Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення автоматизованої системи керування рухомою конструкцією даху паркувального модуля
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ-22-1
Артем СОКОЛОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)
Керівник доц. Артем БРОННІКОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Завідувач кафедри _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Соколов Артем Михайлович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«28» Червень 2026 р. Соколов А.М.
(підпис)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки та безпекової інженерії

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___»_____20 ___ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Соколову Артему Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування рухомою конструкцією даху паркувального модуля
затверджена наказом університету від 04 червня 2026р. № 473 Ст.
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 10 червень 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи 3.1 Комп'ютерне моделювання;
3.2 Модель механізму типу важільної-шарнірний паралельного розгортання;
3.3 Кінематичне моделювання переміщення.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Аналіз стану систем;
4.2 Вибір та обґрунтування технічних рішень для моделювання;
4.3 Розроблення моделі адаптивної системи захисту та трансформації із використанням програмного забезпечення Autodesk Fusion 360, яка включає проєктування тривимірної моделі важільно-шарнірного механізму навісу та налаштування його кінематики;
4.4 Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

слайди у форматі PowerPoint у кількості 14 слайдів з розширенням .pptx.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	Дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	28.04.2026	Виконано
2	Аналіз літератури за темою	30.04.2026	Виконано
3	1 Аналіз та обґрунтування напрямків розробки адаптивних систем захисту і трансформації	02.05.2026	Виконано
4	2 Математичне моделювання та алгоритмізація процесів керування	17.05.2026	Виконано
5	3 Технічне проєктування, симуляція та верифікація характеристик системи керування із використанням програмного забезпечення Fusion360	01.06.2026	Виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	15.06.2026	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	16.06.2026	Виконано
8	Подання роботи на рецензію	20.06.2026	Виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.06.2026	Виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	10.07.2026	Виконано

Дата видачі завдання 27 квітня 2026 р.

Здобувач _____ Артем СОКОЛОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ доц. Артем БРОННІКОВ.
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 75 с; 5 табл., 37 рис; 3 дод., 27 джерел.

ПАРКУВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ, РУХОМИЙ ДАХ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32,MATLAB/SIMULINK, AUTODESK FUSION 360.

Об’єктом дослідження є процес автоматичного керування та трансформації рухомих захисних конструкцій паркувальних модулів.

Предметом дослідження є програмно-апаратне забезпечення системи керування рухомим дахом на базі мікроконтролера.

Метою роботи є проєктування та моделювання адаптивного даху парковки для захисту автомобілів.

Для досягнення мети передбачено виконання таких завдань за розділами:

У першому розділі планується проаналізувати аналоги рухомих навісів, обґрунтувати вибір матеріалів та сформувати необхідну елементну базу.

У другому розділі необхідно створити математичну модель об'єкта у вигляді рівнянь та передавальних функцій, а також розробити алгоритми керування з логікою аварійного захисту від вітрового тиску.

У третьому розділі передбачено виконати моделювання у Wokwi, налаштувати ПІД-регулятор у MATLAB/Simulink, розробити 3D-модель механізму в Autodesk Fusion 360 та провести її аналіз на міцність методом скінченних елементів.

Цілі сталого розвитку 9 "Промисловість, інновації та інфраструктура", а саме п.9.3 "Забезпечити доступність дорожньотранспортної інфраструктури, яка базується на використанні інноваційних технологій, зокрема через розширення форм участі держави у різних інфраструктурних проєктах".

У результаті розроблені програмно-апаратні моделі мають бути повністю готовими до застосування в сучасних автономних модулях міської інфраструктури.

ABSTARCT

Explanatory note: 75 p; 5 tables, 37 figures, 3 appendices, 27 sources.

PARKING MODULE, MOVING ROOF, ESP32 MICROCONTROLLER, MATLAB/SIMULINK, AUTODESK FUSION 360.

The object of the study is the process of automatic control and transformation of movable protective structures of parking modules.

The subject of the study is the software and hardware of the movable roof control system based on a microcontroller.

The purpose of the work is to design and simulate an adaptive parking roof for protecting cars.

To achieve the goal, the following tasks are planned to be performed in sections:

In the first section, it is planned to analyze analogues of movable canopies, justify the choice of materials and form the necessary element base.

In the second section, it is necessary to create a mathematical model of the object in the form of equations and transfer functions, as well as develop control algorithms with the logic of emergency protection against wind pressure.

In the third section, it is planned to perform modeling in Wokwi, configure a PID controller in MATLAB/Simulink, develop a 3D model of the mechanism in Autodesk Fusion 360 and analyze it for strength using the finite element method.

Sustainable Development Goals 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely paragraph 9.3 "Ensure the accessibility of road transport infrastructure based on the use of innovative technologies, in particular through the expansion of forms of state participation in various infrastructure projects". As a result, the developed software and hardware models should be fully ready for use in modern autonomous modules of urban infrastructure.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз та обґрунтування напрямків розробки адаптивних систем захисту і трансформації 13
1.2 Порівняльний аналіз конструктивних рішень рухомих навісів та важільних механізмів 15
1.3 Обґрунтування вибору програмного забезпечення для тривимірного моделювання та інженерного аналізу 20
1.3.1 Fusion 360 та autocad 20
1.3.2 Fusion 360 та solidworks 21
1.4 Порівняльний аналіз та вибір конструкційних матеріалів елементів каркаса 22
2 Математичне моделювання та алгоритмізація процесів керування, обгрунтування засобів 27
2.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів для розробки конструкції 27
2.2 Диференційні рівняння та передавальна функція об'єкта автоматизації 31
2.3 Алгоритмічне забезпечення та логіка роботи виконавчих механізмів в аварійних режимах 34
3 Технічне проєктування, симуляція та верифікація характеристик системи керування із використанням програмного забезпечення fusion360 38
3.1 Схемо–технічне проектування електронної системи керування на базі мікроконтролера esp32 38
3.1.1 Обґрунтування вибору елементної бази системи 38
3.1.2 Розробка схеми підключення та алгоритмів керування 41
3.1.3 Опис програмного забезпечення системи керування 43
3.2 Віртуальна симуляція та схемотехнічне моделювання роботи пристрою. 46
3.3 Моделювання замкнутого контуру сак у середовищі matlab/simulink 49
3.4 Розробка тривимірної (3d) моделі важільного механізму трансформації у fusion

360 та аналіз міцності (fea) 53
3.4.1 Конструктивні елементи та специфікація тривимірної моделі 53
3.4.2 Аналіз міцності (fea) елементів механізму 57
3.5 Охорона праці 60
Висновки 62
Перелік джерел посилання 64
Додаток А Порівняльний аналіз середовищ 68
Додаток Б Основні механічні властивості аустенітних сталей 70
Додаток В Повна програмна реалізація сак механізму 71
Додаток Г Демонстраційний матеріал 74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕРС – електрорушійна сила;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

РСК – розподілена система керування;

САК – система автоматичного керування;

САПР – системи автоматизованого проєктування;

УФ – ультрафіолет;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

BLDC – Brushless Direct Current (безколекторний двигун постійного струму);

CAD – Computer-Aided Design (комп'ютерне проєктування);

CAE – Computer-Aided Engineering (комп'ютерна інженерія);

CAM – Computer-Aided Manufacturing (автоматизоване виробництво);

CFD – Computational Fluid Dynamics (обчислювальна гідрогазодинаміка);

DCS – Distributed Control System (розподілена система керування);

ECAD – Electronic Computer-Aided Design (автоматизоване проєктування електронних систем);

FEA – Finite Element Analysis (аналіз методом скінченних елементів);

I2C – Inter-Integrated Circuit (міжінтегральна схема);

LCD – Liquid Crystal Display (рідкокристалічний дисплей);

LDR – Light Dependent Resistor (фоторезистор);

MCU – Microcontroller Unit (мікроконтролер);

PCB – Printed Circuit Board (друкована плата);

PDM – Product Data Management (управління даними про виріб);

PID – Proportional-Integral-Derivative (пропорційно інтегрально диференціальний регулятор).

ВСТУП

В умовах сучасного розвитку міської інфраструктури та концепції «розумних міст» одним із напрямків стає інтеграція автоматизованих систем управління, засобів мікроконтролерної техніки та інтелектуальних систем моніторингу навколишнього середовища [1]. Цей процес обумовлений швидким ростом вимог до безпеки майна, енергоефективності, гнучкості інфраструктурних рішень та захисту від негативних кліматичних чинників. Зокрема, важливим аспектом проєктування сучасних міських об'єктів є реалізація Цілей сталого розвитку ООН, що передбачають підвищення ефективності експлуатації міського простору, модернізацію інфраструктури на основі впровадження інноваційних технологій та вдосконалення підготовки інженерних фахівців.

Традиційні стаціонарні навіси для захисту автомобілів не здатні забезпечити гнучке затінення та зазнають критичних парусних навантажень під час вітру, що створює ризик руйнування конструкції. Створення рухомих захисних споруд з інтелектуальним автоматичним керуванням дозволяє оперативно вирішити цю проблему, забезпечуючи надійність тримального каркаса та превентивний захист транспортних засобів.

Серед найбільш перспективних технологій, що лягають в основу таких адаптивних систем, є використання вбудованих мікроконтролерних рішень та сучасних методів комп'ютерного моделювання. Завдяки застосуванню завадостійких мікроконтролерів (зокрема сімейства ESP32) та датчиків метеомоніторингу, система здатна аналізувати параметри навколишнього середовища в реальному часі. Водночас застосування новітніх методів моделювання у середовищах MATLAB/Simulink та Autodesk Fusion 360 дає можливість прогнозування роботи систем в реальних умовах, що сприяє оперативній оптимізації законів керування (ПІД-регуляторів), аналізу міцності конструкцій та усуненню проблем із продуктивністю ще на етапі проєктування.

Актуальність теми визначається зростаючою потребою міської інфраструктури в оптимізації паркувального простору, підвищенні експлуатаційної надійності захисних споруд та зниженні кількості аварійних ситуацій при критичних погодних умовах. Створення автоматизованої системи керування рухомим дахом паркувального модуля є важливим кроком до формування більш гнучких, безпечних, автономних та зручних умов для зберігання автомобільного транспорту.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування автоматизованої системи керування рухомою конструкцією даху паркувального модуля шляхом використання мікроконтролерних засобів та методів комп'ютерного моделювання.

Об’єктом роботи є процес автоматичного керування та трансформації рухомих захисних огороджувальних конструкцій в умовах змінного зовнішнього середовища.

Предметом розробки є алгоритмічне, програмне та апаратне забезпечення мікроконтролерної системи автоматичного керування рухомим дахом паркувального модуля.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз сучасного стану та конструктивних рішень автоматизованих рухомих систем захисту;

– провести вибір та обґрунтування елементної бази і технічних засобів автоматизації;

– розробити алгоритмічне забезпечення головного циклу керування та логіки аварійного захисту конструкції;

– розробити математичну модель об'єкта автоматизації у вигляді передавальних функцій;

– виконати схемотехнічне проєктування та симуляцію роботи системи у середовищі Wokwi;

– провести комп'ютерне моделювання замкнутого контуру САК у середовищі MATLAB/Simulink із налаштуванням ПІД-регулятора;

– розробити тривимірну (3D) модель механізму у середовищі Autodesk

Fusion 360 та провести інженерний аналіз міцності;

– розглянути питання охорони праці та безпеки життєдіяльності під час монтажу та експлуатації системи;

– оформити кваліфікаційну роботу.

Проведена робота відповідає цілям сталого розвитку (ЦСР): ЦСР 9 («Промисловість, інновації та інфраструктура») та ЦСР 11 («Сталі міста та спільноти»).

Кваліфікаційна робота оформлена згідно з ДСТУ 3008:2015 [2] та методичними вказівками кафедри [3]. матеріали роботи були апробовані у [4 – 5].

1 АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ РОЗРОБКИ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ЗАХИСТУ І ТРАНСФОРМАЦІЇ

1.1 Аналіз сучасних тенденцій розвитку адаптивних систем захисту та трансформації конструкцій

Сучасна класифікація паркувальних місць базується на положеннях ДБН В.2.3-15:2019 [6], де основним критерієм є ступінь захисту транспортного засобу та тип огороджувальних конструкцій.

Автостоянки закритого типу являють собою капітальні споруди, які можуть бути наземними, підземними або інтегрованими в структуру будівлі. Головною особливістю таких об'єктів є повна ізоляція автомобіля від зовнішнього середовища. Такий підхід дозволяє повністю уникнути негативного впливу сонячної радіації, опадів та значних температурних коливань. Однак будівництво закритих паркінгів супроводжується високою собівартістю [7], та необхідністю встановлення дорогих систем примусової вентиляції та пожежогасіння.

На противагу закритим гаражам, автостоянки відкритого типу є найбільш доступним рішенням, проте вони мають критичні недоліки щодо збереження майна. Незважаючи на низьку вартість облаштування, експлуатація автомобілів у таких умовах призводить до прискореної деградації лакофарбового покриття через фотохімічне старіння. Наприклад, тривале перебування авто під прямими сонячними променями викликає нагрівання кузова до критичних температур.

Ефективність використання захисних бар'єрів для зниження теплового навантаження наочно продемонстрована порівняльному аналізу теплового навантаження на кузов (рис. 1.1).



а) відкрите зберігання; б) використання захисного покриття [7]

Рисунок 1.1 – Порівняльний аналіз теплового навантаження на кузов автомобіля

Як видно з рисунку (рис. 1.1, а), при відкритому зберіганні спостерігається вплив сонячних променів, що призводить до нагріву поверхні даху та скляних зон до температур [8], які значно перевищують критичні позначки. Це руйнує молекулярну структуру пластику в салоні та призводить до вицвітання пігментів фарби. Водночас використання захисного накриття (рис. 1.1, б) дозволяє стабілізувати температурний фон кузова, що підтверджує доцільність впровадження автоматизованих систем накриття для збереження експлуатаційних характеристик транспортного засобу.

Проміжним варіантом, що поєднує переваги обох типів, є напівзакриті стоянки або навіси. Традиційні стаціонарні навіси забезпечують захист від вертикальних опадів, проте мають суттєвий недолік – «парусність». При сильних поривах вітру такі конструкції відчувають значні динамічні навантаження на опори та фундамент. Саме тому виникає технічна необхідність у створенні динамічних, рухомих систем. Автоматизований навіс дозволяє трансформувати відкрите паркувальне місце у захищену зону лише за потреби, що значно підвищує ефективність використання площі та надійність самої конструкції в екстремальних погодних умовах.

Для розуміння, який тип парковки кращий, порівняно за кількома основними параметрами. Важливо врахувати ступінь захисту транспортного засобу від опадів та сонячного випромінювання, захист від корозії кузова, а також рівень капітальних витрат. Аналіз демонструє плюси та мінуси кожного варіанту від звичайного місця під небом до складних автоматичних систем.

Порівняльна характеристика закритих гаражів, відкритих стоянок та автоматизованих навісів наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика типів паркувальних місць

Параметр порівняння	Закритий Гараж	Відкрита стоянка	Автоматизований навіс
Захист від граду	Повний	Відсутній	Високий
Природна вентиляція	Низька	Максимальна	Висока
Вплив УФ-випромінювання	Відсутній	Максимальний	Мінімальний
Капітальні витрати	Дуже високі	Низькі	Середні

1.2 Порівняльний аналіз конструктивних рішень рухомих навісів та важільних механізмів

На сучасному етапі розвитку інженерної інфраструктури автоматизація захисних конструкцій базується на поєднанні прецизійної механіки та інтелектуальних систем керування.

Основним технічним завданням при створенні таких об’єктів є забезпечення мобільності покриття при збереженні високої жорсткості каркаса.

Аналіз існуючих рішень дозволяє виділити кілька домінуючих конструктивних схем, серед яких найбільш поширеними є телескопічні системи (рис. 1.2).

