МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший бакалаврський
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1763-2с
спеціальності *176 Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)

Р.А. Щербаков
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри ЕІСПЗ, професор, к.ф.-м.н., Ніконова З.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Інженер конструктор ТОВ "Конструкторське бюро Колосова" Григор'єва І.К.

Запоріжжя
2026рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Факультет _____
Кафедра *електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення*
Рівень вищої освіти *перший бакалаврський*
Спеціальність *176 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)

Освітня програма *Мікро- та наносистемна техніка*
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ЕІСПЗ*
Критська Т.В.
"*01*" червня 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Щербакову Ростиславу Артемовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) *Розробка блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet*

керівник роботи *Ніконова Зоя Андріївна, к.ф.-м.н., професор*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*23*" *грудня 2025 року №1830-с*

2 Строк подання студентом роботи *01 червня 2026 року*

3 Вихідні дані до роботи *Лазерний світлодіод, 890 нм, 220 В, 3-12В, LTSpice*

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1.* Аналіз особливостей використання блоків живлення мережевих пристроїв *2.* Розробка структурної та електричної принципової схем блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet *3.* Охорона праці

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)*1. Структурна схема блоку живлення мережевих пристроїв по лініях*

інтерфейсу Ethernet 2. Алгоритм функціонування блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet 3. Схема електрична принципова блоку живлення ережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet 4. Залежності інтенсивності відмов від часу

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	*Ніконова З.А., професор*	*23.12.2025*	*23.12.2025*
II	*Ніконова З.А., професор*	*23.12.2025*	*23.12.2025*
III	*Ніконова З.А., професор*	*23.12.2025*	*23.12.2025*

7 Дата видачі завдання *23 грудня 2025 року*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Літературний огляд*	*29.03.2026*	
2	*Розрахункова частина*	*26.04.2026*	
3	*Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки*	*30.05.2026*	
4	*Розробка графічної частини роботи*	*30.05.2026*	
5	*Оформлення пояснювальної записки*	*30.05.2026*	
6	*Нормоконтроль*	*30.05.2026*	
7	*Попередній захист роботи*	*10.06.2026*	

Студент _____ *Щербаков Р.А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ *Ніконова З.А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л.Л.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 72 сторінок, 10 рисунків, 5 таблиць, 18 джерел літератури, додаток А, додаток Б.

Об'єкт дослідження – блок живлення мережевих пристроїв.

Мета роботи – розробка блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet.

Завдання роботи – Розробити структурну схему блоку живлення мережевих пристроїв; Розробити алгоритм функціонування блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet; Розробити схему електричну принципову пристрою; Виконати розрахунок сумарної інтенсивності відмов приладу.

Методика досліджень – проведено моделювання приладу за допомогою програмного забезпечення Multisim та Splan.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено блок живлення мережевих пристроїв на основі спеціалізованої мікросхеми MAX5922CEU, що відповідає стандарту IEEE 802.3af. Проведено розрахунок друкованої плати та надійності пристрою.

Результати впроваджень – макет електронного пристрою пройшов перевірку на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Прогнозні пропозиції – подальше вдосконалення пристрою передбачає оптимізацію друкованої плати з метою зменшення габаритів та покращення теплового режиму роботи силових компонентів.

POWER OVER ETHERNET, PoE-ІНЖЕКТОР, IEEE 802.3AF, MAX5922, БЛОК ЖИВЛЕННЯ, МЕРЕЖЕВЕ ОБЛАДНАННЯ, ETHERNET.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 23.12.2025 р. по 10.06.2026 р.

ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП 6

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЇВ 8

1.1Історія створення та розвитку технології PoE 8

1.2 Зарубіжні та вітчизняні виробники обладнання PoE 18

1.3 Переваги та недоліки технології PoE 22

1.4 Технологія PoE 24

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЇВ ПО ЛІНІЯХ ІНТЕРФЕЙСУ ETHERNET 27

2.1 Вибір та обґрунтування схеми електричної структурної 27

2.2 Обґрунтування вибору елементної бази для схеми електричної принципової 31

2.3 Розрахунок параметрів пристрою 35

2.4 Розрахунок та розробка друкованої плати пристрою 39

2.5 Розрахунок сумарної інтенсивності відмов приладу 47

3 ОХОРОНА ПРАЦІ 55

3.1 Вимоги до техніки безпеки 55

3.2 Вимоги до промсанітарії 57

3.3 Вимоги до пожежної безпеки 58

3.4 Електроізоляція 60

3.5 Приклад розрахунку електроізоляції 62

ВИСНОВОКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 64

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 66

Додаток А 68

Додаток Б ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

ВСТУП

Сучасний розвиток мережевих технологій та інфраструктури зв'язку зумовлює постійне зростання кількості мережевих пристроїв, які необхідно забезпечити електроживленням. Прокладання окремих кабелів живлення до кожного з таких пристроїв — IP-камер відеоспостереження, точок бездротового доступу, VoIP-телефонів, датчиків розумних будівель — вимагає значних матеріальних і трудових витрат. Технологія Power over Ethernet (PoE) вирішує цю проблему, дозволяючи передавати електричну енергію разом із даними по одному кабелю Ethernet, що кардинально спрощує монтаж і скорочує витрати на розгортання мережевої інфраструктури.

Технологія PoE дозволяє обладнанню PSE (Power Sourcing Equipment, наприклад, PoE-комутатор) використовувати кабелі Ethernet для одночасної подачі живлення і даних на пристрої PD (Powered Device, наприклад, точки доступу, IP-камери та телефони VoIP), що суттєво спрощує монтажні роботи та зменшує витрати на розгортання мережі. Для регулювання параметрів живлення IEEE (Інститут інженерів з електротехніки та електроніки) розробив серію стандартів: IEEE 802.3af, IEEE 802.3at та IEEE 802.3bt, кожен з яких визначає мінімальну потужність, що може забезпечити PSE, та максимальну потужність, яку здатний споживати PD.

Перший стандарт IEEE 802.3af, прийнятий у 2003 році, забезпечує вихідну потужність 15,4 Вт на порт (мінімально гарантована потужність на стороні PD — 12,95 Вт). Цього достатньо для IP-телефонів та більшості датчиків. З розвитком технологій з'явилася потреба у більшій потужності, і в 2009 році вийшов стандарт IEEE 802.3at (PoE+), що збільшив вихідну потужність до 30 Вт на порт. Наймолодший стандарт IEEE 802.3bt (PoE++), розроблений у 2018 році, визначає два типи живлення — Тип 3 (до 60 Вт) і Тип 4 (до 100 Вт) — шляхом використання двох або більше пар провідників кабелю

Ethernet, що відкриває можливості для живлення PTZ-камер, POS-терміналів та іншого потужного обладнання.

