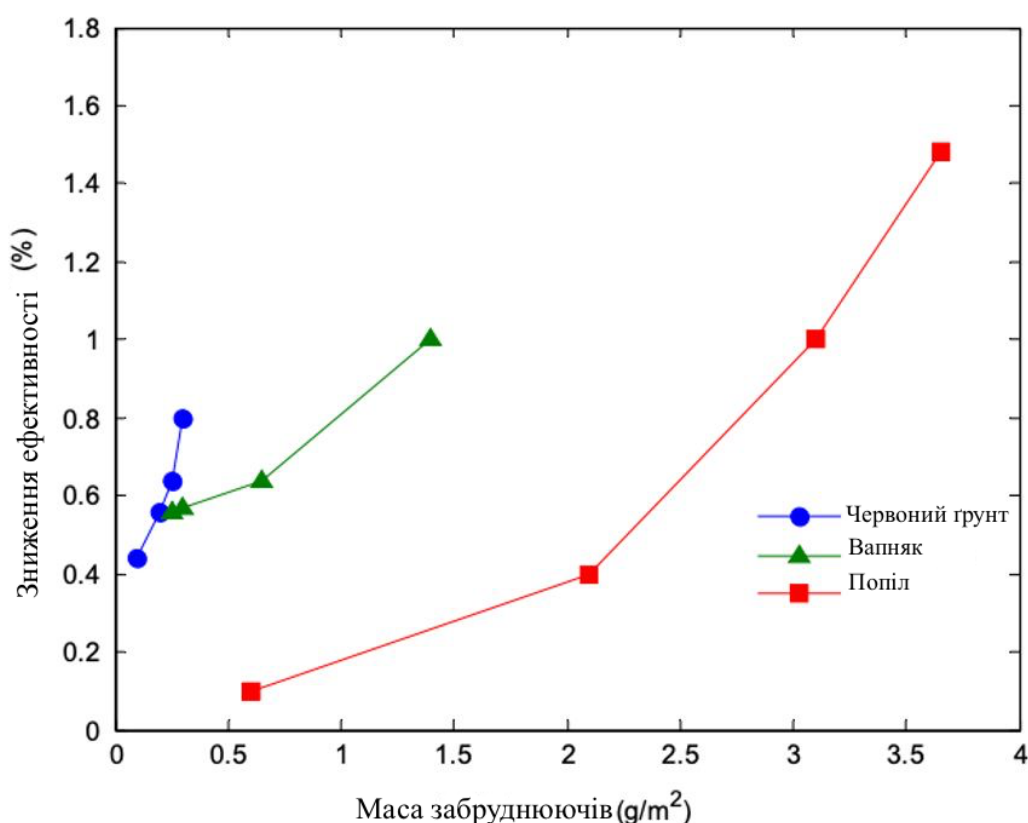


Рисунок 1.3 - Різниця в ефективності між чистими та забрудненими парними панелями для різних масових осаджень досліджуваних забруднювачів

1.2.1 Виявлення та очищення пилу на сонячних панелях

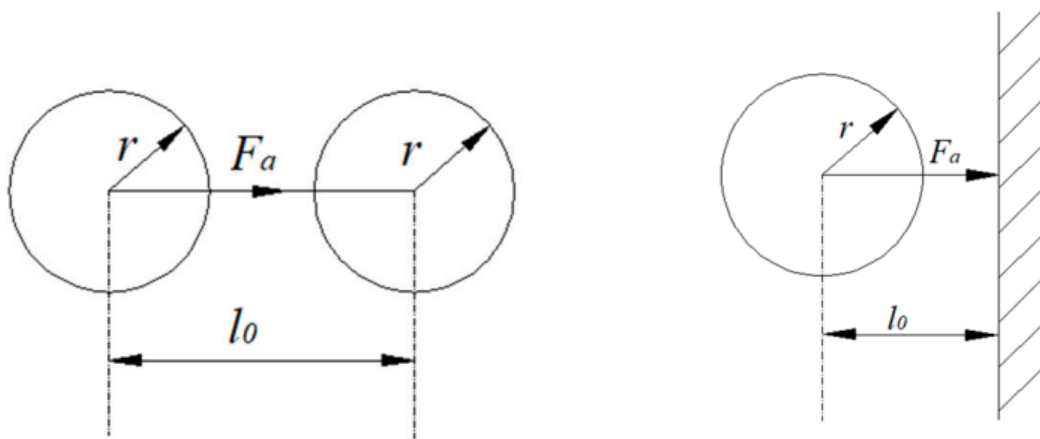
Якщо дослідити причини переміщення пилу на поверхню сонячної панелі, то результати експерименту в «Вплив термофорезу на накопичення пилу на сонячних панелях» [15] вказують на те, що термофоретичний ефект сприяє осадженню пилу на сонячній панелі. Сили, що діють на частинки пилу, включають капілярну силу, електростатичну силу [16], силу Ван дер Ваальса і силу тяжіння, які впливають на швидкість занурення пилу [17]. Крім того,

вологе середовище збільшує сили, що спричиняють прилипання пилу. На основі другого закону Ньютона для дослідження процесу осадження частинок пилу було обрано модель дискретних елементів (DEM). Тому баланс руху частинок можна розрахувати наступним чином:

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_c + \vec{F}_e + \vec{F}_d + \vec{F}_x,$$

де F_g - сила тяжіння, F_a - сила Ван дер Ваальса (показана на рисунку 1.4), F_b - контактна сила, що містить сили між частинками пилу і сонячним дзеркалом, F_c - сила рідинного містка частинки пилу, F_e - електростатична сила, F_d - сила плавучості, F_x - інші сили, що діють на частинку пилу, такі як сила теплового плавання, сила градієнта тиску, сила Саффмана і сила доданої маси.

Оскільки розмір частинки пилу не знаходиться в межах мікроскопічного діапазону молекулярних розмірів, то в цій роботі можна знехтувати силою градієнта тиску, силою доданої маси, силою теплового плавання, силою Саффмана та іншими силами.



(a) Частинка і частинка

(b) Частинка і дзеркало

Рисунок 1.4 - Схематична діаграма дії сили Ван дер Ваальса на задану частинку пилу (F_a)

Грубим методом виявлення бруду на сонячній панелі є фізичне спостереження фахівцями. Цей метод забирає багато часу, а утримання технічного персоналу для регулярного спостереження за гігантською фермою є фінансово дорогим. Час очищення є компромісом між вартістю очищення і прийнятним станом забруднення для ефективності сонячного модуля, оскільки безперервне очищення призводить до непотрібних витрат бюджету. Сонячні панелі здебільшого розташовані на дахах та у віддалених полях, тому автоматизоване розпізнавання бруду та очищення за допомогою роботизованих систем виявилось більш ефективним, ніж інші методи виявлення скупчень бруду. Несправний датчик бруду призведе до помилкового повідомлення, що спричинить запит на очищення панелей у непотрібний час, а в момент, коли очищення є життєво важливим, датчик може вийти з ладу.

Для подолання розриву між витратами на очищення і реальним станом забруднення для ефективності сонячних панелей було прийнято багато механізмів [18]. Відносно, щоб визначити, чи є на сонячній панелі пил, були проведені деякі дослідження для вимірювання маси частинок зразка скла або втрати світлопропускання [19]. Добову динаміку втрат енергії через вплив пилу на оптичний коефіцієнт пропускання застосування фотоелектричного генератора показано на рис. 1.5. Це літній день з ясним небом, більш ніж через два місяці після останніх дощів; як наслідок, рівень пилу, що осідає на поверхні скління фотоелектричного генератора, спричиняє середньодобові втрати на рівні 4,4 %. Ці втрати енергії являють собою частку випромінювання, яку фотоелектричний генератор не отримає. Коли фотоелектричні модулі чисті, втрати енергії залишаються приблизно постійними протягом дня. Коли на склі фотоелектричних модулів осідає пил, поведінка втрат не є постійною протягом дня в дні з ясним небом, а залежить від оптичного пропускання скла з пилом.

Крива тренду, що описує залежність втрат енергії від оптичного пропускання, має дуже специфічну форму (рис. 1.5). Було встановлено, що це явище обумовлено показником заломлення n_2 пилового матеріалу (рис.1.6).

Оптичний коефіцієнт пропускання скління фотомодулів має максимум близько сонячного полудня, а потім зменшується зі збільшенням кута падіння θ_s до мінімального значення (рис. 1.6), а потім зростає для більших значень кута падіння.

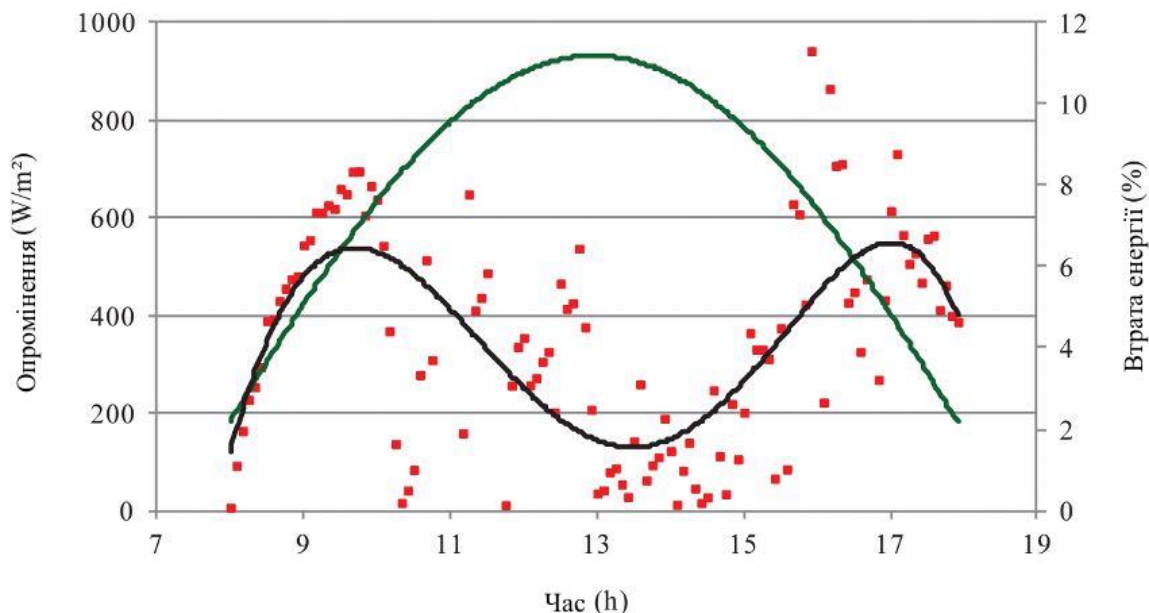


Рисунок 1.5 - Добова динаміка втрат енергії

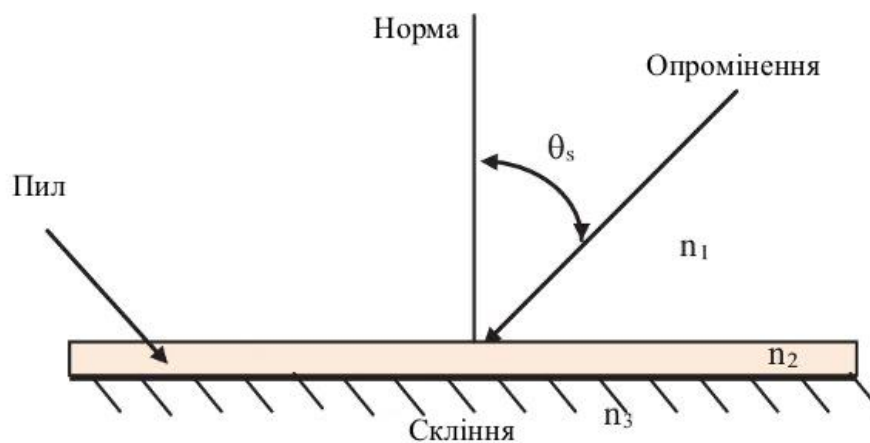


Рисунок 1.6 - Ілюстрація падіння опромінення

Альтернативний метод виявлення бруду в [20] розраховує ідеальний діапазон операцій очищення в днях, щоб зменшити бюджет на очищення і

максимізувати прибуток від брудних панелей, застосовуючи математичну формулу. У формулі визначені кроки очищення ґрунтуються на атмосферних параметрах і вартості процесу миття. Однак розрахунок змінних є нескінченним, затяжним і призводить до нерегулярності. Звідси впливає необхідність автоматизації виявлення забруднень.

Методи виявлення бруду, описані в [22,23] оцінюють падіння вихідної потужності сонячної батареї або струм короткого замикання, викликаний забрудненням фотоелектричних модулів. Ці методи безперервно перевіряють вихідну потужність, щоб виявити забруднення та активувати необхідний процес очищення. Датчики струму і напруги, з'єднані з контролером, обчислюють вихідну потужність фотоелектричної панелі в реальному часі, а потім обробляють вплив накопиченого пилу на вихідну потужність. Удосконалений підхід може стабільно забезпечувати задовільне виявлення забруднення незалежно від вихідної потужності панелі, оскільки вихідна потужність залежить від інших втрат.

1.2.1.1 Переваги та використання методів візуалізації для моніторингу та ідентифікації зовнішніх характеристик об'єктів

Теоретичні дослідження довели можливі переваги використання методів візуалізації для моніторингу зовнішніх характеристик стану об'єктів. Чинні сьогодні методи візуалізації використовують оптичні компоненти, камери та програмне забезпечення для моніторингу поверхонь об'єктів [24]. Разом з тим, така технологія виявлення забруднень є складною і має високу вартість. Однак використання летючих роботів і дронів з камерами високої роздільної здатності виявилось більш ефективним методом, вони можуть отримувати більш детальні зображення [25]. Існують також помилки, пов'язані з методом обробки зображень, який вимагає вдосконалених методів перетворення зображень [26].

Статус кольору для ідентифікації та оцінки фізичних якостей матеріалів висвітлено в [27,28]. Обробка зображень і виявлення об'єктів досягається в

галузях промисловості з використанням колірних характеристик, тоді як датчики кольору виявляють і сортують матеріали відповідно до їхнього кольору [28]. Крім того, середовище може бути визначене і перевірене на основі градацій кольорової чутливості. Такий підхід дозволяє виявляти зміни спонтанно і швидко [31]. Вони оцінюють відбите світло в червоній, зеленій і синій (три кольори білого світла) шкалі з відповідною довжиною хвилі. В експериментальних проєктах [29,30] розрізняли зовнішній вигляд плодів полуниці та помідорів за допомогою датчика кольору, щоб визначити їхню зрілість, впорядкувати та розділити їх, враховуючи їхній колір. Для кожної стадії дозрівання існує своє значення RGB. Колірна сигнатура об'єкта є відповідним описом для виявлення змін на RGB-зображеннях. Вхідні зображення корелюються, щоб знайти ділянки зі зміненими кольорами, а вміст зображень ідентифікується відповідно до функції, мети або точності необхідних вимірювань.

