

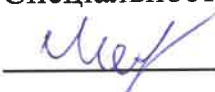
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико–електронних систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему
АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАЗЕМНОЇ СТАНЦІЇ КЕРУВАННЯ
БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ

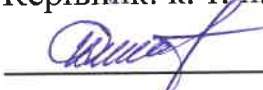
Виконав: студент 4 курсу

Групи Ел-216,

Спеціальності 171 Електроніка

 Шевчук В. Ю.

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

 Штофель Д. Х.

« 13 » 08 2025 р.

Рецензент: к. т. н., старший викладач каф. ІРТС

 Пригула О. М.

« 13 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри БМІОЕС

Коваль Л. Г.


« 16 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 р.

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.

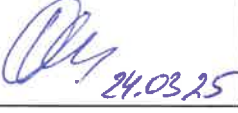
ЗАВДАННЯ

На бакалаврську кваліфікаційну роботу

Студенту Шевчуку Володимирі Юрійовичу, гр. Ел-216

1. Тема БДР «Апаратне забезпечення наземної станції керування безпілотним літальним апаратом», керівник роботи доцент каф. БМІОЕС Штофель Дмитро Хуанович, к. т. н., доцент, затверджені наказом ВНТУ від 20 березня 2025 року № 97.
2. Строк подання студентом роботи до – 02.06.2025 р.
3. Вихідні дані для роботи: портативний пристрій, акумуляторне живлення 8.4 В, радіочастотний діапазон 0.9 ГГц – 2.4 ГГц, потужність споживання в межах 5 Вт, габаритні розміри – приблизно 100 мм * 90 мм, частота передачі сигналу дистанційного керування - 200 Гц.
4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити). 1: Аналітичний огляд питання; 2: Конструкторський розділ; 3: Технологічний розділ; 4: Опрацювання питань охорони праці.
5. Зміст ілюстративної частини: схема електрична принципова, плата друківана.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Штофель Д. Х., к.т.н., доцент кафедри БМІОЕС	 20.03.2025	 13.06.2025
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	Назви етапів БДР	Строк виконання	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	06.06.2025	
6	Нормконтроль БДР	09.06.2025	
7	Рецензування БДР	16.06.2025	
8	Захист БДР	19.06.2025	

Студент



Володимир ШЕВЧУК

Керівник роботи



Дмитро ШТОФЕЛЬ

АНОТАЦІЯ

Шевчук В. Ю. БКР на тему: «Апаратне забезпечення наземної станції керування безпілотним літальним апаратом». Вінниця : ВНТУ, 2025. 89 с.

Українською мовою. 75 рис., 9 табл., бібліогр. 30 найм.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблену наземну складову частину системи дистанційного керування безпілотним літальним апаратом. Розглянуто загальні відомості про сучасну технологію дистанційного керування, розібрано принцип її функціонування, проведено його уніфікацію. Робота містить опис процесу створення принципової схеми пристрою, створення друкованої плати згідно цієї схеми. Наведено обґрунтування обраних конструкторських рішень у процесі розробки.

ABSTRACT

Shevchuk. V. Yu. Bachelor thesis on the topic: «Hardware of unmanned vehicle ground control station». Вінниця : ВНТУ, 2025. 89 p.

In Ukrainian. Figs. 27, Tables. 9, Refs. 30.

In the bachelor's thesis developed a ground component of unmaned vehicle remote control system. It contains general information on modern technology of remote control, explains its functional principles, and generalizes it. Work consists of developing a schematic for this device, and creating printed circuit board according to it. In the process of design, taken construction decisions are explained.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ.....	7
1.1 Огляд систем керування безпілотними літальними апаратами.	7
1.2 Основні компоненти системи дистанційного керування.....	8
1.3 Фізичний і канальний рівень між пристроєм дистанційного керування і модулем передавача	10
1.4 Короткий екскурс в історію RC протоколів	13
2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	16
2.1 Попередній огляд деталей і вимог реалізації	16
2.2 EXPRESS LRS	16
2.3 Вибір обчислювальної платформи.....	19
2.4 Інші попередні деталі реалізації пристрою.....	20
2.5 Розробка принципової електричної схеми прототипу.....	22
2.5.1 Ланцюг вимірювання напруги на акумуляторі	22
2.5.2 Ланцюг контролю подачі напруги на решту схеми.....	23
2.5.3 Взаємодія з модулем передавача	28
2.5.4 Органи керування.....	31
2.5.5 Підсумки розробки принципової схеми	40
2.6 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ.....	42
2.6.1 САПР KiCad. Основні поняття	42
2.6.2 Послідовність проектування ДП	44
2.6.3 Редактор схем. Деякі деталі створення схеми.....	45
2.6.4 Перехід у редактор друкованої плати. Основні параметри плати, визначення допусків по розмірах і розміщеннях	46
2.6.5 Основні класи вузлів схеми.....	48
2.6.6 Додавання посадочних місць на плату, їх розміщення, визначення способу заземлення	49
2.6.7 Трасування провідників і заливка суцільних областей.....	54
2.6.8 Деякі механічні деталі реалізації вибору.....	55
2.7 Підсумки конструкторського розділу.	56

3	ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	57
3.1	Основні поняття, що використовуються у індустрії створення друкованих плат	57
3.2	Способи виготовлення друкованих плат і їх відмінності	60
4	ОПРАЦЮВАННЯ ПИТАНЬ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	65
4.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	66
4.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	69
4.2.1	Мікроклімат	69
4.2.2	Склад повітря робочої зони.....	70
4.2.3	Виробниче освітлення.....	71
4.2.4	Виробничий шум.....	72
4.2.5	Виробничі випромінювання.....	73
4.3	Пожежна безпека	74
4.3.1	Технічні рішення системи запобігання пожежі	75
4.3.2	Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	76
	ВИСНОВКИ.....	79
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
	ДОДАТКИ.....	84
	ДОДАТОК А.....	85
	ДОДАТОК Б.....	89

ВСТУП

З винайденням способів дистанційної передачі інформації, з'явилася ідея створення літального апарату, що не буде потребувати людини, яка ним керує. Відомо, що перші у історії створенні літальні апарати були саме безпілотними. Це було пов'язано з тим, що вони були досить нестабільні і небезпечні, тому що людство не володіло ще тим досвідом створення літаків, який воно набуло згодом. Люди мали змогу створювати все нові прототипи літаючих машин, не ризикуючи життям пілотів. Звісно, спочатку основним рушієм для створення «безпілотників» була військова справа, де зрештою проблема збереження людського життя є ще більш актуальною. Ця тенденція зберігається і зараз. Саме військові – це ті хто отримують найновіші прототипи безпілотних літальних апаратів. Проте за останні 20-30 років, безпілотні літальні апарати, або, як їх скорочено називають – дрони і планери, отримали поширення і в громадському секторі, а також у науці, наприклад, для дослідження тих ділянок планети, де людям перебувати дуже ризиковано, чи навіть для досліджень поза її межами.

Безпілотники наразі доступні кожному, цьому сприяло декілька факторів, основний з яких- це стрімкий розвиток електроніки, стандартизація і уніфікація виробництва друкованих плат, здешевіння напівпровідникових елементів, наявність сучасної компонентної бази. Зрозуміло, що разом з можливостями і якістю безпілотних систем, зросла їх складність, тому розгляд теми безпілотників є досить обширний. Дещо полегшує освоєння цієї області знань те, що за той проміжок часу, протягом якого безпілотні системи існують, вони змогли досить сильно уніфікуватися, тобто, є кілька загальних правил, якими можна описати принцип дії майже кожної системи дистанційного керування. Саме ці знання допомагають у розробці систем як наземного керування, так і тих, що знаходяться на борту ЛА.

Для загального розуміння безпілотних систем варто описати механізм їх роботи в цілому, а вже потім, відштовхуючись від отриманих висновків, матимемо

змогу детальніше описати принцип роботи саме наземної частини технології дистанційного керування.

Метою даної роботи є ознайомлення з наявними техніками дистанційного керування, первісний аналіз технічних вимог до експлуатації майбутнього пристрою, теоретичні міркування на рахунок того, як можна ці вимоги задовільнити, а також які компроміси бувають у використанні тих чи інших конструкторських і виробничих рішень. З метою спрощення міркувань, виріб розділено на декілька структурних частин, розробка кожної з яких розглядається окремо.

Об'єкт дослідження – процес дистанційного керування безпілотним літальним апаратом.

Предмет дослідження – пульт радіоуправління для керування безпілотним літальним апаратом.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ

1.1 Огляд систем керування безпілотними літальними апаратами.

Керування безпілотним літальним апаратом здійснює людина, яка знаходиться на деякій відстані від нього, на землі, укритті чи в транспорті, не надто важливо. Літальний апарат обладнаний усім необхідним для здійснення автономного польоту. Передача сигналу на дистанцію здійснюється або через електромагнітне випромінювання (радіохвилі), або за допомогою провідника струму чи світла (оптоволокно).

Спочатку розглянемо технологію дистанційного керування загалом. Виділимо основні компоненти, потім детально розглянемо функцію кожного з них і опишемо механізм взаємодії між ними. Проте перед тим потрібно роз'яснити деякі основні поняття які використовуються у трактуванні принципів роботи літальних апаратів.

Безпілотні літальні апарати розділяються на два типи: це планери і коптери. Тут можна провести чітку аналогію з літальними апаратами, які керуються людиною: планери нагадують літаки, які завжди можуть летіти тільки вперед, лише змінюючи свою траєкторію руху, коптери нагадують гелікоптери, які як можуть рухатися в довільному напрямку, так і зависати в одній точці. Порівнювати їх далі немає великого сенсу, оскільки обидва типи літальних апаратів для керування використовують однакові 4 осі керування – це тангаж, крен, ристання і тяга. Очевидно, що ці величини по своїй природі є неперервними.

Зрозуміло, що основна функція дистанційного каналу зв'язку – це передавача сигналів дистанційного керування, у яких певним чином закодовані положення 4 осей керування. Окрім сигналів дистанційного керування система може підтримувати телеметрію.

Телеметрією називаються виміряні значення основних параметрів БПЛА, такі як швидкість польоту, напрямок, положення, заряд акумуляторних батарей, та ін., які передаються по лінії зв'язку назад до наземної станції керування.

1.2 Основні компоненти системи дистанційного керування

Структуру сучасних систем керування БПЛА можна розбити на 4 основні блоки. Назвемо їх і коротко опишемо основні їх функції.

1. Модуль дистанційного керування. Від нього відбувається керування літальним апаратом. З цим пристроєм безпосередньо взаємодіє оператор БПЛА. Сигнали дистанційного керування згодом передаються на модуль передавача.
2. Модуль передавача. Прийняті сигнали дистанційного керування з модуля керування передаються на модуль приймача.
3. Модуль приймача. Приймає сигнали дистанційного керування з модуля передавача і передає їх на польотний контролер.
4. Польотний контролер. Серце будь-якого сучасного БПЛА. Займається обробкою сигналів з модуля приймача, і на основі зворотного зв'язку з датчиків положення, акселерометрів, тахометрів та інших міняє швидкість обертання кожного окремого двигуна, так, щоб досягнути бажаної траєкторії польоту.

Блоки 1 і 2 формують Тх сторону, яка знаходиться на землі.

Блоки 3 і 4 формують Rx сторону, яка знаходиться безпосередньо на БПЛА.

Основна схема взаємодії компонентів такої система показана на рисунку 1.1.

Варто зазначити, що як розділ схем керування і передавача на окремі модулі в деяких системах може бути умовним, тобто один від іншого розглядаються нероздільно і є неподільною одиницею, а може бути цілком реальним, причому є

можливість комбінувати різні передавачі з різними модулями дистанційного керування [24, ст. 1]. Останній варіант наразі є більш поширений, очевидно, через свою гнучкість у використанні, саме йому буде приділена увага у цій роботі. Проте передавач і відповідний приймач мають бути тільки від одного виробника, тому що кожен з них використовує свою техніку модуляції/демодуляції сигналу.

Наземні системи керування БПЛА є одним із ключових компонентів стеку технології дистанційного керування.

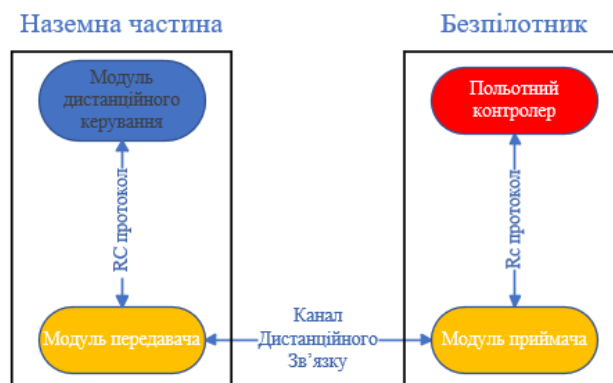


Рисунок 1.1 – Схема взаємодії компонентів системи дистанційного керування

Очевидно, що напрям потоку даних дистанційного керування: Модуль дистанційного керування -> модуль передавача -> модуль приймача -> польотний контролер. Для пакетів даних телеметрії, ця послідовність зворотна, і модуль приймача стає передавачем і навпаки. Проте загально прийнято передавачем називати саме ту структурну одиницю системи, які надсилає дані дистанційного керування.

1.3 Фізичний і каналний рівень між пристроєм дистанційного керування і модулем передавача

Отже, розглянемо безпосередньою механізм передачі даних.

Як згадувалося, основні способи дистанційної передачі інформації - це радіоканал, і оптоволокно. Він формує фізичний рівень передачі даних. Сигнал передається закодованим у певний спосіб, по-іншому цей процес називають модуляцією. Зворотній процес перетворення закодованої інформації у первісну форму називається демодуляцією. Існує безліч технік модуляції та демодуляції сигналу. У випадку безпроводної передачі даних (за допомогою електромагнітних хвиль) використовується частотна, фазова і амплітудна модуляція. Будь-яка комерційна техніка модуляції і демодуляції базується на одному з цих методів, або, що частіше, комбінує відразу декілька.

Донедавна радіоканал був чи не єдиним способом дистанційної передачі інформації, і, звісно, на це є свої причини, головна з яких – це зручність за рахунок відсутності будь-якого фізичного з'єднання з безпілотником. Проте з розвитком оптоволоконних технологій, їх почали впроваджувати в безпілотні системи. Незважаючи на те, що оптоволокно вимагає фізичного з'єднання передавача з приймачем, його використання має також суттєві переваги, які цінують насамперед у військовій справі, а саме: цей канал зв'язку неможливо подавити за допомогою засобів радіоелектронної боротьби, крім того, він має дуже низькі показники згасання рівня корисного сигналу на відстані, що завжди є проблемою у випадку використання радіозв'язку.

В рамках наземної станції керування(між модулем дистанційного керування і модулем передавача) та безпілотного літального апарату(між модулем приймача і польотним контролером) на фізичному рівні використовується передача даних по провідниках, використовуючи такі широкоживані цифрові інтерфейси як UART,

I²C, SPI. На каналному рівні модулі обмінюються даними за допомогою RC протоколу, який базується на одному з цих інтерфейсів. Як правило основою RC протоколу є UART, причому використовується як напівдуплексна(по одному провіднику, одночасний прийом і відправка даних неможлива) версія, так і повнодуплексна(можливо одночасно як і отримувати дані, так і відправляти). Пакети RC-протоколу формуються з окремих UART фреймів. Формат цих фреймів, тобто інвертованість чи неінвертованість, кількість стоп бітів, перевірка парності та швидкість комунікації задаються специфікацією RC протоколу. Основна задача RC протоколу – це передача даних дистанційного керування, також більш розвинені протоколи підтримують *телеметрію*.

Як правило, на стороні Tx і стороні Rx для комунікації між пристроєм керування і модулем передавача, і між приймачем і польотним контролером відповідно, використовується один і той самий RC-протокол, проте можуть бути випадки, наприклад, в яких наземна станція може передавати дані у форматі протоколу PPM, а польотний контролер приймати їх у форматі протоколу CRSF (детальніше про різні протоколи згодом). Зрозуміло, що усі вище розглянуті компоненти системи мають підтримувати обрані протоколи комунікації, програмно чи апаратно. Апаратна реалізація протоколу є досить надійним рішенням, проте в таку систему важко вносити зміни, також більш просунуті протоколи швидко збільшують складність такої системи, попри це, найбільшим недоліком все ж таки є те, що таким чином практично неможливо реалізувати підтримку декількох протоколів одразу, а якщо і можливо, то система стає невиправдано складною. Альтернативою є програмна реалізація протоколу, що є набагато гнучкішим рішенням, простішим в реалізації, дозволяє легко реалізовувати відразу декілька протоколів в одному пристрої, в таку систему відносно легко вносити зміни, проте в її роботі можливий збій, також швидкість обробки інформації зазвичай повільніше,

ніж апаратна реалізація. Апаратна реалізація покладається на дискретні цифрові мікросхеми, або на FPGA – чіпи, програмна – на мікропроцесори і мікроконтролери.

Модулі передавача і приймача, обов'язково використовують одну і ту ж техніку модуляції і демодуляції сигналу, використовуючи певний частотний діапазон. Саме тому на цьому рівні домінує апаратна реалізація, оскільки немає необхідності підтримувати одразу декілька технік обробки сигналу. Проте пакети RC-протоколів що ідуть до або від модуля керування і польотного контролера обробляються програмно (в переважній кількості випадків).

Модуль керування і польотний контролер зазвичай підтримують широкий спектр передавачів/приймачів, кожен з яких використовує свій RC-протокол, саме тому тут і переважає програмна реалізація. Це надає великої гнучкості системі, оскільки один і той ж пристрій керування, так само як і польотний контролер, можна використовувати у парі з великою кількістю передавачів і приймачів відповідно. Наприклад OpenTx і EdgeTx (операційні системи комерційних пристроїв дистанційного керування) мають змогу вибрати в налаштуваннях протокол, по якому буде відбуватись передача даних до зовнішнього модуля передавача, як-от для модулів ExpressLRS чи TBS ми обираємо протокол Crossfire, а для модулів FrSky буде обрано протокол FBus. Майже усі передавачі підтримують також PPM(більш детально про нього нижче), що є спрощеною версією ШІМ. Те ж справедливо і для польотних контролерів.