Блок живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet — це пристрій (інжектор PoE), що призначений для подачі живлення мережевому обладнанню через лінію Ethernet. При цьому використовуються дві пари провідників кабелю, які не задіяні у передачі даних (контакти 4, 5, 7, 8 роз'єму RJ-45), що дозволяє одночасно передавати дані та забезпечувати живлення без будь-яких змін у кабельній інфраструктурі. Розроблюваний пристрій має мінімальні масогабаритні показники, просту конструкцію і нескладне підключення. Основне живлення забезпечує імпульсний блок живлення з вихідною напругою 48 В, що відповідає вимогам стандарту IEEE 802.3af. Завдяки використанню поширеної елементної бази виробництво пристрою є економічно доцільним.

Актуальність теми обумовлена стрімким зростанням попиту на мережеві пристрої в різних галузях: системах безпеки та відеоспостереження, автоматизації будівель (Smart Building), промисловому інтернеті речей (IIoT), медичному обладнанні та телекомунікаційній інфраструктурі. За прогнозами аналітичних компаній, ринок PoE-обладнання щорічно зростає на 10–15%, а кількість підключених до мереж пристроїв у світі вже перевищує десятки мільярдів одиниць. В умовах масштабного розгортання таких мереж питання надійного та ефективного електроживлення мережевих пристроїв набуває першочергового значення.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЇВ

1.1 Історія створення та розвитку технології PoE

Ідея поєднати передачу електроенергії та інформаційного сигналу по одному провіднику не є новою. Ще наприкінці XIX – на початку XX століть телефонні системи використовували живлення телефонних апаратів по тих самих лініях, по яких передавались голосові сигнали. Централа подавала постійну напругу 48 В постійного струму на абонентські лінії, що одночасно забезпечувало живлення мікрофону та дзвінка телефонного апарата й слугувало транспортом для голосового сигналу. Саме цей принцип, по суті, і став прообразом сучасної технології Power over Ethernet (PoE). Проте застосування аналогічного підходу до цифрових комп'ютерних мереж стало можливим лише в кінці 1990-х – на початку 2000-х років, із масовим поширенням структурованих кабельних систем на основі витої пари та розвитком мікроелектроніки.

У 1990-х роках відбулося стрімке поширення мереж Ethernet на основі кабелю з витою парою (twisted pair). Стандарт 10BASE-T (1990) та пізніше 100BASE-TX (1995) визначили використання кабелю категорії Cat3/Cat5 з роз'ємами RJ-45. Кабель містив чотири пари провідників, однак для передачі даних зі швидкістю 10/100 Мбіт/с використовувались лише дві пари (1,2 та 3,6), решта залишалася вільною.

Саме наявність вільних пар в існуючій кабельній інфраструктурі і стала першим технічним підґрунтям для ідеї передачі живлення по кабелю Ethernet. Інженери швидко помітили, що по незадіяним парам 4,5 та 7,8 можна передавати постійний струм, не впливаючи на передачу даних. Крім того, навіть по «зайнятим» парам 1,2 та 3,6 можна подавати постійну складову у

вигляді загального режиму (common mode current), оскільки диференційні сигнали Ethernet не містять постійної складової і розділові трансформатори блокують її для схем обробки сигналів.

Першим комерційним застосуванням подібної ідеї стали системи живлення телефонних апаратів у корпоративних АТС. Ряд виробників АТС у другій половині 1990-х років почали виробляти IP-телефони, які підключались до мережі Ethernet і потребували живлення. Оскільки прокладання окремого кабелю живлення до кожного телефону суттєво збільшувало витрати на монтаж, інженери почали шукати рішення для передачі живлення по наявному кабелю.

Паралельно, у 1997–1999 роках, почалось масове впровадження перших бездротових мереж стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi). Точки доступу Wi-Fi, як правило, монтувались на стелі або стінах – у місцях, де прокласти кабель живлення було технічно складно і дорого, особливо у вже зведених будівлях. Необхідність живлення точок доступу у важкодоступних місцях стала ще одним потужним поштовхом до розвитку технології передачі живлення по кабелю Ethernet.

На зорі 2000-х років, ще до появи офіційного стандарту, кілька провідних компаній запропонували власні пропрієтарні рішення для передачі живлення по кабелю Ethernet. Ці рішення суттєво відрізнялись між собою за технічними параметрами та методами реалізації, що унеможливлювало їхню взаємну сумісність.

Cisco Systems у 2000 році випустила власне рішення під назвою Cisco Inline Power (CIP), також відоме як Cisco Pre-Standard PoE. Воно забезпечувало передачу до 7 Вт потужності при напрузі 48 В і використовувалось переважно для живлення IP-телефонів серії Cisco 7900. Особливістю реалізації Cisco була подача живлення через пари 1,2 та 3,6 (Альтернатива А). Важливо, що Cisco застосовувала власний протокол виявлення пристроїв – Cisco Discovery Protocol

(CDP) – для ідентифікації сумісних PD. Це рішення отримало широке поширення завдяки домінуючому становищу Cisco на корпоративному ринку.

Компанія 3Com незалежно розробила власне рішення – 3Com IntelliJack, що також дозволяло передавати живлення по кабелю Ethernet для живлення VoIP-телефонів власного виробництва. Рішення 3Com технічно відрізнялось від Cisco і було несумісне з ним.

Ряд інших компаній, зокрема Nortel Networks та PowerDsine (ізраїльська компанія, згодом поглинена Microsemi), також запропонували власні рішення для передачі живлення по Ethernet. PowerDsine, зокрема, стала піонером у виробництві PoE-інжекторів – зовнішніх пристроїв, що додавали функцію PoE до існуючих «звичайних» комутаторів без PoE. Це рішення виявилось надзвичайно затребуваним і широко використовується до сьогодні.

Ситуація, коли на ринку одночасно існували кілька несумісних пропрієтарних рішень від різних виробників, стала серйозною перешкодою для масового впровадження технології. Замовники вимушені були або орієнтуватись виключно на обладнання одного виробника (vendor lock-in), або використовувати окремі блоки живлення для кожного мережевого пристрою. Це й спонукало галузь до розробки єдиного відкритого стандарту під егідою IEEE.

У листопаді 1999 року робоча група IEEE 802.3af розпочала роботу над першим офіційним стандартом передачі живлення по кабелю Ethernet. Розробка стандарту тривала близько чотирьох років і супроводжувалась жвавими дискусіями між виробниками щодо технічних параметрів, методів виявлення PD та розподілу потужності.

