

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електронних систем

Керецман Василь Владиславович

Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення

Спеціальність 171 Електроніка

Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня магістра

Науковий керівник:

Папп Олександр Вікторович

к.ф-м.н

(викладач)

Регістрація _____
(номер)

« ____ » _____ 2025 р. _____
(підпис)

Тетяна СЕМАК

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

_____ Тарас ЗАЯЦЬ
(підпис)
к.ф.-м.н., доцент

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

(підпис)

Гор ПИЛИПЧИНЕЦЬ
(Ім'я, Прізвище)

М.н.с. доктор філософії
(науковий ступінь, вчене звання)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Інженерно-технічний факультет
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедрою,
доц. _____ (Заяць Т. М.)
“ ____ ” _____ 2025року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу магістра
на тему:

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО RGB-ОСВІТЛЕННЯ

Студента групи ЕС: Василя КЕРЕЦМАНА ()
Керівник: кандидат фіз.-мат. наук, кафедри ЕС
Олександр ПАПП ()

Ужгород - 2025

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. _____ (Заяць Т. М.)

“ ____ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студенту Керецману Василю Владиславовичу

1. Тема роботи: Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення.

Затверджена на засіданні кафедри (протокол №__ від _____ 2025 р.)

2. Термін закінчення роботи: 10 грудня 2025 року.

3. Вихідні дані до роботи.

- Розробити та обґрунтувати структурну і принципову схеми контролера керування RGB-світлодіодними стрічками з використанням ШІМ (канали R/G/B, формування ШІМ драйвером/МІС).
- Живлення: від мережі 220 В через АС/DC модулі з вихідними напругами +12 В / +24 В (для стрічок) та +3,3 В (для логіки).
- Реалізувати силові ключі для комутації LED-каналів (MOSFET у ключовому режимі) та за потреби керування АС-навантаженням через оптоелектронну розв'язку (оптосимістор + симістор).
- Виконати необхідні розрахунки: електричні, теплові (з урахуванням габаритів плати), надійності та економічний розрахунок собівартості.
- Умови експлуатації:
- $t = +5...+60$ °С; вологість 45...80%; атмосферний тиск 90...104 кПа.

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

- 1) Вступ. Огляд та аналіз аналогів об'єкту проектування.
- 2) Синтез та аналіз структурної та функціональної схеми об'єкту проектування та її опис.
- 3) Технічна пропозиція та її обґрунтування і опис.
- 4) Розрахунок електричних параметрів окремих фрагментів принципової схеми та дослідження дискретних елементів при необхідності.
- 5) Синтез друкованої плати
- 6) Визначення розмірів контактних площадок та друкованих провідників.
- 7) Вибір варіантів встановлення радіоелементів на друкованій платі.
- 8) Тепловий розрахунок пристрою.
- 9) Розрахунок теплових режимів пристрою.

- 10) Розрахунок характеристик надійності пристрою.
- 11) Економічна частина.
- 12) Охорона праці.
- 13) Висновки.

5. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Н. контроль	Папп О.В.		
Н. моноконтроль			

Дата видачі завдання _____ 2025 року.

Керівник роботи _____ (к.ф-м.н. Папп О.В.)
(підпис)

Завдання прийняв на виконання _____ (Керецман В.В.)
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування етапів виконання КРМ	Термін виконання етапів	Примітки
1.	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень.	до 20.12.2024 року	
2.	Огляд та аналіз аналогів.	до 20.02.2025 року	
3.	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції.	до 20.03.2025 року	
4.	Синтез структурної та принципової схем, їх розрахунок.	до 20.04.2025 року	
5.	Виготовлення конструкторської документації.	до 20.05.2025 року	
6.	Оформлення кваліфікаційної роботи магістра.	до 20.11.2025 року	
7.	Захист на державній екзаменаційній комісії.	Згідно з графіком захисту	

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра на тему «Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення» /

Ужгородський національний університет, ІТФ, кафедра ЕС;

Керівник: к.ф.-м.н. Папп О. В.;

Студент: Керецман В. В., група ЕС.

Пояснювальна записка: 53 сторінок, 11 рисунків, 4 таблиць.

Графічна частина: 4 листи формату А1.

Об'єкт розробки – інтелектуальна система керування RGB-світлодіодним освітленням на основі мікроконтролерної платформи з використанням широтно-імпульсної модуляції.

Мета роботи – розробка апаратно-програмного контролера адаптивного RGB-освітлення з можливістю незалежного керування яскравістю та кольором світлодіодних стрічок.

Метод дослідження – аналіз існуючих систем керування освітленням, синтез структурної та принципової схем, а також виконання електричних, теплових, надійнісних і економічних розрахунків.

У процесі виконання роботи розроблено структурну та принципову схеми контролера, виконано аналіз режимів ШІМ-керування світлодіодними стрічками, проведено розрахунок теплового режиму друкованої плати, оцінено надійність пристрою та визначено його собівартість. Отримані результати підтверджують працездатність і доцільність застосування розробленої системи в декоративному та студійному освітленні.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ RGB-ОСВІТЛЕННЯ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА
МОДУЛЯЦІЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, LED-СТРІЧКИ, СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ОСВІТЛЕННЯМ

ABSTRACT

*Master's qualification thesis "Intelligent Adaptive RGB Lighting System" /
Uzhhorod National University, Faculty of Information Technologies and Physics,
Department of Electronics Systems;
Supervisor: PhD (Phys.-Math.), O. V. Papp;
Student: V. V. Keretsman, group ES.*

Explanatory note: 53 pages, 11 figures, 4 tables,
Graphic part: 4 A1 sheets.

The object of development is an intelligent RGB LED lighting control system based on a microcontroller platform using pulse-width modulation.

The purpose of the work is to develop a hardware-software controller for adaptive RGB lighting with independent brightness and color control of LED strips.

Research methods include analysis of existing lighting control systems, synthesis of structural and schematic diagrams, and electrical, thermal, reliability, and economic calculations.

During the work, the controller's structural and schematic diagrams were developed, PWM-based LED control modes were analyzed, the thermal behavior of the printed circuit board was evaluated, reliability indicators were calculated, and the manufacturing cost was determined. The results confirm the feasibility and effectiveness of the developed system for decorative and studio lighting applications.

INTELLIGENT RGB LIGHTING, PULSE-WIDTH MODULATION,
MICROCONTROLLER, LED STRIPS, LIGHTING CONTROL SYSTEMS

ЗМІСТ

1 Вступ	9
2 Огляд та аналіз існуючих аналогів об'єкту проектування	11
2.1. 2.1. ШІМ-модуляція (PWM).....	11
2.2. Методи генерації ШІМ та приклади схем.....	14
2.3 Особливості керування світлодіодних стрічок за допомогою ШІМ	19
3 Розрахунок основних блоків пристрою	21
3.1 Структурна схема пристрою	21
3.2 Мікроконтролерний модуль ESP32-WROOM-32.....	23
3.3 Система живлення та стабілізації напруги.....	24
3.4 Силові ключі та вихідний каскад.....	25
3.5 Блок оптоелектронної розв'язки та керування АС-навантаженням.....	29
3.6 Інтерфейс USB-UART на базі FT232RQ.....	30
4. Конструкторсько-технологічний розділ	31
4.1 Визначення розмірів монтажних отворів	31
4.2 Розрахунок контактних майданчиків	31
4.3 Розрахунок мінімальної ширини друкованого провідника	32
4.4 Тепловий розрахунок.....	34
4.5 Розрахунок характеристик надійності пристрою.....	36
5. Економічна частина.....	39
5.1. Розрахунок собівартості спроектованого пристрою.....	39
5.2. Розрахунок кількості та вартості матеріалів	40
5.3. Розрахунок кількості й вартості покупних комплектуючих	41
6. Заходи по охороні праці та захисту навколишнього середовища.....	43
7.Висновок.....	51

				<i>КРМ.ЕС. 11972862.001 ПЗ</i>		
<i>Ви</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>			
<i>Розробив</i>	<i>Керецман</i>			<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевіри</i>	<i>Папп О.В.</i>			<i>Н</i>	<i>7</i>	<i>53</i>
<i>Н.Конт</i>	<i>Папп О.В.</i>			УжНУ, ІТФ, гр.ЕС, 2-курс		
<i>Затв.</i>	<i>Заяць Т.М.</i>					
Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПІСКА						

1. ВСТУП

У сучасних системах освітлення дедалі ширше застосовуються світлодіодні джерела світла, які поступово витісняють лампи розжарювання та газорозрядні лампи. Це зумовлено їх високою енергоефективністю, тривалим терміном служби, компактними габаритами та широкими можливостями керування яскравістю і кольором випромінювання. Особливу популярність набули світлодіодні стрічки з можливістю зміни кольору світіння (RGB та RGBW), які широко використовуються для декоративного освітлення інтер'єрів, сценічного та студійного освітлення.

На ринку представлено значну кількість готових контролерів та димерів для керування світлодіодними стрічками, які зазвичай комплектуються джерелом живлення та пультом дистанційного керування. Такі пристрої дозволяють змінювати яскравість і колір світіння, проте мають низку суттєвих обмежень. Зокрема, більшість доступних комерційних рішень не підтримують програмоване керування алгоритмами зміни кольору, інтеграцію з комп'ютерними системами або сучасними інтерфейсами зв'язку (Bluetooth, Wi-Fi, енкодери керування тощо).

Окремою важливою проблемою є використання низькочастотної широтно-імпульсної модуляції у бюджетних димерах. Низька частота ШІМ призводить до появи мерехтіння світлового потоку, яке особливо критичне під час відео- та фотозйомки. У таких умовах зйомка можлива лише з фіксованими значеннями витримки (наприклад, 1/50 с), що суттєво обмежує творчі та технічні можливості оператора і робить використання подібних систем невідатним для професійного студійного освітлення.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення програмованого контролера світлодіодних стрічок з можливістю високочастотного ШІМ керування, зовнішнього управління та гнучкої реалізації алгоритмів зміни яскравості й кольору. Реалізація таких функцій можлива шляхом використання мікроконтролерних систем, які забезпечують необхідну обчислювальну потужність, багатоканальне керування та підтримку сучасних інтерфейсів обміну даними.

У даній роботі розглядається розробка та аналіз системи керування світлодіодним RGB-освітленням на основі мікроконтролера та спеціалізованого ШІМ-драйвера. Особлива увага приділяється принципам формування широтно-імпульсної

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

модуляції, її ролі у керуванні світлодіодними навантаженнями, а також розрахунку силових ключів, що комутують світлодіодні стрічки. Запропоноване рішення дозволяє реалізувати стабільне та якісне освітлення без видимого мерехтіння, а також забезпечує можливість програмного керування та інтеграції з зовнішніми системами.

ЕКСПЕРТНЕ
ВІСНУВАННЯ

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					10
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2.ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ

2.1. ШІМ-модуляція (PWM)

Для аналізу принципів керування світлодіодними навантаженнями та роботи розроблюваної системи необхідно насамперед розглянути базовий метод регулювання потужності, який використовується в сучасних електронних пристроях керування освітленням. Таким методом є широтно-імпульсна модуляція[1].

ШІМ-модуляція є фундаментальним інструментом у цифрових та мікроконтролерних системах керування, оскільки дозволяє ефективно регулювати середнє значення напруги або струму на навантаженні без переходу силових елементів у лінійний режим. Саме цей підхід забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, мінімальні теплові втрати та стабільні режими роботи світлодіодних джерел світла.

Оскільки в розроблюваній системі керування яскравістю та кольором світлодіодних стрічок реалізується на основі ШІМ-сигналів, формованих мікроконтролером та спеціалізованим ШІМ-драйвером, доцільно розпочати теоретичну частину з визначення поняття широтно-імпульсної модуляції, її основних параметрів і математичних співвідношень. Це дозволить надалі обґрунтовано виконати розрахунок функціональних блоків схеми та проаналізувати режими роботи силових ключів. [2]

ШІМ (широтно-імпульсна модуляція, PWM) – це спосіб керування середнім значенням напруги або струму на навантаженні за рахунок зміни тривалості імпульсу при фіксованому періоді сигналу.

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

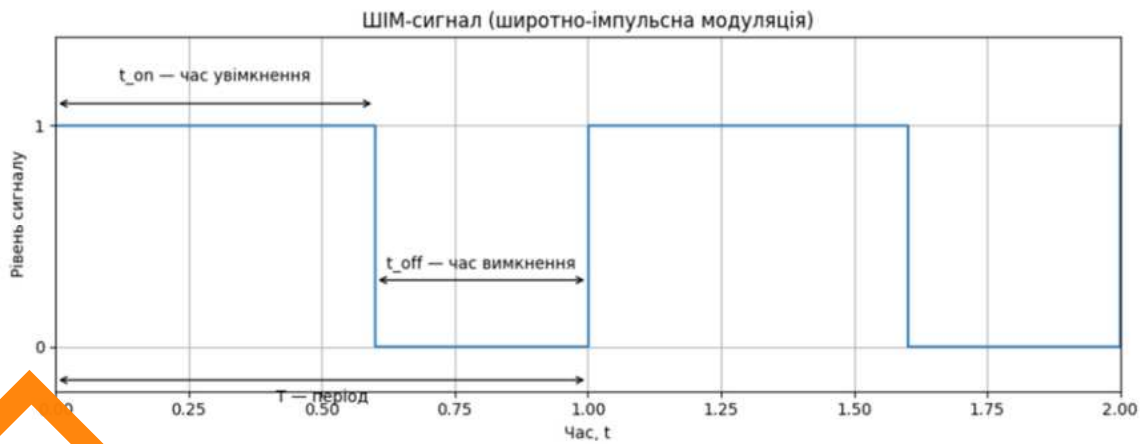


Рис.2.1 Часова діаграма широтно-імпульсної модуляції.

На виході – прямокутні імпульси з:

- періодом T
- частотою $f = 1 / T$
- тривалістю «1» (вмикання) t_{on}
- тривалістю «0» (вимкнення) $t_{off} = T - t_{on}$

Коефіцієнт заповнення (duty cycle) [3-5]

$$D = t_{on} / T = t_{on} / (t_{on} + t_{off}), 0 \leq D \leq 1 \quad (2.1)$$

У відсотках: $D\% = D \cdot 100\%$.

Середнє значення напруги

Середнє значення напруги на навантаженні при прямокутному сигналі з амплітудою V_H :

$$V = D \cdot V_H \quad (2.2)$$

Для струму на резистивному навантаженні:

$$\bar{I} = V / R = (D \cdot V_H) / R \quad (2.3)$$

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.ПЗ

Арк.

12

Ефективне (RMS) значення

Для прямокутника «0 – V_H »:

$$V_{RMS} = V_H \cdot \text{sqrt}(D) \quad (2.4)$$

Для струму:

$$I_{RMS} = (V_H / R) \cdot \text{sqrt}(D) \quad (2.5)$$

Середня потужність:

$$P = V_{RMS}^2 / R = (V_H^2 / R) \cdot D \quad (2.6)$$

ШІМ та роздільна здатність

У цифрових генераторах період ділиться на N кроків таймера. Якщо таймер має n біт:

$$N = 2^n$$

Мінімальний крок зміни загальної ширини імпульсу:

$$\Delta D = 1/N = 1/2^n \quad (2.7)$$

Для 12-бітного ШІМ (як у PCA9685):

$$N = 4096, \Delta D \approx 0.0244 \%$$

Вибір частоти ШІМ

- Занадто низька частота (< 100 Гц) \rightarrow видиме мерехтіння
- Типово для LED: 500 Гц – 2 кГц.
- Дуже високі частоти (10 – 20 кГц) \rightarrow ростуть втрати на перемикання в MOSFET.

