

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 **Наталія СТЕЛЬМАХ**

«12» 06 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Автоматизований компактний купол для спостереження неба»

Виконав: студент IV курсу, групи ПБ-21
Євтушенко Дмитро Сергійович



Керівник:
Доц., к.т.н., с.н.с., Синявський Іван Іванович



Рецензент:
Доц., к.т.н., доц. каф. АСНК, Писарець Анна Валеріївна



Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент



Київ 2026

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка	
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2		
2	A4	ДП.ПБ21.04.1702 ПЗ	Пояснювальна записка	60		
3	A1	ДП.ПБ21.04.1702 СК	Автоматизований компактний купол для спостереження неба	1		
4	A3	ДП.ПБ21.04.1702 СХ	Принципова електрична схема	1		
5	A1	ДП.ПБ21.04.1702 СХ	Алгоритм роботи системи	1		
6	A1	ДП.ПБ21.04.1702 СК	Велика шестерня	1		
7	A1	ДП.ПБ21.04.1702 СК	Стулка кришки	1		
8	A1	ДП.ПБ21.04.1702 СК	Дно	1		
9	A3	ДП.ПБ21.04.1702 СК	Станочний профіль	1		
10	A1	ДП.ПБ21.04.1702 СК	Кріпильна плита	1		
11	A3	ДП.ПБ21.04.1702 СК	Великий ричаг	1		
			ДП.ПБ21.04.1702.00			
		ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Євтушенко Д.С.				Відомість дипломного проєкту	
Керівн.	Синявський І.І.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Стельмах Н.В.					
					Лист	Листів
					1	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП Гр. ПБ-21	

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Наталія СТЕЛЬМАХ

« 12 » 06 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Євтушенко Дмитру Сергійовичу

1. Тема роботи «Автоматизований компактний купол для спостереження неба», керівник роботи Синявський Іван Іванович, д.ф.-м.н, с.н.с. затверджені наказом по університету від «26» 05 2026р. № 1905-с
2. Термін подання студентом роботи 7. 06. 2026
3. Вихідні дані до проєкту: Габаритні розміри, 3D моделі зображуючих поляриметрів для спостереження ділянки небесної сфери. Автоматизація системи повинна включати в себе механізм відкриття/закриття захисної кришки куполу, системи датчиків температури та вологості.
4. Зміст пояснювальної записки: Перелік умовних позначень; Вступ; Розділ 1. Основні принципи розробки куполів для спостережень небесної сфери; 1.1. Аналіз схемних побудов, конструкцій. 1.2. Опис системи зображуючих поляриметрів для спостереження ділянки небесної сфери. 1.3. Постановка задачі. Розділ 2. Проектування системи: 2.1. Розрахунок габаритних розмірів; 2.2. Розробка структурно-функціональної схеми; 2.3. Вибір елементної бази. Розділ 3. Розробка складових частин купола: 3.1 Адаптація конструкції зображуючих поляриметрів для встановлення в купол; 3.3. Проектування корпусу купола; 3.2. Проектування

механізму відкриття/закриття захисної кришки; 3.4. Проектування системи автоматизації роботи куполу; 3.2. Реалізація інтерфейсу. Висновки. Перелік використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Структурно-функціональна схема системи (А1) .

Складальне креслення автоматизованого компактного куполу для спостереження неба (А1).

Алгоритм роботи системи відкриття/закриття захисної кришки (А1).

Деталювання (Зарк. А1).

6. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкта	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Вибір та затвердження теми	березень	
2.	Формулювання та затвердження завдання	березень	
3.	Виконання першого та другого розділів, перевірка їх керівником	квітень	
4.	Виконання 3-го розділу, перевірка їх керівником	травень	
5.	Формування графічної частини ДП	травень	
6.	Оформлення та завершення ДП. Надання на розгляд керівнику	червень	
7.	Надання ДП (електронний варіант) відповідальному на кафедрі для перевірки на наявність запозичень (плагіату)	червень	
8.	Остаточна перевірка ДП керівником, надання відгуку	червень	
9.	Попередній захист ДП	червень	
10.	Рецензування	червень	
11.	Надання роботи відповідальному за організацію дипломного проектування на кафедрі (друкований варіант)		
12.	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	червень	

Студент

Дмитро ЄВТУШЕНКО

Керівник

Іван СИНЯВСЬКИЙ

Анотація

Даний дипломний проєкт присвячений розробці автоматизованого компактного захисного модуля для спостереження небосхилу із застосуванням чотирьох зображуючих поляриметрів. У роботі розглянуто особливості побудови захисного корпусу для приладів спостереження, виконано проєктування конструкції коробки, механізму автоматизованого відкривання та закривання кришки, а також запропоновано структурно-функціональну та електричну схеми системи керування.

Актуальність теми. Наразі щоб провести спостереження поляриметри кожен день виносяться на дах та встановлюються на спеціальний стіл. Оскільки прилади не мають захисту від впливу навколишнього середовища, існує потреба у постійному нагляді. Розробка автоматизованого захисного модуля дозволить полегшити вимірювання та створити основу для подальшої автоматизації процесу спостереження небосхилу.

Мета проєкту. Розробка конструкції захисного модуля для розміщення чотирьох зображуючих поляриметрів, який забезпечить захист обладнання та автоматизоване відкриття і закриття кришки відповідно до заданих умов функціонування.

Під час виконання були проаналізовані існуючі конструктивні рішення, сформовані технічні вимоги до модуля. Також було обґрунтовано вибір елементної бази системи керування, розроблено 3D-модель конструкції в SolidWorks і запропоновано алгоритм роботи системи автоматизації. Виготовлення пристрою в межах дипломної роботи не передбачається. Отримані результати мають характер проєктно-конструкторської розробки та можуть бути використані як основа для подальшого створення дослідного зразка.

Ключові слова: небосхил, зображуючий поляриметр, модуль, захисний корпус, кришка, сервопривод, мікроконтролер, датчик, автоматизація.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач;

БЖ — блок живлення;

МК — мікроконтролер;

ПУЕ — правила улаштування електроустановок;

ШИМ (PWM) — широтно-імпульсна модуляція;

AoLP — Angle of Linear Polarization (кут орієнтації площини лінійної поляризації);

APS — Aerosol Polarimetry Sensor (супутникова місія моніторингу аерозолів);

DC — Direct Current (постійний струм);

DoAP — Division of Aperture Polarimeter (поляриметр за принципом поділу апертури);

DoLP — Degree of Linear Polarization (ступінь лінійної поляризації);

GPIO — General Purpose Input/Output (цифрові порти введення-виведення загального призначення);

HMI — Human-Machine Interface (людино-машинний інтерфейс);

HTTPS — Hypertext Transfer Protocol Secure (захищений протокол передачі гіпертексту);

I2C — Inter-Integrated Circuit (послідовна синхронна шина даних для інтегральних схем);

JSON — JavaScript Object Notation (текстовий формат обміну даними);

NTP — Network Time Protocol (протокол мережевого часу для синхронізації);

POLDER / PARASOL / SPEXone — спеціалізовані космічні місії та супутникові інструменти для поляриметричного дослідження атмосфери й хмар;

RH — Relative Humidity (відносна вологість повітря);

SCL — Serial Clock (лінія тактування шини I2C);

SDA — Serial Data (лінія даних шини I2C);

SPI — Serial Peripheral Interface (послідовний синхронний протокол передачі даних);

TTL — Transistor-Transistor Logic (транзисторно-транзисторна логіка, тип цифрових сигналів);

TLS — Transport Layer Security (протокол захисту транспортного рівня);

UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (універсальний асинхронний приймач-передавач);

USB — Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина);

VCC — Voltage at the Common Collector (позитивний полюс джерела живлення, напруга живлення схем)

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОЗРОБКИ КУПОЛІВ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НЕБЕСНОЇ СФЕРИ.....	12
1.1. Огляд існуючих конструктивних рішень захисних куполів та кожухів для приладів спостереження	12
1.2. Огляд систем автоматизації захисних конструкцій для спостережень	15
1.3. Зображуючі поляриметри: принцип роботи, призначення та технічні характеристики	17
1.4. Аналіз систем дослідження аерозолю	20
1.5. Постановка задачі	22
1.6. Висновки до розділу 1	23
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАХИСНИМ МОДУЛЕМ	24
2.1 Оптимізація та верифікація габаритних розмірів захисного модуля ..	24
2.1.1 Аналіз просторових констант об'єкта захисту	24
2.1.2 Визначення та верифікація внутрішнього об'єму коробки	25
2.1.3 Розрахунок конструктивних параметрів каркасу та зовнішніх габаритів корпусу	26
2.1.4 Геометричний розрахунок параметрів двостулкової кришки та приводу	27
2.1.5 Верифікаційний розрахунок на оптичну сумісність	28
2.2 Вибір елементної бази	29
2.2.1 Вибір мікроконтролера	29
2.2.2 Вибір датчиків	31
2.2.3 Вибір виконавчих приводів механізму відкривання	33
2.2.4 Вибір блоку живлення	34
2.3 Структурно-функціональна схема системи керування	36
2.3.1 Опис інформаційних зв'язків та протоколів комунікації	38
2.3.2 Організація шин електроживлення	39
2.4 Алгоритм роботи системи керування	39
2.4.1 Опис станів системи та критеріїв безпеки	39
2.4.2 Послідовність виконання кроків алгоритму	41

2.5	Висновки до розділу 2.....	43
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНА РОЗРОБКА ЗАХИСНОГО МОДУЛЯ.....		44
3.1	Конструкція корпусу та несучого каркасу.....	44
3.2	Обґрунтування кінематичної схеми та конструкції механізму відкриття кришки	47
3.3	Компонування та монтаж елементів системи автоматизації	49
3.4	Розробка програмного інтерфейсу оператора	51
3.4.1	Архітектура та протоколи двостороннього обміну даними	51
3.4.2	Структура командного меню та ергономіка людино-машинної взаємодії	52
3.4.3	Програмна інтеграція інтерфейсу з логікою метеозахисту	53
3.5	Висновки до розділу 3.....	54
ВИСНОВКИ.....		56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		58

ВСТУП

Сучасні атмосферні та астрономічні дослідження значною мірою базуються на реєстрації просторового розподілу поляризаційного стану світла окремих ділянок небесної сфери. Інформація про стан лінійної та кругової поляризації розсіяного сонячного випромінювання дозволяє з високою точністю визначати мікрофізичні властивості аерозольних частинок в атмосфері, їхню оптичну товщину, розподіл за розмірами, показник заломлення та альbedo. Для вирішення цих завдань застосовуються наземні зображуючі поляриметри з великим полем зору.

Проте тривала експлуатація таких точних оптичних приладів просто неба пов'язана із серйозними ризиками, оскільки потрапляння вологи, пилу та крапель дощу на вхідне вікно, а також утворення конденсату чи запітніння лінз внаслідок температурного дисбалансу призводять до деградації чутливості матриці, корозії механічних елементів та суттєвого спотворення результатів вимірювань. Наразі під час проведення експериментів дослідникам доводиться щодня вручну виносити та встановлювати поляриметри на даху, що потребує постійного нагляду з боку оператора та унеможлиблює тривалий безперервний моніторинг. У зв'язку з цим виникає гостра потреба у розробці спеціалізованого малогабаритного автоматизованого купола, який здатний самостійно оцінювати стан навколишнього середовища, оперативно реагувати на негоду та забезпечувати надійний захист обладнання без постійної присутності людини.

Метою проєкту є розробка конструкції та локальної системи автоматизованого керування компактного захисного купола для розміщення масиву з чотирьох зображуючих поляриметрів, що забезпечить надійний захист оптичного тракту від несприятливих погодних чинників, превентивне відкриття або закриття кришки відповідно до метеорологічних умов та дистанційний моніторинг параметрів комплексу. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати наявні конструктивні рішення захисних

куполів та кожухів, розрахувати й спроектувати просторову геометрію корпусу і несучого рамного каркаса, а також виконати розрахунок елементів конструкції на оптичну сумісність для повного виключення ефекту затінення робочої зони об'єктів. Разом із цим завдання проєкту передбачають розробку оригінального кінематичного механізму приводу двостулкової кришки з мінімальним опором вітру, обґрунтування вибору елементної бази системи керування за критеріями функціональної достатності, побудову структурно-функціональної схеми системи, розробку автономного алгоритму безпеки на базі кінцевого автомата та створення дистанційного людино-машинного інтерфейсу оператора.

Об'єктом дослідження є автоматизований захист та дистанційний моніторинг наземного оптико-електронного обладнання для атмосферних спостережень. Предметом дослідження виступають конструктивні параметри та алгоритми програмного керування компактного двостулкового купола для кластера зображуючих поляриметрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений комплекс проєктно-конструкторських рішень є готовою інженерною основою для створення дослідного зразка автоматизованої станції спостереження неба. Впровадження цієї розробки дозволить значно полегшити проведення наукових вимірювань, повністю захистити дорогі прилади від деструктивного впливу атмосфери та закласти надійний фундамент для подальшої глобальної автоматизації процесів поляриметричного моніторингу без залучення оператора.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РОЗРОБКИ КУПОЛІВ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НЕБЕСНОЇ СФЕРИ

1.1. Огляд існуючих конструктивних рішень захисних куполів та кожухів для приладів спостереження

Астрономічні та метеорологічні прилади спостереження, встановлені просто неба, потребують надійного захисту від несприятливих погодних умов та їх впливів. Захисні конструкції мають одночасно забезпечувати герметичність, механічну міцність у закритому стані та вільний доступ до небосхилу під час спостережень. Різна кількість умов експлуатації, розмірів оптичних систем та вимог до автоматизації зумовила появу принципово різних конструктивних підходів, кожен з яких має власну область застосування.

Найбільш поширеним рішенням в астрономії є купол. Його сферична форма мінімізує вітровий опір і забезпечує природне стікання опадів із поверхні [1]. Для доступу до неба у верхній частині купола передбачено невеликий отвір. Оскільки обертова частина купола азимутально відстежує положення телескопа, мінімізується вплив атмосферних потоків на прилад. Надійний захист від вітру та стороннього освітлення виступає перевагою такої будови. Проте саме обертова основа суттєво ускладнює конструкцію і підвищує вартість, адже вимагає прецизійних напрямних [1] та приводів. Також, всередині купола часто виникає проблема теплового дисбалансу між внутрішнім та зовнішнім середовищем, що негативно впливає на якість зображення. Ці сферичні куполи найбільше підходять для споруд, що мають діаметр приблизно до 10 м [1].



Рисунок 1.1. – Класичний купол

Альтернативою попередньому варіанту, є двостулковий купол, який складається з секторів, які можуть відкриватися в різні боки без обертання всієї конструкції. Саме це дозволяє миттєво відкрити повний огляд небосхилу без необхідності азимутального наведення [2]. Перевагами є швидке вирівнювання температури між внутрішнім і зовнішнім середовищем, менша кількість рухомих елементів і, відповідно, вища надійність. Без недоліків не обійшлося, тут вони виступають у вигляді меншої захищеності від бічного вітру в порівнянні з закритою конструкцією класичного купола. Прикладом є ScoreDome 3M: діаметр 3 м, висота 3,1 м, три стулки, час повного відкривання – 80 секунд, шість двигунів потужністю по 250 Вт кожен; система керування побудована на мікроконтролері Arduino [3]. Такі купольні станції широко застосовуються у мережах моніторингу супутників та автоматизованих оглядах неба.



Рисунок 1.2. – Двостулковий купол

Конструкція з роздільним дахом є найпростішою з технологічного погляду. Дах горизонтально відсувається по рейках убік, повністю відкриваючи внутрішній простір обсерваторії. Перевагами є простота виготовлення і ефективна природна вентиляція. Суттєвим недоліком залишається необхідність у вільній площі збоку від споруди для переміщення даху, а також менш аеродинамічна форма у закритому стані. Але існують варіанти з двостулковим дахом, дві секції якого розсуваються в протилежні сторони (Tele-Station 5 та 6 від Pier Tech [4]).



Рисунок 1.3. – Tele-Station 5 від Pier Tech [4]

Окремо можна виділити корпус у вигляді коробки, що будується із прямих плоских секцій замість криволінійних елементів класичного купола. Це суттєво спрощує виробництво та знижує вартість, хоча і підвищує аеродинамічний опір та може призводити до накопичення снігу на горизонтальних поверхнях. Ця конструкція доцільна для великих об'єктів, де виготовлення криволінійних елементів купола виявляється надмірно дорогим [6].

Матеріал, що часто використовується у астрономічному приладобудуванні – сталь з цинково-алюмінієвим покриттям. Це міцний і перевірений варіант, але вимагає постійного обслуговування задля запобігання корозії. А от у clamshell-куполах від Astro Haven використовують склопластик [5], він є легким, корозійностійким та термічно стабільним матеріалом. Також, можна звернути увагу на алюміній, адже він поєднує в собі

достатню механічну міцність, малу питому масу та природню корозійну стійкість.

Отже, класичний сферичний купол є складним у побудові і дорогим для захисту компактних поляриметрів, а особливо не забезпечує огляд всього небосхилу без азимутального наведення. Порівнявши всі за і проти, найбільш раціональною є модель, що поєднує переваги корпусу-коробки та двостулкової кришки. Прямі алюмінієві профілі та композитні панелі забезпечують технологічність виготовлення та мінімальний габарит. А розбиття кришки на дві частини і підняття на певний градус дозволяє оглядати небо без обертання всієї конструкції.

1.2. Огляд систем автоматизації захисних конструкцій для спостережень

Автоматизований захист вимірювального обладнання від атмосферних впливів є поширеною задачею в галузях, де прилади використовуються у відкритому середовищі: метеорологія, астрономія, телекомунікації. Аналіз існуючих підходів до побудови таких систем дозволяє визначити раціональну архітектуру для захисного модуля поляриметричного масиву.

Системи керування захистом обладнання поділяються на три основні класи. Перший клас – системи на базі промислових контролерів або ПК із спеціалізованим програмним забезпеченням [7]. Такі рішення забезпечують максимальну надійність і функціональність, однак є надмірно складним і затратними для компактних малогабаритних установок. Другий клас – системи на базі одноплатних комп'ютерів, таких як Raspberry Pi [8], що поєднують достатньо обчислювальну потужність із відносно низькою вартістю і застосовуються там, де потрібна локальна обробка великих масивів даних або складна логіка керування. Третій клас – системи на базі Arduino, ESP32, STM32, призначені для моніторингу датчиків, керування виконавчими

механізмами та передачею сповіщень [9]. Для компактних захисних модулів цей клас є найбільш доцільним.

Серед мікроконтролерів найбільшого поширення набули Arduino Mega/Uno, ESP8266 та ESP32. Перша платформа має широкий вибір бібліотек і є добре документованою, але позбавлена вбудованого бездротового зв'язку, через що потребує додаткових модулів. Мікроконтролери ESP8266 мають низьку вартість та забезпечують Wi-Fi-з'єднання, проте мають обмежену кількість GPIO та меншу обчислювальну потужність. ESP32 поєднує 2-ядерний процесор, вбудований Wi-Fi та Bluetooth, достатню кількість GPIO і підтримку апаратного ШІМ [10]. Тому третій варіант є найоптимальнішим вибором для систем, які потребують одночасного керування кількома виконавчими механізмами та бездротового зв'язку.