У червні 2003 року стандарт IEEE 802.3af був офіційно затверджений та опублікований. Він визначив:

- Допустимий діапазон вихідної напруги PSE: 44–57 В постійного струму (номінально 48 В).

- Максимальну потужність PSE на порт: 15,4 Вт при максимальному струмі 350 мА.
- Максимальну потужність PD: 12,95 Вт (з урахуванням втрат у кабелі до 100 м).
- Два методи подачі живлення: Альтернатива A (пари 1,2/3,6) та Альтернатива B (пари 4,5/7,8).
- Стандартну процедуру виявлення PD: пасивний підпис PD – резистор 25 кОм паралельно з конденсатором 100 нФ між контактами.
- Систему класифікації PD: класи 0–3, що відповідають різним рівням потужності.
- Вимоги до захисту від надструму та перегрівання PSE.

Поява офіційного стандарту IEEE 802.3af стала справжнім проривом для ринку. Вже у 2004–2005 роках провідні виробники комутаторів (Cisco, HP, 3Com, Nortel) випустили перші пристрої з підтримкою стандарту, а ринок PoE-пристроїв почав стрімко зростати.

Водночас стандарт мав ряд обмежень, які стали очевидними з часом. Головним недоліком була відносно невисока потужність – до 12,95 Вт на PD, що виявилось недостатнім для живлення потужніших пристроїв: зовнішніх точок доступу Wi-Fi з підігрівом, PTZ-камер з потужною оптикою та підсвічуванням, мультиімедійних телефонів з великими дисплеями тощо.

Вже у 2005 році, паралельно з масовим впровадженням PoE першого покоління, в галузі почались дискусії про необхідність збільшення доступної потужності. Зростаючі потреби у живленні більш складних та потужних мережевих пристроїв вимагали нового стандарту. Робоча група IEEE 802.3at розпочала роботу у 2005 році, і у вересні 2009 року новий стандарт був офіційно затверджений.

Стандарт IEEE 802.3at (PoE+) зберіг повну сумісність з попереднім стандартом IEEE 802.3af і вніс такі ключові зміни та доповнення:

- Максимальна потужність PSE збільшена до 30 Вт при максимальному струмі 600 мА.
- Максимальна потужність PD збільшена до 25,5 Вт.
- Введено новий клас PD – клас 4 (до 25,5 Вт), відсутній у попередньому стандарті.
- Визначено дворівневу класифікацію PD (two-event classification) для надійнішого визначення класу 4.
- Введено обов'язковий моніторинг струму споживання PD у робочому режимі (Layer 2 Power Management via LLDP).
- Уточнено вимоги до якості кабелю: обов'язкова категорія не нижче Cat5e для забезпечення максимальної потужності.

Поява PoE+ відкрила нові можливості застосування. Зовнішні точки доступу Wi-Fi 802.11n з декількома радіомодулями, PTZ IP-камери, відеотелефони з кольоровими дисплеями, тонкі клієнти та IP-термінали тепер могли отримувати живлення по кабелю Ethernet. Це суттєво прискорило впровадження бездротових мереж у суспільних місцях, на підприємствах та в навчальних закладах.

Ринок відреагував стрімко: вже у 2010–2012 роках більшість нових корпоративних комутаторів середнього та старшого класу підтримували PoE+ на всіх або більшості портів, а обсяги ринку PoE-обладнання зросли в рази.

До середини 2010-х років масове поширення Wi-Fi стандарту 802.11ac (Wave 2) з технологіями MU-MIMO та OFDMA, активний розвиток систем відеоспостереження высокої роздільної здатності (4K/8K UHD), розширення ринку IoT та промислової автоматизації знову поставили питання про нестачу доступної потужності PoE. Крім того, стандарт Gigabit Ethernet (1000BASE-T, IEEE 802.3ab, 1999) вже давно вимагав використання всіх чотирьох пар кабелю для передачі даних, що робило неможливим використання «вільних» пар для живлення (Альтернатива B) у гігабітних мережах. Відповідно, збільшення

потужності можливе лише шляхом збільшення струму по вже задіяних парах або переходу до нового підходу.

Робоча група IEEE 802.3bt розпочала роботу у 2013 році. Головним технічним нововведенням нового стандарту стало використання всіх чотирьох пар кабелю одночасно для передачі живлення – на відміну від попередніх стандартів, що використовували лише дві пари. У вересні 2018 року стандарт IEEE 802.3bt був офіційно затверджений.

Стандарт IEEE 802.3bt визначає два типи PSE/PD пристроїв підвищеної потужності:

- Type 3 (PoE++ 60 Вт): максимальна потужність PSE – 60 Вт, максимальна потужність PD – 51 Вт. Підтримує класи PD 5 та 6.
- Type 4 (PoE++ 90 Вт): максимальна потужність PSE – 90 Вт, максимальна потужність PD – 71,3 Вт. Підтримує класи PD 7 та 8.

Технічно передача живлення по чотирьох парах реалізується таким чином: по парах 1,2/3,6 подається одна «гілка» живлення (як в Альтернативі A), а по парах 4,5/7,8 – інша (як в Альтернативі B). Обидві гілки підключаються паралельно і забезпечують вдвічі більший струм при тій самій напрузі (44–57 В). Максимальний струм по кожній пари провідників обмежений до 600 мА, а загальний максимальний струм складає 960 мА (Type 3) або 1920 мА (Type 4).

Стандарт IEEE 802.3bt також запровадив низку важливих нововведень у сфері класифікації та управління живленням:

- Розширена класифікація: введено нові класи 5–8, що дозволяють точніше визначати потребу PD у потужності.
- Фізична багатоподієва класифікація (Physical Layer Classification): підтримка до 4 подій класифікації для точного визначення класу при використанні чотирьох пар.
- Автоматичне узгодження потужності через LLDP (IEEE 802.1AB): PD може динамічно запитувати необхідну потужність у PSE через протокол

LLDP, що забезпечує більш ефективне використання бюджету потужності PSE.

- Підтримка зворотної сумісності: пристрої PoE++ Type 3/4 повністю сумісні з пристроями попередніх стандартів (IEEE 802.3af та IEEE 802.3at).

IEEE 802.3bt відкрив можливості для живлення принципово нових класів пристроїв: тонких клієнтів та міні-ПК (45–60 Вт), великих LED-панелей та дисплеїв для інформаційних табло, відеоконференц-систем, промислових камер з активним підігрівом та сервоприводами, а також зарядних станцій для мобільних пристроїв (за технологією USB Power Delivery).

