

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ
АППАРАТОМ**

Виконав: студент 4 курсу,
групи ЕЛ-216,
спеціальності 171 Електроніка

 Луцик О. Л.

Керівник: к. т. н., доцент каф. БМІОЕС

 Костішин С. В.
« 13 » 06 2025 р.

Рецензент: д. т. н., професор каф. ІРТС

 Семенов А. О.
« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри БМІОЕС

Коваль Л. Г.


« 16 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Бакалавр
Спеціальність 171 Електроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри БМІОЕС
к. т. н., доцент Коваль Л. Г.



«20» 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу
студенту Луцику Олександрю Леонідовичу, гр. ЕЛ-216

1. Тема БДР «Автоматизована система керування безпілотним літальним апаратом», керівник роботи доцент кафедри БМІОЕС Костішин Сергій Володимирович, к. т. н., затверджені наказом ВНТУ від 20 березня 2025 року № 97.
2. Строк подання студентом роботи – до 02.06.2025 р.
3. Вихідні дані для роботи: мініатюрний пристрій для керування рухом безпілотного літального апарату, напруга живлення 3,3 В, споживана потужність – не більше 2 Вт, габаритні розміри – не більше 70 x 60 x 30 мм, маса – не більше 100 г, об'єм – не більше 150 см³, ймовірність відмови – не більше 10,0 × 10⁻⁵ год⁻¹.
4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Теоретичні основи та принципи автоматизованого керування БПЛА; 2. Огляд сучасних систем автоматизованого керування БПЛА; 3. Конструкторський розділ;
4. Опрацювання питань охорони праці.
5. Зміст ілюстративної частини (з точним зазначенням обов'язкових креслеників): схема електрична принципова, плата друкована, корпус пристрою.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Костішин С. В., к. т. н., доцент кафедри БМІОЕС	 20.03.2025	 13.05.2025
Охорона праці	Дембіцька С. В., д. п. н., професор кафедри БЖДПБ	 24.03.25	 30.05.25

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

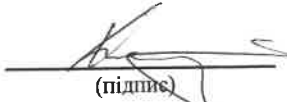
№ з/п	Назва етапів БДР	Строк виконання етапів БДР	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	До 20.03.2025	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	До 21.04.2025	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	До 19.05.2025	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	До 30.05.2025	
5	Попередній захист БДР	02.06.2025	
6	Нормоконтроль БДР	09.06.2025	
7	Рецензування БДР	13.06.2025	
8	Захист БДР	19.06.2025	

Студент


(підпис)

Олександр ЛУЦИК

Керівник роботи


(підпис)

Сергій КОСТІШИН

АНОТАЦІЯ

Луцик О. Л. БКР на тему «Автоматизована система керування безпілотним літальним апаратом». Вінниця : ВНТУ, 2025. 83 с.

Українською мовою. 8 рис., 9 табл., бібліогр. 37 найм.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі проаналізовано принципи побудови і роботи систем автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами, зокрема система навігації та контролю руху. Досліджено питання використання спеціалізованих політних контролерів та акселерометрів. Розроблено електричну принципову схему пристрою автоматизованого керування. Розроблено конструкцію друкованої плати і корпусу пристрою. Опрацьовані питання охорони праці при виробництві електронних систем.

ABSTRACT

Lutsyk O. L. Bachelor thesis on the topic «Automated control system for unmanned aerial vehicle». Vinnytsia : VNTU, 2025. 83 p.

In Ukrainian. Figs. 8, Tables 9, Refs. 37.

The bachelor's thesis analyzes the principles of construction and operation of automated control systems for unmanned aerial vehicles, in particular the navigation and motion control system. The issue of using specialized flight controllers and accelerometers is investigated. An electrical schematic diagram of an automated control device is developed. The design of the printed circuit board and the device housing is developed. Issues of labor protection in the production of electronic systems are studied.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ.....	7
1.1 Загальні аспекти автоматизованого керування БПЛА	7
1.2 Принципи автоматизованого керування БПЛА	8
1.3 Структурні компоненти систем автоматизованого керування БПЛА.....	10
1.4 Сенсорні системи та навігація	13
1.5 Основні алгоритми керування польотом	15
1.6 Принципи роботи систем стабілізації в БПЛА	18
1.7 Засоби забезпечення надійності та безпеки систем керування	20
1.8 Виклики та особливості автоматизованого керування безпілотними апаратами	22
1.9 Висновки до розділу 1	23
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	25
2.1 Огляд сучасних систем автоматизованого керування БПЛА.....	25
2.2 Інтегровані апаратні модулі та периферійні пристрої в системах керування БПЛА	29
2.3 Огляд програмних рішень та алгоритмів керування	34
2.4 Висновки до розділу 2	36
3 РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ.....	38
3.1 Розроблення схеми апаратного забезпечення системи керування безпілотним літальним апаратом.....	38
3.2 Особливості функціонування та управління	41
3.3 Аналіз плати друкованої.....	43
3.4 Компонування пристрою.....	48

3.5 Висновки до розділу 3	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	60
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	60
4.1.2. Електробезпека приміщення.....	63
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	63
4.2.1 Мікроклімат	63
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	64
4.2.3 Виробниче освітлення	65
4.2.4 Виробничий шум.....	66
4.2.5 Виробничі випромінювання.....	67
4.3 Пожежна безпека.....	67
4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	69
4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	69
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина	78
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки на наявність текстових запозичень	83

ВСТУП

Актуальність. У сучасних умовах стрімкого розвитку авіаційних технологій, автоматизовані системи керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) набувають все більшого значення у різних сферах людської діяльності — від військового та цивільного моніторингу до аграрного господарства, картографії, екологічного контролю та логістики. Завдяки своїй мобільності, автономності та здатності працювати в умовах, недоступних або небезпечних для людини, БПЛА стають ключовим елементом інтелектуальних технологій спостереження та управління.

Однак ефективність і надійність безпілотних платформ значною мірою залежить від якості автоматизованої системи керування, яка забезпечує стабільність польоту, обробку телеметричних даних, ухвалення рішень у реальному часі та взаємодію з іншими системами. Зі зростанням вимог до точності, безпеки та енергетичної ефективності зростає потреба в розробці більш досконалих алгоритмів і апаратних рішень, які здатні адаптуватися до змін середовища та складних сценаріїв застосування.

У цьому контексті дослідження принципів побудови, технічних засобів і підходів до розробки автоматизованих систем керування БПЛА є надзвичайно актуальним. Робота в цьому напрямку сприяє розвитку інтелектуальних автономних систем, оптимізації технічних рішень та інтеграції БПЛА в сучасну інфраструктуру управління і спостереження.

Мета. Створення автоматизованої системи керування для безпілотного літального апарата.

Завдання.

1. Вивчити теоретичні основи функціонування безпілотних літальних апаратів та принципи автоматизованого керування.
2. Проаналізувати сучасні технічні рішення та засоби систем керування БПЛА.

3. Оцінити технічні вимоги до автоматизованих систем керування безпілотними літальними апаратами.

4. Здійснити розроблення автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом.

5. Узагальнити результати дослідження для подальшої практичної реалізації системи.

6. Дослідити умови роботи з урахуванням вимог охорони праці.

Об'єкт дослідження. Безпілотні літальні апарати та системи їх автоматизованого керування.

Предмет дослідження. Принципи побудови, технічні засоби і методи розроблення автоматизованих систем керування безпілотними літальними апаратами.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ

1.1 Загальні аспекти автоматизованого керування БПЛА

У сучасному технічному середовищі, де спостерігається стрімкий розвиток автоматизації, інтелектуальних технологій та безпілотних платформ, системи автоматизованого керування посідають ключове місце в структурі функціонування різноманітних технічних засобів, зокрема безпілотних літальних апаратів. Автоматизоване керування виступає основою стабільної, ефективної та безпечної експлуатації БПЛА в широкому спектрі умов та завдань.

Суть автоматизованого керування полягає у здатності технічної системи самостійно приймати рішення та реалізовувати їх без постійного прямого впливу оператора. Це передбачає реалізацію певної логіки дій, яка ґрунтується на обробці великого масиву даних, що надходять з різних джерел, і на їх основі формується вплив на відповідні виконавчі механізми. У широкому розумінні така система має забезпечувати не лише стабільність, а й адаптивність, здатність до самоналаштування та роботи в умовах невизначеності або змін зовнішнього середовища.

Роль автоматизованого керування в контексті БПЛА виходить далеко за межі простого підтримання траєкторії. Йдеться про цілу сукупність функцій і взаємозв'язків між підсистемами, які спільно формують єдиний механізм взаємодії з навколишнім середовищем. Системи цього типу повинні бути здатними в реальному часі обробляти інформацію, формувати відповідні команди, реагувати на зовнішні чинники та забезпечувати виконання заданих цілей навіть за обмежених ресурсів чи технічних умов.

Автоматизоване керування — це не лише технічний процес, а й концептуальна модель організації взаємодії апарату з середовищем. Воно вимагає врахування цілого комплексу факторів: від фізичних властивостей

літального апарата до загальних підходів до побудови структур керування. Залежно від поставлених завдань, рівня автономності та умов використання, система може мати різний ступінь складності, бути відкритою або закритою, мати централізовану або децентралізовану структуру.

Важливим елементом загального підходу до автоматизованого керування є побудова відповідної логіки взаємодії між усіма елементами системи. Це включає як алгоритмічну базу, так і апаратну реалізацію. При цьому кожен компонент — чи то сенсор, чи обчислювальний модуль, чи виконавчий елемент — має чітко визначену роль у загальному процесі. Проте чітко розмежувати їх функції іноді складно, оскільки система діє як цілісне інтегроване середовище[1].

Узагальнюючи, можна зазначити, що автоматизоване керування безпілотними літальними апаратами є складною багатоаспектною задачею, що вимагає системного підходу та інтеграції знань з багатьох галузей. Незважаючи на різноманітність технічних рішень, базові принципи залишаються спільними: забезпечення стабільності, ефективності, надійності та здатності адаптації до змін. Саме ці аспекти визначають загальні риси автоматизованого керування як фундаментального компонента сучасних БПЛА.

1.2 Принципи автоматизованого керування БПЛА

Системи автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) є складними технічними утвореннями, які базуються на широкому колі принципів, що забезпечують їхню ефективність, надійність і функціональну гнучкість. Зважаючи на зростаючу актуальність використання безпілотних технологій у найрізноманітніших галузях, особливого значення набуває осмислення базових принципів, на яких ґрунтується функціонування таких систем. Розуміння цих основ не лише дає змогу краще орієнтуватися в

існуючих технічних рішеннях, а й формує базу для подальших інженерних розробок та вдосконалення майбутніх систем.

Одним із ключових принципів автоматизованого керування є забезпечення зворотного зв'язку, що дає можливість системі постійно аналізувати своє положення, стан та поведінку у реальному часі. Це дозволяє не просто виконувати команди, а динамічно реагувати на відхилення та здійснювати необхідні коригування для досягнення бажаного результату. Такий принцип є основою для побудови адаптивних та стабілізуючих підсистем, які лежать в основі ефективного функціонування будь-якого БПЛА.

Ще одним визначальним підходом є ієрархічність структури керування, яка дозволяє розділити загальну систему на логічно впорядковані рівні — від базових функцій стабілізації до вищих рівнів прийняття рішень. Цей принцип забезпечує логічну послідовність процесів керування, де кожен рівень виконує свою роль і тісно взаємодіє з іншими компонентами. Такий розподіл навантаження дозволяє краще оптимізувати ресурси системи, а також сприяє більш ефективному реагуванню на змінні умови.

Принцип модульності передбачає структурну гнучкість, завдяки якій систему можна легко адаптувати до різних умов використання та конфігурацій. Це особливо актуально для систем, які застосовуються у нестабільних або складних середовищах, де є потреба у швидкому переналаштуванні або модернізації окремих складників. Такий підхід також значно полегшує технічне обслуговування та ремонт, оскільки дозволяє ізолювати й локалізувати проблеми на рівні окремих модулів.

Принцип адаптивності є надзвичайно важливим у сучасних умовах, коли безпілотники змушені функціонувати у змінному, а іноді й непередбачуваному середовищі. Здатність системи до адаптації дозволяє зменшити залежність від жорстких попередньо закладених сценаріїв і забезпечити гнучкість при виконанні складних або нестандартних завдань. Це, у свою чергу, відкриває можливість для більш широкого застосування БПЛА в різних сферах діяльності.

Сучасні тенденції також передбачають імплементацію принципу інтелектуальності, який полягає у використанні алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для розширення можливостей автоматизованого керування. Цей підхід відкриває нові горизонти для автономного функціонування безпілотників у складних ситуаціях без безпосереднього втручання оператора, зокрема у випадках, коли традиційні системи можуть бути недостатньо ефективними.

Принцип відмовостійкості забезпечує здатність системи зберігати функціональність навіть при часткових відмовах окремих елементів. Це досягається через використання резервування, алгоритмів самодіагностики та переходу в безпечні режими. З огляду на те, що безпілотні літальні апарати часто працюють в умовах, де доступ до обслуговування обмежений або взагалі відсутній, цей принцип є одним із ключових для забезпечення їхньої надійної експлуатації[2].

Таким чином, принципи автоматизованого керування БПЛА охоплюють широкий спектр підходів, що забезпечують збалансовану взаємодію між технічними можливостями, адаптивністю до зовнішніх умов та рівнем автономності. У сукупності вони створюють фундамент для розроблення ефективних, гнучких і надійних систем, здатних функціонувати в умовах сучасного складного техногенного середовища.

1.3 Структурні компоненти систем автоматизованого керування БПЛА

Системи автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) являють собою надзвичайно складні й багатокомпонентні технічні утворення, що поєднують у собі широкий спектр апаратного та програмного забезпечення, спрямованого на забезпечення стабільної, безпечної та ефективної експлуатації літального апарата в автономному або напіваавтономному режимі. Розроблення таких систем потребує міждисциплінарного підходу, який охоплює електроніку, програмування,

авіаційну техніку, механіку, зв'язок та системне моделювання. У сучасних умовах стрімкого розвитку безпілотних технологій автоматизовані системи керування стали ключовим елементом, який забезпечує не лише базову стабілізацію та навігацію апарата, але й дозволяє реалізовувати складні сценарії взаємодії з навколишнім середовищем, виконання місій різного типу, а також інтеграцію з іншими інформаційними та керувальними структурами.

Такі системи в більшості випадків складаються з кількох основних підсистем, тісно пов'язаних між собою й функціонально узгоджених у межах єдиної архітектури. До основних елементів можна віднести сенсорну частину, обчислювальні блоки, виконавчі пристрої, комунікаційні засоби, а також програмну платформу, яка забезпечує узгоджену роботу всіх складових та реалізацію логіки управління. Усі ці компоненти працюють у тісному взаємозв'язку, формуючи злагоджену й гнучку систему, здатну адаптуватися до змін зовнішнього середовища, враховувати нові виклики та ефективно реагувати на непередбачувані ситуації.

Сенсорна частина зазвичай включає низку вимірювальних пристроїв, які забезпечують апарат актуальними даними про стан простору, положення, швидкість і висоту. Серед найуживаніших компонентів можна назвати інерціальні вимірювальні модулі (наприклад, MPU-6050 або LSM9DS1), які забезпечують дані про прискорення й кутову швидкість. Вони є критично важливими для реалізації стабілізації апарата. Барометри на кшталт BMP280 чи MS5611 дозволяють більш точно визначати висоту польоту, а ультразвукові та лазерні далекоміри, як-от VL53L0X або TFmini, слугують для вимірювання відстані до поверхні — особливо актуально при зльоті та посадці. GPS-модулі на базі чипів u-blox NEO-M8N забезпечують просторову орієнтацію та навігацію, що є основою для виконання автономних маршрутів. У деяких випадках, коли завдання вимагає підвищеної точності або працювати в обмежених умовах, застосовуються системи комп'ютерного зору, які можуть включати RGB-камери або камери глибини.

Центральним елементом керування вважається обчислювальний модуль. Його завдання полягає у зборі даних із сенсорів, їх обробці відповідно до закладених алгоритмів та прийнятті рішень щодо дій виконавчих органів. Для цих цілей можуть використовуватись як класичні мікроконтролери типу STM32F4 або STM32H7, так і потужніші одноплатні комп'ютери — наприклад, Raspberry Pi або NVIDIA Jetson Nano. Платформа вибирається з огляду на складність завдань, що виконуються, а також необхідність в алгоритмах машинного навчання або обробки зображень. Обчислювальний модуль виконує центральну роль — це своєрідний «мозок» системи, що координує всі її дії. Він формує керувальні сигнали для регуляторів швидкості, або регуляторів ходу (ESC), які, своєю чергою, впливають на роботу безщіткових двигунів типу 2204 або 2212. У разі потреби точного позиціонування або реалізації керування поверхнями керування також застосовуються сервоприводи.