Модулі передавачів можуть відрізнятися за максимальною дальністю ефективною дії, енергоспоживанням, типом антени, та іншими параметрами, але при цьому всьому вони можуть використовувати для обміну даними один і той же RC протокол. І звісно ж, крім перерахованих критеріїв порівняння різних модулів передавача, головним серед них є фізичний канал передачі даних. Ця уніфікація дозволяє значно розширити можливості апаратури керування: її можна

використовувати як з радіопередавачами, так і з тими, що передають дані по оптоволокну.

Як видно, для кожного стеку технологій дистанційного керування виробники використовують свої протоколи комунікації, а також свої техніки модуляції/демодуляції радіочастотного сигналу. Наприклад:

- ExpressLRS і TBS в якості протоколу використовують CRSF (скорочення від Crossfire). Проте техніки модуляції радіосигналу різні: ExpressLRS розраховує на LoRa (відкритий протокол комунікації, доступний для загальносупільного користування), а TBS використовує власний закритий протокол.
- Spektrum в якості модуляції сигналу використовує технології DSM, DSM2, DSMX
- FrSky використовує протокол FBus, а модулює сигнал за допомогою AFHDS, AFHDS 2A.

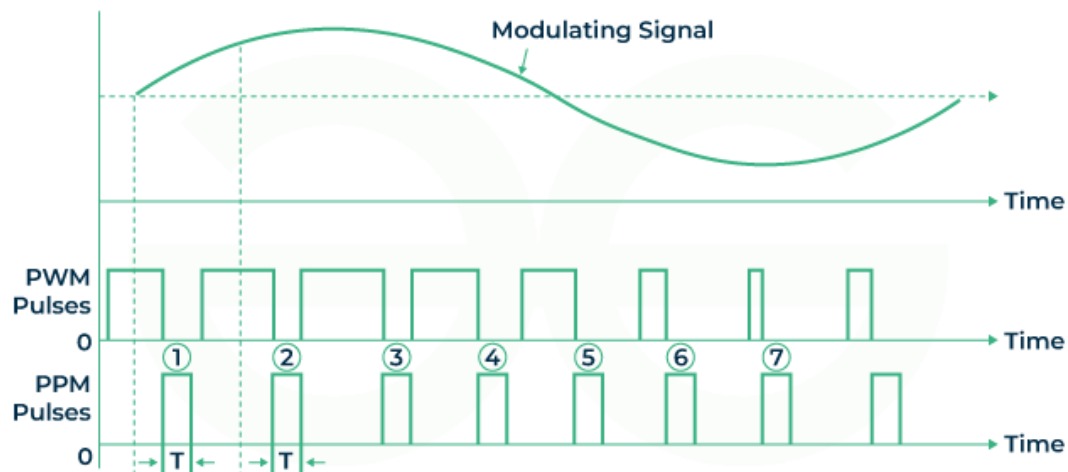
1.4 Короткий екскурс в історію RC протоколів

Серед RC протоколів можна виділити дві основні групи: загальноновживані і комерційні цифрові, які як правило закриті. Серед загальноновживаних можна виділити лише три це: PWM(pulse width modulation або широтно імпульсна модуляція), PPM (pulse position modulation або позиційно імпульсна модуляція) [28].

- Широтно імпульсна модуляція або PWM – ймовірно, найдавніший з усіх вживаних протоколів. Принцип його дії заключається в тому, що для кожного каналу керування існує свій окремий канал передачі(фізично являє собою провідник), в якому аналогове значення сигналу кодується за допомогою ширини імпульсу, що повторяється з певною частотою. Є найпростішим протоколом з точки зору реалізації, але саме в ній криється основний недолік: на кожен канал керування потрібно свій провідник, проблема виникає вже

якщо каналів 5 чи 6, а саме така кількість є мінімальною для нормальної роботи будь якого БПЛА, проте якщо їх більше, система стає досить ще більш громіздкою [28]. Другим суттєвим недоліком є те, що сигнал ШІМ неможливо відстежити на предмет помилок чи спотворень, це може бути проблемою, якщо безпілотною працює в середовищі з великим рівнем електромагнітних завад.

- Позиційно імпульсна модуляція або PPM – є «модифікованою» версією PWM. Використовує лише один фізичний провідник для передачі інформації [28]. Значення кожного каналу керування ідуть послідовно один за другим. Положення високого і низького фронтів сигналу ШІМ співпадають положенням у часі коротких імпульсів. Причому як тільки закінчується низький фронт попереднього сигналу, починається високий фронт наступного. Краще можна зрозуміти цей принцип, використовуючи ілюстрацію 1.2.



Pulse Position Modulation (PPM)



Рисунок 1.2 – Демонстрація, на якій видно, як аналоговий сигнал можна представити у вигляді широтно-імпульсної модляції (ШІМ) і еквівалентний сигнал позиційно-імпульсної модуляції) (ПІМ) [10]

З недоліків цього протоколу так само як і у випадку з PWM можна вважати низьку завадостійкість, і неможливість перевірити цілісність отриманих даних на стороні приймача.

Очевидно, що дані RC протоколи не підтримують телеметрію, і хоча реалізовані сучасною апаратурою керування і польотними контролерами, проте зараз частіше в них надають перевагу комерційним цифровим протоколам. В цій роботі детальніше буде розглянуто RC протокол CRSF(скорочення від Crossfire), що був запатентований брендом TBS і наразі крім апаратури TBS використовується в апаратурі ExpressLRS.

2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Попередній огляд деталей і вимог реалізації

Оскільки темою роботи є саме наземна станція керування, найбільшу увагу приділимо саме таким компонентам як модуль керування і модуль передавача. Є декілька варіантів компоновки такої системи: коли модуль передавача вбудований в модуль керування і коли він підключається окремо. Комерційні прилади мають в собі як і вбудований модуль радіопередавача, так і підтримують зовнішній, який підключається в так званий JR Module Bay. Переваги зовнішнього модуля в тому, що він має більшу потужність, отже дозволяє зберігати зв'язок з БПЛА на більшій дистанції. Модуль передавача лиш передає далі сигнали з модуля дистанційного керування, формуванням яких займається саме останній, тому основною метою цієї роботи розробка модуля дистанційного керування.

Спершу потрібно визначитись з системою дистанційного керування.

2.2 Express LRS

Автор цієї роботи обрав ExpressLRS (скорочено ELRS), оскільки ця система найдоступніша в своїй ціновій категорії, має детальну документацію, і є open source проектом., який розробляється командою ентузіастів. ELRS з'явився відносно недавно, проте вже встиг завоювати прихильність аудиторії, здебільшого це льотчики, проте ця технологія може використовуватись і у більш серйозних цілях. Скажемо декілька слів про реалізацію цієї технології

ELRS використовує радіоканал для дистанційного зв'язку у декількох частотних діапазонах. Сигнал модулюється і демодулюється за допомогою протоколу LoRa (Long Range). Для реалізації цього протоколу використовуються

чіпи SX1276/77/78/79/80. Це мікросхеми трансивери - можуть як передавати, так і отримувати, складаються з двох частин: аналогової, яка займається безпосередньо передачею і прийомом радіосигналу, і цифрової, яка містить два буфери, один для прийому даних, другий для відправки. Для зчитування інформації з буфера чи запису в нього використовується один із послідовних протоколів комунікації, такий як UART чи SPI. Під час роботи мікросхеми дані з буфера відправки поступово передаються аналоговій частині, яка відправляє сигнал у вигляді радіохвиль, тим самим вміст цього буфера очищується. Одночасно з тим, дані, які аналогова частина прийняла зберігаються у буфер прийому, який також очищується по мірі їх зчитування. Як видно, ці чіпи є досить складними у використанні і здебільшого для обслуговування їхнього функціоналу використовується окремий мікроконтролер. Він, вже в свою чергу перетворює дані одного з RS протоколів, у набір команд і інформації, які передаються мікросхемі трансиверу.

ExpressLRS використовує два частотні діапазони: 2.4 ГГц та 900 МГц, тому що це ті діапазони, які не вимагають ліцензії, та є вільними для використання будь-ким. При бажанні, систему можна налаштувати на інші діапазони. Розглянемо основні відмінності користування цими частотними діапазонами.

Діапазон 2.4 ГГц – є більш поширеним, дозволяє передавати більший об'єм даних за одиницю часу, проте цей діапазон поступається діапазону 900 МГц в максимальній дистанції роботи, оскільки більш високочастотне електромагнітне випромінювання розсіюється швидше по мірі поширення у повітрі, і проходження крізь фізичні перешкоди. З цього також випливає, що діапазон 2,4 ГГц споживає більше електроенергії, оскільки вимушений компенсувати втрату рівня корисного сигналу на відстані збільшенням потужності випромінювання [24, ст. 2]. Порівняльний аналіз наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Порівняльний аналіз передавачів, що працюють у різних частотних діапазонах

Характеристика	Передавач, що працює у діапазоні 2,4 ГГц	Передавач, що працює у діапазоні 900 МГц
Дальність дії	Середня	Велика
Здатність проходити через фізичні перешкоди	Погана	Середня
Швидкість передачі даних	Середня	Маленька
Споживання електроенергії	Середнє	Маленьке

Якщо максимальна кількість пакетів, які можна передати за одиницю часу не є найвищим пріоритетом, можна надавати перевагу апаратурі яка працює в діапазоні 900 МГц.

ExpressLRS, для обміну з пристроєм керування використовує RC протокол CRSF(Crossfire) [30, ст.1]. Документацію на цей протокол можна знайти у мережі, а поки що варто зазначити, що цей протокол не є примітивним, а це означає що потрібен буде пристрій, який перетворює положення органів керування у RC пакети цього протоколу, тобто виконує кодування інформації. На цю роль ідеально підходить мікроконтролер. Його використання дасть змогу реалізувати перетворення даних програмно, що звісно дає велику гнучкість у реалізації, дозволяє легко змінювати її деталі а також має інші переваги програмного рішення над апаратним.

2.3 Вибір обчислювальної платформи

Ринок сьогодення налічує безліч мікроконтролерів. Можна використовувати окремий чіп, проте зараз існують багато плат розробників, які мають на «борту» основні типові елементи, які потрібні для нормального функціонування мікроконтролера. Одна з найпопулярніших плат розробників це Arduino, а саме Arduino nano.

Платформа Arduino nano базується на мікроконтролері Atmega328p сімейства AVR. Крім того, Arduino, має вбудований лінійний стабілізатор напруги, є дві версії: одна працює з напругою живлення 3,3 вольт і має максимальну тактову частоту 8 МГц, інша працює з напругою живлення 5 вольт і має максимальну тактову частоту 16 МГц. Тактову частоту обох платформ задає відповідний кварцовий резонатор. Крім того, на платформі інтегрований USB роз'єм для живлення, програмування (через вшитий в пам'яті завантажувач, так званий bootloader) та налагодження. Дві останні функції реалізовано за допомогою протоколу UART, перетворенням сигналів USB у UART займається мікросхема CH340 [3].

Попередньо визначимося з основними параметрами роботи мікроконтролера Atmega328p.

В проекті використана версія Arduino nano з лінійним стабілізатором номіналом 5 вольт і тактовою частотою 16 МГц.

Для реалізації різноманітних конструкторських задумів Atmega328p має велику кількість периферії, досить типової для більшості моделей сучасних мікроконтролерів. Детальніше оглянемо ті, які можуть стати у нагоді при проектуванні даного пристрою.

1. Аналог-цифровий перетворювач, розмірність перетворення 10 біт, підключений через вбудований аналоговий мультиплексор, дає можливість

вимірювати напругу на 8 виходах. Використовується для зчитування положення аналогових органів керування.

2. Апаратний детектор зміни рівня цифрових сигналів і генератор переривань на його основі. Можна використати для реалізації функціоналу користування пристроєм, наприклад певну миттєву реакцію на натиснення кнопки.
3. Таймер-лічильник. Працює від тактового сигналу центрального процесора напряду, або через частотний дільник, що дає змогу точно вибирати бажану частоту його роботи. За його допомогою можна точно синхронізувати відправку RC пакетів на модуль передавача з відправкою модульованого сигналу на приймач літального апарату.

2.4 Інші попередні деталі реалізації пристрою

Як відомо основні органи керування БПЛА, які відповідають за його положення в повітрі – це тангаж, крен, тяга і рискання. Оскільки ці величини є по своїй природі аналоговими, потрібні потенціометри: так звані «джойстики», потенціометри які об'єднують в собі два канали, значення одного з них змінюється при русі по вертикалі а іншого при русі по горизонталі.

Оскільки наземні системи керування БЛПА є мобільними пристроями, то потрібно забезпечити акумуляторне живлення. Непоганим рішенням по балансу ціни, внутрішнього опору, ємності, і кількості циклів заряду\розряду є літій іонні акумулятори. Найпоширеніший форм фактор – 18650, саме його і буде використано. В більшості випадків, напруги 2s батареї вистачає: в повністю зарядженому стані вона сягає близько 8,4 вольт (по 4,2 кожен), в розрядженому - 7 вольт (по 3,5 вольт кожен).

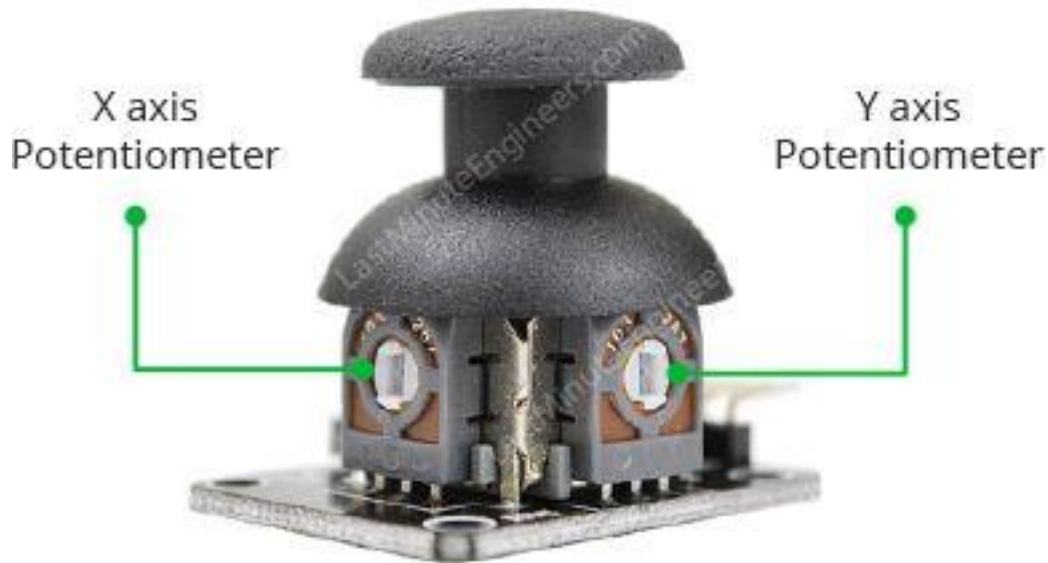


Рисунок 2.1 – Так виглядає аналоговий механізм джойстика [7]

Правила використання акумуляторних батарей. Коли використовуються Li-ion акумулятори, важливо жорстко дотримуватись правил правильної експлуатації, оскільки при їх порушенні акумулятори можуть бути дуже нестійкими і ненадійними, є ризик вибуху чи загорання. Також важливо дотримуватись правил експлуатації і в цілях запобігання швидкого зносу акумуляторів: діапазон напруг на кожній комірці у 4,2 – 3,5 вольт є граничним, не варто заряджати їх до вищої напруги, так як і не варто розряджати нижче рівня 3,5 вольт, оскільки це суттєво зменшує кількість циклів заряду/розряду, при яких ємність акумулятора зберігалася би. Значні і тривалі струми розрядки чи зарядки теж негативно впливають на характеристики акумулятора [9, ст. 154]. Необхідно передбачити змогу системи відстежувати напругу батареї і можливість самовідключення у ті моменти, коли напруга нижче порогової, або струм сягає більше певного значення. Для цих цілей в систему має бути включений модуль BMS (Battery management system), який забезпечує дотримання вище заявлених вимог. Також більшість модулів BMS оснащені найпростішою системою балансування, що теж є необхідним: її суть полягає в тому, що в момент коли напруга на одній з послідовних батарей більше 4,2 В, надмірний

заряд витрачається на нагрівання резистору, ввімкненого паралельно через електронний ключ. Тобто, балансування відбувається лише на етапі зарядки. По можливості можна включити до цієї системи і активний балансір, який буде виконувати балансування не тільки на етапі заряджання а й увесь час. Проте, якщо різниця ємностей акумуляторів, які входять до збірки, не є надто великою, його наявністю можна знехтувати, оскільки він не принесе значної користі.

З точки зору користувача заряджати акумулятори найпростіше буде від стандарту USB (Type B), оскільки такі зарядні пристрої є у кожного, проте потрібно буде підняти напругу з рівня 5 В до рівня напруги батареї. Для цього на ринку є спеціалізовані рішення такі як модулі на мікросхемі FM4256

Модуль акумуляторного живлення будемо вважати окремою одиницею, яка буде підпаяна до основної схеми через контактні площадки напряму, або через силовий роз'єм XT30.

2.5 Розробка принципової електричної схеми прототипу.

Схему пристрою умовно можна поділити на декілька структурних блоків: живлення, взаємодія з модулем передавача, органи керування. Детальніше розглянемо кожен з них

2.5.1 Ланцюг вимірювання напруги на акумуляторі

Як сказано вище у вимогах реалізації, схема має підтримувати можливість автоматичного відключення, якщо заряд батареї надто низький, або ж відключатися при повторному натисненні кнопки живлення. Напругу живлення вимірюємо за допомогою одного з входів АЦП. Діапазон напруг 8,4 – 7 Вольт є вищим напруги живлення мікроконтролера Atmega328p у 5 Вольт, тому сигнал слід подати через

резистивний дільник. Якщо обрати два однакових резистори з малим діапазоном допустимих відхилень від номіналу, вхідний діапазон напруг буде вкладатись у межі 4,2-3,5 що є робочою напругою входів АЦП, і буде дорівнювати напрузі одного акумулятора, якщо вважати що вони ідеально збалансовані. Бажано вибирати резистори з ряду стандартних значень E96, тому що вони мають менше максимальне допустиме відхилення від номінального значення. В схему додатково включений конденсатор для фільтрації можливих завад і згладження можливих стрибків напруги в моменти, коли пристрій короткочасно споживає значний струм.