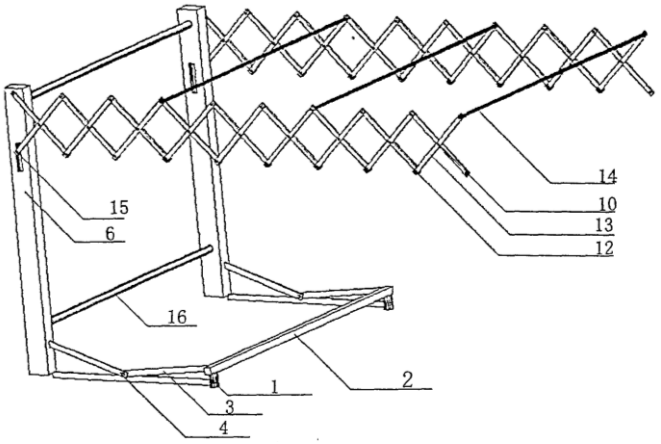


Рисунок 1.2 – Важільний механізм пантографного типу [9]

А також дуже поширеними є важільні механізми пантографного типу (рис. 1.3).

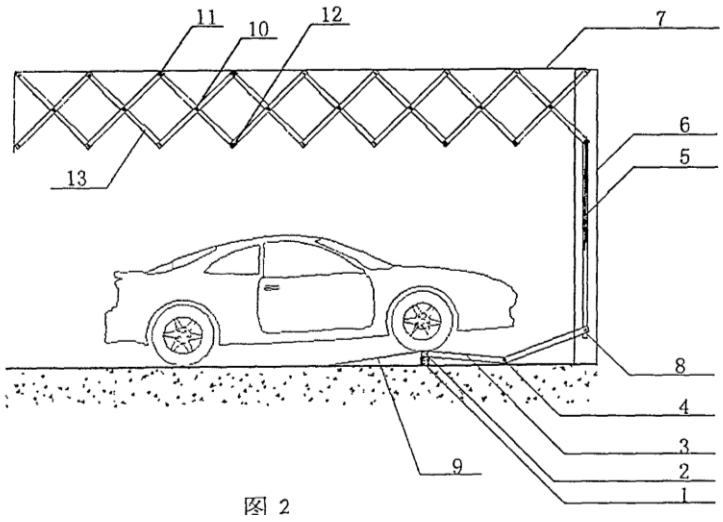


Рисунок 1.3 – Важільний механізм пантографного типу [9]

Кратка інформація що до прикладу телескопічної системи: Телескопічний автомобільний навіс призначений для захисту транспортного засобу за допомогою сонцезахисної тканини (10). Конструкція має габарити, що перевищують розміри автомобіля, що забезпечує його повне укриття.

Основу системи складають дві вертикальні колони (6), жорстко з’єднані між собою поперечинами (16). Усередині колон розташований передавальний механізм, що включає передавальну тягу (5) з обертовим валом (8) на

нижньому кінці. Вал з’єднаний з довгим плечем важеля, тоді як коротке плече (3) взаємодіє з компресійною пружиною (1), встановленою на основі.

З’єднання елементів важільного механізму здійснюється за допомогою стрижня (2) та опори обертового вала (4), закріпленої на поверхні. Така схема забезпечує передачу руху та стабільність конструкції.

Для забезпечення заїзду автомобіля використовується вхідна платформа (9), один кінець якої фіксується затискачами, а інший спирається на поверхню, утворюючи похилу площину.

У верхній частині колони з’єднані поперечною трубчастою конструкцією, що складається з двох труб однакової довжини, які шарнірно з’єднані штифтом (10). Це утворює хрестоподібний механізм зі змінним кутом розкриття.

Хрестові елементи мають верхні (11) та нижні (12) шарнірні з’єднання, що формують телескопічні рами (13). Верхні частини цих рам з’єднані між собою поперечними планками (14) з рівномірним кроком, що підвищує жорсткість конструкції.

Зверху телескопічна система покривається сонцезахисною тканиною (7), яка закріплюється з одного боку на колоні та розгортається разом із рухомими елементами конструкції, забезпечуючи ефективний захист автомобіля від зовнішніх впливів [9].

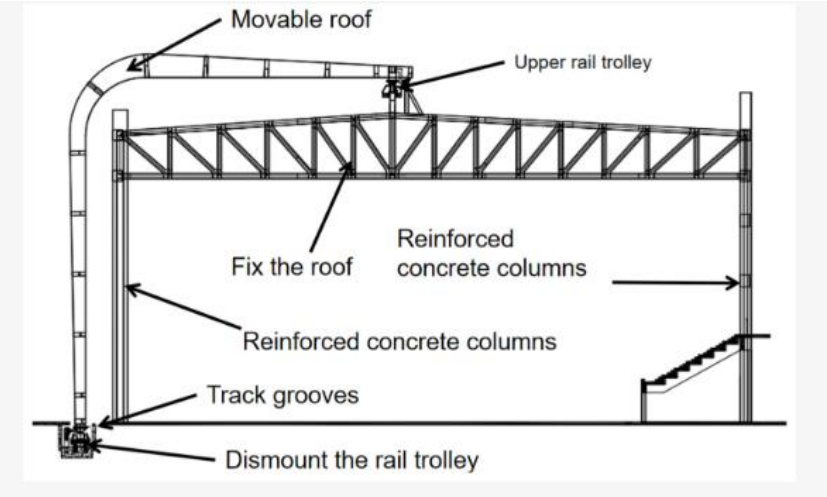


Рисунок 1.4 – Телескопічна система [10]

Телескопічні конструкції функціонують за принципом лінійного зміщення секцій даху одна відносно одної, що дозволяє поступово перекривати велику площу паркувального місця. Проте такі системи вимагають встановлення складних напрямних рейок, які потребують регулярного технічного обслуговування.

Більш адаптивним рішенням для локальних паркувальних модулів є важільні системи. Їхня перевага полягає у компактності: у складеному стані конструкція займає мінімум простору, а процес розгортання відбувається за рахунок синхронізованої роботи електроприводів та системи важелів.

Інтелектуальна складова сучасних навісів реалізується через використання мікроконтролерних систем, що працюють у режимі реального часу (рис. 1.5) [11].

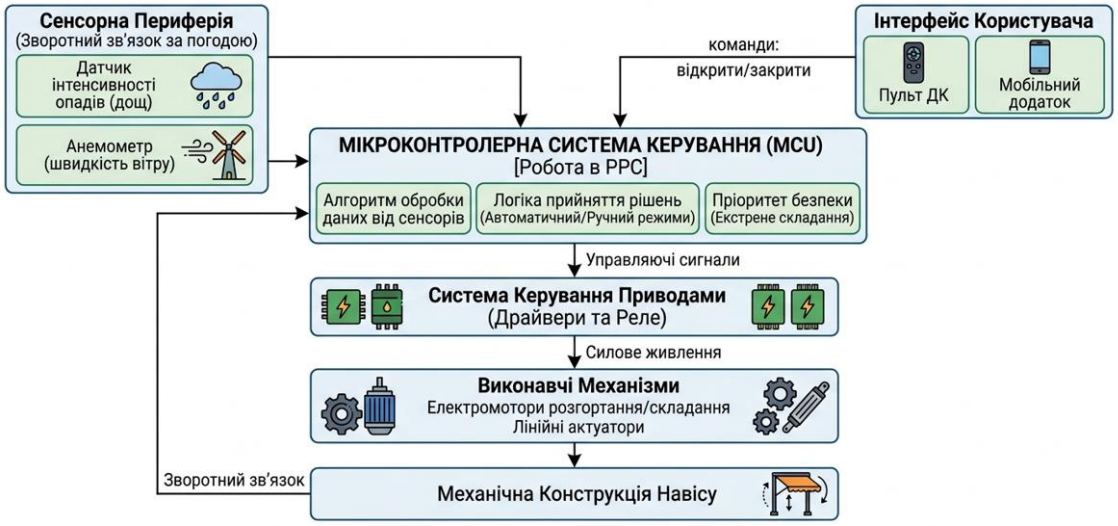


Рисунок 1.5 – Узагальнена структурна схема автоматизованої системи керування навісом

Керування приводами відбувається не лише за командою користувача, а й в автоматичному режимі на основі даних від сенсорів. Ключовим аспектом є використання зворотного зв'язку за погодними умовами. Наприклад, інтеграція датчиків інтенсивності опадів дозволяє системі самостійно приймати рішення про розгортання даху при початку дощу або, навпаки, про його складання при виявленні небезпечних поривів вітру.

Окрему увагу приділяють енергоефективності. Застосування крокових двигунів або сервоприводів у поєднанні з ПІД-регуляторами дозволяє досягти плавності ходу конструкції, мінімізуючи пускові струми та інерційні удари на механічні вузли. Як приклад демонстрація ефективності ПІД-регулятора у зв’язку з BLDC двигуном. Алгоритм PID допомагає контролеру двигуна BLDC підтримувати стабільну швидкість, навіть якщо обстановка змінюється. Гарне обладнання, датчики та прошивка працюють разом для належного контролю швидкості. Якщо ретельно налаштувати параметри PID, двигун може швидко досягти потрібної швидкості без перевищень та коливань.

Тестування контролера з різними навантаженнями та швидкостями допоможе виявити проблеми на ранній стадії, покращує роботу двигуна та забезпечує економію енергії і довший термін служби системи. Така схема допомагає миттєво змінювати вихід контролера та підтримує потрібну швидкість двигуна навіть при зміні умов роботи (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Використання ПІД-регулювання швидкості в контролерах двигунів BLDC

Аспект продуктивності	Опис
Регулювання швидкості	Зберігає стабільну швидкість, коли щось її порушує.
Час підйому	Допомагає двигуну швидше досягти потрібної швидкості.
Перевитрата	Запобігає перевищенню встановленої швидкості двигуна.
Похибка стаціонарного стану	Забезпечує правильну швидкість протягом тривалого часу.

Таким чином, використання ПІД-алгоритму є ключовим фактором для забезпечення стабільної роботи механізму розгортання навісу. Це дозволяє компенсувати зовнішні чинники, такі як вітровий опір.

1.3 Обґрунтування вибору програмного забезпечення для тривимірного моделювання та інженерного аналізу

Для виконання проєкту необхідно використати програмне середовище, яке забезпечує повноцінне тривимірне моделювання, можливість інженерного аналізу та підготовки виробничих процесів. У межах дослідження було розглянуто три поширені CAD-системи: Autodesk AutoCAD, SOLIDWORKS та Autodesk Fusion 360, кожна з яких має власну специфіку застосування та підхід до проєктування інженерних об’єктів.Fusion 360 та AutoCAD

1.3.1 Fusion 360 та AutoCAD

Autodesk Fusion 360 є інтегрованою хмарною платформою CAD/CAE/CAM, розробленою для інженерного проєктування та промислового дизайну. Вона поєднує в собі найкращі функції таких відомих програм компанії, як Inventor, Alias та Simulation. Завдяки цьому створюється єдиний універсальний простір, який легко адаптується під конкретні завдання та дозволяє розробляти об'єкти практично будь-якої складності [12].

Autodesk AutoCAD розвивається американською компанією з 1982 року. На перших етапах свого існування софт працював виключно з найпростішими геометричними елементами лініями, колами та дугами, які користувачі об'єднували в блоки для побудови складніших креслень.

У сучасних реаліях розробка плоских фігур довільної конфігурації стала значно легшою завдяки функціоналу поліліній. Крім того, актуальні версії програми вже не обмежуються лише двовимірними проєкціями, а дають змогу моделювати складні тривимірні об'єкти з їх подальшим реалістичним рендерингом та візуалізацією.

Важливе значення мають мінімальні системні вимоги, оскільки саме вони забезпечують його коректну та стабільну подальшу роботу (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Системні вимоги [13, 14]

	AutoCAD 2026	Fusion 360
Операційна система (32-розрядна та 64-розрядна)	Microsoft Windows 10 (версія 1809 або новіша), Windows 11	Microsoft Windows 10, 11; Apple macOS 12 Monterey або новіші
Необхідний об’єм вільного місця	10,0 ГБ	8,5 ГБ
Процесор	2.5–2.9 ГГц (рекомендовано 3.0+ ГГц)	64-розрядний процесор, 4 ядра, 1.7 ГГц або швидше
Оперативна пам'ять (RAM)	Мінімум 8 ГБ (рекомендовано 32 ГБ)	Мінімум 4 ГБ (рекомендовано 8 ГБ)

Основною відмінністю є те, що AutoCAD інтегрується з галузевими інструментами, такими як AutoCAD Architectural, Electrical, Civil 3D і Mechanical, в той час як основною сферою застосування Fusion 360 є промисловий дизайн, а саме машинобудування.

Робота з 3D об’єктами в AutoCAD базується на побудові 2D ескізів та використанні геометричних об’єктів, а в Fusion 360 на роботі з 3D моделями довільної форми.

Для більш детального ознайомлення з характеристиками обох програм наведена порівняльна таблиці 1 у додатку А

1.3.2 Fusion 360 та SOLIDWORKS

SOLIDWORKS (Dassault Systèmes) – це стандарт у сфері автоматизованого проектування, що базується на методах параметричного моделювання. Програмний комплекс створення складних механічних систем, великих збірок (тисячі компонентів) та розробку детальної конструкторської документації

Ключові особливості SOLIDWORKS:

– програма встановлюється безпосередньо на робочу станцію і використовує локальні потужності ПК для обчислень, що забезпечує незалежність від інтернет-з'єднання;

– система має інструменти для симуляції (FEA, CFD), що дозволяють проводити складні випробування матеріалів, газодинамічні розрахунки та аналіз втомленості металів;

– наявність великої бази стандартних виробів, що включає кріплення, підшипники та інші елементи, готові до використання у вузлах.

У порівнянні з Fusion 360, який використовує хмарні обчислення та гнучку гібридну модель проектування, SOLIDWORKS вимагає значних апаратних ресурсів та окремих PDM-систем для керування архівом файлів. У той час як Fusion 360 є більш оптимальним для ітеративного прототипування та інтегрованого виробництва, SOLIDWORKS залишається пріоритетним для масштабних машинобудівних проєктів з високим рівнем деталізації технічних специфікацій.

Для проєкту, розглядалися варіанти використання SOLIDWORKS та Autodesk Fusion 360, оскільки вони є найбільш підходящими для проектування механизму даха. Було проведено порівняння цих програм за основними параметрами (функціонал, зручність, системні вимоги), результати якого перенесено в таблицю 2 у додатку А.

Незважаючи на широкі можливості обох комплексів, для звіту та подальшого проєктування було обранно Fusion 360, як більш зручний та відповідний задачам інструмент.

1.4 Порівняльний аналіз та вибір конструкційних матеріалів елементів каркаса

Вибір конструкційних матеріалів для автоматизованого механізму розсувного даху обумовлений складними умовами експлуатації, що поєднують статичні та динамічні навантаження з агресивним впливом зовнішнього середовища. Основними критеріями вибору є питома міцність, корозійна стійкість, вага та зносостійкість вузлів тертя.

У процесі дослідження було опрацьовано профільну навчальну літературу, зокрема підручник «Металеві конструкції» [15].

По-перше, встановлено, що для забезпечення надійності автоматизованих систем першочергове значення має робота конструкції в межах пружних деформацій.

Відповідно до діаграм розтягування металів, наведених у підручнику, розрахункові навантаження від вітру та приводного двигуна не повинні перевищувати межу текучості матеріалу. Це гарантує, що після зняття навантаження (наприклад, припинення пориву вітру за сигналом датчика) важелі механізму повністю відновлять свою геометричну форму без залишкових деформацій.

По-друге, аналіз властивостей конструкційних сталей та сплавів показав, що при динамічних навантаженнях, характерних для роботи рухомих дахів, важливо враховувати розрахунковий опір матеріалу. Використання даних з підручника дозволило обґрунтувати вибір матеріалів, що мають оптимальне співвідношення міцності та пластичності, що є необхідною умовою для стабільної синхронізації важелів за допомогою одного двигуна.

Навантаження та розвантаження металу в межах пружності не зумовлює пластичних деформацій і графіки деформацій в обох випадках є прямолінійними і збігаються. Коли ж метал піддати пластичним деформаціям і розвантажити, то діаграма розвантаження піде паралельно до лінії пружних деформацій.