Комунікаційна підсистема слугує каналом обміну інформацією між БПЛА та наземною станцією. Тут використовуються різноманітні технології передачі даних — від традиційних радіоканалів (наприклад, модулі 3DR SiK, LoRa), до сучасних цифрових систем передачі відео й телеметрії, таких як DJI Air Unit або Wi-Fi-модулі з розширеними можливостями. У критичних системах комунікація виконує не лише функцію передавання команд, а й слугує засобом моніторингу, діагностики та страхування в разі втрати автономної навігації.

Важливою ланкою в загальній структурі є програмне забезпечення, яке визначає логіку дій апарата в тій чи іншій ситуації. Програмна платформа забезпечує реалізацію алгоритмів стабілізації, маршрутного планування, уникнення перешкод, а також взаємодію з оператором. Найбільш поширені серед дослідників і розробників системи відкритого типу, такі як ArduPilot або PX4, які дозволяють масштабувати проєкт, адаптувати його до різних типів літальних апаратів і змінювати рівень автономності відповідно до потреб користувача. Наземні станції типу Mission Planner або QGroundControl

надають зручні графічні інтерфейси для підготовки місій, реального моніторингу польоту та аналізу результатів.

Забезпечення взаємодії між усіма компонентами системи потребує використання стандартних інтерфейсів, таких як I2C, SPI, UART, CAN або Ethernet, які слугують не тільки для передавання даних, але й для синхронізації роботи пристроїв. Структура системи зазвичай має ієрархічну побудову, де окремі блоки відповідальні за конкретні функції — зниження рівня навантаження на центральний контролер, підвищення надійності та забезпечення масштабованості[3].

Таким чином, структурні компоненти системи автоматизованого керування БПЛА формують узгоджене технічне середовище, яке дозволяє реалізовувати найрізноманітніші завдання — від стабілізації до автономної навігації та реагування на зміни середовища. Розуміння логіки побудови й принципів роботи кожного з компонентів є основою для подальшого проєктування ефективних, надійних та гнучких систем, що відповідають сучасним вимогам до безпілотних технологій.

1.4 Сенсорні системи та навігація

Сенсорні системи та навігація є одними з найважливіших елементів автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом (БПЛА), що забезпечують збір, обробку та інтерпретацію даних про просторове положення, рух та оточення апарата. Ці системи покликані створювати точну, надійну та безперервну інформаційну основу, необхідну для прийняття оптимальних рішень керування у реальному часі, що визначає безпеку і ефективність польоту.

Основою сенсорних систем є інерціальна вимірювальна одиниця (IMU), яка інтегрує багатовісні гіроскопи та акселерометри для визначення кутової швидкості і прискорення відповідно. Сучасні IMU зазвичай базуються на мікроелектромеханічних системах (MEMS), що поєднують компактність,

низьке енергоспоживання та достатню точність для більшості застосувань у БПЛА. Високоточні гіроскопи можуть бути засновані на лазерній або кільцевій волоконній технології (RLG, FOG), які забезпечують значно нижчий рівень шуму та довготривалу стабільність, що критично для довготривалих автономних місій.

Для визначення абсолютного положення у просторі застосовуються супутникові навігаційні системи GNSS, такі як GPS, Galileo та BeiDou. Незважаючи на високу популярність GNSS, вони мають обмеження, пов'язані з затіненням сигналу, мультиплікацією, затримками та інтерференцією. Тому для підвищення точності застосовуються методи диференціальної навігації (DGPS) та RTK (Real-Time Kinematic), які дозволяють знизити похибку позиціонування до сантиметрового рівня, що особливо важливо для завдань точного землеробства, інспекції інфраструктури чи доставки вантажів[4].

Крім того, для розширення можливостей навігації в умовах обмеженого або відсутнього GNSS-сигналу широко впроваджуються технології візуальної інерціальної одометрії (VIO) та одночасної локалізації й картографування (SLAM). Використання камер високої роздільної здатності (моно-, стерео-, RGB-D) у поєднанні з IMU дозволяє системам візуальної навігації відслідковувати особливості ландшафту, розпізнавати орієнтири та формувати карту навколишнього середовища в режимі реального часу. Для реалізації SLAM застосовуються алгоритми на основі Extended Kalman Filter (EKF), Particle Filter та новітні методи машинного навчання, що підвищують стійкість та точність позиціонування в складних умовах.

Барометричні датчики відіграють важливу роль у визначенні висоти польоту за рахунок вимірювання атмосферного тиску. Для точності даних необхідне регулярне калібрування з урахуванням погодних умов та перепадів тиску. Магнітометри служать для орієнтації відносно магнітного поля Землі і є необхідними для визначення курсу, особливо у випадках, коли супутникові системи навігації недоступні або ненадійні.

Для безпеки польоту і уникнення зіткнень застосовуються ультразвукові сенсори, а також лазерні дальноміри (лідар). Лідари, що працюють у видимому або ближньому інфрачервоному діапазоні, забезпечують високоточне тривимірне сканування простору, дозволяючи формувати карту перешкод у реальному часі. Високочастотні лідарні системи з швидкістю сотні тисяч вимірювань за секунду здатні відслідковувати навіть дрібні рухомі об'єкти, що критично для безпечного польоту у міських середовищах.

Обробка даних з численних сенсорів відбувається у центральному блоці керування за допомогою алгоритмів сенсорної фузії. Найпоширенішим методом є розширений фільтр Калмана (Extended Kalman Filter, EKF), який оптимально інтегрує дані різної природи та похибок, забезпечуючи найкращу оцінку стану літального апарата. В деяких випадках застосовують несингулярні фільтри, баєсові підходи або нейронні мережі для підвищення адаптивності системи до складних або динамічних умов польоту.

Важливим аспектом є також часова синхронізація сигналів від сенсорів з високою точністю, оскільки навіть незначні розбіжності у часі можуть призводити до помилок у позиціонуванні та орієнтації. Для цього застосовують апаратні та програмні засоби синхронізації, такі як протоколи RTP (Precision Time Protocol) та використання апаратних таймерів[5].

У підсумку, сенсорні системи та навігація у сучасних БПЛА — це складний багатокомпонентний комплекс, який включає апаратне забезпечення, програмні алгоритми і методи обробки даних. Висока точність, надійність, адаптивність та швидкодія цих систем безпосередньо впливають на якість автоматизованого керування, безпеку польоту та здатність апарата виконувати складні автономні завдання.

1.5 Основні алгоритми керування польотом

Основні алгоритми керування польотом є ключовими компонентами автоматизованої системи управління безпілотним літальним апаратом (БПЛА),

що забезпечують безперебійну, стабільну та ефективну роботу апарата в різноманітних польотних режимах і умовах експлуатації. З огляду на швидкий розвиток технологій, розширення сфер застосування БПЛА та зростаючі вимоги до автономності, надійності та точності, алгоритми керування польотом набувають все більшої складності і глибини.

Початкові підходи до керування базувалися на класичних методах теорії автоматичного регулювання, зокрема застосуванні пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів. ПІД-регулятори залишаються основою багатьох сучасних систем через їх простоту, ефективність і відносно низькі обчислювальні вимоги. Вони здатні підтримувати стабільність польоту за різними параметрами — такими як кут крену, тангажу, напрямок руху, висота, швидкість і положення у просторі. Проте в умовах змінних зовнішніх впливів, таких як вітер, турбулентність, або при маневрах високої складності, прості ПІД-регулятори можуть виявлятися недостатньо гнучкими, що викликає необхідність використання більш складних підходів.

Оптимальні алгоритми керування, зокрема лінійно-квадратичні регулятори (LQR), використовують математичні моделі системи для мінімізації певної функції вартості, яка балансує між точністю слідування команді та енергетичними затратами. Ці алгоритми дозволяють досягти більш збалансованого і ефективного управління, особливо в умовах, коли потрібно враховувати обмеження по ресурсах і можливі збурення.

Для БПЛА, що мають нелінійну динаміку і працюють у непередбачуваних середовищах, широко застосовуються адаптивні алгоритми керування. Вони здатні змінювати свої параметри у режимі реального часу, реагуючи на зміни стану апарата або зовнішні умови. Наприклад, при пошкодженні одного з двигунів або змінах маси корисного навантаження, адаптивний контролер може переобчислити оптимальні параметри для підтримки стабільності польоту. Це значно підвищує надійність і безпеку експлуатації безпілотників.

Ще одним прогресивним напрямком є використання алгоритмів керування на основі моделі, зокрема Model Predictive Control (MPC). MPC забезпечує прогнозування поведінки системи на певний горизонт часу, що дозволяє заздалегідь планувати оптимальні керуючі дії з урахуванням технічних обмежень, динаміки системи і зовнішніх факторів. Такий підхід особливо корисний у складних сценаріях польоту, наприклад, при уникненні перешкод, польоті в обмеженому просторі або виконанні точних маневрів.

Сучасні дослідження активно інтегрують методи штучного інтелекту у системи керування польотом. Зокрема, нейронні мережі і методи підкріпленого навчання дають змогу розробляти адаптивні контролери, які можуть навчатися на основі досвіду, прогнозувати складні динамічні явища та самостійно коригувати стратегії керування. Такі підходи відкривають нові можливості для підвищення автономності та гнучкості БПЛА, особливо в умовах непередбачуваних завдань і середовищ.

Важливою складовою системи керування є також алгоритми планування траєкторії польоту. Вони визначають оптимальні маршрути з урахуванням характеристик БПЛА, топографії місцевості, наявності перешкод та цілей місії. Алгоритми планування працюють у тісній взаємодії з контролерами польоту, передаючи їм параметри для реалізації безпечного та ефективного руху. Розробка таких алгоритмів включає застосування методів оптимізації, евристичних підходів і алгоритмів пошуку, що враховують як статичні, так і динамічні умови навколишнього середовища.

Крім того, системи керування польотом повинні враховувати механічні та аеродинамічні особливості конкретної платформи, що впливає на вибір і налаштування алгоритмів. Наприклад, квадрокоптери, літаки та гібридні апарати мають різні динамічні властивості, що визначають специфіку контролю. Врахування цих особливостей дозволяє підвищити ефективність керування та розширити функціональні можливості БПЛА[6].

Загалом, комплексне застосування різноманітних алгоритмічних підходів, адаптованих під конкретні умови експлуатації і типи апаратів, є

запорукою надійності, точності та гнучкості автоматизованих систем керування польотом. Постійне удосконалення алгоритмів і інтеграція новітніх технологій дозволяють розширювати спектр застосувань безпілотних літальних апаратів у військовій, цивільній, комерційній, науковій та інших сферах.

1.6 Принципи роботи систем стабілізації в БПЛА

Системи стабілізації в безпілотних літальних апаратах (БПЛА) є невід'ємною частиною забезпечення безпеки польоту, точності виконання завдань та загальної надійності роботи апарата. Вони покликані підтримувати оптимальний стан літального апарата в просторі, запобігаючи надмірним коливанням, неконтрольованим змінам положення або швидкості. Стабілізація забезпечує рівновагу між зовнішніми впливами, такими як вітер або турбулентність, і внутрішніми командами керування, які визначають бажану траєкторію руху.

Основна ідея систем стабілізації полягає у безперервному контролі поточного положення, орієнтації та швидкості БПЛА за допомогою сенсорних даних, які опрацьовуються в режимі реального часу. Для цього використовуються різноманітні датчики — гіроскопи, акселерометри, магнітometri, барометри, а також системи супутникової навігації, такі як GPS або GNSS. Отримана інформація аналізується в бортовому контролері, який порівнює фактичні параметри з заданими і формує коригуючі сигнали для силових установок і сервоприводів.

Стабілізаційні системи часто реалізуються за допомогою багаторівневої архітектури. Нижній рівень відповідає за підтримку базових параметрів — кутів крену, тангажу та курсу, працюючи на швидких часових інтервалах. Цей рівень забезпечує миттєву реакцію на дрібні відхилення, що дозволяє уникнути різких рухів або перекидань. Вищий рівень системи може управляти

більш глобальними завданнями, такими як утримання висоти або слідування складній траєкторії, координуючи роботу нижчого рівня.

Важливою характеристикою систем стабілізації є їх здатність адаптуватися до зміни зовнішніх умов і внутрішніх параметрів апарата. Це досягається застосуванням адаптивних або гібридних регуляторів, які можуть переналаштовувати свої параметри залежно від ситуації, що виникає. Наприклад, при зміні ваги корисного навантаження або несправності окремих двигунів система стабілізації повинна швидко перебудуватися, зберігаючи при цьому стабільність польоту.

У сучасних БПЛА широко застосовуються алгоритми, що поєднують класичні методи регулювання з більш просунутими підходами, зокрема використанням моделей стану і оптимізаційних процедур. Це дозволяє підвищити точність стабілізації, зменшити енергоспоживання та знизити знос апаратних компонентів. Крім того, завдяки сучасним обчислювальним ресурсам на борту, стабілізаційні системи можуть виконувати складні розрахунки в реальному часі, забезпечуючи плавний та безпечний політ.

Не менш важливою складовою систем стабілізації є захист від збоїв і відновлення після нештатних ситуацій. Наприклад, у разі раптового порушення роботи одного з датчиків або двигунів система може активувати резервні алгоритми або аварійні режими, що мінімізують ризик аварії. Це підвищує загальну надійність та безпеку використання БПЛА, що особливо актуально для застосування у критичних або автономних місіях[7].

Таким чином, принципи роботи систем стабілізації в безпілотних літальних апаратах базуються на комплексному поєднанні сенсорного контролю, швидких алгоритмів корекції, адаптивності до змінних умов та надійності в екстрених ситуаціях. Постійне вдосконалення цих систем є одним із ключових напрямків розвитку сучасної безпілотної авіації, що дозволяє розширювати функціональні можливості апаратів і забезпечувати їх ефективність у найрізноманітніших завданнях.

1.7 Засоби забезпечення надійності та безпеки систем керування

Засоби забезпечення надійності та безпеки систем керування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ключовим аспектом при розробці та експлуатації сучасних безпілотних систем. Надійність системи керування безпосередньо впливає на безпеку польоту, зниження ризику аварійних ситуацій та забезпечення стійкості до несправностей. Для досягнення цих цілей застосовуються комплексні технічні заходи, що включають резервування, діагностику, захист від відмов та адаптивні алгоритми.

Одним із основних технічних засобів підвищення надійності є резервування критичних компонентів системи. Резервування може бути апаратним і програмним. Апаратура, як-от контролери польоту, сенсорні блоки або виконавчі механізми, дублюються або навіть утворюють трійкові системи з голосуванням (Triple Modular Redundancy, TMR), що дозволяє продовжити роботу апарата при виході з ладу окремих елементів. Програмне резервування передбачає використання кількох незалежних алгоритмів або програмних модулів, результати яких порівнюються для виявлення і корекції помилок.

Системи діагностики і моніторингу стану (Health Monitoring Systems) забезпечують постійний контроль параметрів обладнання і навколишнього середовища. Застосування датчиків для визначення температури, струму, напруги, а також аналіз даних про працездатність датчиків і виконавчих механізмів дозволяє своєчасно виявляти потенційні відмови та попереджувати про них оператора або автоматично запускати коригувальні дії. Особливо важливим є моніторинг працездатності системи живлення, оскільки її відмова може призвести до аварії.

Захист від зовнішніх впливів, таких як електромагнітні завади або імпульси (EMI) та радіочастотні перешкоди (RFI), реалізується через використання екранування кабелів, фільтрів, а також спеціальних алгоритмів обробки сигналів, які підвищують стійкість системи керування до шумів.

Забезпечення безпеки інформації, включаючи шифрування каналів зв'язку, аутентифікацію команд та запобігання несанкціонованому доступу, є додатковими заходами для запобігання втручанню у роботу БПЛА.

Адаптивні системи керування забезпечують підвищену надійність шляхом автоматичного налаштування параметрів керуючих алгоритмів відповідно до змінних умов польоту або технічного стану апарата. Такі системи використовують моделі стану літального апарата та алгоритми самонавчання, що дозволяє ефективно компенсувати вплив несправностей, втрату ефективності виконавчих механізмів або зміни аеродинамічних характеристик.

Для підвищення безпеки польоту застосовуються аварійні режими, які активуються при виявленні критичних несправностей. Це можуть бути автоматичні посадки, перехід у режим утримання позиції або активація парашутних систем. Такі режими передбачають заздалегідь прописані сценарії дій, що мінімізують ризик пошкодження апарата та оточуючих об'єктів.

Важливим напрямком є також верифікація та валідація програмного забезпечення систем керування. Для цього застосовуються методи формальної верифікації, тестування в симуляторах і польотних стендах, а також аналіз відмов і впливу помилок. Забезпечення високої якості програмного коду знижує ризик непередбачуваних збоїв у роботі системи[8].