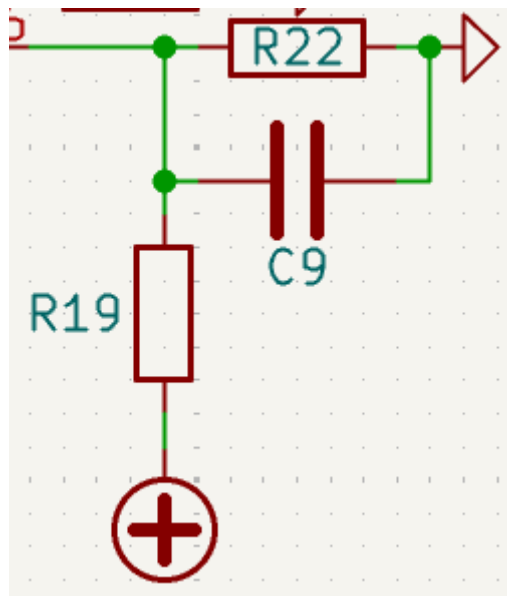


Рисунок 2.2 – Ланцюг вимірювання напруги акумуляторної батареї

2.5.2 Ланцюг контролю подачі напруги на решту схеми

Важливо зазначити що відключення схеми має відбуватись повністю на апаратному рівні, тобто не активна схема не має споживати струм від батареї. Дотримання цієї вимоги дасть можливість уникнути надмірного розрядження акумуляторів. Для цього використаємо схему перемикача живлення з фіксацією, яку реалізовано за допомогою PMOS транзистора IRF9540, який відключає лінію BAT+

від решти схеми в закритому стані і замикає через себе лінії +BATT і +VDC у відкритому. Відкривати канал стік витік транзистора Q1 буде менш потужний NMOS 2n7000 підтягуючи потенціал затвору IRF9540 на землю.

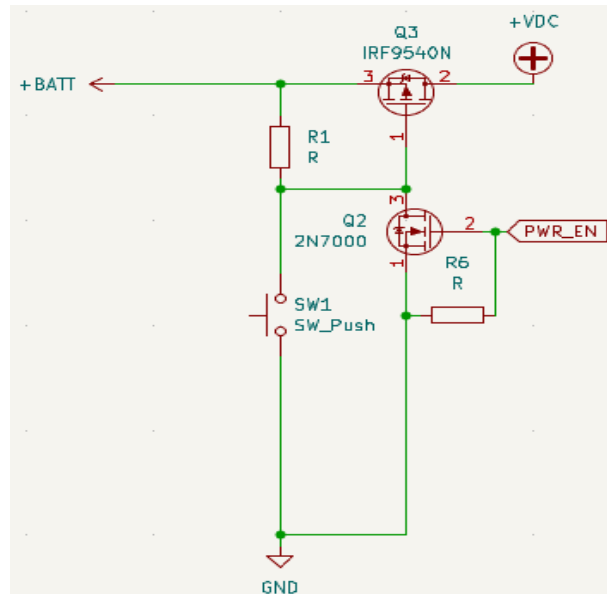


Рисунок 2.3 – Початковий вигляд схеми контролю живлення

Сигнал з виходу Arduino буде підтримувати високий рівень на затворі транзистора 2n7000 (позначений як PWR_EN), тим самим тримаючи відкритим транзистор IRF9540, до тих пір, поки напруга на вході АЦП А7 буде вищою певного рівня. Як тільки напруга стає нижчою, обидва транзистори закриваються, і схема автоматично самовідключається.

Проте очевидно, що в початковий момент часу схема не буде працювати, оскільки знеструмлена Arduino не може подати високий рівень на затвор транзистора 2n7000. Для цього в схему включена звичайна тактова кнопка (на рисунку SW1) паралельно транзистору 2n7000, яка в момент ввімкнення буде виконувати його роль: підтягувати на землю потенціал затвору IRF9540. Як тільки натиснули на

кнопку, схема отримає живлення і почне підтримувати його сама після того, як кнопку відпустили.

Оскільки передбачається можливість відключення схеми за допомогою тієї ж кнопки, схема дещо модифікована, а саме: підтягнути кнопку на лінію BAT+ і додати діод D1 між кнопкою і резистором R1, для того аби високий рівень через R1 не потрапляв назад на затвор IRFZ9540 і навпаки, на кнопці тримався високий рівень навіть якщо на затворі IRFZ9540 низький. Таким чином, ми можемо відслідковувати положення кнопки SW1 окремо, навіть якщо транзистор Q3 вже проводить струм. Встановлений рnr транзистор BC807 проводить струм в моменти, коли кнопка натиснута і подає високий рівень на вхід PWR_BTN. Сигнал PWR_BTN подається саме через транзистор по тій причині, що в момент запуску, під час нетривалого натиснення на кнопку, МК не встигає сконфігурувати пін контролю натиснення кнопки на режим входу і по замовчуванню є виходом, що впливає на роботу схеми. Ось повний вигляд схеми.

Конденсатор C1 разом з опором відкритого каналу стік-витік транзистора Q1 схеми виступає в ролі первинного фільтра низьких частот для живлення решти схеми. Конденсатори C2 і C3 керамічні, низького номіналу, фільтрують короточасні скачки напруги за рахунок низького ESR.

Оскільки весь струм, що споживає схема, протікає через транзистор Q1, потрібно переконатись, що розсіювальна потужність на ньому буде в межах норми. Із Datasheet на цей транзистор дізнаємося, що опір відкритого каналу стік витік становить $R_{ds} = 0.117 \text{ Ом}$ при напрузі витік затвор $V_{gs} = -10 \text{ В}$, і струмові $I_D = -11 \text{ А}$ [8]. У схеми, що розглядається струм споживання буде набагато меншим і в основному буде складатися з струму споживання зовнішнього модуля передавача, що становить приблизно від 0.3 А до 0.5 А.

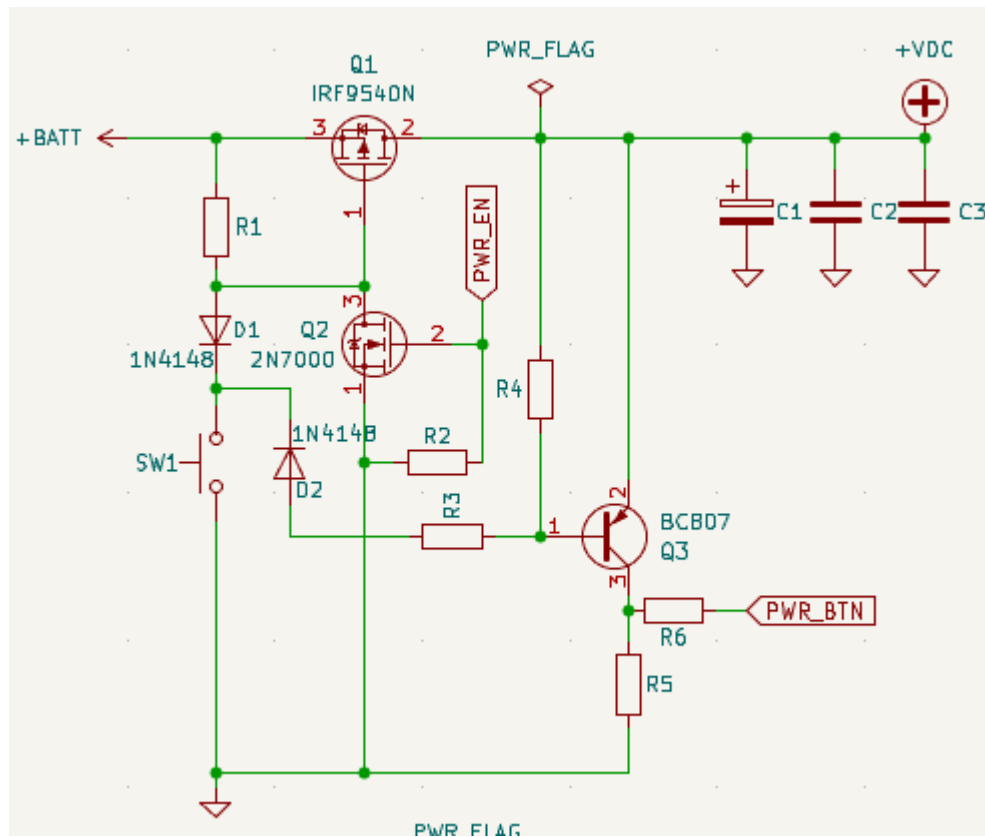


Рисунок 2.4 – Повна схема контролю живлення

Враховуючи, що ардуіно споживає приблизно 20 мА, а потенціометри ще менше, запасу струму в 0.1 А буде цілком достатньо. Отже при струмові $I = 0.6$ А, падіння напруги становитиме

$$U_{ds} = R_{ds} I_d = 0.117 \cdot 0.6 = 0.070 \text{ В}$$

При цьому потужність розсіювання дорівнюватиме:

$$P = I_d U_{ds} = 0.6 \cdot 0.07 = 0.0042 \text{ Вт}$$

Потужність, розсіювана транзистором є досить мізерною, тому очевидно, що в додаткового охолодження не потребує.

Як видно, рnp транзистор при ввімкненні подає рівень напруги батареї 8,4 В на вхід Arduino D4, проте це не є проблемою, бо МК надає захист від критичних рівнів напруг на усіх виводах, як показано на рисунку. Резистор R6 слугує для збільшення вихідного опору сигналу PWR_BTN до таких значень, при яких струм через захисний діод є незначним і ним можна знехтувати.

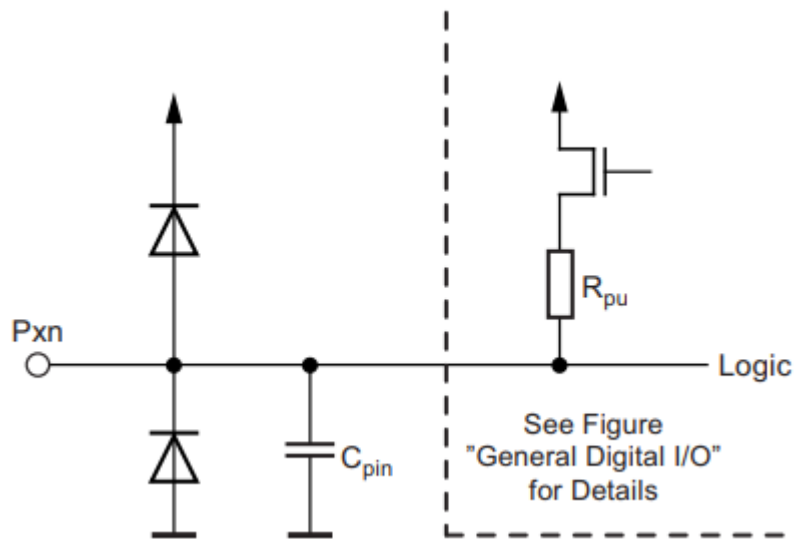


Рисунок 2.5 – Загальна схема захисту вхідних портів МК Atmega328p від критичних значень напруг [4, ст. 58]. Як видно, захисні діоди починають проводити струм тоді, коли напруга на вході стає більшою за напругу живлення 5 В + падіння напруги на рn-переході діода, або коли напруга на вході стає меншою за рівень землі на напругу рn-переходу

Вхід PWR_EN контролю подачі живлення і вихід PWR_BTN моніторингу натиснення кнопки підключені до портів D3 і D4 відповідно, платформи Arduino.

Якщо підключити PWR_BTN до входу, що підтримує генерацію апаратного переривання при зміні рівня цифрового сигналу, можна досягти миттєвої реакції схеми на натиснення кнопки, за рахунок обробника переривань. На платформі

Arduino, це порт D4, туди і підключимо. Вихід PWR_EN можна підключити на будь-який цифровий вихід, в даному випадку використано D3.

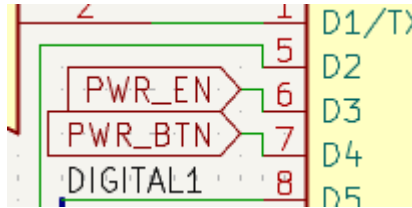


Рисунок 2.6 – Підключення

2.5.3 Взаємодія з модулем передавача

Надалі слід розглянути механізм взаємодії з модулем передавача. Такий модуль використовує стандартизований роз'єм JR Module Bay. Це 5 піновий роз'єм, розпіновку якого можна побачити на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Розпіновка модуля JR [11]

Зовнішні модулі обмінюються інформацією з модулем керування за допомогою протоколу UART в напівдуплексній формі: передача відбувається по одному провіднику(Signal/Data на рисунку, або його ще називають SPort), і в певний момент часу одна з сторін є строго передавачем а інша строго приймачем. Якщо розглядати протокол CRSF, то формат фреймів UART із яких складаються його пакети, є досить типовим: неінвертований, один стоп біт і без перевірки парності. Швидкість комунікації може бути різна - 400 КБод.

Із фреймів UART складаються пакети RC протоколу CRSF.

У даному випадку Master шини UART - це модуль керування, він ініціює обмін даними передачею одного CRSF пакету модулю передавача. Після цього, модуль керування стає приймачем і чекає відповіді від модуля передавача. На вхідний один пакет від модуля керування, модуль передавача відсилає один вихідний пакет у зворотному напрямку. Пакети CRSF на обох сторонах комунікації формуються і оброблюються програмно, це заслуговує окремої теми обговорення, а поки скажемо, що в найпростішому випадку від модуля керування до передавача надходять пакети RC даних, які містять інформацію про положення усіх основних органів керування, тоді як в зворотному напрямку можуть відсилатися пакети синхронізації (мається на увазі синхронізація надходження пакетів з таймером їх відправки далі до приймача), пакети телеметрії та ін..

Платформа Arduino не має вбудованої підтримки напівдуплексної форми UART, але її можна отримати за допомогою деяких маніпуляцій з повнодуплексною. Рішенням, використаним в даній роботі є підключення виходу передавача Tx через мікросхему буферу з третім станом. Схемотехніка цього рішення виглядає так, як на рис. нижче.

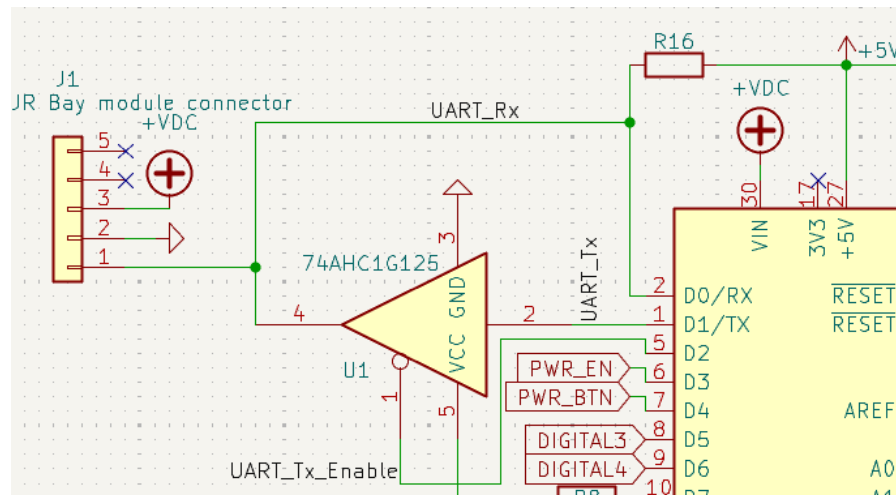


Рисунок 2.8 – Схема перетворення повнодуплексної версії UART в напівдуплексну

Мікросхема U1 74AHC1G125 - це неінвертуючий буфер з можливістю переведення виходу у третій стан. Структурна схема і таблиця істинності для цієї мікросхеми виглядає так:

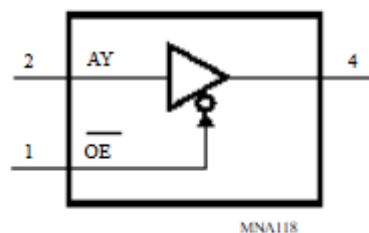


Рисунок 2.9 – Логічний символ, який позначається буфер з третім станом [1, ст.3]

За допомогою входу $\overline{OE}$ можна контролювати, чи є вихід мікросхеми (вихід 4 на демонстрації вище) підключений до її виходу, або знаходиться в стані великого імпедансу (може вважатися електрично відключеним) [1, ст. 2]. Резистор R7, підтягує лінію комунікації на потенціал VDD, оскільки в напівдуплексній формі UART використовують виходи з відкритим колектором(стоком).

При передачі даних формується низький рівень на вході 1 мікросхеми U1, що активує буфер. Також, аби запобігти повторному прийому даних через вхід RX (так званий ехо-сигнал), у МК Atmega328p є можливість апаратно відключити приймач на час передачі.

У випадку прийому на 1 вході U1, формується високий рівень, що переводить його у третій стан, тобто відключає від лінії, запобігаючи вплив передавача на лінію комунікації, а також дає можливість через вбудований TTL UART конвертер CH340 платформи Arduino відсилати вибірково дані на ПК для налагодження системи.