Паралельно з розвитком стандартного PoE відбувається еволюція суміжних та похідних технологій, розширення яких суттєво впливає на загальну екосистему живлення мережевих пристроїв.

Технологія Long Reach PoE (LRPoE або PoE over Extended Reach) була розроблена для передачі живлення та даних на відстані, що перевищують стандартне обмеження Ethernet у 100 м. Ряд виробників (TP-Link, Hikvision, Dahua) пропонують власні пропрієтарні реалізації Extended PoE, що дозволяють передавати живлення на відстань до 200–300 м з обмеженою швидкістю передачі даних (10 Мбіт/с замість 100 Мбіт/с). Це рішення є особливо затребуваним для систем зовнішнього відеоспостереження, де відстані між камерами та обладнанням можуть суттєво перевищувати стандартні 100 м.

Single-Pair Ethernet та PoDL (Power over Data Line, IEEE 802.3cg, 2020). Стандарт Single-Pair Ethernet (SPE) визначає передачу даних по одній пари провідників на відстань до 1000 м зі швидкістю 10 Мбіт/с (10BASE-T1L). Стандарт PoDL (Power over Data Line) дозволяє передавати живлення до 50 Вт по цій самій пари. Це рішення знаходить застосування у промисловій автоматизації, автомобільній електроніці та системах «розумного» будівництва, де вимоги до компактності та вартості кабельної інфраструктури є особливо жорсткими.

Технологія PoE over Coax та PoE over Fiber. Ряд виробників пропонує нестандартизовані рішення для передачі живлення та даних по коаксіальному кабелю (для систем аналогового відеоспостереження) та по оптичному волокну (для випадків, коли використання мідного кабелю неможливе через довжину або перешкоди). Ці рішення, як правило, пропрієтарні та знаходять вузькоспеціалізоване застосування.

USB Power Delivery (USB-PD) та конвергенція з PoE. Стандарт USB Power Delivery (до 240 Вт за специфікацією USB PD 3.1) та PoE++ (до 90 Вт) мають спільну ідеологію – передачу значної електричної потужності по інформаційному кабелю. Ряд сучасних пристроїв (точки доступу Wi-Fi 6/6E, тонкі клієнти) починають підтримувати обидва інтерфейси, і намічається тенденція до конвергенції цих технологій у рамках концепції «Universal Power».

Стандарт IEEE 802.3bt Type 4 (90 Вт) на сьогодні є найбільш потужним ратифікованим стандартом PoE. Проте в галузі вже ведуться дискусії та попередні дослідження щодо можливості подальшого збільшення потужності до 130 Вт і вище у рамках нового стандарту, умовно названого «PoE Ultra» або «PoE 5G Ready». Такий стандарт дозволив би живити ще потужніші пристрої, зокрема базові станції малих осередків (small cells) для мереж 5G, що встановлюються на вуличних конструкціях і потребують до 100–150 Вт для роботи радіочастинного та обчислювального обладнання.

Таблиця 1.1 – Ключові події в історії розвитку технології PoE

Рік	Подія	Значення для галузі
1999	Cisco випускає Cisco Inline Power (CIP)	Перше масове пропрієтарне PoE-рішення на ринку
1999	Створення робочої групи IEEE 802.3af	Початок стандартизації технології
2000	3Com IntelliJack, рішення PowerDsine	Конкуруючі пропрієтарні рішення
2003	Затвердження IEEE 802.3af (PoE, 15,4 Вт)	Перший офіційний стандарт, поч. масового ринку
2005	Створення робочої групи IEEE 802.3at	Старт розробки PoE+ підвищеної потужності
2009	Затвердження IEEE 802.3at (PoE+, 30 Вт)	Подвоєння потужності, нові класи пристроїв
2013	Створення робочої групи IEEE 802.3bt	Старт розробки PoE++ (4 пари)
2018	Затвердження IEEE 802.3bt (PoE++, 90 Вт)	Революція: 4 пари, потужність до 90 Вт
2020	IEEE 802.3cg: SPE + PoDL (50 Вт/1 пара)	PoE для промислових та авто застосувань
2023+	Дискусії щодо «PoE Ultra» (130+ Вт)	Перспектива для 5G small cells та IoT

Таблиця 1.2 – Технічні параметри стандартів Power over Ethernet

Рік прийняття	Стандарт	Назва	Макс. потужність PSE	Макс. потужність PD	Кількість пар	Макс. струм
2003	IEEE 802.3af	PoE	15,4 Вт	12,95 Вт	2 пари	350 мА
2009	IEEE 802.3at	PoE+	30 Вт	25,5 Вт	2 пари	600 мА
2018	IEEE 802.3bt Type 3	PoE++ (60 Вт)	60 Вт	51 Вт	4 пари	960 мА
2018	IEEE 802.3bt Type 4	PoE++ (90 Вт)	90 Вт	71,3 Вт	4 пари	1920 мА
2020	IEEE 802.3cg (PoDL)	PoE/SPE	до 50 Вт	до 40 Вт	1 пара	1000 мА
2023+	Проект	PoE Ultra	до 130 Вт	до 105 Вт	4 пари	до 2500 мА

1.2 Зарубіжні та вітчизняні виробники обладнання PoE

Світовий ринок обладнання PoE представлений широким колом виробників – від транснаціональних корпорацій до спеціалізованих компаній. Нижче розглядаються ключові гравці ринку та їхня продукція.

Cisco Systems (США) є безсумнівним лідером ринку корпоративних мереж та одним із піонерів технології PoE. Компанія пропонує повну лінійку PoE-комутаторів серій Catalyst 9200/9300/9400, Catalyst 1000/2000, а також точки доступу серії Aironet та Catalyst Wi-Fi 6/6E. Cisco першою впровадила пропрієтарний стандарт Cisco Inline Power (CIP) ще до прийняття IEEE 802.3af, а сьогодні підтримує всі актуальні стандарти PoE++. Особливістю продукції Cisco є система CISCO UPOIP (Universal PoE), що дозволяє гнучко розподіляти потужність між портами.

TP-Link (Китай/США) займає лідируючі позиції у сегменті бюджетного та середнього класу PoE-обладнання. Компанія пропонує широкий асортимент PoE-комутаторів серій TL-SG, TL-SF, EasySmart та JetStream, а також PoE-інжектори серії TL-PoE. Продукція TP-Link відзначається відмінним співвідношенням ціни та якості й широко використовується у малому та середньому бізнесі.