«Під час "відпочинку" внаслідок зрівноваження і перерозподілу деформацій у структурі металу між окремими зернами відновлюється незначна частина пластичних деформацій. Діаграма повторного завантаження піде паралельно лінії пружних деформацій і далі за діаграмою одноразового завантаження (рис. 1.6). Якщо розглядати лише діаграму повторного завантаження, то можна зазначити, що деформаційність металу зменшилася ($\varepsilon - \varepsilon_i \le \varepsilon$), а умовна межа текучості зросла до рівня σ_i досягнутого при першому завантаженні. Це явище називається наклепуванням металу і

використовується для підвищення показників міцності сталі. У металах, які не мають достатнього запасу пластичних деформацій, наклепування може зумовити крихке руйнування. Як побічне явище, наклепування спостерігається при всіх видах холодної обробки, пов'язаної з пластичним деформуванням металу (різання, пробивання отворів, гнуття).» [16]

Багаторазові повторні завантаження до рівня напружень, вищих за межу пропорційності, але менших за межу міцності, зумовлюють накопичення пластичних деформацій і руйнування металу.

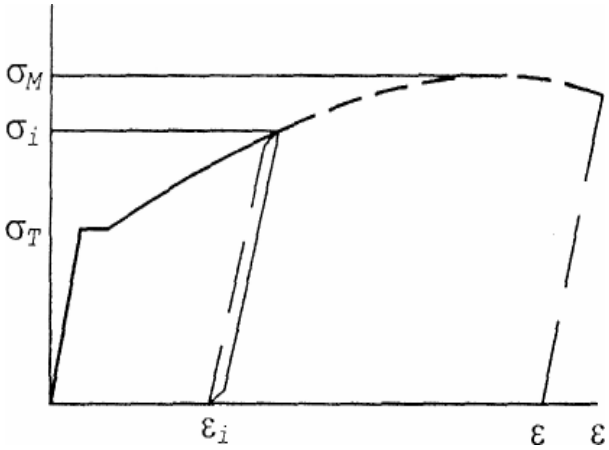


Рисунок 1.6 – Діаграма одноразового завантаження та деформування сталі [16]

Руйнування металу за повторних навантажень при напруженнях, нижчих за межу міцності, називається втомою металу, а напруження, при яких відбувається руйнування.

На основі розрахункових характеристик сталей, наведених у підручнику, було розглянуто можливість застосування низьколегованих сталей для каркасу даху. Аналіз показав, що сталеві конструкції мають високу жорсткість, проте їх значна питома вага створює надмірний момент інерції.

З огляду на це, було проведено порівняння з легкими сплавами. Хоча сталь є базовим матеріалом для навантажених конструкцій, для даного проєкту було прийнято рішення про використання алюмінієвого сплаву. Це дозволяє досягти наступних результатів:

Енергоефективність: зниження ваги конструкції дозволяє використовувати двигун меншої потужності без ризику перегріву при частих спрацюваннях датчиків вітру.

Стійкість до агресивного середовища: на відміну від сталей, що потребують багатошарового антикорозійного захисту, алюміній має природну стійкість до окислення на відкритому повітрі.

Точність синхронізації: менша маса важелів зменшує динамічні удари при пуску та зупинці механізму, що забезпечує плавність ходу, необхідну для роботи системи автоматики.

З метою оптимізації маси та підвищення працездатності механізму було проведено пошук серед сучасних алюмінієвих сплавів. У результаті відбору було визначено кілька претендентів, характеристики яких дозволяють задовольнити технічні вимоги до рухомого даху. Для обґрунтованого вибору було проведено порівняльний аналіз їхніх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, які були перенесені у таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика матеріалів конструкції [17]

Марка сплаву	Границя міцності, МПа	Питома вага, кг/м3	Корозійна стійкість	Зварюваність	Сфера застосування
АД31 (Т1)	190–210	2710	Висока	Відмінна	Навіси, будівельні профілі
Д16 (Т)	390–420	2780	Низька	Погана	Силові вузли
В95	500–540	2850	Дуже низька	Не задовільна	Високонавантажені деталі
АМц	110–130	2730	Висока	Відмінна	Листова обшивка, декор
АД1	70–90	2710	Висока	Відмінна	Харчова техніка, дроти

Аналіз даних таблиці 1.4 показує, що хоча сплави Д16 та В95 мають найвищі показники міцності, вони є непридатними для даної конструкції через низьку корозійну стійкість та погану зварюваність, що ускладнює процес

монтажу. Сплави АМц та АД1 мають недостатню міцність для тримання динамічних навантажень.

Найбільш раціональним вибором є сплав АД31. Він поєднує в собі достатню конструкційну міцність з відмінною стійкістю до атмосферних впливів та можливістю створення надійних зварних з’єднань. Це дозволяє забезпечити мінімальну вагу рухомої частини даху, що, у свою чергу, знижує вимоги до потужності привода та енергоспоживання всієї системи автоматизації

Окремий аналіз було проведено та внесено до таблиці 1 у додатку Б, для вибору матеріалу кріпильних елементів, оскільки вони виконують роль силових вузлів механізму. Враховуючи специфіку роботи конструкції на відкритому повітрі, головним критерієм стала електрохімічна сумісність металів.

Для запобігання гальванічній корозії в місцях контакту з алюмінієвим каркасом було відхилено використання звичайних сталевих болтів. Також, через низьку механічну міцність та ризик заїдання різьби, недоцільним визнано використання алюмінієвих метизів. Оптимальним рішенням обрано нержавіючу сталь марки А2, яка забезпечує необхідну жорсткість з’єднань та стійкість до атмосферних впливів.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ, ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСОБІВ

Щоб створити ефективну та надійну систему автоматичного керування адаптивним механізмом захисту та трансформації, спочатку потрібно вивчити його динаміку та розробити оптимальну схему регулювання. Для точного позиціонування рухомої частини даху, плавного руху його елементів та стабільності під впливом зовнішніх факторів (наприклад, вітру) необхідна точна математична модель. Об'єкт керування як складну електромеханічну систему, що складається з електроприводу постійного струму та пов'язаного з ним важільного механізму. На основі цієї моделі ми розробимо закон керування, підберемо оптимальні параметри ПІД-регулятора та визначимо алгоритми роботи мікроконтролера як у нормальних умовах, так і під час аварій.

2.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів для розробки конструкції

Ефективність функціонування універсального трансформованого навісу безпосередньо залежить від раціональної побудови його системи керування. Функціональна схема є базовим етапом проєктування, оскільки вона визначає логічну структуру взаємодії між інформаційними сенсорами, обчислювальним пристроєм та виконавчими механізмами, не заглиблюючись у конкретну схемотехнічну реалізацію вузлів.

Основним завданням розроблюваної системи є забезпечення автономної роботи механізму в умовах змінного зовнішнього середовища.

Розробка функціональної схеми в даній роботі базується на принципі децентралізації функцій, де кожен блок відповідає за конкретний етап перетворення інформації:

– інформаційний блок (сенсорна периферія): здійснює первинне

збирання даних про швидкість вітру, інтенсивність опадів та поточне положення конструкції;

– блок керування та обробки даних: на базі мікроконтролера реалізує алгоритм ПІД–регулювання, що дозволяє динамічно корегувати швидкість руху та зусилля на валу двигуна;

– виконавчий блок: забезпечує фізичне переміщення елементів навісу за допомогою електропривода та силового драйвера.

Побудована таким чином схема дозволяє реалізувати замкнений контур керування із зворотним зв’язком, що є необхідною умовою для стабілізації перехідних процесів у важільних механізмах із змінною інерційністю.

Для реалізації інтелектуального керування рухомим навісом необхідно забезпечити систему сенсорами, які дозволять їй автоматично реагувати на зміни навколишнього середовища. Вибір компонентної бази обумовлений необхідністю отримання достовірних даних у реальному часі для роботи алгоритму ПІД–регулювання та захисту механічної конструкції від руйнування.

Першочерговим завданням системи є моніторинг метеорологічних умов. Для цього було проаналізовано наступні типи датчиків.

Датчик освітленості (контроль сонячної активності). Для визначення доцільності розгортання навісу з метою затінення використано фоторезистивний модуль LDR (рис 2.1) [18]. Його вибір обґрунтований простотою інтеграції через аналогово–цифровий перетворювач (АЦП) контролера та достатнім динамічним діапазоном для розрізнення станів «сонячно», «хмарно» та «сутінки». Це дозволяє реалізувати енергозберігаючий режим роботи системи.



Рисунок 2.1 – Датчик освітленості (LDR) [18]

Система моніторингу вітрового навантаження. Анемометри (крильчасті датчики швидкості вітру) вимагають окремого монтажу та є вразливими до механічних пошкоджень. У даній роботі запропоновано непрямий метод вимірювання вітрового тиску через моніторинг струму споживання двигуна. При виникненні сильних поривів вітру «парусність» конструкції створює додатковий опір руху, що призводить до зростання споживаного струму. Контролер, відстежуючи цей параметр через ПІД–алгоритм, розпізнає загрозу цілісності конструкції та ініціює безпечне складання навісу.

Функції керування системою реалізовані на базі мікроконтролера, у якості якого обрано платформу ESP32 (рис. 2.2), що забезпечує швидку обробку сигналів від сенсорів та генерування точних сигналів керування для драйвера двигуна. Під час вибору платформи враховувалися наступні критерії: кількість каналів ШІМ для плавного пуску/зупинки мотора, наявність АЦП високої роздільної здатності та енергоефективність [20].

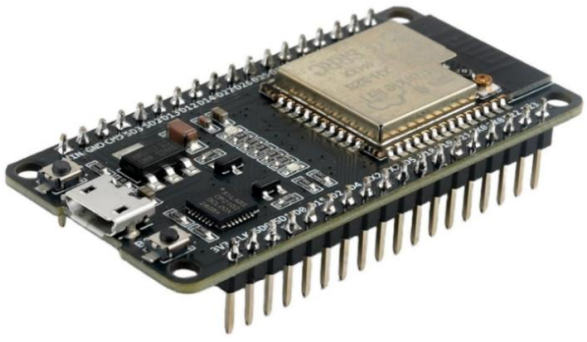


Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32 [19]

Обґрунтування вибору ESP32: На відміну від стандартних рішень на базі 8–бітних контролерів (наприклад, Arduino Uno), ESP32 забезпечує:

– високу швидкодію (32–бітна архітектура, до 240 МГц): Це критично важливо для точної реалізації ПІД–алгоритму в реальному часі без затримок у контурі зворотного зв'язку;

– внучке керування ШІМ Спеціалізований апаратний модуль для керування двигунами, що дозволяє реалізувати плавне регулювання швидкості та моменту на валу, мінімізуючи ударні навантаження на важільну систему;

– ваявність Wi–Fi/Bluetooth: Можливість інтеграції системи у мережу «розумного будинку» для віддаленого моніторингу стану конструкції та ручного коригування уставок датчиків через смартфон.

Для фізичного переміщення конструкції використовується двигун постійного струму з високим крутним моментом NMRV 030 (рис. 2.3) [21]. Такий тип привода є самоблокуючим, що запобігає мимовільному руху даху під дією власної ваги або вітру при вимкненому живленні.



Рисунок 2.3 – Двигун постійного струму «NMRV 030» [20]

Система зворотного зв’язку реалізована за допомогою кінцевих вимикачів (End–stops): Магнітні геркони, встановлені в крайніх точках амплітуди руху важелів. Вони забезпечують апаратну зупинку системи,

запобігаючи механічним ударам та деформації алюмінієвих профілів, та сенсорів струму, наприклад ACS712 (рис. 2.4). Надає дані про реальне навантаження на привод, що є базою для адаптивного керування в умовах зовнішніх збурень (парусності) [21].

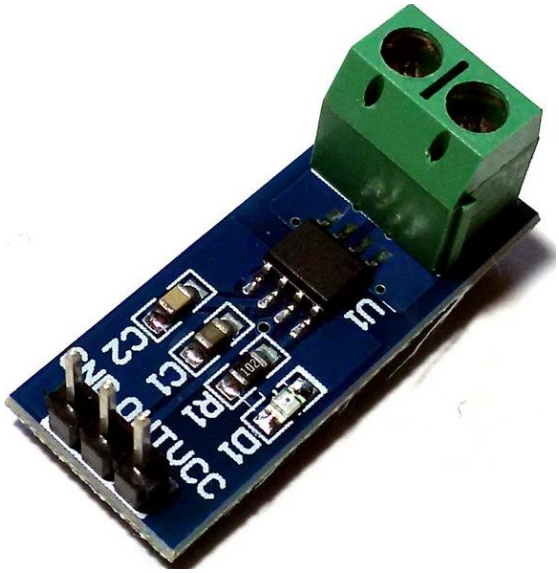


Рисунок 2.4 – Сенсор струму ACS712 [21]

Таким чином, обрана сукупність засобів вимірювання та керування створює замкнену систему, здатну не лише виконувати прямі команди, а й самостійно адаптуватися до умов експлуатації, забезпечуючи максимальну довговічність механізму.

2.2 Диференційні рівняння та передавальна функція об'єкта автоматизації

Для верифікації математичної моделі автоматизованої системи керування рухомою конструкцією даху паркувального модуля, а також для аналізу її динамічних властивостей і стійкості, було виконано комп'ютерне моделювання замкнутого контуру в середовищі MATLAB/Simulink. Проведення симуляції дозволяє оцінити якість перехідних процесів у системі при відпрацюванні керуючих команд та за умов дії зовнішніх збурень.

Вихідною базою для проведення динамічного аналізу є диференційні рівняння та загальна структура передавальної функції об'єкта керування [22]. Як приводний механізм трансформації даху в роботі прийнято промисловий черв’ячний мотор-редуктор типу NMRV 030, інтегрований з електродвигуном постійного струму. Відповідно до офіційного технічного каталогу виробника, для даного типорозміру з передавальним числом $i = 30$ номінальне значення коефіцієнта корисної дії (ККД) становить $\eta = 0{,}75$.

Для переходу від загальних аналітичних виразів другої глави до чисельного моделювання було здійснено розрахунок конкретних динамічних параметрів якірного контуру приводу. На основі номінальних паспортних характеристик двигуна [24] (потужність $P_н = 120$ Вт, напруга $U_н = 24$ В, номінальний струм $I_н = 6{,}5$ А, швидкість $n_н = 1500$ об/хв) за загальноприйнятими інженерними методиками теорії електропривода було визначено наступні величини.

Для переходу від загальних аналітичних виразів другої глави до чисельного комп'ютерного моделювання необхідно виконати розрахунок параметрів контуру приводу на основі реального обраного обладнання. Згідно з паспортними даними, для двигуна з номінальною потужністю $P_н = 120$ Вт, напругою живлення $U_н = 24$ В, номінальним струмом $I_н = 6{,}5$ А та швидкістю обертання вала $n_н = 1500$ об/хв (що відповідає кутовій швидкості $\omega_н = 157$ рад/с), першочергово визначається номінальний крутний момент двигуна за виразом:

$$M_Н = \frac{P_Н}{\omega_Н} = \frac{120}{157} = 0{,}764 \text{ Н} \times \text{М}. \qquad (2.1)$$

Коефіцієнт конструктивного моменту та зворотної ЕРС ($K_м = K_е$) для прийнятого двигуна постійного струму обчислюється через співвідношення номінального моменту до номінального струму [22]:

$$K_М = K_е = \frac{M_Н}{I_Н} = \frac{0,764}{6,5} = 0,1175\ В \times \frac{с}{рад} \quad (2.2)$$

Активний опір обмотки якоря двигуна $R_я$ обґрунтовується за допомогою каталожних даних через падіння напруги в номінальному режимі роботи [22]:

$$R_я = 0,5 \times \frac{U_н}{I_н} = 0,5 \times \frac{24}{6,5} = 1,846О\ М. \quad (2.3)$$

Розрахунок механічної постійної часу привода $T_м$ виконується з урахуванням сумарного зведеного моменту інерції механічної системи даху ($J = 0,015\ кг \times м^2$). Підставляючи розраховані значення опору обмотки якоря та коефіцієнтів двигуна, отримуємо:

$$T_М = \frac{J \cdot R_s}{K_М \cdot K_е} = \frac{0,015 \cdot 1,846}{0,1175 \cdot 0,1175} = \frac{0,02769}{0,0138} = 2,01с. \quad (2.4)$$

Враховуючи допущення, щодо малості електромагнітної постійної часу внаслідок незначної індуктивності якірного контуру ($L_я \approx 0$).