Таблиця 1.1. – Порівняння мікроконтролерних платформ [10]

Характеристика	Arduino Mega 2560	NodeMCU ESP8266	ESP32 DevKit V1
Процесор	AVR ATmega2560 8-біт / 16 МГц	Tensilica L106 32-біт, 80-160 МГц	Xtensa LX6, 2 ядра 32-біт, до 240 МГц
ОЗП / Flash	8 КБ / 256 КБ	64 КБ / 4 МБ	520 КБ / 4 МБ
Wi-Fi / BT	Ні / Ні	Так / Ні	Так / Так
GPIO / ШІМ	54 / 15	17 / 4	36 / 16
I^2C / SPI	1 / 1	1 / 2	2 / 4
Напруга живлення	5 В	3,3 В	3,3 / 5 В
Складність / Вартість	Низька / середня	Низька / низька	Низька / низька

Одним з ключових компонентів будь-якої системи автоматичного захисту є засіб виявлення атмосферних опадів та несприятливих

метеорологічних умов [11]. Для виявлення дощу використовуються резистивні датчики, принцип дії яких базується на зміні опору між провідними доріжками, коли на них потрапляє волога. Також ємнісні датчики з вищою чутливістю та меншою схильністю до корозії, або оптичні, що фіксують розсіювання інфрачервоного випромінювання каплями. Для комплексного моніторингу метеорологічних умов використовуються цифрові сенсори температури, вологості та тиску.

Для виконання механічної частини часто використовують колекторні двигуни постійного струму з редукторами або крокові з драйверами для точного позиціонування. Для систем із двопозиційним або обмежено-кутовим переміщенням обирають сервоприводи завдяки вбудованому зворотному зв'язку, простоті керування через PWM-сигнал і компактності конструкції.

При розробці компактного автоматизованого захисного модуля найдоречнішим буде вибір мікроконтролера ESP32 разом із резистивним датчиком опадів та цифровим датчиком метеорологічних умов, а у ролі виконавчого механізму – сервопривод. Така комбінація забезпечить необхідну функціональність при мінімальних апаратних витратах та складнощах реалізації.

1.3. Зображуючі поляриметри: принцип роботи, призначення та технічні характеристики

Поляризація світла є однією з фундаментальних характеристик електромагнітного випромінювання, яке визначає орієнтацію вектора електричного поля в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Поляризаційний стан несе унікальну інформацію про природу та мікрофізичні властивості середовищ. Кількісно він описується вектором Стокса, який складається з чотирьох параметрів: I (повна інтенсивність), Q та U (лінійна поляризація за різними осями) і V (кругова поляризація) [12]. Ступінь лінійної поляризації (DoLP) та кут орієнтації площини поляризації

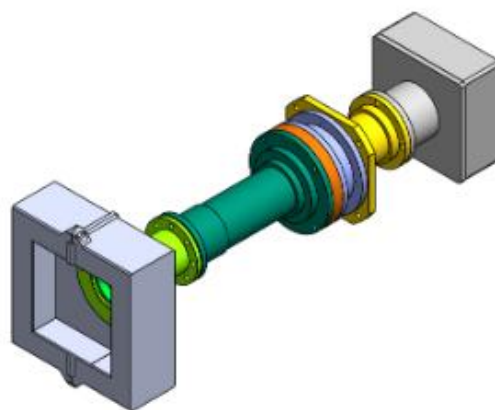
(AoLP) обчислюються безпосередньо з параметрів Q та U і є основними продуктами поляриметричних вимірювань. Визначення цих величин дає змогу отримувати інформацію про показник заломлення та концентрацію атмосферних частинок.

Зображуючий поляриметр – це оптичний прилад, який реєструє просторовий розподіл інтенсивності випромінювання та його поляризаційний стан у кожному елементі поля зору. Прилади цього класу, побудовані за принципом поділу апертури, дозволяють отримувати повний вектор Стокса за одне експонування без рухомих елементів. В основі методу лежить розділення вхідного пучка на чотири субканали за допомогою секторного поляризатора з орієнтаціями 0° , 45° , 90° , 135° , після чого зображення кожного субканалу одночасно фіксуються на спільному фотодетекторі. Така архітектура забезпечує коректність вимірювань навіть в умовах швидкої зміни атмосферної обстановки, оскільки виключає часові зсуви між каналами.

Поляметричні вимірювання знаходять широке застосування в дослідженнях атмосфери та астрономії. Поляризаційний стан розсіяного сонячного випромінювання є надзвичайно чутливим до мікрофізичних властивостей аерозольних частинок. Без залучення поляриметричних спостережень визначення параметрів аерозолі у повному обсязі принципово неможливе. Поляриметрія дозволяє визначити аерозольну оптичну товщину, розподіл частинок за розмірами, ефективний радіус, комплексний показник заломлення та одноразове альbedo розсіювання – характеристики, необхідні для моделювання кліматичних процесів та оцінювання антропогенного впливу на атмосферу. Ефективність поляриметричних методів підтверджена результатами супутникових місій POLDER, PARASOL, APS, 3MI та SPEXone [13].



а)



б)

Рисунок 1.4. – Зображення використовуваних поляриметрів (а), їхня 3Д модель в SolidWorks (б)

Прилад, для захисту масиву якого розробляється даний модуль, є наземним широкоапертурним зображуючим поляриметром, побудованим за принципом DoAP [12]. Комплекс складається з чотирьох однотипних поляриметрів, кожен з яких працює у власному спектральному діапазоні з центральними довжинами хвиль 410, 470, 555 та 865 нм. Вибір саме цих спектральних каналів обумовлено необхідністю отримання максимальної інформації про аерозольні частинки різних типів і розмірів. Канал 410 нм чутливий до дрібнодисперсного аерозолю та поглинаючих компонентів, канал 470 нм – до розподілу частинок за розмірами, 555 нм є базовим атмосферним каналом, 865 нм – до крупнодисперсного аерозолю та пилових частинок. Основний корпус кожного поляриметра має квадратний перетин зі стороною 100 мм і загальну довжину 324,43 мм. Їхній кут охоплення становить 60х60°, що є визначальною конструктивною вимогою до захисного модуля: кришка у відкритому стані не повинна перекривати оптичний тракт жодного з чотирьох приладів.

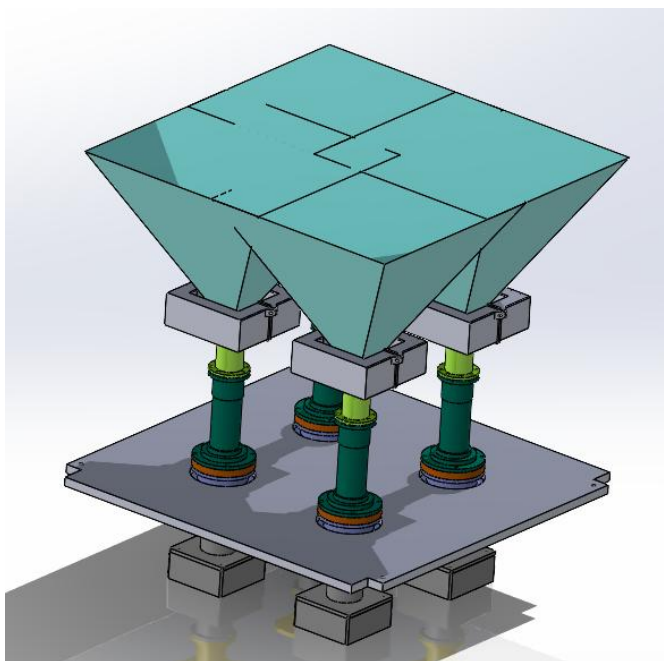


Рисунок 1.5. – Масив з чотирьох зображуючих поляриметрів

Через умови використання виникають суворі вимоги до захисту вищевказаних приладів від атмосферних впливів. Потрапляння вологи на оптичні елементи та мікрополяризаційну матрицю спричиняє спотворення та деградацію чутливості [13]. Конденсат, пил і краплі дощу на входному вікні безпосередньо впливають на точність вимірювання, оскільки навіть незначне забруднення поверхні змінює поляризаційний стан падаючого випромінювання. Підвищена вологість додатково призводить до корозії механічних елементів та псування фільтрів.

1.4. Аналіз систем дослідження аерозолі

Дослідження атмосферного аерозолі набуває дедалі більшого значення в контексті кліматичних змін, якості повітря та безпеки авіаційного і космічного зв'язку. Аерозольні частинки безпосередньо поглинають і розсіюють сонячне випромінювання, впливаючи на радіаційний баланс Землі, а також слугують ядрами конденсації хмар, що опосередковано позначається на глобальному кліматі. Крім кліматичних наслідків, підвищені концентрації дрібнодисперсних часток спричиняють захворювання органів дихання та серцево-судинної системи, погіршують горизонтальну видимість і

ускладнюють функціонування дистанційних оптичних систем. Над Україною аерозольне навантаження визначається поєднанням промислових викидів, сезонного пилу степової зони та транскордонного перенесення частинок з регіонів Середземномор'я і Близького Сходу [22].

Для кількісного опису аерозолі використовують три основних методи дистанційного зондування. Перший – сонячна фотометрія – базується на вимірюванні ослаблення прямого сонячного випромінювання на кількох довжинах хвиль: за законом Бугера-Ламберта-Бера визначається оптична товщина аерозолі (ОТА) та спектральна залежність. Глобальна мережа AERONET, що об'єднує понад 500 наземних фотометрів Cimel CE318, є основним джерелом даних про аерозоль у довгострокових кліматичних дослідженнях [23]. Другий метод – лідарне зондування – забезпечує визначення вертикального профілю розподілу аерозолі; проте лідари, як правило, не дають доступу до повного набору мікрофізичних параметрів без додаткових припущень. Третій метод – поляриметрія – є найбільш інформативним щодо повної фізичної характеристики аерозолі [13].

Поляриметричні вимірювання ґрунтуються на аналізі вектора Стокса розсіяного чи відбитого випромінювання [12]. Аерозольні частинки різної форми, розміру і складу породжують характерні підписи у ступені лінійної поляризації та кутовій залежності поляризованої яскравості. Завдяки цьому поляриметрія дозволяє одночасно відновлювати оптичну товщину аерозолі, функцію розподілу за розмірами та ефективний радіус частинок, комплексний показник заломлення, а також одноразове альbedo розсіювання. Без поляриметричних даних більшість зазначених параметрів у повному обсязі визначити неможливо [13].

Серед існуючих поляриметричних систем виділяють як супутникові, так і наземні інструменти. Супутниковий прилад POLDER, що експлуатувався в рамках місії PARASOL (2004–2013), реєстрував поляризовану яскравість атмосфери у кількох спектральних каналах. Його спадкоємцем є інструмент

SPEXone, встановлений на супутнику PACE (запуск 2024 р.), який вимірює ступінь поляризації у безперервному спектральному діапазоні [24]. Паралельно розвиваються наземні багатокутові поляриметри з широким полем зору. Саме до цього класу належать зображуючі мікрополяриметри, що розглядаються у даному дипломному проєкті: кожен із чотирьох приладів масиву 2×2 одночасно охоплює поле зору $60 \times 60^\circ$ у чотирьох спектральних каналах (410, 470, 555 та 865 нм) [23].

Порівняльний аналіз методів свідчить, що найбільш повна характеристика аерозолю досягається саме при поляриметричному підході: лише він дозволяє з мінімальними апріорними припущеннями одночасно визначити оптичні та мікрофізичні параметри аерозолю, включно з поглинанням, необхідним для оцінки прямого радіаційного ефекту [24]. Фотометрія обмежена визначенням сумарної ОТА без розрізнення внеску різних фракцій, а лідарне зондування вимагає незалежного калібрування. З огляду на сучасні вимоги до точності кліматичних прогнозів і якості повітря, комплексні поляриметричні спостереження стають стандартом для перспективних систем моніторингу атмосферного аерозолю [24].

Оскільки зображуючі поляриметри призначені для тривалих неперервних спостережень просто неба – в умовах добових і сезонних варіацій температури, опадів та механічних навантажень – вони потребують надійного захисного модуля, який не перериває процес вимірювань у сприятливу погоду і водночас оберігає чутливу оптику від несприятливих атмосферних умов. Саме ця вимога і обумовлює розробку автоматизованого компактного купола, що є предметом даного дипломного проєкту.

1.5. Постановка задачі

Розробити автоматизований компактний захисний модуль для чотирьох зображуючих поляриметрів. Потрібно виконати декілька вимог:

1. Внутрішній простір корпусу повинен забезпечувати розміщення чотирьох поляриметрів з габаритними розмірами 324,43x116 мм. Зовнішні габаритні розміри корпусу визначаються розрахунком у розділі 2.

2. Конструкція кришки у повністю відкритому положенні не повинна перекривати поле зору поляриметрів, яке становить 60x60 градусів.

3. Система автоматизації повинна забезпечувати автоматичне закривання кришки при виявленні небезпечних умов (наявність опадів, підвищена вологість, різке падіння атмосферного тиску) та відкривання після нормалізації показників із заданою часовою витримкою.

4. Система повинна забезпечувати дистанційний моніторинг стану.

Отже, потрібно створити модуль, який забезпечить захист приладів від атмосферних опадів та несприятливих кліматичних умов, а також автоматизовану кришку. Система повинна працювати без постійної присутності оператора.

1.6. Висновки до розділу 1

Огляд існуючих конструктивних рішень показав, що класичні сферичні куполи, clamshell-механізми є надто складними та нераціональними для компактних вимірювальних модулів. Найкращим варіантом буде поєднати переваги корпусу-коробки та двостулкової кришки.

Для компактних конструкцій найбільш обґрунтованим є застосування мікроконтролерних систем. Після порівняння різних платформ було обрано ESP32 DevKit V1, через вбудований Wi-Fi модуль, двоядерний процесор, достатню кількість ШІМ-каналів для керування декількома сервоприводами.

Якщо на вхідне вікно зображуючих поляриметрів попаде волога або будь-яке забруднення, то спотвориться поляризаційний стан випромінювання, що вимірюється, та знизять точність результатів. Визначальна конструктивна вимога до модулю – кришка у відкритому стані не повинна перекривати оптичний тракт жодного з чотирьох пристроїв.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАХИСНИМ МОДУЛЕМ

2.1 Оптимізація та верифікація габаритних розмірів захисного модуля

Проектування геометричних параметрів захисного модуля є ітераційним інженерно-конструкторським процесом. Габарити внутрішнього корисного простору мають задовольняти три основні критерії:

1. Ергономічний: Надійне просторове розміщення та фіксація масиву з чотирьох зображуючих поляриметрів.
2. Кінематичний: Наявність динамічних зазорів для інтеграції та безперешкодного руху елементів чотирьох кулісно-важільних механізмів відкривання кришки.
3. Оптичний: Геометрія відкритих стулок кришки за жодних умов не повинна перекривати робоче поле зору поляриметрів, яке становить $60^\circ \times 60^\circ$.

2.1.1 Аналіз просторових констант об'єкта захисту

Вихідними константами проектування, які задані специфікацією вимірювального обладнання, є габаритні розміри кластера приладів. Комплекс складається з чотирьох зображуючих поляриметрів, які об'єднані у матрицю 2x2. Окремий оптичний прилад має такі фіксовані лінійні характеристики:

- Загальна довжина тубуса з електронним блоком: $L_{\text{пол}} = 324,43$ мм;
- Ширина основного квадратного перерізу корпусу: $B_{\text{пол}} = 100$ мм;
- Максимальна ширина приладу з урахуванням виступів під кріплення: $B_{\text{монт}} = 116$ мм

Конструктивно задана чиста відстань між суміжними стінками корпусів поляриметрів у кластері становить $S_{\text{між}} = 70$ мм. Звідси визначається базовий габаритний розмір, який займає суто вимірювальний масив у плані:

$$W_{\text{мас}} = 2 * B_{\text{пол}} + S_{\text{між}} = 2 * 100 + 70 = 270 \text{ мм}$$

Даний розмір визначає межі координатної сітки об'єкта захисту, відносно якої розраховуються параметри захисної оболонки.

2.1.2 Визначення та верифікація внутрішнього об'єму коробки

Для визначення фінальних лінійних розмірів внутрішнього простору у SolidWorks було побудовано первинне компоувальне креслення. Внутрішній простір розділено на дві функціональні зони: вільну (паралельну стулкам) та механічну (вздовж якої інтегруються приводні вузли).

1. Обґрунтування внутрішньої ширини корпусу ($W_{\text{внутр}}$):

Для запобігання виникнення теплового містка між зовнішнім середовищем та оптикою приладів, а також для безпечного прокладання кабельних трас, теоретично необхідний зазор від крайньої стінки поляриметра до обшивки закладено на рівні $\Delta_{\text{шир}} = 78,05 \text{ мм}$. Аналітична перевірка лінійного розміру:

$$W_{\text{внутр}} = W_{\text{мас}} + 2 * \Delta_{\text{шир}} = 270 + 2 * 78,05 = 426,1 \text{ мм}$$

З урахуванням інтеграції каркасу з конструкційного профілю, у моделі зафіксовано фінальний внутрішній розмір по ширині $W_{\text{внутр}} = 426,1 \text{ мм}$.

2. Обґрунтування внутрішньої довжини корпусу ($L_{\text{внутр}}$):

Оскільки вздовж цих стінок інтегруються механізми відкриття кришки, мінімальний зазор від корпусу приладу до внутрішньої стінки збільшено до $\Delta_{\text{довж}} = 93,05 \text{ мм}$. Розрахункова довжина корисного простору:

$$L_{\text{внутр}} = W_{\text{мас}} + 2 * \Delta_{\text{довж}} = 270 + 2 * 93,05 = 456,1 \text{ мм}$$

За результатами оптимізації взаємного розташування елементів кінематики у SolidWorks, внутрішній лінійний розмір по довжині встановлено $L_{\text{внутр}} = 456,1 \text{ мм}$.

3. Розрахунок внутрішньої висоти ($H_{\text{внутр}}$):

Всередині модуля встановлено панель завтовшки $h_{\text{пан}} = 10$ мм на висоті $H_{\text{пан}} = 222$ мм від дна конструкції, яка слугує жорсткою основою для фіксації поляриметрів. Для визначення повної внутрішньої висоти коробки від дна до нижнього зрізу закритої кришки складається рівняння вертикального балансу простору:

$$H_{\text{внутр}} = H_{\text{ниж}} + L_{\text{пол}} + \Delta_{\text{верх}}$$

де:

- $H_{\text{ниж}} = 112,8$ мм – розрахунковий технологічний зазор під електронними блоками приладів для монтажу плати керування, блоків живлення та комутацій.
- $\Delta_{\text{верх}} = 93,56$ мм – розрахункова вертикальна відстань від верхнього торця об'єктива поляриметра до внутрішньої площини кришки, яка виключає деформаційний або динамічний контакт елементів під час закривання.