2.5.4 Органи керування

Схема має 8 основних каналів органів керування 4 з яких, аналогові, відповідають положенням осей керування: крен, тангаж, ристання і тяга, решта 4 – цифрові, 2 із них з фіксацією положення, на них як правило назначають Artn, і вибір режиму польоту, решта 2: це кнопки на джойстиках, можуть використовуватись для довільного призначення

Опишемо детальніше *аналогову* частину схеми керування:

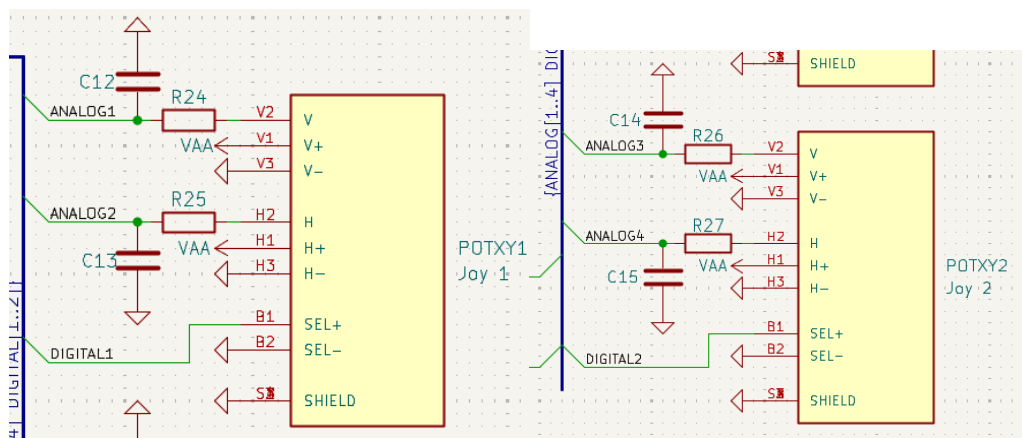


Рисунок 2.10 – Чотири аналогових канали керування разом кнопками на джойстику.

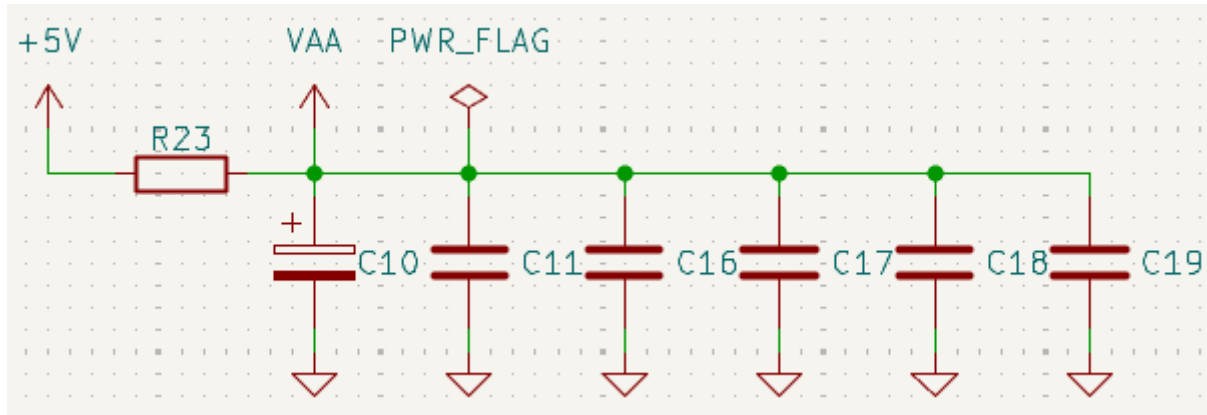


Рисунок 2.11 – Фільтр живлення для аналогової частини схеми.

Розглянемо фільтр напруги живлення аналогової частини схеми

На рис. вище RC ланцюг R23, C10, C11, C16..19 фільтрує високочастотні завади джерела живлення 5 В, він є входним фільтром напруги живлення VAA для усіх чотирьох потенціометрів. Фільтр має блокувати будь-які змінні компоненти напруги живлення, тому значення RC константи потрібно підбирати достатньо велике.

Резистор R23 використаний замість феритового кільця, досить типового у цих схемах, по тій причині, що кільце ефективно тільки на надвисоких частотах. Падіння напруги на ньому може спричинити до ефекту заниженого показань АЦП, якщо в якості його опорної напруги використовується джерело живлення 5 В. МК Atmega328p має змогу підключити зовнішнє джерело опорної напруги, чим і скористаємося.

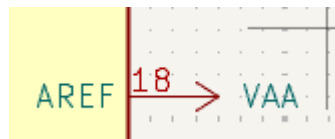


Рисунок 2.12 – Аналогове джерело напруги використовується як джерело опорної напруги для АЦП.

Формула для результату перетворень АЦП виглядає так [4, ст. 215]:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 2^N}{V_{ref}} = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{ref}}$$

де V_{IN} – це вхідна напруга,

V_{ref} – опорна напруга.

N – розрядність АЦП. Для Atmega328p $N = 10$ біт,

З неї зрозуміло, як VAA опорної напруги компенсує падіння напруги на резисторі R23.

Але попри це, не варто обирати його номінал надто великим, оскільки зменшення опорної напруги зменшує крокову напругу. Її можна вирахувати за такою формулою:

$$U_{step} = \frac{U_{ref}}{2^N} = \frac{U_{ref}}{1024}$$

Зменшення крокової напруги для АЦП, означає що вхід стає АЦП більш чутливим до малих коливань рівня вхідного сигналу, а тому різного роду завади отримають більший шанс «спотворити» результат перетворення.

Вирахуємо значення елементів вузла фільтрування VAA.

Конденсатор C10 обрано електролітичний, з великим номіналом: 100 мкФ. Керамічні конденсатори C11 і C16..C19 використано для того, аби компенсувати еквівалентний послідовний опір конденсатора C10, їх значення не надто критичне: оберемо 100 нФ.

Розрахуємо R23 так, щоб падіння напруги на ньому складало 0.1В. Навантаження на лінію VAA є еквівалентним опору 4 паралельно ввімкнених

резисторів, опір яких дорівнює опору потенціометрів, а R_{23} і $R_{\text{навантаження}}$ формують дільник напруг.

$$R_{\text{пот}} = 4,7 \text{ кОм}$$

$$R_{\text{н}} = \frac{R_{\text{пот}}}{4} = \frac{4,7 \text{ кОм}}{4} = 1,175 \text{ кОм}$$

Розрахуємо його. За основу візьмемо, що падіння напруги на R_{18} не має складати більше ніж 0.5 В.

$$\frac{R_{23}}{R_{23} + R_{\text{н}}} \cdot U_{\text{жив}} \leq 0,5 \text{ В}$$

В лівій частині нерівності маємо падіння напруги на резисторі R_{23} . Виразимо звідси R_{23} .

$$R_{18} \leq \frac{0,5 \text{ В} \cdot R_{\text{н}}}{U_{\text{жив}} - 0,5 \text{ В}} \approx 130.5 \text{ (Ом)}$$

Оберемо значення із стандартного ряду Е24 130 Ом.

Фільтри індивідуальних входів. Додатково, на індивідуальних входах АЦП А0..А3, встановлені RC фільтри низьких частот, щоб зменшити рівень завад і шумів потенціометрів, а також для того, щоб задовольнити умови теореми Котельникова і уникнути ситуації накладення сигналу. Річ у тім, що, як було зазначено вище, модуль передавача відправляє сигнали дистанційного керування з певною частотою, і тому доцільно буде зчитувати положення органів керування з цією ж періодичністю. Отже, частота дискретизації положення аналогових органів

керування дорівнює частоті відправки RC пакетів [13, ст. 13-14]. По змовчуванню ця частота дорівнює 200 Гц. Отже,

$$f_{sampling} = 200 \text{ Гц}$$

Згідно теореми Котельникова, максимальна частота сигналу, який дозволяє при дискретизації уникнути накладення сигналу дорівнює [13, ст. 13]:

$$f_{max} = \frac{f_{sampling}}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ Гц}$$

f_{max} (її ще називають частотою Найквіста) і буде максимально допустимою частотою зрізу індивідуальних фільтрів аналогових каналів керування. Важливо розуміти, що в штатній ситуації сигнал з органів керування не змінюється навіть настільки швидко: людина просто не здатна з такою швидкістю рухати органи управління БПЛА, і RC фільтр є найпростішим фільтром першого порядку, тому частоту зрізу слід обирати навіть на нижчому рівні, порядку 30-40 Гц. Еквівалентно схема окремо взятого аналогового каналу керування разом з фільтром виглядає ось так:

Для RC фільтра, значення C буде дорівнювати номіналу конденсатора у схемі, а R утворене з послідовного підключення вихідного опору потенціометра $R_1 \parallel R_2$ і резистора R_3 (як наслідок з теореми Тевенена, потенціометр розглядається як джерело напруги з вихідним опором, що дорівнює опору паралельно ввімкнених опорів, що його складають [12, ст. 9-11]).

$$RC = C \cdot (R_3 + R_1 \parallel R_2)$$

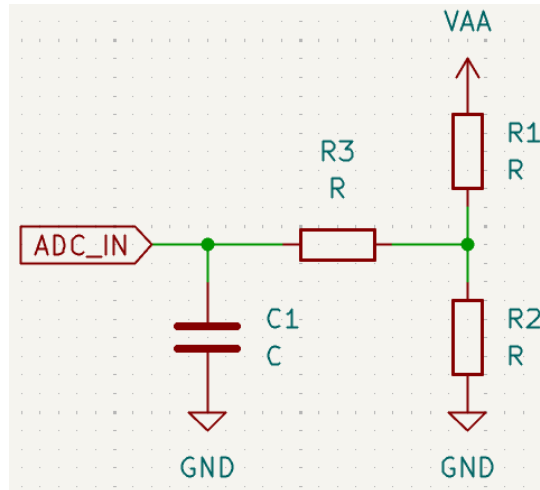


Рисунок 2.13 – Еквівалентна схема аналогового сигналу керування. R1 і R2 формують ланки потенціометра від рухомого контакту до нерухомих

Відразу стикаємося з проблемою того, що вихідний опір потенціометра не постійний, а залежить від його положення: максимальний у середній точці, коли $R_1 = R_2$, і практично нульовий, коли потенціометр в одному з крайніх положень. Для того щоб зменшити вплив цього ефекту, можна збільшити опір резистора R_3 . Номінал R_3 тут потрібно підбирати так, щоб вихідний опір аналогового сигналу був менший за 10 кОм, як того вимагає Datasheet на Atmega328p [4, ст. 212].

Візьмемо значення постійних за такі:

$R_{pot}=4.7$ кОм, $R_3= 4.7$ кОм, $C = 1$ мкФ.

Визначимо частоту зрізу у випадку, якщо $R_1 = R_2 = 0.5R_{pot}$:

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi(R_3 + \frac{R_{pot}}{2})C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot \left(4700 \text{ Ом} + \frac{4700 \text{ Ом}}{2}\right) \cdot 1\text{мкФ}} \approx 22,6 \text{ Гц}$$

У випадку, якщо $R_1 = 0$ чи $R_2 = 0$:

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi \cdot R_3 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 4700 \text{ Ом} \cdot 1\text{мкФ}} \approx 33,9 \text{ Гц}$$

Що є допустимим і дозволяє задовольнити умову теореми Котельника для усіх положень потенціометра.

Час розглянути детальніше цифрову частину схеми керування:

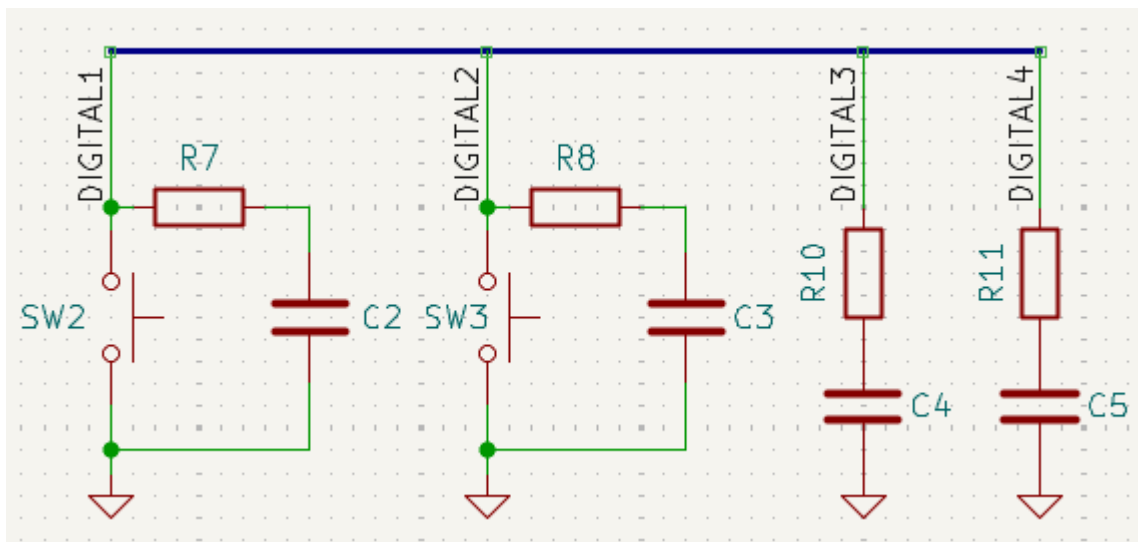


Рисунок 2.14 – Цифрова частина схеми керування. Канали DIGITAL3..4 ідуть від кнопок, встановлених на джойстиках

Характерною особливістю цієї схеми є наявність RC ланок на усіх 4 каналах. Їх основна задача: боротьба з таким явищем, як брязкіт контактів, суть якого зображена на рис. нижче.

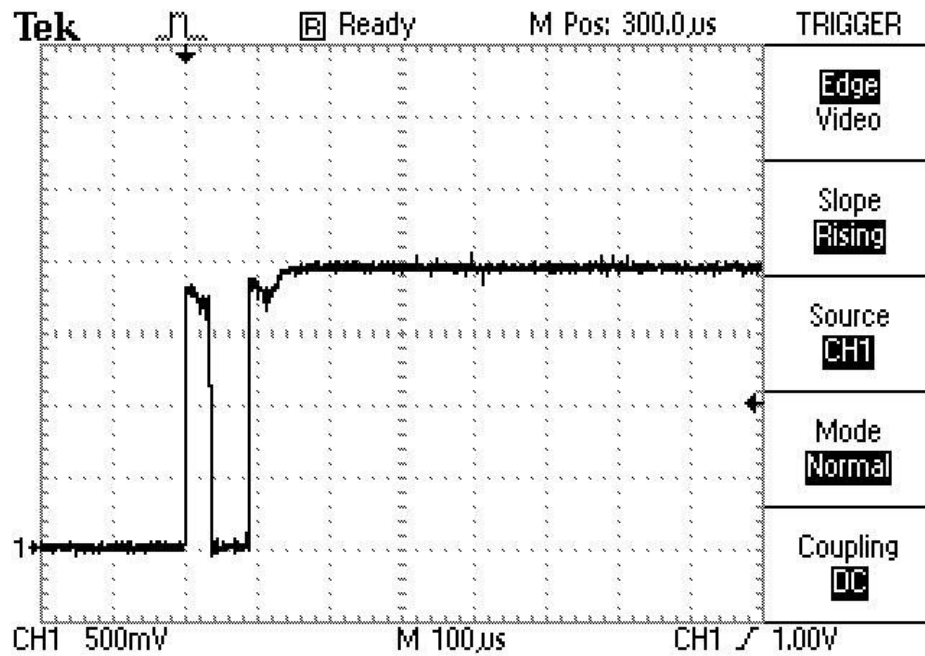


Рисунок 2.15 – Знімок екрану осцилографа, підключеного до кнопки, який демонструє явище брязкоту контактів [5]. Даний рисунок має виключно ілюстративний характер, кожен перемикач буде мати свій унікальний «шаблон» брязкоту

Усі входи цифрових сигналів МК мають бути підтягнені на лінію +5 В внутрішнім резистором, а також мати тригери Шмідта на входах [2, ст.14], що включено в функціонал Atmega328p на апаратному рівні [4]. Після натиснення кнопки конденсатор C2..C5 розряджається через резистори R7..R10, коли кнопку відпускають, конденсатори заряджаються через опір послідовно ввімкнених внутрішніх резисторів і тих, що включені у схему. Datasheet Atmega328p не дає точного значення внутрішніх резисторів, тому доцільно буде налаштувати систему так, аби вона відслідковувала саме спадаючий сигнал при натисненні кнопки, швидкість зміни якого можна контролювати добутком RC: надто велике його значення може призвести до запізненого реагування системи, навпаки, надто маленького може бути недостатньо для повноцінної фільтрації брязкоту. Підібрати

його точно важко: кожен перемикач має індивідуальні характеристики брязкоту. Розрахуємо швидкість реагування системи в залежності від вибраних значень R і C .

Функцію спаду напруги з часом з моменту натиснення кнопки t можна подати у вигляді [2, ст. 14]:

$$U_{out} = U_{charge} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

де U_{charge} – це напруга до якої був заряджений конденсатор, очевидно що в нашому випадку вона дорівнює 5 В;

$\tau = RC$, константа RC ланки.