Netgear (США) спеціалізується на мережевому обладнанні для дому, малого та середнього бізнесу. PoE-комутатори серій Plus (GS3XX) та Smart (GS7XX) забезпечують потужність до 30 Вт (PoE+) і 60/90 Вт (PoE++). Окремо варто відзначити серію AV Line, орієнтовану на аудіовізуальні інсталяції.

Advantech (Тайвань) є провідним виробником промислового мережевого обладнання з підтримкою PoE. Промислові PoE-комутатори EKI-2700 та EKI-2500 розраховані на роботу у широкому діапазоні температур (–40°C...+75°C), мають підвищену стійкість до вібрацій та вологи. Advantech також виробляє промислові PoE-інжектори та медіаконвертери.

Texas Instruments (США) є одним із провідних постачальників мікросхем для реалізації PoE PSE та PD. Мікросхеми серій TPS23861, TPS23862, TPS2384 широко використовуються у розробці PoE-контролерів PSE, а TPS2373, TPS2379 – для реалізації PD-контролерів. Texas Instruments також пропонує референсні дизайни та засоби розробки для прискорення виходу продуктів на ринок.

Analog Devices (Microsemi, США) – компанія, що спеціалізується на мікросхемах для PoE PSE та PD. Особливо відомі контролери серій PD69xxx та PD70xxx для управління PoE у комутаторах. Компанія Microsemi (поглинута Microchip Technology) також виробляє мікросхеми LTC4267, LTC4291 та інші для реалізації PoE.

Підрозділ Linear Technology компанії Analog Devices розробив широкий спектр мікросхем для PoE: LTC4257 (PD-контролер), LTC4259 (PSE-контролер для 4 портів), LTC4295 (перший контролер для PoE++), LTC4296 (для Single-Pair Ethernet). Ці рішення широко застосовуються у проектних розробках усього світу.

Таблиця 1.4 – Провідні зарубіжні виробники обладнання та компонентів PoE

Виробник	Країна	Сегмент ринку	Ключові продукти PoE	Макс. потужність
Cisco Systems	США	Корпоративний	Catalyst 9300, 9400, Aironet AP	90 Вт (PoE++)
HP/Aruba	США	Корпоративний/SMB	Aruba 2930F, 6300, CX	90 Вт (PoE++)
TP-Link	Китай/США	SMB/SOHO	JetStream, EasySmart	60 Вт (PoE++)
Netgear	США	SOHO/SMB	Plus GS3XX, Smart GS7XX	90 Вт (PoE++)
D-Link	Тайвань	SOHO/SMB	DGS-1100, DGS-1210	30 Вт (PoE+)
Ubiquiti	США	SMB/Enterprise	UniFi Switch, EdgeSwitch	60 Вт (PoE++)
Hikvision	Китай	Відеоспостереження	DS-3E, DS-3D серії	30 Вт (PoE+)
Advantech	Тайвань	Промисловий	EKI-2700, EKI-2500	30 Вт (PoE+)
Texas Instr.	США	Компоненти	TPS23861, TPS2373	90 Вт (PoE++)
Analog Devices	США	Компоненти	LTC4267, LTC4295, LTC4296	90 Вт (PoE++)

Вітчизняний ринок виробництва PoE-обладнання перебуває на стадії становлення. На відміну від розвинутих зарубіжних ринків, в Україні поки що відсутні великосерійні виробники PoE-комутаторів, здатні конкурувати з Cisco, TP-Link або Ubiquiti за масштабами виробництва. Проте існують окремі підприємства та науково-дослідні установи, що ведуть розробки у суміжних напрямках.

ДП «Завод "Маяк"» (м. Київ) – одне з найбільших підприємств радіоелектронної галузі України, що спеціалізується на виробництві систем зв'язку та управління, у тому числі для потреб оборони. Підприємство має значний досвід у виробництві спеціалізованих блоків живлення та комунікаційного обладнання.

ПАТ «НВО "Комунар"» (м. Харків) – багатопрофільне підприємство, що виробляє електронне обладнання, включаючи системи живлення та телекомунікаційне обладнання. Має досвід виробництва спеціалізованих блоків живлення для промислових застосувань.

ДП «Науково-дослідний інститут «Квант»» (м. Київ) – спеціалізується на розробці та виробництві електронних систем, у тому числі систем передачі даних. Інститут має науково-технічний потенціал для проведення досліджень у галузі PoE.

Університети та науково-дослідні установи. Ряд кафедр Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Харківського національного університету радіоелектроніки, Національного університету «Львівська політехніка» та інших провідних ВНЗ ведуть дослідження та підготовку фахівців у галузі мережевих технологій та силової електроніки, що є базою для майбутніх розробок у сфері PoE.

Слід зазначити, що відсутність вітчизняного серійного виробництва PoE-обладнання є водночас і проблемою (залежність від імпорту), і перспективою (незайнята ринкова ніша) для українських підприємств та розробників.

1.3 Переваги та недоліки технології PoE

Технологія PoE має цілий ряд суттєвих переваг порівняно з традиційними методами електроживлення мережевого обладнання:

- Спрощення монтажу та зниження витрат на розгортання. Відпадає необхідність прокладання окремих ліній електроживлення та встановлення розеток поблизу кожного мережевого пристрою. Для монтажу достатньо лише кабелю Ethernet, що суттєво знижує трудозатрати та матеріальні витрати, особливо у вже побудованих будівлях.
- Централізоване керування живленням. PoE-комутатор або контролер дозволяє дистанційно вмикати та вимикати живлення окремих портів, що забезпечує можливість дистанційної перезагрузки завислих пристроїв без фізичного доступу до них. Це особливо цінно для пристроїв, встановлених у важкодоступних місцях.
- Підтримка централізованих систем безперебійного живлення (ДБЖ). При використанні PoE-комутатора з підключеним ДБЖ усі пристрої, що живляться через нього, автоматично отримують резервне живлення при відключенні мережі. Це особливо важливо для систем безпеки та відеоспостереження.
- Гнучкість розміщення обладнання. Мережеві пристрої можна розташовувати у будь-якому місці, де є кабель Ethernet, незалежно від наявності розеток. Це дозволяє оптимально розміщувати точки доступу Wi-Fi, камери та датчики.
- Стандартизованість та сумісність. Завдяки стандартам IEEE 802.3af/at/bt забезпечується сумісність обладнання різних виробників. PD-пристрій, що підтримує стандарт, можна підключити до будь-якого стандартного PSE.