Таким чином, комплексний підхід до забезпечення надійності та безпеки систем керування БПЛА включає застосування резервування, систем моніторингу, захисту від зовнішніх впливів, адаптивних алгоритмів, аварійних режимів і суворого контролю якості програмного забезпечення. Всі ці технічні засоби разом формують основу безпечної і ефективної експлуатації сучасних безпілотних літальних апаратів.

1.8 Виклики та особливості автоматизованого керування безпілотними апаратами

Автоматизоване керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) є складною та багатогранною задачею, що пов'язана з численними викликами та особливостями, характерними саме для цього класу систем. Поєднання технічних, програмних та експлуатаційних факторів формує низку проблем, які необхідно враховувати під час розроблення та впровадження систем керування.

Однією з ключових особливостей є високий рівень автономності, який вимагає від системи здатності приймати рішення без участі оператора у режимі реального часу. Це накладає значні вимоги на алгоритми керування та обробку даних від сенсорів, оскільки апарат повинен адаптуватися до змін навколишнього середовища, непередбачуваних ситуацій і потенційних загроз. Крім того, автономність ускладнює діагностику несправностей і вимагає розроблення надійних засобів самодіагностики та самовідновлення.

Серед суттєвих викликів варто виділити обмеженість ресурсів безпілотного апарата — це обмеження по масі, розмірах, енергоспоживанню та обчислювальній потужності. Через це апаратні платформи керування мають бути максимально компактними й енергоефективними, а програмне забезпечення — оптимізованим. Водночас складність задачі керування, зокрема в умовах нестабільних атмосферних явищ, змушує застосовувати передові методи обробки сигналів і адаптивні алгоритми, що мають високі обчислювальні вимоги.

Важливою особливістю є також необхідність забезпечення безперервного зв'язку між БПЛА і наземним пунктом керування або між апаратами у складі флотилії. Зміни в якості або втрати каналу зв'язку можуть призвести до критичних наслідків, тому системи керування мають містити механізми резервування, автономного режиму і захисту від втручання, у тому числі кібератак.

Ще одним викликом є складність інтеграції різноманітних сенсорних систем і їхнє калібрування. Адекватне розпізнавання оточення, виявлення перешкод, навігація у складних умовах та забезпечення точності позиціонування залежать від правильної роботи і коректної обробки даних із GPS, інерційних вимірювальних блоків, камер, радарів та інших сенсорів.

Не менш важливою є і безпека польотів у повітряному просторі з іншими літальними апаратами, птахами чи людьми. Системи автоматизованого керування мають бути сумісними з регуляторними вимогами, стандартами авіаційної безпеки, а також мати можливість кооперації з іншими апаратами для запобігання зіткненням[9].

Таким чином, розробка систем автоматизованого керування БПЛА пов'язана із комплексом технічних, програмних та організаційних викликів. Для успішного вирішення цих завдань необхідна інтеграція міждисциплінарних знань у сфері авіаційної техніки, програмування, кібербезпеки, телекомунікацій та управління ризиками. Це забезпечує створення ефективних, надійних і безпечних безпілотних літальних апаратів, здатних виконувати широкий спектр завдань у різних умовах експлуатації.

1.9 Висновки до розділу 1

Розділ 1 присвячений теоретичним основам функціонування безпілотних літальних апаратів та принципам автоматизованого керування ними. У ньому було розглянуто загальні аспекти систем автоматизованого керування БПЛА, що дозволяє усвідомити складність та багатогранність таких систем, а також їхню важливість для забезпечення ефективності та безпеки польотів. Проаналізовано принципи керування, які лежать в основі функціонування автоматизованих систем, включно з особливостями алгоритмів, що відповідають за стабілізацію, навігацію та адаптацію до змін навколишнього середовища.

Окрему увагу приділено структурним компонентам систем керування, що включають апаратні модулі, сенсорні підсистеми та засоби зв'язку, які забезпечують збір, обробку і передачу інформації для прийняття управлінських рішень. Розглянуто сенсорні системи і навігаційні технології, що є ключовими для забезпечення точності позиціонування і безпеки польотів. Детально проаналізовані основні алгоритми керування польотом, які реалізують підтримку стійкості, рух у просторі та реакцію на зовнішні впливи.

У розділі також висвітлено принципи роботи систем стабілізації, що дозволяють підтримувати оптимальні параметри польоту в різних умовах, а також засоби забезпечення надійності та безпеки, які є необхідними для запобігання відмовам і збоїв у роботі систем керування. Було виділено ключові виклики, пов'язані з автоматизованим керуванням БПЛА, зокрема питання автономності, обмежень ресурсів, складності інтеграції сенсорів, забезпечення зв'язку і відповідності вимогам безпеки.

Загалом, теоретичний аналіз підтвердив, що ефективна робота систем автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами базується на комплексній взаємодії апаратних, програмних і алгоритмічних компонентів. Розуміння принципів функціонування, структурних особливостей і сучасних викликів створює міцну основу для подальшого розроблення автоматизованої системи керування, що буде розглянута в наступних розділах цієї роботи.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

2.1 Огляд сучасних систем автоматизованого керування БПЛА

Сучасні системи автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами відрізняються високим рівнем інтеграції апаратних і програмних компонентів, що забезпечують ефективне, надійне і гнучке управління польотом.

Однією з найбільш відомих та широко застосовуваних платформ є Pixhawk (рис. 2.1) — відкрита апаратно-програмна система, яка завдяки своїй універсальності та потужним технічним характеристикам отримала популярність як у аматорських, так і в професійних проєктах. Апаратура Pixhawk базується на 32-бітному мікроконтролері STM32F4 серії Cortex-M4, що забезпечує високу обчислювальну потужність для виконання складних алгоритмів стабілізації, навігації та планування польоту. Вона підтримує підключення широкого спектра сенсорів, серед яких GPS-модулі (наприклад, Ublox Neo-M8N) для точного позиціонування, інерціальні вимірювальні блоки (IMU) на базі гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів, а також барометри для визначення висоти польоту. Завдяки різноманітним інтерфейсам, таким як UART, SPI, I2C, CAN і PWM, система Pixhawk здатна працювати з різними типами апаратних компонентів, що дозволяє налаштовувати платформу під конкретні потреби проєкту. Програмне забезпечення PX4 і ArduPilot, що використовується на цій платформі, реалізує багатофункціональні автопілотні алгоритми, включно з PID-регуляторами, плануванням маршрутів, автоматичним поверненням до бази (Return-To-Home) та адаптивною стабілізацією польоту. Відкритий код цих програмних комплексів дає змогу розробникам модифікувати функціонал під специфічні завдання, інтегрувати додаткові модулі, наприклад, для управління вантажем або камерою.

Телеметрія на основі радіомодулів (433/915 МГц) і Wi-Fi забезпечує безперервний зв'язок між оператором і БПЛА, що критично для моніторингу та контролю польоту.



Рисунок 2.1 – Система автоматизованого керування 3DR Pixhawk® [10]

Іншим популярним комерційним рішенням є система DJI Naza-M, яка широко застосовується у багатьох мультикоптерах для цивільних і напівпрофесійних цілей. Відмінною рисою Naza-M є її здатність інтегрувати в собі кілька типів датчиків, зокрема IMU, GPS і барометр, що разом забезпечують стабільне утримання положення та висоти навіть в складних метеоумовах. Програмна частина системи підтримує різні режими польоту, серед яких ручне управління, напіваавтоматичні режими з утриманням позиції і висоти, а також повністю автономний політ з виконанням заздалегідь заданих маршрутів. Точність і стабільність роботи системи досягаються завдяки використанню фірмових алгоритмів DJI, які оптимізують обробку даних сенсорів та корекцію польоту в режимі реального часу. Крім того, система Naza-M має вбудовані функції безпеки, зокрема автоматичне повернення при втраті сигналу або низькому заряді акумулятора, що підвищує надійність експлуатації.



Рисунок 2.2 – Автопілот DJI Naza-M[11]

Військові та промислові БПЛА оснащуються ще більш складними системами автоматизованого керування, прикладом яких можуть слугувати платформи General Atomics MQ-9 Reaper та Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk. Ці безпілотники обладнані багаторівневими системами навігації, що комбінують глобальні супутникові системи (GPS/GLONASS/Galileo), інерціальні навігаційні системи, а також оптичні та радіолокаційні сенсори для точного визначення положення і орієнтації в просторі. Автоматизовані системи керування на цих платформах мають розвинені алгоритми прийняття рішень, що дозволяють не лише виконувати польоти за заздалегідь заданими маршрутами, а й адаптуватися до змінних умов, реагувати на загрози та виконувати складні маневри. Зв'язок із командними центрами забезпечується за допомогою захищених каналів зв'язку, включно із супутниковими системами, що дозволяє підтримувати управління на великій відстані. Високий рівень надійності та безпеки систем досягається через дублювання критичних вузлів, застосування резервних живильних джерел і багатоканальних алгоритмів контролю стану систем[12][13].

Окремо варто відзначити сучасні рішення з впровадженням технологій штучного інтелекту, які знаходять застосування в таких системах, як Skydio 2. Ці платформи використовують складні алгоритми комп'ютерного зору і машинного навчання для розпізнавання перешкод, динамічного планування маршрутів і адаптивного ухилення від об'єктів у реальному часі. Завдяки інтеграції високопродуктивних обчислювальних модулів та сенсорів (наприклад, стереокамер, лідара), ці системи забезпечують максимально автономний режим польоту навіть у складних середовищах з великою кількістю перешкод, де традиційні системи можуть виявитися менш ефективними[14].

Інфраструктура зв'язку є ключовим елементом, що підтримує роботу усіх сучасних систем автоматизованого керування. Вона включає підтримку різноманітних протоколів передачі даних, таких як MAVLink, які забезпечують стабільну і надійну комунікацію між БПЛА і оператором. Для збільшення дальності і стійкості зв'язку застосовуються цифрові радіочастотні модулі на базі стандартів LTE, 5G, а також супутникові канали, що дозволяє розширювати географічні межі контролю і забезпечувати роботу у віддалених регіонах.

Таким чином, сучасні системи автоматизованого керування БПЛА являють собою складні комплексні рішення, які поєднують потужну апаратну базу, високотехнологічні сенсорні системи, просунуті алгоритми керування та надійні канали зв'язку. Кожна з описаних систем — Pixhawk, DJI Naza-M, військові платформи MQ-9 Reaper і RQ-4 Global Hawk, а також інноваційні ШІ-орієнтовані рішення Skydio 2 — відображає різні рівні розвитку і можливостей сучасних технологій, що дозволяють ефективно виконувати широкий спектр завдань у сфері безпілотних літальних апаратів.

2.2 Інтегровані апаратні модулі та периферійні пристрої в системах керування БПЛА

У сучасній індустрії безпілотних літальних апаратів (БПЛА) автоматизовані системи керування відіграють фундаментальну роль, оскільки саме вони забезпечують ефективність, надійність і точність виконання різноманітних місій. Проте безпілотний літальний апарат не може функціонувати лише завдяки базовому контролеру польоту. Для досягнення необхідного рівня автономності та безпеки застосовується цілий комплекс апаратних модулів, які формують єдину інтегровану систему. Кожен із цих модулів виконує свою специфічну функцію, і їх взаємодія забезпечує повноцінне керування літальним апаратом у різних умовах експлуатації. Важливо розглянути докладно основні апаратні компоненти, які на сьогодні є актуальними та широко використовуються в галузі БПЛА, починаючи від телеметричних модулів і закінчуючи платформами для обробки даних.

Перш за все, телеметричні модулі є невід'ємною частиною системи зв'язку між безпілотником і оператором або наземною станцією. Телеметрія забезпечує передачу важливої інформації про стан літального апарата в реальному часі: координати, швидкість, висоту, стан акумуляторів, параметри сенсорів та інші діагностичні дані. Серед найбільш поширених рішень на ринку варто відзначити Flytrex Live 3G, RFD900 і SiK Radio.

Flytrex Live 3G (рис. 2.3) відрізняється тим, що використовує мобільну мережу 3G для передачі даних, що дозволяє працювати на значно більших відстанях у порівнянні зі стандартними радіочастотними каналами. Це особливо актуально у випадках, коли необхідно забезпечити безперервний зв'язок у міських або складних ландшафтних умовах, де радіосигнали можуть бути заблоковані або ослаблені[15]. RFD900 — це надійний радіомодуль, що працює в діапазоні 900 МГц, і забезпечує стабільний зв'язок на великих відстанях, що робить його оптимальним вибором для промислових застосувань, де потрібне довге покриття без втрати якості сигналу[16]. SiK

Radio – це більш бюджетне рішення, яке часто використовують у аматорських або напівпрофесійних проєктах, що вимагають доступного, але водночас якісного зв'язку на середніх відстанях. Усі ці модулі відрізняються різними характеристиками, такими як дальність дії, пропускна здатність, енергоспоживання та тип використовуваного каналу зв'язку, що дозволяє вибирати оптимальне рішення під конкретні завдання[17].



Рисунок 2.3 – Телеметричний модуль Flytrex Live 3G[15]

Другим ключовим елементом є модулі GPS та ГНСС високої точності, які істотно підвищують точність позиціонування безпілотної літака у просторі. У сучасних умовах важко уявити ефективну систему керування БПЛА без використання супутникових навігаційних технологій. RTK GPS (Real-Time Kinematic GPS) — це передова технологія, яка дозволяє отримувати координати з точністю до сантиметрів шляхом обробки сигналів від супутників із додатковою корекцією за допомогою наземних станцій або мережі базових станцій. Окрім американської системи GPS, сучасні GNSS-модулі підтримують й інші глобальні навігаційні системи, такі як європейська

Galileo та китайська BeiDou, що забезпечує підвищену стійкість позиціонування за рахунок збільшення кількості доступних супутників і більшої географічної гнучкості. Впровадження RTK GPS і мультисистемних GNSS-модулів суттєво підвищує надійність і точність автоматизованого керування навіть у складних умовах, таких як міські каньйони або ліси, де сигнал може бути частково заблокований[18].

Наступна категорія — сенсорні платформи — являє собою сукупність різноманітних датчиків, які відповідають за оцінку руху, положення, орієнтації і навколишніх умов. До таких сенсорів належать інерціальні вимірювальні одиниці (IMU), які поєднують в собі гіроскопи, акселерометри і часто магнітометри. Ці датчики вимірюють кутові швидкості, прискорення та напрямок магнітного поля, що дозволяє контролеру польоту здійснювати точне відстеження положення БПЛА в просторі. Сучасні IMU базуються на MEMS-технологіях (мікроелектромеханічні системи), які забезпечують високий рівень точності, невеликі розміри, низьку вагу та низьке енергоспоживання. Барометри, як частина сенсорної платформи, призначені для вимірювання атмосферного тиску і визначення висоти польоту, що особливо важливо для стабілізації польоту на різних висотах і забезпечення плавного набору або зниження висоти. Магнітометри виконують функцію електронного компаса, визначаючи напрямок щодо магнітного поля Землі, що використовується для орієнтації апарату в просторі та корекції курсу польоту. Комплексна робота всіх цих сенсорів забезпечує точне позиціонування і орієнтацію БПЛА в тривимірному просторі, що є запорукою стабільності польоту та безпеки операцій[19].

Енергетичні системи керування, зокрема Battery Management Systems (BMS), а також контролери живлення відіграють життєво важливу роль у забезпеченні безперебійної роботи електроніки БПЛА. BMS здійснюють контроль за зарядом і розрядом акумуляторів, захищають батареї від перенапруги, надмірного розряду, перегріву та коротких замикань, а також здійснюють балансування елементів акумулятора для максимального

подовження терміну їх служби. Урахування цих аспектів особливо важливе для безпілотників, оскільки безперебійне живлення забезпечує стабільну роботу систем керування і запобігає аварійним ситуаціям, пов'язаним із відмовою живлення. Контролери живлення регулюють напругу та струм, які подаються на різні компоненти, підтримуючи їх в оптимальних робочих умовах, що зменшує ризики поломок і підвищує надійність системи в цілому[1].

Системи збереження даних, або логери польоту, є незамінними для збору інформації про всі аспекти роботи БПЛА під час польоту. Вони записують параметри, такі як GPS-координати, швидкість, висоту, орієнтацію, стан акумуляторів, роботу сенсорів та іншу діагностичну інформацію. Наявність таких даних дозволяє інженерам та операторам аналізувати ефективність польоту, виявляти потенційні проблеми, вдосконалювати алгоритми керування і проводити ретельний аудит у разі виникнення аварійних ситуацій. Логери можуть бути як вбудованими в основний контролер польоту, так і зовнішніми пристроями, що підключаються через інтерфейси зв'язку, забезпечуючи гнучкість у налаштуванні системи збору даних[1].