Фінальна внутрішня висота модулю:

$$H_{\text{внутр}} = 112,8 + 324,43 + 93,56 = 490 \text{ мм}$$

2.1.3 Розрахунок конструктивних параметрів каркасу та зовнішніх габаритів корпусу

Конструктивну основу захисної коробки становить рамний каркас, зібраний із квадратного конструкційного профілю перерізом 20х20 мм. Ззовні каркас закривається листовою обшивкою товщиною $\delta_{\text{обш}} = 4$ мм.

Довжина горизонтальних поздовжніх профілів каркасу: $L_{\text{проф}} = 400$ мм.

Довжина вертикальних стійкових елементів каркасу: $L_{\text{проф}} = 450$ мм.

Зовнішні лінійні габарити захисної коробки розраховуються шляхом додавання до внутрішніх розмірів подвійної товщини обшивки.

$$L_{\text{зовн}} = L_{\text{внутр}} + 2 * 4 = 456,1 + 8 = 464,1 \text{ мм}$$

$$W_{\text{зовн}} = W_{\text{внутр}} + 2 * 4 = 426,1 + 8 = 434,1 \text{ мм}$$

Зовнішній висотний габарит коробки визначається додаванням товщини рамних профілів основи та внутрішньої висоти модулю:

$$H_{\text{зовн}} = H_{\text{внутр}} + B_{\text{проф}} = 490 + 20 = 510 \text{ мм}$$

Для організації вільного зливу опадів та виключення капілярного затікання води під дно модуля, конструкція оснащується чотирма опорними ніжками $H_{\text{ніжки}} = 20 \text{ мм}$ з перерізом 40x40 мм. Загальний статичний вертикальний габарит модуля у закритому стані вираховується як:

$$H_{\text{заг}} = H_{\text{зовн}} + H_{\text{ніжки}} = 510 + 20 = 530 \text{ мм}$$

2.1.4 Геометричний розрахунок параметрів двостулкової кришки та приводу

Захисний дах модуля складається з двох однакових дзеркально-симетричних стулук. Лінійні розміри стулук виводяться з отриманих зовнішніх габаритів коробки з урахуванням вимог герметичності та створення навісу.

Для надійного перекриття торців корпусу, закладається двосторонній козирковий виступ $\Delta_{\text{коз}} = 5 \text{ мм}$. Тоді довжина стулки розраховується так:

$$L_{\text{криш}} = L_{\text{зовн}} + 2 * \Delta_{\text{коз}} = 464,1 + 10 = 474,1 \text{ мм}$$

Ширина кожної з двох симетричних частин даху визначається діленням повної зовнішньої ширини коробки навпіл з додаванням величини перекриття центрального стику стулук:

$$W_{\text{криш}} = \frac{W_{\text{зовн}}}{2} + \Delta_{\text{коз}} = \frac{434,1}{2} + 5 = 217,05 + 5 = 222,05 \text{ мм}$$

Синхронізація чотирьох важільних приводів відкривання забезпечується циліндричною передачею з нормативною міжосьовою відстанню $a_w = 48 \text{ мм}$.

При заданій кількості зубців малої шестерні $z_1 = 21$ та великої шестерні $z_2 = 43$ передавальне відношення дорівнює:

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{43}{21} = 2,0476$$

Розрахунковий модуль зубів передачі виводиться через геометричні сталі зубчастого зачеплення:

$$m = \frac{2 * a_w}{z_1 + z_2} = \frac{2 * 48}{43 + 21} = \frac{96}{64} = 1,5 \text{ мм}$$

На основі розрахованого модуля визначаються точні ділильні діаметри шестерень кінематичного вузла:

- Діаметр ділильного кола малої шестерні: $d_1 = m * z_1 = 1,5 * 21 = 31,5 \text{ мм}$
- Діаметр ділильного кола великої шестерні: $d_2 = m * z_2 = 1,5 * 43 = 64,5 \text{ мм}$

2.1.5 Верифікаційний розрахунок на оптичну сумісність

Оскільки за розрахунком вертикального балансу лінзи об'єтивів заглиблені всередину коробки на $\Delta_{\text{верх}} = 93,56 \text{ мм}$, необхідно математично довести, що стінки та верхній рамний профіль не перекриватимуть світлові пучки приладів під час вимірювань.

При повному робочому куті огляду приладу у 60° (половинний кут розхилу світлового конуса $\alpha = 30^\circ$) розрахунковий радіус світлового пучка на рівні верхнього зрізу коробки визначається через тригонометричну функцію тангенса відносно висоти заглиблення оптики:

$$R_{\text{пучка}} = \Delta_{\text{верх}} * \tan(30^\circ) = 93,56 * 0,5774 = 54,02 \text{ мм}$$

Для безперешкодного проходження світла чиста лінійна відстань від крайньої точки лінзи приладу до внутрішньої сторони елемента рамного каркаса повинна суворо задовольняти нерівність конструктивного обмеження:

$$L_{\text{заз}} > R_{\text{пучка}}$$

При отриманому в ході проєктування зазорі $L_{\text{заз}} = 96,38$ мм проведемо верифікацію умови:

$$96,38 \text{ мм} > 54,02 \text{ мм}$$

Нерівність виконується з позитивним надлишком. Гарантований інженерний запас вільного простору дорівнює:

$$\text{Запас} = L_{\text{заз}} - R_{\text{пучка}} = 96,38 - 54,02 = 42,46 \text{ мм}$$

Оскільки розрахункова умова повністю задоволена, геометрична структура захисного модуля повністю виключає ефект віньєтування зображення стінками чи каркасом купола. Після повного циклу роботи кулісного механізму, масив із чотирьох зображуючих поляриметрів отримує безперешкодний оптичний доступ до спостереження усієї заданої ділянки небесної сфери.

2.2 Вибір елементної бази

Для реалізації алгоритму надійного захисту метеорологічного та оптичного обладнання необхідна розробка локальної системи керування, яка здійснюватиме безперервний збір інформації про стан навколишнього середовища, аналітичну обробку даних у реальному часі та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів кришки. Вибір елементної бази здійснюється шляхом порівняльного аналізу за критеріями функціональної достатності, енергоефективності, масогабаритних показників та стійкості до експлуатації у відкритому середовищі.

2.2.1 Вибір мікроконтролера

Центральний контролер повинен забезпечувати апаратну генерацію сигналів широтно-імпульсної модуляції для одночасного позиціонування чотирьох приводів відкривання кришки. Не можна забувати про інтегровані

інтерфейси I2C/SPI для цифрових сенсорів, а також вбудований бездротовий модуль для реалізації дистанційного моніторингу оператором.

Для проекту обрано 32-бітний двоядерний мікроконтролер ESP32 NodeMCU DevKit V1, який поєднує високу обчислювальну потужність із вбудованими радіомодулями Wi-Fi та Bluetooth.



Рисунок 2.1. – Мікроконтролер ESP32 DevKit V1 [14]

Далі наведені технічні характеристики мікроконтролера, згідно з якими буде розроблятися система. Технічні характеристики взяті з сайту Arduino.ua

- Архітектура та обчислювальне ядро: Xtensa Dual-Core 32-bit LX6;
- Тактова частота процесора: до 240 МГц (забезпечує паралельну обробку потоку даних та генерацію ШІМ);
- Об'єм оперативної пам'яті: 520 КБ;
- Об'єм вбудованої Flash-пам'яті: 4 МБ
- Бездротові інтерфейси комунікацій: Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth v4.2 BLE;
- Інтерфейси підключення периферії: 2 x I^2C , 3 x UART, 4 x SPI;
- Апаратні канали ШІМ: до 16 незалежних каналів із гнучким налаштуванням роздільної здатності;
- Номінальна напруга логічних рівнів: 3,3 В (вхідна/вихідна);
- Напруга живлення плати модуля: 5 В (через вбудований лінійний стабілізатор AMS1117 – 3,3);

- Струм споживання в робочому режимі: 80 мА (до 240 мА при активній передачі даних через Wi-Fi) [14]

2.2.2 Вибір датчиків

Для забезпечення автоматичного закривання кришки при виявленні несприятливих погодних умов система має фіксувати наявність рідких опадів, а також контролювати вологість та атмосферний тиск.

1. Датчик виявлення опадів FC-37



Рисунок 2.2. – Датчик опадів FC37 та мікросхема LM393 [16]

Для миттєвої реєстрації початку дощу або снігопаду обрано резистивний датчик опадів FC-37 (Рис.2.2.) у комплекті з аналогово-цифровим модулем-компаратором на базі мікросхеми LM393.

Технічні характеристики:

- Напруга живлення: 3.3 В – 5 В DC
- Робочий струм: 15 мА
- Компаратор: LM393
- Типи виходів:
 - Цифровий вихід: TTL рівні (0В/5В)
 - Аналоговий вихід: 0В – VCC (пропорційно рівню вологи)
- Вологість: до 95% RH (без конденсату на електронному модулі)

- Час відгуку: менше 1 секунди
 - Інтерфейс підключення: 4-пінний роз'єм (VCC, GND, DO, AO)
 - Розміри електронного модуля: 31.5x14 мм
 - Вага комплекту: приблизно 20 г [16]
2. Цифровий метеорологічний сенсор BME280

Щоб забезпечити комплексний мікрокліматичний моніторинг для превентивного захисту оптичного обладнання, найкращим варіантом буде BME280 (Рис.2.3)



Рисунок 2.3. – Датчик BME280 [17]

Технічні характеристики:

- Інтерфейс підключення: I^2C
- Межі вимірювання температури: від -40 до 85 градусів
- Точність виміру температури: від 0,5 до 1 градуса
- Межі виміру вологості: від 0 до 100%
- Точність виміру вологості: 3%
- Межі вимірювання тиску: від 300 до 1100 гПа
- Точність вимірювання тиску 1гПа
- Напруга живлення: від 1,8 до 5 В
- Споживаний струм під час вимірювання тиску / вологості /

температури: 714 мкА / 340 мкА / 350 мкА

- Розміри модуля: 15x12x3 мм [17]

2.2.3 Вибір виконавчих приводів механізму відкривання

Через обмежений кут переміщення робочого важеля кулісного механізму, використання сервоприводів є найбільш раціональним через наявність вбудованого зворотного зв'язку за положенням. Для реалізації чотирьох кінематичних приводів обрано сервоприводи Digger DSS-M15S (Рис.2.4) з повністю металевим редуктором.



Рисунок 2.4. – Сервопривод DSS-M15S [15]

Технічні характеристики:

- Робоча напруга живлення: 4,8 В – 7,2 В (номінальна напруга функціонування в системі – 6 В);
- Максимальний крутний момент: 15 кг*см при напрузі живлення 6 В;
- Швидкість переміщення вихідного валу на кут 60°: 0,16 сек;
- Електричні струми споживання:
 - Струм спокою: 80 мА;
 - Струм зупинки: 1,4 А;
 - Струм очікування: 4 мА;
- Кінематичний робочий діапазон кута повороту: 0 – 180°;
- Матеріал елементів редуктора: Високоміцний мідно-алюмінієвий сплав;

- Сигнал зворотного зв'язку: 0 – 3,3 В;
- Частота керування: 50 – 330 Гц;
- Розміри: 54,5 x 20 x 47,5 мм. [15]

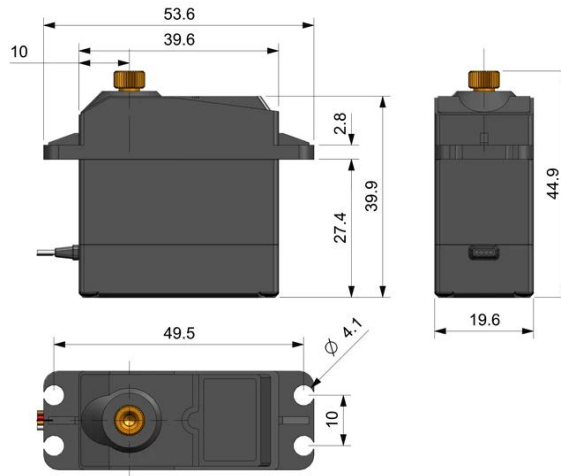


Рисунок 2.5. – Габаритні розміри DSS-M15S [15]

2.2.4 Вибір блоку живлення

Для забезпечення надійної та безперебійної роботи всіх елементів електронної схеми автоматизації необхідно підібрати стабілізоване джерело живлення. Основними критеріями вибору є забезпечення номінальних рівнів напруги, стійкість до пускових струмів електроприводів, високий ККД та наявність комплексного захисту від електричних аварій.

У даному проєкті всі компоненти функціонують від постійного струму з номінальною напругою 5 В. Розрахуємо сумарне струмове навантаження системи для визначення необхідної потужності джерела живлення:

1. Мікроконтролер: піковий струм при активації передачі даних через Wi-Fi становить $I_{\text{МК}} = 0,24 \text{ А}$
2. Датчики: сумарний струм споживання $I_{\text{сенс}} = 0,02 \text{ А}$
3. Виконавчі сервоприводи: номінальний струм одного приводу під час руху 350 мА. Проте в моменти запуску або подолання вітрового

навантаження пусковий струм одного сервопривода може досягати 1,8 А. При синхронній роботі, струм споживання може досягати $I_{\text{прив}} = 4 * 1,8 = 7,2 \text{ А}$

Загальний піковий струм системи становить:

$$I_{\text{пiк}} = I_{\text{мк}} + I_{\text{сeнс}} + I_{\text{прив}} = 0,24 + 0,02 + 7,2 = 7,46 \text{ А}$$

Згідно з вимогами надійності проєктування систем автоматизації, джерело живлення повинно мати конструктивний запас по потужності не менше 20-25% для запобігання тривалій роботі на межі можливостей та перегріву. Таким чином, мінімальний розрахунковий вихідний струм джерела живлення повинен бути:

$$I_{\text{дж}} \geq 1,25 * I_{\text{пiк}} = 1,25 * 7,46 = 9,325 \text{ А}$$

З огляду на отримані розрахункові дані, для інтеграції в систему автоматизації обрано промисловий імпульсний блок живлення в перфорованому металевому кожусі Mean Well RSP-75-7,5 [18] (Рис.2.6.), який повністю задовольняє умову за навантаженням ($15 \text{ А} > 9,33 \text{ А}$)



Рисунок 2.6. – Блок живлення Mean Well RSP-75-7,5 [18]

Технічні характеристики:

- Вихідна потужність: 75 Вт;

- Струм на виході: 10 А;
- Вихідна напруга: 7,5 В;
- Діапазон вхідної напруги змінного струму: 85-264 В;
- Частота вхідного змінного струму: 47-63 Гц;
- Ступінь захисту: IP20;
- Габаритні розміри: 159х97х30 мм. [18]

2.3 Структурно-функціональна схема системи керування

На основі обраної елементної бази автоматизації та принципу повної автономності об'єкта розроблено структурно-функціональну схему системи керування захисним куполом (Рис.2.7.).

Особливості даної архітектури є те, що вона функціонує в режимі замкненого автономного регулювання без можливості зовнішнього інтерактивного втручання з боку людини. Роль оператора зведена до пасивного віддаленого моніторингу. Він лише отримує односторонні телеметричні та аварійні сповіщення від модуля через бездротовий канал зв'язку.

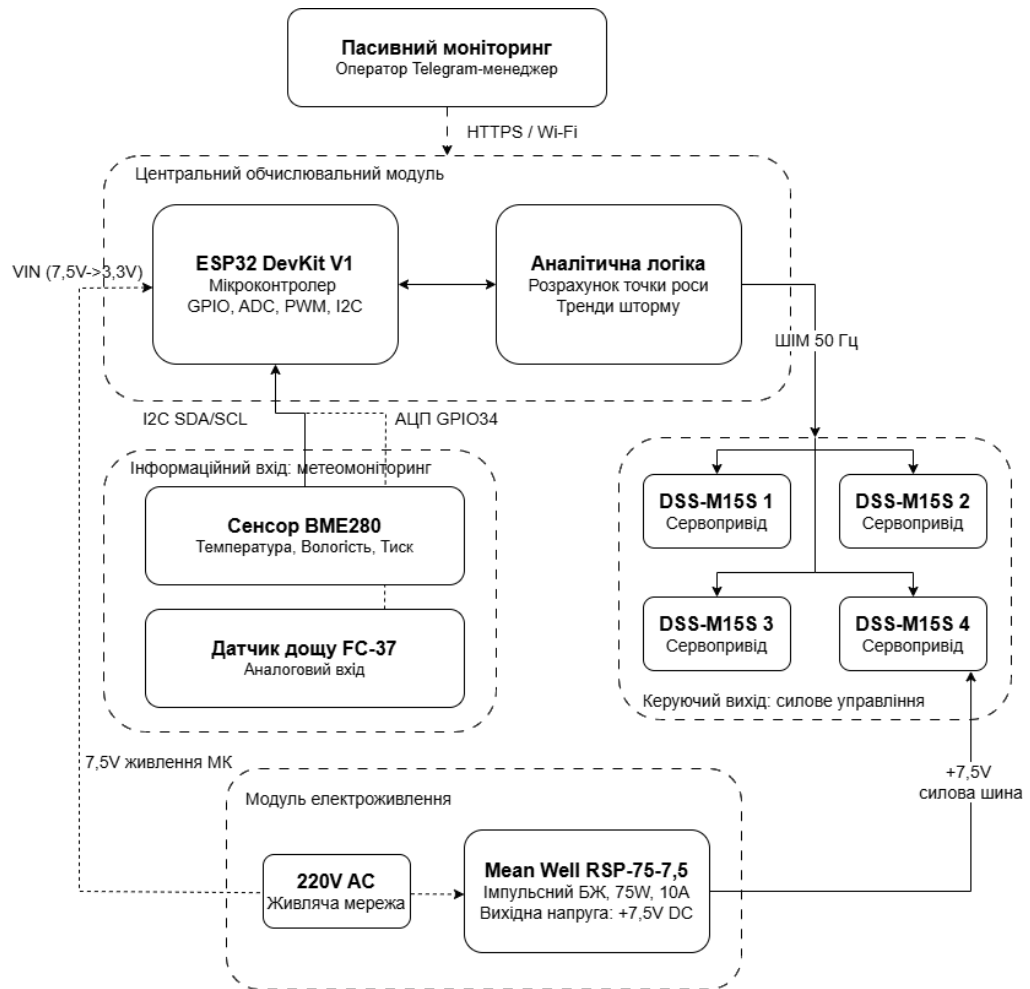


Рисунок 2.7. – Структурно-функціональна схема системи керування

Структурно систему керування розділено на чотири взаємопов'язані модулі:

1. Інформаційно-вимірювальний модуль: здійснює безперервний збір метеорологічних даних навколо купола за допомогою прецизійного цифрового сенсора клімату BME280 та аналогового датчика опадів FC-37.
2. Центральний обчислювальний модуль: ядро системи, що реалізує захисні алгоритми, аналізує прогностичні тренди негоди, обчислює точку роси та генерує вихідні сигнали керування.
3. Модуль виконавчих приводів: здійснює фізичне переміщення стулок кришки за допомогою чотирьох сервоприводів DSS-M15S.

4. Модуль одностороннього бездротового сповіщення: здійснює передачу звітів та аварійних прапорів у месенджер Telegram оператора через HTTP-запити.