I/O Pin Input Threshold Voltage versus V_{CC} (V_{IL} , I/O Pin read as '0')

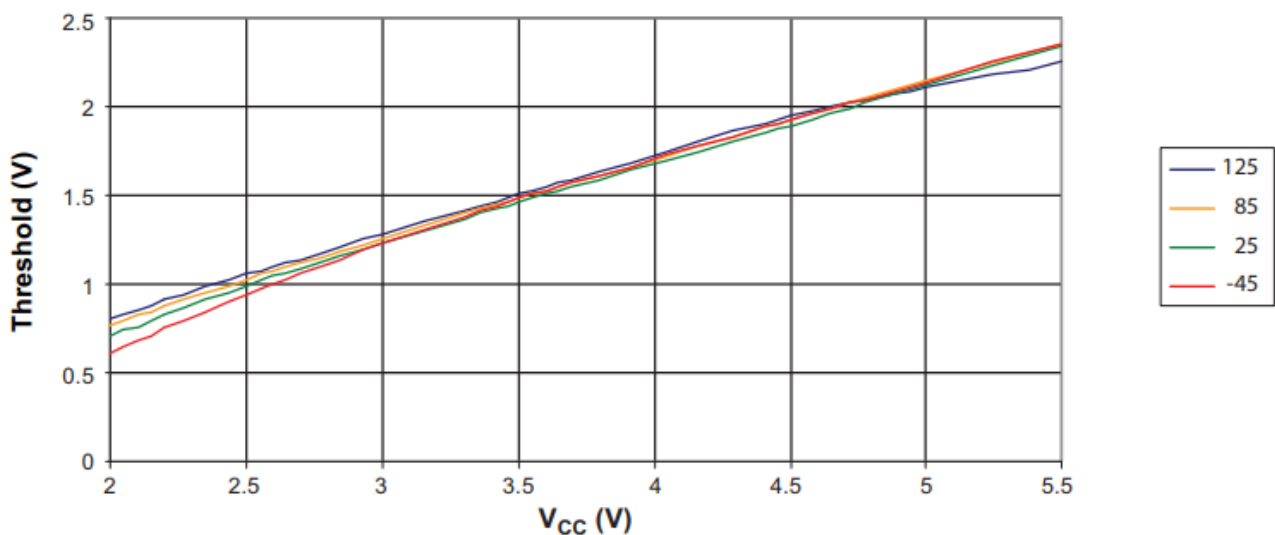


Рисунок 2.16 – Графік залежності порогової напруги для вхідного тригера Шмідта МК Atmega328p, яка зчитується як логічний 0, від напруги живлення [4, ст. 273]

При напрузі живлення у 5В, пороговий рівень зчитування логічного нуля відповідає напрузі приблизно 2.1 В і майже не залежить від температури. Виберемо значення R і C 10 кОм і 220 нФ відповідно. Тоді постійна часу $\tau = RC = 2.2$ мс. Підставивши у формулу ці значення, отримаємо:

$$2,1 = 5 \cdot e^{-\frac{t}{2,2 \cdot 10^{-3}}}$$

$$t \approx 1,9 \text{ мс}$$

Саме стільки пройде часу від моменту натиснення кнопки, до моменту коли рівень напруги впаде нижче рівня, що вважається логічним нулем.

Виходячи з того, що період відправки пакетів дистанційного керування при частоті 200 Гц дорівнює 5 мс, таку швидкість реагування можна вважати прийнятною.

2.5.5 Підсумки розробки принципової схеми

На цьому розгляд основних структурних блоків схеми можна вважати завершеним. Підсумовуючи, усе вище сказане, отримуємо повну схему так, як на рис.

Повний перелік елементів, що розміщено на ній наведено у таблиці 2.5.5.

Таблиця 2.5.5. Перелік елементів схеми

Елемент	Номінал, маркування	Корпус	Виробник	Примітки
Q1	IRF9540	TO - 220	International Rectifier	-
Q2	2N7000	TO - 92	NXP	-
Q3	BC807	SOT - 23	NXP	-
U1	74AHC1G125	SOT - 23-5	NXP	-
A1	Arduino nano (5v 16 MHz)	-	Adafruit	-

D1	1N4148	SOD – 123	NXP	-
D2	1N4148	SOD – 123	NXP	-
SW1	Тактова кнопка d = 6 мм, h = 13мм	-	-	-
POTXY1	KY – 023	-	AZDelivery	-
POTXY2	KY – 023	-	AZDelivery	-
R1	10 кОм	SMD 1206	-	-
R2..R6	1 кОм	SMD 0805	-	-
R6	4.7 кОм	SMD 0805	-	-
R7, R15, R20, R21	10 кОм	SMD 1206	-	-
C5..C8	220 нФ	SMD 0805	-	-
R8..R14 і R17..R18	100 кОм	SMD 0603	-	Реститори, які підтягують невикористані виходи Arduino. Значення не критичне
R16	1 кОм	SMD 1206	-	-
R19 і R22	4.7 кОм	SMD 1206	-	Ряд E96
C9	100 нФ	SMD 0603	-	-
C10	100 мкФ	5mm*6mm SMD	-	-
C11	100 нФ	SMD1206	-	-
C16..C19	100 нФ	SMD1206	-	-
R23	130 Ом	SMD1206	-	-
R24..R27	4.7 кОм	SMD1206	-	-

C12..C15	1 мкФ	SMD0603	-	-
J1	Роз'єм	JST B05B-XASK- 1	-	-

2.6 Проектування друкованої плати

2.6.1 САПР KiCad. Основні поняття

Для проектування друкованої схеми було використано середовище автоматизованого проектування KiCad, який є безкоштовним, легким в освоєнні, має багату бібліотеку і активно підтримується користувачами.

Пакет розробки KiCad дає можливість експортувати готовий рисунок ДП у gerber-файл, який вимагають виробники друкованих плат. За бажанням чи необхідністю, ДП можна виготовляти і власноруч, роздрукувавши її рисунок.

Найбільша одиниця розробки проект KiCad: проект. Проект репрезентує якийсь електронний виріб, який має свою принципову схему і друковану плату. Схема пристрою і рисунок ДП створюються окремо, причому програма дає можливість автоматично визначити можливі шляхи проведення доріжок між елементами, дає змогу з легкістю виявити помилки в проектуванні, такі як: неправильне підключення, коротке замикання, недотримання вимог мінімально допустимих відстаней, відсутність усіх провідників на друкованій платі. Спочатку накреслюють схему пристрою і вже після цього приступають до створення друкованої плати.

Запорукою її успішного створення є правильність усіх електричних з'єднань згідно принципової схеми пристрою. Зрозуміло, що остаточна правильність усіх електричних з'єднань залишається відповідальністю того, хто створює схему, оскільки KiCad лише *відображає* електричні схеми, а не є їх симулятором.

Варто більш детально описати базові терміни, які використовує KiCad для розуміння схем. У термінології KiCad кожен елемент, який можна побачити на схемі є умовним символом. Символ репрезентує якийсь реальний компонент на платі – роз’єм, резистор, різноманітні інтегровані схеми та інше. Сучасна бібліотека має символи для дуже великої кількості електронних компонентів. Кожен символ має свої входи/виходи, визначені на етапі його створення. Проте символ має більш абстрактну сутність, для того, аби розмістити його на друковану плату, існують посадочні місця (*footprint*) для кожного елемента схеми. Деякі елементи мають посадочне місце по замовчуванню, проте для більшості його доведеться назначати власноруч, оскільки KiCad не знає які номінали конденсаторів чи резисторів будуть використовуватись в схемі, чи в якому корпусі буде використаний той чи інший транзистор. Щоб назначити посадочне місце, потрібно виділити елемент натисненням лівої кнопки миші, потім через меню *Properties*, вибравши його із контекстного меню, або натиснувши літеру E на клавіатурі. Альтернативним шляхом для цього є меню *Tools -> Assign Footprints*, також там перераховані усі елементи з їхніми відповідними посадочними місцями, тому через нього зручно перевіряти, чи усім елементам поставлено у відповідність свій footprint.

Вузли(*Nets*) у KiCad - це провідники, які з’єднані між собою, та які з’єднують разом декілька елементів. Наприклад лінія живлення VDC вважається вузлом, і включає у себе усі провідники, які електрично з’єднані між собою і з’єднують відповідні входи живлення усіх елементів, що підключені до них.

Клас вузлів (*NetClasses*) у KiCad – умовно дозволяють об’єднати довільну кількість вузлів, які мають однакові параметри у один клас, аби спростити і пришвидшити процес створення і редагування кожного з них.

2.6.2 Послідовність проектування ДП

Умовно процес створення друкованої плати в KiCad має наступну послідовність:

У редакторі схеми:

1. Додавання символів до плати, або імпорт/створення нових, якщо таких немає у стандартній бібліотеці
2. Проведення з'єднань згідно схеми пристрою, що розроблюється
3. Анотація вузлів, критичних для схеми, для спрощення їх використання у процесі розведення друкованої плати, анотація елементів
4. Перевірка правильності побудови електричної схеми за допомогою вбудованого інструменту *Electrical Rules Checker*

У редакторі друкованої плати:

1. Визначитись з основними параметрами плати такі як: матеріал діелектричної основи, її товщина, кількість мідних шарів, їх товщина, основні вимоги та обмеження на розміщення елементів і трасування провідників
2. Додавання і розміщення елементів згідно правил дотримання електромагнітної, теплової сумісності
3. Визначити усі класи і поставити їм у відповідність вузли.
4. Трасування доріжок, розміщення перехідних отворів, заливка суцільними поверхнями
5. Перевірка правильності проектування за допомогою вбудованого інструмента *Design Rules Checker*.

Ці етапи не обов'язково ідуть саме у цій послідовності, людина, яка створює плату, може виконувати ці дії у довільному порядку, єдиним виключенням є те що в кінці обов'язково повинна слідувати перевірка правильності проектування.

Розглянемо основні нюанси кожного перерахованого етапу проектування друкованої плати.

2.6.3 Редактор схем. Деякі деталі створення схеми

При розробці електричної принципової схеми можна зіткнутися з тим, що стандартна бібліотека KiCad не має потрібних символів і посадочних місць. У цієї проблеми є два способи рішення: знайти відповідний символ чи посадочне місце в мережі, або, якщо такого не знайшлося, створити свій.

Додати бібліотеку можна через сторінку проекту, у пункті *Preferences*, далі *Manage Symbol Libraries*, чи *Manage Footprint Libraries*. У вкладці *Global Libraries* можна додати бібліотеки, які буде видно у всіх проектах, крім того, можна відключити, ті, які не використовуються, аби зберегти об'єм оперативної пам'яті комп'ютера. У вкладці *Project Specific Libraries*, можна додати бібліотеки, які використовуються лише у відкритому проекті.

Для створення посадочного місця потрібно відкрити *Symbol Editor* у пункті *Tools*. Детальніше на цьому пункті не будемо зупинятися, оскільки в даній роботі не було потреби створювати власний символ.

При проведенні провідних з'єднань на схемі, часто виникає ситуація, коли для зручності замість безпосередніх з'єднань використовують так звані *мітки (Labels)*. У KiCad мітки бувають глобальні і ієрархічні. Останні використовуються і досить складних і великих проектах, тому зупинимось на глобальних. Для того, аби з'єднати два провідники, чи виходи/входи елементів на схемі, потрібно до обох підключити мітку з однаковою назвою. Використання міток дозволяє уникнути загромождження схеми і є досить поширеним у професійній діяльності.

Також потрібно пам'ятати деякі деталі реалізації того, як KiCad розуміє, які провідники є сигнальними, а які відповідають за живлення. Для позначення

провідників, що проводять живлення, використовуються символи, які його позначають, так звані *Power Symbols*. *PWR_FLAG* у символах живлення позначає провідник, по якому надходить живлення, решта по замовчуванню вважаються сигнальними. Також символи живлення містять спеціальні мітки, наприклад VDD чи VAA, VDC, VAC, GND, Chassis та ін., якими зручно позначати лінії живлення. Ці мітки працюють так само, як і звичайні. Також бувають ситуації, коли деякі виходи/входи елементів не потребують підключення, для того, щоб програма це розуміла, потрібно позначити їх спеціальним символом *No Connection Flag*.

Для вузлів, що утворилися в результаті створення з'єднань, *KiCad* автоматично назначає ім'я, яке можна змінити на власне за допомогою мітки *Net Label*. При розміщенні символів літерно-номерні індекси назначаються автоматично. Зазвичай літеру визначає тип символу: для конденсаторів це літера C, для транзисторів літера Q і так далі. Номерні індекси зростають у порядку розміщення елементів. Якщо існують вимоги до індексування елементів на схемі строго справа-наліво, зверху-вниз, можна скористатися пунктом *Tools->Annotate Schematic*.

Перевірка правильності електричної принципової схеми *Inspect->Electrical Rules Checker* є бажаною у маленьких проектах і обов'язковою у великих, тому що дозволяє виявити багато помилок ще на етапі створення. Варто переконатись у відсутності помилок, і бажано, у відсутності попереджень.

Після назначення усіх посадочних місць можна переходити безпосередньо у редактор друкованої плати.

2.6.4 Перехід у редактор друкованої плати. Основні параметри плати, визначення допусків по розмірах і розміщеннях

Визначимося з *основними параметрами плати*. Перше, що потрібно зауважити, це те, що буде використовуватись двошарова плата, її основою буде

матеріал діелектрика FR4. Наявність двох шарів спростить процес розробки плати і забезпечить покращену електромагнітну сумісність елементів на ній.

Важливо також ввести обмеження на трасування і розміщення елементів, цього вимагають усі виробники друкованих плат, і якщо їх не дотриматись, вартість виробу може суттєво зрости. Усі ці обмеження перераховані в пункті меню

File -> Board Setup -> Design Rules -> Constraints

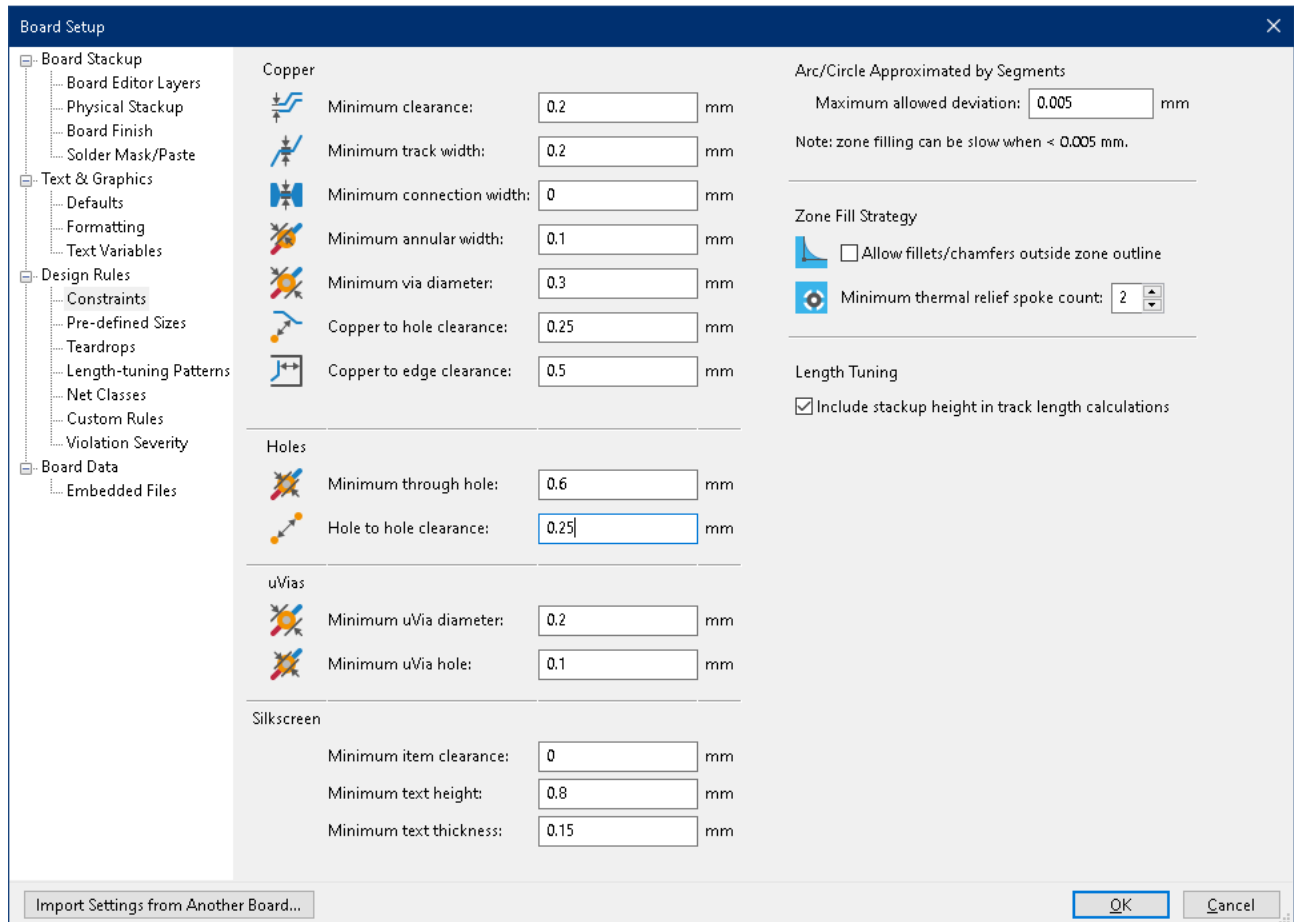


Рисунок 2.17 – Вікно налаштування обмежень

Коротко перерахуємо ті з них, які мають найбільше для нас значення:

- Minimum clearance - Мінімальна відстань між доріжками. Виберемо значення 0,2 мм.
- Minimum track width - Мінімальна ширина доріжки. Виберемо значення 0,2 мм

- Minimum connection width - Мінімальна ширина з'єднання. Не досить суттєво, тому можна обирати 0 мм
- Minimum annular width – Мінімальна товщина, на яку металізований отвір має бути більшим за доріжку. Виберемо значення 0,1 мм.
- Minimum via diameter - Мінімальний діаметр перехідного металізованого отвору. Виберемо значення 0,3 мм
- Copper to hole clearance - Мінімальна відстань отворів до найближчого провідника. Виберемо значення 0,25 мм
- Copper to edge clearance - Мінімальна відстань доріжок до найближчого краю плати. Виберемо значення 0,5мм.
- Minimal through hole - Мінімальний діаметр наскрізних отворів. Значення 0,6 мм має бути достатньо
- Hole to hole clearance - Мінімальна відстань між наскрізними отворами. Лишимо значення по замовчуванню 0,25 мм.

2.6.5 Основні класи вузлів схеми

Крім розміщення елементів, не меншу роль грають параметри провідників, які їх з'єднують. Крім мінімально допустимих вимог, ми маємо можливість редагувати параметри окремо для кожного вузла за допомогою вікна налаштувань *File -> Board Setup -> Design Rules -> Net Classes*. У цьому вікні створюються класи вузлів, для яких треба вказати їх основні параметри: назву, товщину провідника (*Track Width*), мінімальну відстань до інших провідників (*Clearance*), зовнішній і внутрішній перехідного отвору (*Via Size* і *Via Hole*) та ін.. По замовчуванню існує клас *Default*, він ставиться у відповідність усім вузлам. За необхідністю, вузлам назначаються інші класи, як-от, наприклад, вузлам живлення +Batt, +VDC ставиться у відповідність клас VDC, після того усі з'єднання які відносяться до цього вузла, переймають

параметри які вказано у цьому класі. Перечислимо основні класи вузлів, які використовуються на платі.