Модулі зв'язку, такі як Wi-Fi, LTE, 4G і 5G, відкривають нові можливості для безпілотних літальних апаратів, забезпечуючи високошвидкісний обмін даними і керування на великих відстанях. Wi-Fi модулі традиційно використовуються для локального зв'язку на невеликих відстанях, наприклад, у межах об'єкту або навчального полігону. Сучасні технології мобільного зв'язку LTE, 4G та 5G дають змогу забезпечити передачу великих обсягів даних, таких як відео у реальному часі, телеметричні дані, та команд керування у складних умовах міської забудови або віддалених місцях. Особливо 5G-сети забезпечують мінімальну затримку та високу пропускну здатність, що відкриває можливості для застосування БПЛА в режимі реального часу з надзвичайною точністю управління та швидкою реакцією на зміни середовища. Це має велике значення для таких сфер, як

охорона громадського порядку, моніторинг інфраструктури, доставка вантажів і багато інших[1].

Важливим компонентом сучасних систем автоматизованого керування є апаратні платформи для розпізнавання та обробки даних, наприклад, NVIDIA Jetson або Raspberry Pi. Ці мініатюрні комп'ютери на борту безпілотників дозволяють виконувати складні обчислювальні завдання, пов'язані з аналізом відеопотоків, розпізнаванням об'єктів, побудовою 3D-моделей, прокладанням маршрутів і ухилянням від перешкод. Використання таких платформ дає змогу значно підвищити автономність безпілотників, оскільки обробка даних здійснюється безпосередньо на борту, без потреби у постійному зв'язку з наземною станцією. Це особливо важливо в умовах, коли сигнал може бути обмеженим або відсутнім. Застосування потужних апаратних платформ також сприяє інтеграції сучасних алгоритмів штучного інтелекту і машинного навчання, що відкриває перспективи для розвитку інтелектуальних автономних систем[20][21].

Загалом, сучасний ринок пропонує широкий спектр високотехнологічних апаратних рішень, які охоплюють всі ключові аспекти функціонування безпілотних літальних апаратів. Комплексна інтеграція телеметричних модулів, високоточних навігаційних систем, сенсорних платформ, енергетичних систем управління, засобів збереження даних, сучасних модулів зв'язку та потужних обчислювальних платформ дозволяє створювати надійні, багатофункціональні і гнучкі системи автоматизованого керування. Ці системи здатні виконувати широкий спектр завдань у різних сферах, включно з агропромисловістю, охороною довкілля, моніторингом, інфраструктурою, військовими та дослідницькими проектами. Завдяки безперервному розвитку технологій і впровадженню інновацій, можливості безпілотних систем постійно розширюються, відкриваючи нові горизонти для їх застосування у сучасному світі.

2.3 Огляд програмних рішень та алгоритмів керування

Огляд програмних рішень та алгоритмів керування безпілотними літальними апаратами є невід’ємною частиною розробки ефективних систем автоматизованого керування. Сучасні програмні платформи забезпечують комплексне керування польотом, обробку даних сенсорів, навігацію, стабілізацію та виконання складних автономних місій із високою точністю та надійністю. Основу таких рішень складають програмні стекові архітектури, побудовані на модульних принципах, що дозволяють інтегрувати різні алгоритми контролю та обробки в єдину систему.

Одним із найпопулярніших програмних рішень є ArduPilot — відкритий проект з багатофункціональним автопілотом, який підтримує широкий спектр БПЛА, включно з мультикоптерами, літаками, гвинтокрилами та наземними роботами. ArduPilot побудований на C++ з використанням реального часу операційної системи (RTOS) або ядра без ОС, що забезпечує високу швидкодію та мінімальні затримки в обробці команд. Він включає реалізацію таких алгоритмів, як PID-регулювання для стабілізації руху по трьох осях, алгоритми розпізнавання місії, планування маршруту з урахуванням перешкод, а також інтеграцію RTK GPS для покращення точності позиціонування.

Іншим відомим програмним рішенням є PX4 Autopilot — модульна платформа з відкритим кодом, розроблена для підтримки багатоплатформних БПЛА. PX4 використовує архітектуру із розподіленими процесами, де окремі модулі відповідають за обробку сенсорних даних, оцінку стану апарата (state estimation), планування траєкторії, керування польотом (flight control) і комунікації. У PX4 широко застосовуються фільтри Калмана (Extended Kalman Filter — EKF) для синтезу даних з IMU, GPS, барометрів та магнітометрів з метою отримання точної оцінки позиції, швидкості та орієнтації. Контролери польоту підтримують різні типи регуляторів — класичні PID, а також адаптивні і оптимальні методи управління (наприклад, LQR — лінійний квадратичний регулятор).

Значне місце в програмних рішеннях займають алгоритми автономної навігації, які включають методи планування маршруту та уникнення перешкод. Використовуються алгоритми A*, Rapidly-exploring Random Tree (RRT), D* Lite, а також більш складні методи на основі машинного навчання та глибокого навчання для адаптивного прийняття рішень у реальному часі. Алгоритми розпізнавання та класифікації об'єктів реалізуються з використанням нейронних мереж, що інтегруються в програмні стеки через бібліотеки TensorFlow Lite або PyTorch Mobile.

Для реалізації багаторівневого управління польотом застосовуються концепції поведінкових моделей (behavior trees), які дозволяють формалізувати послідовність дій дрона, від простих команд — взлету, утримання висоти — до складних місій, таких як патрулювання території, пошук об'єктів або доставка вантажів. Використання цих моделей підвищує гнучкість та адаптивність системи.

У багатьох програмних платформах застосовуються засоби моделювання і симуляції польотів, такі як Gazebo або SITL (Software In The Loop), які дозволяють тестувати алгоритми віртуально, що значно підвищує безпеку і зменшує час розробки. Також використовуються засоби віддаленого оновлення ПЗ (Over-the-Air updates), що забезпечує можливість швидкого впровадження покращень без необхідності фізичного доступу до апарата.

Важливою складовою програмних рішень є системи управління енергоспоживанням, які моніторять рівень заряду батарей, прогнозують час польоту та керують споживанням енергії периферійними модулями, що є критичним для забезпечення тривалості та безпеки польоту.

Для забезпечення безпеки польотів в програмних системах передбачені засоби автоматичного повернення додому (Return-To-Home), аварійної посадки, геозонування (Geo-fencing) з обмеженням польотів у заборонені зони, а також захист від втрати зв'язку. Інтеграція із системами моніторингу погоди дозволяє враховувати зовнішні умови і коригувати поведінку БПЛА[22].

Отже, сучасні програмні рішення та алгоритми керування БПЛА є складними багатофункціональними системами, які забезпечують надійне, точне і безпечне виконання польотних місій завдяки використанню передових методів обробки даних, моделювання поведінки та адаптивного управління в режимі реального часу. Їх подальший розвиток тісно пов'язаний із прогресом у галузі штучного інтелекту, обчислювальної техніки та сенсорних технологій.

2.4 Висновки до розділу 2

Розділ 2 присвячений комплексному аналізу існуючих технічних рішень і засобів реалізації систем автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами. Було детально розглянуто сучасні системи автоматизованого керування, що широко застосовуються в різних типах БПЛА, таких як Pixhawk, DJI Naza та інші. Особлива увага приділялась їх архітектурі, функціональним можливостям та технічним характеристикам, які забезпечують ефективне виконання польотних місій різної складності. Крім того, було проаналізовано апаратні модулі та периферійні пристрої, які є невід'ємною частиною систем керування, зокрема телеметричні модулі, високоточні GPS/ГНСС приймачі, сенсорні платформи (IMU, барометри, магнітометри), енергетичні системи управління, системи збереження даних, комунікаційні модулі (Wi-Fi, LTE, 4G/5G) та апаратні платформи для обробки даних (наприклад, NVIDIA Jetson, Raspberry Pi). Ці компоненти забезпечують надійність, точність та гнучкість роботи системи керування. Важливою складовою розділу був огляд програмних рішень та алгоритмів керування, які формують інтелектуальну основу БПЛА. Було розглянуто програмні платформи, такі як ArduPilot та PX4, а також алгоритми стабілізації польоту, планування траєкторій, автономної навігації і обробки сенсорної інформації. Особливий акцент зроблено на використанні методів штучного інтелекту для підвищення адаптивності та безпеки польотів. Проведений аналіз показує, що сучасні системи автоматизованого керування БПЛА є високотехнологічними

комплексами, які інтегрують апаратні та програмні компоненти з передовими алгоритмами керування. Вони характеризуються високою модульністю та масштабованістю, що дозволяє адаптувати їх до різних завдань і умов експлуатації. Перспективи розвитку галузі пов'язані з удосконаленням обчислювальних ресурсів, розвитком сенсорних технологій та інтеграцією методів штучного інтелекту, що відкриває нові можливості для підвищення автономності, надійності та ефективності безпілотних літальних апаратів у різноманітних сферах застосування.

3 РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ

3.1 Розроблення схеми апаратного забезпечення системи керування безпілотним літальним апаратом

Розроблення схеми апаратного забезпечення системи керування безпілотним літальним апаратом є одним із ключових етапів створення надійної та ефективної автоматизованої системи. Вибір апаратних компонентів впливає на точність, стабільність роботи, енергоспоживання та загальну функціональність безпілотного літального апарата (БПЛА). Тому обґрунтований підхід до формування апаратної бази є необхідною передумовою для подальшого успішного розроблення системи.

У запропонованій схемі системи керування безпілотним літальним апаратом центральним елементом виступає мікроконтролер Attiny2313. Це компактний і енергоефективний 8-бітний мікроконтролер архітектури AVR, який добре зарекомендував себе у вбудованих системах з обмеженими ресурсами. Завданням Attiny2313 є обробка ШІМ-сигналів, що надходять з приймача, а також збір та первинна обробка даних з трьохосового акселерометра ADXL345 (рис. 3.1). Також мікроконтролер відповідає за запис отриманої інформації в зовнішню енергонезалежну пам'ять, що забезпечує збереження важливих даних навіть у разі втрати живлення. Використання Attiny2313 дозволяє оптимізувати апаратні витрати та зменшити енергоспоживання системи, що особливо важливо для безпілотних апаратів із обмеженим живленням [24].

Для збереження даних обрана мікросхема пам'яті AT45DB161, яка представляє собою флеш-пам'ять типу SPI з достатнім об'ємом і швидкістю запису/зчитування для задач систем керування БПЛА. Завдяки інтерфейсу SPI, який підтримує швидку і надійну передачу даних, ця пам'ять дозволяє ефективно зберігати інформацію про параметри польоту, сигнали приймача та

дані з сенсорів. Важливо відзначити, що флеш-пам'ять такого типу забезпечує довговічність і стійкість до механічних та електромагнітних впливів, що характерні для польотних умов.

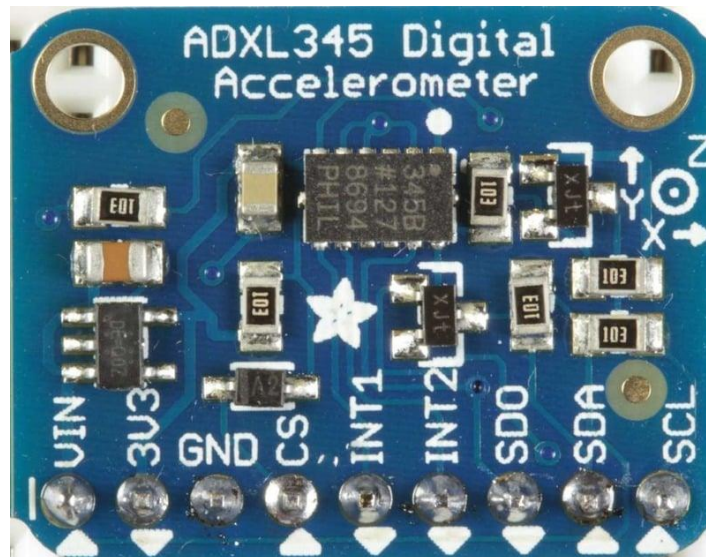


Рисунок 3.1 – Плата MEMC-акселерометра ADXL345

Для збереження даних обрана мікросхема пам'яті AT45DB161, яка представляє собою флеш-пам'ять типу SPI з достатнім об'ємом і швидкістю запису/зчитування для задач систем керування БПЛА. Завдяки інтерфейсу SPI, який підтримує швидку і надійну передачу даних, ця пам'ять дозволяє ефективно зберігати інформацію про параметри польоту, сигнали приймача та дані з сенсорів. Важливо відзначити, що флеш-пам'ять такого типу забезпечує довговічність і стійкість до механічних та електромагнітних впливів, що характерні для польотних умов.

Використання цифрового трьохосового акселерометра ADXL345 є логічним вибором для вимірювання лінійних прискорень в трьох взаємно перпендикулярних осях. Цей сенсор відомий своєю високою точністю, низьким рівнем шуму та широким діапазоном вимірювань. Однак ADXL345 є досить чутливим до стабільності напруги живлення, тому для забезпечення його надійної роботи у схемі використовується стабілізатор напруги LM1117. Цей лінійний стабілізатор здатний підтримувати стабільну вихідну напругу

навіть при коливаннях вхідної напруги, що запобігає виникненню похибок у вимірюваннях та збільшує загальну надійність системи.

Для зручності керування початком та зупинкою процесу запису даних передбачена апаратна кнопка S1. Вона дозволяє оператору або автоматизованій логіці вмикати і вимикати запис у пам'ять без необхідності складних програмних дій, що підвищує зручність експлуатації і знижує ризик помилок.

Візуальний контроль стану системи керування безпілотним літальним апаратом здійснюється за допомогою світлодіодів VD1 та VD2. Ці індикатори дають змогу швидко оцінити режим роботи пристрою — чи відбувається запис, чи система знаходиться у режимі очікування, або виникли несправності. Такий простий, але ефективний метод індикації є стандартною практикою в розробці вбудованих систем і суттєво полегшує діагностику.

Зв'язок між мікроконтролером, акселерометром та пам'яттю реалізовано через програмний протокол SPI (Serial Peripheral Interface). SPI є одним із найбільш поширених протоколів для високошвидкісної передачі даних між мікроконтролерами і периферійними пристроями. Його простота реалізації, висока швидкість передачі та можливість одночасної двонаправленої комунікації роблять його оптимальним вибором для задач БПЛА, де важливі швидкий обмін інформацією та мінімальні затримки.

Для моніторингу ШІМ сигналів, які надходять з приймача, у мікроконтролері запускається 16-бітний таймер, що виконує вимірювання тривалості імпульсів високого рівня на кожному каналі. Використання 16-бітного таймера дозволяє отримувати достатню роздільну здатність та точність вимірювань, що критично для коректного розпізнавання команд керування. Фіксація фронту та спаду імпульсів здійснюється за допомогою апаратних переривань, що мінімізує навантаження на основний цикл обробки даних і забезпечує своєчасне реагування системи на зміни в сигналах керування.

Загалом, запропонована апаратна схема відповідає сучасним вимогам до систем керування БПЛА, забезпечуючи надійну роботу в умовах динамічного польоту, обмеженого енергоспоживання і необхідності швидкої обробки великої кількості даних. Поєднання енергоефективного мікроконтролера Attiny2313 з високоточним акселерометром ADXL345 і надійною зовнішньою пам'яттю AT45DB161 створює потужну платформу для реалізації різноманітних алгоритмів керування та збору телеметричних даних. Використання стабілізатора LM1117 і апаратних елементів управління робить систему зручною у використанні та стійкою до зовнішніх факторів, що істотно підвищує загальну ефективність і безпеку польотів. Таким чином, ця апаратна база є надійним фундаментом для подальшої розробки і впровадження автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом.

3.2 Особливості функціонування та управління

Система керування безпілотним літальним апаратом функціонує в двох основних режимах, що забезпечують різні варіанти запису даних для подальшого аналізу польоту. Перший режим передбачає запис лише перевантажень, тобто інформації про прискорення, що виникають під час польоту, а другий режим дозволяє одночасно записувати як перевантаження, так і дані з приймача радіоуправління. Такий поділ режимів роботи дає можливість більш гнучко налаштовувати систему залежно від конкретних вимог до обсягу інформації та ресурсів пам'яті. Адже іноді дані з каналів радіоуправління можуть бути зайвими, і для економії обмеженого обсягу пам'яті, який становить 2 мегабайти, була передбачена можливість вимикання їх запису. Вказаний обсяг пам'яті дозволяє зберігати досить великий масив інформації: зокрема, у випадку запису тільки прискорень (три числові значення, кожне по 2 байти, із частотою 50 вимірювань на секунду) пам'ять вистачає приблизно на 116 хвилин безперервного збору даних. Якщо ж активовано режим запису як прискорень, так і даних із шести каналів

радіоприймача, час безперервного збереження інформації зменшується приблизно до 38 хвилин через більший обсяг одночасно записуваних даних.