2.3.1 Опис інформаційних зв'язків та протоколів комунікації

Система поділяється на чотири канали інформаційного зв'язку:

1. Канал комплексного моніторингу клімату. Комунікація здійснюється через послідовну синхронну шину I^2C . Для організації зв'язку використовуються дві лінії мікроконтролера: лінія тактування SCL та двонаправлена лінія даних SDA. Дані передаються у вигляді пакета цифрових байтів із частотою до 400 кГц. Цей канал повністю захищений, що прибирає спотворення показників температури, тиску та вологості електромагнітними наведеннями від силових двигунів.

2. Канал виявлення опадів. Комунікація побудована по аналоговій лінії A0. Сигнал надходить на вхід інтегрованого 12-бітного АЦП контролера ESP32 у вигляді напруги 0-3,3 В, що дозволяє програмі оцінювати інтенсивність вологи на платі для реалізації триггеру швидкого реагування.

3. Канал силового ШІМ-керування. Керування положенням стулок даху реалізовано через незалежні лінії генерації широтно-імпульсної модуляції частотою 50 Гц. Кожен із чотирьох приводів підключений до окремого GPIO. Тривалість високого рівня імпульсу жорстко задає просторову координату валу.

4. Канал бездротового сповіщення. Інформаційний вихідний канал. Обмін даними реалізовано за допомогою вбудованого Wi-Fi-модуля. Мікроконтролер виступає в ролі HTTP-клієнта. При зміні станів системи ESP32 через захищений TLS-протокол відправляє POST-запити у вигляді JSON-пакетів на віддалений сервер Telegram за прикладним протоколом HTTPS. Оператор отримує ці текстові повідомлення на свій кінцевий пристрій пасивно.

2.3.2 Організація шин електроживлення

Для захисту логічної частини мікроконтролера від високо амплітудних струмових завад та просідань напруги, які виникають при синхронному пуску чотирьох сервоприводів, лінії живлення на схемі чітко розділені:

- Лінія $\sim 220V$ AC: надходить від промислової мережі на вхід імпульсного блока Mean Well RSP-75-7,5;
- Силова шина $=7,5V$ DC: підведена від виходу БЖ окремими провідниками великого перерізу безпосередньо до ліній живлення чотирьох сервоприводів та до виводу V_{in} плати ESP32.
- Шина логіки $+3,3V$ DC: формується внутрішнім лінійним стабілізатором плати ESP32 і живить виключно слабкострумові кола самого процесора, датчика BME280 та плати датчика FC-37.

2.4 Алгоритм роботи системи керування

Функціонування автоматизованої системи керування захисним куполом базується на циклічному опитуванні інформаційно-вимірювальних каналів, аналізі динаміки метеорологічних параметрів та розрахунку комплексних критеріїв загрози для оптичних приладів. Головним завданням алгоритму є превентивне закривання стулок кришки для уникнення потрапляння рідких опадів, пошкодження конструкції штормовим вітром або утворення конденсату на лінзах зображуючих поляриметрів.

2.4.1 Опис станів системи та критеріїв безпеки

Програма мікроконтролера ESP32 реалізує кінцевий автомат, який може перебувати в одному з трьох основних станів:

1. Режим очікування: стулки кришки повністю закриті. Робочий струм утримує вали, датчики опитуються у фоновому режимі.
2. Робочий режим спостереження: стулки кришки повністю відкинуті на максимальний робочий кут. Оптичний тракт поляриметрів повністю вільний.

3. Аварійне закриття: пріоритетний підпрограмний процес, що перериває будь-які поточні операції для екстреного повернення стулок у безпечне закрите положення при виявленні критичних умов.

Логіка автономного захисту обладнання оперує трьома незалежними інженерними критеріями спрацювання:

1. Дискретно-аналоговий критерій опадів: фіксація прямого потрапляння вологи на сенсорну плату. Спрацьовує, коли аналогове значення на вході АЦП перевищує поріг:

$$Rain_{val} > 2000$$

2. Аналітичний критерій точки роси: обчислення дефіциту точки роси як різниці між поточною температурою повітря з датчика та розрахованою температурою точки роси. Критичний поріг, що викликає запітніння лінз:

$$\Delta T = T - T_d \leq 2,0^{\circ}C$$

3. Прогностичний барометричний критерій: базується на комплексному аналізі векторів зміни атмосферного тиску та відносної вологості. Критичним порогом для ініціалізації випереджального закриття купола є виконання системи нерівностей за фіксований проміжок часу ($\Delta t = 10$ хв):

$$\begin{cases} \Delta P = P_t - P_{t-10} \leq -1,5 \text{ гПа} \\ \Delta RH = RH_t - RH_{t-10} \geq 10 \% \end{cases}$$

де P_t , RH_t – поточні значення, а P_{t-10} , RH_{t-10} – значення, зафіксовані у кільцевому буфері пам'яті ESP32 10 хвилин тому. Одночасне падіння тиску та стрімке зростання вологості свідчить про наближення негоди, що дозволяє сховати оптику ще до падіння перших крапель дощу.

2.4.2 Послідовність виконання кроків алгоритму

Логіка керуючої програми виконується у нескінченному циклі й складається з таких послідовних етапів:

Крок 1. Ініціалізація системи

При подачі живлення від Mean Well RSP-75-7,5 мікроконтролер конфігурує GPIO, виділяє апаратні таймери ШІМ, підключається до Wi-Fi та синхронізує точний час через NTP-сервер. Для забезпечення безпеки приладів реалізовано режим Safe Boot: сервоприводи відразу отримують сигнал на закриття, переводячи систему в стан State_Closed. Після цього виконується перша миттєва перевірка метеорологічних умов.

Крок 2. Циклічний збір інформації

З періодичністю $t_{\text{опит}} = 2000$ мс контролер зчитує температурні показники, відносну вологість та атмосферний тиск. Отримані значення тиску та вологості кожну хвилину записуються у кільцевий буфер для відстеження 10-хвилинних трендів. Паралельно на кожному кроці циклу сканується аналогова лінія RAIN_PIN.

Крок 3. Розрахунок термодинамічних показників

На основі значень температури та вологості за допомогою вбудованого математичного апарату обчислюється температура точки роси (T_d) за формулою Магнуса-Тетенса [21]:

$$\gamma(T, RH) = \frac{17,27 * T}{237,7 + T} + \ln\left(\frac{RH}{100}\right)$$

$$T_d = \frac{237,7 * \gamma(T, RH)}{17,27 - \gamma(T, RH)}$$

Крок 4. Перевірка умов безпеки

Програма послідовно аналізує чотири захисні умови:

1. Перевірка на дощ:

Чи перевищує поточний сигнал з датчика FC-37 критичний поріг 2000?

2. Перевірка на конденсат:

Чи виконується нерівність $(T - T_d) \leq 2,0^{\circ}\text{C}$?

3. Перевірка на штормовий фронт:

Чи зафіксовано за останні 10 хвилин падіння тиску $\geq 1,5$ гПа разом із ростом вологості $\geq 10\%$?

4. Перевірка статичних меж:

Чи перевищує вологість поріг 80% або чи впав тиск нижче 1005 гПа?

Крок 5. Прийняття рішення та керування приводами

Фіксація загрози:

Якщо хоча б одна з умов безпеки виконується, система негайно ініціює стан State_Emergency. Контролер подає сигнал на закриття для всіх 4-х сервоприводів. Купол закривається. Через Telegram Bot API оператору надсилається миттєве сповіщення з деталізацією причини аварії та поточними метеоданими.

Безпечне середовище:

Якщо всі умови безпеки задоволені, система переходить у стан State_Opened. Контролер дає команду на відкриття, забезпечуючи вільний хід кулісного механізму.

Крок 6. Функціонування логічного таймера висихання

Для запобігання потраплянню залишків крапель води з даху всередину коробки під час руху механізму, алгоритм блокує миттєве відкриття купола після завершення негоди. Коли датчик FC-37 повертається у стан «сухо», контролер запускає таймер затримки на висихання. Повторне переведення кришки в робочий стан State_Opened дозволяється лише за умови, що програмний таймер повністю обнулився, а вологість повітря та атмосферний тиск одночасно нормалізувалися і стабілізувалися нижче критичних меж.

2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломного проєкту виконано повний комплекс теоретичних, алгоритмічних та системно-технічних розрахунків, спрямованих на проектування локальної автономної системи керування захисним куполом для чотирьох зображуючих поляриметрів.

Виконано аналітичний розрахунок просторового балансу захисного модуля на основі обраних конструкторських параметрів каркасу із профілю 20x20 мм і координатного положення монтажної панелі на висоті 222 мм від дна конструкції. Перевірочний розрахунок на оптичну сумісність підтвердив, наявність конструкторського запасу простору у 42,36 мм відносно робочого світлового конуса огляду приладів, що повністю виключає виникнення ефекту віньєтування зображення.

Здійснено вибір елементної бази системи автоматизації за критеріями функціональної достатності, обчислювальної потужності та автономності. Для реалізації ядра системи обрано мікроконтролер ESP32 DevKit V1. Для створення повноцінного мікрокліматичного моніторингу в реальних умовах експлуатації обґрунтовано вибір датчика опадів FC-37 та сенсора BME280. В якості виконавчих приводів обрано сервоприводи Digger DSS-M15S із високоміцним металевим редуктором. Після розрахунку максимального сумарного споживання системи, було обрано промислове джерело живлення Mean Well RSP-75-7,5, що гарантує 25-відсотковий інженерний запас потужності та унеможливорює просідання напруги логіки при старті приводів.

Розроблено структурно-функціональну схему системи керування, яка відображає архітектуру інформаційних, сигнальних та енергетичних зв'язків. Також спроектовано алгоритм роботи керуючої програми ESP32, побудований за принципом замкненого циклу, де людина-оператор повністю виключена з контуру прийняття рішень і виконує лише пасивне спостереження.

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНА РОЗРОБКА ЗАХИСНОГО МОДУЛЯ

3.1 Конструкція корпусу та несучого каркасу

Для забезпечення високої питомої міцності та мінімізації загальної маси установки, силовий каркас модуля спроектовано на базі стандартного алюмінієвого конструкційного станочного профілю перерізом 20x20 мм. Вибір даного профілю зумовлений такими інженерними чинниками:

- Високий момент опору вигину та крученню при малій вазі погонного метра;
- Наявність Т-подібних пазів, що дозволяє легко регулювати положення внутрішніх вузлів, монтажних платформ та полегшує прокладання кабельних трас;
- Висока корозійна стійкість матеріалу, що є критично важливим для систем відкритого позиціонування.

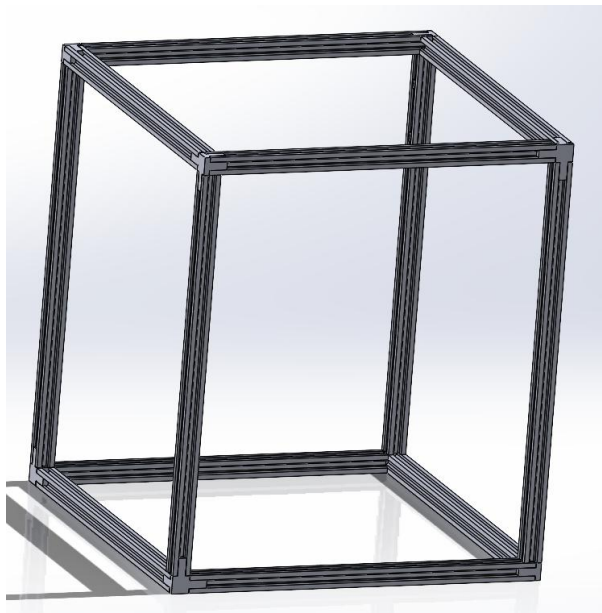


Рисунок 3.1. – Каркас захисного модуля

Силовий каркас складається з чотирьох вертикальних профілей довжиною 450 мм, які жорстко з'єднані з горизонтальними профілями довжиною 400 мм та кутовими з'єднувачами (Рис.3.1.).

Зовнішня обшивка каркасу виконана з алюмінієвих композитних панелей, що забезпечує герметичність. Загальні зовнішні габаритні розміри захисної коробки становлять 464.1 x 434.1 x 510 мм.

Для запобігання безпосередньому контакту дна конструкції з монтажною поверхнею, дестабілізації через калюжі або бруд, а також для гасіння вібраційних навантажень, на нижній площині встановлено чотири опорні ніжки. Кожна ніжка має геометричні розміри 40 x 40 x 20 мм.

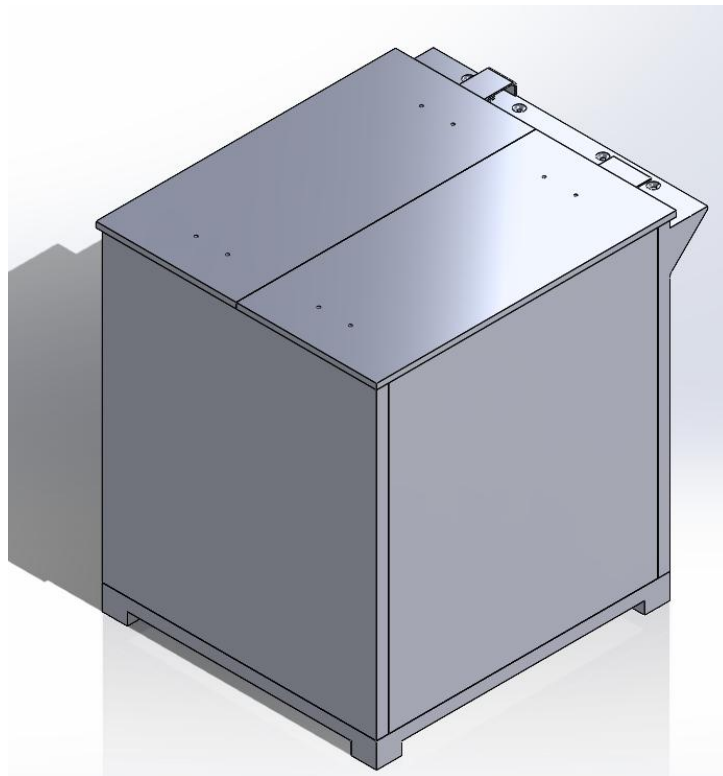


Рисунок 3.2. – Загальний 3Д вигляд захисного модуля в зборі

Усередині корпусу на висоті 222 мм від нижньої площини дна горизонтально інтегровано монтажну панель товщиною 10 мм, яка виконує роль базової плити для оптичних приладів. Панель виготовлена з високоміцного алюмінієвого сплаву Д16Т методом фрезерування. Її габаритні розміри по ширині та довжині повністю збігаються з внутрішнім периметром коробки. Це дозволяє герметично розділити внутрішній простір купола на два ізольовані відсіки:

1. Нижній технологічний: слугує для розміщення важких та тепловіділяючих компонентів.

2. Верхній використовується для безпосередньої робочої зони поляриметрів.

На монтажній панелі жорстко закріплено масив вимірювального обладнання, що складається з чотирьох зображуючих поляриметрів, розташованих за схемою матриці 2 x 2.

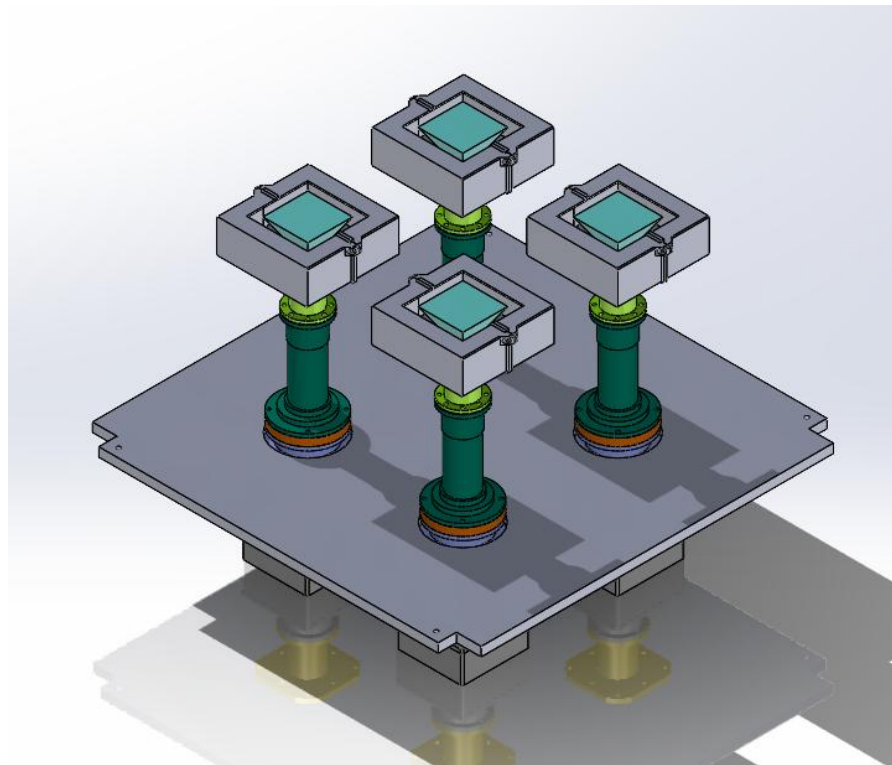


Рисунок 3.3. – Масив з 4-х поляриметрів встановлених в платформу

Просторове розташування поляриметрів у верхньому відсіку розраховано з високою точністю для виключення взаємного затінення бленд та перекриття апертур:

- Відстань від нижнього торця поляриметра до дна конструкції: 112,8 мм;
- Відстань від верхнього оптичного зрізу поляриметра до внутрішньої поверхні захисної кришки у закритому стані: 52,77 мм;

- Чистий внутрішній проміжний інтервал між корпусами сусідніх поляриметрів у масиві: 70 мм;
- Відстань від бічної стінки поляриметра до внутрішньої стінки корпусу у зоні, де рухомі елементи: 78,05;
- Відстань від поляриметра до внутрішньої стінки корпусу в зоні розміщення механізмів відкриття: 93,05 мм. Збільшення цього проміжку на 15 мм зумовлене необхідністю безперешкодного функціонування внутрішніх важелів та шестерень механізму приводу кришки.

3.2 Обґрунтування кінематичної схеми та конструкції механізму відкриття кришки

Для запобігання проникненню опадів та вологи всередину модуля у стулках кришки передбачено конструктивні козирки-відступи, які виступають за межі основного периметра коробки корпусу. Коли йде дощ у закритому стані купола вода під дією сили тяжіння природним шляхом стікає по зовнішніх гранях козирків назовні.