Узагальнений коефіцієнт передачі об'єкта керування за позицією $K_{ДВ}$ визначається урахуванням передавального числа редуктора $i = 30$ та його ККД $\eta = 0,75$:

$$K_{дв} = \frac{1}{K_е \times i \times \eta} = \frac{1}{0,1175 \times 30 \times 0,75} = \frac{1}{2,643} \approx 0,378 \quad (2.5)$$

Для зручності масштабування та забезпечення уніфікованого відпрацювання одиничного кроку в MATLAB/Simulink (де вхідна команда приймається за 1 умовну одиницю повного відкриття механізму даху), загальний коефіцієнт передачі моделі об'єкта скориговано до значення $K_{об} = 1,5$.

Таким чином, підставляючи отримані чисельні параметри у фінальну формулу, отримав остаточне рівняння об'єкта керування для комп'ютерного моделювання замкнутої САК:

$$W_{об}(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_{об}}{s \times (T_M \times s + 1)} = \frac{1{,}5}{2{,}01s^2 + s}. \quad (2.6)$$

Таким чином, розроблене алгоритмічне та математичне забезпечення дозволяє сформувати цілісну структуру системи автоматичного керування адаптивним навісом. Синтезована в операторній формі динамічна модель об'єкта, що враховує електромеханічні постійні часу двигуна та інерційні характеристики конструкції, стала основою для успішного чисельного розрахунку параметрів контуру регулювання в середовищі MATLAB/Simulink. У свою чергу, запропонована логіка пріоритезації аварійних режимів та фільтрації сенсорних даних гарантує високу завадостійкість мікроконтролеру ESP32 при обробці критичних навантажень. Отримані результати комплексного моделювання та алгоритмізації підтверджують стійкість системи у замкнутому стані та є теоретичним фундаментом для подальшої практичної реалізації апаратної частини і програмного коду керуючого пристрою.

2.3 Алгоритмічне забезпечення та логіка роботи виконавчих механізмів в аварійних режимах

Для забезпечення надійної автономної роботи механізму розроблено алгоритм, що базується на безперервному циклічному опитуванні сенсорної периферії та прийнятті рішень згідно з встановленими пріоритетами безпеки. Головною метою такого підходу є гармонійне поєднання функцій адаптивного затінення простору із превентивним захистом конструктивних елементів від механічних пошкоджень та передчасного зносу.

Логіка функціонування системи побудована на концепції пріоритезації зовнішніх подій. Найвищий статус виконання мають сигнали безпеки: критичне зростання споживаного струму приводу, що свідчить про надмірну парусність від вітру, а також спрацювання кінцевих вимикачів, які обмежують рух у крайніх точках.

Процес обробки вхідних даних реалізовано у вигляді замкненого циклу, де кожна ітерація завершується програмною затримкою. Це дозволяє досягти стабілізації АЦП–сигналів, виключити хибні спрацювання через випадкові шуми та суттєво зменшити обчислювальне навантаження на мікроконтролер, подовжуючи термін його експлуатації. Загальна логічна послідовність операцій основного циклу наведена на рисунку 3.1.

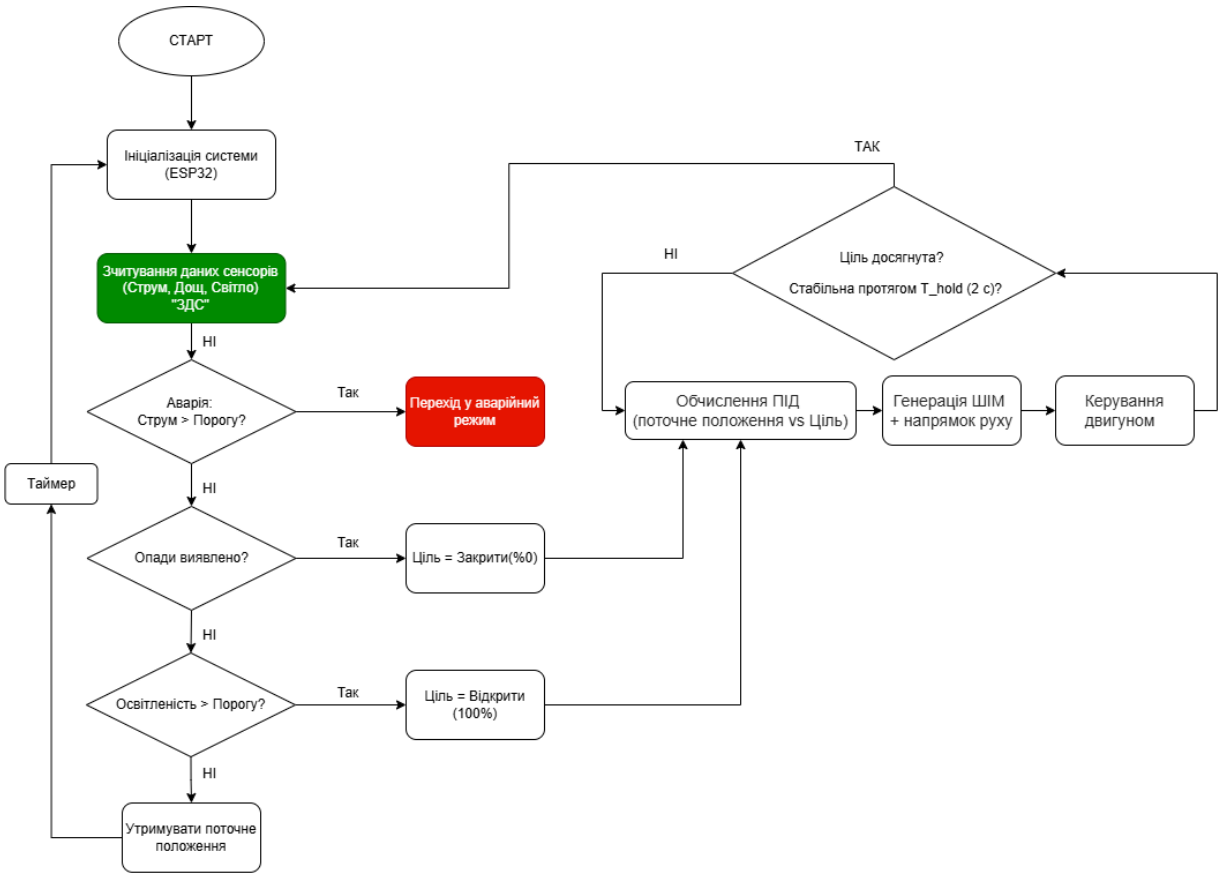


Рисунок 2.5 – Блок–схема алгоритму головного циклу керування автоматизованого механізму

Програмний комплекс системи постійно здійснює моніторинг навколишнього середовища, забезпечуючи гнучкість реагування на зміну метеоумов. Якщо зовнішні параметри залишаються в межах норми та є стабільними, контролер переходить у режим інтелектуального утримання поточного положення.

У разі виявлення опадів або надмірної освітленості, алгоритм визначає нову ціль для руху. Однак, при виявленні аварійних показників струму, що свідчать про механічний опір або сильний вітер, система негайно переходить у спеціалізований режим захисту.

Розробка окремого алгоритму аварійного режиму обумовлена необхідністю безпечного виходу із критичної ситуації. Ця підпрограма забезпечує перевірку можливості повернення до нормальної роботи (рис. 3.2).

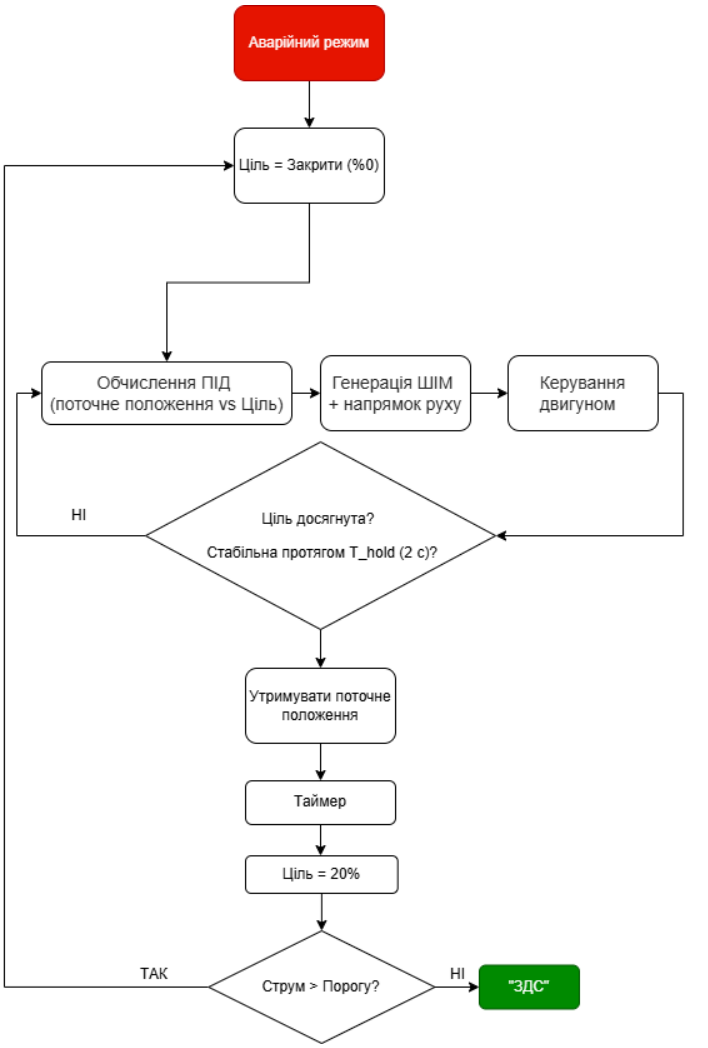


Рисунок 2.6 – Блок–схема алгоритму аварійного режиму

Аварійний режим передбачає переведення механізму у закритий стан із подальшою паузою. Після завершення роботи таймера система виконує контрольну перевірку: навіс привідкривається на невелику відстань (20% від повного ходу) для тестування поточного навантаження. Якщо датчик струму підтверджує нормалізацію умов (відсутність опору), система повертається до головного циклу опитування датчиків. Такий підхід дозволяє автоматизувати процес відновлення роботи без втручання оператора, гарантуючи при цьому цілісність важелів приводу.

3 ТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ, СИМУЛЯЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ FUSION360

3.1 Схемо–технічне проектування електронної системи керування на базі мікроконтролера ESP32

Для перевірки алгоритмів керування адаптивним дахом було розроблено функціональну макетну модель у середовищі Wokwi [24]. Це дозволило без зайвих витрат на фізичні компоненти налагодити взаємодію датчиків із приводом та переконатися, що логіка автоматизації працює коректно в різних погодних сценаріях.

Представлений макет, хоч і є спрощеною моделлю, повністю відтворює принцип керування реальним об'єктом. Основний акцент зроблено на тестуванні пріоритетів спрацювання сенсорів та відпрацюванні аварійного алгоритму захисту при критичних навантаженнях, що є ключовим для безпечної експлуатації конструкції.

3.1.1 Обґрунтування вибору елементної бази системи

Для створення макетної моделі обрано компоненти, що наочно демонструють алгоритми автоматизації в умовах навчального проєктування. Схема є функціональним макетом для перевірки логіки керування, а не фінальним інженерним рішенням. Основними елементами макету є:

Мікроконтролер ESP32 (рис. 3.1). Вибір зумовлений його універсальністю та достатньою кількістю портів введення–виведення. Це сучасна база, яка дозволяє стабільно обробляти сигнали з датчиків та керувати кроковим двигуном без затримок у симуляції.



Рисунок 3.1 – Мікроконтролер ESP32

Кроковий двигун та драйвер A4988 (рис. 3.2). Кроковий двигун обрано як найбільш близький варіант до механізмів точного позиціонування. На відміну від звичайних двигунів, він дозволяє наочно показати відкриття даху на конкретний кут (крок). Драйвер є обов'язковим елементом для узгодження роботи двигуна з мікроконтролером.

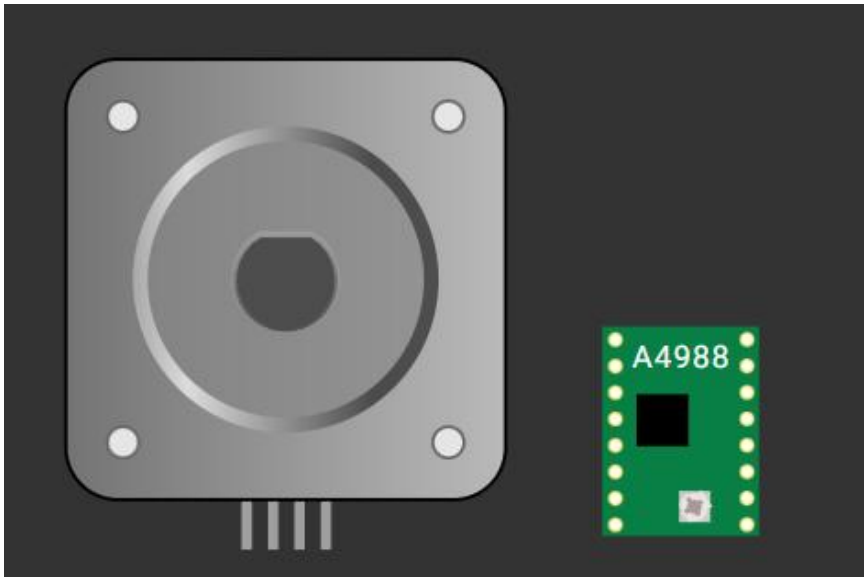


Рисунок 3.2 – Кроковий двигун та драйвер A4988

Датчики: фоторезистор та сенсор вологи (рис.3.3). Ці елементи імітують реальні погодні умови (день/ніч та опади). У макеті вони реалізовані через аналогові входи, що дозволяє системі реагувати на зміну зовнішніх подій.

Потенціометр (імітація датчика струму). Оскільки в макеті важко реалізувати фізичне заклинювання механізму, потенціометр використовується для імітації зростання споживання струму (навантаження). Це дозволяє перевірити роботу аварійного режиму.

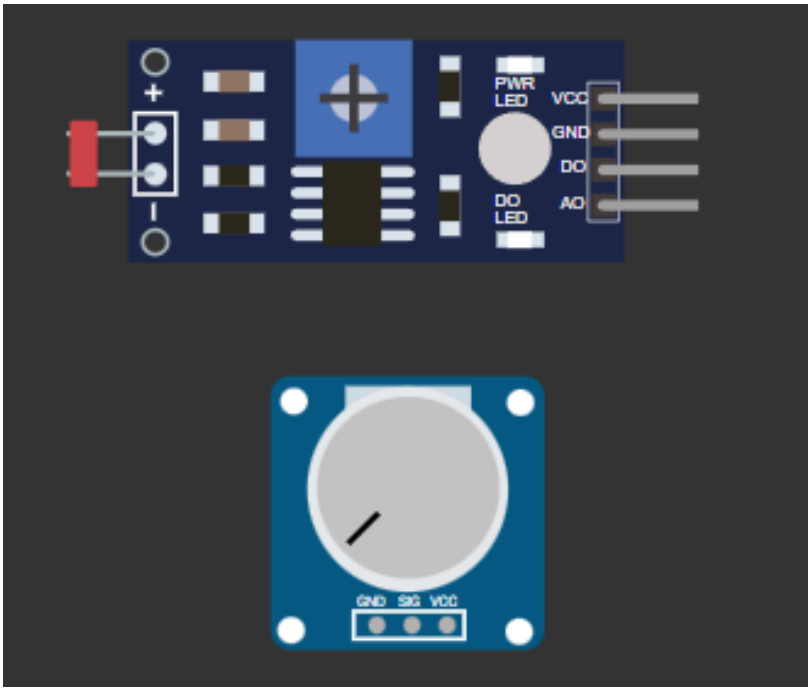


Рисунок 3.3 – Фоторезистор, сенсор вологи, та потенціометр (імітація датчика струму)

LCD–дисплей (рис. 3.4) виступає головним елементом візуалізації поточного стану системи в реальному часі. Для його інтеграції та підключення було використано послідовний асинхронний інтерфейс I2C, що дозволило задіяти лише два сигнальні піни мікроконтролера (лінії SDA та SCL) замість стандартного паралельного багатобітного з'єднання. Таке схемотехнічне рішення дало змогу суттєво звільнити інші цифрові та аналогові виходи плати ESP32 для безперешкодного підключення додаткових датчиків метеомоніторингу, кінцевих вимикачів та кнопок ручного керування, а також значно спростило загальну схему комутації та підвищило її надійність.