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

13

2.2. Методи генерації ШІМ та приклади схем

ШІМ на NE555 (аналогова реалізація)

Таймер NE555 в астабільному режимі.

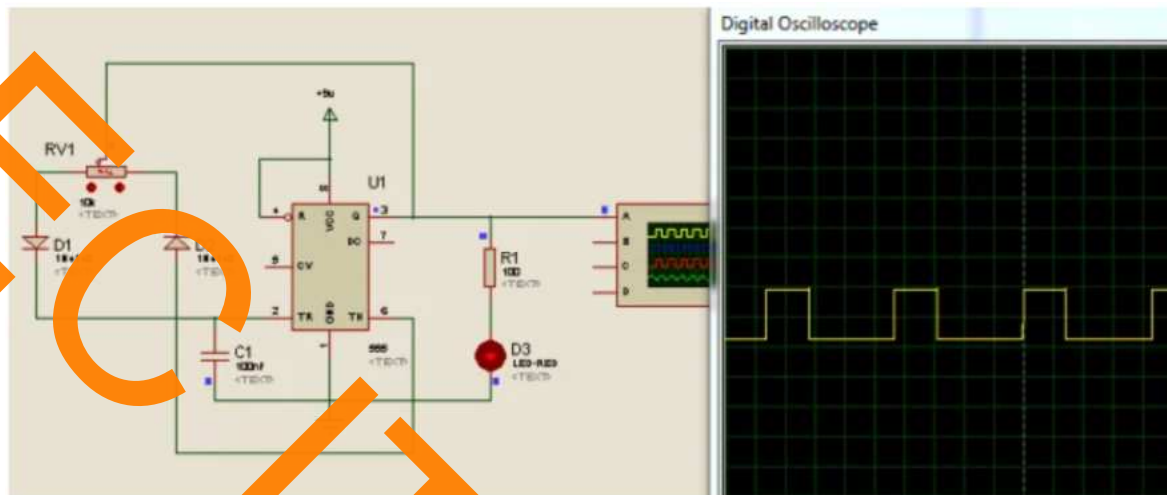


Рис 2.2 – Схема генератора ШІМ-сигналу на таймері NE555 та форма вихідного сигналу на цифровому осцилографі.

Основна формула частоти:

$$f \approx 1.44 / ((R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C) \quad (2.8)$$

Зміна RV1 (потенціометр) → зміна коефіцієнта заповнення. Керуючи напругою на виводі CTRL, можна реалізувати аналогово керований ШІМ.

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.ПЗ

Арк.

14

Операційний підсилювач + пилка (компараторний ШІМ)

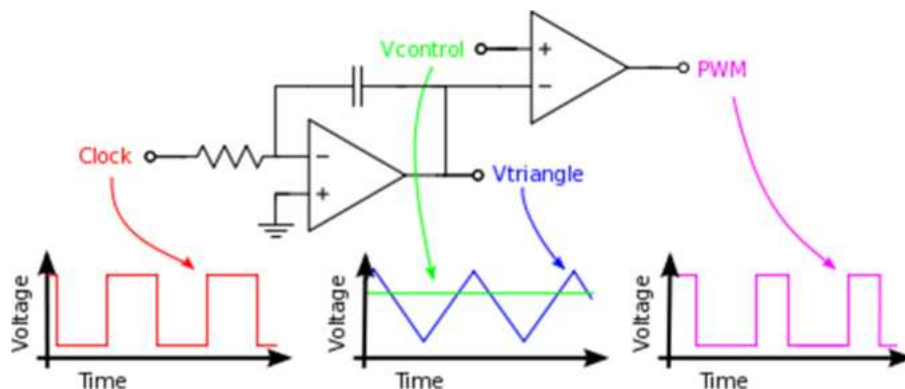


Рис. 2.1 – Схема генератора ШІМ-сигналу операційній підсилювачах.

- Генератор пилкоподібної (або трикутної) напруги.
- Компаратор, який порівнює пилку з V_{ctrl} .

Коли $V_{triangle} < V_{ctrl} \rightarrow$ вихід «1»,

коли $V_{triangle} > V_{ctrl} \rightarrow$ вихід «0».

Коефіцієнт заповнення:

$$D = (V_{ctrl} - V_{min}) / (V_{max} - V_{min}). \quad (2.9)$$

ШІМ у мікроконтролері (ESP32, STM32, AVR)

Таймер рахує від 0 до TOP, а регістр COMPARE визначає момент перемикання.

Частота:

$$f = f_{clk} / ((TOP + 1) \cdot prescaler) \quad (2.10)$$

Коефіцієнт заповнення:

$$D = COMPARE / (TOP + 1). \quad (2.11)$$

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.ПЗ

Арк.

15

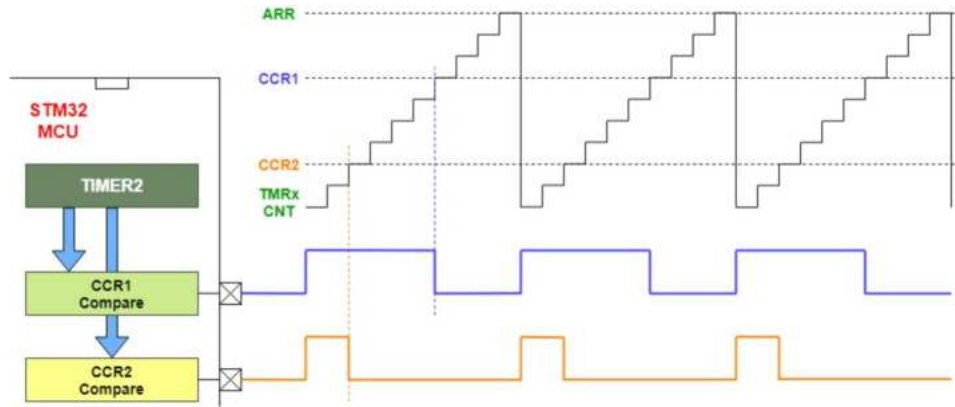


Рис. 2.4 – Діаграми роботи таймерів у мікроконтролері (наприклад, STM32):

Апаратна реалізація ШІМ у мікроконтролерах виконується за допомогою таймерів із регістрами порівняння. Таймер рахує від 0 до завантаженого значення TOP/ARR/CR. Коли лічильник досягає значення COMPARE (OCR/CCR) — логічний вихід перемикається, формуючи імпульс. Таким чином, змінюючи COMPARE при фіксованому TOP змінюємо коефіцієнт заповнення D.[6]

Спеціалізовані ШІМ-драйвери

Окрім вбудованих таймерів мікроконтролера, у практичних системах часто застосовують зовнішні спеціалізовані ШІМ-драйвери, зокрема PCA9685, TLC5940, LP5024 та подібні мікросхеми. Такі драйвери містять власні генератори тактової частоти та багатоканальні лічильники, що дозволяє формувати велику кількість незалежних ШІМ-сигналів з високою роздільною здатністю. Керування ними зазвичай здійснюється через стандартні цифрові інтерфейси (I²C, SPI), що значно спрощує масштабування системи.

Застосування апаратних ШІМ-драйверів має низку переваг у порівнянні з програмною генерацією імпульсів: забезпечується точна частота без джитера, зменшуються електромагнітні завади, підвищується енергоефективність та забезпечується можливість реалізації багатоканального керування без перевантаження мікроконтролера. Саме тому у системах керування світлодіодним освітленням доцільно використовувати апаратні ШІМ-модулі або спеціалізовані драйвери.[9]

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Наприклад - 16-канальний 12-бітний драйвер з I²C, має один глобальний лічильник на 4096 кроків.

Для такого драйвера, частота ШИМ можна визначити як :

$$f_{PWM} = f_{osc} / (4096 \cdot (PRE_SCALE + 1)) \quad (2.12)$$

$$f_{osc} \approx 25 \text{ МГц.}$$

Таблиця 1. Порівняльна характеристика використання мікроконтролерів та драйверів.

Характеристика	ШИМ у мікроконтролері (AVR, STM32, ESP32)	Зовнішній ШИМ-драйвер (PCA9685, TLC5940)
Формування сигналу	Апаратні таймери MCU	Власний генератор і таймери
Навантаження на CPU	Мінімальне	Практично відсутнє
Кількість каналів	Обмежена кількістю таймерів і виводів	Висока (8–24 і більше каналів)
Роздільна здатність ШИМ	8–16 біт (залежно від MCU)	Зазвичай 12–16 біт
Стабільність частоти	Висока	Дуже висока
Масштабованість	Обмежена ресурсами MCU	Легко розширюється
Інтерфейс керування	Внутрішній	I ² C, SPI
Складність реалізації	Середня	Низька при великій кількості каналів
Типове застосування	Приводи, регулятори швидкості LED-системи	Багатоканальні LED-контролери, освітлення

Логічна реалізація на лічильнику + ROM

Лічильник генерує код часу, а ROM або логіка формує ШИМ із заданим профілем (наприклад, логарифмічна шкала яскравості). У такій реалізації генератор імпульсів побудований на базі цифрового лічильника, який послідовно генерує адреси від 0 до максимального значення. Ці адреси використовуються для доступу до табличної пам'яті (ROM), де зберігаються значення вихідної PWM-логіки, що відповідає потрібній формі модуляції. Для кожного тактового циклу ROM повертає

стан виходу (логічна “1” або “0”), який формується на ШІМ-виході. Такий підхід дозволяє реалізовувати будь-які профілі PWM, у тому числі лінійні, логарифмічні чи кастомні, без значних апаратних витрат.

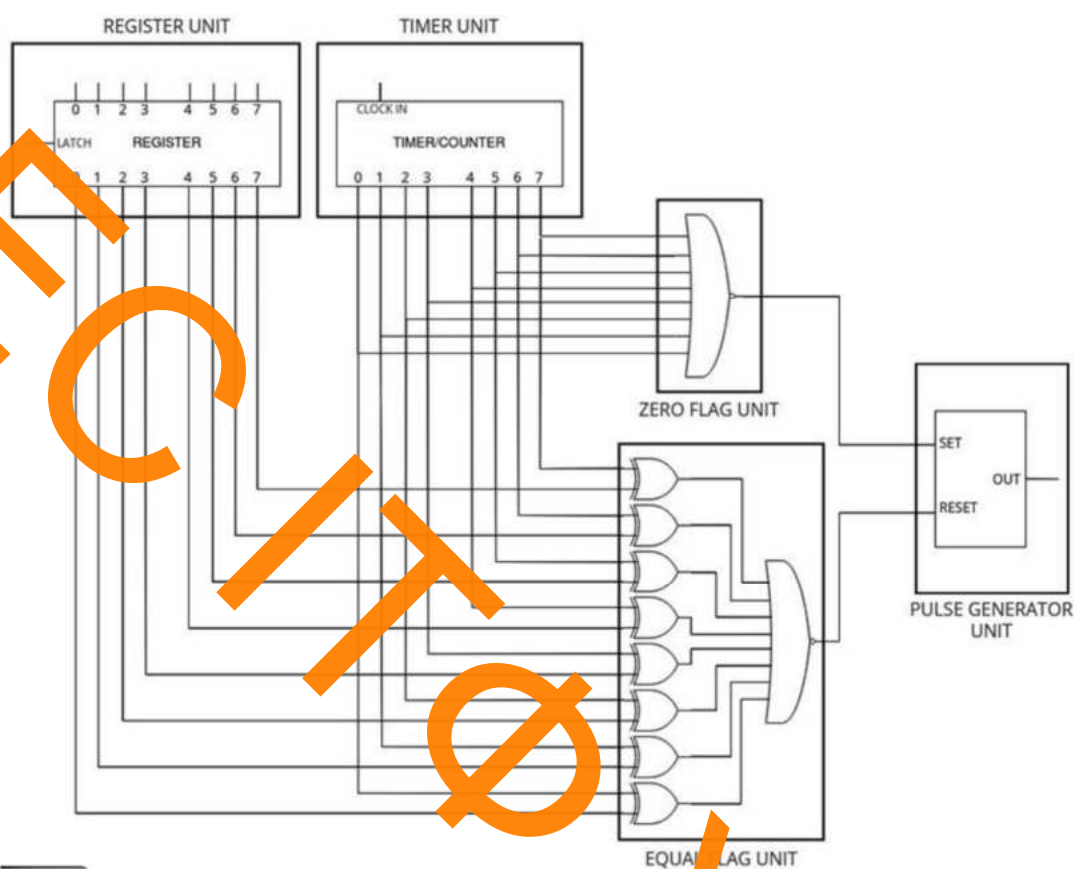


Рис 2.5 – Логічна реалізація генератора ШІМ на основі цифрового лічильника та ROM-логіки (Pattern/Lookup).

Цю схему часто застосовують у цифрових системах, коли потрібні нестандартні або нестатичні PWM-профілі (наприклад, логарифмічні, лінійні або інші форми заповнення). Лічильник циклічно збільшує своє значення, адресуючи ROM, а ROM повертає логічні значення для формування імпульсів з заданою шириною в кожному циклі. Такі рішення використовують у цифрових ПЛІС/ПЛІС-подібних генераторах, а також у спеціалізованих апаратних PWM-модулях, де необхідна таблична форма модуляції.

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

18

2.3. Особливості керування яскравістю світлодіодних стрічок за допомогою ШІМ

Керування яскравістю світлодіодних стрічок у сучасних електронних системах, як правило, здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції. Такий підхід зумовлений особливостями роботи світлодіодів як напівпровідникових приладів, для яких критичним параметром є струм, а не напруга. ШІМ-модуляція дозволяє змінювати середнє значення струму через світлодіоди без зміни його амплітуди в імпульсі, що забезпечує стабільні електричні та світлові характеристики.

Основною перевагою ШІМ-керування є можливість роботи силових ключів у ключовому режимі, коли вони перебувають або у повністю відкритому, або у повністю закритому стані. Це значно зменшує втрати потужності на силових елементах у порівнянні з лінійним регулюванням струму, при якому надлишкова енергія розсіюється у вигляді тепла. Таким чином, використання ШІМ підвищує енергоефективність системи та знижує теплове навантаження на компоненти.

Яскравість світлодіодної стрічки при ШІМ-керуванні визначається коефіцієнтом заповнення сигналу, тобто відношенням часу увімкнення світлодіодів до повного періоду сигналу. Збільшенням коефіцієнта заповнення зростає середній струм, а відповідно і світловий потік.