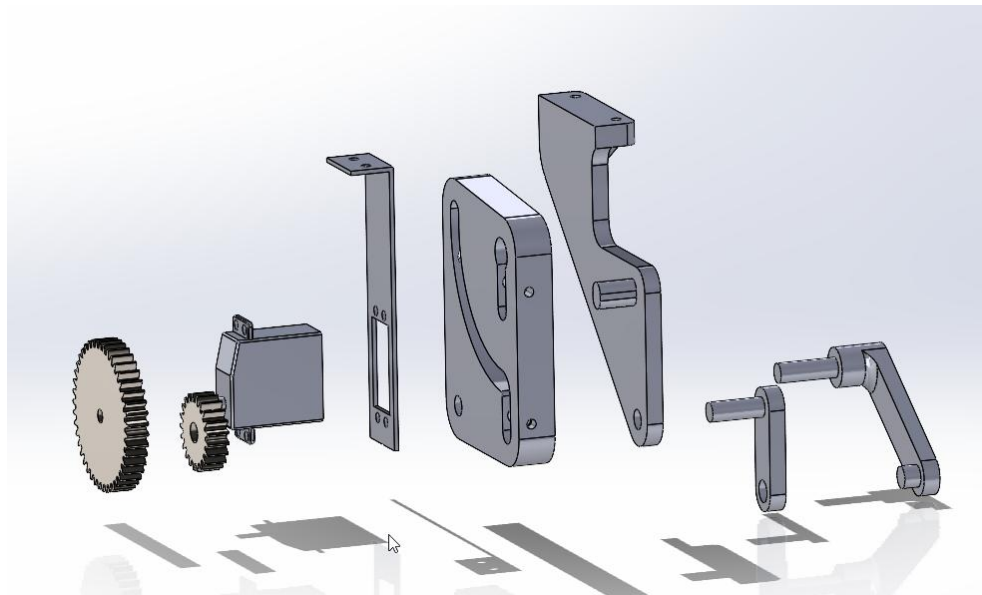


Рисунок 3.4. – Механізм відкривання кришки у розібраному вигляді

Керування кожною стулкою здійснюється автономно за допомогою двох ідентичних механізмів, розташованих на протилежних бічних гранях. До складу одного кінематичного вузла входять такі конструктивні елементи:

1. Джерело крутного моменту: цифровий сервопривод з високим пусковим моментом;
2. Несучий кронштейн сервоприводу, виконаний методом фрезерування, призначений для жорсткої фіксації корпусу двигуна на верхньому горизонтальному станочному профілі каркасу.
3. Зубчаста передача складається з великої шестерні ($z_1 = 43$), яка встановлена на шліцевому валу сервоприводу, та маленької ($z_2 = 21$). Міжосьова відстань передачі становить 48 мм. Передаточне відношення дорівнює $i = 2.048$. Дане рішення дозволяє збільшити корисний крутний момент на вихідному валу механізму більш ніж удвічі, що забезпечує плавне подолання вітрових навантажень при відкритті кришки.
4. Також два важелі, довгий та короткий, що передають рух від малої шестерні до кришки.
5. Останній компонент це напрямна копірна панель закріплена на вертикальному боковому профілі каркасу. Панель має прецизійні фігурні вирізи (пази), по яких переміщуються напрямні штифти, жорстко змонтовані на кронштейні кришки та малому важелі.

Застосування копірних пазів дозволило реалізувати складну двохетапну траєкторію руху стулок, яка не має тертя, заклинювання або змивання ущільнювачів.

- Перший етап: При отриманні команди на відкриття сервопривід через шестерні надає руху важелям. Напрямні штифти починають рух по вертикальних ділянках пазів панелі. Стулка кришки суворо паралельно піднімається вертикально вгору на висоту 17,5 мм.
- Другий етап: При досягненні висоти 17,5 мм штифти переходять у дугоподібну ділянку напрямних вирізів. Механізм трансформує лінійний рух у кутовий, і стулка плавно відкидається на кут 90° , фіксуючись у кінцевому положенні паралельно вертикальним стінкам захисної коробки.

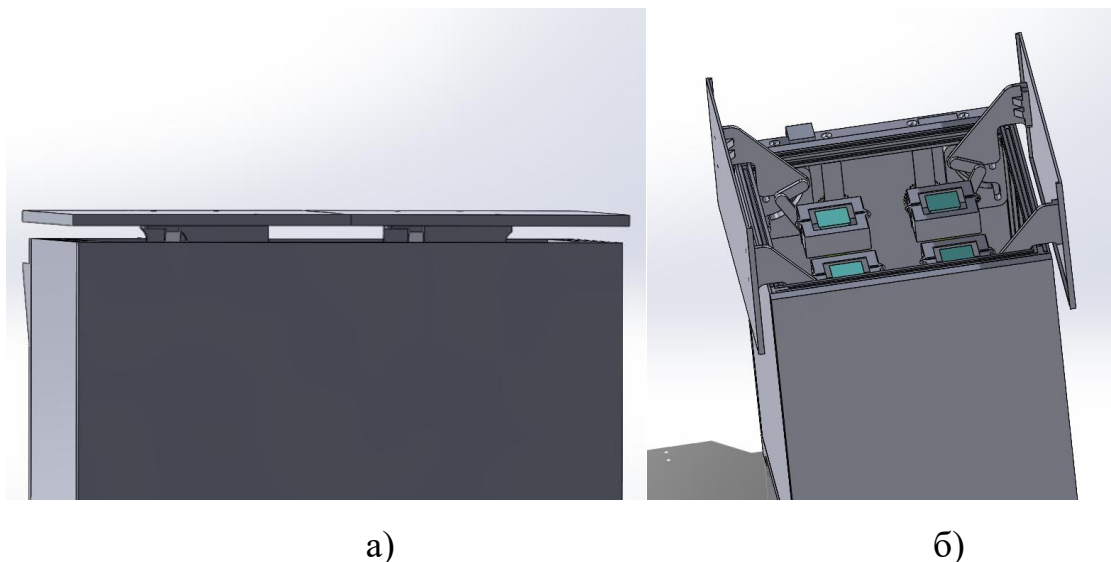


Рисунок 3.5. – Траєкторія руху кришки: а) підйом 17,5 мм; б) повне відкриття на 90°

Така кінематика забезпечує 100% доступ для вільного огляду неба поляриметрами, при цьому вітрильне навантаження на відкинуту кришку мінімізується.

3.3 Компонування та монтаж елементів системи автоматизації

Монтаж електронних компонентів та комунікаційних зв'язків системи автоматизації виконано з урахуванням мінімізації довжини провідників, захисту від наведення перехресних завад та забезпечення кліматичної стійкості відповідно до вимог ПУЕ. Апаратне ядро системи базується на 32-бітному мікроконтролері ESP32.

Комутація периферійних пристроїв, виконавчих механізмів та сенсорів до базового модуля ESP32 реалізована відповідно до розробленої принципової схеми:

- Цифрова шина I^2C (лінії SDA та SCL): Використовується для зчитування даних барометричного тиску з датчика BMP180 (або прецизійного аналога BME280). Підключення виконано до апаратних пінів мікроконтролера GPIO 21 та GPIO 22. Живлення сенсора забезпечується стабілізованою напругою 3,3В від внутрішнього лінійного регулятора плати ESP32.

- Інтерфейс датчика вологості DHT22: Сенсор здійснює вимірювання відносної вологості та температури повітря у верхньому робочому відсіку. Передача даних реалізована за однопровідним цифровим протоколом, а сигнальний вихід датчика підключено до цифрового піна GPIO 19[19]. Живлення сенсора підведено від лінії 3,3 В для забезпечення стабільності сигналу на довгих лініях зв'язку.

- Аналоговий канал датчика опадів FC-37: Для первинного виявлення рідких опадів застосовано сенсорний модуль FC-37 із компаратором. Його аналоговий вихід підключено до порту вводу-виводу GPIO 34, що входить до складу внутрішнього 12-бітного аналого-цифрового перетворювача ESP32. Це дозволяє не просто фіксувати факт наявності води, а й оцінювати інтенсивність зволоження пластини за рівнем напруги.

- Для керування чотирма сервоприводами механізму трансформації кришки задіяно індивідуальні ШІМ-виходи мікроконтролера, що забезпечує незалежне позиціонування кожного важеля:

- Сервопривод 1 (ліва стулка, передній) → GPIO 27;
- Сервопривод 2 (ліва стулка, задній) → GPIO 14
- Сервопривод 3 (права стулка, передній) → GPIO 12
- Сервопривод 4 (права стулка, задній) → GPIO 13

Сервоприводи під час пуску та подолання механічного опору кришок споживають значні струми (до 1,5-2 А на один привід), що супроводжується потужними імпульсними кидками напруги. Для запобігання збоїв, зависань та перезавантажень мікроконтролера ESP32 в апаратній архітектурі реалізовано схему роздільного живлення:

1. Слабкострумова лінія: Мікроконтролер та сенсори живляться від окремого відфільтрованого джерела напруги через роз'єм Micro-USB або вивід 5V.

2. Силова лінія (VCC): Сервоприводи підключені до потужної силової шини 5 В / 6 В, що живиться від зовнішнього імпульсного блока живлення через загальну шину заземлення (GND).

3.4 Розробка програмного інтерфейсу оператора

Програмний інтерфейс оператора у даному проєкті реалізовано на базі месенджера Telegram за допомогою розробленого чат-бота. Таке інженерне рішення дозволило відмовитися від створення локальних громіздких графічних утиліт, забезпечило оператору повну мобільність та зняло проблему «сірих» IP-адрес і налаштування маршрутизації в локальній мережі Wi-Fi спостережної станції.

3.4.1 Архітектура та протоколи двостороннього обміну даними

Взаємодія між нижнім апаратним рівнем (мікроконтролер ESP32 захисного купола) та верхнім рівнем керування (інтерфейс оператора в Telegram) базується на захищеному клієнт-серверному протоколі HTTPS через хмарний сервіс Telegram Bot API [20].

Оскільки контролер функціонує всередині локальної мережі, пряме адміністрування пристрою з боку серверів Telegram є неможливим. Для вирішення цієї задачі в керуючому програмному забезпеченні ESP32 реалізовано метод періодичного синхронного опитування серверів за технологією Long Polling [20]. З обчислювальним інтервалом у 2000 мс мікроконтролер ініціює HTTPS-запити за допомогою об'єкта UniversalTelegramBot для виявлення нових текстових директив, які оператор надіслав у чат.

З метою забезпечення інформаційної безпеки та захисту від несанкціонованого доступу сторонніх осіб до керування куполом, на апаратному рівні впроваджено жорстку фільтрацію вхідного потоку даних. Програма зчитує унікальний ідентифікатор чату відправника (chat_id) і порівнює його з константою CHOSEN_CHAT_ID оператора. У разі незбігу

параметрів, команда ігнорується, а зломиснику автоматично повертається повідомлення про відпому в доступі.

3.4.2 Структура командного меню та ергономіка людино-машинної взаємодії

Для підвищення ергономіки системи та виключення помилок ручного введення тексту, за допомогою інструментарію BotFather в інтерфейс було інтегровано фіксоване командне меню (кнопка «Menu» / «/») (Рис.3.6.). Оператору доступний чітко визначений набір директивних макрокоманд:

- /start або /help – ініціалізація інтерфейсу, виведення вітального вікна та довідки;
- /open – директивна команда на розведення ступок купола;
- /close – примусове закриття та блокування кришки купола;
- /status – запит миттєвого звіту телеметричних даних.

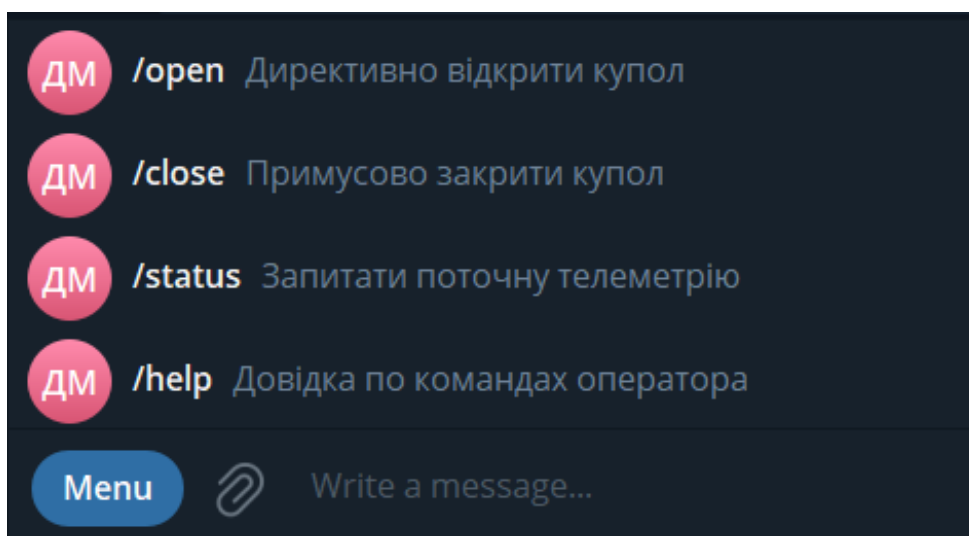


Рисунок 3.6. – Створене меню для управління системою в Telegram

При отриманні команди /status інтерфейс у реальному часі формує та надсилає оператору структурований інформаційний транспарант, що містить поточний стан кришки, активність таймера висихання, а також точні фізичні показники середовища: температуру, відносну вологість, атмосферний тиск, дефіцит точки роси та рівень вологості з АЦП (Рис.3.7.).

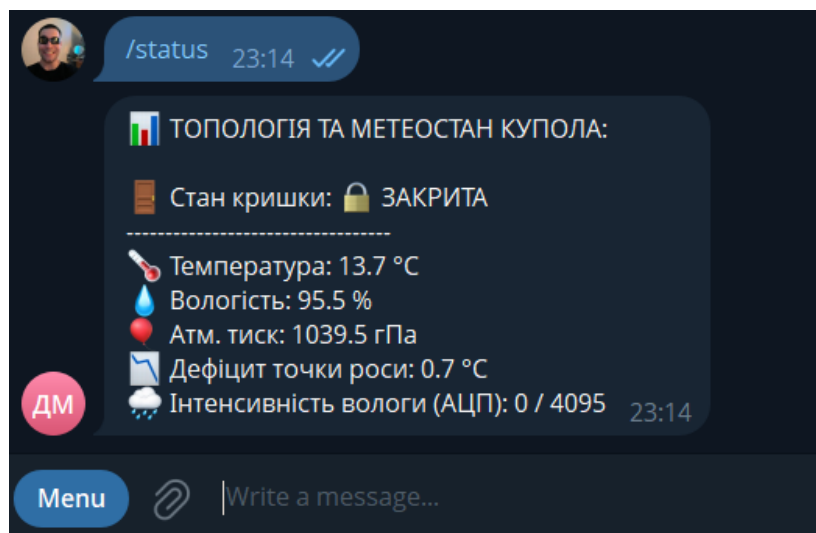


Рисунок 3.7. – Візуалізація роботи команди /status

3.4.3 Програмна інтеграція інтерфейсу з логікою метеозахисту

Важливою особливістю розробленого НМІ є його повна інтеграція з внутрішніми алгоритмами безпеки купола. Інтерфейс підтримує два режими інформаційної логіки:

1. Асинхронний Alarm-менеджер: Купол самостійно виступає ініціатором діалогу у разі аварійних ситуацій. При реєстрації перших крапель лощу або падінні тиску (штормовий фронт), система автоматично закриває стулки та надсилає оператору тривожне сповіщення з маркером АВАРІЯ або АВТОМАТИЧНЕ ЗАКРИТТЯ КУПОЛА!, деталізуючи причину активації захисту.

2. Інтерлокінг команд (Блокування входних дериктивів): Якщо оператор надсилає примусову команду /open, програма не виконує її сліпо. Спочатку ESP32 опитує локальні датчики FC-37, DHT22 та BMP180. Якщо поточні метеопараметри незадовільні (йде дощ, вологість $> 80\%$ або є ризик випадіння роси $\leq 2^{\circ}\text{C}$), інтерфейс блокує роботу сервоприводів, відхиляє команду оператора і повертає в чат обґрунтовану відмову (наприклад: «ВІДХИЛЕНО! Локальний датчик FC-37 фіксує активні опади!») (Рис.3.8.).

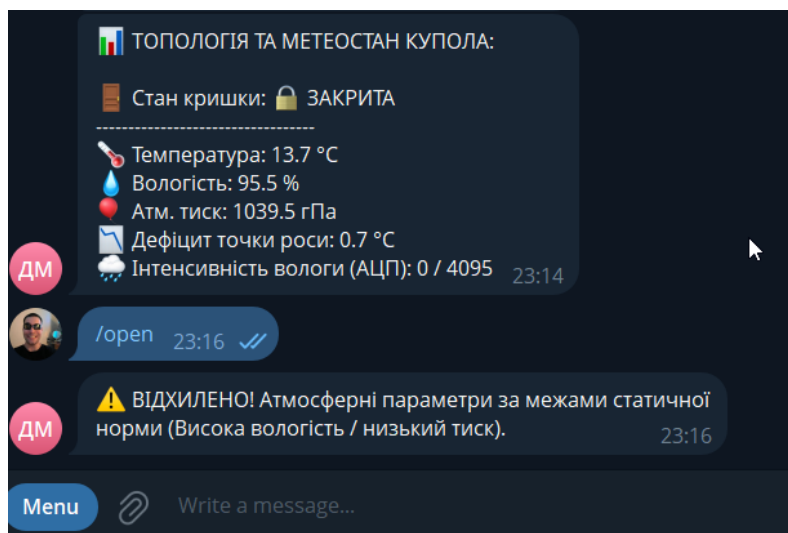


Рисунок 3.7. – Реакція системи на команду /open при незадовільних погодних умовах

Під час дегідратації корпусу після дощу, інтерфейс динамічно транслює в чат зворотний відлік часу, що залишився до безпечного розблокування оптичного відсіку, забезпечуючи повний дистанційний контроль за життєвим циклом вимірювального комплексу поляриметрів.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі 3 було обґрунтовано та спроектовано просторову конструкцію силового каркасу захисного модуля на основі конструкційного алюмінієвого станочного профілю серії 2020 із зовнішніми габаритами коробки 464.1x434.1x510 мм. Визначено оптимальну топологію внутрішньої монтажної панелі (товщина 10 мм, висота 222 мм від дна конструкції), що забезпечує жорстку фіксацію вимірювального масиву з 4-х зображуючих поляриметрів у вигляді матриці 2x2 з урахуванням необхідних конструктивних проміжків та зазорів для обслуговування обладнання.

Розроблено оригінальний важільний механізм приводу двостулкової захисної кришки на базі циліндричної зубчастої передачі з передаточним відношенням $i \approx 2.05$, який успішно реалізує складну двохетапну кінематичну траєкторію: первинний вертикальний підйом ступок на 17,5 мм,

а потім плавне поворотне відкидання на кут 90° паралельно вертикальним стінкам коробки, що повністю звільняє робоче поле для оптичних приладів.

Спроековано інтерактивний людино-машинний інтерфейс оператора на базі месенджера Telegram з використанням технології Long Polling для двостороннього обміну даними за захищеним HTTPS-протоколом. Інтерфейс успішно інтегровано з алгоритмами метеозахисту купола, що дозволило реалізувати апаратну фільтрацію доступу за `chat_id`, виведення повної телеметрії за запитом, а також автоматичне блокування виконання небезпечних ручних команд оператора у разі фіксації незадовільних погодних умов локальними сенсорами комплексу.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті повністю виконано поставлене завдання та досягнуто визначеної мети — розробки автоматизованого компактного купола для спостереження неба, що забезпечує надійний захист та автономне функціонування наземного оптичного обладнання. В результаті проведенного комплексу теоретичних, конструкторських та програмних робіт успішно вирішено інженерну задачу з ізоляції чотирьох зображуючих поляриметрів від деструктивних чинників навколишнього середовища без погіршення їхніх оптичних характеристик.