- ❖ Клас VDC використовується для вузлів акумуляторного живлення
 - Ширина доріжки має бути великою: 1,5 мм
 - Вимоги до мінімальної відстані між провідника і доріжками не строгі, оскільки напруги живлення досить малі: 0,2 мм
- ❖ Клас Digital використовується для цифрових ліній комунікації.
 - Ширина доріжки має бути дещо більшу за решту: 0,7 мм
 - Мінімальну відстань в даному випадку варто підібрати більшу, щоб зменшити перехресні перешкоди між лініями цифрових і рештою сигналів:
- ❖ Клас Analog використовується для аналогових сигналів
 - Ширина доріжки не є критичною

2.6.6 Додавання посадочних місць на плату, їх розміщення, визначення способу заземлення

Щодо безпосереднього процесу трасування друкованої плати, спершу потрібно додати усі посадочні місця. Натисненням *Tools -> Update PCB from Schematics* відкриваємо вікно, у якому натискаємо кнопку *Update PCB*. Впевнюємося, у відсутності помилок додавання, це означає що усі посадочні місця повністю відповідають символам, використаним у схемі.

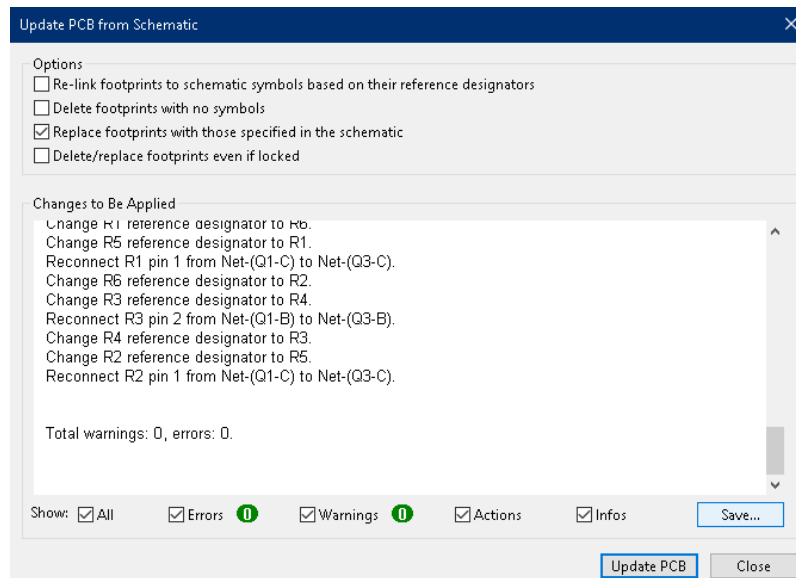


Рисунок 2.18 – Вікна додавання посадочних місць

Після того, як посадочні місця додані, визначимось з розміщенням елементів.

Електромагнітна сумісність різних компонентів плати є основним критерієм розміщення елементів на ній.

Оскільки схема складається з цифрової частини – це зв'язок з модулем передавача, і аналогової – це сигнали основних органів керування, їх варто розмістити роздільно у окремі частини ДП: між ними має зберігатися деяка відстань, аби виключити можливість цифрових сигналів впливати на чутливі аналогові органи керування. Насамперед, потрібно максимально відділити ті цифрові сигнали, які мають велику швидкість наростання, тому що саме вони створюють найбільшу частину електромагнітних високочастотних завад. По цій самій причині кнопки з фільтром брязкоту можна сміливо встановлювати близько до аналогових каналів, тому що, завдяки RC ланкам, сигнал має досить пологі передні та задні фронти, і не здатен суттєво впливати на якість аналогового сигналу (перехресні перешкоди пропорційні похідній вхідного сигналу по часу).

Також для збільшення електромагнітної сумісності між аналоговою і цифровою схемою не менш важливою вимогою є дотримання правильної розводки

заземлення. У аналоговій частині не передбачується сигналів, що можуть змінюватись швидко, тому там це не настільки критично. Набагато більшу роль заземлення грає цифровій частині схеми: потрібно помістити провідники сигналу якомога ближче до заземлення, це суттєво зменшить паразитну індуктивність ліній передачі інформації [6, с.189-191]. Типовим і широкоживаним рішенням у таких ситуаціях є використання другого шару плати лише для заземлення, тоді як на першому міститься живлення і сигнали. Звісно, такий підхід ускладнює процес трасування плати, оскільки відпадає можливість використовувати нижній шар для інших провідників. По цій причини, комерційні виробники ДП, прибігають до використання трьох, чотирьох, або навіть більше шарів, проте це суттєво збільшує складність вартість виробу і зменшує його ремонтпридатність. В нашому випадку високошвидкісні цифрові сигнали пробігають лише по досить обмеженій області плати, саме там і діє це обмеження. На решті плати дозволяється використовувати обидва шари для трасування, оскільки це не вплине суттєво на її характеристики.

Для створення суцільної площини заливки, потрібно обрати опцію *Draw Filled Zones*, в меню справа. В вікні потрібно обрати шари плати на яких відбудуватиметься заливка, в нашому випадку будемо виконувати заливку як на нижньому, так і на верхньому. Далі слід обрати вузол, для якого буде проводитись заливка, тобто *GND*. В меню *Pad Connections* обираємо *Thermal Reliefs*. Обравши цю опцію, заливка буде підключатись до посадочних місць тонкими з'єднувачами для того, щоб зменшити тепловіддачу великим площамі міді під час пайки. В якості *Fill Type* вибираємо суцільну заливку *Solid fill. Remove Islands* встановлений в *Always*, що візуально дасть змогу легко виявити електрично ізольовані області суцільної заливки, так звані «острови», які нівелюють усі переваги суцільної площини заземлення. Після того, як обрано основні параметри окреслюємо контури майбутньої заливки, які мають співпадати з контуром друкованої плати. Для безпосередньої заливки потрібно натиснути клавішу *B*, але після того, як було повністю виконаня процес трасування

плати. Комбінацією Ctrl + B, можна тимчасово прибрати заливку, якщо потрібно змінити трасування плати.

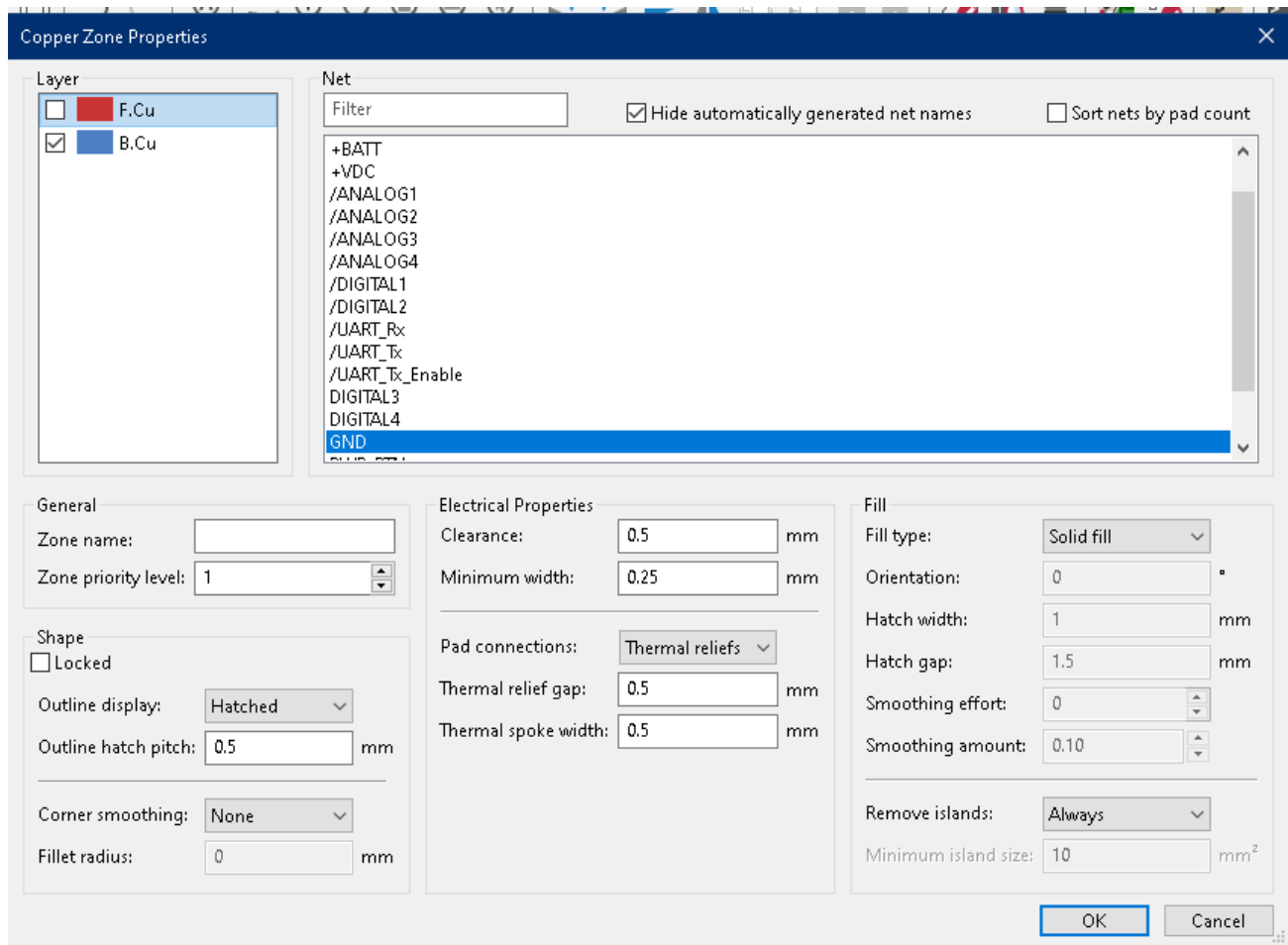


Рисунок 2.19 – Вікно редагування параметрів суцільної заливки

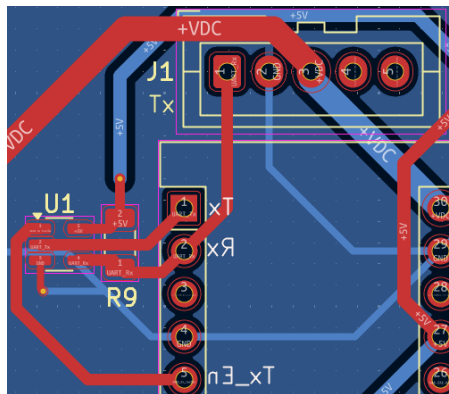


Рисунок 2.20 – Цифрова лінія обміну даними між платою (Виходи Tx, Rx, Tx_En) і конектором J1. Синя заливка відповідає суцільній площині заземлення на задній частині ДП

Як видно, єдине місце, де ділянка заземлення не перекриває цифрові сигнали – це безпосередньо посадочні місця модуля Arduino. Цей недолік виникає з використання компромісного рішення панельного підключення Arduino.

Аналогова частина не містить у собі сигналів, які швидко змінюються, тому вимоги до її проектування дещо простіше задовільнити. Вихідні RC фільтри для аналогових сигналів варто розташувати якомога ближче до входів АЦП Arduino, щоб мати змогу фільтрувати завади на усій довжині провідника аналогового сигналу. В даному випадку довжини цих провідників є досить великими, що може призвести до збільшення кількості наведень у них. Це вимушена міра, тому що потрібно розмістити органи керування так, щоб ними було зручно користуватись.

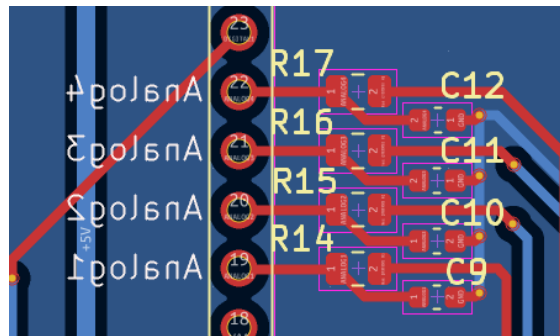


Рисунок 2.21– Аналогові RC фільтри низьких частот

Розв'язувальні фільтруючі конденсатори живлення розміщені максимально близько до потенціометрів. Провідники аналогового живлення і сигналу є досить широкими, з мінімальною кількістю заворотів.

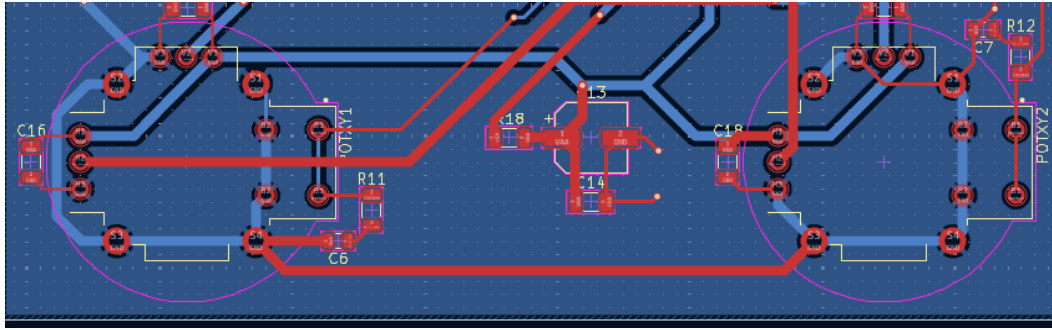


Рисунок 2.22 – Аналогова частина схеми

2.6.7 Трасування провідників і заливка суцільних областей

Трасування доріжок слід виконувати по можливості найбільш коротшим шляхом, який з'єднує контакти, з мінімальною кількістю розгалужень, заворотів, по можливості уникати поворот провідника на кут більше ніж 90° .

Чим менший розмір друкованої плати, тим менше вартість її виготовлення, тому усі компоненти потрібно розміщувати компактно, не забуваючи про правила електромагнітної сумісності, які було розглянуто вище. Задля підтримки високого естетичного рівня вигляду виробу варто однакові вузли, провідники та інше виконувати симетрично. Для того щоб провести провідник, натискаємо клавішу *X*, або обираємо пункт *Route Single Track* в меню зліва. Після цього курсор миші автоматично дотягується до контактних доріжок. Класи вузлівзначаються автоматично.

На цьому розгляд основних моментів проектування друкованої плати закінчено. Після остаточних трасувань доріжок натискаємо клавішу *B*. Окреслимо контур ДП за допомогою прямокутника, що дасть змогу визначити її розмір. Загальний вигляд ДП можна побачити на рисунку нижче.

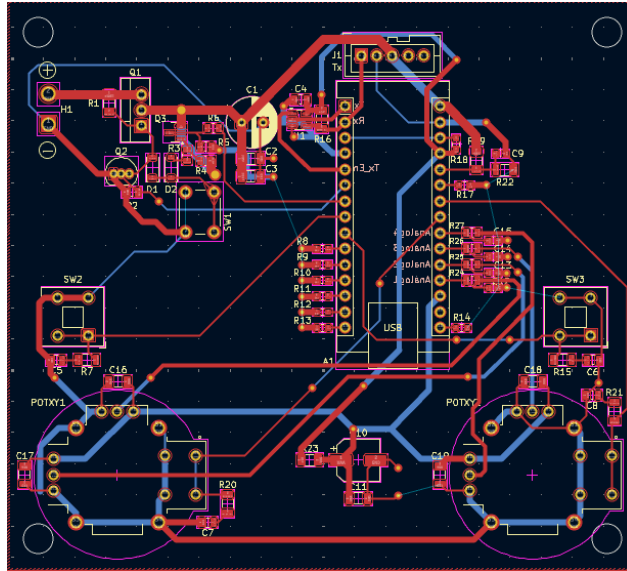
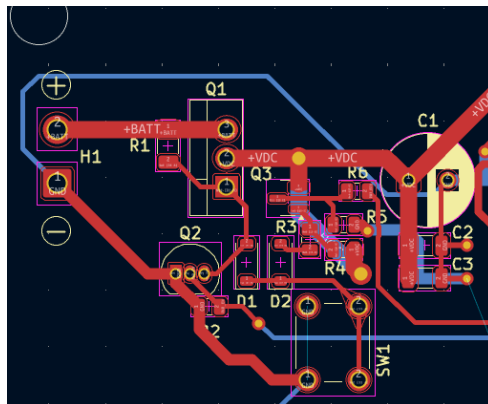


Рисунок 2.23 – Загальний вигляд ДП без заливки

2.6.8 Деякі механічні деталі реалізації вибору

Для живлення на плату відведено дві окремі контактні площадки, до яких будуть підпаюватись провідники. Ці провідники можна буде окремо вивести на акумуляторну батарею напругою, чи через роз'єм, зазвичай використовуваний у цих випадках, наприклад XT30. Через вузли +Batt і +VDC буде проходити струм живлення модуля передавача, який споживає найбільший струм у цій системі, для їх проведення будуть використовуватись провідники шириною 1,5 мм.



Комунікація з модулем передавача. Для з'єднання з модулем передавача, на платі є роз'єм JST серії ХА на 5 виходів.

Для визначення розміру плати потрібно окреслити форму, в якій будуть заключатися краї плати. Найпростіша форма плати – прямокутник, її і використаємо. Для цього на шарі під назвою Edge. Cuts креслимо прямокутник, який і буде обрамляти контури плати. Кінцеві розміри плати

Ширина – 101,6 мм (40 дюймів)

Висота - 91,44 мм (36 дюймів)

Для кріплення плати на корпус у діелектричній основі передбачено 4 отвори радіусом 2,54 мм (1 дюйм), біля вершин прямокутника, щоб обмежує плату. Для того аби їх розмістити, потрібно накреслити кола відповідних діаметрів на шарі Edge. Cuts. Відстань від країв монтажних отворів до країв плати становить 2,54 мм.