1.2.2 Автоматизовані методи очищення бруду на сонячних панелях

Наразі фотоелектричні панелі можна очищати вручну та автоматично. З часом ручне очищення стає дорожчим порівняно з автоматичним. У цьому проєкті розглядаються різні технології очищення, доступні сьогодні на ринку, такі як: ополіскувач Heliotech, електростатичне очищення та роботизована система Sun Brush. Ці методи очищення були обрані для огляду, щоб визначити, чи зможе робот для очищення працювати на поверхні фотоелектричних панелей. Крім того, використання робототехніки для очищення фотоелектричних панелей розширюється протягом останніх кількох років, щоб зменшити потребу в ручному очищенні. Методи очищення пояснюються нижче.

1.2.2.1 Технологія Heliotex

Heliotex (рис.1 7) - це автоматична система очищення, яка мие та ополіскує поверхні сонячних панелей. Система очищення може бути запрограмована на час, коли це необхідно, залежно від умов навколишнього середовища (Heliotex, 2013).

Переваги та недоліки використання системи очищення Heliotex наведені нижче:

Переваги:

- добре підходить для ділянок з вільним доступом до води;
- підвищує ефективність фотоелектричних панелей після миття майже на 100%.



Рисунок 1.7 - Технологія очищення Heliotex

Недоліки:

- дороге обладнання, таке як мило, шланги та помпа, які необхідні;
- потребує постійного доступу до великої кількості води;
- потребує регулярної перевірки на наявність води та мила накопичення залишків.

1.2.2.2 Електростатичне очищення

Ця технологія очищення була вперше розроблена вченими для розв'язання проблеми відкладення пилу на поверхнях фотоелектричних перетворювачів (рис.1.8-1.9). Ця технологія також може бути використана в сухих запилених місцях на Землі. Цей метод не є безпечним для домовласників, які використовують сонячні панелі, оскільки панель трясеться, що може послабити її з'єднання з дахом, і вона може впасти та спричинити травми. Ще метод EDS є менш ефективним для малих частинок пилу в діапазоні від 0 до 5 мкм, тоді як він продемонстрував кращу продуктивність для частинок пилу, які мають розмір понад 20 мкм. Також, було виявлено, що використання методу очищення EDS як додаткового шару поверх фотоелектричної панелі зменшує інтенсивність сонячного випромінювання через її прозорий екран.

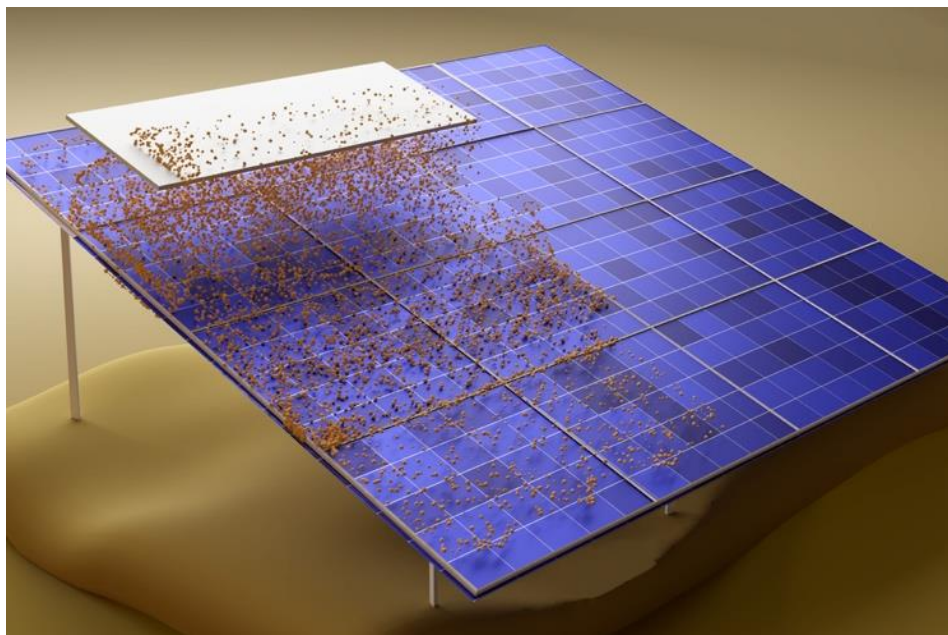


Рисунок 1.8 - Структура фотоелектричної системи, що використовує електростатичне очищення

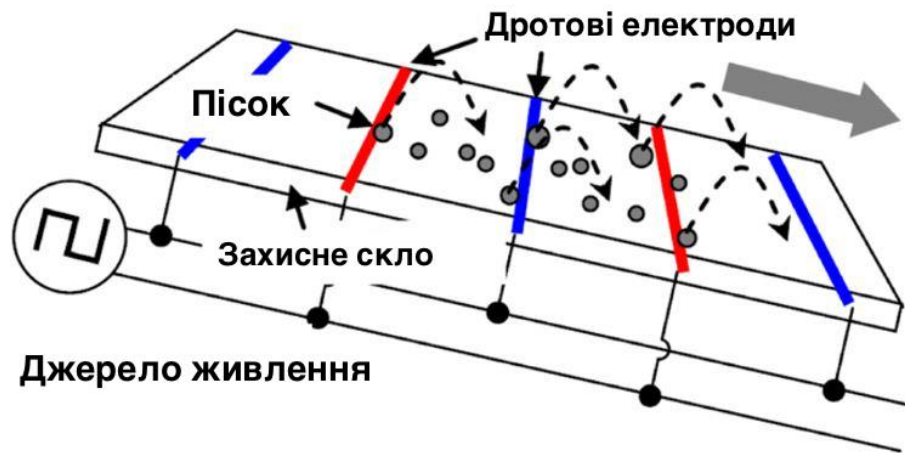


Рисунок 1.9 - Схематична схема електростатичної системи очищення, яка використовує стоячу хвилю та силу тяжіння для видалення піску з сонячної панелі

Таким чином, це призводить до зниження ефективності панелі, що є наслідком невизначеного врахування довговічності щодо ультрафіолетового випромінювання [47].

1.2.2.3 Робот Sun Brush

Sun Brush - це робот-прибиральник з аналогічною фіксованою конструкцією, призначений для очищення снігу з фотоелектричних панелей (рис.1.10). Це автоматизована система очищення фотоелектричних панелей.



Рисунок 1.10 - Повне автоматичне очищення сонячних панелей за допомогою Sun Brush.

Недоліками використання роботизованих систем Sun Brush є те, що вони дорогі і їх важко встановити на великій площі фотоелектричних панелей.

1.3 Процеси очищення фотоелектричних панелей від пилу

Загальновизнано, що очищення фотоелектричних панелей від пилу, що накопичився, допомагає забезпечити максимальну ефективність роботи панелей і, отже, максимальну вихідну потужність. Але виникає питання щодо частоти очищення. Встановлення раціональної частоти очищення фотоелектричних панелей від пилу важливо не тільки тому, що це дозволяє знизити витрати, але й тому, що надмірно часте очищення призводить до руйнування і впливає на термін служби фотоелектричних панелей [48]. У літературі існують різні схеми частоти не тільки тому, що дослідники мають різні погляди, але й тому, що частота очищення залежить від кліматичних умов і місцевих особливостей, таких як будівлі, споруди та рослинність [49].

З погляду експлуатації та обслуговування, очищення фотоелектричних панелей повинно базуватися або на певному часовому інтервалі, або на певних умовах. З огляду на пустельні регіони з невеликою кількістю дощів або взагалі без них, Цзян та ін. [50] запропонували формулу для розрахунку оптимального інтервалу очищення (T), як показано в рівнянні (1). Використовуючи цю формулу, автори визначили, що оптимальна частота очищення фотоелектричних панелей в пустельних районах становить 21 день. Іншими словами, чистка проводиться раз на три тижні.

$$T = \frac{M_d}{C_d V_d} \quad (1)$$

де T - час або частота очищення (в днях), M_d — щільність накопичення пилу, C_d — масова концентрація пилу в повітрі, V_d — швидкість частинок пилу, визначена за рівнянням (5). Перспектива Абу-Назера [51] вимагає

балансу між вартістю очищення фотоелектричних панелей і ступенем втрат ефективності, які можуть бути допустимими [51]. З цього погляду, Абу-Насер запропонував математичну формулу для визначення оптимальної кількості днів, N , між очищеннями, яка максимізує прибуток і мінімізує втрати ефективності, як показано в рівнянні (2).

$$N = \sqrt{\frac{2P}{\alpha si\beta}} \quad (2)$$

де N - оптимальна кількість днів між циклами очищення, P - вартість очищення сонячної батареї, α - середньодобові втрати ефективності сонячного перетворення через накопичення пилу, s - середня кількість сонячних годин на добу, i - потужність встановленої фотоелектричної системи, β - ціна за кВт-год. Аль-Отайбі та ін. [52] розробили систему з очищенням на основі заданого часового інтервалу та тривалості: щосуботи вранці о 2 годині ночі протягом 3 хвилин. Щотижневе очищення проводилося з використанням лише води та доповнювалося очищенням раз на місяць з використанням води та мила [52]. Вони рекомендують, щоб частота очищення фотоелектричних панелей залежала від кліматичних умов: у вологих холодних кліматичних умовах фотоелектричні панелі слід чистити кожні шість місяців; у вологих помірних умовах - кожні три місяці; у вологих екваторіальних умовах - щомісяця; а в сухих кліматичних умовах — щотижня. Що стосується методів очищення, то для очищення фотоелектричних панелей у вологому холодному та помірному кліматі пропонується вологе очищення з використанням мила та теплої води; у вологих екваторіальних умовах - нанопокриття та автоматичне очищення за допомогою склоочисників; у сухих посушливих кліматичних умовах — сухе очищення, включаючи використання автоматизованих роботизованих пристроїв, технології самоочищення, ротаційної щітки та повітряних шлангів/компресорів. Після дослідження глобального впливу твердих частинок на фотоелектричну генерацію, використовуючи світові дані за 12-річний період, Лі та ін. [53] дослідили вплив очищення на покращення фотоелектричної

генерації порівняно з видаленням лише атмосферних опадів. Тому запропоновано проводити очищення на щомісячній або щоквартальній основі, на додаток до видалення лише опадів, залежно від місця розташування фотоелектричної системи.

2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

В основі всіх автоматизованих систем очищення фотоелектричних панелей від пилу лежить контролер, який відстежує параметри процесу і керує системою. Контролер отримує вхідні дані від датчиків фотоелектричної системи та інших компонентів системи, обробляє вхідні дані відповідно до заданих алгоритмів і надсилає відповідні сигнали що керують для відповідних дій інших компонентів системи, таких як двигуни постійного струму, для руху елемента в заданому напрямку або просто для відображення параметрів на рідкокристалічних дисплеях. В автоматизованих системах очищення фотоелектричних установок від пилу використовуються мікроконтролери, і хоча багато досліджень загалом вказують на використання мікроконтролерів, лише кілька досліджень конкретизують тип використовуваного мікроконтролера.

Для проведення автоматизації процесу вибрано мікроконтролер, що базуються на сімействі Arduino, такий як Arduino Uno.

2.1 Розробка структурної схеми системи

Основна увага при розробці та реалізації цієї системи була приділена тому, щоб зробити систему простою, дешевою, ефективною та зручною у використанні. Прототип системи реалізовано на основі автоматизованого методу очищення склоочисників з використанням мікроконтролера Arduino Nano (компактна версія Arduino UNO), з'єднаного з різними пристроями вводу та виводу. Був прийнятий модульний підхід до проєктування; блок-схема системи показана на рисунку 12. Зазначу, що дві ланки: фотоелектрична панель до блоку живлення та блок живлення до очисного пристрою не показані.

Реалізація системи була здійснена з використанням як апаратного (електричного та механічного), так і програмного забезпечення. Основні блоки на рисунку 2.1 представлені та детально описані з усіма технічними характеристиками для полегшення їх тиражування у пункті 2.2.

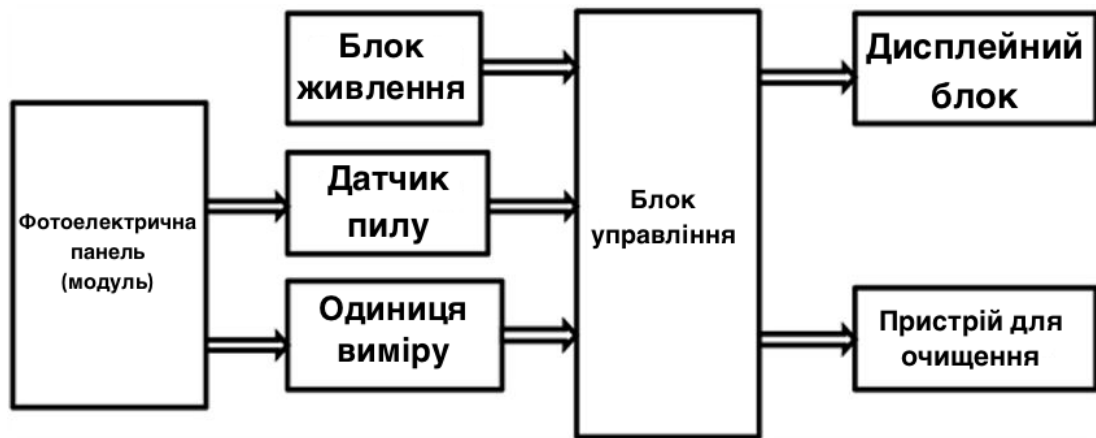


Рисунок 2.1 - Структурна схема системи

2.2 Основні блоки системи

2.2.1 Блок управління

Цей блок контролює та управляє роботою всієї системи. Блок отримує вхідні сигнали від датчиків та вимірювачів пилу, а після обробки надсилає вихідні сигнали на дисплей та блоки очищення системи. Керування здійснюється за допомогою виконання програм у мікроконтролері Arduino. Arduino Nano, який є невеликим і повністю придатним для макетування мікроконтролером, був обраний не тільки через його широке використання в багатьох дослідженнях, але, що більш важливо, тому що він дуже добре підходить як недорогий, легко програмований мікроконтролер. Принципова схема блоку управління показана на рисунку 2.2.

Блок керування містить два кінцеві вимикачі та три кнопки. Кінцеві вимикачі використовуються для виявлення присутності склоочисника на двох

кінцях фотоелектричної панелі, в той час, як кнопки використовуються для виконання налаштувань в системі.