Для організації зв'язку між системою керування безпілотним літальним апаратом та персональним комп'ютером, що необхідний для налаштування пристрою, а також для вивантаження збереженої інформації, використовується стандартний UART-інтерфейс мікроконтролера. Передача даних відбувається за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми, яка забезпечує зручне та стабільне з'єднання між двома пристроями. Керування процесом обміну даними реалізується через набір команд, представлених у вигляді окремих символів, кожен із яких виконує певну функцію. Наприклад, команда «Z» використовується для стирання пам'яті — при її активації адресний лічильник, який відповідає за поточне місце запису даних, обнуляється. Важливо зауважити, що фізичне видалення даних при цьому не відбувається, а лише встановлюється вказівка на початок нового циклу запису.

Іншою ключовою командою є «M», яка дозволяє змінювати режим запису між двома описаними вище варіантами. Під час її виконання також відбувається обнулення адресного лічильника, що служить для уникнення плутанини між різними режимами збору даних, оскільки в системі відсутня механізм синхронізації при перемиканні. Після активації команди «M» пілотажно-навігаційний комплекс повертає у відповідь символ «1», якщо активовано режим запису як прискорень, так і даних з приймача, або символ «0», якщо записуються лише прискорення. За замовчуванням встановлений режим «1», який зберігається в енергонезалежній пам'яті, що гарантує збереження налаштувань навіть після вимкнення живлення. Аналогічно зберігається і значення адресного лічильника.

Команда «R» відповідає за процес зчитування накопичених даних. Після її активації пілотажно-навігаційний комплекс передає збережену інформацію через СОМ-порт, де числові значення розділяються спеціальним символом «;» для полегшення подальшої обробки. Синхронізація отриманих даних виконується на стороні комп'ютерної програми, що забезпечує коректний

аналіз та інтерпретацію записів. Серед недоліків цієї системи слід відзначити тривалий час зчитування повного обсягу інформації, який становить приблизно 40 хвилин, що може бути незручним при частих операціях вивантаження.

При початку експлуатації необхідно вимкнути приймач та живлення, після чого засвічується зелений світлодіод, що інформує про готовність пристрою до роботи. Для початку запису даних слід натиснути відповідну кнопку, після чого починає блимати червоний світлодіод. Наступне натискання цієї кнопки зупиняє запис. Якщо червоний світлодіод світиться постійно, це означає, що пам'ять переповнена, і подальше використання комплексу неможливе до очищення накопиченої інформації.

Щоб зчитати дані, необхідно знову подати живлення, не відключаючи при цьому приймач, підключити UART-USB кабель до пристрою та запустити комп'ютерну програму. Параметри з'єднання налаштовуються лише один раз, і надалі зберігаються в пам'яті програми. Далі користувач повинен обрати опції «Підключитися до FDR» та «Прочитати пам'ять», після чого відбувається передача даних на комп'ютер. Під час цього процесу зелений світлодіод комплексу блиматиме, сигналізуючи про активний обмін інформацією. Після завершення завантаження даних вони зберігаються у файл, який можна легко відкрити та проаналізувати за допомогою популярного програмного пакету Microsoft Excel. Після успішного збереження даних користувач отримує можливість безпечно стерти пам'ять, звільняючи її для подальшого використання. Таким чином, система забезпечує достатній рівень контролю та гнучкості у роботі з даними, незважаючи на деякі обмеження, пов'язані з обсягом пам'яті та часом обробки.

3.3 Аналіз плати друкованої

Плату виготовлено комбінованим методом, що поєднує декілька технологічних процесів для досягнення високої якості та надійності виробу.

Крок координатної сітки становить 0,625 мм, що забезпечує точне розташування елементів і дозволяє уникнути помилок при монтажі. Контактні площадки мають довільну форму, що дає змогу адаптувати плату до різноманітних типів радіоелементів, при цьому мінімальний розмір площадок не менший за 0,5 мм, що відповідає сучасним вимогам до компактності та точності монтажу. Відстань між двома будь-якими отворами контролюється з точністю $\pm 0,08$ мм, що гарантує надійність механічного кріплення та сумісність із компонентами корпусу або іншими вузлами пристрою. З метою захисту від впливу навколишнього середовища, з однієї сторони плати нанесено захисну маску, яка оберігає мідні шари від окислення, забруднень і механічних пошкоджень. Для зручності ідентифікації радіоелементів та спрощення монтажу, маркування виконано фарбою ТНПФ-51 чорного кольору відповідно до робочого креслення. Дата виготовлення та заводський номер плати нанесені фарбою білого кольору БМ, шрифтом ЗПР-П, що забезпечує високу контрастність та довговічність нанесення, полегшуючи облік та контроль продукції на виробництві і в процесі експлуатації. Такий комплексний підхід до виготовлення та маркування друкованої плати сприяє підвищенню якості кінцевого виробу і його надійності в експлуатації.

Під час розробки конструкції площу плати було розраховано з урахуванням розмірів елементної бази та щільності компоновки за формулою:

$$S = q * S_{pe} \quad (3.1)$$

де q – коефіцієнт дезінтеграції, $q = (2 - 4)$; S_{pe} – площа радіоелементів.

$$S_{дп} = (2 - 4) * 444,04 = 888,08 - 1776,16$$

Отже, площа друкованої плати не повинна перевищувати 1776,16 мм². Враховуючи, що фактичні розміри плати складають 40×30 мм, її площа становить:

$$S_{дп} = 1200 \text{ мм}^2.$$

При конструюванні друкованої плати враховано такі конструкторсько-технологічні вимоги:

- плата має прямокутну форму;
- товщина плати становить $1,5 \pm 0,15$ мм, що вибрано з урахуванням технології виготовлення, а також механічних і електричних характеристик конструкції;
- центри отворів розташовані у вузлах координатної сітки;
- відстань між центрами отворів витримується з допуском не більше $\pm 0,2$ мм, а для отворів, пов'язаних з багатовивідними навісними радіoeлементами та автоматизованим монтажем, — не більше $\pm 0,1$ мм;
- отвори на платі розміщені таким чином, щоб відстань між краями отворів (без урахування фаски) була не меншою за товщину плати.

Для виготовлення друкованої плати обрано склотекстоліт товщиною 1,5 мм, який є одним із найпоширеніших і найбільш надійних матеріалів у сучасній електроніці. Склотекстоліт відомий своїм широким діапазоном робочих температур, що дозволяє експлуатувати виріб у різних кліматичних умовах без ризику деформацій чи втрати характеристик. Крім того, цей матеріал характеризується низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення, що забезпечує стабільність розмірів плати навіть при значних коливаннях температури. Важливо зазначити, що граничне відхилення товщини такого матеріалу може становити до 0,2 мм, що враховується при проектуванні для забезпечення необхідної точності. В якості конкретного варіанту обрано фольгований двосторонній склотекстоліт марки СФ-2-35-1,5. Товщина фольги на такому матеріалі становить 35 мікрометрів, а загальна товщина плати разом із фольгою — 1,5 мм. Цей матеріал є оптимальним вибором для виготовлення як двосторонніх, так і односторонніх друкованих плат, що робить його універсальним та зручним для широкого спектра застосувань. Враховуючи всі ці характеристики, використання саме такого склотекстоліту забезпечує надійність, довговічність та високу якість готового виробу.

Для розробки даного виробу, з урахуванням важливих технічних параметрів та особливостей конструкції, було прийнято рішення обрати оптимальний рівень точності виготовлення друкованої плати. Важливо відзначити, що крок координатної сітки, який складає 0,625 мм, став основою для вибору саме такого класу точності, який найбільш відповідає функціональним вимогам пристрою. Хоча теоретично схема могла б бути виконана й із більш високим рівнем точності, наприклад четвертим класом, однак ширина друкованих провідників у цьому випадку виявилась би занадто малою для стабільної роботи всієї системи. Це може призвести до зниження надійності та виникнення технічних проблем під час експлуатації. Тому вибір третього класу точності виглядає найдоцільнішим і найоптимальнішим з точки зору забезпечення балансу між якістю, надійністю та технологічністю виготовлення. До характеристик цього класу точності належать такі параметри, які безпосередньо впливають на роботу плати та її довговічність: ширина провідника у більш широких місцях складає приблизно 0,45 мм, що забезпечує надійний струмопровідний шлях і достатню механічну міцність. У вузьких ділянках ширина провідника зменшена до 0,25 мм, що дозволяє оптимізувати розміщення елементів і зменшити загальний розмір плати, не втрачаючи при цьому необхідної функціональності. Відстань між двома провідниками встановлена на рівні 0,25 мм, що є компромісом між щільністю розміщення та уникненням коротких замикань і перешкод. Особливу увагу приділено гарантійним поясам, які виконують роль додаткового захисту і забезпечують цілісність зовнішнього шару плати з розміром 0,1 мм, а також внутрішнього шару, де цей поясок має товщину 0,05 мм. Ці елементи конструкції суттєво підвищують стійкість плати до механічних та електричних впливів під час роботи. В цілому, такий рівень точності відповідає сучасним стандартам якості і технологічним вимогам, що робить його ідеальним для застосування в системі керування безпілотним літальним апаратом, забезпечуючи надійність, стабільність роботи і довговічність виробу.

Конструктивні та експлуатаційні характеристики складових системи керування безпілотним літальним апаратом узагальнено і представлені у вигляді таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Конструктивні та експлуатаційні характеристики складових системи керування безпілотним літальним апаратом

Назва елемента Тип корпусу мікросхем	Кіл., шт.	Конструктивні параметри				Допустимі умови експлуатації		
		Маса, Г	Площа встанов., мм ²	Висота, мм	Діаметр виводу, мм	Макс. темп., °С	Частота вібрації, Гц	Струм споживання, mA
Конденсатори								
0805	2	0,8	0,5	0,5	0,2	+125	15...300	10
Мікросхеми								
ATtiny2313	1	2,4	154	1,70	0,8	+80	60...330	50
AD8040ARZ	1	1,45	124,5	1,6	0,25	+90	60...330	10
AT45DB161-TSO P	1	1,45	124,5	1,6	0,25	+70	60...330	40
Резистори								
0402	8	0,06	1,28	0,35	0,25	+125	10...2000	10
Роз'єми								
PLS-3	1	1,8	19,4	8,54	0,64	+140	60...200	-
PLS-5	1	6,8	27,4	8,54	0,64	+140	60...200	-
PLS-6	1	14,4	43,8	8,54	0,64	+140	60...200	-
5ESDV-02P	1	(12,4)	(750)	(15)	-	+140	60...200	-
Світлодіоди								
<u>LTW-K140SZR30</u>	2	0,9	4,8	1,1	0,25	+70	10...2000	20
Тактова кнопка								
TACTSW-008	1	0,8	36	4,7	0,7	+125	10...2000	-

3.4 Компонування пристрою

Принципи компоновання визначають базові конструктивні елементи, які закладаються в основу радіоелектронного апарату (РЕА). Вибір конкретного принципу компоновання залежить від вимог до конструкції РЕА та існуючих обмежень. Компонування – це процес вибору форми, основних геометричних розмірів, орієнтовної маси та просторового розміщення елементів і вузлів, спрямований на досягнення максимально ефективного функціонування пристрою відповідно до його схеми та призначення. Результатом цього процесу є компоновальний ескіз, який дозволяє оцінити можливі габарити, форму та масу блоку. Існують різні методи компоновання: аналітичний, модельний, графічний та натурний. Аналітичний метод базується на роботі з числовими характеристиками, такими як розміри, маса, площа чи об'єм елементів. Модельне компоновання, завдяки своїй простоті та наочності, є найбільш поширеним; воно використовує плоскі або об'ємні моделі, що виконані у вигляді спрощених креслень. Графічний метод полягає у спрощеному викреслюванні елементів і варіантів компоновання з використанням трафаретів, штампів тощо. Натурне компоновання передбачає використання реальних елементів (наприклад, резисторів, конденсаторів) замість моделей.

Компоновання блоків радіоелектронних систем (РЕС) розглядається з трьох основних аспектів. Перший – це забезпечення зручності складання, контролю, ремонту, а також механічних та електричних з'єднань, де особливу увагу приділяють ергономічним вимогам. Другий аспект – функціональне компоновання, яке полягає у розміщенні елементів на друкованих платах з урахуванням їх функціональних, енергетичних вимог, а також щільності розміщення компонентів і топології друкованих провідників. В процесі розробки конструкції приладу необхідно здійснити компоновання на двох рівнях: по-перше, компоновання друкованої плати з обов'язковим групуванням елементів за функціональними блоками, враховуючи теплову

сумісність та мінімізацію довжини з'єднувальних провідників; по-друге, зовнішнє компонування всього приладу з урахуванням всіх технічних і технологічних вимог. Серед основних вимог – технологічність виробництва та ремонтпридатність, що означає необхідність оптимізації внутрішнього й зовнішнього компонування відповідно до технічного завдання[23].

Конструктивна основа будь-якого виробу радіоелектронної апаратури (РЕА) — це носій, який забезпечує цілісність пристрою, а також виконує функції розміщення, надійного механічного кріплення і захисту від механічних навантажень і шкідливих впливів навколишнього середовища. Відповідно до прийнятої класифікації типових структур сучасних РЕА, розглянутий пристрій належить до другого рівня. Це означає, що його компоненти нульового структурного рівня, які відповідають за виконання завершених функцій прийому, передачі або перетворення сигналів, реалізовані на базовій носійній конструкції другого рівня та мають властивості конструктивної взаємозамінності. До корпусу блоку висуваються численні вимоги: він повинен забезпечувати жорстке кріплення друкованих плат і надійне з'єднання їхніх виводів з переходами для зв'язку із зовнішніми електричними колами. Корпус також виконує захисну функцію, оберігаючи плати та електрорадіoelementи від впливу несприятливих кліматичних умов і механічних пошкоджень. Окрім цього, корпус має бути технологічно вигідним у виробництві, сприяти зручності монтажу, контролю, налаштування та ремонту пристрою, а також відповідати ергономічним вимогам і мати естетично привабливий вигляд.

Розглянемо три різні варіанти компонування цього пристрою. З урахуванням умов експлуатації, а також вимог до масогабаритних характеристик і вартості, у першому та другому варіантах корпус виготовлено з пластику — полістиролу сірого кольору. Для третього варіанту обрано корпус з алюмінію.

Варіант №1 передбачає горизонтальне розміщення друкованої плати всередині пластикового корпусу (рис. 3.2). На передній панелі розміщена

кнопка SB1, яка відповідає за запуск і зупинку запису даних. Для зменшення габаритів пристрою та забезпечення функціональності керування використано SMD-компоненти, а також круглу кнопку з ковпачком. Крім того, на передній панелі встановлене прозоре віконце, через яке можна спостерігати за режимом роботи пристрою.

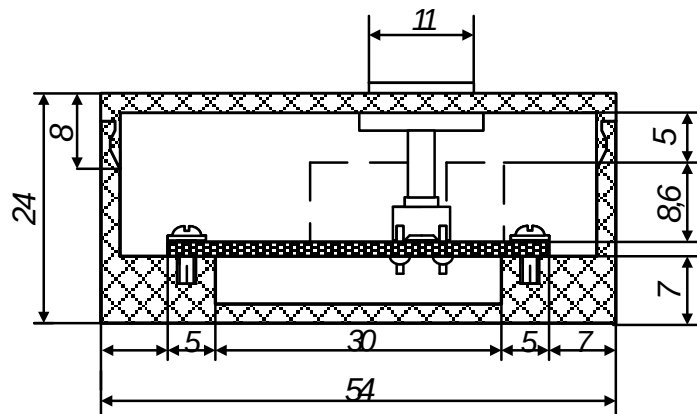


Рисунок 3.2 – Перший варіант компоновання пристрою

Друкована плата фіксується гвинтами до виступаючих пластикових елементів, які є литими та виготовляються одночасно з корпусом, що дозволяє скоротити кількість операцій під час складання корпусу. На задній панелі розташований прохідний клемник, через який здійснюється контроль та зчитування даних, а також подається живлення. Для зменшення витрат матеріалів та спрощення виробничого процесу верхня кришка пристрою кріпиться за допомогою вбудованих засувок — литих елементів конструкції, які надійно фіксують кришку при прикладанні невеликої сили. Загальна конструкція пристрою відзначається простотою, монолітністю та компактністю.

Варіант №2 передбачає горизонтальне розташування друкованої плати в пластиковому корпусі з окремим відсіком для акумулятора. Плата фіксується за допомогою гвинтів до виступаючих пластикових елементів, які є литими і виготовляються одночасно з корпусом, що значно зменшує кількість операцій під час складання пристрою. Конструкція корпусу поділена на дві основні

частини: одна призначена для розміщення плати, інша – для акумулятора (рис. 3.3).