2.7 Підсумки конструкторського розділу.

На цьому етапі можна вважати, що основні моменти створення електронного приладу ми покрили. Ось ті етапи, які ми подолали:

- Розробили принципову електричну схему. Визначились з основними номіналами елементів, які туди входять.
- Створили рисунок друкованої плати, відповідно до цієї схеми

Ці міркування хоча і важливі, проте залишаються суто теоретичними. Пророблену роботу можна вважати створенням креслення майбутнього проекту. Саме цим займаються команди розробників. Безпосередньо фізичний процес створення друкованої плати називається її виготовленням, а процес розміщення і пайки на ній компонентів називається її збіркою. Більше про два останніх йтиметься у Технологічному розділі.

3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Основні поняття, що використовуються у індустрії створення друкованих плат

В минулому розділі йшлося про проектування креслення друкованої плати, та крім цього слід поговорити про процедуру її виготовлення. Спочатку окреслимо основні поняття.

Друкована плата на даний час є основою будь якого електронного виробу практично будь-якої складності. Зрозуміло, що це є зручним способом з'єднання між собою електронних компонентів, прийшовши на заміну таким технологіям, як от, наприклад, навісний монтаж.

Матеріалом основи є діелектрик, такий як текстоліт, склотекстоліт, гетинакс. Відповідно кожна друкована плата має декілька струмопровідних рисунків – відповідно, якщо плата одностороння, на одному з боків, якщо двостороння, то з обох боків. Плати, що мають 3 і більше шари називають багатошаровими, технологія їх виготовлення більш складна і передбачає нашаровування один на одного діелектричних і провідних шарів.

Оскільки одношарові плати (One-layer PCB в західній термінології) мають лише один струмопровідний рисунок, тому тут проблемою постає трасування провідників, що ідуть перпендикулярно. За рахунок цього фактору зростає складність трасування такої плати, у місцях де розташувати з'єднання не перпендикулярно неможливо, використовують так звані перемички – резистори з нульовим опором, або металеві дроти. Історично, цей вид друкованих плат з'явився найпершим, і наразі поступається більш технологічним. Незважаючи на це, попит на односторонні плати залишається високим, в першу чергу, через їх низьку вартість.

Особливо односторонні плати актуальні для виробництва відносно нескладних виробів.

Двосторонні плати (Double-layer PCB в західній термінології) значно полегшують процес створення електронних пристроїв, вирішуючи постійну проблему трасування перпендикулярних провідників, від якої страждають односторонні ДП. При однаковій складності електронної схеми, розумно розведена двостороння плата буде завжди легшою і компактнішою. Проте, зрозуміло, що за рахунок наявності перехідних отворів, їх створення є більш складним процесом, а слідом і більш дорогим, ніж створення односторонньої, проте все рівно значно дешевшим, ніж створення багатошарових. Цей вид плат є найбільш поширений, саме через те, що у більшості випадків вони зберігають баланс між кількістю струмопровідних шарів, і вартістю виробництва.

Багатошарові плати (Multi-layer PCB в західній термінології). Містять три або більше струмопровідних шари. Є досить складними, вимагають сучасного устаткування, і є найдорожчими у виготовленні. Використовуються в основному для створення складних пристроїв, з величезною кількістю електричних з'єднань і строгими вимогами до величин паразитних ємностей і індуктивностей. Зрозуміло, що чим більша кількість шарів, тим більша вартість створення друкованої плати.

Гнучкі плати (Flexible PCB). Діелектричною основою таких плат є гнучкий матеріал. Завдяки гнучкості, можна надати їй таку форму, яка дозволяє вмістити її у будь-який корпус, саме тому її підвид – так звані шлейфи, використовуються для з'єднань майже в усіх портативних пристроях. Також, за рахунок гнучкості, ці плати дозволяють використовувати їх у пристроях, які можуть зазнавати значних вібрацій при роботі, оскільки гнучка поверхня значно краще амортизує, ніж тверда.

Крім того, для розуміння процесів створення даного виробу потрібно розумітися на деяких термінах, ось основні з них:

Фотолітографія – спосіб перенесення рисунків друкованих плат на основу за допомогою світлочутливих матеріалів - фоторезистів

Фоторезист – світлочутливий матеріал, який полімеризується, простіше кажучи, твердішає, під дією ультрафіолетового випромінювання. Використовується у методі фотолітографії. Його використання передбачає два етапи: експонування – безпосередня дія на нього УФ випромінювання, за яким слідує проявлення – розкриття рисунка за рахунок видалення тих ділянок, які не підлягли експонуванню.

Фольгований текстоліт – діелектричний матеріал, який покритий тонким шаром провідного металу, зазвичай це мідь.

Паяльна маска – термостійкий матеріал, що використовується для захисту друкованих провідників чи полігонів від раптового потрапляння припою на них під час пайки. Також надає ізолюючі властивості, і надає друкованій платі характерного вигляду (найчастіше, використовується зелена паяльна маска, проте це не є принципіальним).

Gerber-файл – це відкритий формат плоского векторного зображення, який став стандартом для описання рисунків друкованих плат.

Позитивний рисунок друкованої плати – збігається з її gerber файлом.

Негативний рисунок друкованої плати – є протилежним відображенням gerber файлу: пусті ділянки рисунку заповнюються, а ті, які у файлі були заповненими, навпаки, залишаються пустими.

Під час створення виробу усі методи опираються на формування рисунку на певній поверхні. Для цього є декілька методів: офсетохімічна, сітко-хімічна і фотохімічна. Зупинимось лише на останній. Саме вона передбачає використання фоторезисту.

Є два методи експонування фоторезисту: класичний і прямий.

Класичний ґрунтується на використанні масок: прозорих плівок, на яких нанесений фотошаблон. Відповідно, плівку прикладають щільно до фоторезисту, а

рисунок на ній захищає непотрібні ділянки від УФ випромінювання. Цей метод з'явився перший.

Інший метод, прямий, заключається в тому, що фоторезист піддається експонуванню напряду на спеціальному обладнанні, або під дією зфокусованого променя який направляється системою дзеркал, або дією монотонного випромінювання, що пропускається через спеціальну керовану матрицю.

По відношенню до класичного методу, прямий має перевагу в точності, але вимагає дороговартісного обладнання.

Надалі, коли йтиметься що фоторезист піддається експонуванню згідно позитивного/негативного рисунка плати, матиметься на увазі саме пряме експонування. Відповідно, для того, щоб класичним методом отримати результат співставний пряму експонуванню згідно позитивного рисунка плати, потрібно використовувати *фотошаблон в негативі* і навпаки.

3.2 Способи виготовлення друкованих плат і їх відмінності

Способів виготовлення друкованих плат існує безліч: від найпростіших, які не важко відтворити навіть у себе удома, до найбільш складних і професіональних, які вимагають спеціальних навичок, обладнання і досвіду. Розглянемо лише основні з них, які використовуються найчастіше з певних міркувань (яких саме, стане відомо згодом).

Субтрактивний метод полягає в тому, щоб на ламінованій основі витравити ті ділянки, які є зайвими (звідси і назва, subtract – віднімання, в даному випадку непотрібного). Для цього:

1. Шматок фольгованого матеріалу проходить механічно хімічно обробку для кращої адгезії і знежирення поверхні.
2. На шар міді наноситься фоторезист.

3. Фоторезист піддається експонуванню згідно *позитивного рисунка ДП*
4. Далі йде проявлення фотошаблону.
5. Ті ділянки міді, які мають залишитися на основі, тепер закриті фоторезистом, решта піддається травленню у кислотному розчині.
6. Свердління, якщо плата передбачає монтаж у наскрізні отвори

На цьому етапі варто зазначити, що видалити зайву мідь з поверхні основи можна не тільки хімічним способом. Проте саме хімічний спосіб залишається найпоширенішим, через простоту і швидкість використання. Опишемо його дещо детальніше:

Недоліками даного методу є: можливі великі об'єми не використаної міді, утилізація травильних розчинів, неможливість отримання перехідних отворів між верхнім і нижнім шаром плати.

Альтернативою є адитивний метод. Він полягає у тому, щоб на чистій діелектричній основі наростити необхідні ділянки міді за допомогою хімічного осадження (тобто, add - додати). Для цього:

1. Неламіновану діелектричну основу механічно і хімічно обробляють для кращої адгезії фоторезисту і мідного покриття
2. Формування наскрізних отворів
3. На основу наноситься фоторезист
4. Фоторезист піддається експонуванню згідно *негативного рисунка ДП*.
5. Проявлення фотошаблону. Формується малюнок ДП.
6. Плата проходить етап хімічного міднення до товщини приблизно 30 мкм.
7. Видалення фоторезисту.
8. Нанесення паяльної маски, лудіння контактних площадок
9. Контроль якості

Цей метод забезпечує надійну металізацію наскрізних отворів, високу точність рисунка, дозволяє економити мідь. Із недоліків треба виділити те, що процес займає

до 17 годин, крім того, з цього випливає, що потрібно використовувати фоторезисти, що можуть бути стійкими до лужного середовища протягом такого тривалого часу [29, ст. 35].

Порівняємо дещо ці методики.

Як вже було зазначено, підібрати потрібний фоторезист для адитивного методу важче, оскільки в основному вони виготовляються так, аби бути стійкими до кислотних середовищ, тоді як процес хімічного міднення відбувається в лужному. Ще однією принциповою різницею цих методів є те, що адитивний метод дозволяє реалізувати металізацію перехідних отворів, що беззаперечно є його основною перевагою.

Комбіновані або напіваадитивні методи передбачають використання субтрактивних і адитивних методів в одній технології і використовуються головним чином для виробництва двошарових плат, тому що спрощують проблему формування металізованих перехідних отворів. В цих методах металізацію перехідних отворів виконують шляхом хімічного осадження. Згодом, за допомогою електролізу, на тонкому покритті отворів нарощується потрібна товщина міді [29, ст. 39].

Найбільше поширення отримав комбінований позитивний метод. Його етапи можна описати так:

1. Заготовкою є фольгований текстоліт. Його поверхня обробляється для кращої адгезії.
2. Формування отворів.
3. Створення струмопровідного шару на стінках отворів шляхом хімічного міднення.
4. Нанесення фоторезисту
5. Фоторезист піддається експонуванню згідно *негативного* рисунка друкованої плати.

6. Проявлення фотошаблону. Поверхні провідників і перехідних отворів стають відкритими.

7. Додаткове нарощування шарів і перехідних отворів до потрібної товщини шляхом гальванічного осадження.

8. Гальванічне нарощення металорезисту. Ним покриваються усі струмопровідні ділянки.

9. Видалення фоторезисту.

10. Травлення міді. Завдяки металорезисту, нанесеному на кроці 8, ділянки провідників і перехідних отворів повністю захищені, травленню піддаються лише ділянки, що були захищені фоторезистом.

11. Видалення металорезисту.

12. Нанесення паяльної маски.

Як видно, цей метод комбінує в собі технології адитивного (хімічне міднення поверхонь) і субтрактивного (травлення усієї поверхні плати, яка не захищена металорезистом).

Комбіновано негативний метод є дещо простішим, його можна описати так:

1. Травлення плати згідно субтрактивного методу (етапи 1-5)
2. Покриття захисним лаком
3. Формування наскрізних отворів
4. Металізація отворів шляхом, спочатку хімічного міднення, згодом гальванічного нарощення.

5. Зняття лаку

Тут важливо підмітити, що, у субтрактивного і комбінованого негативного методу етап свердління відбувається у завершальних стадіях циклу виробництва. І навпаки, у адитивного і комбінованого позитивного методу етап свердління відбувається на початку. Ця, на перший погляд, не суттєва різниця, має вирішальне значення у використанні цих методів. Досить довгий час свердління плат

виконувалося вручну, і очевидно, що набагато легше правильно просвердлити плату з готовими струмопровідними рисунками як у випадку субтрактивного і комбінованого негативного методів. Проте поява свердлувальних верстатів з програмним управлінням вирішила цю проблему, і дозволила в повному обсязі використовувати комбіновано позитивний метод.

Чому комбінованому позитивну методі надають перевагу перед комбіновано негативним? Тут є декілька причин. Перша з них це те, що для гальванічного нарощування стінок перехідних отворів у комбіновано негативному методі виникає необхідність з'єднувати їх усіх електрично з катодом електролітичної ванни. Крім того, якщо лакове покриття буде покрито недбало (етап 2 негативного методу), є шанс потрапляння мідної плівки в непотрібні ділянки плати, погіршуючи її ізолюючі властивості. Недоліки ж позитивного методу перед негативним не є настільки критичними: невелике бічне підтравлення, що дещо зменшує мінімальну допустиму щільність рисунку, додаткові витрати на видалення або освітлення металорезисту [26, ст. 37].

4 ОПРАЦЮВАННЯ ПИТАНЬ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Охорона праці при роботі з наземними станціями в Україні є важливим аспектом забезпечення безпеки працівників, які виконують технічне обслуговування, моніторинг та управління системами зв'язку, навігації або дистанційного зондування. Робота в таких умовах пов'язана з впливом електромагнітного випромінювання, високої напруги, підвищеної температури, а також необхідністю взаємодії з електронною апаратурою та системами живлення.

Усі працівники, що залучені до роботи з наземними станціями, повинні проходити первинний, повторний та позаплановий інструктаж з охорони праці, мати відповідну кваліфікацію, пройти медичний огляд і бути ознайомленими з інструкціями безпечної експлуатації обладнання. Робочі зони повинні бути чітко розмежовані, особливо ділянки з підвищеною небезпекою — наприклад, приміщення з передавальними антенами або високовольтними установками.

Під час дослідження апаратного забезпечення наземної станції керування безпілотним літальним апаратом на працівника, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21]: 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 дослідника апаратного забезпечення наземної станції 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 токо- 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 дослідження апаратного забезпечення наземної станції керування безпілотним літальним апаратом - 1а [14] (табл.4.2.1).

Таблиця 4.2.1 – Параметри мікроклімату

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

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

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 4.2.2.

Таблиця 4.2.2 – 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.4.2.3).

Таблиця 4.2.3 – 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 4.2.3:

Таблиця 4.2.3 — Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір розрізнювання об'єкта	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	Бокове	Верхнє або	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» [18] (табл. 4.2.4.).

Таблиця 4.2.4. Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудої 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 [20] (табл. 4.2.5).

Таблиця 4.2.5 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 [19].

Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 0,05 м від екрана та корпусу відео термінала при будь-яких положеннях регульовальних 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/ЕЄС [17]).

4.3 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 [23] та «Правила пожежної безпеки в Україні» [25].

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» [22]. У приміщенні знаходяться ПК та інша оргтехніка, що можуть спричинити пожежу.

Згідно даних наведених у таблиці 3.1 будівля, в якій знаходиться приміщення, має II ступінь вогнестійкості [15] приміщення можна віднести до категорії вибухопожежонебезпеки В (табл. 4.3—1.).

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

Таблиця 4.3—2. Визначення ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колонни	сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття міжповерхові (у т. ч. горищні 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	

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 чинники, 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.

Одним із ключових завдань пожежної безпеки є забезпечення стійкості будівель до високих температур і запобігання їх руйнуванню під час пожежі. Зважаючи на високу вартість електронного обладнання та підвищений рівень пожежонебезпеки, приміщення, призначені для обчислювальних центрів або розміщення комп'ютерної техніки, повинні будуватись з дотриманням вимог 1 або 2 ступеня вогнестійкості.

Будівельні конструкції таких приміщень, як правило, виготовляються з матеріалів, що не горять — наприклад, цегли, бетону, скла чи металу. Деревину дозволено використовувати лише у виняткових випадках, і то тільки після обов'язкової обробки спеціальними вогнезахисними речовинами.

Для оперативного реагування на незначні загоряння в будівлях передбачено низку засобів пожежогасіння, серед яких — внутрішні системи пожежного водопроводу, ручні вогнегасники, контейнери з піском, азбестові покривала тощо. Застосування води в таких зонах, як серверні, архіви носіїв інформації або приміщення з контрольно-вимірювальною апаратурою, можливе лише в крайніх ситуаціях, коли масштаби загоряння становлять серйозну загрозу. У таких випадках

об'єм води слід звести до мінімуму, а технічне обладнання потрібно захистити від намокання, накривши його щільними вологостійкими матеріалами.

Найчастіше для боротьби з пожежами на ранніх етапах використовують вогнегасники. У приміщеннях із комп'ютерною технікою перевага надається вуглекислотним вогнегасникам, оскільки вони ефективно гасять полум'я, не пошкоджуючи електроніку. Крім того, вуглекислий газ не проводить електричний струм, що дає змогу застосовувати його навіть у тих випадках, коли знеструмлення обладнання неможливе або утруднене.

ВИСНОВКИ

Сфера дистанційного керування безпілотників є досить новою, тому кількість літератури по ній дещо обмежений. Проте все ж, за рахунок отриманої інформації з різноманітних джерел, вдається отримати загальну картину.

Розглянуто створення апаратного забезпечення наземної станції керування. Згідно необхідних характеристик, проведено розрахунок ключових вузлів схеми. Зрозуміло, що даний пристрій для свого функціонування повинен містити на своєму борту ще й програмне забезпечення. Вимоги до нього диктуються умовами користування, і виходять за рамки даної роботи.

Електричні характеристики виробу дозволяють передавати сигнал на модуль передача з частотою 200 Гц. Виріб живиться акумуляторною збіркою Li-Ion 2s. Габаритні розміри: 101,6 мм (ширина), 91,44 мм (довжина). Швидкість комунікації з модулем передавача по інтерфейсу UART можна обирати 400 КБод.

Завдяки використанню двохсторонньої плати, значно полегшився процес трасування плати, а також, отримали можливість зменшити паразитні індуктивності швидкісних ліній передачі за рахунок використання суцільного заземлення.

Розглянуто деталі професійного виробництва друкованих плат.