- Безпека. Напруга 48 В постійного струму, яка використовується в PoE, є безпечнішою для обслуговування порівняно зі змінним струмом 220 В. Крім того, PSE подає живлення лише після виявлення сумісного PD, що захищає від ненавмисного подання живлення на несумісне обладнання.
- Підтримка функції енергозбереження. Сучасні PoE-комутатори підтримують функцію IEEE 802.3az (Energy Efficient Ethernet, EEE), а також можливість налаштування розкладів живлення для зниження споживання енергії у неробочий час.
- Моніторинг споживання. PoE-комутатори надають інформацію про споживану потужність кожного підключеного пристрою в режимі реального часу, що дозволяє ефективно керувати енергоспоживанням мережевої інфраструктури.

Поряд із суттєвими перевагами, технологія PoE має ряд обмежень та недоліків, що необхідно враховувати при проектуванні систем:

- Обмеження потужності. Навіть стандарт IEEE 802.3bt Type 4 забезпечує максимум 90 Вт на порт, що недостатньо для живлення пристроїв з більш значним енергоспоживанням (потужних ПК, серверів, більшості принтерів тощо).
- Втрати потужності у кабелі. Опір провідників кабелю Ethernet призводить до втрат потужності при передачі. Так, для кабелю Cat5e довжиною 100 м при струмі 600 мА втрати можуть сягати 2,5–3 Вт. При максимальних струмах PoE++ втрати можуть бути значно більшими.
- Нагрів кабелю. При передачі значних потужностей кабель нагрівається, особливо у щільно укладених пучках. Це не лише знижує ефективну потужність, що доставляється до PD, але й може скорочувати термін служби кабелю та потребує врахування при проектуванні кабельних трас.

- Обмеження довжини кабелю. Стандарт PoE розрахований на стандартну максимальну довжину сегмента Ethernet – 100 м. При більших відстанях потрібні або довгострокові PoE-рішення (Long Reach PoE), або підсилювачі/повторювачі, що збільшує вартість.
- Складність проєктування PSE. Розробка блоку живлення PoE (PSE), що відповідає всім вимогам стандарту (виявлення, класифікація, захист від надструму, контроль напруги тощо), є нетривіальним технічним завданням, що вимагає значної кваліфікації розробника.
- Вища вартість обладнання. PoE-комутатори та PoE-інжектори дорожчі від звичайних аналогів. Зростання вартості може бути відчутним при великій кількості портів, хоча в більшості випадків економія на монтажі електроживлення компенсує цю різницю.
- Проблема сумісності при переході між стандартами. Не всі пристрої коректно підтримують усі режими та класи PoE, що може призводити до проблем сумісності, особливо при змішуванні обладнання різних поколінь та виробників.

1.4 Технологія PoE

Технологія PoE (Power over Ethernet) дозволяє обладнанню PSE (Power Sourcing Equipment, наприклад, PoE-комутатор) використовувати кабелі Ethernet для одночасної подачі живлення і даних на PD (Powered Device, наприклад, точки доступу, IP-камери і телефони VoIP), що може спростити установку кабелів і заощадити. Різні стандарти PoE, такі як IEEE802.3af, 802.3at і 802.3bt, випущені IEEE (Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки) для регулювання кількості енергії, яка подається на ці PD. В даний час стандарт PoE доступний в трьох типах: IEEE 802.3af, IEEE 802.3at і IEEE 802.3bt. Вони визначають мінімальну потужність, яку може забезпечити джерело PSE, і максимальну потужність, яку PD може отримати. Фактично,

технологія PoE існує з 2003 року. IEEE 802.3af є першим стандартом PoE. Його вихідна потужність 15,4 Вт достатня для більшості IP-телефонів і точок доступу. Але з розвитком технологій багато пристроїв, такі як IP-відео-телефони, вимагають більше 13 Вт для можливих додатків. З цієї причини IEEE 802.3at був випущений в 2009 році, вказавши 30 Вт на порт на PSE. Сьогодні існує потреба в ще більшій потужності для підтримки таких пристроїв, як IP-камери PTZ і POS-термінали. Таким чином, новий IEEE 802.3bt був розроблений в 2018 році і збільшив максимальну вихідну потужність PoE до 60 Вт або 100 Вт на порт. Короткий опис стандартів:

IEEE 802.3af, також відомий як стандартний PoE з напругою живлення 44-57 В і струмом 10-350 мА. У цьому стандарті максимальна вихідна потужність порту обмежена 15,4 Вт. Однак деяка потужність буде втрачена на кабелі Ethernet під час передачі. Таким чином, мінімальна гарантована потужність, доступна на PD, становить 12,95 Вт на порт. Він може підтримувати VoIP-телефони, датчики і так далі.

IEEE 802.3at. Оновлений стандарт називається PoE +, який сумісний зі стандартом PoE. Напруга живлення PoE + коливається від 50 В до 57 В, а струм живлення може становити 10-600 мА. Він забезпечує до 30 Вт потужності на кожен порт PSE. Через втрату потужності мінімальна вихідна потужність кожного порту становить 25 Вт. Цей тип може підтримувати пристрої, які вимагають більше енергії, такі як РК-дисплеї, біометричні датчики і планшети.

IEEE 802.3bt. Новітній стандарт PoE, який визначає два типи стандартів живлення/потужності - тип 3 і тип 4. Вони збільшують максимальну потужність PoE, надаючи більше енергії через дві або більше пари кабелів Ethernet. У режимах типу 3 і типу 4 PSE ідентифікують PD і встановлюють потужність відповідно до максимальної потужністі PD, що призводить до кращої системі доставки енергії.

Метою кваліфаційної роботи роботи є розробка блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Розробити структурну схему блоку живлення мережевих пристроїв.
2. Розробити алгоритм функціонування блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet.
3. Розробити схему електричну принципову пристрою.
4. Виконати розрахунок сумарної інтенсивності відмов приладу.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМ БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЇВ ПО ЛІНІЯХ ІНТЕРФЕЙСУ ETHERNET

2.1 Вибір та обґрунтування схеми електричної структурної

Електрична структурна схема визначає загальній склад та організацію зв’язків між функціональними вузлами. Надає повне уявлення про функціонування пристрою, що проєктується.

При розробці структурної схеми слід використовувати принцип системного підходу, які для даного проекту можна сформулювати у вигляді наступних положень:

- виконується функціональна декомпозиція загальної задачі проєктування на окремі під задачі;
- пристрій, що проєктується, уявляється у вигляді низки функціональних вузлів та сукупності процесів, які взаємодіють між собою та підлягають досягненню визначеної мети;
- пристрій, що проєктується, уявляється ієрархічною системою, що може біти описана із різними видами деталізації; ступінь деталізації повинен бути достатнім для розкриття процесів, які відбуваються у пристрої, що проєктується.