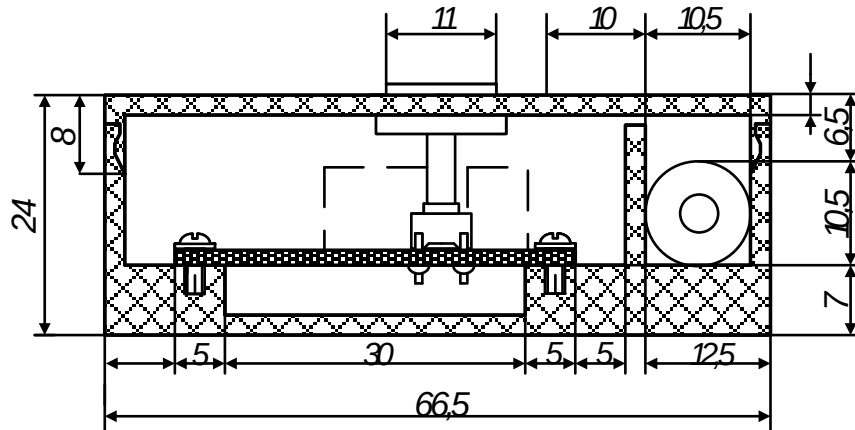


Рисунок 3.3 – Другий варіант компоновки пристрою

Головною перевагою цього варіанту в порівнянні з попереднім є наявність спеціального акумуляторного відсіку, що підвищує зручність експлуатації. Для зменшення використання матеріалів і спрощення технологічного процесу верхня кришка корпусу кріпиться за допомогою литих засувок, які надійно фіксують кришку при прикладанні помірної сили. Конструкція вирізняється своєю простотою, монолітністю та компактністю.

Водночас, серед недоліків варіанту варто зазначити збільшення кількості технологічних операцій при виробництві корпусу, що веде до зростання кошторисних витрат і тривалості виготовлення. Крім того, через додатковий акумуляторний відсік збільшується маса пристрою, що, в свою чергу, впливає на підвищення його вартості.

Варіант №3 передбачає горизонтальне розміщення друкованої плати всередині алюмінієвого корпусу. Плата фіксується за допомогою гвинтів до виступаючих литих алюмінієвих елементів, які виготовляються одночасно з корпусом. Такий підхід дозволяє значно зменшити кількість операцій під час монтажу корпусу.

На задній панелі корпусу розташований прохідний клемник, що забезпечує контроль і зчитування даних, а також подачу живлення.

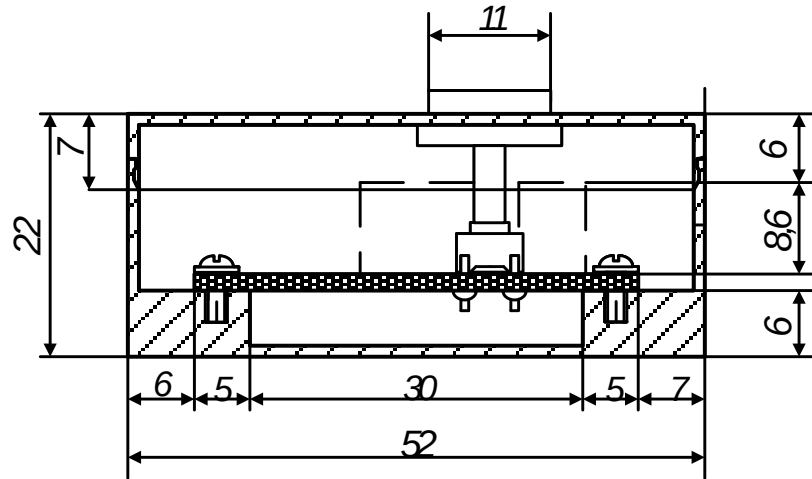


Рисунок 3.4 – Третій варіант компоновання пристрою

Головною перевагою цього варіанту є значне підвищення механічної міцності пристрою в порівнянні з попередніми варіантами.

До недоліків варто віднести збільшення кількості технологічних операцій при виготовленні корпусу, що веде до зростання виробничих витрат і часу виготовлення. Крім того, завдяки використанню алюмінію маса пристрою збільшується, що також позначається на підвищенні його загальної вартості.

Розглянемо три варіанти компоновання приладу, виконаємо розрахунок його маси, габаритних розмірів та рівня надійності, після чого порівняємо отримані показники для визначення оптимального варіанту, що повністю відповідає вимогам технічного завдання.

Розміри друкованої плати становлять 40×30 мм, тоді площа плати:

$$S_{\text{дп}} = 1200 \text{ мм}^2.$$

Висота корпусу визначається максимальною висотою радіоелементів та конструктивними особливостями пристрою. У цьому випадку найвищим елементом на платі є роз'єм, висота якого становить 8,54 мм. Для спрощення подальших розрахунків приймаємо висоту роз'єму рівною 8,6 мм.

Габаритні розміри приладу, сформованого за першим варіантом компоновання, визначаються таким чином. Ширина корпусу базується на ширині друкованої плати. Внутрішній об'єм розраховується з урахуванням

простору, який займає плата з радіокомпонентами, а також передбачає додатковий запас для забезпечення безпеки та зручності монтажу. Для першого варіанту слід врахувати, що на задній панелі розташований прохідний клемник довжиною 30 мм, що впливає на кінцеві внутрішні розміри корпусу, які становлять:

а) висота $h_{\text{вн.}} = 5 + 1,5 + 8,5 + 5 = 20 \text{ мм}$;

б) довжина $a_{\text{вн.}} = 5 + 40 + 5 = 50 \text{ мм}$;

в) ширина $b_{\text{вн.}} = 5 + 30 + 30 = 65 \text{ мм}$.

зовнішні габарити (із врахуванням товщини корпусу):

а) висота $h_{\text{зовн.}} = h_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 20 + 2 + 2 = 24 \text{ мм}$;

б) довжина $a_{\text{зовн.}} = a_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 50 + 2 + 2 = 54 \text{ мм}$;

в) ширина $b_{\text{зовн.}} = b_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 65 + 2 + 2 = 69 \text{ мм}$.

Об'єм корпусу:

$$V_{\text{корп.}} = V_{\text{зовн.}} = 2,4 \cdot 5,4 \cdot 6,9 = 89,42 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Об'єм пристрою:

$$V_{\text{пристр.}}^I = V_{\text{корп.}} = 89,42 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Для другого варіанту компоновання пристрою, з урахуванням довжини акумулятора, що дорівнює 45 мм, отримуємо такі внутрішні розміри:

а) висота $h_{\text{вн.}} = 5 + 1,5 + 8,5 + 5 = 20 \text{ мм}$;

б) довжина $a_{\text{вн.}} = 5 + 40 + 17,5 = 62,5 \text{ мм}$;

в) ширина $b_{\text{вн.}} = 5 + 45 + 5 = 55 \text{ мм}$.

зовнішні габарити (із врахуванням товщини корпусу):

а) висота $h_{\text{зовн.}} = h_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 20 + 2 + 2 = 24 \text{ мм}$;

б) довжина $a_{\text{зовн.}} = a_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 62,5 + 2 + 2 = 66,5 \text{ мм}$;

в) ширина $b_{\text{зовн.}} = b_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 55 + 2 + 2 = 59 \text{ мм}$.

Об'єм корпусу:

$$V_{\text{корп.}} = V_{\text{зовн.}} = 2,4 \cdot 6,65 \cdot 5,9 = 94,16 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Об'єм пристрою:

$$V_{\text{пристр.}}^{II} = V_{\text{корп.}} = 94,16 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Для третього варіанту компоновання пристрою, враховуючи розташування прохідного клемника на задній панелі довжиною 30 мм, внутрішні розміри корпусу складають:

а) висота $h_{\text{вн.}} = 5 + 1,5 + 8,5 + 5 = 20$ мм;

б) довжина $a_{\text{вн.}} = 5 + 40 + 5 = 50$ мм;

в) ширина $b_{\text{вн.}} = 5 + 30 + 30 = 65$ мм.

зовнішні габарити (із врахуванням товщини корпусу):

а) висота $h_{\text{зовн.}} = h_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 20 + 1 + 1 = 22$ мм;

б) довжина $a_{\text{зовн.}} = a_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 50 + 1 + 1 = 52$ мм;

в) ширина $b_{\text{зовн.}} = b_{\text{вн.}} + t_{\text{стінки1}} + t_{\text{стінки2}} = 65 + 1 + 1 = 67$ мм.

Об'єм корпусу:

$$V_{\text{корп.}} = V_{\text{зовн.}} = 2,2 \cdot 5,2 \cdot 6,7 = 76,65 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Об'єм пристрою:

$$V_{\text{пристр.}}^{\text{III}} = V_{\text{корп.}} = 76,65 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Розрахуємо масу пристрою. Знаходимо об'єм плати:

$$V_{\text{пл.}} = S_{\text{пл.}} \cdot h; \quad (3.2)$$

$$V_{\text{пл.}} = 12 \cdot 0,15 = 1,8 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Знаходимо масу плати:

$$m_{\text{пл.}} = \rho \cdot V_{\text{пл.}}; \quad (3.3)$$

$$m_{\text{пл.}} = 1,6 \cdot 1,8 = 2,88 \text{ (г)};$$

де ρ – густина склотекстоліту, $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$ [8].

Маса розміщених на платі елементів: $m_{\text{ел.}}^{\text{пл.}} = 32,98 \text{ (г)}$.

Маса елементів, розміщених на корпусі: $m_{\text{ел.}}^{\text{корп.}} = 12,4 \text{ (г)}$.

Загальна маса елементів:

$$m_{\text{ел.}} = m_{\text{ел.}}^{\text{пл.}} + m_{\text{ел.}}^{\text{корп.}}; \quad (3.4)$$

$$m_{\text{ел.}} = 32,98 + 12,4 = 45,38 \text{ (г)}.$$

Загальна маса пристрою формується сумою ваги корпусу, друкованої плати та складових елементів.

Для першого варіанту:

Маса корпусу:

$$m_{\text{корп.1}} = (V_{\text{зовн.1}} - V_{\text{вн.1}}) \cdot \rho_{\text{пол.}}, \quad (3.5)$$

де $\rho_{\text{пол.}} = 1,05 \text{ г/см}^3$ – густина полістиролу (ГОСТ 20282-86) [15].

$$m_{\text{корп.1}} = (89,42 - (2,0 \cdot 5,0 \cdot 6,5)) \cdot 1,05 = 25,64 \text{ (г)}.$$

Маса пристрою:

$$m_{\text{прист.1}} = 25,64 + 2,88 + 45,38 = 73,9 \text{ (г)}.$$

Для другого варіанту:

Маса корпусу:

$$m_{\text{корп.2}} = (V_{\text{зовн.2}} - V_{\text{вн.2}}) \cdot \rho_{\text{пол.}}; \quad (3.6)$$

$$m_{\text{корп.2}} = (94,16 - (2,0 \cdot 6,25 \cdot 5,5)) \cdot 1,05 = 26,68 \text{ (г)}.$$

Маса пристрою:

$$m_{\text{прист.2}} = 26,68 + 2,88 + 45,38 = 74,94 \text{ (г)}.$$

Для третього варіанту:

Маса корпусу:

$$m_{\text{корп.3}} = (V_{\text{зовн.3}} - V_{\text{вн.3}}) \cdot \rho_{\text{алюм.}}, \quad (3.7)$$

де $\rho_{\text{алюм.}} = 2,8 \text{ кг/дм}^3$ – густина алюмінію (ГОСТ 4784-97) [16].

$$m_{\text{корп.3}} = (76,65 - (2,0 \cdot 5,0 \cdot 6,5)) \cdot 2,8 = 32,62 \text{ (г)}.$$

Маса пристрою:

$$m_{\text{прист.3}} = 32,62 + 2,88 + 45,38 = 80,88 \text{ (г)}.$$

Потрібно виконати розрахунок показників надійності пристрою. Пристрій складається з 20 елементів, кожен із яких потенційно може спричинити відмову всієї системи. Тому важливо провести розрахунок надійності пристрою з урахуванням внеску кожного з цих компонентів.

Таблиця 3.2 – Розрахунок надійності пристрою за складовими елементами

Назва елементів	Кількість елементів	Інтенсивність відмов	Робоча температура	Виправлений коефіцієнт	Інтенсивність відмови групи
Позначення елементів	n_i	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$	°C	a	$\lambda_{гр} \cdot 10^{-6}$
Конденсатори К10-176	2	0,16	+125	13	4,16
Резистори Р1-12	8	0,07	+125	13	7,28
Мікроконтролер Attiny 2313	1	0,2	+80	13	2,6
Мікросхеми ADXL345	1	0,14	+90	13	1,82
АТ45DB161	1	0,15	+70	13	1,95
Світлодіоди L513SRD	2	0,8	+70	13	20,8
Тактова кнопка TACTSW-008	1	0,5	+125	13	6,5
Роз'єми	4	0,05	+140	13	2,6
Пайки	88	0,01	+40	13	11,44
Друкована плата	1	1,0	80	13	13
Всього:					72,15

Інтенсивність відмов розраховується:

$$\lambda_{pc} = \sum_{i=1}^m a_i \cdot n_i \cdot \lambda_{pt} \quad (3.8)$$

де a_i – коефіцієнт впливів зовнішнього середовища; n_i – число елементів в групі; m – кількість однакових елементів.

Час роботи визначається:

$$T_{pc} = \frac{1}{\lambda_{сум}} = \frac{1}{72,15 \cdot 10^{-6}} = 13860 \text{ год.} \quad (3.9)$$

Таким чином напрацювання на відмову становить 13860 год.

Розрахуємо вірогідність безвідмовної роботи в будь-який момент часу і побудуємо графік залежності, яка розраховується за формулою:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\text{сум}} t}.$$

Якщо $\lambda_{\Sigma} t < 0,1$ то з високою точністю можна вважати $P(t) = 1 - \lambda_{\Sigma} t$, де t – тривалість випробувань.

Графік $P(t)$ можна використовувати і для визначення гарантійного часу експлуатації виробу. Для цього слід розрахувати час, при якому $P(t)$ рівний 0,7 (рис. 3.5):

$$t_{\text{гр.т.с.}} = 4,966 \cdot 10^3 \text{ год.}$$

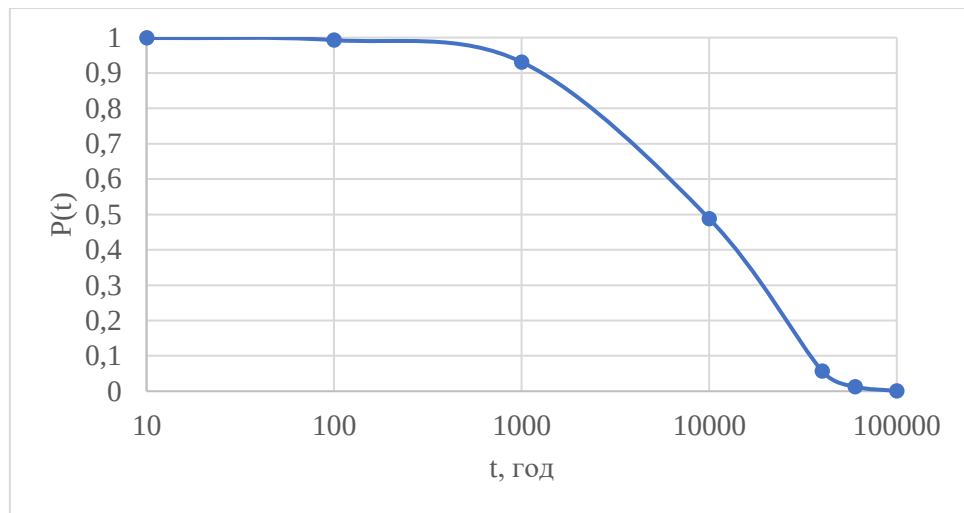


Рисунок 3.5 – Залежність ймовірності безвідмовної роботи навігаційного комплексу від тривалості експлуатації t

Оптимальний варіант конструкції корпусу визначається на основі комплексної оцінки, що враховує ключові параметри: об'єм, масу та інтенсивність відмов. Для цього використаємо результати проведених раніше розрахунків, які дозволяють порівняти і вибрати найбільш ефективне рішення.

Комплексний показник розраховується за формулою:

$$K = \varphi_1 \left(\frac{V}{V_{\text{ТЗ}}} \right) + \varphi_2 \left(\frac{m}{m_{\text{ТЗ}}} \right) + \varphi_3 \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{ТЗ}}} \right), \quad (3.10)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – вагові коефіцієнти які визначаються за важливістю; m маса пристрою; V – об’єм пристрою; λ – інтенсивність відмов пристрою; $V_{ТЗ}, m_{ТЗ}, \lambda_{ТЗ}$ – об’єм, маса та інтенсивність відмов пристрою.