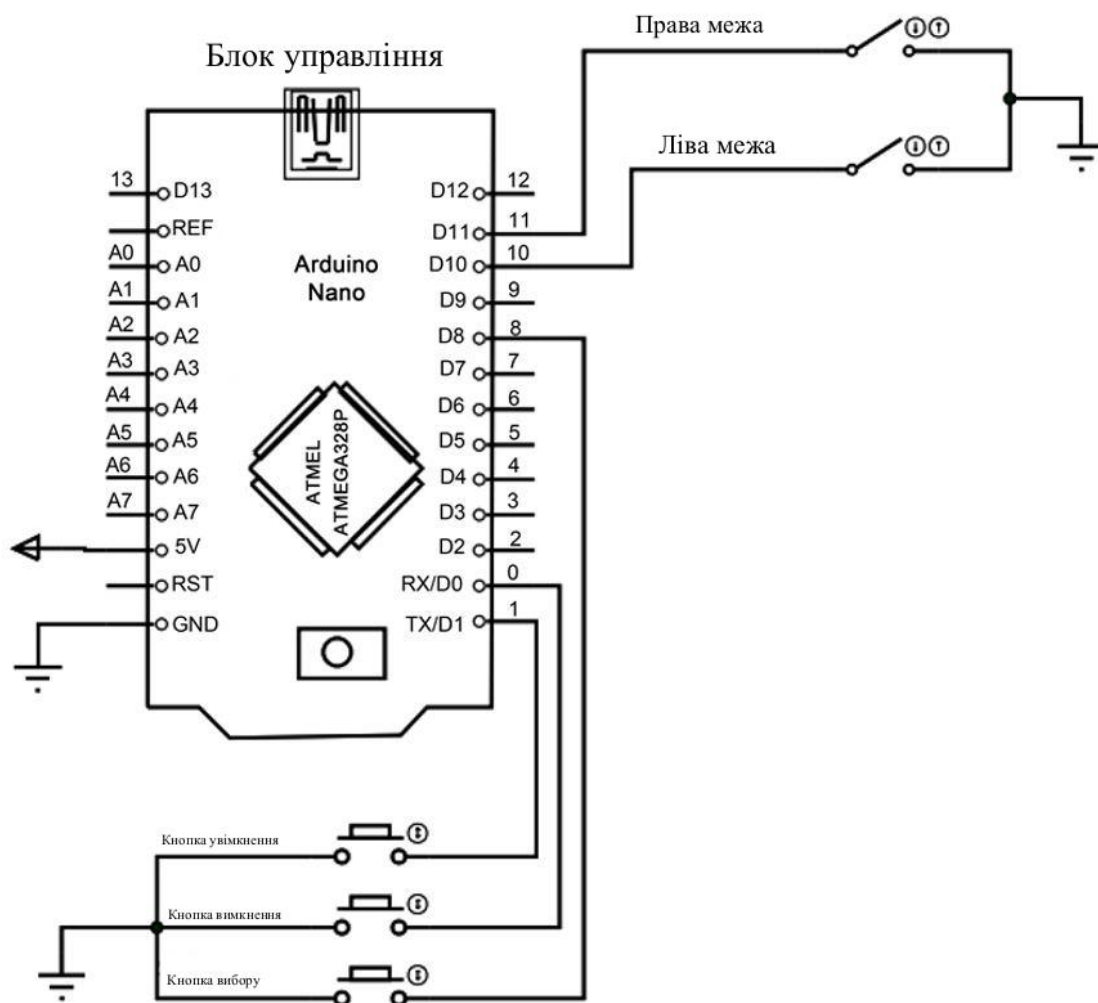


Рисунок 2.2 - Електронна схема блоку управління (з кнопками та кінцевими вимикачами).

2.2.2 Фотоелектричні панелі

Фотоелектричні панелі — це комбінація декількох сонячних елементів, які використовуються для перетворення енергії сонця (сонячного випромінювання) в електричну енергію. Фотоелектрична панель, що використовується в цьому проєкті, належать до полікристалічного типу. Цей вибір був зумовлений не лише міркуваннями вартості та розміру, але й міркуваннями широкої доступності та використання в даній місцевості. Технічні характеристики фотоелектричної панелі представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Технічні характеристики фотоелектричної панелі моделі ZB70202010 20 Вт.

Пікова потужність	20 W
Максимальна напруга живлення	17.5 V
Максимальний струм живлення	1.14 A
Напруга холостого ходу	21 V
Струм короткого замикання	1.28 A
Максимальна робоча напруга системи	1000 V
Стандартна умова випробування	1000 W/m ² , AM = 1.5°C, 25°C
Вага	1.8 kg
Розмір: Довжина × Ширина × Глибина (Д × Ш × Г)	0.54 m × 0.36 m × 0.02 m
Площа поверхні, кв.м	0.19 m ²

2.2.3 Блок живлення

Блок живлення забезпечує електричну енергію, необхідну для роботи всієї системи очищення. Блок складається з самої сонячної панелі, акумулятора, DC-DC перетворювача та контролера заряду.

Сонячна енергія перетворюється на електричну, і ця енергія зберігається в акумуляторі в процесі заряджання. Для цього проєкту було обрано свинцево-кислотну акумуляторну батарею глибокого циклу через її низьку вартість та широке розповсюдження в даній місцевості. Враховуючи, що акумуляторна батарея глибокого циклу розрахована на 12 В, вона не може бути використана для безпосереднього живлення мікроконтролера блоку управління. Для перетворення 12 В (від акумулятора) в 5 В (для використання в мікроконтролері) використовується DC-DC перетворювач. DC-DC перетворювач, який використовується в цьому проєкті, є кращим за традиційні стабілізатори напруги через його відносно високу ефективність.

Останній елемент блоку живлення, контролер заряду, регулює швидкість заряджання та розряджання акумулятора. Для цього проєкту було обрано ШІМ-контролер заряду на противагу MPPT-контролеру заряду через його нижчу вартість та широке застосування в автономних сонячних системах. Електронна схема електростанції представлена на рисунку 2.3.

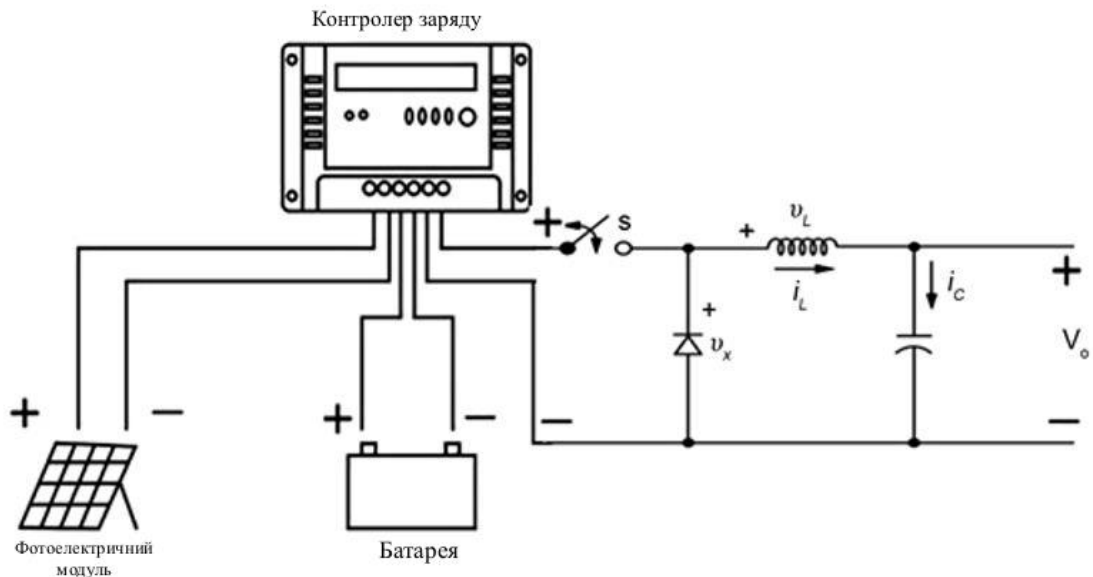


Рисунок 2.3 - Силовий блок

2.3 Вибір датчика пилу та датчика кольору

Датчик пилу відповідає за виявлення наявності пилу на поверхні фотоелектричної панелі. Цей блок вимірює кількість пилу, що накопився на поверхні фотоелектричної панелі, і подає її на вхід блоку керування. У блоці керування, якщо кількість пилу перевищує певне порогове значення, спрацьовує блок очищення для очищення фотоелектричної панелі, коли виконуються інші умови, описані нижче. Для вимірювання кількості пилу в датчику пилу використовується інноваційне використання двох світлозалежних резисторів (LDR): LDR1 для вимірювання параметрів на запиленій фотоелектричній панелі та LDR2 для вимірювання параметрів на чистій фотоелектричній панелі. Конструкція з використанням LDR для виявлення та вимірювання накопиченого пилу на панелі є дешевим та економічно

ефективним варіантом у порівнянні з використанням спеціалізованого обладнання, такого як пиловий фотометр.

Датчики кольору — це фотоелектричні датчики, які генерують світло і виявляють дзеркальне світло, відбите від об'єкта. У роботі [24] за допомогою датчика кольору TCS3200 проводили динамічні вимірювання на антропогенному фоні за допомогою керованої рейкової системи. Датчик встановлювався на заданих в експерименті висотах і рухався вздовж лінії довжиною 150 см з постійною швидкістю вперед. TCS3200 оснащений білими світлодіодами (LED) для освітлення поверхні об'єкта для визначення кольору, а об'єкт відбиває світло на датчик для визначення інтенсивності кольору. Фотодіоди 8×8 в TCS3200 завуальовані червоним, зеленим, синім (RGB) і прозорими оптичними фільтрами для перетворення фотонів в електронні сигнали [38,39]. TCS3200 може визначати колір світла що падає і виводити квадратні хвилі з 50% робочим циклом. Перетворювач струму в частоту перетворює інтенсивність відбитого світла в частоту, яка може бути сполучена з мікроконтролером за допомогою цифрових входних і вихідних контактів. Порівняно з іншими науковими інструментами, цей датчик має досить низьку вартість.

Оптичні властивості сонячних панелей можуть змінюватися через зміну кольору. Зміна кольору може бути постійною через інтенсивний клімат або тимчасовою через забруднення поверхні [40]. Постійна зміна кольору залежить від типу використовуваного інкапсулятора, ультрафіолетового світла, температури модуля, вологості або проникності кисню [41]. Втрати на насичення і відбиття енергії що падає сонячними панелями проявляються в їхньому знебарвленні. Зміна кольору інкапсулянта є найбільш помітною серед режимів деградації [42,43]. Коричневий і жовтий пігмент на панелях з'являється через етиленвінілацетат (EVA), що є результатом неконтрольованої хімічної реакції з матеріалами всередині панелі. Деякі добавки, що використовуються для запобігання знебарвлення панелей і посилення стійкості до ультрафіолету, з

часом можуть зникати, що призводить до того, що модулі на основі EVA стають жовтими або коричневими. Знебарвлення є надзвичайно сильним у гарячих точках або пошкоджених комірках. Зазвичай вона нерівномірна і має розсіяний характер. Хоча інноваційні підходи знижують рівень знебарвлення, вони не усувають його [44].

При вимірюванні накопичення пилу тут робиться припущення, що пил рівномірно і лінійно осідає на фотоелектричній панелі в будь-який час, а отже, також рівномірно і лінійно осідає на двох LDR, які розміщені на панелі. Припущення про лінійне осадження пилу було використано при виведенні математичної формули для визначення оптимальної кількості днів між двома сеансами очищення фотоелектричних панелей [54] і є обґрунтованим для цього дослідження.

Під час роботи LDR виробляє напругу на виході, яка змінюється залежно від інтенсивності світла на LDR: чим більша інтенсивність світла на LDR, тим менший його опір і, отже, більша його вихідна напруга. У цій конструкції LDR1, що піддається накопиченню пилу, служить для відображення стану запиленої фотопанелі; в той час, як LDR2, який періодично очищається від пилу на основі запрограмованого алгоритму блоку управління, служить для відображення стану чистої фотопанелі. Парадигма зондування пилу та порогового виявлення, використана в конструкції системи, ґрунтується на тому, що накопичені частинки пилу розсіюють або відбивають сонячне випромінювання, що надходить, в результаті чого зменшується інтенсивність світла, що досягає фотоелементів на панелі. Таким чином, різниця у вихідній потужності двох LDR вважається обумовленою накопиченням пилом і використовується для порівняння з встановленим порогом пилу. Взаємозв'язок між станом фотоелектричної панелі (запилена чи чиста), накопиченням пилу (високе чи низьке), інтенсивністю світла на фотоелементах (низька чи висока) та вихідною напругою LDR (низька чи висока) показано в таблиці 2.2.

Виявлення накопиченого пилу відбувається шляхом порівняння блоком керування вихідних сигналів LDR1 та LDR2. Кількість накопиченого пилу, при якій слід розглянути можливість запуску очищення, встановлюється за допомогою показника DP - відсотка накопиченого пилу, який розраховується за формулою (3).

$$DP = \left(1 - \frac{VLDR1}{VLDR2}\right) \times 100 \quad (3)$$

де DP - накопичений відсоток пилу, VLDR1 - вихідна напруга LDR1 (запилена фотоелектрична панель), а VLDR2 - вихідна напруга LDR2 (чиста фотоелектрична панель).

Таблиця 2.2 - Зв'язок між накопиченим пилом, інтенсивністю світла та вихідною напругою LDR.

	Фотоелектрична панель		Світлозалежний резистор (LDR)	
	Щільність пилу	Інтенсивність світла	Опір	Вихідна напруга
Брудно	Високий	Низький	Високий	Низький
Чисто	Низький	Високий	Низький	Високий

Напочатку роботи системи фотоелектрична панель не містить пилу (чиста). Це означає, що $VLDR1 = VLDR2$ і частка в рівнянні (3) дорівнює числу 1.

В результаті $DP = 0\%$ (що менше порогового значення, встановленого в системі); це означає, що блок керування не може розглядати можливість запуску процесу очищення.

Коли пил починає накопичуватися, VLDR1 починає зменшуватися, що призводить до відповідного зменшення, починаючи з 1, частки в рівнянні (3). Відповідно, DP починає зростати від 0% до 100% (коли вихід LDR1 дорівнює нулю, тобто $VLDR1 = 0$ через велику кількість накопиченого пилу, який повністю блокує потрапляння сонячного випромінювання на фотоеlementи).

Введення встановленого порогового значення пилу є першим конструктивним міркуванням, яке гарантує, що система не буде чекати, поки накопичиться велика кількість пилу ($DP = 100\%$), перш ніж розглядати питання про запуск очищення; так само система не буде розглядати питання про очищення, коли на фотоелектричній панелі немає пилу або кількість пилу на панелі низька. Другим залежним фактором при проєктуванні є те, що вихідна потужність фотоелектричної панелі повинна бути вище певного порогового значення. Як тільки пороговий критерій відсоткового вмісту пилу буде виконано, система почне очищення тільки тоді, коли цей другий критерій буде виконано разом з третім критерієм. Введення порогового значення потужності, нижче якого очищення не може бути запущено, навіть якщо відсоток пилу перевищує встановлений поріг, є конструктивним рішенням, щоб гарантувати, що очищення фотоелектричної панелі не може бути ініційоване вночі, коли вихід фотоелектричної панелі дорівнює нулю. Третє конструктивне рішення полягає в тому, щоб переконатися, що коли накопичений пил перевищує встановлений поріг, це значення повинно залишатися постійним протягом певного часу. Це дозволяє уникнути помилкового спрацьовування очищення, коли низька інтенсивність світла на фотоелектричній панелі може бути результатом чогось іншого, а не накопичення пилу, який може тимчасово затінювати фотоеlementи. На основі практичних експериментів і випробувань в ході реалізації прототипу системи, порогове значення було встановлено на рівні $DP = 60\%$ для даної місцевості. Для двох однакових LDR, що використовуються в проєкт, це відбувається, коли пил накопичується до такого рівня, що продуктивність LDR 1 знижується до 40% від продуктивності LDR 2. Підсумовуючи, можна сказати, що процес очищення ефективно починається тоді, коли виконуються всі три міркування (умови). З'єднання датчика пилу з блоком керування показано на рисунку 2.4.