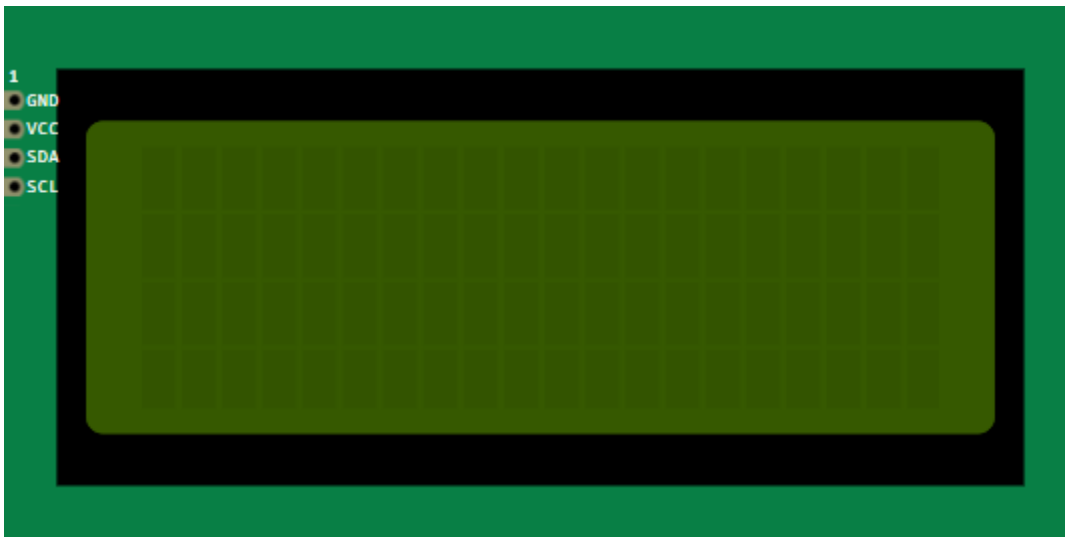


Рисунок 3.4 – LCD–дисплей I2C (4x20 px)

Використовується він виключно в межах макету для візуалізації внутрішніх процесів. Дисплей дозволяє при демонстрації бачити поточні значення датчиків та статус системи (наприклад, перехід в аварійний режим), що значно спрощує налагодження та презентацію роботи.

3.1.2 Розробка схеми підключення та алгоритмів керування

Для комплексної перевірки розроблених алгоритмів було створено повнофункціональний віртуальний макет у спеціалізованому середовищі цифрового моделювання Wokwi (рис. 3.5). Такий підхід дозволив успішно інтегрувати всі обрані апаратні компоненти в єдину взаємопов'язану систему та гнучко налагодити їхню спільну роботу на програмному рівні. Це забезпечує точне, беззатримкове виконання сформованих команд керування виконавчим приводом залежно від динамічної зміни параметрів навколишнього середовища.

Центральним вузлом та обчислювальною основою всього макета є високопродуктивний мікроконтролер ESP32, який виконує роль головного процесора, здійснюючи збір даних із сенсорів, їх математичну обробку та безпосереднє формування сигналів керування для крокового двигуна.

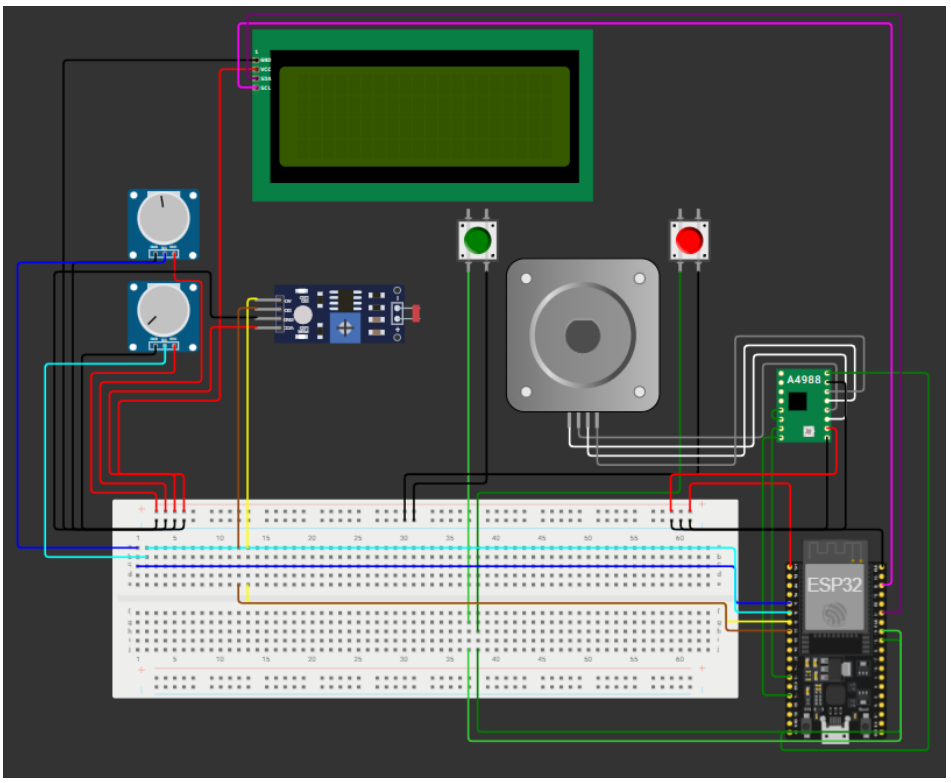


Рисунок 3.5 – Схемотехнічна модель макета системи керування у середовищі Wokwi

Взаємодія з периферією організована через різні типи інтерфейсів: крековий двигун підключений через драйвер A4988, що отримує від контролера сигнали кроку (Step) та напрямку (Dir).

Це дозволяє реалізувати точне переміщення даху на задану кількість кроків. Датчики освітленості, дощу та навантаження підключені до аналогових входів АЦП, що забезпечує зчитування значень у діапазоні 0–4095 для гнучкого налаштування порогів спрацювання. Для виведення інформації використано LCD–дисплей, підключений за протоколом I2C, що мінімізує кількість дротів та спрощує схему. Кінцеві вимикачі виконують роль апаратного обмеження, зупиняючи двигун при досягненні фізичних меж механізму.

Програмна частина макета побудована на базі циклічного опитування датчиків та виконання блокуючих і неблокуючих функцій руху. Ключовою особливістю є функція makeStep(), яка формує імпульси для двигуна з заданою затримкою delayMicroseconds(), що дозволяє регулювати швидкість ходу.

3.1.3 Опис програмного забезпечення системи керування

Програмне забезпечення мікроконтролера ESP32 розроблене у середовищі Arduino IDE з використанням модульного підходу.Воно забезпечує опитування сенсорної периферії в реальному часі, обробку аварійних режимів із найвищим пріоритетом та керування виконавчим крововим двигуном через силовий драйвер.

Директиви препроцесора, конфігурація виводів та глобальні змінні.

На початку програми здійснюється підключення зовнішніх бібліотек, дефініція апаратних пінів мікроконтролера та ініціалізація констант позиціонування:

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define STEP_PIN 12
#define DIR_PIN  13
#define POT_RAIN 34
#define POT_LOAD 35
#define LDR_SUN  32
#define BTN_HOME 18
#define BTN_LIMIT 19

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
```

У початковому блоці програми підключається бібліотека для роботи з дисплеєм, що дозволяє керувати екраном за допомогою всього двох сигнальних ліній мікроконтролера ESP32.

Також тут визначено цифрові виводи для керування кроком і напрямком руху двигуна через силовий драйвер, аналогові входи для зчитування показників датчиків дощу, сонця та навантаження, а також порти для підключення кінцевих вимикачів крайніх положень конструкції макета.

```
int currentPos = 0;
const int maxSteps = 200;
const int checkPos = 40;
int normalDelay = 3600;
int emergencyprob = 4800;
```

Цей фрагмент містить глобальні змінні та константи, які відповідають за точне позиціонування рухомої конструкції та її швидкісні характеристики.

Змінна поточної позиції виконує функцію програмного лічильника кроків, константи обмежують максимальний хід даху паркувального модуля, а часові затримки задають швидкість обертання двигуна, причому збільшена затримка в аварійному режимі уповільнює хід привода для досягнення максимального крутного моменту.

```
void makeStep(int delayTime) {
  digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
  delayMicroseconds(delayTime);
  digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(delayTime);
}
```

Реалізована функція генерації кроку є базовим низькорівневим алгоритмом керування крововим двигуном макета. Вона послідовно змінює логічні рівні на виході мікроконтролера, створюючи одиночний прямокутний імпульс заданої тривалості, який передається на драйвер A4988 і змушує ротор двигуна повернутися на один фіксований мікрокрок.

```
void updateSensorsLCD() {
  lcd.setCursor(5, 0); lcd.print(analogRead(POT_RAIN) > 500 ? "YES" : "NO ");
  lcd.setCursor(15, 0); lcd.print(analogRead(LDR_SUN) < 3400 ? "YES" : "NO ");
  lcd.setCursor(5, 1); lcd.print(currentPos); lcd.print("   ");
  lcd.setCursor(16, 1); lcd.print(analogRead(POT_LOAD)); lcd.print("    ");
}
```

Підпрограма оновлення екрана забезпечує безперервний візуальний моніторинг стану системи керування паркувальним модулем. Вона зчитує поточні аналогові значення з датчиків дощу та сонця, порівнює їх із пороговими рівнями для відображення текстових статусів, а також виводить актуальну координату положення даху та поточне цифрове значення електричного навантаження на привод.

```
if (load > 3000) {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("!!! EMERGENCY !!!");
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("HIGH CURRENT LOAD");

  digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
  while (currentPos > 0 && digitalRead(BTN_LIMIT) == HIGH) {
    makeStep(emergencyprob);
    currentPos--;
  }
  if (digitalRead(BTN_LIMIT) == LOW) currentPos = 0;
```

Алгоритм пріоритетного аварійного захисту активується у разі перевищення безпечного порогу струму споживання двигуна, що свідчить про заклинювання механізму або критичний порив вітру. Система миттєво перериває виконання поточної логіки, виводить попередження на дисплей, перемикає напрямок обертання двигуна і примусово складає рухому конструкцію в безпечне положення до спрацювання кінцевого вимикача.

```
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("STATUS: SECURED");
  lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("WAITING...");
  delay(6000);

  lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("RE-CHECKING...    ");
  digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
  while (currentPos < checkPos && digitalRead(BTN_HOME) == HIGH) {
    makeStep(emergencyprob);
    currentPos++;
  }
  lcd.clear();
  drawStaticText();
  return;
}
```

Особлива увага приділена аварійному режиму, який реалізований через пріоритетну перевірку значення навантаження. Якщо значення з датчика струму перевищує встановлений поріг, система припиняє виконання штатного циклу та переходить до виконання захисного алгоритму.

Фрагмент алгоритму аварійного закриття:

```
if (load > 3000)
{
    digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
    while (currentPos > 0 && digitalRead(BTN_LIMIT) == HIGH){
      makeStep(400);
      currentPos--;
   }
    delay(5000);
}
```

Така логіка гарантує, що при виникненні механічної перешкоди або вітрового навантаження, система не тільки врятує привід від перевантаження, а й перейде в стан безпеки до моменту автоматичної повторної перевірки умов експлуатації. Це робить макетну модель наближеною до реальних промислових зразків автоматики. Повну програмну реалізацію надано у Додатку В.

3.2 Віртуальна симуляція та схемотехнічне моделювання роботи пристрою.

Практичне комп’ютерне моделювання в спеціалізованому середовищі Wokwi дозволило повноцінно підтвердити працездатність обраного алгоритму керування та перевірити часові характеристики руху виконавчого механізму. Процес комплексних випробувань розпочинається з обов'язкової ініціалізації системи, під час якої мікроконтролер опитує порти, перевіряє поточний стан кінцевих вимикачів для визначення початкового положення та виводить на LCD–дисплей поточні параметри навколишнього середовища (рис. 3.6).

У штатному режимі функціонування розроблена система демонструє стабільну та швидку реакцію на динамічні зміни погоди. Логіка програми побудована так, що абсолютним пріоритетом для автоматики є захисне функціонування рухомого даху при наявності будь яких активних зовнішніх чинників або кліматичних загроз.

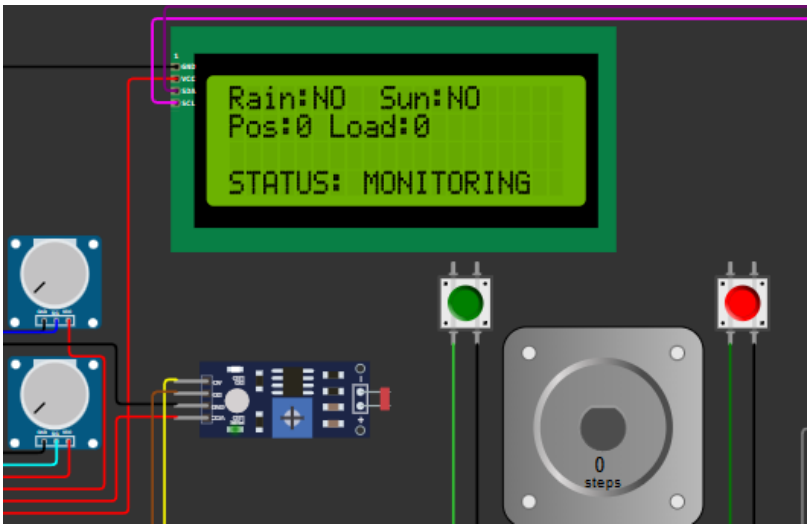


Рисунок 3.6 – Візуалізація стану системи «Моніторинг» на LCD–дисплеї під час моделювання

При імітації сонячної погоди, виявленні опадів або при їх одночасному впливі, система ініціює рух привода, що супроводжується індикацією «ACTION: OPENING» (рис. 3.7). У цьому стані двигун здійснює плавне

висування конструкції для забезпечення захисту або експлуатації об'єкта. Автоматичне повернення механізму у вихідне закрите положення відбувається за умовою повної відсутності зовнішніх подразників (відсутність сонця та дощу), що дозволяє економити ресурс привода в періоди бездіяльності.

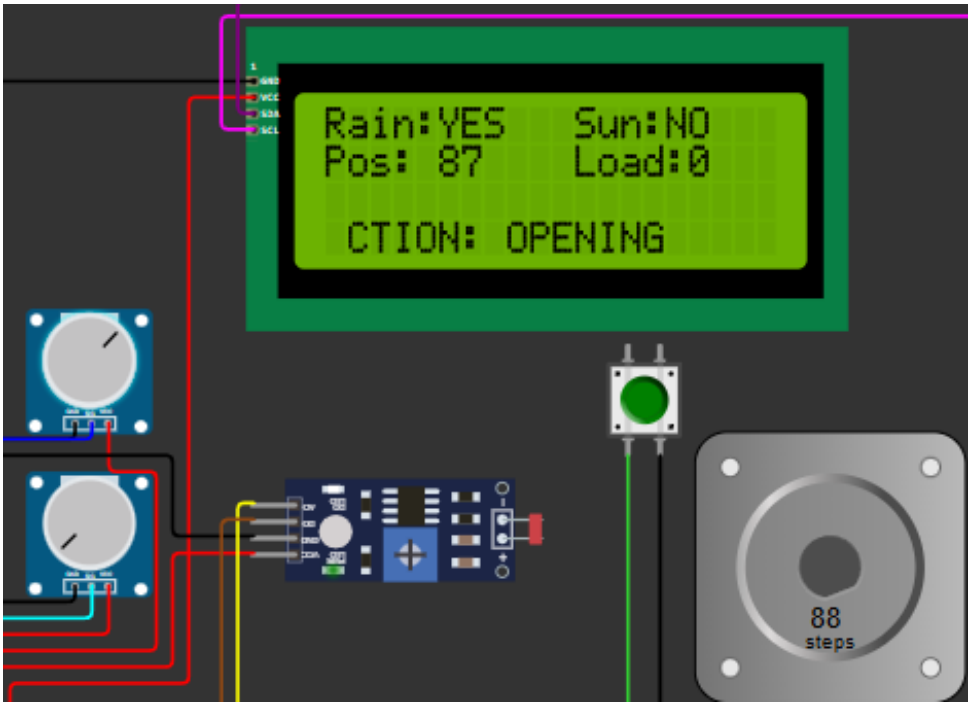


Рисунок 3.7 – Візуалізація стану системи розгортання

Важливою частиною випробувань демонстраційного макета стала перевірка алгоритмів захисту привода. Для імітації реальних умов було змодельовано механічне перевантаження (заклинювання або сильний зустрічний вітер). У середовищі моделювання цей стан відтворювався шляхом штучного підвищення навантаження на двигун через зміну значень аналогового каналу датчика струму.

При досягненні критичного порогу, заданого програмною константою, система переходить у режим захисту з пріоритетною обробкою аварій над іншими процесами. На цьому етапі ігноруються сигнали датчиків сонця та дощу, оскільки першочерговим є захист механіки та двигуна від пошкодження.

Аварійний стан (рис. 3.8) реалізується негайним відключенням ШІМ-

сигналу драйвера, що припиняє живлення двигуна. Після цього активується блокування тривалістю 6 секунд, протягом якого заборонені будь-які команди керування. Це забезпечує згасання інерції конструкції та стабілізацію навантажень у вузлах. Одночасно на дисплеї відображається повідомлення про критичну помилку. Такий підхід дозволяє відокремити короткочасні пускові стрибки струму від реального перевантаження та гарантує надійний захист системи в умовах експлуатації.

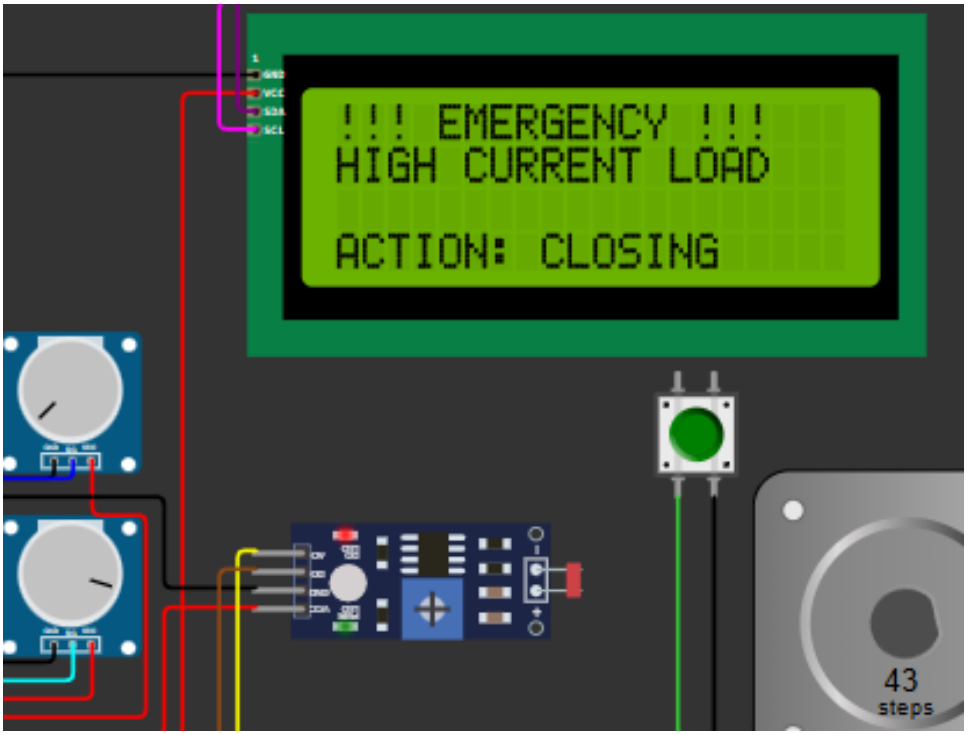


Рисунок 3.8 – Візуалізація стану системи при критичному механічному навантаженні

Після активації аварійного протоколу система переходить у стан очікування. Це необхідно для того, щоб запобігти виходу з ладу електричних компонентів та дати можливість усунути причину перевантаження. Протягом цього часу на дисплеї відображається блокування системи (рис. 3.9).

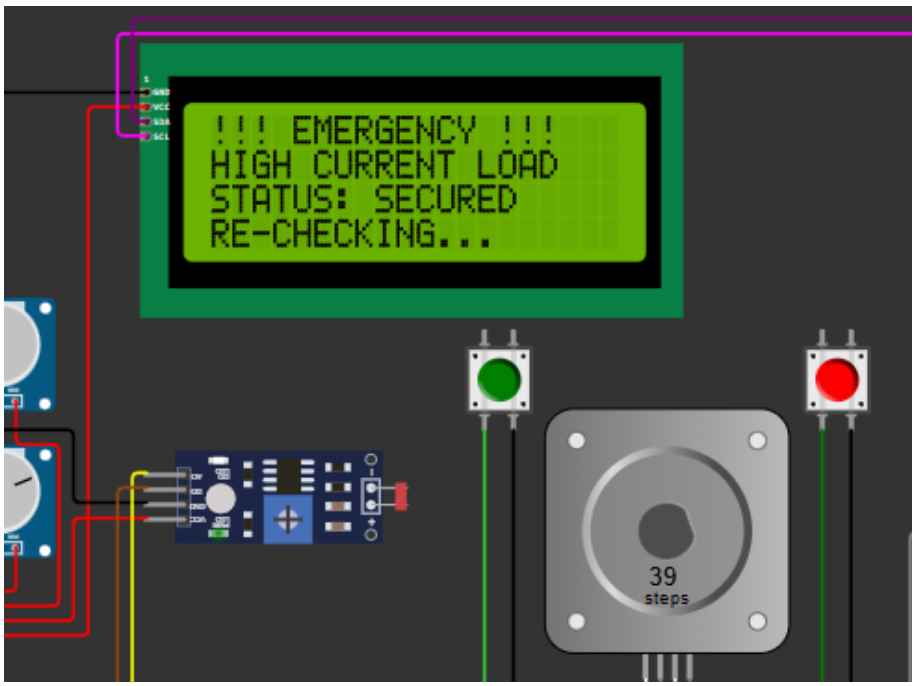


Рисунок 3.9 – Візуалізація стану перевірки системи після аварійного блокування

Підсумовуючи результати проведеного моделювання, можна стверджувати, що розроблений демонстраційний макет успішно відпрацьовує всі закладені сценарії: від реагування на зміну метеоумов до захисту обладнання у критичних ситуаціях. Програмні алгоритми забезпечують стабільну роботу без ривків та коректну обробку помилок, що підтверджує надійність алгоритму.

3.3 Моделювання замкнутого контуру САК у середовищі MATLAB/Simulink

Для верифікації синтезованого закону керування контуру автоматизації розсувного навісу було виконано блочне симуляційне моделювання у середовищі MatLab/Simulink. Процес розробки та чисельного аналізу динаміки слідкуючої САК розподілено на кілька послідовних етапів.

У першому етапі «Збирання структурної схеми з бібліотеки блоків», у новому робочому вікні програми Simulink за допомогою оглядача бібліотек

(Library Browser) було сформовано первинний каркас системи (рис. 3.10). Для цього використано стандартні блоки: Step для генерації вхідного ступінчастого сигналу завдання, Sum як елемент порівняння, PID Controller для реалізації безперервного ПІД-закону керування, Transfer Fcn для опису динамічних властивостей об'єкта автоматизації та Scope для функцій віртуального осцилографа.

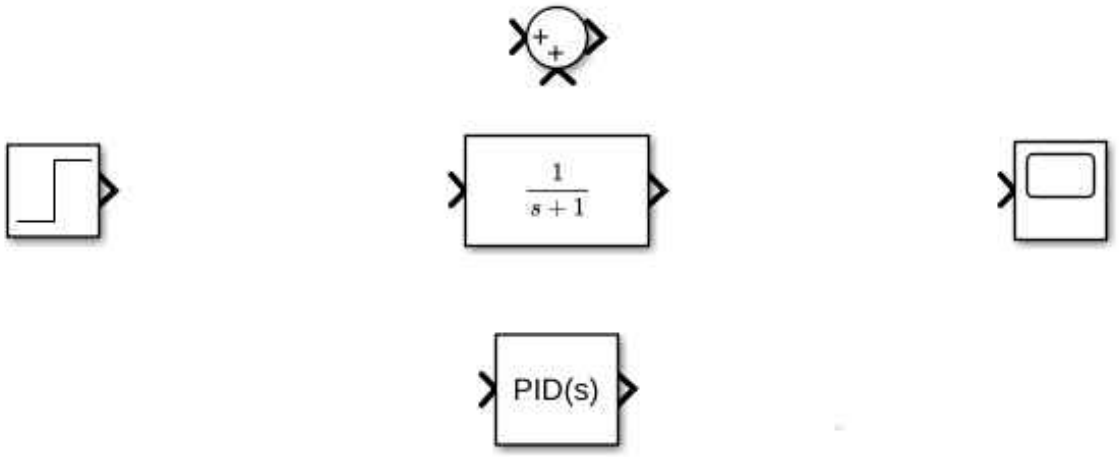


Рисунок 3.10 – Первинна схема у Simulink зі стандартними блоками до налаштування

У другому етапі «Конфігурування зворотного зв'язку та параметрів об'єкта» на даному етапі у параметрах блока Sum знак зворотного зв'язку змінено з ++ на +- для реалізації від'ємного зворотного зв'язку за положенням конструкції даху [26].

У діалоговому вікні блока Transfer Fcn задано передавальну функцію об'єкта (рис. 3.11), отриману в теоретичній частині роботи відповідно до виразу (2.6), де у полі коефіцієнтів чисельника (Numerator coefficients) вказано значення [1.5], а у знаменнику (Denominator coefficients) прописано масив коефіцієнтів [2.01 1 0].

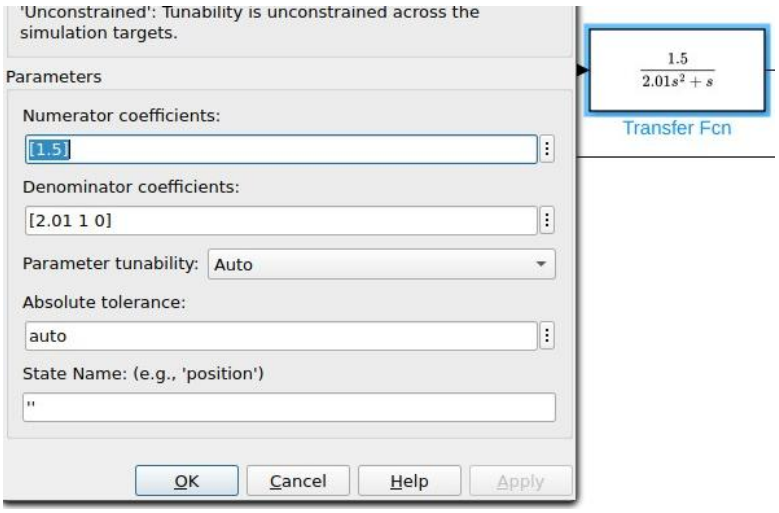


Рисунок 3.11 – Вікно налаштування параметрів динамічного блока «Transfer Fcn»

У третьому етапі «Аналітичний синтез регулятора через PID Controller» для розрахунку коефіцієнтів контуру керування було відкрито внутрішнє меню налаштувань ПІД-контролера, де за допомогою інтерактивного додатка частотної оптимізації PID Controller (кнопка Tune) проведено автоматичний синтез параметрів. Головним інженерним критерієм оптимізації було обрано забезпечення максимальної швидкодії за умови повної відсутності перерегулювання ($\sigma = 0\%$) для виключення ударних навантажень на важільний каркас, внаслідок чого система визначила оптимальні коефіцієнти (рис. 3.12): пропорційний становить 4.85, інтегральний дорівнює 1.52, а диференціальний – 0.65.

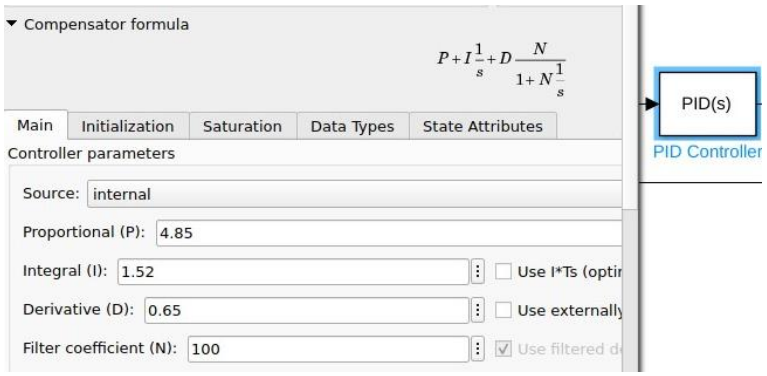


Рисунок 3.12 – Графічний інтерфейс додатка «PID Controller» із розрахованими параметрами

У четвертому етапі «Запуск симуляції замкненої САК» після імпорту знайдених параметрів у блок регулятора шляхом застосування команди Apply, усі лінії зв'язку між елементами схеми були остаточно з'єднані (рис. 3.13). Час інтегрування моделі (Stop Time) встановлено на значення 2.0 секунди, що є достатнім для повного завершення перехідних процесів у приводі, після чого виконано розрахунок динаміки замкненої системи під номінальним навантаженням.

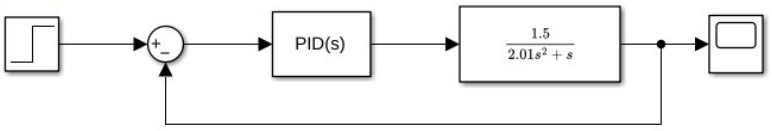


Рисунок 3.13 – Фінальний вигляд повністю зібраної та готової до роботи схеми моделювання у Simulink

У п'ятому етапі «Аналіз графіків перехідного процесу» візуалізація результатів чисельного розрахунку та фіксація часових характеристик виконана за допомогою графічного вікна Scope. Отримана крива розгону системи (рис. 3.14) повністю відповідає критеріям стійкості та підтверджує високу якість регулювання положення виконавчого механізму [27].

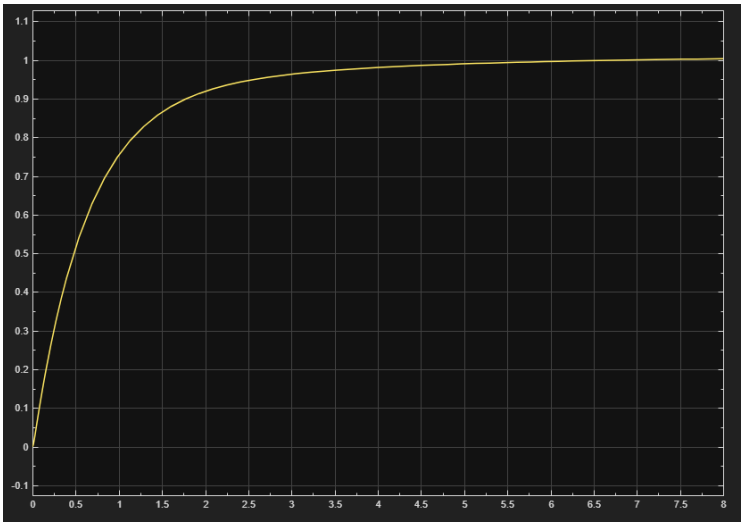


Рисунок 3.14 – Графік перехідного процесу (Step Response) з вікна осцилографа Scope

На основі аналізу графічної залежності зафіксовано показники якості, де час регулювання становить 4 секунди для оперативного відпрацювання зовнішніх збурень, перерегулювання строго дорівнює нулю відсотків для плавної зупинки актуатора без механічних ударів, а стала статична похибка дорівнює нулю завдяки дії інтегральної складової.

3.4 Розробка тривимірної (3D) моделі важільного механізму трансформації у Fusion 360 та аналіз міцності (FEA)

3.4.1 Конструктивні елементи та специфікація тривимірної моделі

Для перевірки працездатності конструкції та її механічної надійності в середовищі Autodesk Fusion 360 було розроблено параметричну тривимірну модель важільного механізму трансформації. Створення CAD-моделі дозволяє точно оцінити просторове розташування деталей, виключити ризики їх взаємного перетинання під час руху та підготувати геометрію до розрахунку на міцність.

Оскільки важелі системи безпосередньо сприймають крутний момент від приводного мотор-редуктора NMRV 030, вони піддаються статичним та динамічним навантаженням.