Обчислимо комплексний показник для трьох варіантів пристрою.

$$K_1 = 0,6 \left(\frac{89,42}{95} \right) + 1 \left(\frac{73,9}{85} \right) + 0,8 \left(\frac{72,15 \cdot 10^{-6}}{75 \cdot 10^{-6}} \right) = 2,2.$$

$$K_2 = 0,6 \left(\frac{94,16}{95} \right) + 1 \left(\frac{74,94}{85} \right) + 0,8 \left(\frac{72,15 \cdot 10^{-6}}{75 \cdot 10^{-6}} \right) = 2,24.$$

$$K_3 = 0,6 \left(\frac{76,65}{95} \right) + 1 \left(\frac{80,88}{85} \right) + 0,8 \left(\frac{72,15 \cdot 10^{-6}}{75 \cdot 10^{-6}} \right) = 2,21.$$

Оптимальним варіантом конструкції вважається той, що має найнижчий комплексний показник. Порівняння трьох варіантів корпусу показало, що найменший комплексний показник, $K_1 = 2,2$, припадає на перший варіант — корпус із полістиролу з горизонтальним розміщенням друкованої плати, яка фіксується на основі за допомогою спеціальних кріпильних болтів. Отже, перший варіант корпусу є найдоцільнішим вибором.

3.5 Висновки до розділу 3

Розділ 3 присвячений розробленню автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом, що включає детальний аналіз конструктивних рішень, вибір матеріалів та методів компонування, а також оцінку основних технічних характеристик. В процесі роботи було здійснено комплексний розгляд конструкції та корпусу пристрою, зокрема визначено оптимальні параметри друкованої плати, її матеріали та технології виготовлення, що забезпечують необхідну міцність, теплову стабільність і надійність в експлуатації.

Було проведено аналіз трьох варіантів компонування приладу, з урахуванням їх маси, габаритних розмірів та надійності, що дозволило визначити найефективніший варіант розміщення функціональних елементів для досягнення оптимального балансу між технічними параметрами і вимогами експлуатації. Зокрема, перевагу було надано конструкції корпусу з

горизонтальним розміщенням друкованої плати в полістироловому корпусі, який забезпечує надійне кріплення та зручність обслуговування.

Оцінка надійності пристрою базувалась на аналізі інтенсивності відмов окремих компонентів, що дало змогу визначити загальний показник надійності системи та врахувати його при виборі конструктивних рішень. Запропонований підхід до розробки конструкції дозволяє забезпечити не лише функціональність і технічні характеристики, а й довговічність і стабільність роботи системи в умовах реальної експлуатації.

Отже, виконаний комплексний аналіз та розробка конструктивної частини автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом створюють міцну основу для подальшої розробки програмного забезпечення та інтеграції системи в цілісний апаратний комплекс, що відповідає вимогам технічного завдання і забезпечує високий рівень надійності й ефективності.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці в умовах використання автоматизованих систем передбачає створення безпечних і комфортних умов для працівників, які працюють із комп'ютерною технікою, автоматизованими пристроями та програмним забезпеченням. Усі технічні засоби повинні відповідати вимогам електробезпеки, бути заземленими та оснащеними захистом від перенапруг, коротких замикань і статичної електрики.

Під час проектування автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом на працівника, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [26]: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму; підвищений рівень статичної електрики; підвищена напруженість електричного поля; недостатня освітленість повітря робочої зони; фізичні перевантаження (статичні); нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо покращення умов праці на робочому місці.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

На робочому місці під час проектування автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть

виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи.

Проектування робочих місць, забезпечених ПК, відноситься до числа важливих проблем ергономічного проектування в області обчислювальної техніки.

Робоче місце і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам. Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця проектувальника повинні бути дотримані наступні основні умови: оптимальне розміщення устаткування, що входить до складу робочого місця і достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення [27].

Головними елементами робочого місця проектувальника є стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоча поза сидячи викликає мінімальне стомлення працівника. Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і постійність розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібне для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Висота робочої поверхні столу для користувачів повинна регулюватися в межах 680-800 мм, при відсутності такої можливості висота робочої поверхні столу повинна бути 725 мм. Модульними розмірами робочої поверхні столу для ПК, на підставі яких повинні розраховуватися конструктивні розміри, слід вважати: ширину 800, 1200, 1400 мм, глибину 800 і 1000 мм при нерегульованій висоті, що дорівнює 725 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною – не менше 500 мм, глибиною на рівні колін - не менше 450 мм і на рівні простягнутої ноги – не менше 650 мм. Робочий стілець (крісло) повинен бути підйомно-поворотним і регульованим по висоті і кутам нахилу сидіння і спинки, а також - відстані спинки до переднього краю сидіння. Робоче місце необхідно обладнати підставкою для ніг, має ширину не менше 300 мм, глибину не менше 400 мм, регулювання по висоті в межах до 150 мм і по куту нахилу

опорної поверхні підставки до 20 градусів. Підставка повинна мати рифлену поверхню і бортик по передньому краю заввишки 10 мм. Клавіатуру слід розташовувати на поверхні столу на відстані 100-300 мм від краю, зверненого до користувача, або на спеціальній регульованій по висоті робочої поверхні, відокремленої від основної стільниці.

Електричний струм – являє собою прихований тип небезпеки, бо його важко визначити в струмо- та неструмоведучих частинах устаткування, які є хорошими провідниками електрики. Смертельно небезпечним для життя людини вважають струм, величина якого перевищує 0,05 А, струм менше 0,05 А - безпечний (до 1000 В). З метою попередження уражень електричним струмом до роботи повинні допускатися тільки особи, що добре вивчили основні правила з безпеки виконання роботи.

Приміщення, де експлуатуються ПК, належать до приміщень без підвищеної небезпеки ураження людини електричним струмом. Вимоги електробезпеки і пожежної безпеки у приміщеннях, де встановлені ПК і все устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження роботи їх, електропроводи і кабелі мають відповідати електробезпеці зони та мати апаратуру захисту від струму короткого замикання.

Лінії електромережі ПК, у приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників (заземлення або занулення), причому площі перерізу нульового робочого і нульового захисного провідника повинні бути не менші за площу перерізу фазового провідника.

Відповідно до правил електробезпеки в службовому приміщенні повинен здійснюватись постійний контроль стану електропроводки, запобіжних щитів, шнурів, за допомогою яких включаються в електромережу комп'ютери, освітлювальні прилади, інші електроприлади. Електричні установки, до яких відноситься практично все обладнання ПК, представляють для людини велику потенційну небезпеку, тому що в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що

знаходяться під напругою. Специфічна небезпека електроустановок - струмоведучі провідники, корпуси стійок ПК і іншого устаткування, яка під напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції, не подають будь-яких сигналів, які попереджають людину про небезпеку. Реакція людини на електричний струм виникає лише при протіканні останнього через тіло людини. Виключно важливе значення для запобігання електротравматизму має правильна організація обслуговування діючих електроустановок ВЦ, проведення ремонтних, монтажних і профілактичних робіт.

Оскільки в приміщенні використовується понад п'ять ПК, тому на помітному місці встановлено аварійний резервний вимикач, який в разі небезпеки повністю знеструмлює електричну мережу (крім освітлення). В такому випадку при використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого або важкогорючого матеріалу дозволено прокладати їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів, що ми і спостерігаємо у приміщенні.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничих приміщень нормується в залежності від теплових характеристик виробничого приміщення, категорії робіт по важкості і періоду року. Категорія виконуваних робіт під час проектування автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом - 1а [30] (табл. 4.1).

Для підтримання у виробничих приміщеннях метеорологічних умов, які задовольняють нормативні вимоги використовують систему вентиляції. Приміщення обладнано системою загально обмінної припливно-витяжної вентиляції. На кожную вентиляційну установку складений паспорт з технічною характеристикою та схемою установки.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні Відносна вологість Швидкість руху повітря	21 ... 25 ° С 40 ... 60% до 0,1 м / с
Теплий	Температура повітря в приміщенні Відносна вологість Швидкість руху повітря	22 ... 28 ° С 40 ... 60% 0,1 ... 0,2 м / с

Крім того, для підтримання температури в холодний період року використовують загальну систему опалення.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Оксид азоту	0,085	0,085	2
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Під час роботи на ПК важливо, щоб повітря мало певний іонний склад. Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі приміщень з ПК мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення на робочому місці проектувальника є бічне одностороннє.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні (характеристика зорової роботи – дуже високої точності) зазначені у таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для максимального використання природного освітлення в приміщенні слід систематично очищувати вікна від пилу та встановити жалюзі. Віконні прорізи не затемнюються іншими будівлями.

Як джерела світла для штучного освітлення в приміщенні

застосовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ. Допускається застосування ламп розжарювання у світильниках місцевого освітлення

4.2.4 Виробничий шум

Рівні шуму на робочих місцях визначаються за ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [29] (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звуку, еквівалентні рівні звуку, дБА/дБАекв.
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творча діяльність, обробка даних,	86	71	61	54	49	45	42	40	38	60

Рівень шуму на робочих місцях не має перевищувати 60 дБА, що досягається застосуванням малошумного обладнання, використанням спеціальних матеріалів для обшивки приміщень, а також різноманітними звукопоглинальними пристроями (перегородки, кожухи, прокладки тощо).

4.2.5 Виробничі випромінювання

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях із ПК (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих [32] (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Допустимі параметри електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень [29].

Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 0,05 м від екрана та корпусу відео термінала при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинна перевищувати ОД бер/год (100 мкР/год).

Для забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів комп'ютерних випромінювань необхідно застосовувати при екранні фільтри, локальні світлофільтри (засоби індивідуального захисту очей) та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат (згідно Директиви № 90/270/ЄЕС [33]).

5.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а в разі його виникнення запобігається вплив на людей небезпечних факторів пожежі і забезпечується захист матеріальних цінностей. Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі і системою пожежного захисту.

Пожежна безпека приміщення повинна відповідати вимогам Кодексу

цивільного захисту України [9] та «Правила пожежної безпеки в Україні» [35].

За вибуховою і пожежною небезпекою приміщення належить до категорії Д, згідно з нормами технологічного проектування «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [36]. У приміщенні знаходяться ПК та інша оргтехніка, що можуть спричинити пожежу.

Згідно даних наведених у таблиці 4.7 будівля, в якій знаходиться приміщення, має II ступінь вогнестійкості [37] приміщення можна віднести до категорії вибухопожежонебезпеки В (табл. 4.3.1).

Таблиця 4.7 – Визначення ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колони	сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття міжповерхові (у т. ч. горищі та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні ненесучі	внутрішні ненесучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E15, M0 E30, M1	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Клас приміщення і зон з вибухо- і пожежонебезпеки II-IIa (приміщення, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали.)

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Для запобігання виникнення пожежі в приміщенні застосовують такі заходи:

- щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;
- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

Електромережі, електроприлади і апаратура експлуатується тільки у справному стані з урахуванням вказівок та рекомендацій підприємств-виготовлювачів. У разі виявлення пошкоджень електромереж, вимикачів, розеток та інших електровиробів слід негайно вимкнути їх та вжити необхідних заходів щодо приведення в пожежобезпечний стан.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, запобігання пожежі, обмеження її розповсюдження, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у разі виникнення вогнища загоряння і в якому зазначено місця розташування пожежної техніки. Як відомо пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин, окислення і джерел запалювання. У робочому приміщенні присутні всі три основні чинника, необхідні для виникнення пожежі. Горючими компонентами є: будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін

Джерелами запалювання у ВЦ можуть бути електронні схеми від ПК,

прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де внаслідок різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри та дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів. У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні дроти, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відведення надлишкової теплоти від ЕОМ служать системи вентиляції та кондиціонування повітря. При постійному дії ці системи представляють собою додаткову пожежну небезпеку.

При проведенні обслуговуючих, ремонтних і профілактичних робіт використовуються різні мастильні речовини, легкозаймисті рідини, прокладаються тимчасові електропровідниками, ведуть пайку та чистку окремих вузлів. Виникає додаткова пожежна небезпека, яка потребує додаткових заходів пожежного захисту. Зокрема, при роботі з паяльником слід використовувати неспалену підставку з нескладними пристроями для зменшення споживаної потужності в неробочому стані.

Однією з найбільш важливих завдань пожежної захисту є захист будівельних приміщень від руйнувань та забезпечення їх достатньої міцності в умовах впливу високих температур при пожежі. З огляду на високу вартість електронного устаткування приміщення, а також категорію його пожежної небезпеки, будинки для ВЦ і частини будинку іншого призначення, в яких передбачено розміщення ПК повинні бути 1 і 2 ступеня вогнестійкості.

Під час зведення будівельних конструкцій зазвичай використовують негорючі матеріали, такі як цегла, залізобетон, скло, метал тощо. Використання деревини повинно бути обмеженим, а в разі її застосування необхідно обробити матеріал вогнезахисними речовинами.

Для гасіння невеликих загорянь застосовуються такі засоби, як внутрішні пожежні водопроводи, вогнегасники, сухий пісок, азбестові покривала тощо. У машинних залах, приміщеннях для зберігання

інформаційних носіїв та кімнатах із контрольно-вимірювальними приладами застосування води можливе лише у виняткових випадках, коли пожежа набуває значних масштабів. При цьому слід використовувати мінімальну кількість води, а обладнання захистити від потрапляння вологи, накривши його брезентом або щільною тканиною.

На початкових етапах займання широко використовують вогнегасники. У приміщеннях найчастіше застосовують вуглекислотні вогнегасники, оскільки вони ефективно ліквідовують пожежі, не пошкоджують електроніку та мають діелектричні властивості, що дозволяє використовувати їх навіть за наявності напруги в електроустановках.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто загальні аспекти систем автоматизованого керування БПЛА, що дозволяє показати їх важливість для забезпечення ефективності та безпеки польотів. Проаналізовано принципи керування, які лежать в основі функціонування автоматизованих систем, включно з особливостями алгоритмів, що відповідають за стабілізацію, навігацію та адаптацію до змін навколишнього середовища.

Окрему увагу приділено структурним компонентам систем керування, що включають апаратні модулі, сенсорні підсистеми та засоби зв'язку, які забезпечують збір, обробку і передачу інформації для прийняття управлінських рішень. Розглянуто сенсорні системи і навігаційні технології, що є ключовими для забезпечення точності позиціонування і безпеки польотів. Детально проаналізовані основні алгоритми керування польотом, які реалізують підтримку стійкості, рух у просторі та реакцію на зовнішні впливи.

Загалом, теоретичний аналіз підтвердив, що ефективна робота систем автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами базується на комплексній взаємодії апаратних, програмних і алгоритмічних компонентів. Розуміння принципів функціонування, структурних особливостей і сучасних викликів створює міцну основу для подальшого розроблення автоматизованої системи керування, що буде розглянута в наступних розділах цієї роботи.

Було розглянуто сучасні системи автоматизованого керування, що широко застосовуються в різних типах БПЛА, таких як Pixhawk, DJI Naza та інші. Особлива увага приділялась їх архітектурі, функціональним можливостям та технічним характеристикам, які забезпечують ефективне виконання польотних місій різної складності. Крім того, було проаналізовано апаратні модулі та периферійні пристрої, які є невід'ємною частиною систем керування, зокрема телеметричні модулі, високоточні GPS/ГНСС приймачі, сенсорні платформи (IMU, барометри, магнітометри), енергетичні системи управління, системи збереження даних, комунікаційні модулі (Wi-Fi, LTE,

4G/5G) та апаратні платформи для обробки даних (наприклад, NVIDIA Jetson, Raspberry Pi). Ці компоненти забезпечують надійність, точність та гнучкість роботи системи керування. Важливою складовою розділу був огляд програмних рішень та алгоритмів керування, які формують інтелектуальну основу БПЛА. Було розглянуто програмні платформи, такі як ArduPilot та PX4, а також алгоритми стабілізації польоту, планування траєкторій, автономної навігації і обробки сенсорної інформації. Особливий акцент зроблено на використанні методів штучного інтелекту для підвищення адаптивності та безпеки польотів. Проведений аналіз показує, що сучасні системи автоматизованого керування БПЛА є високотехнологічними комплексами, які інтегрують апаратні та програмні компоненти з передовими алгоритмами керування. Вони характеризуються високою модульністю та масштабованістю, що дозволяє адаптувати їх до різних завдань і умов експлуатації. Перспективи розвитку галузі пов'язані з удосконаленням обчислювальних ресурсів, розвитком сенсорних технологій та інтеграцією методів штучного інтелекту, що відкриває нові можливості для підвищення автономності, надійності та ефективності безпілотних літальних апаратів у різноманітних сферах застосування.

В роботі була розроблена автоматизована електронний пристрій керування безпілотним літальним апаратом, зокрема аналіз конструктивних рішень, вибір матеріалів та методів компонування, оцінку основних технічних характеристик. В процесі роботи було здійснено комплексний розгляд конструкції та корпусу пристрою, зокрема визначено оптимальні параметри друкованої плати.

Було проведено аналіз трьох варіантів компонування приладу, з урахуванням їх маси, габаритних розмірів та надійності, що дозволило визначити найефективніший варіант розміщення функціональних елементів для досягнення оптимального балансу між технічними параметрами і вимогами експлуатації. Зокрема, перевагу було надано конструкції корпусу з

горизонтальним розміщенням друкованої плати в полістироловому корпусі, який забезпечує надійне кріплення та зручність обслуговування.