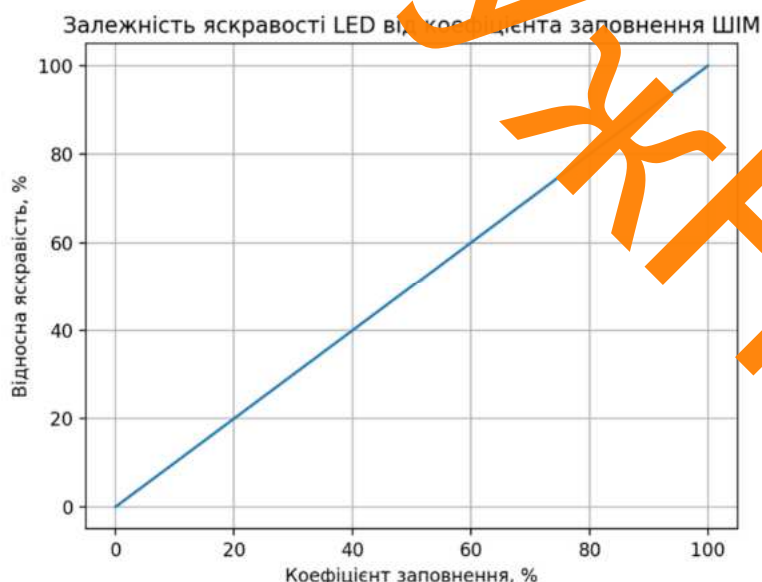


Рис 2.6 – Залежність яскравості світлодіодної стрічки від коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу.

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ

Арк.

19

При цьому миттєвий струм у фазі увімкнення залишається незмінним і дорівнює номінальному значенню, визначеному конструкцією стрічки та її обмежувальними резисторами або драйверами.

Важливим аспектом керування яскравістю є вибір частоти ШІМ. При занадто низькій частоті можливе виникнення видимого мерехтіння світлового потоку, що негативно впливає на комфорт зорового сприйняття та робить систему непридатною для відео- та фотозйомки. Зазвичай для світлодіодних стрічок застосовують частоти ШІМ у діапазоні від 500 Гц до кількох кілогерц. Підвищення частоти зменшує ймовірність мерехтіння, однак призводить до зростання втрат на перемикання у силових транзисторах.

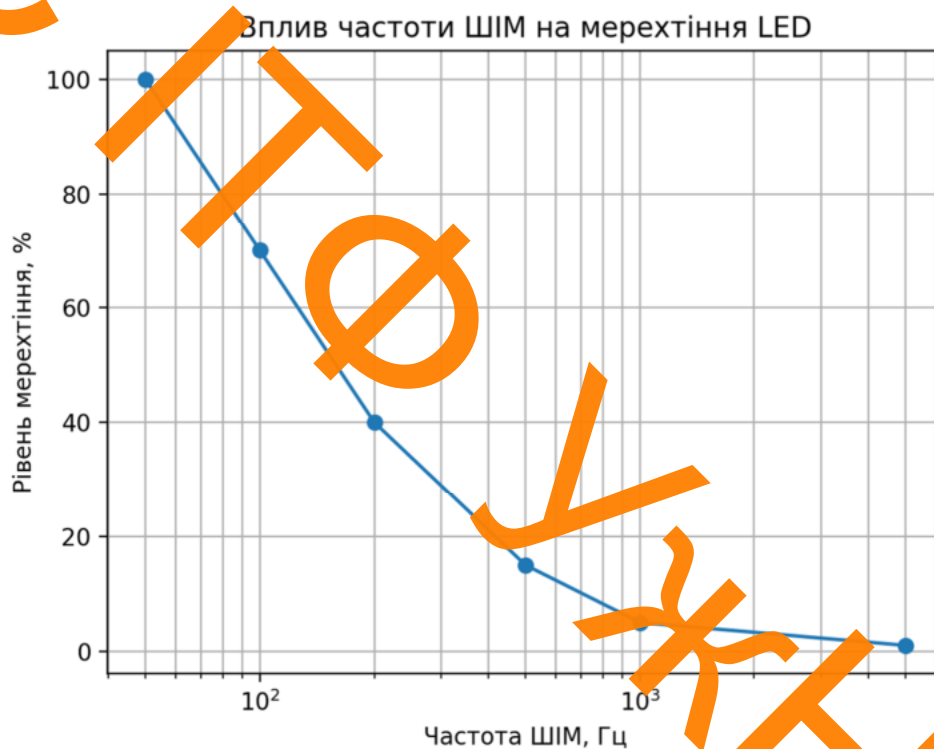


Рис 2.7 – Залежність рівня мерехтіння світлодіодного освітлення від частоти ШІМ-сигналу

Окремої уваги потребує питання лінійності регулювання яскравості. Людське око сприймає зміни освітленості нелінійно, тому лінійна зміна коефіцієнта заповнення не відповідає суб'єктивному відчуттю плавної зміни яскравості. Для компенсації цього ефекту в системах керування часто застосовують корекцію за

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

20

гамма-функцією або табличні методи перетворення значень яскравості, що особливо актуально для RGB-освітлення.

Графік на Рис. 2.7 ілюструє зменшення рівня мерехтіння світлодіодного випромінювання зі збільшенням частоти ШІМ-сигналу. При низьких частотах мерехтіння може бути помітним для людського ока та відеокамер, тоді як при частотах понад 500–1000 Гц світловий потік сприймається як безперервний.

Крім того, при ШІМ-керуванні світлодіодними стрічками необхідно враховувати електромагнітні завади, що виникають унаслідок крутих фронтів імпульсів. Для зменшення рівня завад застосовують резистори в ланцюгах керування затворами транзисторів, фільтруючі конденсатори на лініях живлення, а також оптимізують трасування друкованої плати.

Таким чином, використання широтно-імпульсної модуляції для керування яскравістю світлодіодних стрічок забезпечує високу енергоефективність, стабільність світлових характеристик та гнучкість керування, що робить цей метод найбільш доцільним для сучасних систем освітлення.

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					21
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ БЛОКІВ ПРИСТРОЮ

3.1 Структурна схема пристрою

Згідно з технічним завданням, необхідно розробити програмно-керовану систему керування світлодіодним RGB-освітленням із можливістю гнучкого регулювання яскравості та кольору світіння, а також з підтримкою зовнішнього керування та розширення. Основною вимогою до системи є забезпечення стабільної роботи світлодіодних стрічок без видимого мерехтіння, висока енергоефективність та електрична безпека при роботі з мережевою напругою.

Структурна схема розроблюваного пристрою побудована за модульним принципом та складається з кількох функціонально завершених блоків, кожен з яких виконує чітко визначену роль у загальній роботі системи. Такий підхід дозволяє спростити проектування, підвищити надійність роботи пристрою та забезпечити можливість подальшої модернізації або масштабування системи керування освітленням.

Склад основних функціональних блоків пристрою

Структурно схема пристрою складається з наступних основних компонентів:

1. Система живлення та стабілізації напруги
2. Блок керування та інтерфейс обміну даними
3. Блок керування світлодіодами (RGB-контролер)
4. Силові ключі та вихідний каскад
5. Блок оптоелектронної розв'язки та керування АС навантаженням

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

22

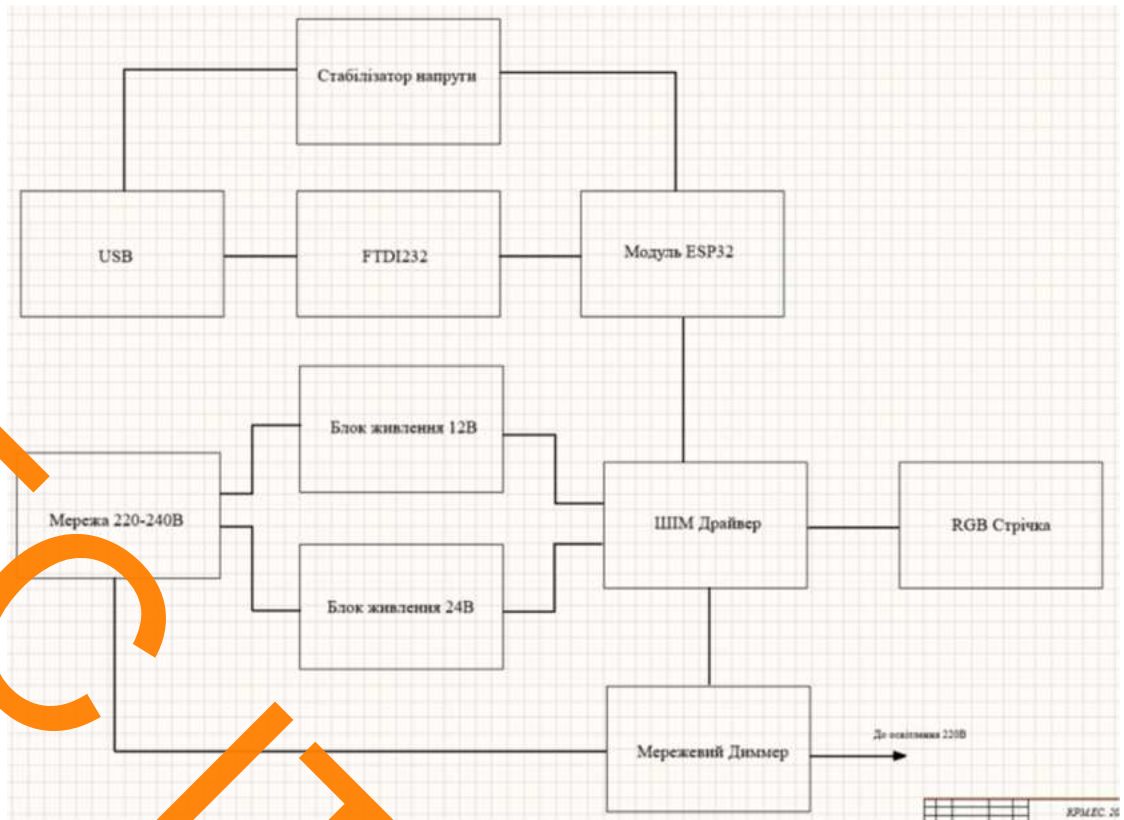


Рис 12. Структурна схема пристрою.

3.2 Мікроконтролерний модуль ESP32-WROOM-32

Центральним елементом системи є мікроконтролерний модуль **ESP32-WROOM-32**, який забезпечує формування керуючих сигналів, обмін даними з периферійними модулями та реалізацію алгоритмів керування світлодіодними каналами. Використання ESP32 обумовлене наявністю достатньої обчислювальної потужності, розвиненої периферії, апаратних модулів ШІМ, а також можливістю реалізації бездротових та дротових інтерфейсів керування.

Мікроконтролер ESP32 побудований за модифікованою Гарвардською архітектурою, що поєднує логічне розділення пам'яті програм і даних із загальним адресним простором. Два обчислювальні ядра Tensilica Xtensa LX6 дозволяють розподіляти задачі керування, обробки сигналів та обміну даними, що є особливо корисним при одночасному керуванні декількома каналами освітлення та зовнішніми інтерфейсами.

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.ПЗ

Арк.

23

Основні параметри живлення ESP32-WROOM-32:

- напруга живлення: 3,0–3,6 В;
- струм у режимі активної роботи: 80–100 мА (короткочасні піки);
- струм у режимі очікування: <10 мА (без Wi-Fi).

Оцінка споживаної потужності:

$$P_{ESP32} = U \cdot I \approx 3.3 \times 0.1 = 0.33 \text{ Вт} \quad (3.1)$$

Таким чином, при проектуванні системи живлення необхідно враховувати пікові навантаження мікроконтролера.

3.3 Система живлення та стабілізації напруги

Живлення пристрою здійснюється від мережі змінного струму через модульні імпульсні джерела живлення **IRM-60-12** та **IRM-60-24**, які забезпечують стабілізовані вихідні напруги +12 В та +24 В відповідно. [23,24]



(IRM-60)

Рис 12. Загальний вигляд блока живлення.

Застосування готових сертифікованих AC/DC-модулів дозволяє підвищити електробезпеку пристрою, зменшити рівень електромагнітних завад та спростити реалізацію силової частини.

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					24
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

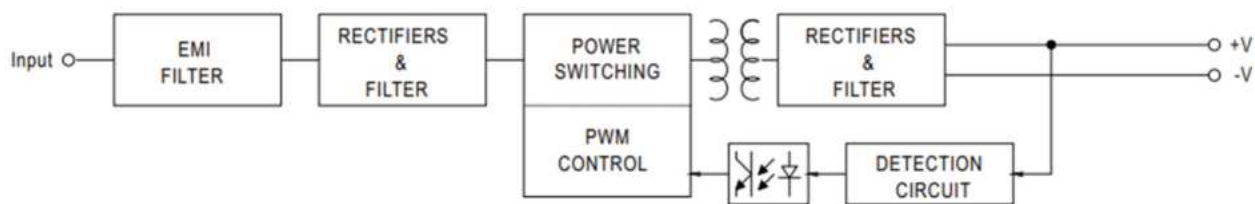


Рис 12. Структурна схема блока живлення.

Напруга +12 В використовується для живлення допоміжних вузлів та формування напруги логічного рівня, тоді як +24 В призначена для живлення світлодіодних стрічок. Для зниження рівня пульсацій та фільтрації перешкод на виходах джерел живлення застосовані фільтруючі конденсатори **C1, C2, C5, C6** номіналом 1–10 мкФ, які виконують роль локальних накопичувачів енергії та зменшують імпульсні просідання напруги.

Для живлення мікроконтролера та логічних схем використовується лінійний стабілізатор напруги **LM1117-3**, який формує стабільну напругу +3,3 В. Вибір лінійного стабілізатора обумовлений низьким рівнем шумів та простотою реалізації. Конденсатори **C3, C10, C11, C12, C13, C14** виконують функцію локальної розв'язки по живленню, зменшуючи вплив імпульсних навантажень та забезпечуючи стабільну роботу цифрових і аналогових вузлів.

3.4 Силові ключі та вихідний каскад

Безпосереднє комутування струму світлодіодних стрічок у даному пристрої реалізовано на MOSFET-транзисторах **2N7000**, які працюють у ключовому режимі (режим насичення для MOSFET — “fully on” / “fully off”). Формування ШІМ-сигналів для цих ключів виконується не мікроконтролером напряму, а спеціалізованим багатоканальним ШІМ-драйвером **PCA9685**, що забезпечує 16 незалежних виходів із 12-бітною роздільною здатністю. Такий підхід зручний тим, що мікроконтролер ESP32 передає в PCA9685 лише значення яскравостей по I²C, а точне формування імпульсів здійснюється апаратно всередині драйвера без навантаження CPU, з мінімальним джитером і стабільною частотою.

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

25

Мікросхема PCA9685 є 16-канальним LED-контролером з керуванням по шині I²C, оптимізованим для застосувань із керуванням підсвічуванням червоного, зеленого, синього та бурштинового (RGBA) кольорів. Кожен вихід світлодіода має власний індивідуальний ШІМ-контролер із 12-бітною роздільною здатністю (4096 рівнів) та фіксованою частотою, яка програмується в діапазоні приблизно від 24 Гц до 1526 Гц. Коефіцієнт заповнення ШІМ може змінюватися в межах від 0 % до 100 %, що дозволяє встановлювати задане значення яскравості світлодіода. Усі виходи працюють на одній спільній частоті ШІМ.

Кожен вихід LED може бути:

вимкнений або увімкнений (без використання ШІМ), або керуваний власним ШІМ-контролером.

Вихідні драйвери світлодіодів можуть бути налаштовані як відкритий стік (open-drain) зі струмом до 25 мА при 5 В, або як totem-pole з можливістю віддавати 10 мА та приймати 25 мА при 5 В. Мікросхема PCA9685 працює в діапазоні напруг живлення від 2,3 В до 5,5 В. Входи та виходи є толерантними до 5,5 В. Світлодіоди можуть бути безпосередньо підключені до виходів LED (до 25 мА, 5,5 В) або керуватися за допомогою зовнішніх драйверів, що дозволяє працювати з більшими струмами або вищими напругами при мінімальній кількості дискретних компонентів.