При аналізі системи визначаються складові її елементи і ряд вихідних параметрів. Аналіз структури з метою визначення складових її елементів ґрунтується на одноріневому чи багаторівневому підходах.

При одноріневому підході всі елементи структури системи визначаються на одному рівні абстракції; для визначення всіх можливих варіантів структури системи проведення класифікація елементі, визначаються їх параметри, аналізуються можливості спільного функціонування різних елементів.

Багаторівневий аналіз структури системи заснований на ідеях системного підходу і багаторівневої декомпозиції системи. Параметри визначаються тільки для елементів системи. Параметри і показники якості підсистеми і системи в цілому визначаються при багаторівневому синтезі структури системи.

Структурна схема пристрою складаються з наступних блоків:

- блок живлення;
- вторинний блок живлення;
- комутатор;
- блок індикації.

Блок живлення забезпечує пристрій напругою, необхідною для стабільної та безвідмовної роботи як самого пристрою, так і обладнання, яке надалі буде підключено до комутатора.

Вторинний блок живлення формує напругу + 5 В для живлення логічної частини пристрою.

Комутатор виконує функцію електронного ключа, підключаючи та відключаючи мережеве обладнання від джерела живлення, а також виконує функцію електронного запобіжника. Комутатор також виконує функцію розпізнавання підключених мережевих пристроїв.

Блок індикації сигналізує, у якому стані знаходиться пристрій.

Структурна схема блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet зображена на рис. 2.1.

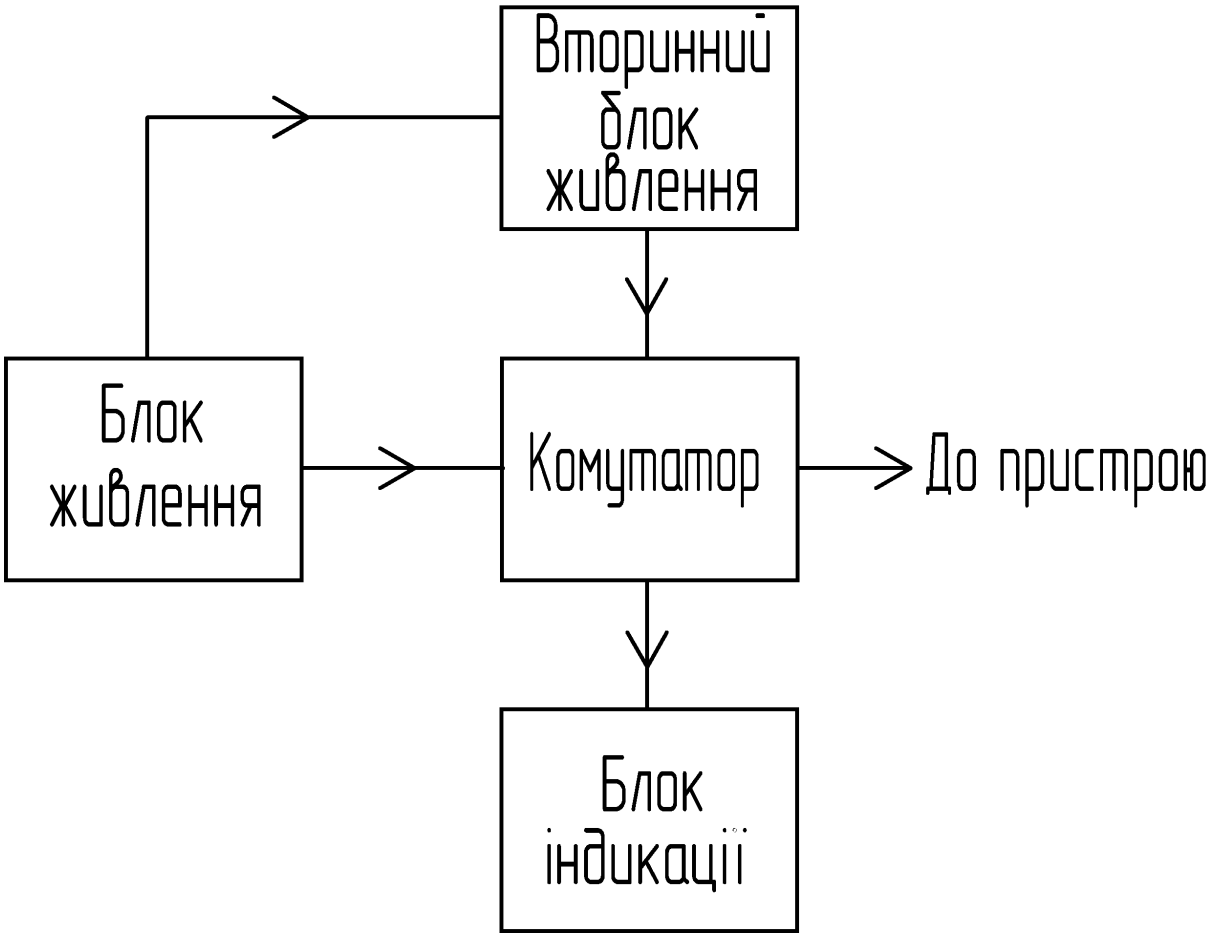


Рисунок 2.1 - Структурна схема пристрою

Виходячи з вище сказаного на основі розробки структурної схеми, розроблено алгоритм функціонування пристрою.

Пристрій готовий до роботи одразу ж після ввімкнення основного джерела живлення. На початку блок живлення подає струм у 7,5 мА у лінію живлення, щоб визначити, чи підключено до мережі пристрій, який необхідно живити. Якщо до мережі підключено мережевий пристрій, блок живлення проводить його ідентифікацію за допомогою короткочасних імпульсів. По відгуку від мережевого пристрою блок живлення ідентифікує підключений пристрій та подає живлення у лінію із необхідними параметрами, такими як напруга та максимальний споживаний струм. При цьому блок живлення постійно контролює споживаний струм, і якщо він перевищить максимально

встановлений, пристрій вимкне живлення і перейде до початкової фази – визначення, чи підключено до мережі навантаження.

На рисунку 2.2 зображено алгоритм функціонування даного пристрою.