Оцінка надійності пристрою базувалась на аналізі інтенсивності відмов окремих компонентів, що дало змогу визначити загальний показник надійності системи та врахувати його при виборі конструктивних рішень. Запропонований підхід до розробки конструкції дозволяє забезпечити не лише функціональність і технічні характеристики, а й довговічність і стабільність роботи системи в умовах реальної експлуатації.

Отже, виконаний комплексний аналіз та розробка конструктивної частини автоматизованої системи керування безпілотним літальним апаратом дозволяють використовувати її в цілісному апаратному комплексі БПЛА, що забезпечує високий рівень надійності й ефективності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Austin, Reg. *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment*. John Wiley & Sons, 2011.
2. Beard, Randal W.; McLain, Timothy W. *Small unmanned aircraft: Theory and practice*. Princeton university press, 2012.
3. Valavanis, Kimon P.; Vachtsevanos, George J. *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2014.
4. Titterton, David; Weston, John L. *Strapdown inertial navigation technology*. IET, 2004.
5. Lewis, Frank L.; GE, Shuzhi Sam (ed.). *Autonomous mobile robots: sensing, control, decision making and applications*. CRC Press, 2018.
6. Richards, Arthur; How, Jonathan P. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming. In: *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*. IEEE, 2002. p. 1936-1941.
7. Hoffmann, Gabriel, et al. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In: *AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit*. 2007. p. 6461.
8. Petritoli, Enrico; Leccese, Fabio; Ciani, Lorenzo. Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 2018, 18.9: 3171.
9. Finn, Anthony; Scheduling, Steve. Developments and challenges for autonomous unmanned vehicles. *Intelligent Systems Reference Library*, 2010, 3: 128-154.
10. https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk.html
11. <https://www-v1.dji.com/naza-m.html>
12. <https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9a>
13. <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/aircraft/global-hawk>
14. <https://www.skydio.com/skydio-2-plus-enterprise>
15. <https://www.flytrex.com/>

16. <https://rfdesign.com.au/>
17. <https://github.com/ArduPilot/SiK>
18. Hofmann-Wellenhof, Bernhard; Lichtenegger, Herbert; Wasle, Elmar. *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, 2007.
19. Boiko, Juliy; Svachii, Oleh; Kałaczyński, Tomasz. Control of unmanned aerial vehicle modules based on inertial measurement system and MEMS sensor. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2024. p. 01005.
20. <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-modules>
21. Zaheer, Zainab, et al. Aerial surveillance system using UAV. In: *2016 thirteenth international conference on wireless and optical communications networks (WOCN)*. IEEE, 2016. p. 1-7.
22. Ebeid, Emad, et al. A survey of open-source UAV flight controllers and flight simulators. *Microprocessors and Microsystems*, 2018, 61: 11-20.
23. Лободзінська, Р. С., et al. Конструювання та технологія радіоелектронних засобів. *Вінниця: ВНТУ*, 2007.
24. ADXL345 datasheet. — URL: <https://www.analog.com/en/products/adxl345.html#:~:text=The%20ADXL345%20is%20a%20digital,a%20wide%20variety%20of%20applications>.
25. Яровий О. В. Системи управління безпілотними літальними апаратами для здійснення моніторингу наземних об'єктів. *Системи управління навігації та зв'язку Збірник наукових праць*. 2018. № 3(49). С. 33-38.
26. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с
27. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
28. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

29. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

30. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

31. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

32. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>

33. Директива № 90/270/ЕЄС «Про мінімум вимог безпеки і гігієни праці при роботі з екранними пристроями - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/provisions-on-workload-ergonomical-and-psychosocial-risks/osh-directives/5>

34. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI

35. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

36. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

37. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-200

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

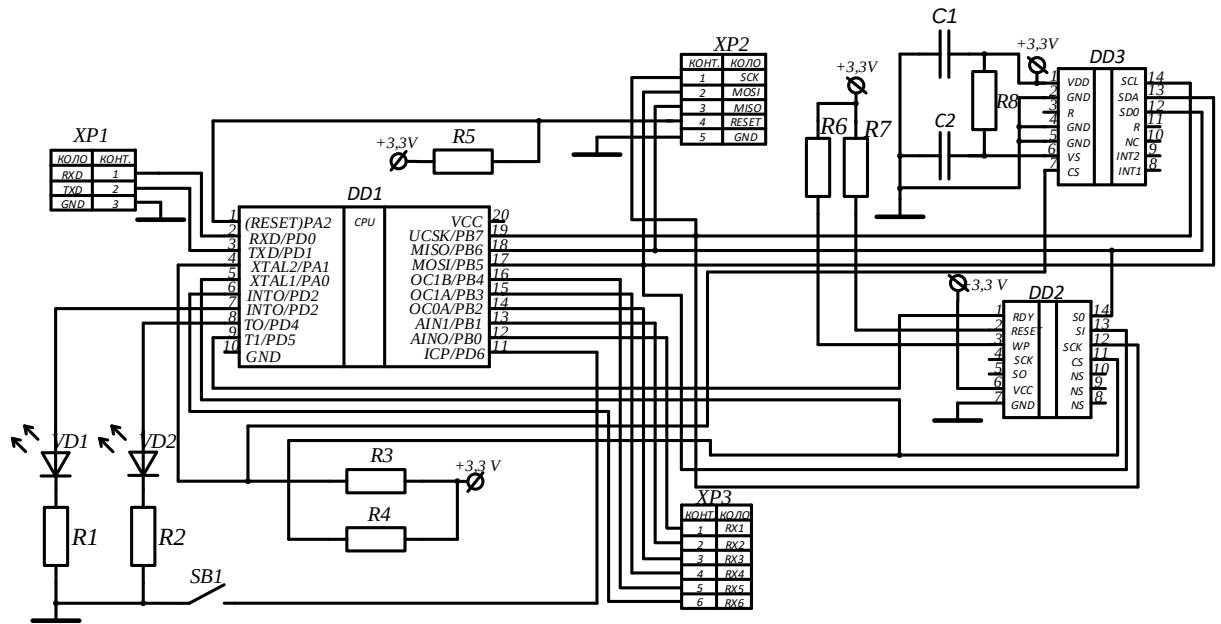


Рисунок А.1 – Схема електрична принципова

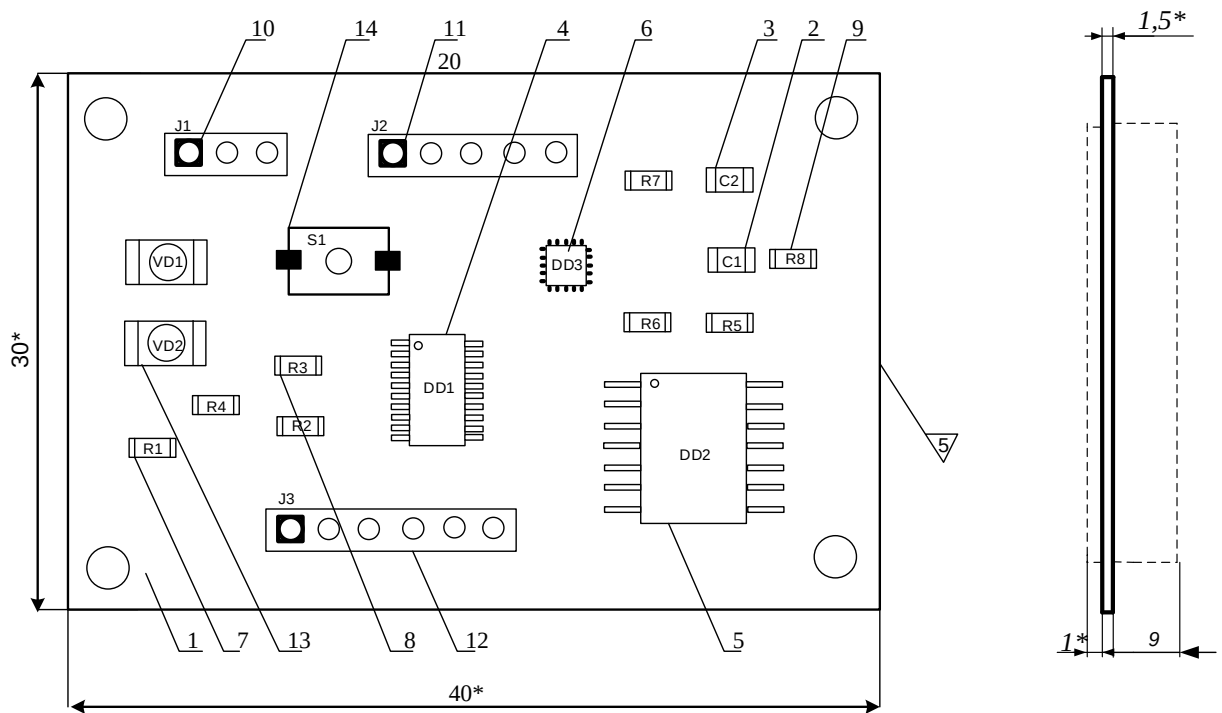


Рисунок А.2 – Друкована плата пристрою

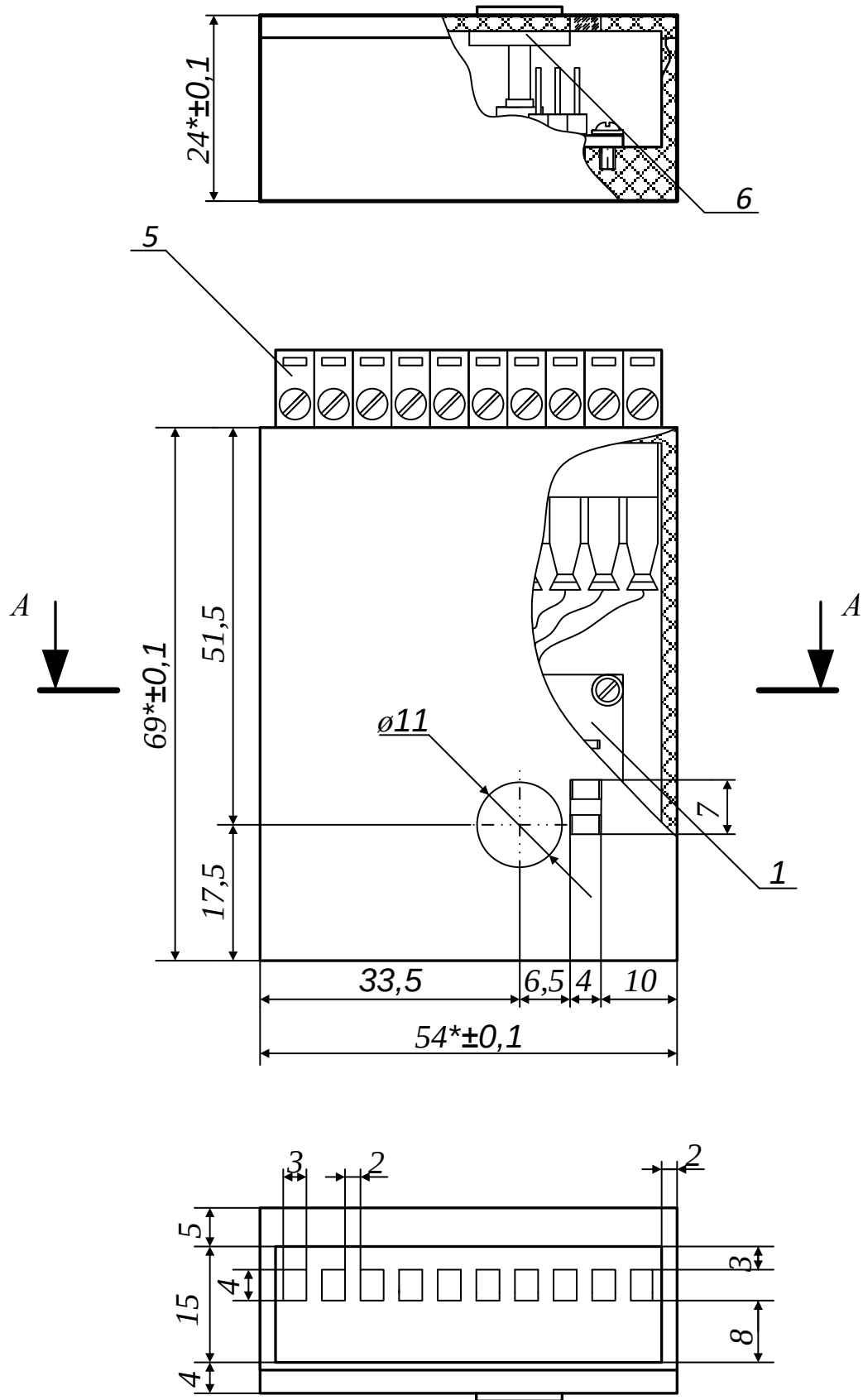


Рисунок А.3 – Корпус пристрою керування

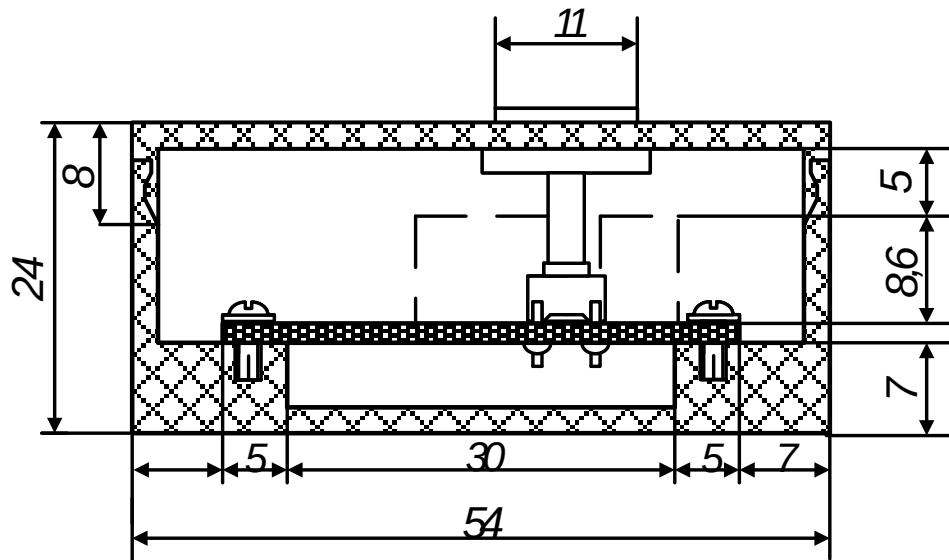


Рисунок А.4 – Друкована плата пристрою



Рисунок А.5 – Зовнішній вигляд верхньої частини корпусу

Таблиця А.1 – Перелік елементів

Позначення	Найменування	Кількість
Конденсатори		
<i>C1</i>	<i>0805-1 мкФ ±10% -10В-Х7R</i>	1
<i>C1</i>	<i>0805-10 мкФ ±10% -10В-Х7R</i>	1
Мікросхеми		
<i>DD1</i>	<i>Attiny2313</i>	1
<i>DD2</i>	<i>ADXL345</i>	1
<i>DD3</i>	<i>AT45DB161-TSO P</i>	1
Резистори		
<i>R1, R2</i>	<i>0402-47 Ом ±5%; 0,125 Вт</i>	2
<i>R3-R7</i>	<i>0402-10 кОм ±5%; 0,125 Вт</i>	5
<i>R8</i>	<i>0402-100 Ом ±5%; 0,125 Вт</i>	1
Роз'єми		
<i>XP1</i>	<i>FB-3 ГОСТ 24733-81</i>	1
<i>XP2</i>	<i>FB-5 ГОСТ 24733-81</i>	1
<i>XP3</i>	<i>FB-6 ГОСТ 24733-81</i>	1
Світлодіоди		
<i>VD1-VD2</i>	<i>LTW-K140SZR30</i>	2
Тактова кнопка		
<i>SB1</i>	<i>TACTSW-008</i>	1

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Автоматизована система керування безпілотним літальним апаратом

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 1,12 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Коваль Л. Г., завідувач кафедри БМІОЕС

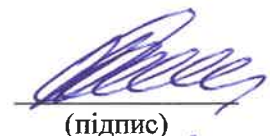
(прізвище, ініціали, посада)

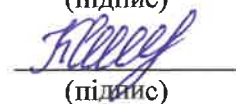
Карась О. В., гарант ОПІ «Електроніка»

(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)


(підпис)


(підпис)

Штофель Д. Х.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлені:

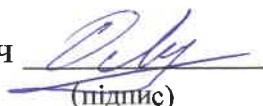
Керівник


(підпис)

Костішин С. В., доц. каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Луцик О. Л.

(прізвище, ініціали)