Особливості роботи по шині I²C

PCA9685 належить до сімейства пристроїв Fast Mode Plus (Fm+), які забезпечують підвищену швидкість роботи шини I²C — до 1 МГц, а також підтримують більшу ємність навантаження шини — до 4000 пФ.

Хоча мікросхеми PCA9635 та PCA9685 мають багато спільних характеристик, PCA9685 володіє низкою унікальних особливостей, що роблять її більш придатною для застосувань, таких як LCD-підсвічування та архітектурне або декоративне LED-освітлення (Ambilight).

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.ES.11972862.001.ПЗ

Арк.

26

Адресація та програмне скидання

Програмно-налаштовані адреси LED All Call та три адреси Sub Call по шині I²C дозволяють усім або визначеним групам мікросхем PCA9685 реагувати на спільну адресу. Це дає можливість, наприклад, одночасно вмикати або вимикати всі червоні світлодіоди чи реалізовувати ефект “біжучого рядка”, мінімізуючи кількість I²C-команд.

Функція програмного скидання (Software Reset, SWRST) через загальний витік I²C дозволяє виконати скидання PCA9685 аналогічно апаратному POR. Усі регістри ініціалізуються значеннями за замовчуванням, а виходи встановлюються у стан LOW, що забезпечує швидку та зручну повторну конфігурацію пристрою.

Драйвер PCA9685 генерує ШИМ-рівні 0/лог.1 на виходах LEDx. Ці сигнали подаються на затвори MOSFET-транзисторів (або через узгоджувальний каскад, якщо потрібні більші струми затвора/інша напруга керування). Важливо розуміти, що PCA9685 є логічним драйвером (для керування навантаженням у міліамперному діапазоні), тому основною частині саме MOSFET виконує функцію комутатора струму стрічки.

Кожен кольорний канал R, G, B керується окремим транзистором, що забезпечує незалежне регулювання середнього струму кожного каналу та, відповідно, змішування кольору. У типовому включенні стрічки MOSFET використовується як низькобічний ключ (low-side switch): стік підключений до “мінуса” навантаження, витік — до землі (GND). “Плюс” стрічки подається напряду від джерела 12/24 В.

Оцінка часу фронтів (t_r , t_f)

Час фронтів MOSFET визначається зарядом затвора та струмом, яким драйвер здатний заряджати/розряджати затвор. Для транзистора 2N7000 типовий заряд затвора $Q_g \approx 5$ нКл. Припустимо, що ефективний струм керування затвором становить 10 мА.

Формула оцінки часу фронту:

$$t_{edge} \approx Q_g / I_{drv} \quad (3.2)$$

	Виконав				КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					27
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{edge} \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} / 10 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 0,5 \text{ мкс.} \quad (3.3)$$

Отже, час наростання та спаду струму можна прийняти:

$$t_r \approx t_f \approx 0,5 \text{ мкс.} \quad (3.4)$$

Втрати на провідність (статичні)

Втрати на провідність визначаються опором відкритого каналу MOSFET та струмом навантаження. Для 2N7000 при напрузі керування 3,3 В типовий опір каналу можна оцінити як $R_{DS(on)} \approx 1,5 \text{ Ом}$.

Формула статичних втрат:

$$P_{cond} = I^2 \cdot R_{DS(on)} \cdot D \quad (3.5)$$

При струмі $I = 0,15 \text{ А}$ та коефіцієнті заповнення $D = 1$:

$$P_{cond} = (0,15)^2 \cdot 1,5 \approx 0,034 \text{ Вт.} \quad (3.6)$$

Втрати на перемикання (динамічні)

Динамічні втрати виникають під час перемикання транзистора, коли на ньому одночасно присутні напруга та струм.

Формула динамічних втрат:

$$P_{sw} \approx 0,5 \cdot V \cdot I \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{PWM} \quad (3.7)$$

Приймаємо: $V = 24 \text{ В}$, $I = 0,15 \text{ А}$, $(t_r + t_f) = 1 \text{ мкс}$, $f_{PWM} = 1 \text{ кГц}$.

$$P_{sw} \approx 0,5 \cdot 24 \cdot 0,15 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \approx 0,0018 \text{ Вт (1,8 мВт)}.$$

Втрати на керування затвором

Втрати на керування затвором пов'язані із зарядом та розрядом ємності затвора при кожному циклі ШІМ.

Формула втрат на керування затвором:

$$P_{gate} = Qg \cdot V_{GS} \cdot f_{PWM} \quad (3.8)$$

При $Qg = 5 \text{ нКл}$, $V_{GS} = 3,3 \text{ В}$ та $f_{PWM} = 1 \text{ кГц}$:

$$P_{gate} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot 3,3 \cdot 1000 \approx 0,000017 \text{ Вт (0,017 мВт)}.$$

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

При струмі навантаження 150 мА основні втрати у MOSFET визначаються статичними втратами на провідність. Втрати на перемикання та керування затвором є незначними. Отримані значення підтверджують доцільність використання MOSFET у ключовому режимі для ШІМ-керування світлодіодними стрічками з малим та середнім струмом.

3.7. Блок оптоелектронної розв'язки та керування АС-навантаженням

Блок оптоелектронної розв'язки та керування навантаженням змінного струму призначений для безпечного та надійного керування зовнішнім АС-навантаженням з боку низьковольтної логічної частини пристрою. Основною метою застосування оптоелектронної розв'язки є гальванічне відокремлення силового кола змінного струму від мікроконтролера та логічних схем, що суттєво підвищує електробезпеку, надійність та надійність всієї системи.

До складу блоку входять оптосимістор МОС3021М та силовий симістор ВТ136. Оптосимістор забезпечує передачу керуючого сигналу з логічного рівня на силову частину без електричного контакту між ними. Світлодіод оптопари керується виходом мікроконтролера або драйвера, а фоточутливий елемент формує імпульс керування для симістора.

Силовий симістор ВТ136 виконує безпосереднє комутування навантаження змінного струму. Застосування окремого симістора дозволяє працювати з напругами мережі 220 В та струмами, що значно перевищують можливості оптосимістора.

Для надійного спрацювання оптосимістора необхідно забезпечити достатній струм через світлодіод оптопар. Типове пряме падіння напруги на світлодіоді оптопар МОС3021 становить приблизно 1,2 В.

Формула розрахунку струму світлодіода оптопар:

$$I_{LED} = (U_{ctrl} - U_f) / R$$

При напрузі керування $U_{ctrl} = 3,3$ В та резисторі $R = 330$ Ом:

$$I_{LED} = (3,3 - 1,2) / 330 \approx 6,4 \text{ мА.}$$

	Виконав				КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					29
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане значення перевищує мінімально необхідний струм спрацювання, що гарантує надійне керування оптопарою.

3.6 Інтерфейс USB–UART на базі FT232RQ

Для програмування мікроконтролера та налагодження системи застосовано USB–UART перетворювач FT232RQ. Він забезпечує стабільний двонаправлений зв'язок з персональним комп'ютером та підтримує швидкості обміну до кількох мегабіт за секунду.

Основні параметри FT232RQ:

- напруга живлення: 5 В (USB) / 3,3 В (логіка);
- струм споживання: до 15 мА.

Оцінка потужності:

$$P_{USB} \approx 5 \times 0.015 = 0.075 \text{ Вт} P_{\{USB\}} \quad (3.9)$$

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

30

4. КОНСТРУКТОРСЬКО – ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Визначення номінального діаметра монтажного отвору

$d \geq d_{\text{ве}} + \Delta d_{\text{МО}} + r$, де $d_{\text{ве}}$ – діаметр вивода елемента, для якого визначається діаметр монтажного отвору (МО);

$\Delta d_{\text{МО}}$ – нижнє граничне відхилення від номінального діаметра МО,

$\Delta d_{\text{МО}} = 0,1$ мм,

r – різниця між мінімальним діаметром МО і максимальним діаметром виводу елемента, $r = 0,1 \dots 0,2$ мм.

$$d \geq d_{\text{ве}} + \Delta d_{\text{МО}} + r = 0,5 + 0,1 + 0,2 = 0,8 \text{ мм} \quad (4.1)$$

2.2 Визначення діаметра контактної майданчика (КМ)

$$D_{\text{max}} = D_{\text{minI}} + 1,5 * h_{\text{ф}} + 0,03, \quad (4.2)$$

де D_{minI} – мінімальний ефективний діаметр КМ, мм;

$h_{\text{ф}}$ – товщина фольги, $h_{\text{ф}} = 0,035$ мм. Коефіцієнт $1,5 h_{\text{ф}}$ враховує підрівнювання фольги друкованого провідника в циліндр.

0,03 – КМ виготовляють комбінованим позитивним методом.

$$D_{\text{minI}} = 2 \left(b_{\text{ПО}} + \frac{d_{\text{max}}}{2} + \delta_0 + \delta_{\text{КМ}} \right) \quad (4.3)$$

де d_{max} – максимальний діаметр просвердленого отвору в ДП, мм;

$b_{\text{ПО}}$ – ширина пояска КМ, $b_{\text{ПО}} = 0,05$ мм (табл.3.2);

δ_0 – похибка розташування центру отвору щодо вузла КС, $\delta_0 = 0,07$ мм (табл.3.3);

$\delta_{\text{КМ}}$ – похибка розташування центру КМ щодо вузла КС, $\delta_{\text{КМ}} = 0,05$ (табл.3.3).

	Виконав				КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					31
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Максимальний діаметр просвердленого отвору ДП:

$$d_{max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15), \quad (4.4)$$

де d – номінальний діаметр МО, мм;

Δd – допуск на діаметр отвору, $\Delta d=0,05$ мм;

$$d_{max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15) = 0,8 + 0,05 + 0,1 = 0,95 \text{ мм.}$$

$$D_{minI} = 2 \left(b_{ПО} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_0 + \delta_{KM} \right) = 2 \left(0,05 + \frac{0,95}{2} + 0,07 + 0,05 \right) = 1,29$$

$$D_{max} = D_{minI} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 = 1,29 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,37 \text{ мм}$$

Максимальний діаметр КМ:

$$D_{max} = D_{min} + 0,02$$

$$D_{max} = 1,29 + 0,02 = 1,39 \text{ мм}$$

2.3 Визначення мінімальної ширини провідника

$$b_{min} = b_{\Gamma_{пр}} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 \quad (4.5)$$

де $b_{\Gamma_{пр}}$ – мінімальна ширина провідника. Визначаємо з таблиці класів точності (табл.3.2). Для 4-го класу точності ДМ $b_{\Gamma_{пр}} = 0,15$ мм;

$$b_{min} = b_{\Gamma_{пр}} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 = 0,15 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,23 \text{ мм}$$

Звідси визначимо максимальну ширину :

$$b_{max} = b_{min} + 0,02 \quad (4.6)$$

$$b_{max} = 0,23 + 0,02 = 0,25 \text{ мм}$$

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					32
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розміщення ЕРЕ на платі регламентується умовно координатною сіткою із взаємо перпендикулярних систем паралельних ліній, розташованих на однаковій відстані одна від одної.

Кроком координатної сітки вибираємо 1,25 мм.

Для пірофосфатного електроліту $\gamma=0,25$, тому $D_{пер}=1,5*0,25=0,3$

Клас густини рисунка вибирається по ГОСТу. Я вибрав другий. Ширина провідників для цього класу рівне $t_{min}=0,25$ мм, а відстань між провідниками теж рівне 0,25 мм.

Визначимо товщину шини живлення. Знаючи, що сила струму рівне 0,35 А, враховуючи, що перетин провідника рівне 50мкм, і що густина струму не може бути більшою як 25 А/мм², ширина провідника буде рівним :

$$t_{заг}/(h \cdot p_1) = 5.00 / (0.05 \cdot 25) = 6,25 \quad (4.7)$$

Шина землі буде виконана у вигляді полігонів. Також вони будуть відігравати слоєм відводу тепла.

Розрахунок проведено із урахуванням, що максимальний струм, який при проходженні по доріжці викликає її перегрів на температуру 25°C.

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.ПЗ

Арк.

33

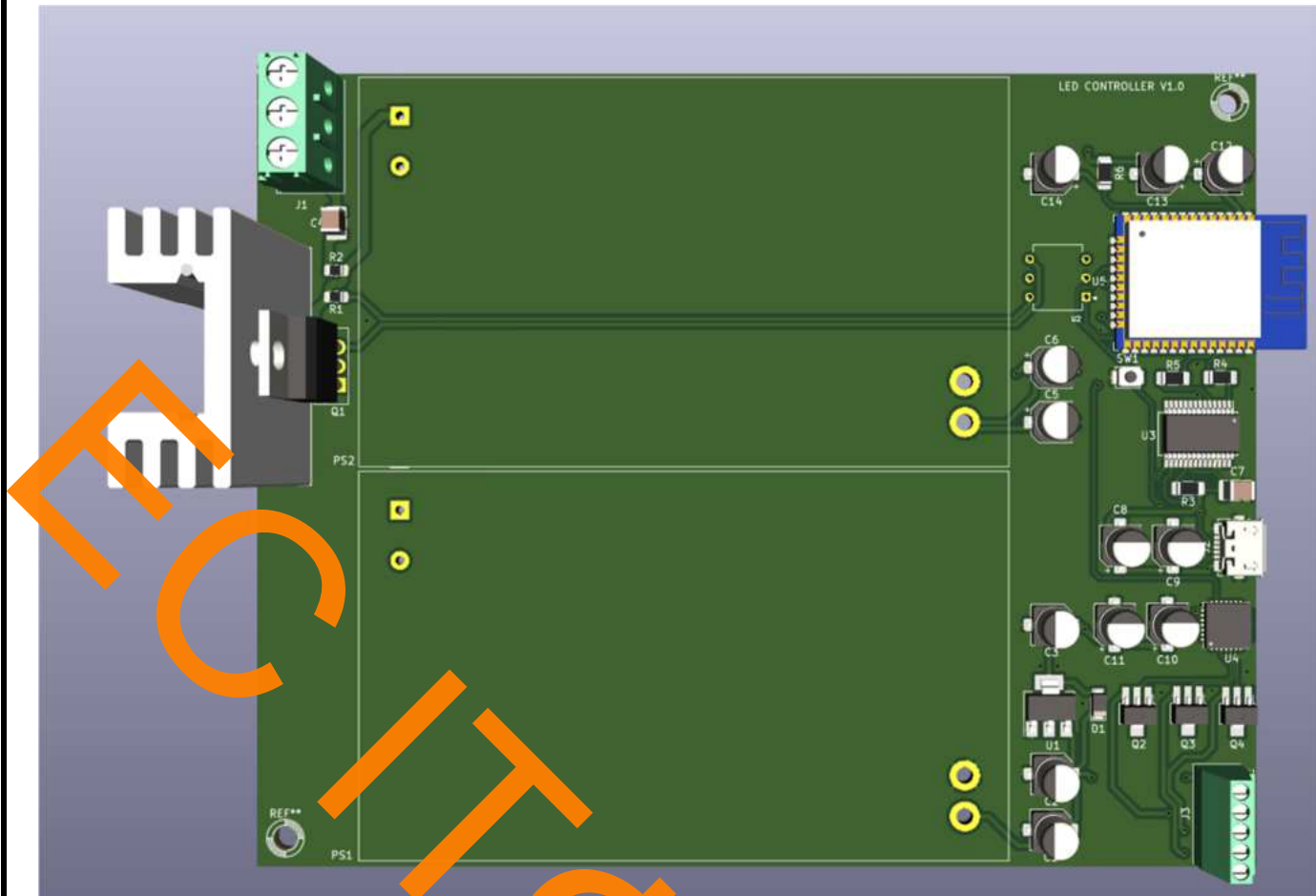


Рис14. Зовнішній вигляд спроектованої плати у середовищі проєкування.