2.3 Вимірювальний блок

Вимірювальний блок відповідає за вимірювання напруги, струму та потужності, що генерується фотоелектричною панеллю. Складне обладнання, таке як лічильники сонячної енергії та аналізатори сонячної енергії, слугують вимірювальними одиницями в системах очищення фотоелектричних панелей.[38-40]

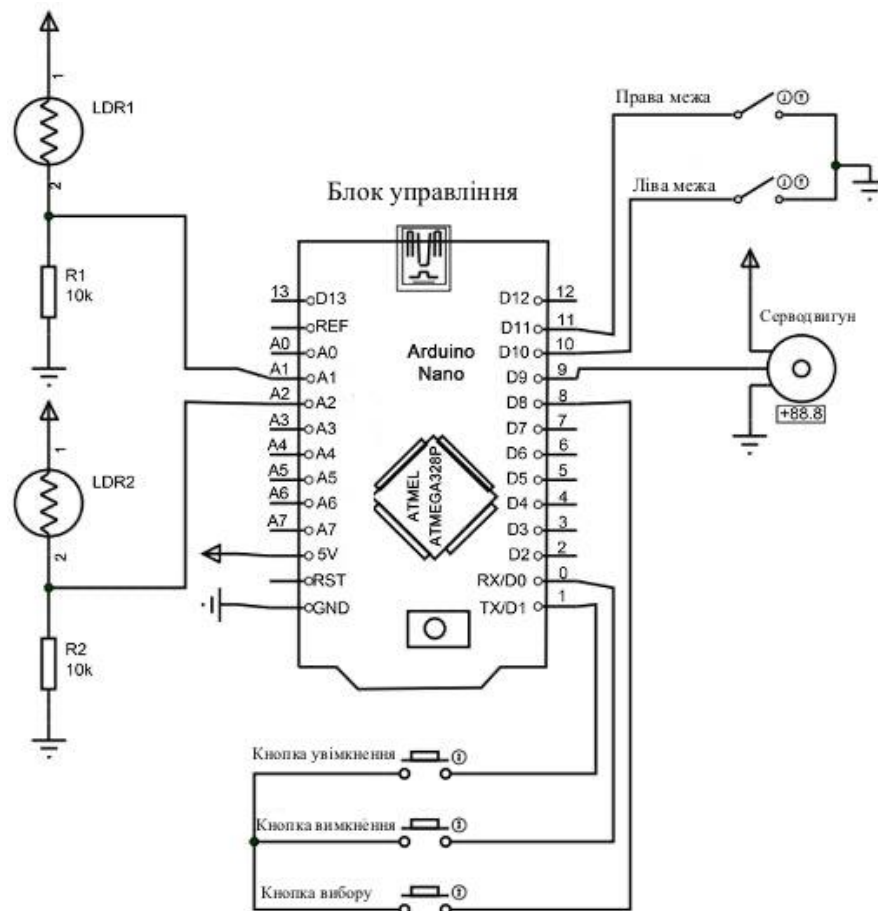


Рисунок 2.4 - Підключення датчика пилу до блоку управління.

Для того, щоб забезпечити низьку вартість системи, були використані дешеві датчики струму і напруги; відповідно, для вимірювання струму (I) і напруги (V) фотоелектричної панелі. Виміряні значення подаються на блок управління, який потім розраховує відповідну потужність (P) фотоелектричного модуля за рівнянням (4):

$$P = IV \quad (4)$$

2.4 Дисплейний блок

Для відображення інформації про стан різних параметрів автоматизованої системи очищення використовується рідкокристалічний дисплей 16×2 . На ньому відображаються вихідні напруги ДБЖ, а також струм, напруга та потужність фотоелектричної панелі, виміряні вимірювальним блоком. Він також відображає інформацію про стан фотоелектричної панелі (чиста, якщо поріг накопичення пилу не досягнуто, або брудна, у протилежній ситуації).

2.5 Блок очищення

Цей блок відповідає за очищення поверхні фотоелектричної панелі від пилу. Фактичний початок процесу очищення відбувається тоді, коли виконуються всі три міркування (умови), описані вище. Виконання цих умов необхідне для того, щоб уникнути непотрібного частого очищення, яке є шкідливим для здоров'я фотоелектричної системи, як зазначено в огляді літератури. Було розглянуто кілька методів очищення, і використання води та склоочисника було обрано як найбільш прийнятне для цього проєкту з погляду вартості. Очисний пристрій складається з двигуна постійного струму, ведучого гвинта, склоочисника, рами склоочисника, водяного помпи (насоса) та струменя помпи. Етапи та процедури специфікації та вибору цих компонентів, а також їх опис і технічні параметри представлені в наступних розділах. [41-45]

2.5.1 Водяна помпа і водяний струмінь

Водяна помпа всмоктує воду з контейнера для зберігання і подає її на поверхню фотоелектричної панелі за допомогою водяного струменя. Вибір

водяної помпи ґрунтувався на кількох основних параметрах: витраті, тиску, напорі, потужності та ефективності [55]. З таблиці 2 видно, що площа поверхні фотоелектричної панелі $S_{pv} = 0.54 \times 0.36 \text{ m}^2 = 0.1944 \text{ m}^2 = \sim 0.20 \text{ m}^2$. Для очищення цієї відносно невеликої площі необхідно уникати втрат води. Тому приймається постійна низька витрата води ($\dot{Q}$), як зазначено в рівнянні (5).

$$\dot{Q} = 0.25 \text{ L/min} = 0.000004 \text{ m}^3/\text{s} = 4.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (5)$$

Крім того, припускаючи, що тиск води (P) становить 0,5 бара = $0,5 \times 10^5$ Па, потужність P_{wp} , необхідна для перекачування води, розраховується за формулою (6):

$$P_{wp} = \dot{Q} \times P \quad (6)$$

Чисельно $P_{wp} = 4.0 \times 10^{-6} \times 0.5 \times 10^5 = 0.2$ Вт. З такою низькою потужністю слід вибрати занурювальний водяна помпа постійного струму. Відомо, що занурювальні водяні помпи мають високий ККД, який коливається від 76% до 84% [56]. Отже, припускаючи, що ККД занурювального водяної помпи η_{wp} дорівнює 80%, потужність двигуна, необхідна для водяної помпи (P_{mp}), визначається з рівняння (7):

$$P_{mp} = \frac{P_{wp}}{\eta_{wp}} \quad (7)$$

Чисельно, $P_{mp} = \frac{P_{wp}}{\eta_{wp}} = \frac{0.2}{0.8} = 0.25$ Вт.

Струмінь води рухається через пластикову трубку. Залежність між швидкістю води (v) і розміром пластикової трубки, яка використовується для створення струменя води, зображена у рівнянні (8).

$$\dot{Q} = Av, \quad (8)$$

де $(\dot{Q})$ витрата $[\text{м}^3/\text{с}]$, A - площа поперечного перерізу труби $[\text{м}^2]$ і v - швидкість руху води по трубі $[\text{м}/\text{с}]$.

Підставляючи площу $A = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$, де d $[\text{м}]$ - діаметр трубки в рівнянні (8), і трансформуючи, отримуємо вираз для швидкості витікання води зі струменя води у вигляді рівняння (9):

$$v = \frac{4\dot{Q}}{\pi d^2} \quad (9)$$

На основі наведених вище розрахунків була обрана мікрозанурювальна водяна помпа постійного струму з акумуляторним живленням, технічні характеристики якого наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики водяної помпи постійного струму: модель див. у датчику.

Вхідний постійний струм	5 V
Поточний	1.8 A
Сила	0.36 W
Витрата	2 - 3 L/Min
Розмір	43.4 × 24.4 mm
Матеріал	Пластик
Шум	40 db max

2.5.2 Склоочисник і привідні гвинтові системи

Система склоочисника складається зі склоочисника (рис. 2.5) [42] та металевої рами, призначеної для утримання склоочисника на фотоелектричній панелі. Система склоочисників вагою 0,54 кг прикріплена до ведучого гвинта, і стає масою M $[\text{кг}]$ системи приводу ведучого гвинта. Це загальна маса, що

переміщується двигуном постійного струму по поверхні фотоелектричної панелі під час процесу очищення.

Обраний гвинт, схема якого показана на рисунку 2.6, має основний діаметр $d = 10$ мм і характеризується рівнянням (10) [47].



Рисунок 2.5 - Склоочисник

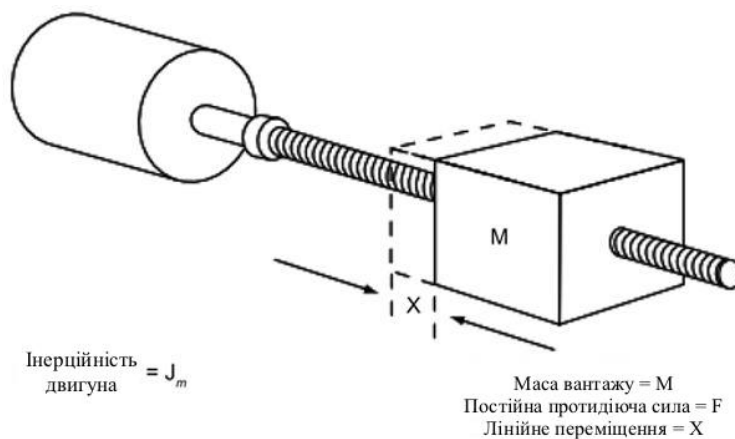


Рисунок 2.6 - Привідний гвинт

На рисунку 2.6 M - система склоочисників.

$$\omega = \left(\frac{2\pi}{L} \right) v \quad (10)$$

де ω - кутова швидкість гвинта [рад/с]; v - лінійна швидкість маси [м/с²]; і L - виліт, тобто довжина, на яку гвинт просувається за один оберт.

L залежить від інших параметрів ходового гвинта. Метричні характеристики ISO для ходового гвинта Асте з великим кроком, обраного для цього проєкту, представлені в таблиці 2.4 [59].

Таблиця 2.4 Технічні характеристики гвинтів Асте з великим кроком.

Основний діаметр, d	10.00 мм
Малий діаметр, d_r	8.16 мм
Середній діаметр, $d_m = (d + d_r)/2$	9,08 мм
Крок діаметра, $d_p = d_m$	9,08 мм
Крок, p	1,5 мм
Виліт, $L = L_m = 2\pi r_m$	28.29 мм
Площа меншого діаметра, A_r	52.3 мм ²
*Коефіцієнт тертя, f	0.10 - 0.15

*Примітка: низьке значення ($f = 0,10$) для дуже ефективної системи та високе значення ($f = 0,15$) для найгіршого випадку.

2.5.3 Вибір двигуна постійного струму

Вибір двигуна постійного струму може ґрунтуватися на піковому крутному моменті, кривих швидкість/крутний момент або характеристиках обмотки залежно від наявної інформації виробника [60], але для неважкого проєкту, такого як представлений у цьому дослідженні, швидкість, піковий крутний момент і напруга є мінімальними характеристиками, які необхідно знати, щоб вибрати відповідний двигун постійного струму. Напруга постійного струму визначається наявним джерелом електроенергії, яким у цьому проєкті є 12-вольтова батарея (блок живлення). Тому для вибору двигуна постійного струму необхідно визначити лише крутний момент і швидкість.

Фотоелектрична панель, що використовується в системі, нахилена під кутом $\alpha = 6^\circ$. Для переміщення системи склоочисників в процесі очищення двигун постійного струму повинен подолати силу тертя (F_f) і силу, зумовлену вагою системи склоочисників (F_x). Ці сили визначаються рівняннями (11) і (12).

$$F_f = \mu Mg \cos(\alpha) \quad (11)$$

$$F_x = Mg \sin(\alpha), \quad (12)$$

де $M = 0,54$ кг - маса склоочисника, $g = 9.81$ м/с² - прискорення під дією сили тяжіння, μ - коефіцієнт тертя між склоочисником і поверхнею фотоелектричної панелі, α - кут нахилу фотоелектричної панелі. Склоочисник виготовлений з губкоподібного матеріалу; з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,3$ між склоочисником і поверхнею фотоелектричної панелі, але оскільки конструкція рами чинить певну вагу на склоочисник, коефіцієнт тертя вважається вищим, $\mu = 0,4$. Враховуючи кут нахилу $\alpha = 6^\circ$ і використовуючи наведені вище рівняння, чисельно $F_f = 0.4 \times 0.54 \times 9.81 \times 0.99 = 2.1$ Н; і $F_x = 0.54 \times 9.81 \times 0.1 = 0.53$ Н. Сила, яку двигун постійного струму повинен прикладати в найгіршому випадку, виникає, коли система склоочисників рухається вгору по нахиленій фотоелектричній панелі. Ця сила (F) більша або дорівнює двом силам, що діють на систему склоочисників, як показано в рівнянні (13).

$$F \geq F_f + F_x \quad (13)$$

Чисельно $F \geq 2,1 + 0,53$ Н $\geq 2,63$ Н $= 2,7$ Н, що приводить до рівняння (14):

$$F = 2.7 \text{ Н} \quad (14)$$

Враховуючи параметри ведучого гвинта в таблиці 5, крутний момент, необхідний для переміщення вантажу, що притискає систему витирання, $F = 2,7$ Н (з рівняння (14)), отримуємо за допомогою рівняння (15) [59]:

$$T = \frac{Fd_p}{2} \left(\frac{L_m + \pi f d_p}{\pi d_p - f L_m} \right), \quad (15)$$

де $F = 2.7 \text{ N}$ та інші параметри, як визначено в Таблиці 5.

$$\begin{aligned} \text{Чисельно, } T &= \frac{2.7 \times 9.01}{2} \left(\frac{28.29 + 3.14 \times 0.15 \times 9.01}{3.14 \times 9.01 - 0.15 \times 9.01} \right) \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \\ T &= 12.16 \left(\frac{28.29 + 4.24}{28.29 - 4.24} \right) \times 10^{-3} = 12.16 \left(\frac{32.53}{24.05} \right) \times 10^{-3} \\ &= 12.16 \times 1.35 \times 10^{-3} = 16.44 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} = 0.01644 \text{ N} \cdot \text{m} \\ T &= 0.01644 \text{ N} = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m} (204 \text{ g} \cdot \text{cm}) \end{aligned} \quad (16)$$

Рекомендується вибирати двигун постійного струму з додатковим 15% запасом по піковому крутному моменту для забезпечення запасу міцності [60]. Такий запас міцності забезпечує необхідну потужність для переміщення системи склоочисників по фотоелектричній панелі із заданою швидкістю. На основі врахування безпечного запасу крутний момент для вибору двигуна постійного струму, T_{dc} , отримують за допомогою рівняння (17):

$$T_{dc} = 1.15T = 1.15 \times 0.02 = 0.023 \text{ N} \cdot \text{m} (235 \text{ g} \cdot \text{cm}) \quad (17)$$

Механічна вихідна потужність двигуна — це добуток крутного моменту на валу на швидкість його обертання, і визначається за формулою (18):

$$P_{mech} = T_{dc} \times \omega \quad (18)$$

де T_{dc} - крутний момент на валу, а ω - швидкість обертання валу в радіанах за секунду, що визначається залежністю $\omega = \left(\frac{2\pi}{L} \right) v$ (рівняння (10)). При $L = L_m = 28,51 \text{ мм}$ рівняння (10) можна переписати як:

$$\omega = \left(\frac{2\pi}{L_m} \right) v = \left(\frac{2\pi}{0.02851} \right) v \text{ rad/s} = 220.39v \text{ rad/s} \quad (19)$$

Для того, щоб визначити ω , зазначимо, що система склоочисників може пройти відстань $x=0,54 \text{ м}$ (довжина використовуваної фотоелектричної панелі) з різними швидкостями, v , залежно від необхідного часу (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5 - Лінійна та обертальна швидкості для системи склоочисників та двигуна постійного струму з відповідною механічною потужністю ($x = 0,54$ м, $T_{dc} = 0,023$ Нм).