Підсумовуючи результати проєктування, першочергово було обґрунтовано геометричну форму купола у вигляді корпусу-коробки з двостулковою кришкою. Така архітектура є найбільш раціональною для компактних установок, оскільки забезпечує миттєвий повний огляд небесної сфери в межах $60^\circ \times 60^\circ$ і повністю нівелює потребу у впровадженні складних та дорогих обертових систем азимутального наведення. Для забезпечення надійної автоматизації було здійснено ретельний вибір та розрахунок елементної бази. Апаратне ядро системи побудовано на базі мікроконтролера ESP32 DevKit V1, інформаційно-вимірювальний комплекс складається з прецизійного сенсора метеоумов BME280 та датчика опадів FC-37, а виконавчими приводами обрано сервоприводи DSS-M15S з міцним металевим редуктором. Стабільне живлення всіх вузлів забезпечує промисловий імпульсний блок Mean Well RSP-75-7,5, підібраний із 25-відсотковим інженерним запасом потужності.

Просторове моделювання та верифікацію конструкції модуля виконано в середовищі SolidWorks. На основі фіксованих габаритів кластера поляриметрів визначено оптимальні зовнішні розміри корпусу, які склали $464.1 \times 434.1 \times 510$ мм, а як несучу основу спроектовано жорсткий каркас з алюмінієвого профілю серії 2020. Перевірочний розрахунок на оптичну сумісність підтвердив наявність інженерного запасу простору в 42,46 мм

відносно світлового конуса огляду приладів, що повністю виключає виникнення ефекту віньєтування або затінення зображення елементами конструкції. Особливу увагу приділено трансформації даху, для якої розроблено оригінальний важільний механізм на базі циліндричної зубчастої передачі з передаточним відношенням $i \approx 2.05$. Цей вузол реалізує складну двохетапну траєкторію, де стулки спочатку піднімаються вертикально на 17,5 мм для захисту ущільнювачів від тертя, а потім плавно відкидаються на кут 90° паралельно стінкам, мінімізуючи вітрове навантаження.

Програмна складова проєкту базується на автономному алгоритмі керування мікроконтролера, який працює в замкненому циклі за принципом кінцевого автомата. Логіка безпеки аналізує три незалежні критерії загрози: пряме потрапляння вологи, ризик утворення конденсату на лінзах через дефіцит точки роси та наближення штормового фронту за трендами тиску й вологості. Дистанційний моніторинг, асинхронне сповіщення оператора та захисний інтерлокінг ручних команд реалізовано через людино-машинний інтерфейс на базі чат-бота в месенджері Telegram за технологією Long Polling через HTTPS-протокол.

На основі отриманих результатів можна зробити загальне заключення, що створений автоматизований компактний купол є завершеною, технічно обґрунтованою та працездатною інженерною розробкою. Усі компоненти системи — від механічного каркасу до програмних алгоритмів та дистанційного інтерфейсу зв'язку — успішно інтегровані в єдиний комплекс. Впровадження пристрою дозволить повністю автоматизувати процес щоденних атмосферних досліджень, мінімізувати ризики пошкодження дорогого вимірювального обладнання та виключити присутність людини з контуру прийняття оперативних рішень. Матеріали дипломного проєкту мають виражену практичну цінність і повністю готові до використання як основа для створення та натурних випробувань дослідного зразка установки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dhillon V. S. Observatory Domes and Enclosures. PHY217: Observational Techniques. URL: https://vikdhillon.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/telescopes/phy217_tel_domedes.html
2. Conventional vs. Clamshell Domes: Choosing the Best Dome. Sea West Observatories. URL: <https://seawestobservatories.com/conventional-vs-clamshell-domes-choosing-the-best-dome/>
3. Automatic Observatory Domes. ScopeDome. URL: https://www.scopedome.com/?page_id=2988&lang=en
4. Roll-Off Roof Observatories. Pier Tech Inc. URL: <https://piertechinc.com/roll-off-roof-observatories/>
5. Brunete A., Hernando M., Gambao E. Smart Cover: An Automated Protective Cover for Telescope Instruments. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 4. Article 1138. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041138>
6. Weather Monitoring and Observatory Control. Stardreams Observatory. URL: <https://www.stardreamsobservatory.com/equipment/weather-monitoring/>
7. Reeve M., Vallely P., Kochanek C. S. An Open-Source, Autonomous Observatory Control System. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. 2022. Vol. 8, No. 2. Article 027002. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.2.027002>
8. Шліхта О. Р. Система моніторингу стану погоди та прогнозування опадів зі сповіщенням через Telegram : магістерська дис. : 172 Телекомунікації та радіотехніка. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. 77 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/7e404831-8f07-4b2b-a987-3f81270acef0>
9. Baldini V., Battistelli E., Gervasi M., Natoli P., Peverini O. A. Automated Control System for Microwave Telescope Protection. Proc. SPIE. 2018. Vol. 10700. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2312460> .

10. Galvez-Serna J. F., Munoz-Arias M., Rosero-Montalvo P. D. Low-cost Embedded System for Environmental Monitoring in Scientific Instrumentation. *Ingeniería y Ciencia*. 2020. Vol. 16, No. 31. P. 125–148. DOI: <https://doi.org/10.17230/ingciencia.16.31.5>.
11. Чумак В. В., Богач І. В. Розробка інтелектуальної сенсорної системи моніторингу мікроклімату з мобільним керуванням. Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2025. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/47985>
12. Measuring Stokes Parameters. College of William & Mary. URL: <https://pol3he.sites.wm.edu/wp-content/uploads/sites/50/2020/01/measuring-Stokes-parameters.pdf>
13. Tyo J. S., Goldstein D. L., Chenault D. B., Shaw J. A. Review of Passive Imaging Polarimetry for Remote Sensing Applications. *Applied Optics*. 2006. Vol. 45, No. 22. P. 5453–5469. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.45.005453>.
14. Wi-Fi модуль DevKit V1 з ESP-32. Arduino.ua. URL: <https://arduino.ua/prod3990-wi-fi-modul-devkit-v1-s-esp-32>
15. DSS-M15S — Digital Servo 15kg. DFRobot. URL: <https://www.dfrobot.com/product-1709.html>
16. YL-83 — модуль датчика дощу / води / снігу. MyProject. URL: <https://myproject.com.ua/yl-83-modul-datchika-doschu-vodi-snigu-ua.html>
17. BME280 5V I²C — датчик температури, вологості та тиску. Arduino.ua. URL: <https://arduino.ua/ru/prod1930-bme280-5v-i2c-datchik-temperatyri-vlajnosti-davleniya>
18. Д — імпульсний блок живлення 75 Вт, 7,5 В. MeanWell Ukraine. URL: https://meanwell.in.ua/ru/acdc/kkm/rsp-75-7_5
19. Telegram Bot API: офіційна документація. Telegram. URL: <https://core.telegram.org/bots/api>
20. Murray F. W. On the Computation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology*. 1967. Vol. 6, No. 1. P. 203–204. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006%3C0203:OTCOSV%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006%3C0203:OTCOSV%3E2.0.CO;2).

21. Як працює сервопривід? Принцип роботи і застосування. Siemens Technology Україна. URL: <https://www.siemens-technology.com.ua/yak-pracue-servoprivid/>
22. Milinevsky G., Danylevsky V. Atmospheric Aerosol Over Ukraine Region: Current Status of Knowledge and Research Efforts. *Frontiers in Environmental Science*. 2018. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00059. URL: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2018.00059/full>
23. Dubovik O. et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019. Vol. 224. P. 474–511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.11.024>.
24. Remer L. A. et al. Opinion: Aerosol remote sensing over the next 20 years. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. Vol. 24. P. 2113–2127. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-24-2113-2024>.

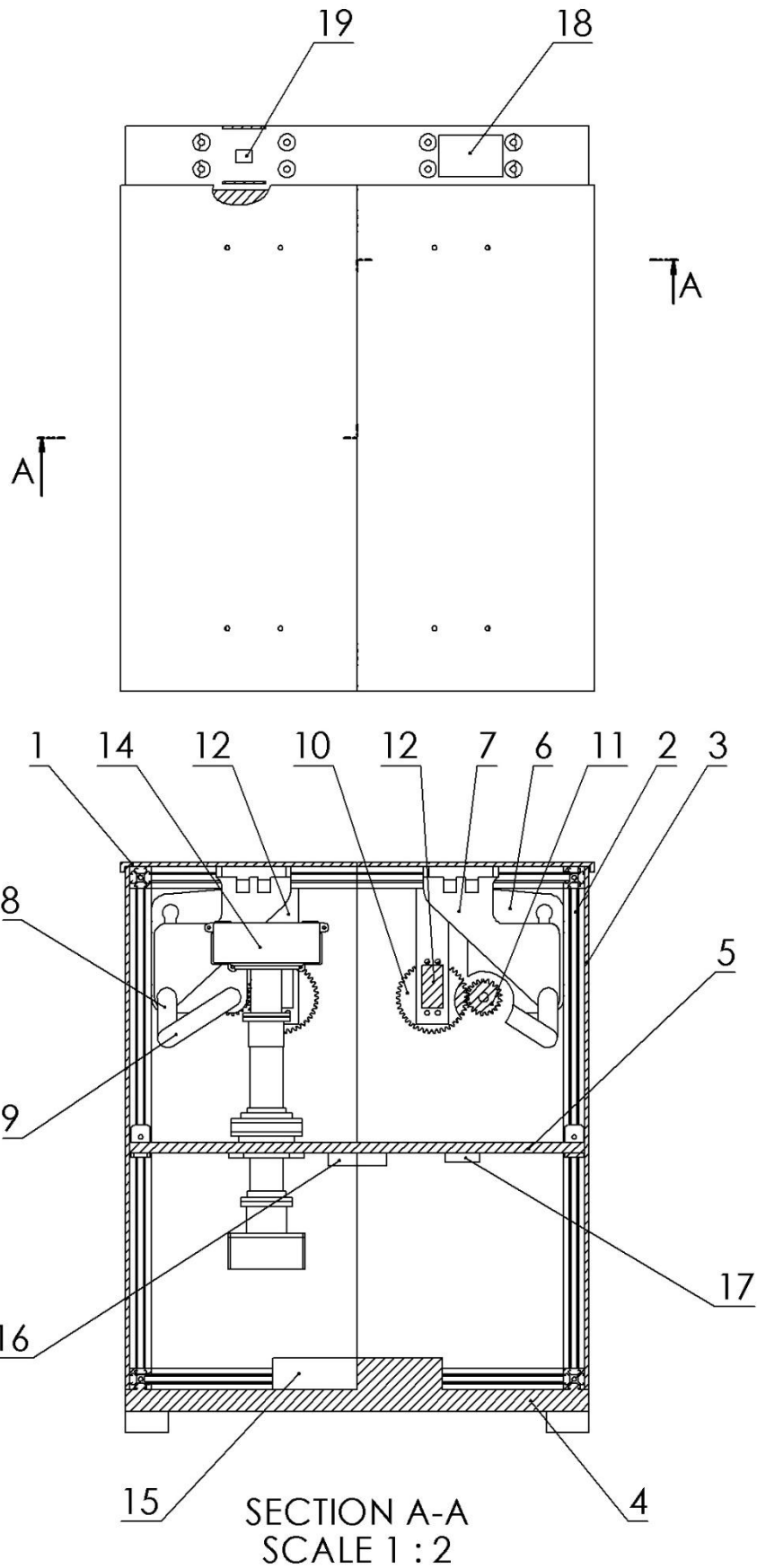
ДОДАТКИ

Додаток 1

Перш. заст.	Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
Спроб. №	A1			СК ПБ21.04.1702.000	Складальний кресленик	1	
					Деталі		
	A1	1		ДП ПБ21.04.1702.000	Стулка кришки	2	
	A3	2		ДП ПБ21.04.1702.000	Станочний профіль	4	
		3			Захисна панель	2	
	A1	4		ДП ПБ21.04.1702.000	Дно	1	
	A1	5		ДП ПБ21.04.1702.000	Кріпильна плита	1	
		6			Пластинка	4	
Підп. і дата		7			Кронштейн	4	
		8			Малий ричаг	4	
	A3	9		ДП ПБ21.04.1702.000	Великий ричаг	4	
	A1	10		ДП ПБ21.04.1702.000	Велика шестерня	4	
		11			Маленька шестерня	4	
		12			Кронштейн сервопривода	4	
					Додатки		
		13			Сервопривод DSS-M15S	4	
Взем. інв. №		14			Поляриметр	4	
		15			БЖ Mean Well RSP-75-7.5	1	
		16			Мікроконтролер ESP32	1	
		17			Мікросхема LM393	1	
		18			Датчик дощу FC-37	1	
		19			Датчик BME280	1	
Інв. № підп.					ДП ПБ21.04.1702.000		
	Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		
	Розробник	Ебтушенко Д.С.				Літера	Аркуш
	Перев.	Синявський І.І.					Аркушів
	Н.контр.						
	Затв.	Синявський І.І.					
Захисний купол для спостереження неба						1	1
						КПІ, ПБФ	

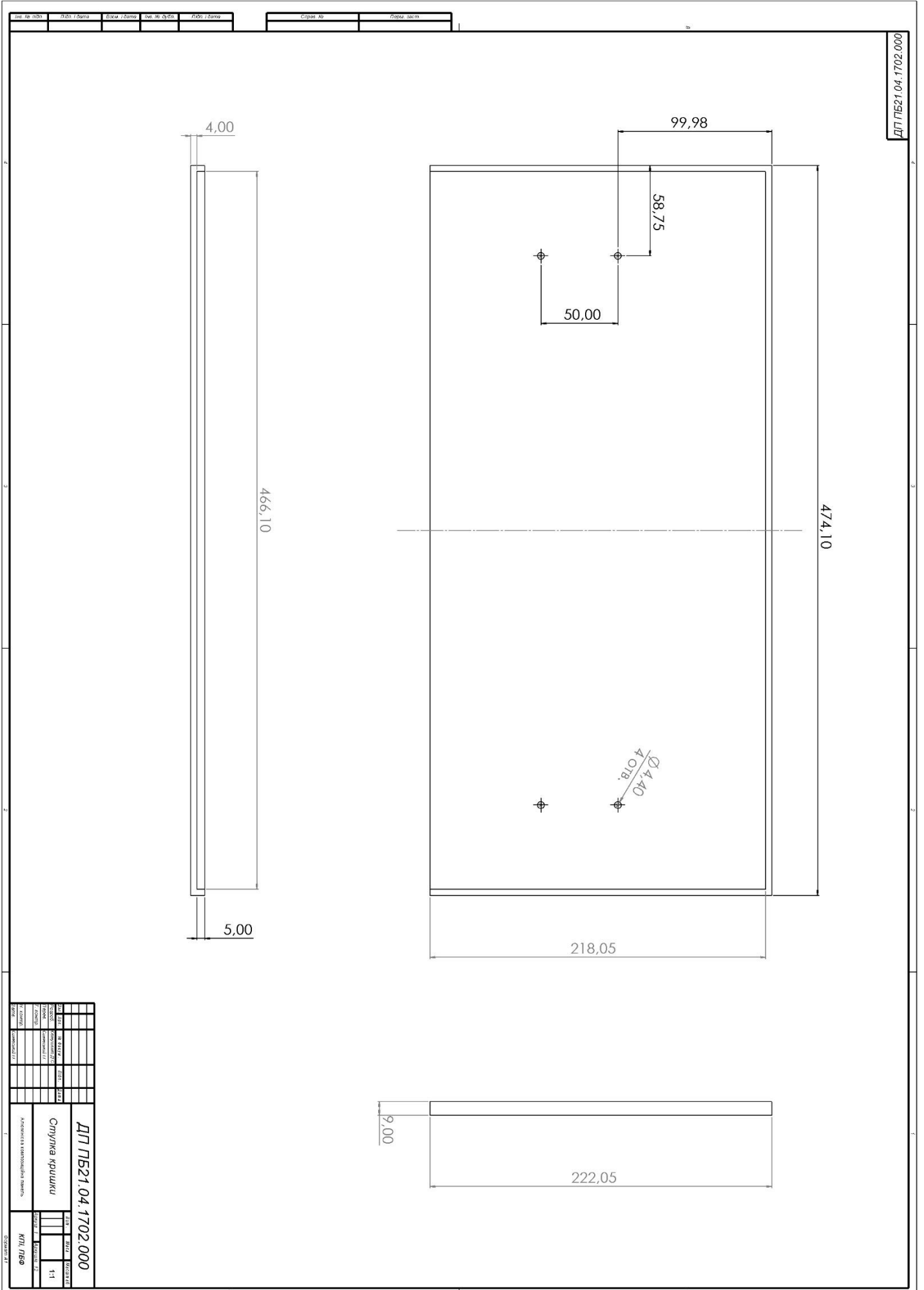
Додаток 1

ДП ПБ21.04.1702.000



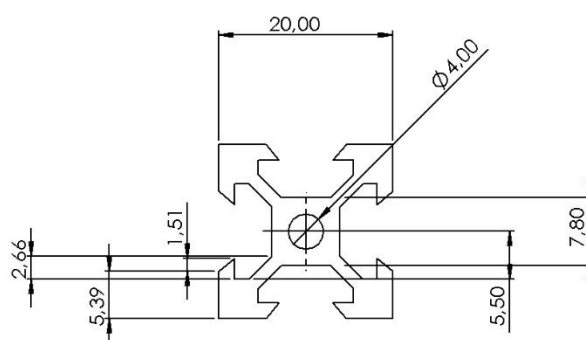
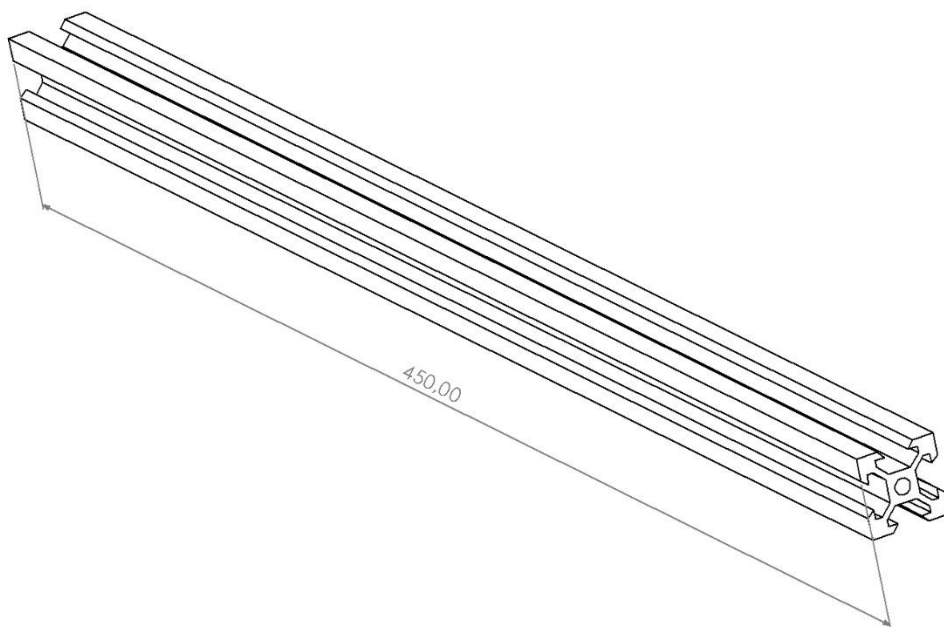
СК ПБ21.04.1702.000					
Вид	Узел	№ документа	Дата	Масштаб	Лист
Разработчик	Инженер	Д.С.			1/2
Техник	Инженер	П.			
Проверен					
Ут. в инст. Д.					
Дата в.	Согласован	П.			
Складальный кресленник				КПН, ПБФ	

Додаток 2



1

ДП ПБ21.04.1702.000



Справ. №	Перш. заст.