2.4 Тепловий розрахунок.

Деталізований розрахунок теплонавантаження држкованої плати виконується з метою оцінки температурних режимів кремйх елементів та плати в цілому при тривалій роботі пристрою. Такий розрахунок є необхідним для обґрунтування працездатності елементної бази, перевірки відсутності перегріву та забезпечення необхідного рівня надійності пристрою.

Методика розрахунку ґрунтується на класичному інженерному підході, що використовується у стандартах IPC (IPC-2221, IPC-2152) та рекомендаціях MIL-HDBK-217F,[20-22] і полягає у визначенні сумарної

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

потужності тепловиділення та оцінці температурного підйому за умов природної конвекції.

Тепловий режим апаратури характеризується залежністю температури нагріву відносно навколишнього середовища від розсіювання потужності джерела енергії.

Температура навколишнього середовища дуже впливає на надійність пристрою. Цей вплив пояснюється максимально допустимою температурою інтегральних мікросхем.

Використовуючи дані, отримані у попередньому розділі проведемо аналіз потужностей розсіювання на елементах пристрою (елементи на яких за теоретичними розрахунками потужність розсіювання буде дуже малою – знехтувані).

Згідно з кресленням друкованої плати, її габаритні розміри становлять:

— довжина: 134,57 мм;

— ширина: 106,60 мм.

Площа плати визначається за формулою: $S = L \cdot W$

$$S = 0,13437 \cdot 0,10660 \approx 0,01433 \text{ м}^2 \approx 143 \text{ см}^2.$$

Сумарна теплова потужність, що розсіюється на платі:

$$P_{\Sigma} \approx 2,87 \text{ Вт.}$$

Питоме тепловантаження плати:

$$q = P_{\Sigma} / S = 2,87 / 0,01433 \approx 200 \text{ Вт/м}^2.$$

Згідно з рекомендаціями IPC-2152, значення до 300 Вт/м² є допустимими для плат з природною конвекцією.

На основі узагальнених графіків IPC-2152 для плат FR-4 площею понад 100 см² можна прийняти тепловий опір $R_{\theta_{пл}} \approx 12 \dots 18 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$. Приймається консервативне значення 15 °C/Вт.

Температурний підйом плати:

$$\Delta T = P_{\Sigma} \cdot R_{\theta_{пл}} = 2,87 \cdot 15 \approx 43 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (4.8)$$

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					35
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Розрахунок характеристик надійності пристрою.

Розрахунок надійності електронних пристроїв виконується з метою прогнозування ймовірності безвідмовної роботи виробу протягом заданого часу експлуатації та оцінки середнього напрацювання на відмову (MTBF). На етапі проектування, коли статистичні експлуатаційні дані відсутні, застосовуються аналітичні та напівемпіричні методи прогнозування, що базуються на узагальнених статистичних даних для класів електронних компонентів.

У сучасній інженерній практиці для оцінки надійності електронної апаратури найчастіше використовуються такі методики та нормативні документи:

- MIL-HDBK-217F — напівемпірична методика прогнозування інтенсивності відмов електронних компонентів;
- IEC TR 62380 (FIDES) — європейська методика прогнозування надійності з урахуванням профілю навантаження;
- Telcordia SR-332 — стандарт для телекомунікаційного обладнання.

У даній роботі для розрахунку характеристик надійності використовується методика MIL-HDBK-217F у спрощеному режимі Parts Count. Даний підхід є рекомендованим для навчальних і кваліфікаційних робіт, оскільки дозволяє виконати розрахунок при обмеженій інформації про реальні режими експлуатації та конструктивні особливості виробу.

Використання застарілих стандартів типу ГОСТ у даному випадку для сучасної електроніки є методично некоректним, оскільки більшість ГОСТів були розроблені для елементної бази 1970–1990-х років і не враховують особливостей сучасних мікросхем, технологій виготовлення (CMOS, SoC, BGA, QFN), а також реальні умови експлуатації цифрових пристроїв. Натомість стандарти MIL-HDBK-217F, IEC TR 62380 та Telcordia базуються на статистичних даних експлуатації сучасної елементної бази та широко застосовуються у міжнародній практиці.

Разом з тим, термінологія та загальні визначення теорії надійності (інтенсивність відмов, безвідмовність, ремонтпридатність) можуть бути запозичені з національних стандартів, таких як ГОСТ 27.002, що не суперечить використанню

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

сучасних методик розрахунку.

У методиці MIL-HDBK-217F (Parts Count) інтенсивність відмов окремого елемента визначається за формулою:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot K_T \cdot n \quad (4.9)$$

де λ_0 — базова інтенсивність відмов для даного типу елементів; K_T — температурний коефіцієнт; n — кількість однакових елементів у схемі.

Сумарна інтенсивність відмов пристрою визначається як сума інтенсивностей відмов усіх компонентів:

$$\lambda_{\Sigma} = \Sigma \lambda_i \quad (4.10)$$

Середній час напрацювання на відмову (MTBF) обчислюється за формулою:

$$MTBF = 1/\lambda_{\Sigma} \quad (4.11)$$

Таблиця 2. Результати розрахунку надійності з урахуванням температури

№	Елемент	К-сть, шт	λ_0 , 1/год	K_T	λ , 1/год	Примітка
1	ESP32-WROOM-32	1	$3.6 \cdot 10^{-6}$	1.2	$3.6 \cdot 10^{-6}$	Мікроконтролер
2	FT232RL	1	$2.4 \cdot 10^{-6}$	1.2	$2.4 \cdot 10^{-6}$	USB-UART
3	LM1117-3.3	1	$1.5 \cdot 10^{-6}$	1.2	$1.8 \cdot 10^{-6}$	Лінійний стабілізатор
4	PCA9685	1	$1.2 \cdot 10^{-6}$	1.2	$1.44 \cdot 10^{-6}$	PWM-драйвер
5	MOSFET 2N7000	3	$0.5 \cdot 10^{-6}$	1.1	$1.65 \cdot 10^{-6}$	Силові ключі
6	BT136	1	$1.8 \cdot 10^{-6}$	1.3	$2.34 \cdot 10^{-6}$	Симістор
7	Резистори SMD	12	$0.1 \cdot 10^{-6}$	1.0	$1.2 \cdot 10^{-6}$	Пасивні
8	Конденсатори SMD	14	$0.08 \cdot 10^{-6}$	1.0	$1.12 \cdot 10^{-6}$	Пасивні
9	Роз'єми та кнопки	3	$0.5 \cdot 10^{-6}$	1.0	$1.5 \cdot 10^{-6}$	Механічні

Підсумкові показники надійності

Сумарна інтенсивність відмов пристрою з урахуванням температурних факторів:

$$\lambda_{\text{заг}} \approx 13.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Середній напрацювання на відмову (MTBF) становить:

$MTBF = 1 / \lambda_{\text{заг}} \approx 7.4 \cdot 10^4$ годин (близько 8.5 років безперервної роботи).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		38

5. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СПРОЕКТОВАНОГО ПРИЛАДУ

Перехід народного господарства на ринкові відносини має на меті створення економичних важелів для ефективного діючого виробництва як з точки зору раціонального використання ресурсів, так і з точки зору невпинного прискорення науково – технічного прогресу і повного задоволення потреб виробників і споживачів.

Основним результатом постановлених задач повинно стати підвищення якості усіх видів продукції й забезпечення її конкурентоздатністю

Практичне припинення за останні роки приладобудівного виробництва, в тому числі й приладів аналітичної техніки, робить неможливи здійснити об'єктивний розрахунок економічної ефективності розробки приладу, тому її розрахунок носить оцінний характер.

Рівень якості конструкції характеризується системою техніко-економічних показників, номенклатура яких залежить від виду і призначення продукції. Для оцінки рівня якості спроектованої техніки необхідно витрати базового взірця (аналога), розрахувати показники технологічності для спроектованого приладу, заставити їх з показниками аналога. До показників технологічності відносять коефіцієнт матеріаломісткості виробу, коефіцієнт стандартизації виробу, уніфікації, коефіцієнт повторюваності складових частин, коефіцієнт збіжності.

5.1. Розрахунок собівартості виготовлення спроектованого приладу

Собівартість продукції – це витрати на її виробництво й реалізацію, що включають в себе вартість витрачених сировини і матеріалів, заробітну плату працівників, витрати по утриманню й експлуатації устаткування та інші поточні витрати.

Проведемо розрахунок собівартості виготовлення спроектованого приладу у вигляді калькуляції. Оскільки даний пристрій макет не планується для

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					39
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

серійного виробництва, а буде виготовлятися кафедрою тільки під замовлення інститутів та університетів то у даному розділі буде наведена тільки калькуляція собівартості спроектованого приладу не враховуючи витрати на заробітні плати чи інше.

5.2. Розрахунок кількості і вартості матеріалів, що витрачаються на виготовлення спроектованого приладу

Розрахунок кількості і вартості матеріалів представлений у вигляді таблиці 5.1.

Табл. 5.1 Розрахунок кількості і вартості матеріалів що витрачаються на виготовлення спроектованого приладу

№	Найменування	Характеристика	Од.	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	Матеріал FR4	130x106 мм, 1.6 мм	шт	1	120	120
2	Мідна фольга	35 мкм, 2 шари	шт	1	65	65
3	Покриття ENIG	Ni+Au	шт	1	140	140
4	Фотошаблон і експонування	Топ - бот	шт	1	60	60
5	Травлення провідників	Хімічне	шт	1	55	55
6	Свердління та металізація	CNC + PTH	шт	1	110	110
7	Паяльна маска	Двостороння	шт	1	70	70
8	Маркування (silkscreen)	Білий	шт	1	35	35
9	Електричний контроль	Flying probe	шт	1	45	45

Разом виготовлення друкованої плати: 700.00 грн.

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

5.3. Розрахунок кількості й вартості покупних комплектуючих виробів і напівфабрикатів, що витрачаються на виготовлення спроектованого приладу

Розрахунок кількості і вартості покупних комплектуючих виробів і напівфабрикатів представлений у вигляді табл 5.1

Табл 5.2 Розрахунок кількості і вартості покупних комплектуючих виробів напівфабрикатів на виготовлення спроектованого приладу

№	Компонент	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	ESP32-WROOM-32	1	220	220
2	PCA9685	1	95	95
3	USB-UART FT232RL	1	150	150
4	IRM-60-12 AC/DC	1	480	480
5	IRM-60-24 AC/DC	1	520	520
6	Симістор РМ136	1	45	45
7	Оптосимістор MOC3021	1	35	35
8	MOSFET 2N7000	3	12	36
9	LM1117-3.3	1	25	25
10	USB Type-C роз'єм	1	35	35
11	Конденсатори SMD	25	2	50
12	Резистори SMD	20	1	20
13	Світлодіоди індикації	4	3	12
14	Кнопка керування	1	6	6
15	Клеми та роз'єми	6	10	60

Разом покупні комплектуючі: 1789.00 грн

Додаткові виробничі витрати

Монтаж компонентів (SMT + ручний): 220.00 грн

Налагодження та перевірка: 120.00 грн

Пакування та логістика: 80.00 грн

Разом додаткові виробничі витрати: 420.00 грн

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

41

Загальна калькуляція собівартості

№	Стаття витрат	Сума, грн
1	Виготовлення друкованої плати	700.00
2	Покупні комплектуючі	1789.00
3	Монтаж і перевірка	420.00
	РАЗОМ СОБІВАРТІСТЬ	2909.00

РАЗОМ СОБІВАРТІСТЬ 2909.00

ЕС
ІТ
Ф
У
Ж
Т
У

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.ES.11972862.001.ПЗ

Арк.

42

6. ЗАХОДИ ПО ПЛАНУВАННЮ, ТЕХНІЦІ БЕЗПЕКИ ТА ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

6.1. Охорона праці. Характеристика небезпечних і шкідливих факторів на всіх етапах технологічного процесу, монтажу і експлуатації.

Після обробки поверхонь деталей механічними методами (шліфівка, різка і т.д.) часто використовують ефективні хімічні методи очистки поверхні (знежилення, травлення і т.д.) - при цьому використовують небезпечні і отруйні речовини, їх вплив залежить від функціональних властивостей, агрегатного стану, класу шкідливості, часу і характеру впливу, засобів загального та індивідуального захисту.

При знежиренні використовують їдкі луги, горючі розчинники (бензин, ацетон, трихлоретан, тетуол, бензол, спирти).

При травленні небезпечними є сірчана, азотна, ортофосфорна кислоти. Виникає загроза ентерального отруєння, хімічних опіків, отруєння в наслідок вдихання парів цих кислот. Процеси гальванічної обробки супроводжуються виділенням з поверхні ванн водню та кисню, що захвачують за собою пари електроліту, окиси металів, солі, органічні сполуки. Останні сильно забруднюють повітря гальванічного цеху.

Все це відповідає нормативному акту з питань охорони праці (НАОП) 1.4.32-2.63-77 (ОСТ4ГО.091.228-77): "Вимоги до ступеню очищення вентиляційних викидів з гальванічних цехів", НАОП 1.4.32-2.58-78 (ОСТ114ГО.0.91.249-78): "Легкозаймисті, горючі, хімічно-небезпечні та шкідливі речовини. Вимоги безпеки при зберіганні, транспортуванні та використанні". Монтаж електричних схем приладів, радіоапаратури ведеться з застосуванням різних видів пайки. Кожному різновиду пайки характерні певні шкідливі і небезпечні фізичні фактори, що відрізняються як кількістю так і якістю характеристик. При цьому деякі види пайки продукують декілька таких фізичних факторів, що ведуть до погіршення здоров'я працівників, підвищення

	Виконав			
	Керівник			
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

KPM.EC.11972862.001.P3

Арк.

43

травматизму, погіршення умов праці, виникнення пожеж і вибухів. Такими потенційно-шкідливими є: запыленість і загазованість повітря робочої зони; інфрачервоне випромінювання від розплавленого припою; високочастотне електромагнітне випромінювання; ультразвукове випромінювання від паяльника при пайці хвилею; дія електростатичного заряду; неоптимальна освітленість робочих зон; незадовільні метеорологічні умови в робочій зоні; вплив бризг палива розплавленого припою; ураження електричним струмом.

Враховуючи не абияку шкідливість вихідних компонентів, до приміщення, де виконується паяння пред'являють особливі вимоги: НАОП 1.4.32-2.87-81 (ОСТ 25 2191-81); "Паяння свинцево олов'яними припоями. Вимоги безпеки"; НАОП 1.4.32-2.82-84 (ОСТ 25 1159-84): "виробництво друкованих плат. Вимоги безпеки".

6.2. Основні заходи безпеки та вилучення передбачуваних шкідливих факторів на всіх етапах технологічного процесу, монтажу і експлуатації..

Для створення безпечних умов праці необхідно виконання відповідних заходів у відповідності з ГОСТ 12.3.008-75.