Час, t [с]	Швидкість, v = x/t [м/с]	$\omega = 220.39v$ [рад/с]	$N = \omega(60/2\pi)$ [об/хв]	$P_{mech} = T_{dc} \times \omega$ [w]
0.1	5.40	1190	11,370	27.37
0.15	3.60	793	7577	18.24
0.2	2.70	595	5685	13.69
0.25	2.16	476	4548	10.95
0.3	1.80	397	3793	9.13
0.35	1.54	340	3249	7.82
0.4	1.35	298	2848	6.85
0.45	1.20	265	2532	6.10
0.5	1.08	238	2274	5.47
0.55	0.98	217	2074	4.99
0.6	0.90	199	1902	4.58
0.65	0.83	183	1749	4.21
0.7	0.77	170	1625	3.91
0.75	0.72	159	1520	3.66
0.8	0.68	149	1424	3.43
0.85	0.64	140	1338	3.22
0.9	0.60	133	1271	3.06
0.95	0.57	126	1204	2.90
1	0.54	119	1137	2.74
1.5	0.36	80	765	1.84

Для вибору двигуна постійного струму припустимо, що час очищення становить 1 секунду, а швидкість $v = (0,54/1)$ м/с = 0,54 м/с. З таблиці 6

вибираємо двигун постійного струму з необхідною потужністю $P_{mech} = 2,74$ Вт. Також рекомендується, щоб номінальна потужність двигуна була щонайменше вдвічі більшою за необхідну (розрахункову), щоб забезпечити достатню потужність для роботи без перевантаження двигуна, як це визначено рівнянням (20) [61]:

$$P_{dc} = 2P_{mech} = 2 \times 2.74 = 5.48 \text{ watts} \quad (20)$$

Для $P_{dc} = 5,48$ Вт, $T_{dc} = 0,023$ Нм = 235 гсм і $\omega = 119$ рад/с ($N = 1137$ об/хв). Технічні характеристики обраного двигуна постійного струму наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6. Технічні характеристики двигуна постійного струму: SGMADA RS-775-12-2500.

Номінальна напруга	12 V
Струм без навантаження	≤ 200 мА
Швидкість без навантаження	2500 об/хв
Крутний момент при максимальній ефективності	300 гсм (0,03 Нм)
Швидкість при максимальній ефективності	1850 об/хв
Потужність при максимальній ефективності	5.6 Вт
Струм при максимальній ефективності	$\leq 0,9$ мА
Крутний момент зупинки	1200 гсм (0,12 Нм)
Струм зупинки	3,3 мА

2.6 Проєктування та моделювання повної схеми системи

Проєктування та моделювання принципової електричної схеми для всієї системи, створення схемотехніки системи виконано за допомогою Proteus версії 8.0 [62]. Принципова схема з усіма компонентами системи очищення фотоелектричних панелей представлена на рисунку 2.7.

3D-проєкт системи очищення фотоелектричних панелей від пилу, створений за допомогою програмного забезпечення Solid Works, показаний на рисунку 2.8.

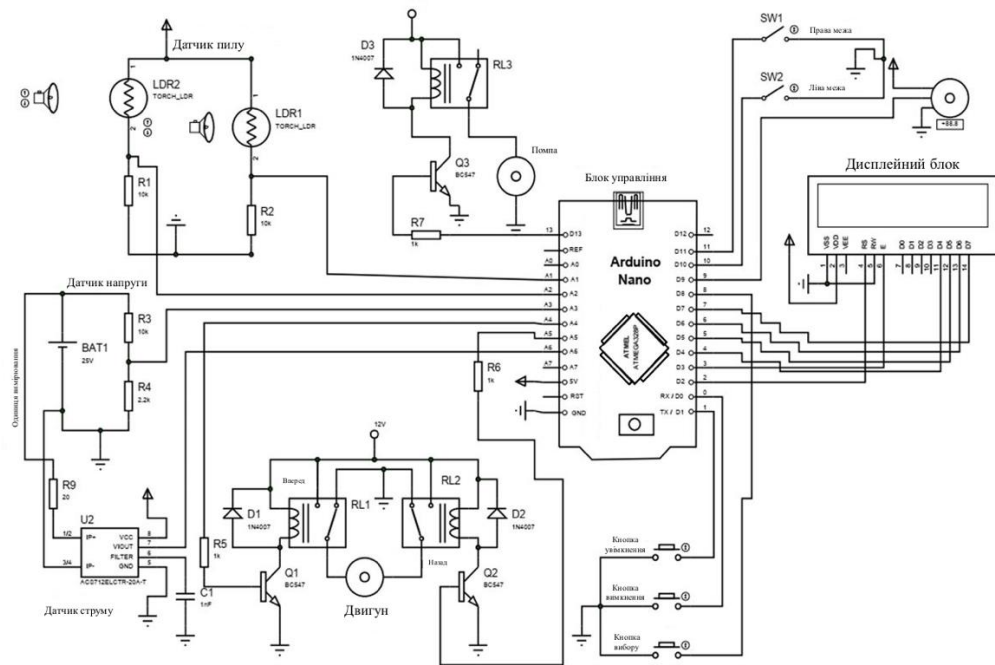


Рисунок 2.7 - Принципова схема повної системи очищення фотоелектричних панелей від пилу.

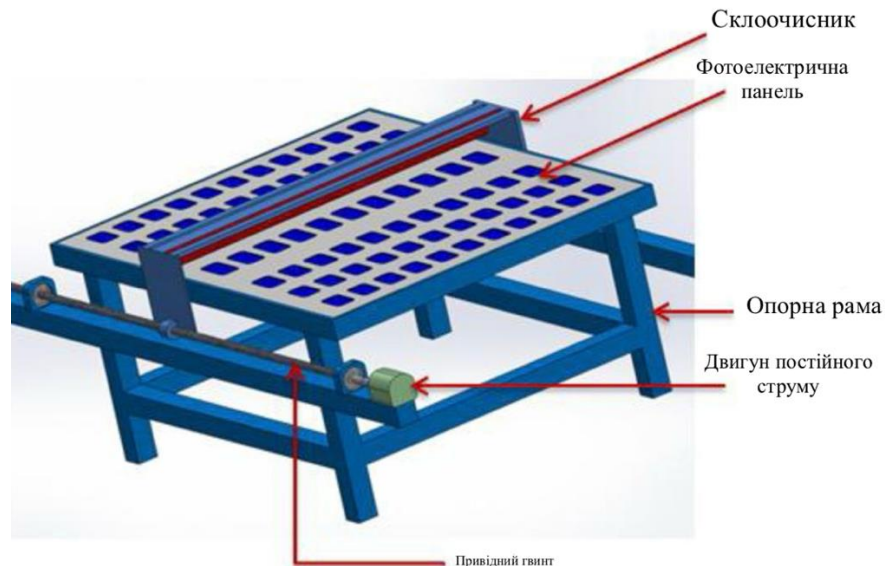


Рисунок 2.8 - 3D-проект системи очищення фотоелектричних панелей від пилу в Solid Works.

2.7 Розробка алгоритму роботи системи та її тестування

Після ввімкнення системи блок керування бере на себе управління роботою системи, починаючи з ініціалізації та встановлення необхідних порогових значень для заданих параметрів. Дані про рівень накопичення пилу на поверхні сонячної панелі та кількість енергії, виробленої фотоелектричною панеллю, отримуються з блоку датчика пилу та вимірювального блоку. На основі даних, отриманих від двох LDR, блок керування обчислює відсоток пилу (DP), що осідає на фотоелектричній панелі, вихідну потужність і стабільність значення відсотка пилу. Якщо всі три критерії виконуються, запускається водяний насос і вода подається на поверхню сонячної панелі. Згодом запускається двигун постійного струму і переміщує систему склоочисників по поверхні фотоелектричної панелі в прямому напрямку до тих пір, поки система склоочисників не активує кінцевий вимикач на кінці фотоелектричної панелі, в цей момент водяний насос і двигун постійного струму зупиняються. Після короткої паузи водяний насос і двигун постійного струму запускаються знову,

однак двигун постійного струму працює в реверсному режимі, і та ж сама послідовність, описана вище, повторюється. Коли система склоочисників активує кінцевий вимикач на початковому кінці фотоелектричної панелі, водяний насос і двигун постійного струму зупиняються. Узагальнена схема роботи автоматизованої системи очищення фотоелектричних панелей від пилу представлена на блок-схемі, зображеній на рисунку 2.9.

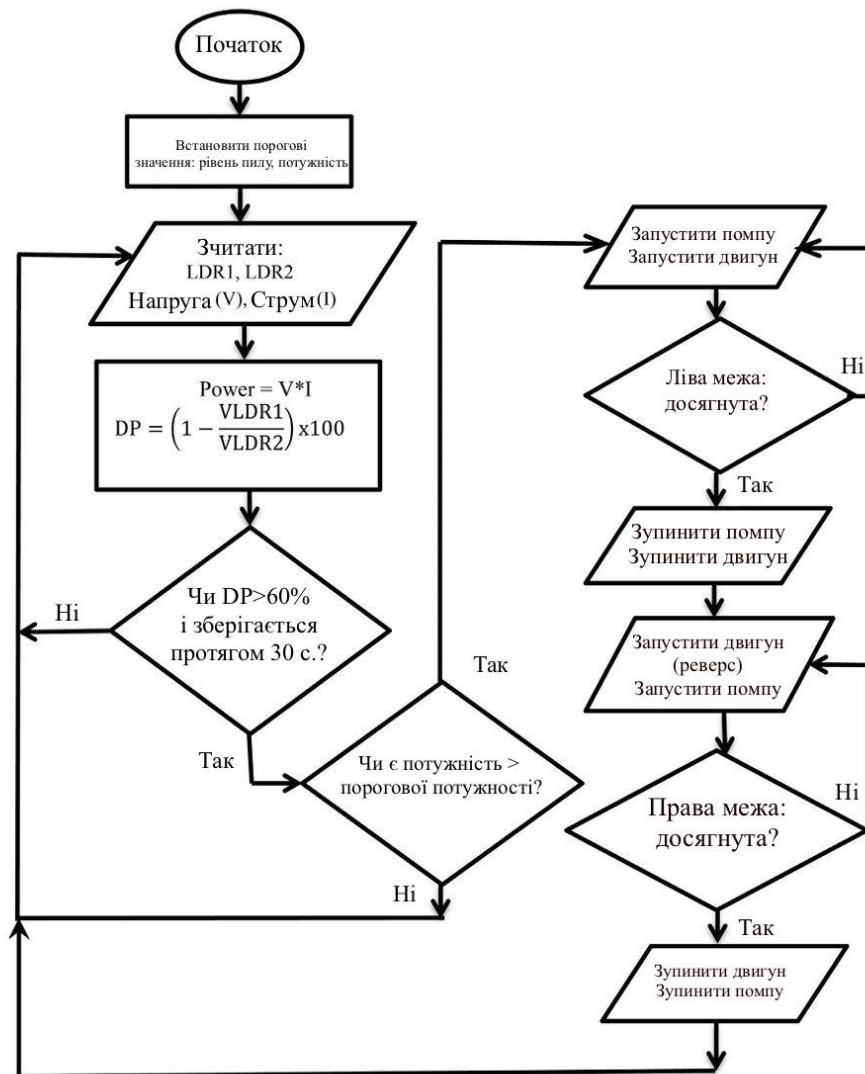


Рисунок 2.9 - Блок-схема роботи системи

Для того, щоб протестувати та оцінити продуктивність системи, були проведені вимірювання струму та напруги, коли фотоелектрична панель була запиленою та коли вона була чистою. Результати вимірювань і розрахована

вихідна потужність наведені в таблиці 2.7, а відповідні вольт-амперні характеристики показані на рисунку 2.10.

Таблиця 2.7 - Вимірювання струму та напруги фотомодуля.

Запилена фотоелектрична панель			Чиста фотоелектрична панель		
Напруга (В)	Струм (А)	Потужність (Вт)	Напруга (В)	Струм (А)	Потужність (Вт)
0.00	0.59	0.00	0.00	0.79	0.00
4.00	0.56	2.24	5.00	0.76	3.80
10.50	0.50	5.25	8.90	0.74	6.59
11.55	0.48	5.54	12.00	0.70	8.40
12.50	0.46	5.75	12.58	0.69	8.68
12.80	0.44	5.63	12.60	0.68	8.57
12.90	0.43	5.55	13.40	0.64	8.58
13.16	0.40	5.26	13.55	0.62	8.40
13.20	0.39	5.15	13.82	0.60	8.29
13.30	0.38	5.05	14.00	0.58	8.12
13.50	0.36	4.86	14.20	0.56	7.95
13.60	0.35	4.76	14.50	0.52	7.54
13.70	0.32	4.38	14.60	0.48	7.01
13.80	0.30	4.14	14.70	0.46	6.76
14.00	0.20	2.80	14.80	0.44	6.51
14.10	0.10	1.41	15.20	0.25	3.80
14.20	0.00	0.00	15.40	0.00	0.00

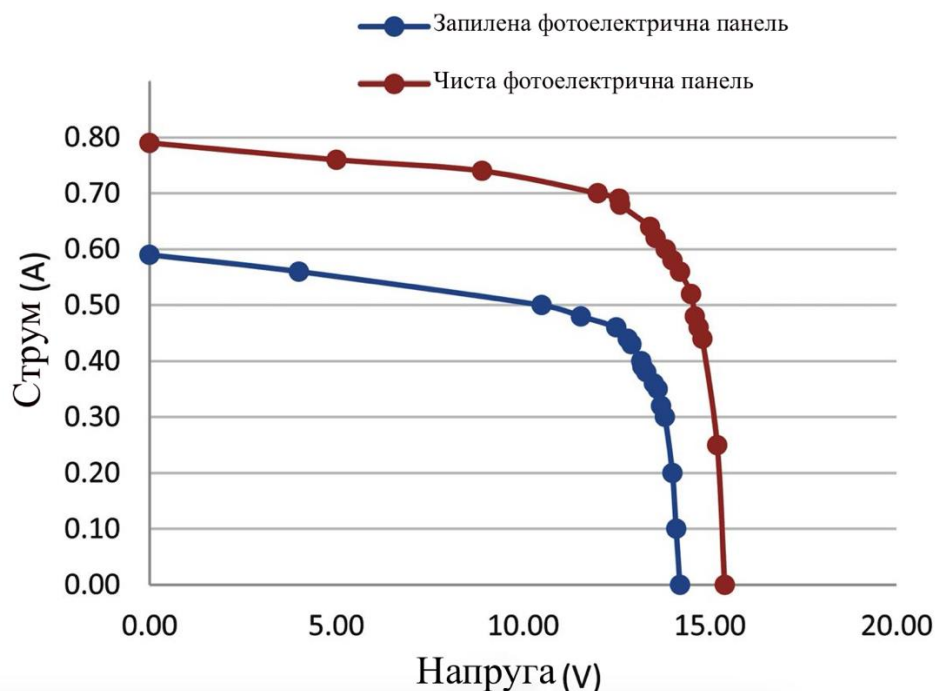


Рисунок 2.10 - Характеристики запиленої та чистої фотоелектричної панелі.