Для перевірки міцності елементів виконано комп'ютерне стимуляційне моделювання методом скінченних елементів Для детального аналізу геометрії збірки, кожну ланку механізму трансформації було змодельовано як окремий елемент із заданням відповідних конструкційних матеріалів. На рисунку 3.15 представлено загальний вигляд розробленої тривимірної збірки механізму трансформації у закритому (вихідному) стані.

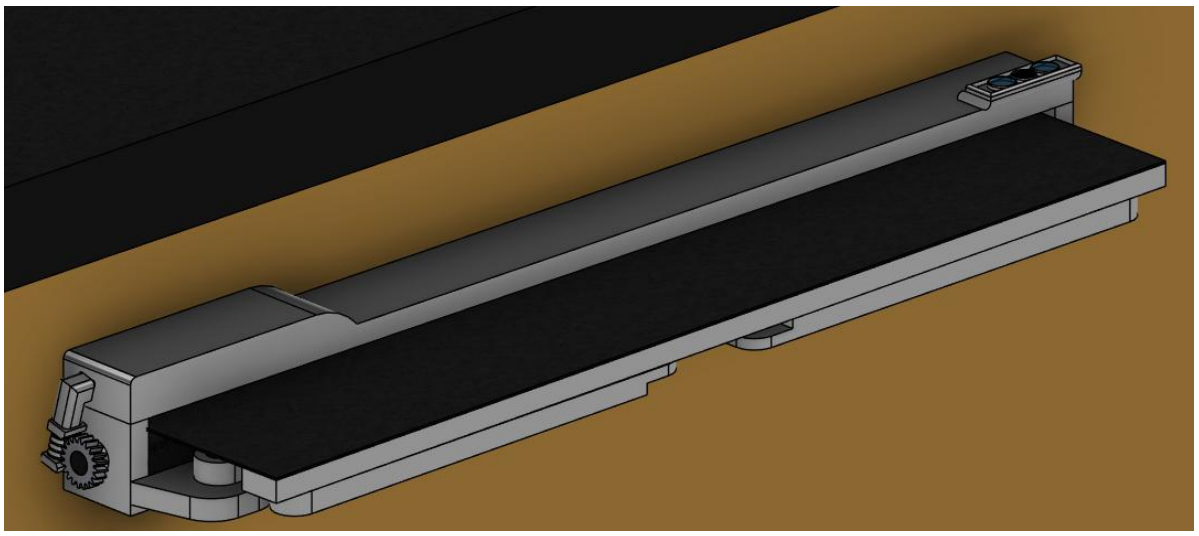


Рисунок 3.15 – Загальний вигляд 3D-моделі механізму трансформації у закритому (складеному) стані

У цьому положенні рухома захисна панель та система важілей компактно складаються всередину захисного корпусу системи. Таке рішення дозволяє мінімізувати габаритні розміри всього модуля в періоди, коли автоматичний дах не використовується. Крім того, закрита конструкція надійно захищає внутрішні шарнірні з'єднання, напрямні та елементи зубчастої передачі привода від прямого впливу атмосферних опадів, вологи та бруду, що суттєво підвищує надійність і довговічність роботи всього мехатронного комплексу.

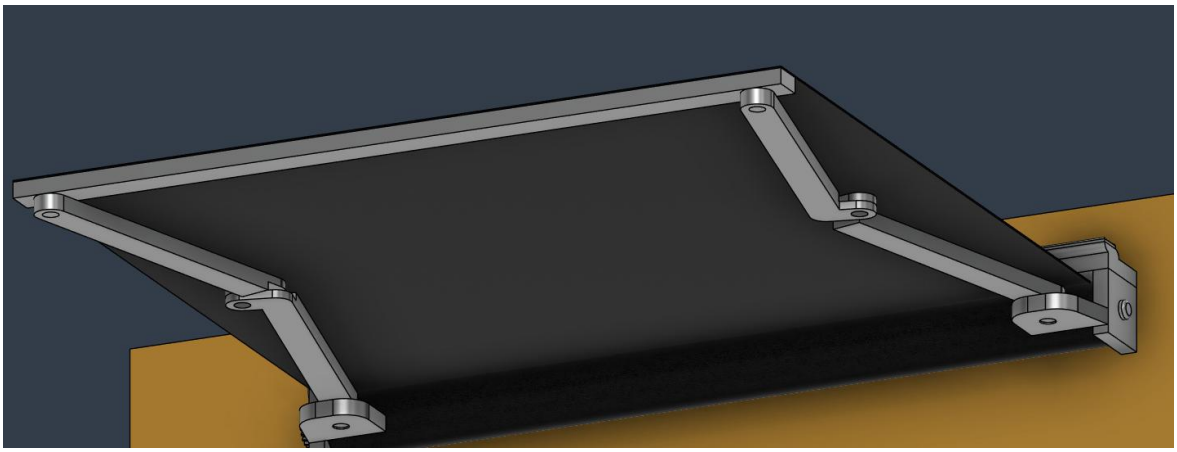


Рисунок 3.16 – Загальний вигляд 3D-моделі механізму трансформації у відкритому (робочому) стані

У цьому крайньому робочому положенні (рис. 3.16) розроблена система важелів повністю розкривається, висуваючи захисну панель даху вперед на максимальну проєктну відстань. На наведеному графічному зображенні чітко видно симетричну просторову конструкцію, що складається з чотирьох однакових за довжиною важелів, які надійно утримують і стабілізують панель знизу.

При подачі необхідного крутного моменту від виконавчого привода всі важелі синхронно повертаються на заданий кут, забезпечуючи плавність ходу, жорсткість кінематичного ланцюга та рівномірне висування навісу без виникнення небезпечних перекосів чи заклинювань механізму.

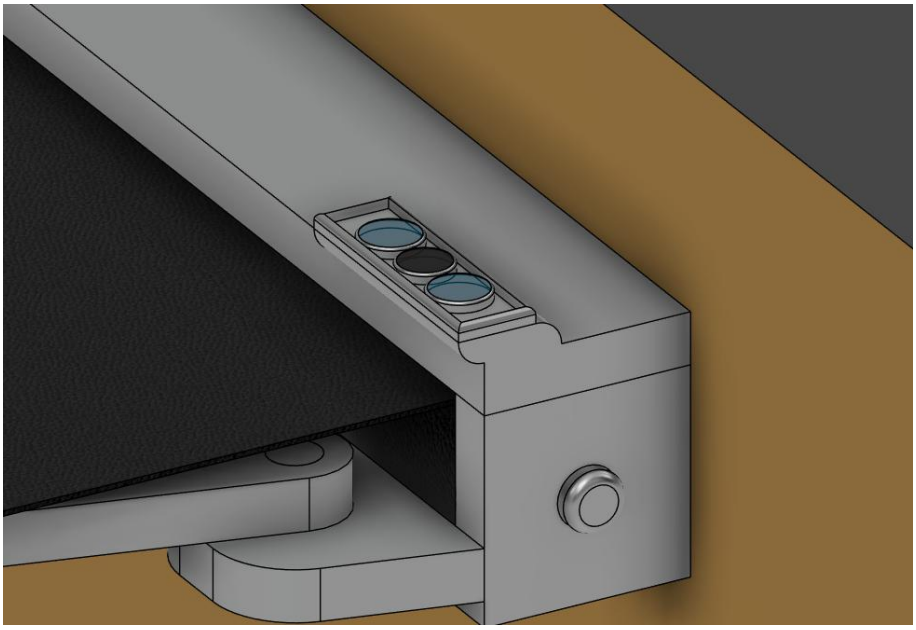


Рисунок 3.17 – Розміщення блоку датчиків на захисному корпусі системи

Блок (рис. 3.18) є важливим елементом системи автоматизації та призначений для контролю погодних умов Датчики розташовані у верхній частині корпусу для забезпечення максимального огляду та точного зчитування параметрів зовнішнього середовища. Сигнали з цього блоку надходять на головний контролер, який автоматично приймає рішення про висування або складання захисного даху, забезпечуючи безпечну роботу всього комплексу.

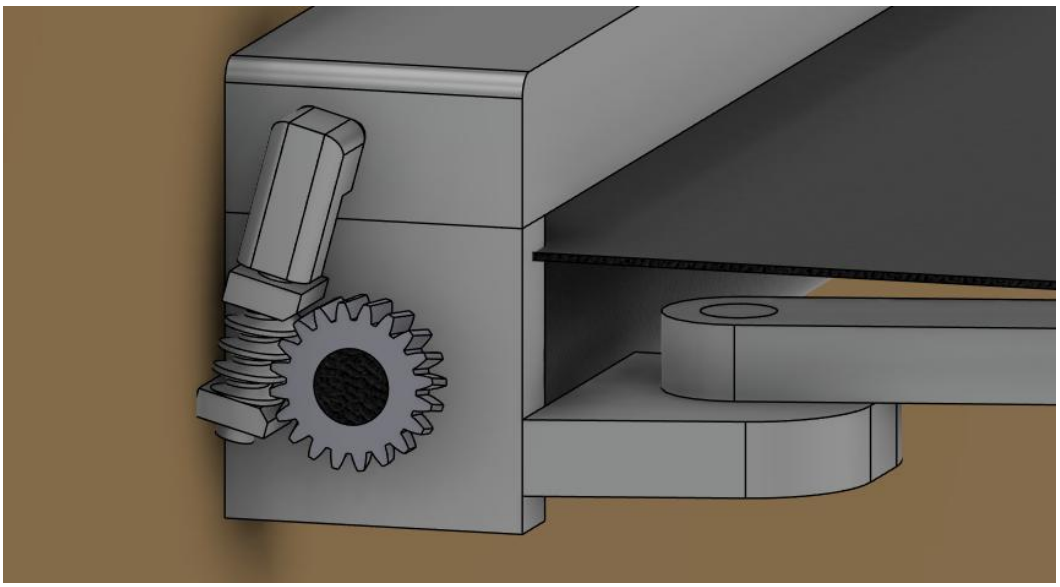


Рисунок 3.18 – Демонстраційна модель приводного вузла з 20-зубчастою шестірнею

Конструкція цього вузла виконана у вигляді черв'ячної передачі, яка складається зі спіралі та шестірні на 20 зубів. Оскільки представлена 3D-модель є демонстраційною, такий варіант механізму обрано для наочного показу передачі обертання.

У реальній конструкції цей вузол за потреби можна легко змінити або спростити (наприклад, встановивши дві звичайні шестірні) для оптимізації та полегшення процесу виробництва.

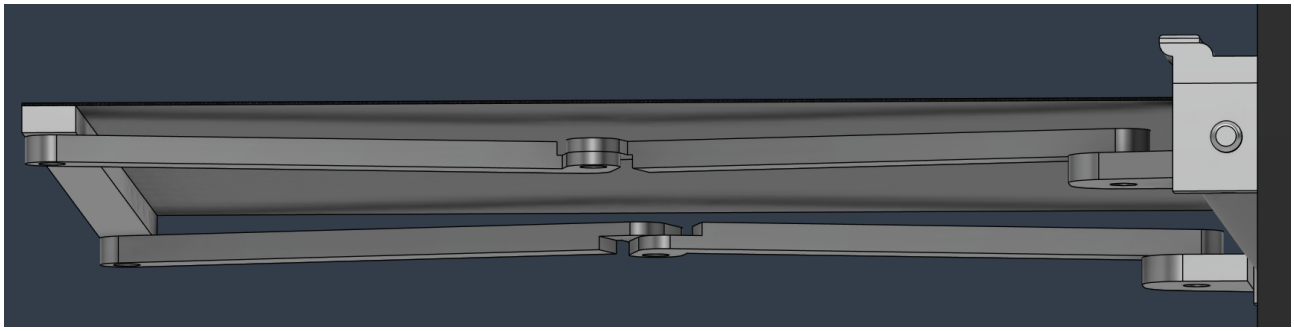


Рисунок 3.19 – Загальний вигляд важільного механізму

Особливістю цієї схеми є високий рівень уніфікації конструкції. В системі використовуються чотири важелі (рис. 3.19), всі вони виготовляються

як абсолютно однакові деталі. Для роботи на протилежній стороні механізму ланки під час збирання просто перевертаються у просторі. Таке рішення дозволяє значно спростити та здешевити процес виготовлення, оскільки для виробництва всього важільного каркаса потрібен лише один вид заготовок та однакове технологічне оснащення.

3.4.2 Аналіз міцності (FEA) елементів механізму

Для перевірки жорсткості та надійності розробленого навісу було проведено статичний аналіз у модулі Simulation середовища Autodesk Fusion 360. Це моделювання є стрес тестом, який максимально наближений до реальних умов експлуатації механізму.

Під час налаштування симуляції було задано дві ключові граничні умови. По-перше, система автоматично враховує власну масу всіх деталей завдяки увімкненню стандартної сили тяжіння зі значенням за замовчуванням прискорення вільного падіння $9.806/м^2$. По-друге, було проведено 5 симуляції, на самий кінець висунутого навісу було прикладено додаткову зосереджену вертикальну силу величиною 100-400 Н (10-40кг), яка спрямована вниз. Таке спеціальне навантаження дозволяє перевірити стійкість конструкції до раптових зовнішніх впливів у її найвідповідальнішому повністю відкритому стані.

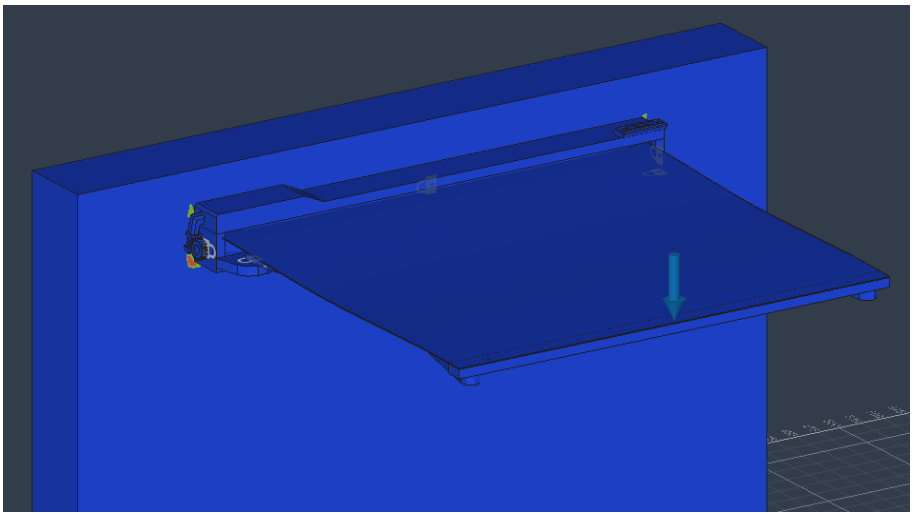


Рисунок 3.20 – Розподіл навантажень у моделі під дією власної ваги та сили

Аналіз отриманих результатів комп'ютерного моделювання (Рис 3.20) показує, що рухома панель та чотири уніфіковані важелі повністю знаходяться у безпечній синій зоні. Це означає, що сумарна дія власної ваги та прикладеної сили в 100 Н не викликає небезпечних деформацій чи прогинів, а сама конструкція демонструє відмінну жорсткість.

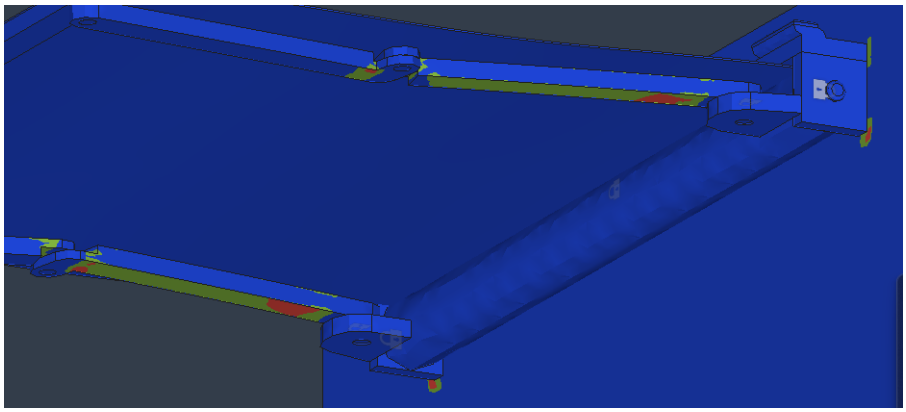


Рисунок 3.21 – Розподіл навантажень у важільної системи 100Н

Візуальний аналіз напружено-деформованого стану (рис. 3.21) показує, що основна частина тіла важелів залишається в межах безпечної синьої та зеленої зон, що підтверджує правильність вибору їхнього поперечного перерізу та загальної геометрії каркаса. Проте в місцях шарнірних з'єднань ланок між собою та в точках їхнього підключення до опорних кронштейнів чітко помітні локальні зони підвищеного напруження, які пофарбовані у червоний колір.

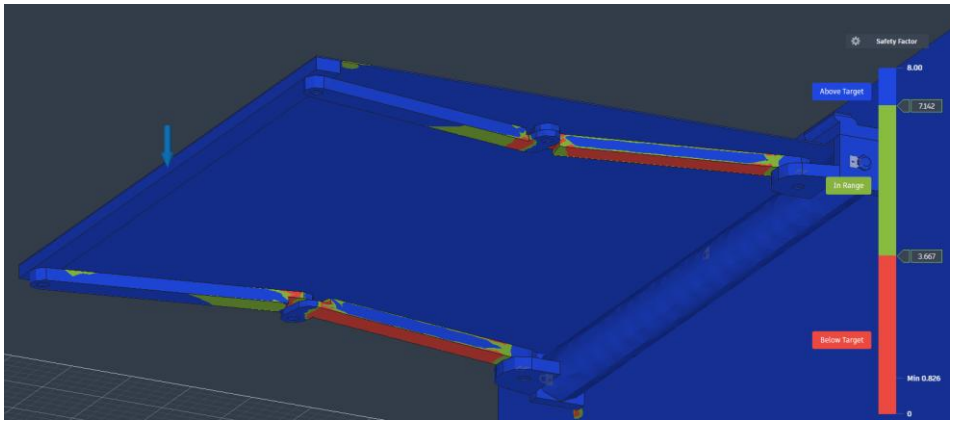


Рисунок 3.22 - Розподіл навантажень у важільної системи 200Н

Детальний аналіз результатів симуляцій №1-4 показує (табл. 3.1), що зі збільшенням зовнішнього тиску конструкція прогнозовано втрачає стійкість. При навантаженні у 200 Н коефіцієнт запасу міцності падає до 0,826, що вказує на появу критичної межи деформацій у шарнірах. Подальше зростання сили до 300 Н та 400 Н призводить до критичного зниження коефіцієнта безпеки (до 0,550 та 0,410), що в реальних умовах означає механічне руйнування важелів через надмірну парусність або снігове перевантаження.

Отримані критичні точки повністю обґрунтовують впровадження підсистеми автоматичного захисту в архітектуру контролера.

Таблиця 3.1 – Параметри та результати FEA-розрахунку

№ Симуляції	Навантаження Н	Мінімальний коефіцієнт запасу	Статус конструкції
1	100	1,618	Конструкція стабільна
2	200	0.826	Критична межа
3	300	0.550	Неприпустиме навантаження (руйнування)
4	400	0.410	Критичне руйнування конструкції

Отримані результати моделювання повністю збігаються з теоретичними очікуваннями, зони максимальних напружень локалізовані саме там, де і передбачалося на важелях кріплення та осях. Оскільки на ці елементи припадає пікове навантаження від власної ваги конструкції та сили, прикладеної до краю.

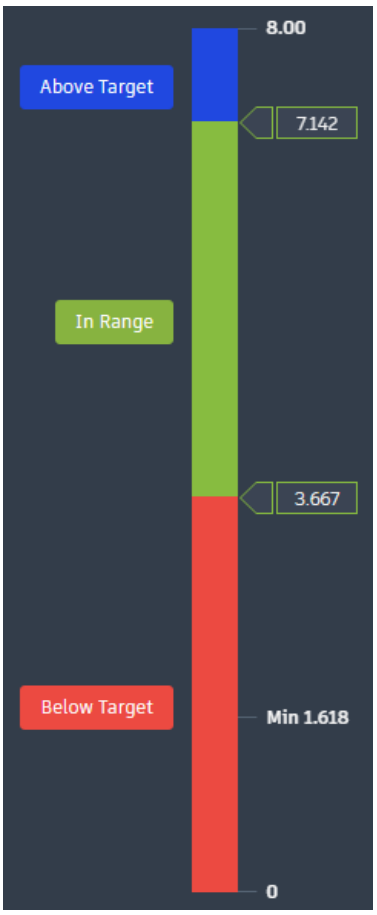


Рисунок 3.22 – Шкала коефіцієнта запасу міцності (Safety Factor) за результатами розрахунку

Узагальнюючи результати проведеного статичного аналізу, можна зробити висновки, що розроблена конструкція адаптивного навісу успішно пройшла стрес-тест на міцність. Отриманий мінімальний коефіцієнт запасу (рис. 3.21) 1,618 гарантує, що навіть за умов повного консольного висування механізм працюватиме стабільно і без ризику руйнування чи заклинювання ланок. Отже, запропонована механічна частина є цілком надійною, працездатною.

3.5 Охорона праці

При розробці та експлуатації автоматизованої системи керування рухомим дахом паркувального модуля було враховано основні вимоги безпеки та охорони праці. Оскільки проектований пристрій поєднує в собі електричні

компоненти та рухомі механічні ланки, основними небезпечними факторами є ризик ураження електричним струмом та можливість отримання травм від рухомих важелів.

Для забезпечення безпечної роботи та захисту користувачів у проекті реалізовано такі технічні й програмні рішення:

– електробезпека: всі електронні елементи керування (мікроконтролер ESP32, драйвери приводу та плати) розміщуються в ізольованому захисному боксі, що повністю унеможливлює випадковий контакт із частинами мікроконтролера під напругою. Силова частина системи (мотор-редуктор NMRV 030) живиться від безпечної низької напруги 24 В;

– механічна безпека: каркас важільного механізму виготовлено з легкого алюмінієвого сплаву АД31, що значно знижує загальну вагу та момент інерції конструкції при зупинці. Для запобігання заклинюванню деталей та поломці актуаторів у крайніх точках руху встановлено магнітні кінцеві вимикачі, які автоматично припиняють подачу сигналів на двигун;

– програмний захист (аварійний режим): у контур керування інтегровано датчик струму ACS712. Якщо під час розгортання даху виникає механічна перешкода або критичне вітрове навантаження, споживаний струм двигуна різко зростає. Контролер ESP32 миттєво фіксує це відхилення, блокує роботу приводу та запускає безпечний алгоритм аварійного закриття;

– пожежна безпека: елементи електронної схеми захищені плавкими запобіжниками від короткого замикання, а ізоляція з'єднувальних дротів виконана з матеріалів, що не підтримують горіння;