Основні вимоги безпеки технологічних процесів включають наступні аспекти:

- усунення безпосереднього контакту працівників з матеріалами, що мають шкідливий вплив;
- заміна небезпечних і шкідливих технологічних процесів і операцій на менш небезпечні, чи зовсім безпечні;
- використання комплексної механізації і автоматизації виробництва, дистанційне управління особливо шкідливими процесами і операціями;
- раціональна організація праці і відпочинку;
- впровадження систем контролю і управління технологічними процесами, що забезпечують захист працівників (аварійне відключення виробничого обладнання);
- своєчасне видалення і знешкодження шкідливих відходів виробництва.

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					44
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важлива і обов'язкова умова забезпечення безпеки - викладення умов безпеки в технологічній документації. Повнота викладу контролюється методичними вказівками: "РД 50-134-78".

Існує ряд загальних стандартів, якими треба користуватися:

-для приміщень: "Будівельні норми і правила":

- для обладнання - ГОСТ 12.2.003-74: "Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки";

-ГОСТ 12.1 .004-76 "Пожежна безпека. Загальні вимоги";

-ГОСТ 12.1.010-76 "Вибухобезпека. Загальні вимоги".

Основні заходи по охороні праці (ОП) при роботах з хімічними речовинами і матеріалами:

- автоматизація і механізація технологічних процесів: найбільший рівень безпеки в машинобудівному виробництві - поточні лінії: автоматизовані системи для пайки, травлення, обезжирення;

- герметизація обладнання в спеціальних боксах, шафах, що обладнані ефективною вентиляцією;

- заміна токсичних, отруйних речовин на менш небезпечні.

Від кислот і лугів захищаються гумовими або поліхлорвініловими фартухами, чоботами. При роботі з токсичними і отруйними речовинами використовують засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).

Отруйні і токсичні речовини перевозять у спеціальній тарі на тележках із швидкістю < 5 км/год.

Вдихання хімічних речовин в газоподібному стані приводить до пошкодження верхніх дихальних шляхів і до загально токсичного впливу при всмоктуванні в кров.

При різних операціях можуть поступати в атмосферу промислові речовини, що відносяться до першого класу безпеки. Так трихлоретан при дії світла перетворюється на фосген, що є дуже небезпечним.

При всіх операціях пайки в повітря можуть попадати пари олова та свинцю, пари соляної кислоти, окис вуглецю, вуглеводень та інше. Особливо шкідливий

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

свинець та його сполуки. При попаданні в організм він акумулюється в кістках, м'язах, печінці. Результатом є свинцеве отруєння.

Пайка з використанням флюсів і їх біологічний вплив залежить від складу:

- каніфоль - подразнюючий вплив;
- спирти - наркотичний ефект;
- етиленгліколь - токсичний

вплив. Основні заходи:

1. Водонепроникна підлога з нахилом для стоку в каналізацію.
2. При ручній пайці використовувати паяльники живленням до 42 В.
3. Різні технологічні операції виконувати в різних приміщеннях.
4. Використані серветки спалюють і повторно не використовують,
5. Експлуатація цехів і приміщень тільки при наявності приточно - відточної вентиляції.
6. Не допускати до роботи з припоями осіб до 18 років і вагітних.

Для захисту шкіри рук від речовин, що входять до складу флюсів, використовують захисні мазі і пасти (мазь "Миколан", пасти - ИЕП-1, казеїнова).

Все вищеописане відповідає наступним НАОП

- НАОП 1.4.32-2.67-84 (ОСТ 11073.062-84);
- НАОП 1.4.32-2.39-85 (ОСТ 11 120005-85);
- НАОП 1.4.32-2.21-80 (ОСТ 11 091.700-80);
- НАОП 1.4.32-2.63-77 (ОСТ4ГО. 091.228-77).

6.3. Розрахунок необхідного повітряного обміну для промислової вентиляції.

Розрахунок необхідного повітряного обміну ведеться по наступним факторам: по кількості працюючих; по надходженню в повітря робочої зони шкідливих газів, парів та пилу; по виділенню вологи; по теплонадлишкам.

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					46
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По першому фактору розрахунок кількості повітря (м /год) вираховується лише при нормальному мікрокліматі і відсутності в повітрі шкідливих речовин, чи вмісту їх в межах допустимих норм.

Обмін повітря визначається по формулі:

$$L=nL' \quad (6.1)$$

де n - число працюючих;

L' - витрати повітря на одного працюючого (для об'ємів приміщення 20 м³ і більше на одного працюючого).

Для $n = 50$ чел., та $L = 20$ м /год (для об'ємів приміщення 20 м³ і більше на одного працюючого в промислових приміщеннях):

$$L=22*20=440 \text{ (м}^3\text{/год)} \quad (6.2)$$

По другому фактору необхідний обмін повітря визначається по формулі:

$$(6.3)$$

де $q_{\text{мк}}$ - інтенсивність надходження шкідливої речовини в повітря робочої зони;

Z_1 - гранично допустима концентрація (ГДК) даної речовини (в мг/м³);

Z_2 - концентрація шкідливої речовини в повітрі, що надходять (в мг/м³).

Концентрація Z_2 повинна бути мінімальною, що по санітарним нормам відповідає формулі: $Z_2 < 0,3Z_1$.

Враховуючи високу шкідливість компонентів, що входять до складу припою і знаходяться в парогазовому стані, розраховується L для слідуючих елементів:

a) свинець - клас шкідливості 1-й, ГДК в повітрі робочої зони 0,01 мг/м³;

b) олово - клас шкідливості 3-й, ГДК в повітрі робочої зони 10 мг/м³;

c) цинк - клас шкідливості 2-й, ГДК в повітрі робочої зони 0,5 мг/м³;

d) мідь - клас шкідливості 2-й, ГДК в повітрі робочої зони 1 мг/м³.

$$\text{Для свинцю: } L_c = \frac{10}{0.01-0.3*0.01} = 1429 \text{ (м}^3\text{/год)} \quad (8.4)$$

Для цинку: (6.5)

Для олова: (6.6)

Для міді: (6.7)

У відповідності з СН 245-71 при одночасному надходженні в повітря приміщення декількох шкідливих речовин однонаправленої дії

	Виконав				КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					47
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунок вентиляції виконується сумуванням об'ємів повітря, необхідного для розбавлення кожної речовини окремо до допустимих концентрацій.

$$L = L_C + L_O + L_M + L_U = 1429 + 1,4 + 28,6 + 1,4 = 1460,4 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (6.8)$$

По третьому фактору розрахунок виконується по формулі:

$$L = \frac{m * q_B}{q_Y - q_H} \quad (6.9)$$

де $m = 0,8$ при висоті приміщення $n = 5 \div 3 \text{ м}$;

q_B - кількість вологи, що виділяється в приміщенні

(взьмемо $q_B = 150 \text{ г/м}^3$);

q_Y - вологість повітря, що виділяється з приміщення

(взьмемо $q_Y = 130 \text{ г/м}^3$);

q_H - вологість повітря (взьмемо $q_H = 100 \text{ г/м}^3$)

$$L = \frac{0,8 * 150}{130 - 100} = 4 \text{ (м}^3/\text{год)}$$

По четвертому фактору об'єм повітря розраховують по формулі :

$$L = \frac{Q}{c * (t_Y - t_n) * \rho} \quad (6.10)$$

де Q - надлишок тепла в приміщенні в Дж/год;

c — теплоємність повітря в Дж/кг-К;

ρ - густина повітря в кг/м³;

t_Y і t_n температура відкачуючого і нагнітаемого повітря відповідно

$$L = \frac{150000}{1007 * (30 - 20) * 1.206} = 12.35 \text{ (м}^3/\text{год)} \quad (6.11)$$

Загальний необхідний повітрообмін для промислової вентиляції при виробництві спроектованого пристрою:

$$L_{\text{заг}} = 1000 + 1460,4 + 4 + 12,35 = 2476,75 \text{ (м}^3/\text{год)}. \quad (6.12)$$

	Виконав				КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					48
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.4. Захист навколишнього середовища.

Охороні навколишнього середовища з кожним роком приділяється все більше уваги, що обумовлено в першу чергу різким зростанням шкідливих викидів, що наносять біосфері великих, часто не відновлюваних втрат.

В електронній техніці використовується широка гамма матеріалів. Вже на етапі розробки нових видів продукції слід передбачити можливість її повторної переробки. Вироби повинні мати тривалий строк використання, надаватися ремонту та демонтажу або повторному використанню.

Одним із завдань дипломного проекту була розробка друкованої плати. Процес виготовлення друкованої плати складається з декількох етапів і характеризується використанням різних хімічних речовин. При виготовленні друкованої плати застосовується багатованнова промивка, що забезпечує раціональне використання води. При скиданні її у водоймища необхідно досліджувати як самі стоки, так і воду в водоймищі. Необхідно використовувати замкнуті водокорисні цикли.

Обладнання для нанесення електролітичних, хімічних та анодизаційних поверхонь має відповідати вимогам до обладнання згідно ГОСТ 12.3.008 - 75 та ГОСТ 12.2.003-74.

Обладнання для низькотемпературної пайки, лудіння та робочі місця мають відповідати вимогам "Санітарні правила організації процесів пайки дрібних виробів сплавами, що містять свинець". Вони повинні мати місцеву витяжну вентиляцію, оснащену звуковою або світловою сигналізацією, що попереджає про припинення відносу повітря.

Всі пристрої для підключення та перемикання електричних кіл потрібно захищати кожухами.

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					49
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. ВИСНОВОК

У даній магістерській роботі виконано проектування, розрахунок та техніко-економічне обґрунтування програмно-апаратного контролера керування світлодіодними стрічками з використанням широтно-імпульсної модуляції. Основною метою роботи було створення універсального та масштабованого пристрою керування RGB-освітленням із можливістю програмної конфігурації, стабільної роботи на підвищених частотах ШІМ та інтеграції у сучасні цифрові системи керування.

У ході роботи проаналізовано принципи формування ШІМ-сигналів, методи їх генерації та особливості застосування для керування яскравістю світлодіодних джерел світла. Обґрунтовано доцільність використання високочастотної ШІМ-модуляції для освітлювальних систем, зокрема у студійному та декоративному освітленні, де критичним є уникнення мерехтіння та взаємодії з експозиційними параметрами фото- та відеоапаратури.

Розроблено структурну та принципову схеми пристрою, які включають мікроконтролерний модуль ESP32-WROOM-32, багатоканальний ШІМ-драйвер PCA9685, силові ключі на MOSFET-транзисторах, систему оптоелектронної розв'язки для керування навантаженням змінного струму, а також вузли живлення на основі імпульсних AC/DC-модулів. Така архітектура забезпечує гальванічну розв'язку, високу електробезпеку та гнучкість керування.

У роботі виконано детальні електричні, теплові та надійнісні розрахунки. Зокрема, оцінено втрати потужності в силових елементах, втрати на перемикання MOSFET-транзисторів, тепловий режим друкованої плати з урахуванням її реальних геометричних розмірів та рекомендацій стандартів IPC-2152. Показано, що при сумарному тепловиділенні близько 2,9 Вт температурний режим плати залишається у допустимих межах за умов природної конвекції, без необхідності застосування примусового охолодження.

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Окрему увагу приділено розрахунку характеристик надійності пристрою. На основі сучасних міжнародних методик прогнозування надійності (MIL-HDBK-217F, IEC TR 62380) визначено інтенсивність відмов основних компонентів та розраховано середній час напрацювання на відмову. Отримані результати підтверджують відповідність пристрою вимогам до надійності електронних систем побутового та напівпрофесійного призначення. Обґрунтовано доцільність використання сучасних стандартів замість застарілих нормативних документів, які не враховують особливостей сучасної елементної бази.

Виконано економічний розрахунок виготовлення пристрою, що включає оцінку вартості друкованої плати, покупних комплектуючих та виробничих витрат. Показано, що собівартість дослідного зразка є обґрунтованою та відповідає рівню складності пристрою, а при переході до дрібносерійного виробництва можливе суттєве зниження вартості одиної продукції.

Отримані результати підтверджують, що розроблений контролер є функціонально завершеним, технічно обґрунтованим та придатним до практичного використання. Запропоновані виробні технічні рішення можуть бути використані для створення систем декоративного, сценічного та студійного освітлення, а також можуть слугувати основою для подальшої модернізації, зокрема інтеграції бездротових інтерфейсів, розширення кількості каналів керування та реалізації складніших алгоритмів світлових ефектів.

Таким чином, поставлені у магістерській роботі завдання виконано повністю, а отримані результати мають як теоретичну, так і практичну цінність.

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.P3</i>	Арк.
	Керівник					51
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. – 3rd ed. – Cambridge University Press, 2015.
2. Tietze U., Schenk C., Gamm E. Semiconductor Circuit Design. – Springer, 2019.
3. Erickson R. W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. – Springer, 2001.
4. Pressman A. I., Billings K., Morey T. Switching Power Supply Design. – McGraw-Hill, 2009.
5. Vahiano J. W. Embedded Systems: Introduction to ARM Cortex-M Microcontrollers. – CreateSpace, 2012.
6. Yiu J. The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors. – Newnes, 2014.
7. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. – Espressif Systems, 2023.
8. Espressif Systems. ESP32-WROOM-2 Datasheet. – Espressif Systems, 2023.
9. Texas Instruments. Understanding PWM Signal Generation. – Application Report, 2016.
10. NXP Semiconductors. PWM for LED Lighting Applications. – Application Note, 2018.
11. NXP Semiconductors. PCA9685 – 16-Channel, 12-Bit PWM LED Controller Datasheet. – 2022.
12. ON Semiconductor. AND9093 – MOSFET Switching Losses Explained. – Application Note, 2015.
13. Infineon Technologies. Triac Basics and Applications. – Application Note, 2017.
14. STMicroelectronics. BT136 Datasheet. – 2022.
15. Vishay Intertechnology. 2N7000 MOSFET Datasheet. – 2021.
16. ON Semiconductor. MOC3021 Optotriac Datasheet. – 2020.

	Виконав				<i>KPM.EC.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

17. IPC-2152. Standard for Determining Current-Carrying Capacity in Printed Board Design. – IPC, 2010.
18. IPC-2221. Generic Standard on Printed Board Design. – IPC, 2012.
19. Texas Instruments. Thermal Design by Insight, Not Hindsight. – Application Report, 2014.
20. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – U.S. DoD, 1995.
21. IEC TR 60380. Reliability Data Handbook. – IEC, 2016.
22. ГОСТ 27.001-2015. Надійність техніки. Терміни та визначення.
23. MEAN WELL. IRM-60 Series Datasheet. – 2023.
24. MEAN WELL. Switching Power Supply Design Guide. – 2021.
25. Espressif Systems – Official Documentation. <https://www.espressif.com>
26. IPC – Association Connecting Electronics Industries. <https://www.ipc.org>
27. Texas Instruments – Application Notes Library. <https://www.ti.com>

	Виконав				<i>КРМ.ЕС.11972862.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

<i>Поз. позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кіл.</i>	<i>Примітки</i>					
<u>Конденсатори</u>								
C1–C4	Конденсатор 100 нФ, керамічний	4	GRM188R71H104KA93					
C5–C6	Конденсатор 10 мкФ, керамічний	2	GRM21BR61A106KE19					
C7–C8	Конденсатор 47 мкФ, електролітичний	2	UHE1C470MDD					
<u>Діоди</u>								
D1	Діод випрямний	1	1N4007					
D2	TVS-діод	1	SMBJ5.0A					
<u>Мікросхеми</u>								
U1	Мікроконтролер з Wi-Fi та Bluetooth	1	ESP32-WROOM-32					
U2	USB–UART перетворювач	1	FT232RL					
U3	ШИМ-контролер світлодіодів, 12В	1	PCA9685					
U4	Оптопара	1	MOC3021					
PS1	Імпульсний блок живлення 12 В	1	IRM-60-12					
PS2	Імпульсний блок живлення 24 В	1	IRM-60-24					
U5	Стабілізатор напруги 3.3 В (LDO)	1	LM1117-3.3					
<u>Світлодіоди</u>								
LED1–LED3	Світлодіод RGB потужний	3	Generic RGB LED					
<i>KPM.EC. 11972862.001 ПЕ</i>								
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення Перелік елементів	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Керецман</i>					<i>У</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
<i>Перевірив</i>	<i>Панн О.В.</i>					<i>УжНУ, ІТФ, гр. ЕС</i>		
<i>Т.контр</i>						<i>2 курс</i>		
<i>Н/Контр.</i>	<i>Панн О.В.</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Заяць Т.М.</i>							

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

Зааць Т.М.