З результатів видно, що більшу потужність можна отримати від фотоелектричної панелі, коли вона чиста, порівняно з запиленою. Фотоелектричні панелі зазвичай чисті (без пилу), коли їх купують і встановлюють, і підтримання їх у чистоті забезпечує максимальну потужність.

Як і інші дослідження, наведені вище результати вказують на те, що продуктивність фотоелектричних панелей погіршується під впливом накопичення пилу. Щоб кількісно оцінити негативний вплив накопичення пилу, ми порівняли продуктивність фотоелектричної панелі, що працює в точці максимальної потужності (MPP), коли вона чиста і коли вона запилена.

З таблиці 2.7 та рівняння (4) видно, що вихідна потужність запиленої панелі в точці максимальної потужності становить $P_{mppD} = 5,75$ Вт, тоді як вихідна потужність чистої системи в точці максимальної потужності $P_{mppC} = 8,68$ Вт. Відносний відсоток збільшення продуктивності в результаті використання системи для очищення пилу на фотоелектричній панелі, $P_{dustclean}$, розраховується за допомогою рівняння (21):

$$P_{\text{dustclean}} = \frac{P_{\text{mppC}} - P_{\text{mppD}}}{P_{\text{mppC}}} \times 100\%$$

$$P_{\text{dustclean}} = \frac{8.68 - 5.75}{8.68} \times 100 = \frac{2.93}{8.68} \times 100 = 33.76\%. \quad (21)$$

З наведених вище результатів і розрахунків видно, що очищення пилу з фотоелектричних панелей позитивно впливає на продуктивність фотоелектричних панелей, що відображається у збільшенні вихідної потужності. У точці максимальної потужності відносне відсоткове покращення продуктивності становить 33,76%. Це можна інтерпретувати як відсоткове збільшення ефективності роботи в результаті очищення пилу з фотоелектричних панелей в цьому дослідженні.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Програмування системи

Програмування автоматизованої системи очищення виконувалось за допомогою інтегрованого середовища розробки Arduino (IDE Arduino IDE 1.8.18), що пропонується компанією Arduino.cc, для написання, компіляції та завантаження кодів (скетчів) на плати Arduino [47].

3.2 Підключення елементів

У проєкті використовується мова програмування C++. Всі компоненти підключені до пінів Arduino Nano відповідно до принципової схеми, що забезпечує правильне зчитування даних та керування системою. Наступною буде описана робоча програма. Головне вікно програми відображається після підключення необхідних бібліотек і оголошення змінних, які використовуються мікроконтролерним пристроєм:

Ініціалізація бібліотек та компонентів:

Необхідно підключити бібліотеки: EEPROM для збереження налаштувань та LiquidCrystal для роботи з LCD дисплеєм. Оголосити піни для підключення LDR, датчиків напруги та струму, реле, кінцевих вимикачів та індикатора стану.

```
#include <EEPROM.h> // Для збереження та зчитування порогових значень
```

```
#include <LiquidCrystal.h> // Для роботи з LCD дисплеєм
```

// Ініціалізація LCD дисплея (підключення до пінів Arduino Nano)

const int rs = 10, en = 11, d4 = 12, d5 = 13, d6 = A4, d7 = A5;

LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

// Піни для датчиків та інших компонентів

const int LDR1 = A1;

const int LDR2 = A0;

const int voltageSensor = A2;

const int currentSensor = A3;

const int pumpRelay = 7;

const int motorForwardRelay = 5;

const int motorBackwardRelay = 6;

const int upButton = 2;

const int downButton = 3;

const int selectButton = 4;

const int rightLimitSwitch = 8;

const int leftLimitSwitch = 9;

const int statusLED = 13; **// Індикатор стану системи**

// Порогові значення

float dustThreshold;

float powerThreshold;

// Адреси EEPROM для збереження порогових значень

const int dustThresholdAddress = 0;

const int powerThresholdAddress = sizeof(float);

Налаштовуємо всі необхідні піни як вхідні або вихідні:

```
void setupPins() {  
  
    pinMode(LDR1, INPUT); // Вхідний пін для LDR1  
  
    pinMode(LDR2, INPUT); // Вхідний пін для LDR2  
  
    pinMode(voltageSensor, INPUT); // Вхідний пін для датчика напруги  
  
    pinMode(currentSensor, INPUT); // Вхідний пін для датчика струму  
  
    pinMode(pumpRelay, OUTPUT); // Вихідний пін для реле водяної помпи  
  
    pinMode(motorForwardRelay, OUTPUT); // Вихідний пін для реле руху  
двигуна вперед  
  
    pinMode(motorBackwardRelay, OUTPUT); // Вихідний пін для реле руху  
двигуна назад  
  
    pinMode(upButton, INPUT_PULLUP); // Вхідний пін для кнопки збільшення  
порогу  
  
    pinMode(downButton, INPUT_PULLUP); // Вхідний пін для кнопки зменшення  
порогу  
  
    pinMode(selectButton, INPUT_PULLUP); // Вхідний пін для кнопки вибору  
  
    pinMode(rightLimitSwitch, INPUT_PULLUP); // Вхідний пін для правого  
кінцевого вимикача  
  
    pinMode(leftLimitSwitch, INPUT_PULLUP); // Вхідний пін для лівого кінцевого  
вимикача  
  
    pinMode(statusLED, OUTPUT); // Вихідний пін для індикатора стану  
  
}
```

Зчитуємо значення з датчиків освітленості, напруги та струму:

```
void readSensors(float &V1, float &V2, float &voltage, float &current) {  
  
    V1 = analogRead(LDR1); // Зчитування значення з LDR1  
  
    V2 = analogRead(LDR2); // Зчитування значення з LDR2
```

```

    voltage = analogRead(voltageSensor) * (25.0 / 1023.0); // Перетворення
аналогового значення в напругу

    current = analogRead(currentSensor) * (5.0 / 1023.0); // Перетворення
аналогового значення в струм

}

```

Призначаємо функції для обчислення відсотка пилу та потужності на основі зчитаних значень:

```

float calculateDustPercentage(float V1, float V2) {

    return ((V2 - V1) / V2) * 100.0; // Обчислення відсотка пилу

}

```

```

float calculatePower(float voltage, float current) {

    return voltage * current; // Обчислення потужності

}

```

Відображаємо зчитані та обчислені дані на LCD дисплеї:

```

void displayData(float voltage, float current, float power, float DP) {

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("V: ");

    lcd.print(voltage, 1);

    lcd.print("V I: ");

    lcd.print(current, 1);

    lcd.print("A");

    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print("P: ");

```

```

lcd.print(power, 1);

lcd.print("W DP: ");

lcd.print(DP, 1);

lcd.print("%");

}

```

Функція для запуску процесу очищення, яка включає водяну помпу та управляє рухом склоочисників:

```

void startCleaning() {

    digitalWrite(pumpRelay, HIGH); // Включення водяної помпи

    delay(180000); // Час роботи помпи 180000 мс (3 хвилини)

    digitalWrite(pumpRelay, LOW); // Вимкнення водяної помпи


    digitalWrite(motorForwardRelay, HIGH); // Запуск двигуна вперед

    while (digitalRead(rightLimitSwitch) == HIGH) {

        // Очікування до досягнення кінцевого вимикача праворуч

    }

    digitalWrite(motorForwardRelay, LOW); // Зупинка двигуна

    delay(500); // Час паузи


    digitalWrite(motorBackwardRelay, HIGH); // Запуск двигуна назад

    while (digitalRead(leftLimitSwitch) == HIGH) {

        // Очікування до досягнення кінцевого вимикача ліворуч

    }

    digitalWrite(motorBackwardRelay, LOW); // Зупинка двигуна

}

```

Наша штовуємо функцію "setup" для ініціалізації пінів, LCD дисплея, зчитування порогових значень з EEPROM та калібрування LDR:

```
void setup() {  
  
    setupPins(); // Налаштування пінів  
  
    lcd.begin(16, 2); // Ініціалізація LCD дисплея  
  
    lcd.print("Solar Cleaner");  
  
    delay(2000);  
  
    lcd.clear();  
  
    // Зчитування порогових значень з EEPROM  
  
    EEPROM.get(dustThresholdAddress, dustThreshold);  
  
    EEPROM.get(powerThresholdAddress, powerThreshold);  
  
    // Встановлення значень за замовчуванням, якщо EEPROM не  
    ініціалізований  
  
    if (isnan(dustThreshold)) dustThreshold = 60.0;  
  
    if (isnan(powerThreshold)) powerThreshold = 5.0;  
  
    calibrateLDR(); // Калібрування LDR  
}
```

Основний цикл loop:

Зчитування даних з датчиків, обчислення параметрів, відображення даних на LCD та перевірка умов для запуску очищення. Якщо умови виконуються, викликається функція startCleaning.

```

void loop() {

    float V1, V2, voltage, current;

    readSensors(V1, V2, voltage, current); // Зчитування значень з датчиків


    float power = calculatePower(voltage, current); // Обчислення потужності

    float DP = calculateDustPercentage(V1, V2); // Обчислення відсотка пилу


    displayData(voltage, current, power, DP); // Відображення даних на LCD


    // Перевірка умов для запуску очищення

    if (DP >= dustThreshold && power >= powerThreshold) {

        startCleaning();

    }


    delay(300000); // Затримка між вимірюваннями 300000 мс (5 хвилин)

}

```

Налаштування порогових значень:

Функція для налаштування порогових значень пилу та потужності за допомогою кнопок та зберігає їх у EEPROM.

```

// Функції для налаштування порогових значень

void adjustThresholds() {

    bool adjusting = true;

    while (adjusting) {

        lcd.clear();

        lcd.print("Dust: ");

```

```

lcd.print(dustThreshold);

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("Power: ");

lcd.print(powerThreshold);


if (digitalRead(upButton) == LOW) {

    dustThreshold += 1.0; // Збільшення порогового значення пилу

    delay(200); // Затримка для уникнення повторного натискання

}

if (digitalRead(downButton) == LOW) {

    dustThreshold -= 1.0; // Зменшення порогового значення пилу

    delay(200); // Затримка для уникнення повторного натискання

}

if (digitalRead(selectButton) == LOW) {

    adjusting = false;

    delay(200); // Затримка для уникнення повторного натискання


    // Збереження порогових значень в EEPROM

    EEPROM.put(dustThresholdAddress, dustThreshold);

    EEPROM.put(powerThresholdAddress, powerThreshold);

}

}

}

```

Калібрування LDR:

Функція для калібрування LDR для забезпечення точних вимірювань освітленості.

```

// Функція калібрування LDR

void calibrateLDR() {

```

```

float sumLDR1 = 0;

float sumLDR2 = 0;

const int numReadings = 100;

for (int i = 0; i < numReadings; i++) {

    sumLDR1 += analogRead(LDR1); // Сумування значень LDR1

    sumLDR2 += analogRead(LDR2); // Сумування значень LDR2

    delay(10);

}

float baselineLDR1 = sumLDR1 / numReadings; // Обчислення середнього значення для LDR1

float baselineLDR2 = sumLDR2 / numReadings; // Обчислення середнього значення для LDR2

lcd.clear();

lcd.print("Calibrated:");

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("LDR1: ");

lcd.print(baselineLDR1); // Відображення каліброваного значення LDR1

lcd.print(" LDR2: ");

lcd.print(baselineLDR2); // Відображення каліброваного значення LDR2

delay(2000);

}

```

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 ОХОРОНА ПРАЦІ

Законодавство України покладає на всіх роботодавців обов'язок щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці. Витрати на охорону праці на підприємстві згідно зі ст. 19 Закону «Про охорону праці» повинні становити не менше 0,5% від фонду оплати праці за попередній рік, а за невиконання законодавства про охорону праці до підприємства можуть бути застосовані санкції аж до заборони його експлуатації.

Створення служби охорони праці.

Згідно зі ст. 15 Закону «Про охорону праці» така служба обов'язково повинна бути створена на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб у відповідності з Типовим положенням про службу охорони праці, затверджене наказом Держкомітету з нагляду за охороною праці від 17.11.2004 р. № 257. На підставі цього документа також має бути розроблено Положення про службу охорони праці цього підприємства, визначено структуру такої служби, її чисельність, основні завдання, функції та права її працівників. Крім того, повинні бути затверджені посадові інструкції посадових осіб служби, що визначають їх обов'язки, права та відповідальність за виконання покладених на них функцій.

На підприємствах з кількістю працівників менше 50 чоловік функції служби охорони праці можуть виконувати в порядку сумісництва (суміщення) особи, які мають відповідну підготовку. А на підприємствах з кількістю працівників менше 20 для виконання функцій служби охорони праці можуть на договірних засадах залучатися сторонні фахівці, які мають не менше трьох років виробничого стажу і пройшли навчання з охорони праці.

Розробка та затвердження на підприємстві положення, інструкцій та інших актів з охорони праці.

Обов'язок роботодавця за твердженням таких документів передбачений в ст. 13 Закону «Про охорону праці». Вони повинні встановлювати правила виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на будівельних майданчиках і робочих місцях. Інструкції та інша документація з охорони праці розробляються на підставі положень законодавства з охорони праці, типових інструкцій та технологічної документації підприємства з урахуванням виду діяльності підприємства і конкретних умов праці на ньому.

При проведенні вимірювань користуватись інструкцією з охорони праці при виконанні вимірювань в електроустановках напругою до 1000В електровимірювальними приладами

4.1.1 Загальні положення по охороні праці

Дані положення по охороні праці розроблені на підставі:

Положення про розробку інструкцій з охорони праці ДННОП 0.00-4-15-98. Наказ Держ. нагляд охорони праці №9 від 29.01.98р.

Правил безпечної експлуатації електроустановок.

Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Положення про "Навчання, інструктаж і перевірку знань працівників підприємств і організацій Міненерго України з питань охорони праці та експлуатації обладнання".

Правил безпеки при роботі з інструментами та пристосуваннями.

Правил застосування і випробування засобів захисту, що використовуються в електроустановках

Інструкції з надання першої допомоги потерпілому в зв'язку з нещасним випадком при обслуговуванні електричного обладнання.

До робіт по виконанню вимірювань електровимірювальними приладами в електроустановках напругою до 1000В допускаються особи, які у встановленому порядку пройшли медичний огляд, вступний і первинний

інструктажі, навчання, перевірку знань з ПБЕЕ, ПБЕЕС, ПУЕ, ПТЕ, ППБ, ПЕЕЗ ПЕРШ, керівництва з експлуатації електровимірювальних приладів та даної інструкції.

Особи, що не досягнули 18-річного віку, не пройшли навчання та перевірку знань до роботи не допускаються.

Працівники служб енергозбуту, допущені до вимірювальних робіт електровимірювальними приладами в електроустановках до 1000 В, несуть повну відповідальність за виконання вимог даної інструкції та інших чинних нормативних документів.