Також робота містить рекомендації з охорони праці при експлуатації даного виробу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 74AHC1G125 Datasheet (HTML) - NXP Semiconductors. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/15208/PHILIPS/74AHC1G125.html>
2. A guide to Debouncing / Jack G. Ganssle. The Ganssle Group. 2007.
3. Arduino nano – Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_Nano.
4. ATMEGA328P Datasheet (HTML) - ATMEL Corporation. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/241077/ATMEL/ATMEGA328P.html>
5. Bouncing and debouncing. URL: <https://community.element14.com/members-area/personalblogs/b/blog/posts/bouncing-and-debouncing>
6. High speed digital design: a handbook of black magic / Johnson, Howard. Pearson Education India. 1993.
7. How 2-Axis Joystick Works? Interface with Arduino & Processing. URL: https://www.google.com/search?q=How+2-Axis+Joystick+Works+%26+Interface+with+Arduino+%2B+Processing&rlz=1C1GCEU_ruUA1162UA1162&oq=How+2-Axis+Joystick+Works+%26+Interface+with+Arduino+%2B+Processing&gs_lcrp=EgZja_HJvbWUyBggAEEUYOdIBBzIwNWowajeoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#vhid=zephyr:0&vssid=atritem-https://lastminuteengineers.com/joystick-interfacing-arduino-processing/
8. IRF9540 Datasheet (HTML) - International Rectifier. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68329/IRF/IRF9540.html>
9. Power electronics design handbook: low-power components and applications / Kularatna, Nihal. Elsevier. 1998.
10. Pulse position modulation. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/electrical-engineering/pulse-position-modulation-ppm/>.

11. Radio Preparation - ExpressLRS. URL: <https://www.expresslrs.org/quick-start/transmitters/tx-prep/#external-expresslrs-modules>.
12. The art of Electronics. Vol. 3 / Hayes, Thomas C., and Paul Horowitz. Cambridge, UK. Cambridge University Press. 1999.
13. Алгоритми та засоби обробки сигналів : навч. посібн. / Ваврук Є., Лашко О., Попович Р. – Львів : СПОЛОМ, 2021. – 240 с. : іл. – Бібл.: с. 237–239 (34 назви)..
14. 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>
15. 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
16. ДБН В.2.4-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 144 с
17. Директива № 90/270/ЄЕС «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/4>
18. 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>
19. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
20. ДСН і ПЗ 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>
21. ДСТУ OHSAS 18002:2014. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT).

К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с

22.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_36/4-1-0-1749.

23.Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 4403-VI

24. Малохвій Е. Е. Використання ExpressLRS для побудови високопродуктивного радіозв'язку з низькою затримкою на великі відстані [Електронний ресурс] / Е. Е. Малохвій, Г. А. Кучук // Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 28-30 листопада 2023 р. / гол. Є. І. Сокол ; оргком.: Р. П. Мигущенко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків, 2023. – С. 48-49

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

26. Наскрізна розробка інтелектуальної техніки. Частина 2: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / Я. Л. Зінгер, Ю. Ф. Адаменко; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 105 с.

27.НПАОП 0.00-7.14-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_14-18_01_ua.php

28. Протоколи передачі в RC: PWM, PPM, SBUS, DSM2, DSMX, SUMD та інші – де і як це працює, що краще. URL: https://rc-hobby.com.ua/infocenter/obzory-i-stati/protokoli-peredachi-v-rc -pwm -ppm -sbus -dsm2 -dsmx -sumd-ta-inshi -de-i-yak-tse-pratsyu -shcho-kra/?srsltid=AfmBOor4YyTelCgMXJyghoRqcJ03uAb0GF1F60sRM_CnZ-XcYvNCggdf

29. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу [Електронний ресурс] : підручник / Л. А. Яцюк, О. В. Косогін, Д. Ю. Ущатовський, О. В. Лінючева, Ю. Ф. Фатєєв; – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видво «Політехніка», 2018. – 330 с.

30. УДК 004.716 АНАЛІЗ ПРОТОКОЛУ CROSSFIRE / М.О. Притула, А.О. Гайдамашко. Вінницький національний технічний університет. 2023. – [Електронний ресурс]. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2023/paper/view/19068/15851>

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

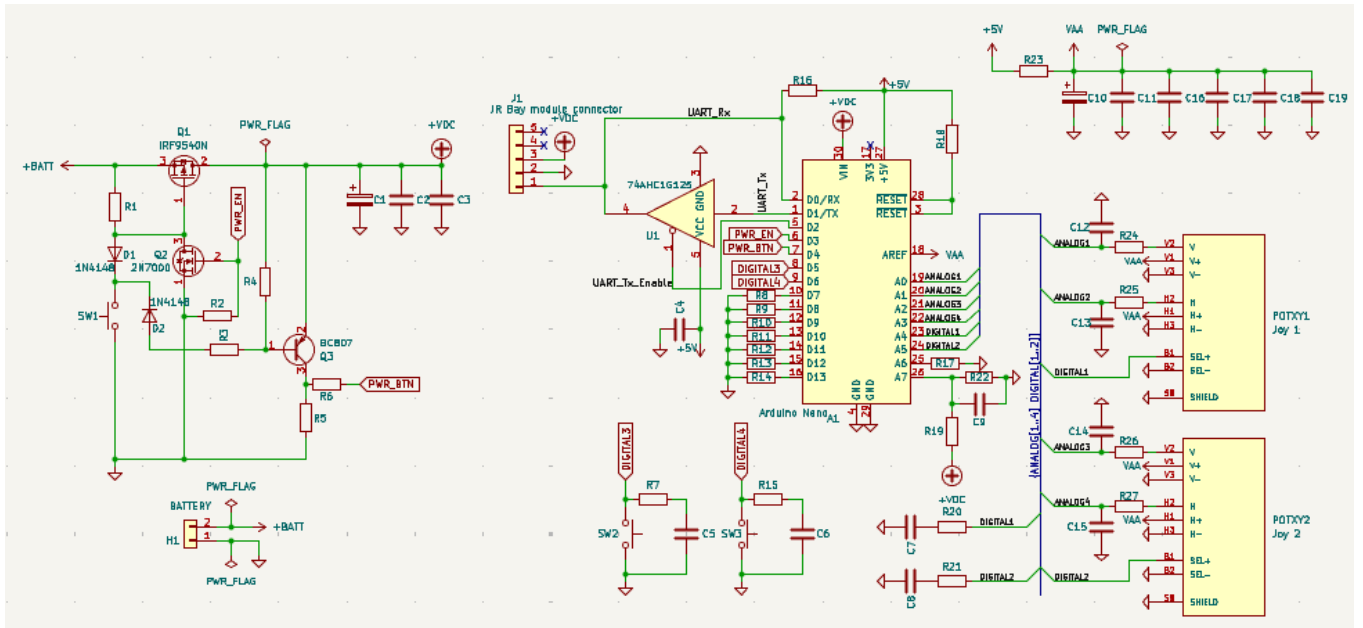


Рисунок А. 1 – Електрична схема принципова

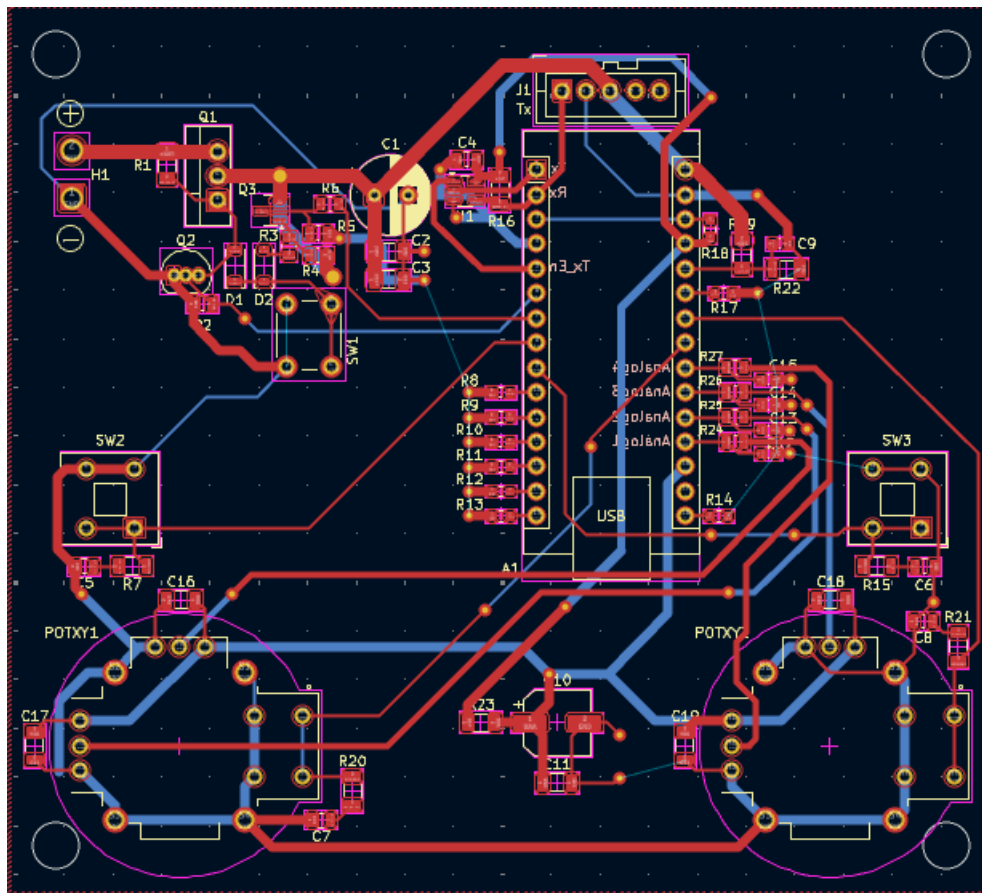


Рисунок А. 2 – Рисунок друкованої плати без суцільної заливки площини заземлення для кращої розбірливості

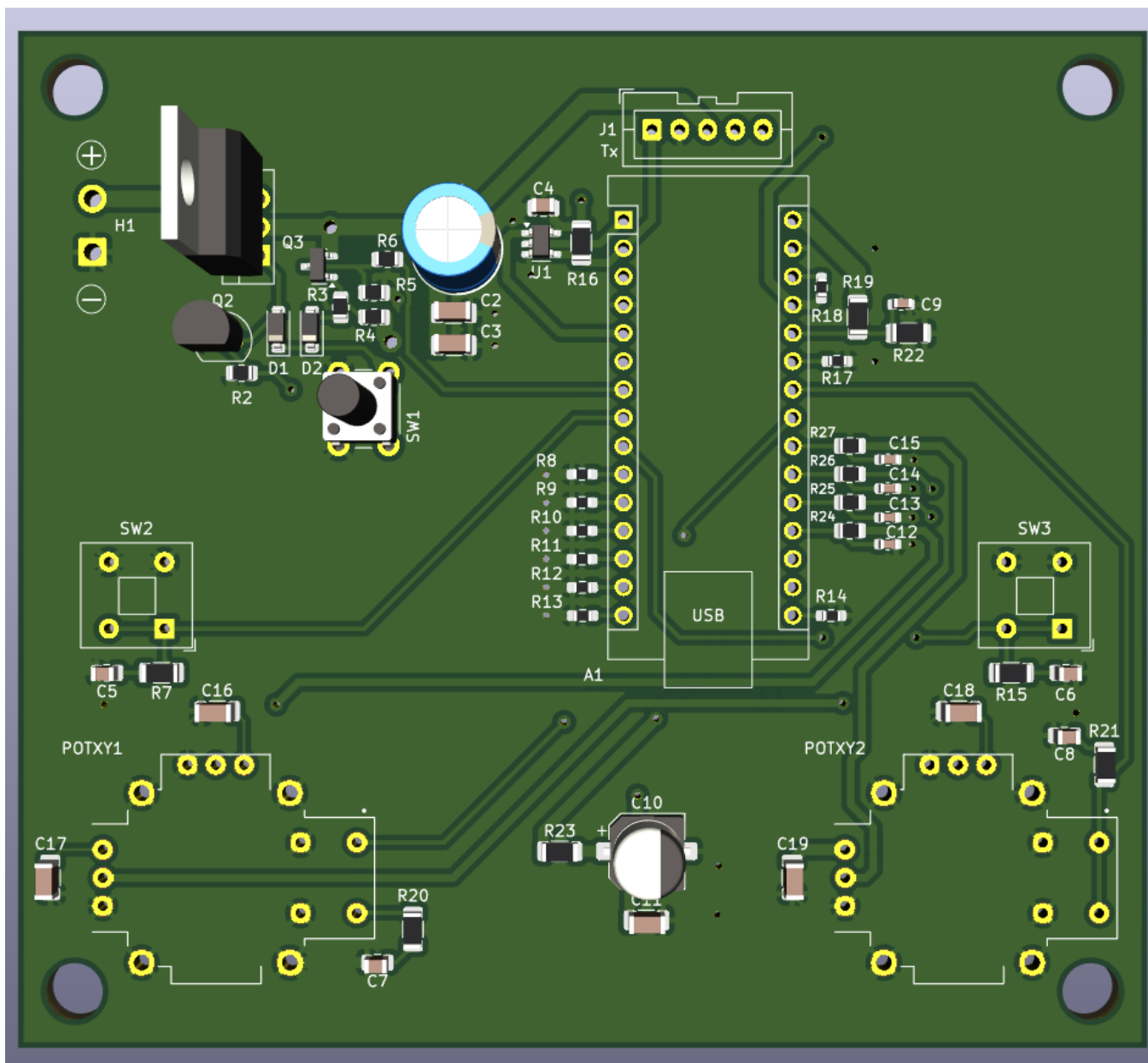


Рисунок А. 3 – Вид друкованої плати з переднього боку.

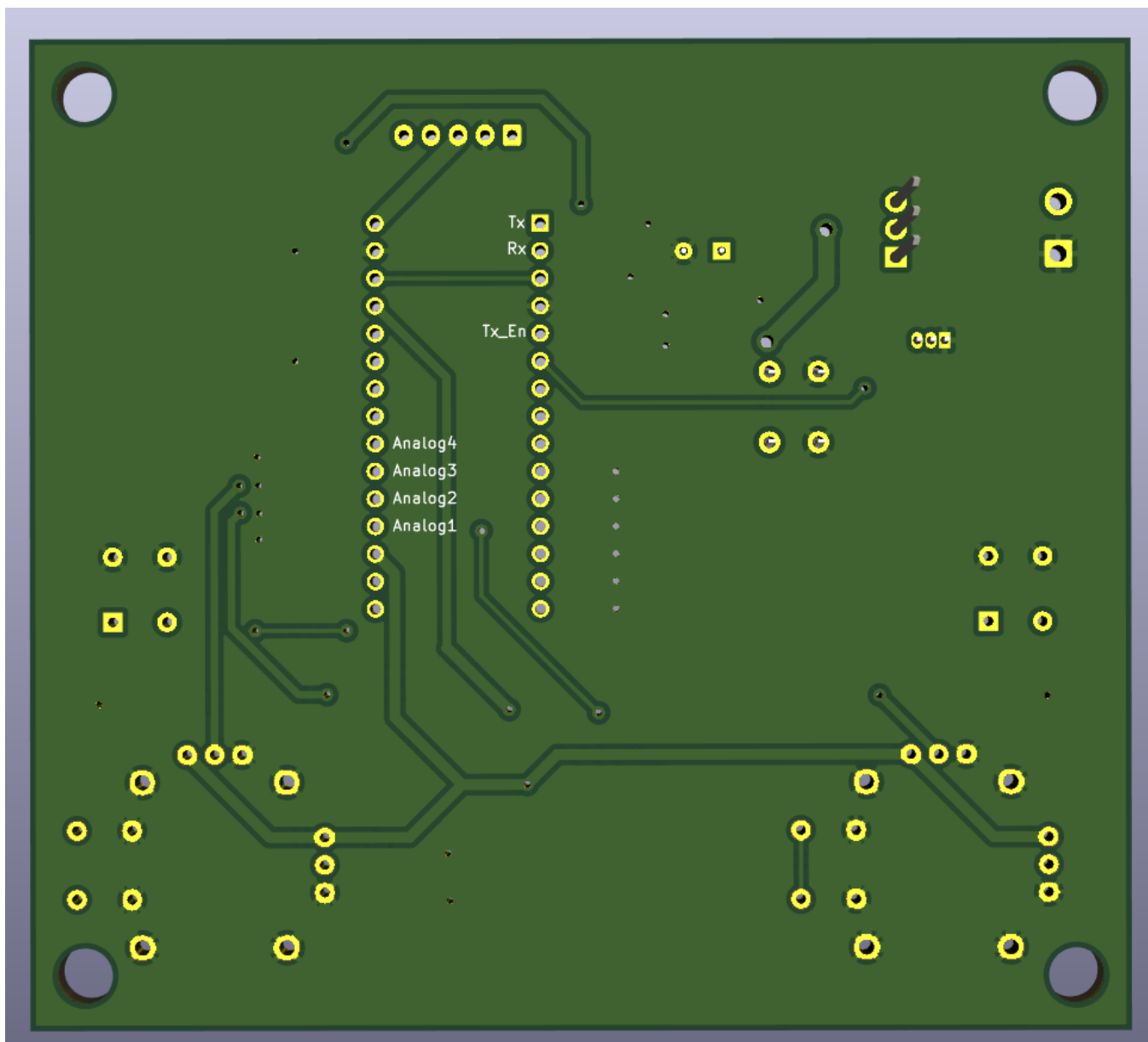


Рисунок А.4 – Вид друкованої плати з заднього боку

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Апаратне забезпечення наземної станції 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 0,11 %

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.

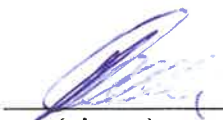
Експертна комісія:

Коваль Л. Г., завідувач кафедри БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Карась О. В., гарант ОПП «Електроніка»

(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)


(підпис)

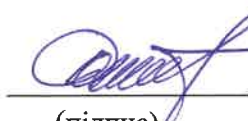
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Штофель Д. Х.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлені:

Керівник


(підпис)

Штофель Д. Х., доц. каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Шевчук В. Ю.

(прізвище, ініціали)