Студента (-ки) 2 курсу
спеціальності ЕС
Керещон В.В.
(прізвище, ініціали)

ЗАЯВА

щодо самостійного виконання
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти

Я, Керещон Василь Владиславович
(прізвище, ім'я, по батькові),
Студент(-ка) 2 курсу ІТФ, ЕС
(форма навчання, факультет, курс)
заявляю: моя письмова робота на тему Інтелектуальна система
адаптивного RGB-освітлення

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

Дата

Підпис

додаток 2.

ДОВІДКА

про результати перевірки на унікальність
кваліфікаційної, навчальної (курсової) роботи

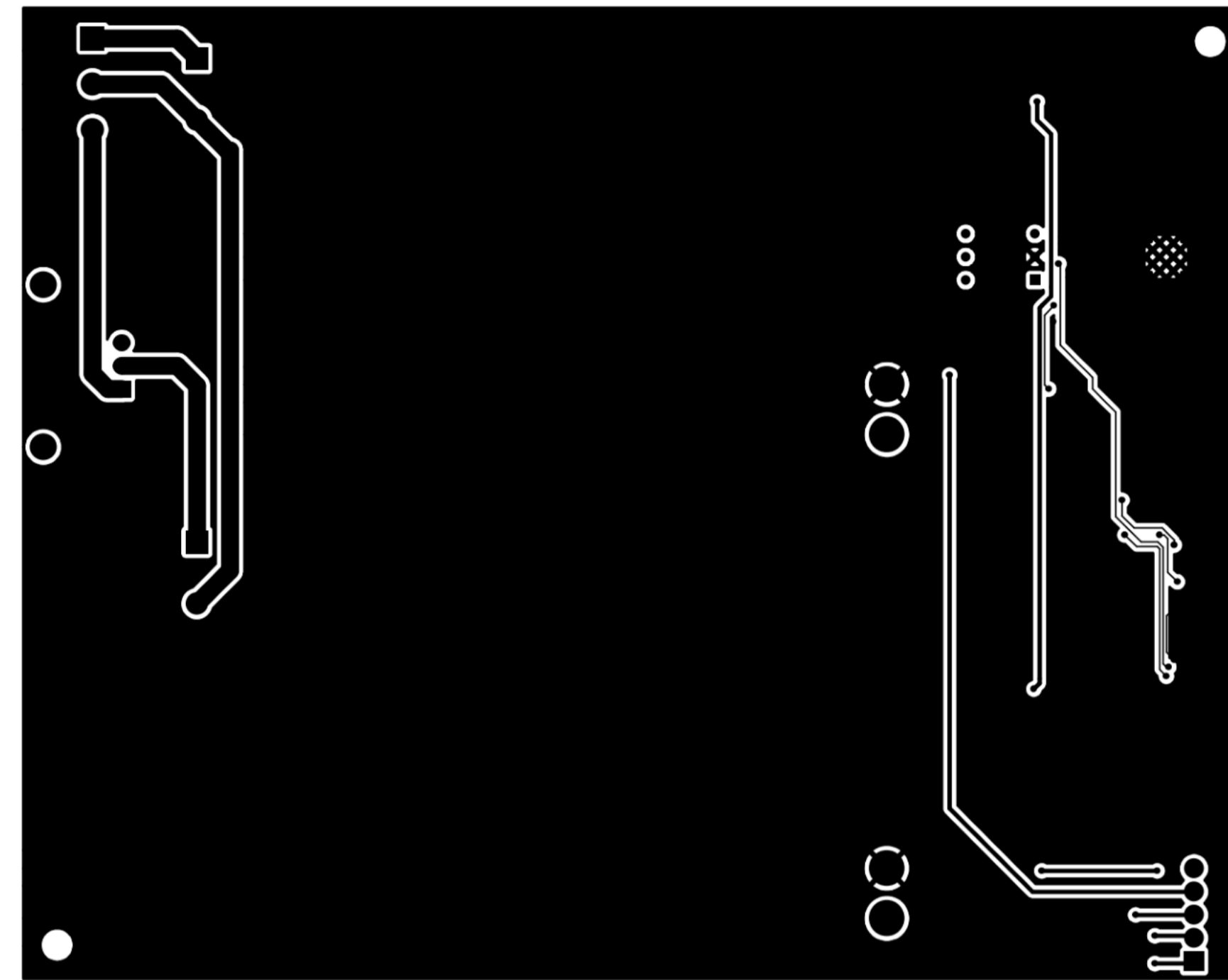
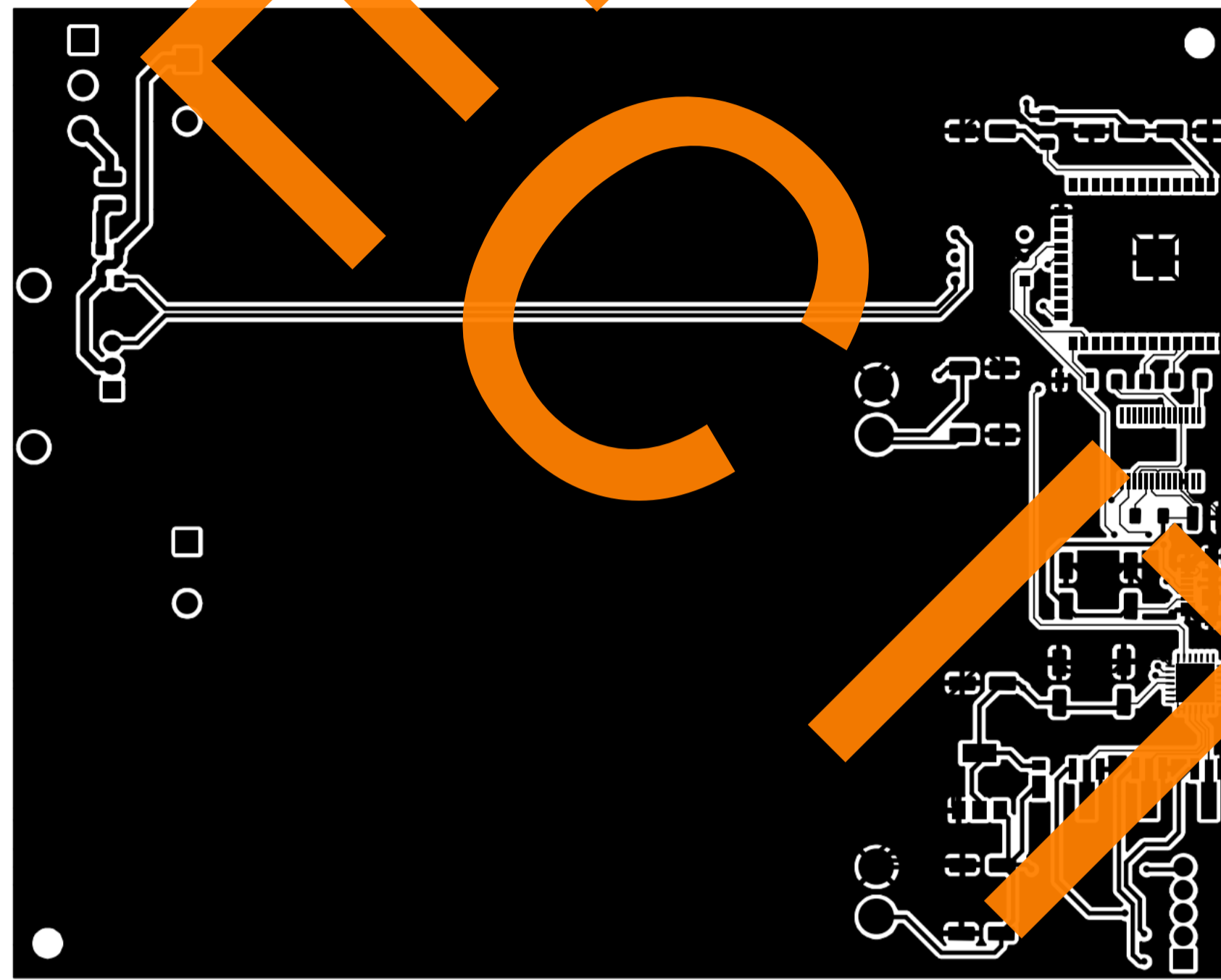
Автор роботи	Керецімон В.В.
Назва роботи	Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення
Спеціальність	ЕС
Курс	2
Факультет	ІТФ
Кафедра	ЕС
Керівник роботи	Патр Д.В.
Роботу перевірено в програмі	Unicheck
Додано до бази даних	Так
Ідентифікаційний номер роботи	
Результати перевірки	
Показник унікальності тексту через перевірку роботи у внутрішній базі кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ	
Показник унікальності тексту в мережі Інтернет	

Відповідальна особа/
Науковий керівник роботи

Патр Д.В.
(прізвище, ініціали)