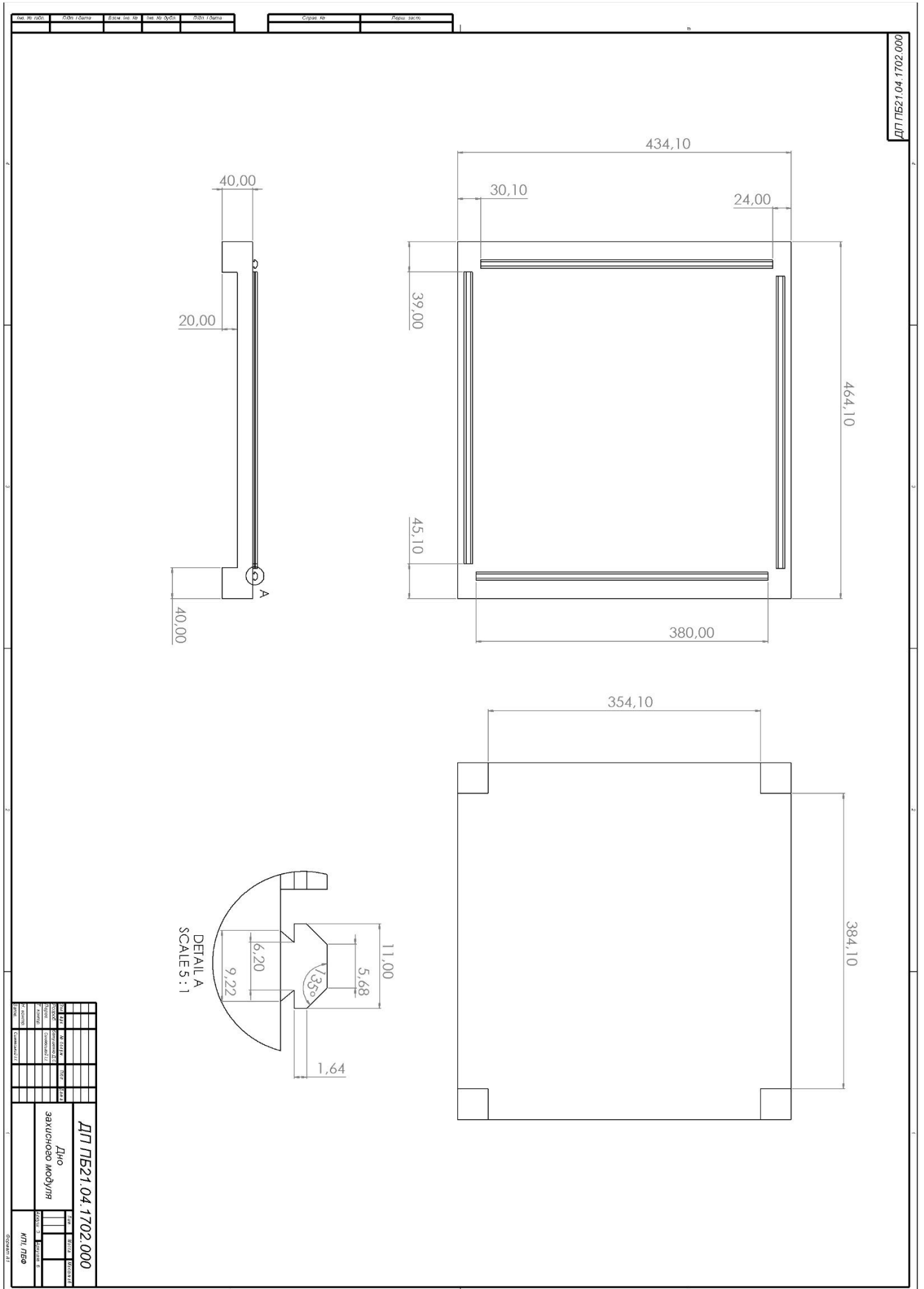
Інв. № підп.	Підп. і дата	Взем. і дата	Інв. № дубл.	Підп. і дата

						ДП ПБ21.04.1702.000					
						Станочний профіль			Лит.	Масса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата							
Розроб.		Бегушенко Д.С.									
Перев.		Синявський І.І.									
Т. контр.											
									Аркус 2	Аркушів 12	
Н. контр.						Алюміній			КПІ, ПБФ		
Зате.		Синявський І.І.									

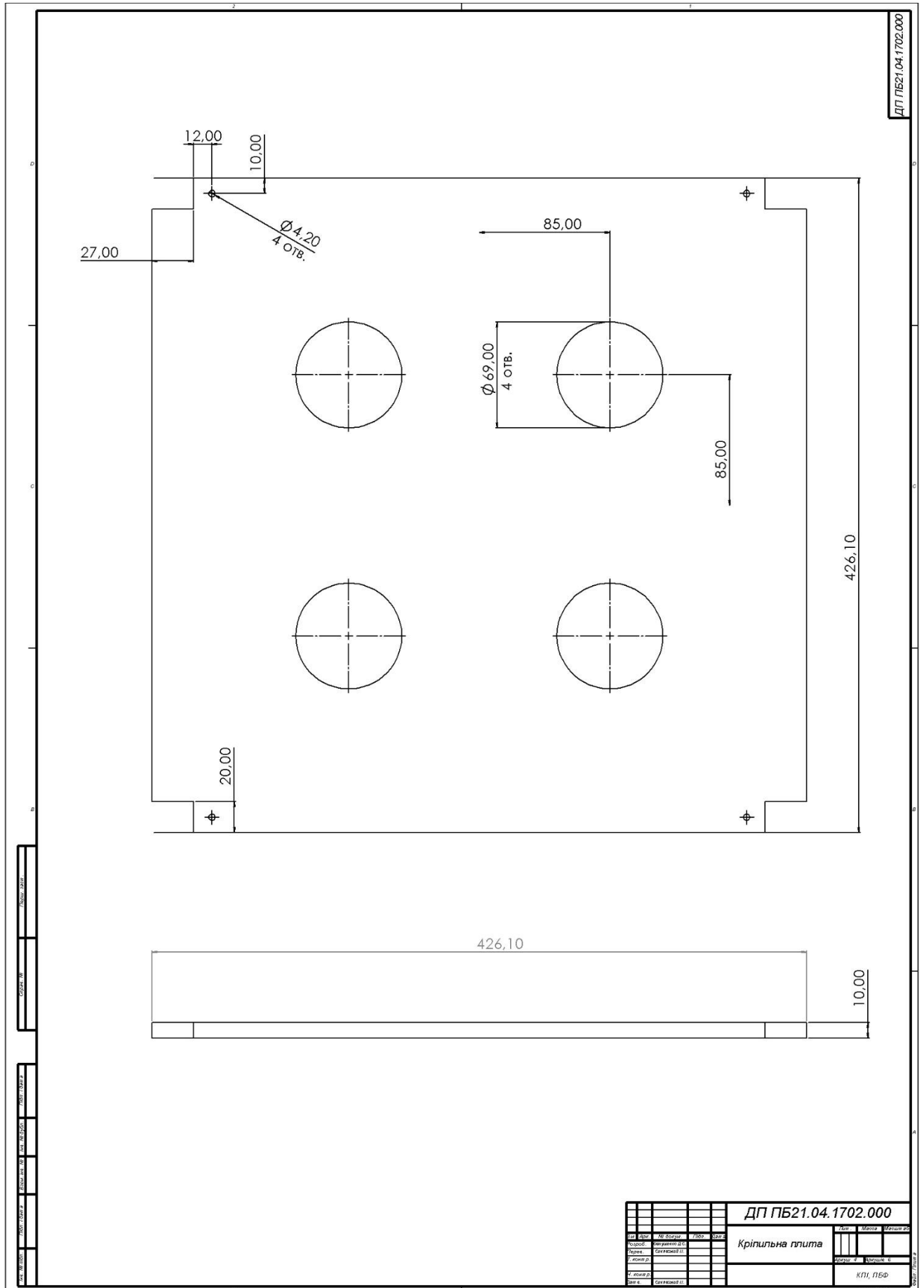
Датум: Aluminium profile vertical

Формат А3

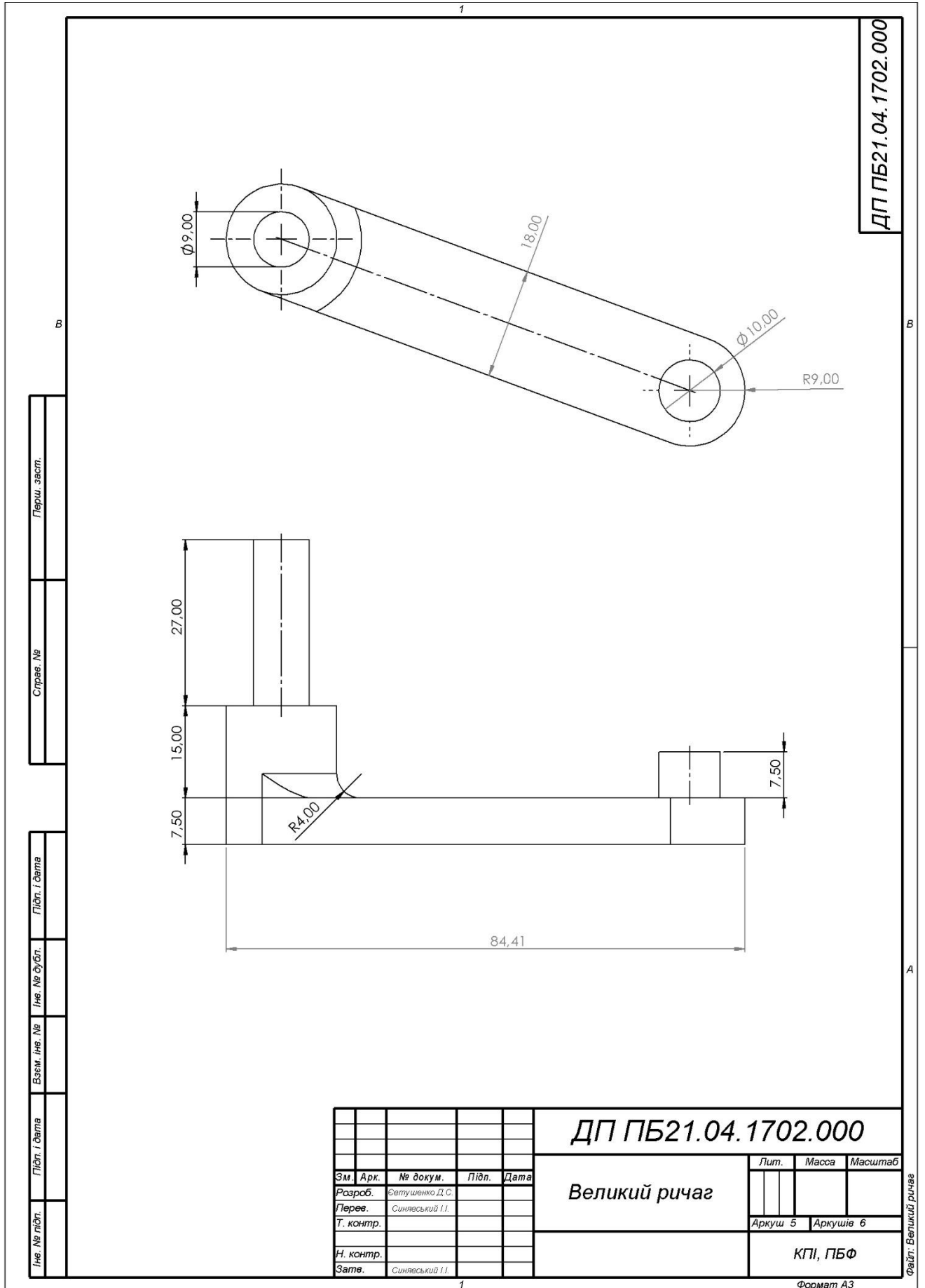
Додаток 2



Додаток 2



Додаток 2



ДП 1621,04.1702,000

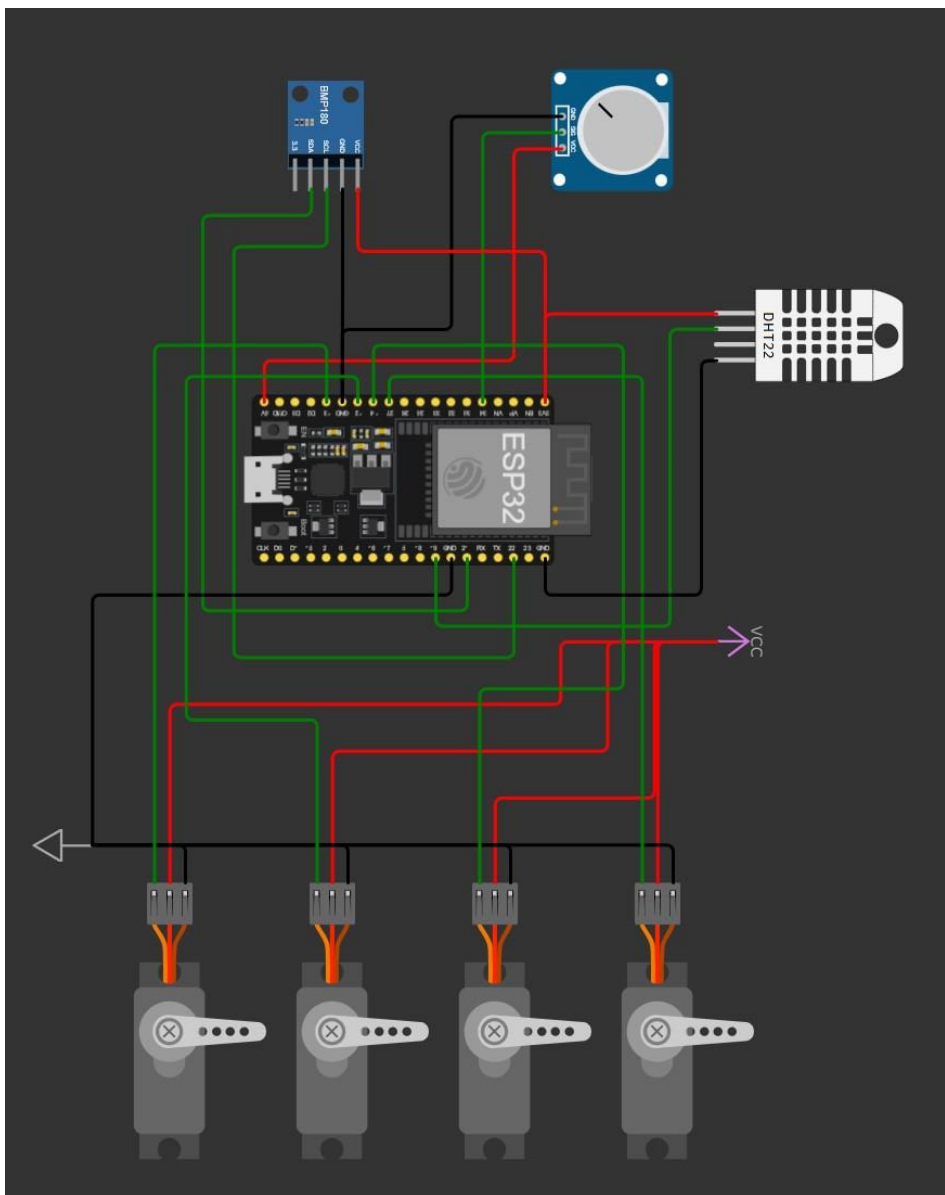


					ДП ПБ21.04.1702.000		
					Велика шестерня		
Мат. Алю.	МШ. Шестер.	17001	Мат. в.		Мат.	Мат. в.	Мат. в.
Шестер.	Шестер. в. в.						
Полос.	Сам. Шестер. II.				Мат. в.	Мат. в.	
Шестер. в.							
Шестер. в.	Сам. Шестер. II.				КП, ПДФ		

Додаток 3

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
Перш. заст.						
Справл.№						
Підп. і дата						
Інф. № дубл.						
Взем. інф. №						
Підп. і дата						
Інф. № підп.						

Додаток 3



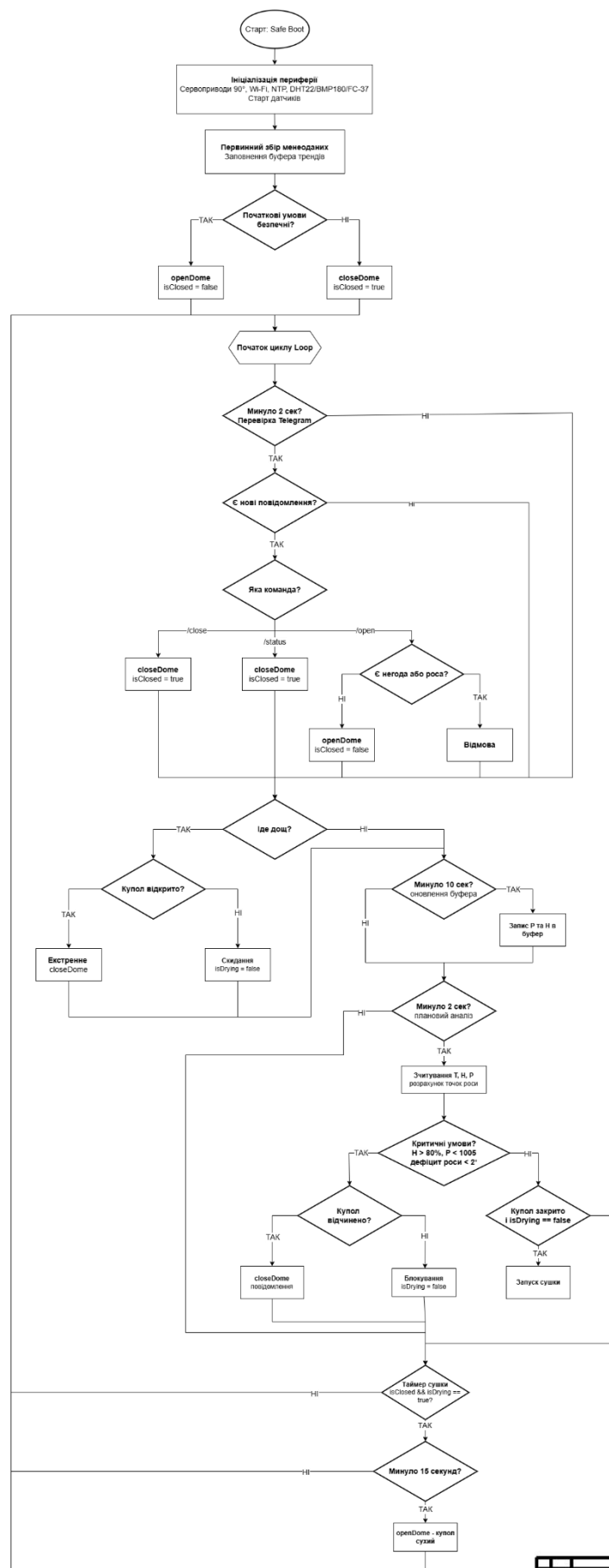
Інв. № підп.	Підп. і дата	Взем. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата

Справ. №	Перш. заст.