Працівники повинні вміти звільняти потерпілого від дії електричного струму, надавати долікарську допомогу в разі одержання потерпим електротравм, переломів, вивихів, укусів тварин, забоїв, опіків, обморожень, отруєнь тощо.

Забороняється проведення вимірювань у випадку наближення та проходження грози.

Роботи по виконанню вимірювань електровимірювальними приладами відносяться до робіт під напругою і проводяться за розпорядженням двома працівниками з групою Ш. Забороняється самовільне виконання робіт, а також розширення робочого місця, визначеного розпорядженням.

Основними небезпечними факторами при проведенні вимірювальних робіт є:

- наявність робочої напруги на струмовідних частинах;
- поява електричної дуги при коротких замиканнях в колах вимірювання;
- підвищена напруга у вторинних колах трансформаторів струму при випадковому розмиканні (обриві) вторинного кола;
- падіння з висоти при порушенні вимог безпеки під час виконання вимірювань на висоті

4.1.2 Вимоги безпеки перед початком робіт

При виконанні вимірювання електровимірювальними приладами (далі-

приладами) в електроустановках, що належать установі, розпорядження на безпечне виконання робіт віддається керівниками або спеціалістами установи, які мають право давати такі розпорядження. Роботи виконуються двома працівниками енергопостачальника з групою Ш.

При виконанні вимірювання приладами в електроустановках споживача розпорядження безпечне виконання робіт віддається електротехнічними працівниками споживача, які мають право давати розпорядження. В електроустановках споживачів роботи з вимірювання приладами може виконувати один працівник установи з групою Ш у супроводі оперативного працівника електроустановки споживача з групою Ш.

На виконання робіт з вимірювань в електроустановках споживачів, які не мають обслуговуючого персоналу, розпорядження віддається керівниками або спеціалістами установи, які мають право давати розпорядження. Роботи виконуються двома працівниками енергопостачальної організації з групою Ш.

Роботи по розпорядженню слід реєструвати у "Журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями".

В електроустановках без місцевого оперативного персоналу у тих випадках, коли допуск на робочому місці не потрібний, допуск до роботи здійснюється керівником робіт.

Перед початком вимірювань приладами необхідно відгородити розташовані поблизу робочого місця струмовідні частини, що перебувають під напругою, до яких можливий випадковий дотик.

Забороняється працювати в одязі з короткими або закоченими рукавами. Рукави повинні бути застібнуті біля кисті рук.

Керівник роботи повинен оглянути стан приладів, інших засобів захисту, звернувши увагу на стан ізоляції, відсутність тріщин і сколів ізоляції на приладах трансформаторів струму, на корпусі та інших частинах приладу. Необхідно також оглянути стан ізоляції щупів, які поставляються разом із приладами. Щупи можуть бути замінені тільки на такі ж, або на інші з тими ж

електричними параметрами.

Для вимірювань слід застосовувати кліщі з приладом, що встановлений на їх робочій частині. Використання кліщів з винесеним приладом забороняється.

Працівників, що проводять вимірювання, при допуску до роботи інструктує керівник робіт з питань безпечного проведення роботи, використання приладів, технології проведення вимірювань.

Без інструктажу допускати працівників до роботи забороняється.

Забороняється допуск до роботи працівників з ознаками алкогольного або наркотичного оп'яніння, хворих.

Перед підняттям на драбину, вона повинна бути ретельно перевірена.

Використання металевих несправних драбин та інших несправних засобів підняття на висоту і виконання вимірювань з них категорично забороняється.

Кожен працівник зобов'язаний виконувати вимоги даної інструкції, інших нормативних документів з охорони праці, а також інструктивні вказівки, отримані під час допуску до роботи.

4.1.3 Вимоги безпеки під час роботи

Вимірювання можна проводити лише на ділянках шин, конструктивне виконання яких, а також відстань між стумовідними частинами різних фаз і між ними та заземленими частинами - виключають можливість електричного пробоя між фазами або на землю через зменшення ізоляційних відстаней за рахунок робочої частини кліщів.

Вимірювання приладами на шинах слід виконувати, стоячи на підлозі в діелектричних калошах, ботах або на ізольованій підставці чи на гумовому діелектричному килимку.

Під час роботи з електровимірювальними приладами, показниками напруги допускається наближення людини до струмовідних частин на відстань, визначену довжиною їхньої ізольованої частини.

В темний період доби або в темних місцях ділянки робіт, робочі місця,

підходи до них слід освітлювати. Забороняється працювати в неосвітлених місцях.

Під час пофазного вимірювання струмів з допомогою кліщів у разі горизонтального розташування фаз необхідно перед проведенням вимірювань обгородити кожен фазу ізолюючою прокладкою. Вказані операції проводяться в діелектричних рукавичках.

Кліщі необхідно тримати у висячому положенні. Забороняється схилитися до приладу під час відліку показів.

У випадку роботи з приладами, коли можливе випадкове доторкання до струмопровідної частини при заведенні кліщів трансформатора струму за шину, необхідно користуватися діелектричними рукавичками.

Під час проведення вимірювань забороняється торкатися приладу, проводів, вимірювальних трансформаторів.

Коли прилади приєднані до кола, що перевіряється, забороняється доторкатися до гнізд, що не використовуються.

Якщо порядок величин, яка перевіряється заздалегідь невідомий, то розпочинати перевірку слід з найбільшої межі вимірів.

Перед поверненням перемикача границь вимірів необхідно вимкнути щупи від кола, що перевіряється.

4.1.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Прибрати робоче місце, вивести працівників з електроустановки, виконати запис в журналі про закінчення робіт за розпорядженням.

Про всі виявлені недоліки та зауваження, порушення нормального режиму роботи електроустановки негайно повідомити чергового диспетчера установи або відповідального за електрогосподарство споживача.

4.1.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Якщо під час роботи виникає аварійна ситуація, то роботи по вимірюванню необхідно негайно припинити, зняти напругу з робочої ділянки електромережі. Повідомити про це чергового диспетчера установи, а в електроустановках

споживача відповідальний персонал споживача. Працівників з електроустановки вивести в безпечне місце.

При виникненні короткого замикання в лічильнику, загорянні вторинної комутації, необхідно негайно зняти напругу шляхом вимкнення ввідного комутаційного апарату (автоматичного вимикача, рубильника, зняття запобіжників), застосовуючи захисні засоби та дотримуючись вимог техніки безпеки.

При виникненні пожежі необхідно вжити заходів по запобіганню поширення пожежі, викликати пожежну охорону, повідомити про пожежу чергового диспетчера установи, а в електроустановках споживача - відповідальний персонал споживача і приступити до гасіння пожежі наявними засобами, дотримуючись вимог безпеки.

При попаданні людини під дію електричного струму необхідно негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму шляхом вимкання електроустановки або її частини з допомогою наявних захисних засобів, дотримуючись вимог безпеки.

При наданні до лікарської допомоги необхідно діяти швидко, без будь-якої затримки, водночас вживши всіх заходів для виклику швидкої допомоги та повідомлення керівництва установи.

Надання до лікарської допомоги необхідно проводити безперервно до прибуття медичної допомоги.

У випадках легких травм та пошкодження або захворювання потерпілому необхідно забезпечити спокій, тепло і негайно відправити в лікарню, повідомити про випадок керівництво РЕМ.

Відповідальність

За невиконання вимог даної інструкції винні несуть дисциплінарну, адміністративну та кримінальну відповідальність.

4.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.2.1 Залежність розмірів осередків ураження від маси продуктів вибуху, (СДОР), їхнього тиску, метеоумов, і місцевості.

В комплексі заходів протихімічного захисту населення важливе місце займає оцінка радіаційної та хімічної обстановки . Володіння її методикою є прямим обов'язком начальників цивільної оборони , командирів формувань ЦО.

При аваріях, пов'язаних з виробництвом, зберіганням та транспортуванням сильнодіючих отруйних речовин (СДОР), може виникнути складна хімічна обстановка з утворенням зон хімічного зараження (ЗХЗ) та осередків хімічного ураження (ОХУ). Небезпека ураження населення в цих умовах вимагає швидкого виявлення СДОР і оцінки хімічної обстановки , а також періодичного її уточнення ,оскільки метеоумови можуть постійно змінюватись.

Тому командно-начальницький склад і особовий склад невоєнізованих формувань ЦО об'єктів господарської діяльності (ОГД) повинен досконало володіти методикою оцінки хімічної обстановки.

Хімічна обстановка - це обстановка, яка складається на території адміністративного району, населеного пункту чи ОГД внаслідок викиду (випливу) СДОР або застосування хімічної зброї, істотно впливає на життєдіяльність населення роботу ОГД, боєздатність формувань ЦО і вимагає вжиття необхідних заходів захисту.

Зона хімічного ураження включає ділянку розливу - територію, над якою поширюється первинна або вторинна хмара СДОР чи ОР в небезпечних для життя і здоров'я людей концентраціях . В зоні хімічного зараження може знаходитись один або більше осередків хімічного ураження. Осередок хімічного ураження - це територія, в межах якої внаслідок виливу СДОР виникають масові ураження людей, сільськогосподарських тварин і рослин .ЗХЗ характеризується розмірами (глибиною і шириною) і площею , які

залежать від кількості СДОР (ОР), їх виду , метеоумов, рельєфу місцевості, наявності на ній рослинності, типу і щільності забудови . Хімічну обстановку на ОГД виявляють пости (ланки) радіаційного і хімічного спостереження (ПРХС) та на хімічно небезпечних об'єктах - черговий диспетчер, який у випадку аварії повідомляє робітників і службовців об'єкту і доповідає в штаб ЦО міста (району).

Оцінка хімічної обстановки проводиться методом прогнозування (завчасно, при розробці плану ЦО об'єкту) і за даними розвідки.

При оцінці хімічної обстановки методом прогнозування приймається умова одночасного розливу (викиду) всього запасу СДОР (воєнний час) або із максимальної по об'єму одиничної ємності (в мирний час) при сприятливих для розповсюдження зараженого повітря метеоумовах (інверсія, швидкість вітру 1м/с).

Оцінка хімічної обстановки за даними розвідки проводиться на основі конкретної обстановки, коли враховується фактична кількість вилитої СДОР і реальні метеоумови. Оцінка хімічної обстановки на ОГД передбачає:

- визначення розмірів і площі ЗХЗ;
- визначення часу підходу хмари зараженого повітря СДОР до об'єкту;
- визначення тривалості уражаючої дії СДОР;
- визначення можливих втрат населення в ОХУ.

Для оцінки хімічної обстановки необхідно мати такі вихідні дані:

вид і кількість СДОР; місце викиду СДОР; час викиду СДОР; ступінь захищеності людей (наявність захисних споруд , індивідуальних засобів захисту); топографічні умови місцевості і характер забудови на шляху розповсюдження хмари зараженого повітря (закрита чи відкрита місцевість); метеоумови; швидкість і напрямок вітру в приземному шарі, температура повітря і ґрунту, ступінь вертикальної стійкості повітря.

Розрізняють три ступені вертикальної стійкості повітря :

- інверсію - при ній нижні шари повітря холодніші за верхні, що

перешкоджає переміщенню його по вертикалі і створює оптимальні умови для збереження високих концентрацій отруйних речовин (виникає у вечірній і нічний час при тихій погоді і швидкості вітру до 4м/с);

– конвекцію - нижні шари повітря нагріті більше ніж верхні, що сприяє переміщенню повітря по вертикалі, а значить зменшенню її уражаючої дії. Виникає вдень, при ясній погоді і швидкості вітру до 4м/с);

– ізотермію - температура повітря межах 20-30м від земної поверхні майже однакова (спостерігається в похмуру погоду, при опадах або при швидкості вітру більше 4м/с, а також як перехідний період від інверсії до конвекції навпаки).

4.2.2 Оцінка хімічної обстановки

Оцінку хімічної обстановки можна проводити за формулами і таблицями складеними відповідно до основних видів СДОР.

Радіоелектронні підприємства є небезпечними об'єктами третього ступеня по хімічній небезпеці, це означає, що зона зараження виходить за межі території об'єкту. В запасах даного об'єкту може бути нагромаджено до 150т соляної кислоти. Максимальний об'єм ємності становить 40т кислоти. Проведемо оцінку можливої хімічної обстановки в результаті руйнування 40-а тонної ємності соляної кислоти з чисельністю зміни 500 чоловік. На віддалі 1 км знаходиться житловий масив. Робітники і службовці протигазами забезпечені на 100%. Метеорологічні умови :

Інверсія : швидкість вітру -1м/с ; $t=20^{\circ}\text{C}$; $A^{\circ}=270^{\circ}$. Потрібно :

Оцінити хімічну обстановку, яка може скластися внаслідок аварії на час після аварії $N=1$ год;

Розв'язання:

Визначаємо глибину можливого зараження (Γ) і площу зараження (S)
Визначаємо еквівалентну кількість речовини в первинній хмарі :

$$Q_1 = K_1 \times K_3 \times K_5 \times K_7 \times Q_9 \quad (T)$$

де $Q_0=40$ (т)

K_1 - коефіцієнт, який залежить від умов зберігання СДОР, $K_1=0$

K_3 -коефіцієнт рівний відношенню порогової токсодози соляної кислоти до порогової дози інших СДОР, $K_3=0.3$;

K_5 -коефіцієнт, який враховує ступінь вертикальної стійкості повітря (інверсія=1);

K_7 -коефіцієнт, який враховує вплив температури повітря $K_7=1$

Отже $Q_1=0$

Визначаємо еквівалентну кількість речовини у вторинній хмарі :

$$Q_2 = (1 - K_1) \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \times K_7 \times Q_0 / h \times d \quad (\text{т})$$

де K_2 - коефіцієнт, який залежить від фізико-хімічних властивостей СДОР, $K_2=0,021$; K_4 - коефіцієнт, який враховує швидкість вітру ; K_6 - коефіцієнт, який залежить від часу, що минув від початку аварії. $K_6=1$,

при $N=1$

$$Q_2=4,2 \text{ (т)}$$

I Oi-4.2 (т)."

Глибина зони зараження первиною (вторинною) хмари визначається в залежності від еквівалентної кількості речовини і швидкості вітру.

Повна глибина зони зараження $\Gamma_{\text{п}}$ (км) визначається :

$$\Gamma_{\text{п}} = \Gamma_{\text{I}(2)} + 0.5 \Gamma_{2(1)} \text{ км};$$

де $\Gamma_{\text{I}(2)}$ - найбільший із розмірів Γ_1 і Γ_2 , $\Gamma_{2(1)}$ - найменший із розмірів Γ_1 і Γ_2 , $\Gamma_{\text{п}}=11,25\text{км.}$, $\Gamma_{\text{п}}=N \times V$, $N=1\text{год}$ за табл. 11 [11] $V=5\text{км/год}$ (при швидкості повітря 1м/с); $\Gamma_{\text{п}}=5\text{км}$;

Площа зони зараження. Площа зони можливого зараження первиною (вторинною) хмари визначається :

$$S_{\text{м}} = 8,72 \times 10^3 \times \Gamma_{\text{п}}^2 \times f \quad (\text{км}^2)$$

де $S_{\text{м}}$ -площа зони можливого зараження СДОР, км^2 ;

$\Gamma_{\text{п}}$ - глибина зони зараження , км

f - кутові розміри зони можливого зараження , (град); при $v=1\text{м/с}$; $f=180^\circ$.