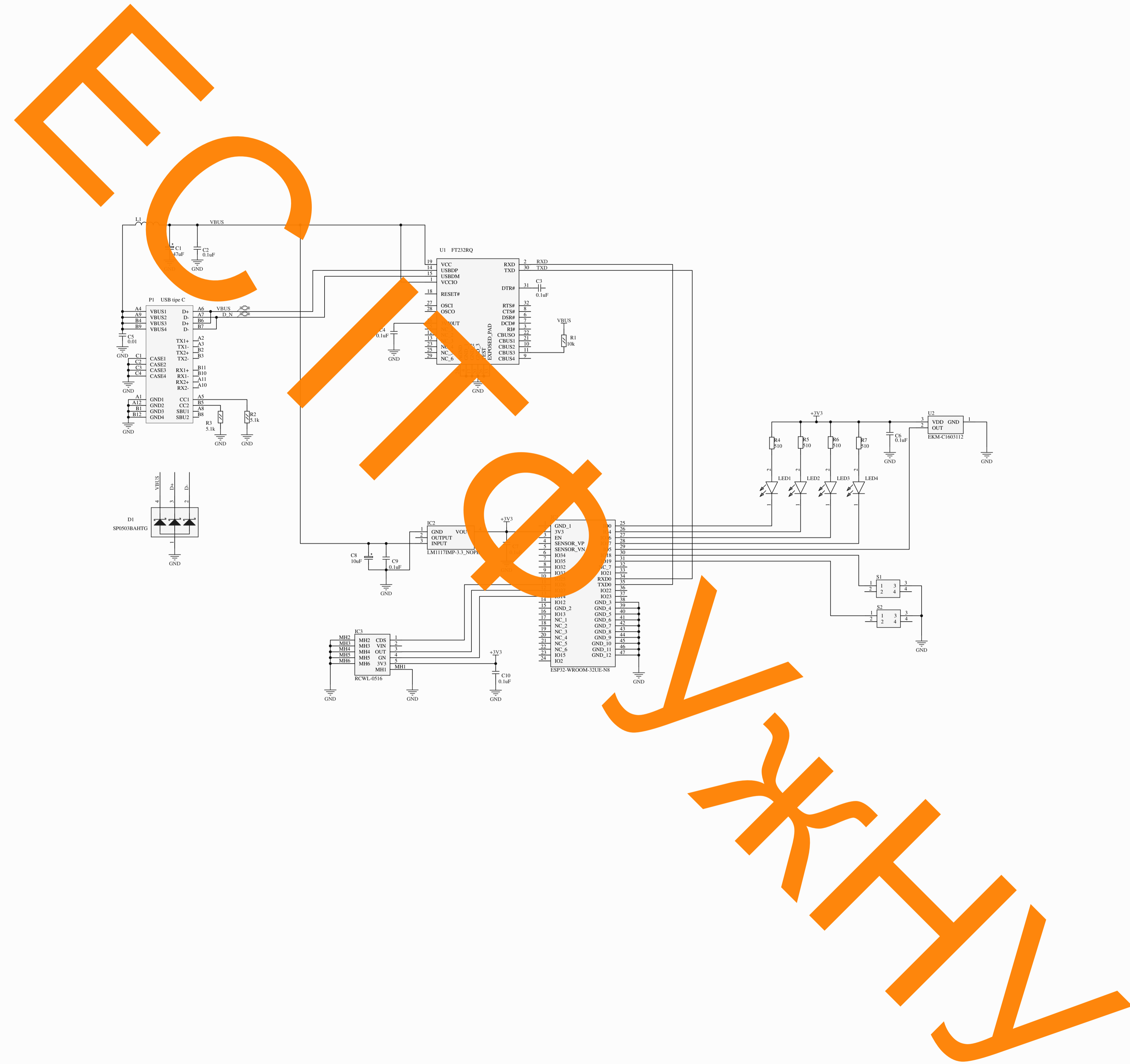
18.12.2025
Дата

Підпис

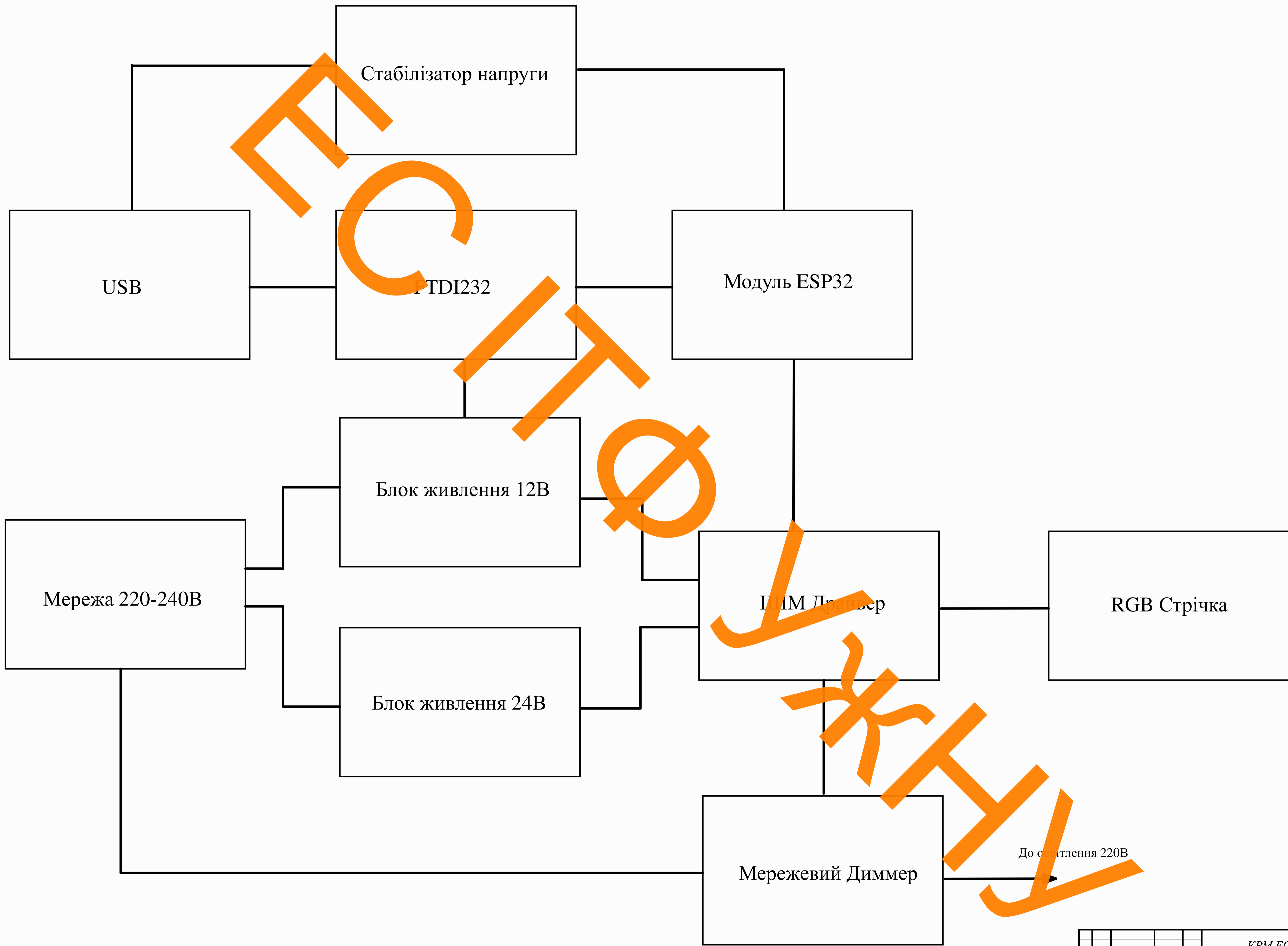


1. Плату виконати комбінованим методом: SMT-монтаж для всіх компонентів, окрім трьох роз'ємів, які встановлюються методом ТНТ (монтаж в отвори).
2. Крок координатної сітки: 1.25 мм для всіх елементів.
3. Товщина фольги: 35 мкм.
4. Покриття друкованої плати:
Виконати покриття за технологією ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) для забезпечення надійності контакту SMT-компонентів.
5. Отвори для роз'ємів:
Виконати металізовані отвори діаметром відповідно до вимог роз'єму.
6. Відповідність геометричних розмірів та допусків згідно ГОСТ 23752-79.
7. Паяння: Паяльні зони для SMT-компонентів виконати відповідно до вимог IPC-7351 для посадкових місць.
8. Виконання згідно IPC-A-600 для друкованих плат класу 2 (для комерційного обслуговування).

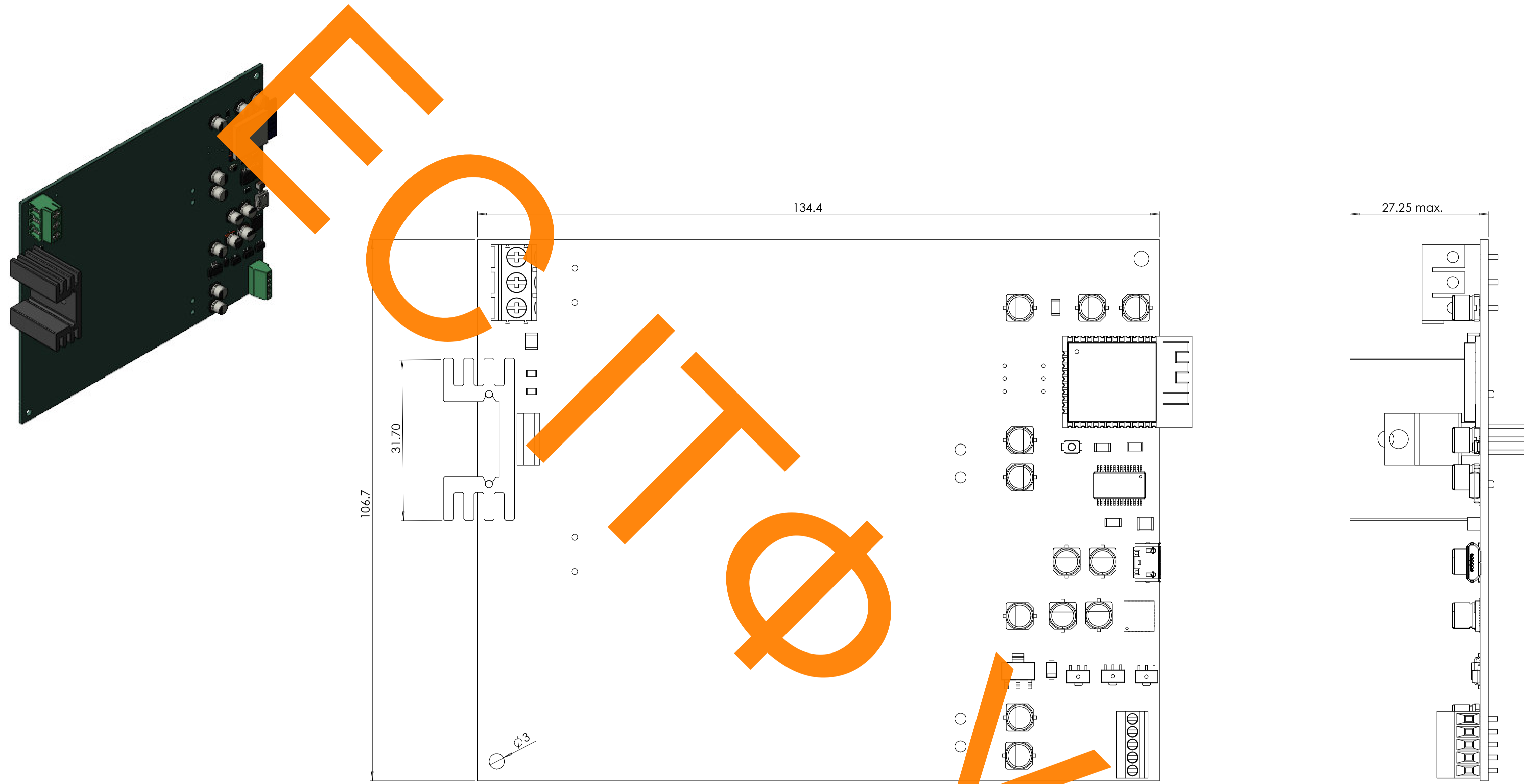
					KPM.EC. 11972862.001 ДП		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення ДРУКОВАНА ПЛАТА		
Розроб.	Керецман В.В.						
Перев.	Папп О.В.						
					Літ.	Маса	Масштаб
					Н		5:1
					Арк.	Аркуші 1	
Н. контр.	Папп О.В.				<i>УжНУ, ІТФ, ІІ курс, гр. ЕС</i>		
Затв.	Зяць Т.М.						



					KPM.EC. 20050054.001 E3		
					Гібридна система виведення руху з підвищеною надійністю на основі пасивного інфрачервоного сенсора та радара		
Зм.	Арх.	№ докум.	Побис.	Дата	Літера	Маса	Масштаб
Розробив	Мельник І.П.				Н		1:1
Перевірив	Заць Т.М.				Архиви		
					УсхНУ, ІТФ, курс 2 гр. ЕС		
Н. Копр.	Палл О.В.						
Затвердив	Заць Т.М.						



					<i>KPM.EC. 11972862.001 E1</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Повис	Дата	Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення Схема електрична структурна	Літера	Маса	Масштаб
Розробив	Керівник В.В.					Н		5:1
Перевірив	Попов О.В.					Архив		
Н. Кошар	Попов О.В.				УжНУ, ІТФ, курс 2			
Затвердив	Зацьор Т.М.				гр. ЕС			



Вимоги до виготовлення та складання друкованої плати

Електромонтаж друкованої плати виконувати відповідно до вимог стандарту IPC-A-610, клас 2 (вироби середньої складності, промислове застосування).

Монтаж компонентів:

- SMT-компоненти паяти методом оплавлення (Reflow).
- Для THT-компонентів застосовувати безсвинцевий припій SAC305 (Sn96.5Ag3.0Cu0.5) відповідно до стандарту IPC J-STD-006.
- Ключові компоненти та всі роз'ємні елементи встановлювати вручну після завершення SMT-монтажу.

Друковані провідники та конструкція плати:

- Геометрію та параметри друкованих провідників виконувати згідно стандарту IPC-2221.
- Усі відстані між компонентами та провідниками повинні відповідати мінімальним технологічним зазорам згідно IPC-SM-782.
- Технологічні отвори для монтажу або механічного кріплення плати передбачати відповідно до конструктивного рішення виробу.

Захист плати:

Після завершення складання плату покривати захисним лаком типу ЕП-572, білого кольору, згідно ТУ 6-10-1539-76 (за винятком контактних зон роз'ємів і тестових майстроків).

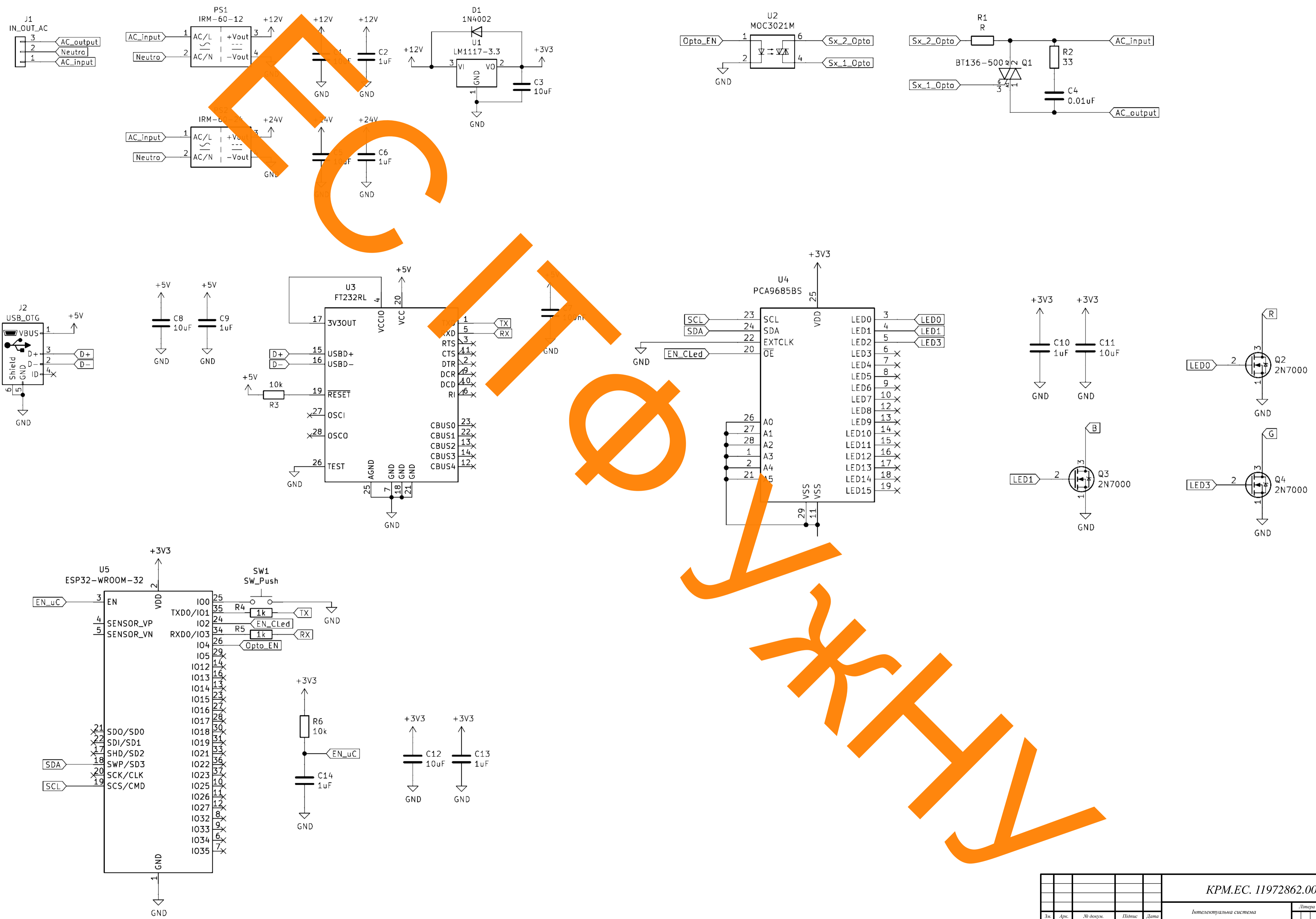
Маркування:

- Маркування елементів виконувати шовкотрафаретним методом.
- Фарба — ЧМ (чорна) або БМ (біла) згідно ТУ 029-02-859-78.
- Висота шрифту — 2,5 мм відповідно до НО 010.007.
- Місця нанесення маркування на кресленнях вказані умовно.

Контроль якості складання:

- SMT-монтаж контролювати методом візуального огляду під мікроскопом.
- Загальний стан чистоти плати після складання має відповідати вимогам IPC-5704.

					KPM.EC. 11972862.001 СК		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Інтелектуальна система адаптивного RGB-освітлення СКЛАДАЛЬНЕ КРЕСЛЕННЯ		
Розроб.	Керецман В.В.						
Пров.	Папп О.В.						
Н. контр.	Папп О.В.				Літ.	Маса	Масштаб
Затв.	Зяць Т.М.				Аркуш 1	Аркушів 1	
					УжНУ, ІТФ, ІІ курс, гр. ЕС		
					Формат А1		



					KPM.EC. 11972862.001 E3		
					Интеллектуальная система адаптивного RGB-освещения		
Зм.	Арх.	№ докум.	Полнос.	Дата	Литера	Масш.	Масштаб
Разработчик	Керецман В.В.				И		1:1
Проверено	Попл О.В.				Схема электрична принципиова		
					УжсНУ, ИФ, курс 2 гр. ЕС		
И. Контр.	Попл О.В.						
Затверждено	Зыков Т.М.						



Автентифіковано засобом перевірки на плагіат ANTIPLA
Дата видачі: понеділок, 15 грудня 2025, 22:51
Доступно через www.antip.la

Плагіатограма

Результат (відсоток плагіату)	0%
Назва документу	Керецман - Антіплаг.docx
Кількість символів	18,078
Кількість спеціальних символів	128
Кількість слів	2,384
Унікальна кількість слів	1,403
Кількість речень	155
Найпоширеніші слова	та, на, =, з, +
Найдовше слово	$d+\Delta d+(0,1 \cdot 0,15)=0,8+0,05+0,1=0,95$
Середня довжина слова	6.6
Середня кількість слів у реченні	15.4
Всього посилань	0
Кількість слів із плагіатом	0

15.12.2025

(дата)

Alex Papo

(перевірив)