СхЕ ПБ21.04.1702.000

[illegible]

7521.04.1702.000



Зем. Арх.	не догуг.	Гидр.	Дан.		
Разреш.	Зем. уделного д. С.				
Терев.	Сек. ласкай? II.				
Г. коня р.					
Ч. коня р.					
Зем. е.	Сек. ласкай? II.				

Блок-схема

Дит.	Масса	Мат.
Докл. 1	Докл. 1	
КПИ, ПБФ		

КПИ, ПБФ

FIGURE 4

Додаток 5

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>    // BMP085/BMP180
#include <DHT.h>                // DHT22
#include <ESP32Servo.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <UniversalTelegramBot.h> // Бібліотека для зворотного зв'язку Telegram
#include <ArduinoJson.h>        // Потрібна для роботи бота (парсинг JSON)
#include "time.h"
#include <cmath>

// === НАЛАШТУВАННЯ ТЕЛЕГРАМ ===
const String CHOSEN_BOT_TOKEN = "8655454212:AAF8HHDvRUPsW1F7skzKU8muU5UC1mNmU5k";
const String CHOSEN_CHAT_ID   = "691802942";

// Створення об'єктів для роботи двостороннього зв'язку Telegram
WiFiClientSecure botClient;
UniversalTelegramBot bot(CHOSEN_BOT_TOKEN, botClient);

unsigned long lastTimeBotRan = 0;
const unsigned long botRequestInterval = 2000; // Опитування сервера Telegram раз
на 2 секунди

// Налаштування пінів (GPIO) ESP32
#define DHTPIN 19          // Пін даних для DHT22
#define DHTTYPE DHT22
#define RAIN_PIN 34        // Аналоговий вихід датчика дощу FC-37

#define SERVO1_PIN 27
#define SERVO2_PIN 14
#define SERVO3_PIN 12
#define SERVO4_PIN 13

// Інженерні константи безпеки з диплома
const float CRIT_DEW_POINT_GAP = 2.0; // Критичний дефіцит точки роси (2.0 °C)
const float CRIT_HUMIDITY = 80.0;
const float CRIT_PRESSURE = 1005.0;
const int RAIN_THRESHOLD = 2000;      // Поріг спрацювання FC-37 у Wokwi

// Буфер для відстеження штормового фронту (10 хвилин)
const int BUFFER_SIZE = 10;
float pressureBuffer[BUFFER_SIZE];
float humidityBuffer[BUFFER_SIZE];
int bufferIndex = 0;
bool isBufferFull = false;
unsigned long lastBufferUpdate = 0;
const unsigned long bufferInterval = 10000; // Оновлення буфера щохвилини
```

```

// Константи кутів на основі розрахунку модулів шестерень
const int DOME_OPEN_ANGLE_P1 = 0;
const int DOME_OPEN_ANGLE_P2 = 180;
const int DOME_CLOSED_ANGLE = 90;

// Налаштування NTP
const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
const long gmtoffset_sec = 7200;
const int daylightOffset_sec = 3600;

Adafruit_BMP085 bmp; // Барометр для Wokwi
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Датчик вологості для Wokwi
Servo servo1; Servo servo2; Servo servo3; Servo servo4;

unsigned long lastBMETime = 0;
const unsigned long bmeInterval = 2000;

unsigned long dryStartMillis = 0;
bool isDrying = false;
const unsigned long dryInterval = 15000; // 15 сек для Wokwi (в записці – 10 хв)

bool isClosed = true;

// Прототипи функцій для уникнення помилок компіляції
void closeDome();
void openDome();
float calculateDewPoint(float temp, float humid);
void printLocalTime();

// Функція розрахунку точки роси за формулою Магнуса-Тетенса
float calculateDewPoint(float temp, float humid) {
    const float a = 17.27;
    const float b = 237.7;
    float alpha = ((a * temp) / (b + temp)) + log(humid / 100.0);
    return (b * alpha) / (a - alpha);
}

void sendTelegramMessage(String text) {
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        bot.sendMessage(CHOSEN_CHAT_ID, text, "");
    }
}

void printLocalTime() {
    struct tm timeinfo;
    if(!getLocalTime(&timeinfo)){
        Serial.print("[Час не синхронізовано] ");
        return;
    }
}

```

```

Serial.printf("[%02d.%02d.%04d %02d:%02d:%02d] ",
              timeinfo.tm_mday, timeinfo.tm_mon + 1, timeinfo.tm_year + 1900,
              timeinfo.tm_hour, timeinfo.tm_min, timeinfo.tm_sec);
}

// ФУНКЦІЯ ОБРОБКИ ВХІДНИХ КОМАНД З ТЕЛЕГРАМУ
void handleNewMessages(int numNewMessages) {
  for (int i = 0; i < numNewMessages; i++) {
    String chat_id = String(bot.messages[i].chat_id);

    // Фільтр безпеки: реагуємо лише на твій Chat ID
    if (chat_id != CHOSEN_CHAT_ID) {
      bot.sendMessage(chat_id, "❌ Доступ заборонено. Ви не є оператором цього купола!", "");
      continue;
    }

    String text = bot.messages[i].text;
    printLocalTime();
    Serial.println("Отримано команду з Telegram: " + text);

    if (text == "/start" || text == "/help") {
      String welcome = "🤖 Система автоматизації захисного купола готова до роботи.\n\n";
      welcome += "Доступні команди оператора:\n";
      welcome += "🔓 /open - Директивно відкрити купол\n";
      welcome += "🔒 /close - Примусово закрити купол\n";
      welcome += "🇮🇹 /status - Запитати поточну телеметрію\n";
      bot.sendMessage(chat_id, welcome, "");
    }

    else if (text == "/open") {
      if (!isClosed) {
        bot.sendMessage(chat_id, "ℹ️ Купол уже перебуває у відкритому стані.", "");
      } else {
        // Перевірка метеоумов перед ручним відкриттям
        float temperature = dht.readTemperature();
        float humidity = dht.readHumidity();
        float pressure = bmp.readPressure() / 100.0F;
        int rainValue = analogRead(RAIN_PIN);

        if (isnan(humidity) || isnan(temperature)) {
          bot.sendMessage(chat_id, "❌ Помилка: Не вдалося зчитувати дані з датчиків. Відкриття заблоковано.", "");
          continue;
        }

        float dewPoint = calculateDewPoint(temperature, humidity);
        float dewPointGap = temperature - dewPoint;

```

```

// Перевірка критичних умов безпеки
if (rainValue > RAIN_THRESHOLD) {
    bot.sendMessage(chat_id, "🔴 ВІДХИЛЕНО! Локальний датчик FC-37 фіксує
активні опади! Купол залишається закритим.", "");
} else if (humidity > CRIT_HUMIDITY || pressure < CRIT_PRESSURE) {
    bot.sendMessage(chat_id, "⚠️ ВІДХИЛЕНО! Атмосферні параметри за межами
статичної норми (Висока вологість / низький тиск).", "");
} else if (dewPointGap <= CRIT_DEW_POINT_GAP) {
    bot.sendMessage(chat_id, "⚠️ ВІДХИЛЕНО! Високий ризик утворення
конденсату на оптиці (Точка роси).", "");
} else {
    openDome();
    isDrying = false;
    bot.sendMessage(chat_id, "🔓 Команда виконана. Стулки купола успішно
відкрито.", "");
}
}

else if (text == "/close") {
    if (isClosed) {
        bot.sendMessage(chat_id, "🔒 Стулки купола вже закриті та заблоковані.",
        "");
    } else {
        closeDome();
        isDrying = false;
        bot.sendMessage(chat_id, "🔒 Команда виконана. Стулки купола примусово
закриті.", "");
    }
}

else if (text == "/status") {
    float temperature = dht.readTemperature();
    float humidity = dht.readHumidity();
    float pressure = bmp.readPressure() / 100.0F;
    int rainValue = analogRead(RAIN_PIN);

    float dewPoint = calculateDewPoint(temperature, humidity);
    float dewPointGap = temperature - dewPoint;

    String statusMsg = "🏠 ТОПОЛОГІЯ ТА МЕТЕОСТАН КУПОЛА:\n\n";
    statusMsg += "🚪 Стан кришки: " + String(isClosed ? "🔒 ЗАКРИТА" : "🔓
ВІДКРИТА") + "\n";
    if (isDrying) statusMsg += "⌚ Режим: Активне висихання корпусу\n";
    statusMsg += "-----\n";
    statusMsg += "🌡️ Температура: " + String(temperature, 1) + " °C\n";
    statusMsg += "💧 Вологість: " + String(humidity, 1) + " %\n";
    statusMsg += "📉 Атм. тиск: " + String(pressure, 1) + " гПа\n";
    statusMsg += "🌫️ Дефіцит точки роси: " + String(dewPointGap, 1) + " °C\n";

```

```

        statusMsg += " 🌧 Інтенсивність вологи (АЦП): " + String(rainValue) + " /
4095";

        bot.sendMessage(chat_id, statusMsg, "");
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // 1. SAFE BOOT: Миттєва фіксація стулок у закритому стані
    ESP32PWM::allocateTimer(0); ESP32PWM::allocateTimer(1);
    ESP32PWM::allocateTimer(2); ESP32PWM::allocateTimer(3);
    servo1.setPeriodHertz(50); servo2.setPeriodHertz(50);
    servo3.setPeriodHertz(50); servo4.setPeriodHertz(50);
    servo1.attach(SERVO1_PIN, 500, 2400); servo2.attach(SERVO2_PIN, 500, 2400);
    servo3.attach(SERVO3_PIN, 500, 2400); servo4.attach(SERVO4_PIN, 500, 2400);

    closeDome();
    Serial.println("Ініціалізація системи... Купол зачинено для безпеки оптики.");

    // 2. Підключення до Wi-Fi
    Serial.print("Підключення до Wi-Fi...");
    WiFi.begin("Wokwi-GUEST", "", 6);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nWi-Fi підключено успішно!");

    // Конфігурація SSL-клієнта для Telegram (відключення суворої перевірки SSL)
    botClient.setInsecure();

    // 3. Синхронізація часу через NTP
    configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
    struct tm timeinfo;
    while(!getLocalTime(&timeinfo)){
        delay(200);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nЧас успішно синхронізовано!");

    // 4. Ініціалізація окремих датчиків для Wokwi
    Wire.begin(21, 22);
    if (!bmp.begin()) {
        Serial.println("Помилка: Барометр BMP не знайдено!");
        while (1) {}
    }
    dht.begin();

```

```

    printLocalTime();
    Serial.println("Система активована. Перевірка початкових метеоумов...");
    sendTelegramMessage("🚀 Локальна система автоматизації активована. Перевіряю
початковий стан атмосфери...");

    // 5. Первинний аналітичний збір даних (DHT22 + BMP180)
    float startHumidity = dht.readHumidity();
    float startPressure = bmp.readPressure() / 100.0F;
    float startTemp = dht.readTemperature();
    int startRain = analogRead(RAIN_PIN);

    if (isnan(startHumidity)) startHumidity = 0.0;
    if (isnan(startTemp)) startTemp = 20.0;

    float startDewPoint = calculateDewPoint(startTemp, startHumidity);

    // Заповнюємо стартові значення в буфер трендів погоди
    for(int i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++) {
        pressureBuffer[i] = startPressure;
        humidityBuffer[i] = startHumidity;
    }

    // Перевірка умов безпеки при старті
    if (startHumidity > CRIT_HUMIDITY || startPressure < CRIT_PRESSURE ||
        startRain > RAIN_THRESHOLD || (startTemp - startDewPoint) <=
CRIT_DEW_POINT_GAP) {
        printLocalTime();
        Serial.println("⚠️ Початкові умови незадовільні! Обладнання під загрозою.
Купол залишається ЗАЧИНЕНИМ.");
        sendTelegramMessage("⚠️ Початкові метеоумови за межами норми. Купол
заблоковано у закритому стані.");
        isDrying = false;
    } else {
        printLocalTime();
        Serial.println("☀️ Метеопараметри в нормі. Відкриваю робоче вікно.");
        openDome();
        sendTelegramMessage("☀️ Атмосферні умови безпечні. Робоче вікно купола
відкрито.");
    }

    lastBMETime = millis();
    lastBufferUpdate = millis();
    lastTimeBotRan = millis();
}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();
    int rainValue = analogRead(RAIN_PIN);

```

```

// === ЗВОРОТНІЙ ЗВ'ЯЗОК: ЧИТАННЯ КОМАНД З ТЕЛЕГРАМУ ===
if (currentMillis - lastTimeBotRan > botRequestInterval) {
    int numNewMessages = bot.getUpdates(bot.last_message_received + 1);

    while (numNewMessages) {
        handleNewMessages(numNewMessages);
        numNewMessages = bot.getUpdates(bot.last_message_received + 1);
    }
    lastTimeBotRan = currentMillis;
}

// ПРИОРИТЕТ 1: КРИТЕРІЙ МИТТЄВОГО ВИЯВЛЕННЯ ОПАДІВ (Датчик FC-37)
if (rainValue > RAIN_THRESHOLD) {
    if (!isClosed) {
        printLocalTime();
        Serial.println("🔴 КРИТИЧНО: Зафіксовано прямі опади! Екстрене закриття купола!");
        closeDome();
        sendTelegramMessage("🔴 АВАРІЯ: Датчик FC-37 виявив рідкі опади! Стулки негайно закриті для захисту поліриметрів.");
        isDrying = false;
    }
    else if (isClosed && isDrying) {
        printLocalTime();
        Serial.println("☁️ Фіксація повторних крапель. Таймер висихання скинуто.");
        isDrying = false;
        sendTelegramMessage("☁️ Фіксація повторних крапель. Таймер висихання скинуто, очікування нормалізації.");
    }
    return;
}

// ОНОВЛЕННЯ БУФЕРА ДЛЯ ТРЕНДУ ПОГОДИ (Щохвилини)
if (currentMillis - lastBufferUpdate >= bufferInterval) {
    lastBufferUpdate = currentMillis;
    pressureBuffer[bufferIndex] = bmp.readPressure() / 100.0F;
    humidityBuffer[bufferIndex] = dht.readHumidity();

    bufferIndex++;
    if (bufferIndex >= BUFFER_SIZE) {
        bufferIndex = 0;
        isBufferFull = true;
    }
}

// ПРИОРИТЕТ 2: ПЛАНОВИЙ МОНИТОРИНГ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НЕГОДИ
if (currentMillis - lastBMEtime >= bmeInterval) {
    lastBMEtime = currentMillis;

```

```

float temperature = dht.readTemperature();
float pressure = bmp.readPressure() / 100.0F;
float humidity = dht.readHumidity();

if (isnan(humidity) || isnan(temperature)) return;

float dewPoint = calculateDewPoint(temperature, humidity);
float dewPointGap = temperature - dewPoint;

printLocalTime();
Serial.printf("Телеметрія -> Т: %.1f°C | Н: %.1f%% | Р: %.1f гПа | Точка
роси: %.1f°C (Дефіцит: %.1f°C)\n",
              temperature, humidity, pressure, dewPoint, dewPointGap);

int oldestIndex = isBufferFull ? bufferIndex : 0;
float deltaPressure = pressure - pressureBuffer[oldestIndex];
float deltaHumidity = humidity - humidityBuffer[oldestIndex];

// ПЕРЕВІРКА КОМПЛЕКСНИХ КРИТЕРІЇВ ЗАХИСТУ
bool stormWarning = (deltaPressure <= -1.5 && deltaHumidity >= 10.0);
bool dewPointRisk = (dewPointGap <= CRIT_DEW_POINT_GAP);
bool staticLimitsExceeded = (humidity > CRIT_HUMIDITY || pressure <
CRIT_PRESSURE);

if (staticLimitsExceeded || dewPointRisk || stormWarning) {
    if (!isClosed) {
        printLocalTime();
        closeDome();

        String msg = "⚠ АВТОМАТИЧНЕ ЗАКРИТТЯ КУПОЛА!\nПричина: ";
        if (stormWarning) msg += "Виявлено наближення штормового фронту!\n";
        else if (dewPointRisk) msg += "Загроза утворення конденсату на лінзах
(Точка роси)!\n";
        else msg += "Перевищено статичні пороги атмосфери!\n";

        msg += "Т: " + String(temperature, 1) + "°C | Н: " + String(humidity, 1)
+ "% | Р: " + String(pressure, 1) + " гПа";
        Serial.println(msg);
        sendTelegramMessage(msg);
    }
    isDrying = false;
}
else if (isClosed && !isDrying && (humidity <= CRIT_HUMIDITY && pressure >=
CRIT_PRESSURE && !dewPointRisk)) {
    printLocalTime();
    Serial.println("☀ Метеоумови повністю стабілізувалися. Запуск таймера
висихання...");
    isDrying = true;
    dryStartMillis = currentMillis;
}

```

```

        sendTelegramMessage("🌫 Атмосферні показники нормалізувалися. Запущено
алгоритм висихання залишків вологи...");
    }
}

// ПРИОРИТЕТ 3: ЛОГІКА ТАЙМЕРА ВИСИХАННЯ
if (isClosed && isDrying) {
    unsigned long timePassed = currentMillis - dryStartMillis;

    static unsigned long lastCountTime = 0;
    if (currentMillis - lastCountTime >= 1000) {
        lastCountTime = currentMillis;
        long secondsLeft = (dryInterval - timePassed) / 1000;
        if (secondsLeft >= 0) {
            Serial.printf("🕒 Процес дегідратації корпусу. До відкриття купола: %ld
сек...\n", secondsLeft);
        }
    }

    if (timePassed >= dryInterval) {
        printLocalTime();
        Serial.println("💡 Корпус купола повністю сухий. Безпечно відкриваю
стулки.");
        openDome();
        isDrying = false;
        sendTelegramMessage("💡 Верифікація сухості корпусу успішна. Автоматика
відкрила стулки.");
    }
}
}

void closeDome() {
    servo1.write(DOME_CLOSED_ANGLE);
    servo2.write(DOME_CLOSED_ANGLE);
    servo3.write(DOME_CLOSED_ANGLE);
    servo4.write(DOME_CLOSED_ANGLE);
    isClosed = true;
}

void openDome() {
    servo1.write(DOME_OPEN_ANGLE_P1);
    servo2.write(DOME_OPEN_ANGLE_P1);

    servo3.write(DOME_OPEN_ANGLE_P2);
    servo4.write(DOME_OPEN_ANGLE_P2);
    isClosed = false;
}
}

```