Для нашого прикладу:

$$\Gamma_n = 5 \text{ км}, V = 1 \text{ м/с},$$

$$S_M = 0,00872 \times 52 \times 180 = 39,2 (\text{км}^2)$$

$$S_M = 39,2 (\text{км}^2);$$

Площа фактичного зараження S_f в км розраховується за формулою

$$S_f = K_e \times \Gamma_n^2 \times N^{0,2}$$

K_e - коефіцієнт який залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря:
інверсія=0,081;

$$\text{Тоді } S_f = 0,081 \times 5^2 \times 1^{0,2} = 2,025 (\text{км}^2);$$

Час підходу зараженого повітря до об'єкту залежить від швидкості перенесення хмари повітряним потоком

$$T_n = L/v \text{ (год)};$$

L -відстань від джерела зараження до заданого об'єкту , км;

v -швидкість переносу переднього фронту хмари зараженого повітря,
км/год;

$$L = 1 \text{ км}, v = 5 \text{ км};$$

$$T_n = 0,2 (\text{год}) = 15 (\text{хв}).$$

Можливі втрати робітників , службовців і населення в районах хімічного зараження визначаються з використанням табл.5 [11] в залежності від умов перебування і забезпеченості засобами індивідуального захисту.

$$\text{Можливі втрати } -4\% , P = 500 \times 0,04 = 20 \text{чол.}$$

Орієнтовна структура втрат:

легкого ступення-25% (5чол);

середнього ступення-40 % (8чол);

з смертельними випадками-35% (7чол).

Зона можливого зараження хмарию СДОР обмежена півколом, який має кутові розміри f і радіус, рівний глибині зараження.

Зона можливого зараження має такий вигляд :

При швидкості вітру за прогнозом $v = 0.6$ -м/с - півколо

$$A^0 = 270^0$$

$$f = 180^0$$

$$r = \Gamma$$

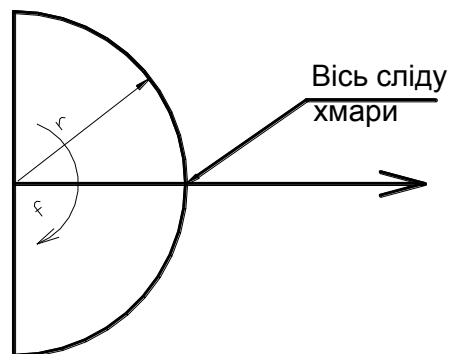


Рисунок 6.1 – Зона можливого зараження

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було розроблено, впроваджено та протестовано недорогий прототип системи для автоматизованого очищення запилених фотоелектричних панелей. Система здатна виявляти пил за допомогою простого і дешевого датчика пилу на основі LDR. Система проста у використанні та виявилася здатною ефективно розв'язувати проблеми накопичення пилу на фотоелектричних панелях без залучення ручної праці.

Було оцінено продуктивність системи та виявлено, що завдяки очищенню фотоелектричних панелей від накопиченого пилу спостерігається збільшення продуктивності на 33,76%. Ці результати підкреслюють важливість очищення фотоелектричних панелей від бруду, яке повинно бути включено до всіх планів технічного обслуговування фотоелектричних систем. Повна інформація про процес проєктування та реалізації, включаючи всі принципові схеми, а також кроки з визначення розмірів та відповідного вибору компонентів були продемонстровані в цій роботі.

References

Список літератури

1. Barnicoat G., Danson M. The ageing population and smart metering: A field study of householders' attitudes and behaviour toward energy use in Scotland. 2015. 107-115. DOI: 10.1016/j.erss.2015.09.007. Режим доступу – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629615300438?via%3Dihub>
2. Ogbolumani O.A., Nwulu N. Integrated appliance scheduling and optimal sizing of an autonomous hybrid renewable energy system for agricultural food production. Lecture Notes Mech. Eng. 2020. 651-660. DOI: 10.1007/978-981-15-5753-8_60. Режим доступу – https://www.researchgate.net/publication/344007109_Integrated_Appliance_Scheduling_and_Optimal_Sizing_of_an_Autonomous_Hybrid_Renewable_Energy_System_for_Agricultural_Food_Production
3. Ogbolumani O.A., Nwulu N.I. A food-energy-water nexus meta-model for food and energy security. Sustain. Prod. Consum. 30. 2022. 438-453. DOI: 10.1016/j.spc.2021.12.019. Режим доступу – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550921003663>
4. Shairi N.A.S., Ghoni R., Ali K. Solar panel dust monitoring system. Eng. Herit. J. 4 (2). 2020. 44-45. DOI: 10.26480/gwk.02.2020.44.45. Режим доступу – https://www.researchgate.net/publication/346821257_SOLAR_PANEL_DUST_MONITORING_SYSTEM
5. Qasem H., Mnatsakanyan A., Banda P. Assessing dust on PV modules using image processing techniques. Proceedings of the Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2016. 2066-2070. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749993. Режим доступу – <https://ieeexplore.ieee.org/document/7749993>

6. Menoufi K. Dust accumulation on the surface of photovoltaic panels: introducing the Photovoltaic Soiling Index (PVSI). Sustainability 9 (6). 2017. DOI: 10.3390/su9060963. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/317376914_Dust_Accumulation_on_the_Surface_of_Photovoltaic_Panels_Introducing_the_Photovoltaic_Soiling_Index_PVSI
7. Adinoyi M.J., Said S.A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. Renew. Energy 60. 2013. 633-636. DOI: 10.1016/j.renene.2013.06.014. Режим доступа – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811300420X>
8. Mazumder M.K., et al. Environmental degradation of the optical surface of PV modules and solar mirrors by soiling and high RH and mitigation methods for minimizing energy yield losses. Proceedings of the IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC. 2015. DOI: 10.1109/PVSC.2015.7355973. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/294581106_Environmental_Degradation_of_the_Optical_Surface_of_PV_Modules_and_Solar_Mirrors_by_Soiling_and_High_RH_and_Mitigation_Methods_for_Minimizing_Energy_Yield_Losses
9. Kim J.G., Kim D.H., Yoo W.S., Lee J.Y., Kim Y.B. Daily prediction of solar power generation based on weather forecast information in Korea. IET Renew. Power Gener. 11 (10). 2017. 1268-1273. DOI: 10.1049/iet-rpg.2016.0698. Режим доступа – <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-rpg.2016.0698>
10. Alnasser T.M.A., Mahdy A.M.J., Abbas K.I., Chaichan M.T., Kazem H.A. Impact of dust ingredient on photovoltaic performance: an experimental study. Sol. Energy 195. 2020. 651-659. DOI: 10.1016/j.solener.2019.12.008. Режим доступа – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X1931322X>

11. Rajput D.S., Sudhakar K. Effect of dust on the performance of solar PV panels. International Journal of ChemTech Research 5 (2). 2013. 1083-1086. Режим доступа – ...
12. Darwish Z.A. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic: Review and research. International Journal of Energy and Environment 7 (4). 2013. 152-159. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/258051333_Impact_of_Some_Environmental_Variables_with_Dust_on_Solar_Photovoltaic_PV_Performance_Review_and_Research_Status
13. Kaldellis J.K., Kokala A. Quantifying the decrease of the photovoltaic panel's energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal. Energy 35. 2010. 4862-4869. Режим доступа – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210003200>
14. Darwish Z.A., Kazem H.A., Sopian K., Al-Goul M.A., Alawadhi H. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews 41. 2015. 735-744. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.046. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/266079457_Effect_of_Dust_on_Photovoltaic_Performance
15. Oh S., Figgis B.W., Rashkeev S. Effects of thermophoresis on dust accumulation on solar panels. Sol. Energy 211. 2020. 412-417. DOI: 10.1016/j.solener.2020.09.053. Режим доступа – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X20308932>
16. Liu X., Yue S., Li J., Lu L. Study of a dust deposition mechanism dominated by electrostatic force on a solar photovoltaic module. Sci. Total Environ. 754. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142241. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/337637724_Study_on_Dust_Deposition_Mechanics_on_Solar_Mirrors_in_a_Solar_Power_Plant

17. Isaifan R.J., Johnson D., Ackermann L., Figgis B., Ayoub M. Evaluation of the adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 191. 2019. 413-421. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.11.031. Режим доступа – <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-the-adhesion-forces-between-dust-and-Isaifan-Johnson/36c006b298865827550b210eca0c0f145dc49613>
18. Olorunfemi B.O., Ogbolumani O.A., Nwulu N. Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: a systematic review on smart systems. *Sustainability* 14 (17). 2022. DOI: 10.3390/SU141710920. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/363224145_Solar_Panels_Dirt_Monitoring_and_Cleaning_for_Performance_Improvement_A_Systematic_Review_on_Smart_Systems
19. Semaoui S., Arab A.H., Boudjelthia E.K., Bacha S., Zeraia H. Dust effect on optical transmittance of photovoltaic module glazing in a desert region. *Energy Procedia* 74. 2015. 1347-1357. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.781. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/281451518_Dust_Effect_on_Optical_Transmittance_of_Photovoltaic_Module_Glazing_in_a_Desert_Region
20. Abu-Naser M. Solar panels cleaning frequency for maximum financial profit. *Open J. Energy Effic.* 06 (03). 2017. 80-86. DOI: 10.4236/ojee.2017.63006. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/319045429_Solar_Panels_Cleaning_Frequency_for_Maximum_Financial_Profit
21. Darwish Z.A., Kazem H.A., Sopian K., Al-Goul M.A., Alawadhi H. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41. 2015. 735-744. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.046. Режим доступа –

https://www.researchgate.net/publication/265908393_Effect_of_dust_pollutant_type_on_photovoltaic_performance

22. Magalhães P.M., Martins J.F., Joyce A.L. Comparative analysis of overheating prevention and stagnation handling measures for photovoltaic-thermal (PV-T) systems. *Energy Procedia*, 91. 2016. 346-355. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/305749606_Comparative_Analysis_of_Overheating_Prevention_and_Stagnation_Handling_Measures_for_Photovoltaic-thermal_PV-T_Systems
23. Sam B.B., Ekka A., Hingora M.A. A survey paper on colour detection system for industrial applications using arduino. *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 590. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/590/1/012037. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/336566763_A_Survey_Paper_on_Colour_Detection_System_for_Industrial_Applications_Using_Arduino
24. Adothu B., Chattopadhyay S., Bhatt P., Hui P., Costa F.R., Mallick S. Early-stage identification of encapsulants photobleaching and discoloration in crystalline silicon photovoltaic module laminates. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 28 (8). 2020. 767-778. DOI: 10.1002/pip.3269. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/339998974_Early-stage_identification_of_encapsulants_photobleaching_and_discoloration_in_crystalline_silicon_photovoltaic_module_laminates
25. Meena R., Kumar S., Gupta R. Comparative investigation and analysis of delaminated and discolored encapsulant degradation in crystalline silicon photovoltaic modules. *Sol. Energy* 203. 2020. 114-122. DOI: 10.1016/j.solener.2020.04.041. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/340791363_Comparative_investigation_and_analysis_of_delaminated_and_discolored_encapsulant_degradation_in_crystalline_silicon_photovoltaic_modules

26. Al-Housani M., Bicer Y., Koç M. Experimental investigations on PV cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: comparison of cleaning techniques for drone retrofitting. *Energy Convers. Manag.* 185. 2019. 800-815. DOI: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.01.058. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/331571246_Experimental_investigations_on_PV_cleaning_of_large-scale_solar_power_plants_in_desert_climates_Comparison_of_cleaning_techniques_for_drone_retrofitting
27. Johnson C.E., Srirama P.K., Sharma R., Pruessner K., Zhang J., Mazumder M.K. Effect of particle size distribution on the performance of electrodynamic screens. *IEEE 40th Industry Applications Society Annual Meeting Conference*, 2005. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/4180090_Effect_of_particle_size_distribution_on_the_performance_of_electrodynamic_screens
28. Al-Otaibi A., Al-Qattan A., Fairouz F., Al-Mulla A. Performance Evaluation of Photovoltaic Systems on Kuwaiti Schools' Rooftop. *Energy Conversion and Management* 95. 2015. 110-119. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.02.039. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/273261564_Performance_evaluation_of_photovoltaic_systems_on_Kuwaiti_schools'_rooftop
29. Li X., Mauzerall D.L., Bergin M.H. Global Reduction of Solar Power Generation Efficiency Due to Aerosols and Panel Soiling. *Nature Sustainability* 3. 2020. 720-727. DOI: 10.1038/s41893-020-0553-2. Режим доступа – https://www.researchgate.net/publication/342369053_Global_reduction_of_solar_power_generation_efficiency_due_to_aerosols_and_panel_soiling
30. Abu-Naser M. Solar Panels Cleaning Frequency for Maximum Financial Profit. *Open Journal of Energy Efficiency* 6. 2017. 80-86. DOI: 10.1016/j.ijot.2018.08.006. Режим доступа –

https://www.researchgate.net/publication/319045429_Solar_Panels_Cleaning_Frequency_for_Maximum_Financial_Profit

- 31.GlobalSpec. Pumps. Режим доступу – <https://www.globalspec.com/pfdetail/pumps/flow>
- 32.Tobin S.M., Servos D.C. Application and Design with MATLAB. Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton. 2011. Режим доступу – <https://www.perlego.com/book/1601146/dc-servos-application-and-design-with-matlab-pdf>
- 33.Budynas R.G., Nisbett J.K. Shigley's Mechanical Engineering Design. 11th edition. McGraw-Hill Education, New York. 2020. Режим доступу – https://www.academia.edu/99603190/Shigleys_Mechanical_Engineering_Design
- 34.Poulin J.E. Practical Considerations in DC Motor and Amplifier Selection. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-20. 1984. 1130-1140. DOI: 10.1109/TIA.1984.4504575.
- 35.GlobalSpec. DC Motors Information. 2022. Режим доступу – https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/motors/dc_motors
- 36.Proteus. PCB Design and Simulation Made Easy. 2021. Режим доступу – <https://www.labcenter.com/>
- 37.Arduino. Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1. 2021. Режим доступу – <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>
- 38.В.Б. Савків., Ю.Б. Капаціла, Р.І. Михайлишин. Методичні вказівки розроблено у відповідності з навчальними планами підготовки фахівців освітнього рівня «Бакалавр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя. 2021. 46 с.
- 39.Платформа .NET та мова програмування C# 8.0: навчальний посібник / Коноваленко І.В., Марущак П.О. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2020 – 320 с. /Рекомендовано до друку Вченою радою Тернопільського

національного технічного університету імені Івана Пулюя. Протокол № 10 від 20 жовтня 2020 року

- 40.Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. / (Рекомендовано до друку вченою радою Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя протокол № 9 від 4 жовтня 2022 р.
- 41.Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
- 42.Автоматизація періодичних технологічних процесів: Типова програма, методичні вказівки, теорія та практика. Лабораторний практикум / Укладачі: Проць Я.І., Данилюк О.А., Федорів П.С. - Тернопіль: ТДТУ, 2005 -135 с.
- 43.Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
- 44.Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
- 45.Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.

- 46.Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
- 47.Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.