Впроваджені апаратні та програмні заходи дозволяють звести до мінімуму ризики виникнення аварійних ситуацій, забезпечуючи безпечну експлуатацію автоматизованого навісу як для обслуговуючого персоналу, так і для автомобіля.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено, розроблено та реалізовано модель автоматизованої системи керування рухомою конструкцією даху паркувального модуля з використанням програмного забезпечення для тривимірного проектування. Робота охоплює весь цикл технічного проєктування: від аналізу сучасного стану автоматизованих систем і засобів моніторингу середовища до перевірки функціональності та міцності створеної моделі в середовищі імітаційного моделювання.

Аналіз сучасного стану систем автоматизації та інфраструктури показав, що інтеграція адаптивних захисних конструкцій у міське середовище є актуальним напрямком розвитку технологій. Зокрема, рухомі елементи даху, як частина автоматизованих комплексів, забезпечують точність, повторюваність і безпечність виконання захисних операцій, мінімізуючи вплив несприятливих або мінливих факторів навколишнього середовища на автомобільну техніку.

У роботі було обґрунтовано вибір програмного забезпечення для моделювання системи, враховуючи його широкі функціональні можливості, підтримку інструментів інженерного аналізу, а також здатність інтеграції з іншими платформами. Проведено аналіз переваг обраного середовища, що дозволило знайти найефективніший шлях реалізації поставленого завдання.

Практична частина роботи включала реалізацію кількох ключових етапів:

– розробку та геометричне проєктування тривимірної моделі паркувального модуля;

– оптимізацію важільного механізму трансформації на основі впровадження уніфікованих ланок;

– розробку привода на базі механічної передачі для надійної фіксації

конструкції у заданих положеннях;

– програмування та інтеграцію спеціалізованого блока датчиків погоди для забезпечення адаптивного автоматичного керування;

– проведення статичного аналізу міцності конструкції для перевірки її стійкості до граничних експлуатаційна навантажень.

Результати симуляцій підтвердили коректність роботи системи. Візуалізація рухів та розподілу напружень у спеціалізованому середовищі дозволила оцінити точність та ефективність розробок.

Таким чином, в ході виконання кваліфікаційної роботи було повністю досягнуто поставленої мети. Побудована модель автоматичного даху паркувального модуля може бути адаптована для складніших сценаріїв керування або інтегрована в загальну систему інфраструктури [28].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Розумне місто Україна: що це таке і як воно працює в українських реаліях [Електронний ресурс] // Visit Ukraine - SERVICE PORTAL ABOUT UKRAINE 24/7. – Режим доступу: https://visitukraine.today/uk/blog/2183/smart-city-ukraine-what-it-is-and-how-it-works-in-ukrainian-realities?srsltid=AfmBOoqGtHmwUCK__wOstnBtxD9UzVgm1IdVby9xPIgEgFdSSl7zoN7l#yak-viglyadayus-smart-city-ta-skilki-ix-u-sviti (дата звернення: 28.04.2026).

2. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлювання. – Введ. 2015-06-22. – К. : Держстандарт України, 2017. – 29 с.

3. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» : навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В. А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. – 151 с.

4. Підручники – Fusion360inUA [Електронний ресурс] // Fusion360inUA. – Режим доступу: https://fusion360.in.ua/?page_id=420 (дата звернення: 29.04.2026).

5. Пушкар М. С. Проектування систем автоматизації : навчальний посібник / М. С. Пушкар, С. М. Проценко. – Дніпропетровськ : НГУ, 2013. – 244 с. – Режим доступу: https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0053800.pdf (дата звернення: 30.04.2026).

6. Автостоянки і гаражі для легкових автомобілів: ДБН В.2.3-15:2007 [Електронний ресурс] // Державні будівельні норми України. – Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-368 (дата звернення: 02.05.2026).

7. Стоянка на мільйон: скільки коштують паркомісця у різних містах України [Електронний ресурс] // Delo.ua. – Режим доступу: https://delo.ua/news/stoyanka-na-milion-skilki-kostuyut-parkomiscya-u-riznix-mistax-ukrayini-443765 (дата звернення: 03.05.2026).

8. Перегрів автомобіля на сонці: як захистити машину влітку [Електронний ресурс] // Prostavki.kiev.ua. – Режим доступу: https://prostavki.kiev.ua/ru/perehriv-avtomobilia-na-sontsi/ (дата звернення: 06.05.2026).

9. Sunshading device for automobile: Patent CN100434643C [Electronic resource] // Google Patents. – URL: https://patents.google.com/patent/CN100434643C/en (дата звернення: 12.05.2026).

10. Retractable vehicle cover: Patent US8267106B2 [Electronic resource] // Google Patents. – URL: https://patents.google.com/patent/US8267106B2/en (дата звернення: 17.05.2026).

11. Андрусевич А. О. Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни «Проєктування комп'ютерно-інтегрованих систем» / упоряд. А. О. Андрусевич та ін. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 48 с.

12. Fusion 360 vs. SOLIDWORKS: Comparison Guide [Electronic resource] // Autodesk. – 2024. – URL: https://www.autodesk.com/campaigns/fusion-360/fusion-360-vs-solidworks (дата звернення: 20.05.2026).

13. System requirements for AutoCAD 2024 including Specialized Toolsets [Electronic resource] // Autodesk Support. – URL: https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/-sfdcarticles/sfdcarticles/System-requirements-for-AutoCAD-2024-including-Specialized-Toolsets.html (дата звернення: 17.04.2026).

14. System requirements for Autodesk Fusion 360 [Electronic resource] // Autodesk Support. – URL: https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/System-requirements-for-Autodesk-Fusion-360.html (дата звернення: 20.05.2026).

15. Металеві конструкції : підручник / за ред. О. Г. Хоменка. – 2018. – 342 с. – Режим доступу: https://www.tpgnpu.ho.ua/images/my_images/doc_pdf/metalevi_constr_pidruchnik_2018.orig.pdf (дата звернення: 24.05.2026).

16. Міцність нержавіючих металовиробів та їх характеристики: класи марок A2 та A4 [Електронний ресурс] // НМК. – Режим доступу: https://nmk.com.ua/index.php?route=extension-/blog/blog&blog_id=23 (дата звернення: 24.05.2026).

17. Фізичні характеристики сплавів алюмінію: порівняльна таблиця [Електронний ресурс] // Aluprofil. – Режим доступу: https://aluprofil.com.ua/ua/a304-fizicheskie-harakteristiki-splavov.html (дата звернення: 27.05.2026).

18. Keyestudio Photoresistor Sensor Module Light Dependent Resistor Compatible with Arduino [Electronic resource] // Eckstein Shop. – URL: https://eckstein-shop.de/Keyestudio-Photoresistor-Sensor-Module-Light-Dependent-Resistor-Compatible-with-Arduino (дата звернення: 28.05.2026).

19. High Power DC Motor 700W DIA 124mm [Electronic resource] // King Right Motor. – URL: https://www.kingright.com.tw/uk/product/dc-motor_F7147H.html (дата звернення: 30.05.2026).

20. Черв’ячний мотор-редуктор постійного струму NMRV 030/90ZYT [Електронний ресурс] // Приводні системи. – Режим доступу: https://drivesystems.com.ua/nmrv30-90zyt-2/ (дата звернення: 30.05.2026).

21. Датчик струму на основі ACS712 [Електронний ресурс] // Радіодеталі. – Режим доступу: https://radiodetali.com.ua/ua/product/datchik-strumu-acs712-30a-82089 (дата звернення: 02.06.2026).

22. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. / П. М. Павленко, С. Ф. Філоненко, О. М. Чередніков, В. В. Трейтяк. – Київ : НАУ, 2017. – 392 с.

23. Мотор-редуктор черв'ячний одноступінчастий NMRV 030: технічні характеристики та габаритні розміри [Електронний ресурс] // Каталог промислового обладнання «AIP Україна». – 2026. – Режим доступу: https://xn--80aqy.com.ua/reduktory/nmrv/nmrv-030/ (дата звернення: 02.06.2026).

24. Wokwi Online Arduino Simulator [Electronic resource]. – URL: https://wokwi.com/ (дата звернення: 10.06.2026).

25. Розділ 2. Будова та принцип дії САК [Електронний ресурс] // StudFiles. – Режим доступу: https://studfile.net/preview/5456858/page:3/ (дата звернення: 10.06.2026).

26. Siqueira R. Autodesk FUSION 360: static stress analysis of a mechanical support [Research Report] / R. Siqueira, T. Santos, J. Santos. – ResearchGate, 2017. – 22 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/314207993_Autodesk_FUSION_360_static_stress_analysis_of_a_mechanical_support (дата звернення: 10.06.2026).

27. Як впровадити ПІД-регулювання швидкості в контролерах двигунів BLDC [Електронний ресурс] // WonderfulPCB. – Режим доступу: https://www.wonderfulpcb.com/uk/blog/how-to-implement-pid-speed-regulation-in-bldc-motor-controllers/ (дата звернення: 17.06.2026).

28. Про затвердження Правил охорони праці у ливарному виробництві. Офіційний вебпортал парламенту України. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0293-10#Text (дата звернення: 17.06.2025).