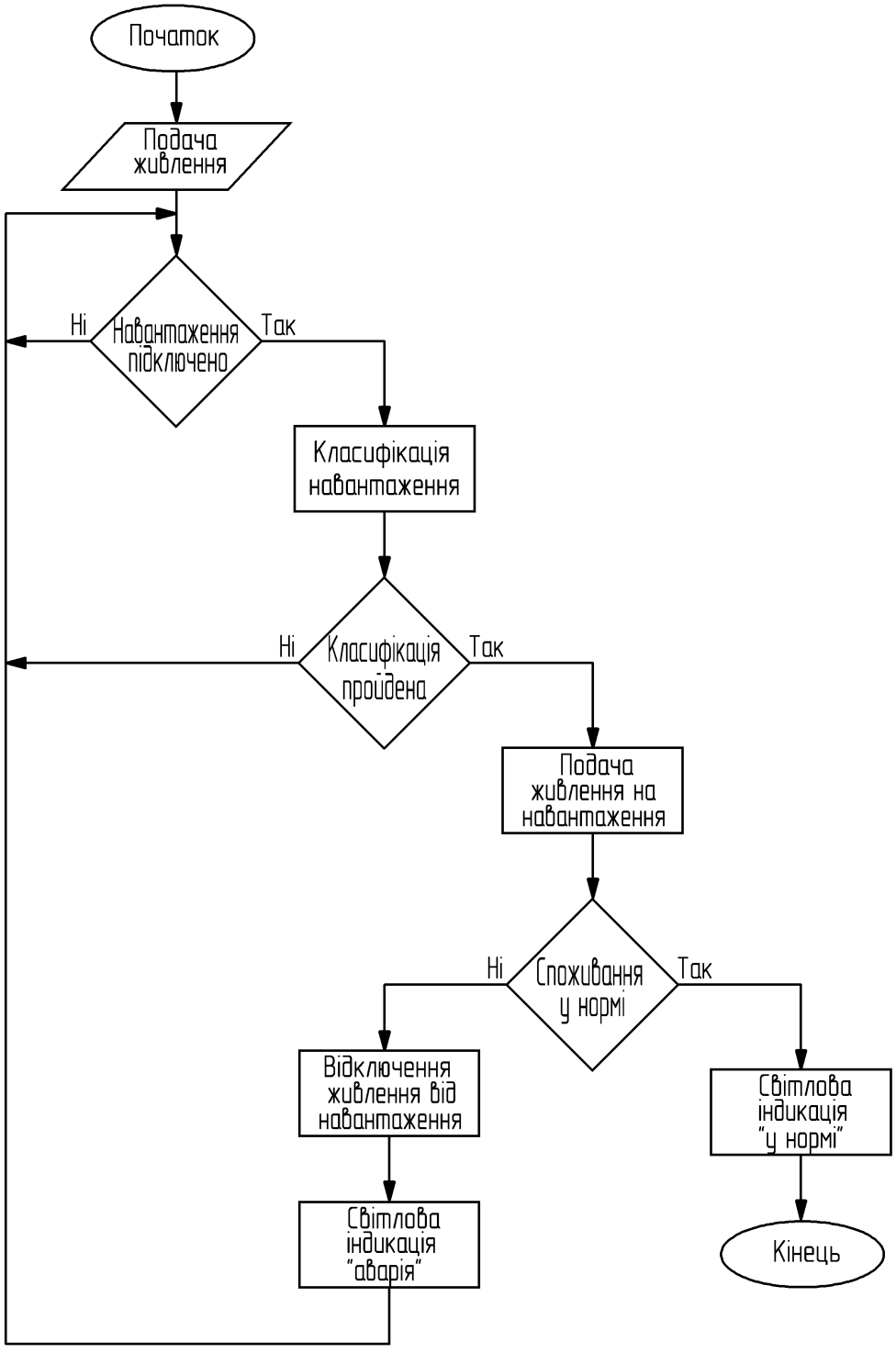


Рисунок 2.2 – Алгоритм функціонування блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet

2.2 Обґрунтування вибору елементної бази для схеми електричної принципової

Принципова схема визначає повний склад елементів та зв’язків між ними і надає детальне уявлення про принцип роботи вузла чи пристрою.

Принципова схема будується на основі раніше розроблених структурної чи функціональної схеми. Для розробки принципової схеми необхідно визначитись із серією ІМС та складом аналогової обв’язки, на яких буде реалізований даний пристрій.

При цьому необхідно врахувати такі фактори, як швидкодія сигналів, потужність, наявність довідникової документації, надійність та економічні показники.

Блок живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet працює наступним чином.

Мікросхеми серії MAX5922 мають кілька виводів контролю стану. Всі вони виконані за схемою з відкритим стоком. Вивід 10 (FAULT) призначений для індикації аварійного стану. При перегріванні або перевищенні струму навантаження мікросхема переходить в аварійний стан, знімаючи живлення з лінії і встановлюючи низький логічний рівень напруги на виводі 10. При нормальній роботі вивід 10 знаходиться в високоімпедансному стані. Вивід 11 (РОК) - індикатор подачі напруги на вихід інжектора. При різниці напруги на його вході і виході менше 0,75 В цей вивід переходить в стан з низьким логічним рівнем. В іншому випадку він знаходиться в високоімпедансному стані. Вивід 12 (ZC) призначений для сигналізації про виявлення нульового струму споживання, при цьому він переходить в стан з низьким логічним рівнем напруги.

На виводи 16-18 (виходи CL2-CL0) контролер виводить код класифікації PD, знайденого в процесі виявлення та класифікації. Виводи контролю стану

можна використовувати для підключення до мікроконтролеру або для виведення на індикатори.

Зокрема, вивід 11 - індикатор подачі напруги в лінію, до нього може бути підключений світлодіод, розташований на лицьовій панелі інжектора. Можна підключити світлодіод зеленого кольору світіння до виводу 11, а червоного кольору світіння - до виводу 10. У цьому випадку світіння першого відповідає нормальній роботі, другого - перевищення струму навантаження.

При роботі інжектора в режимі, сумісному зі стандартом 802.3af, вимкнені світлодіоди показують, що PD не підключено або не опізнано.

Допустимий струм навантаження цих виходів становить до 3 мА, чого цілком достатньо для світлодіодів.

Мікросхеми серії MAX5922 (і багато інших контролери PSE виробництва фірми Maxim) мають одну особливість. Вони можуть працювати з PD більш високого класу, ніж передбачено стандартом. У фазі класифікації PD може заявити про свою приналежність до класу 4, і мікросхема серії MAX5922 буде забезпечувати його живлення. Однак ці мікросхеми не забезпечують двоімпульсну класифікацію, як це передбачено стандартом 802.3at. Отже, PD, що належать класу 4 і призначені для роботи за стандартом 802.3at, будуть повідомлені про те, що їх живить джерело, сумісне з IEEE 802.3af і нездатне віддати потужність більш 15,4 Вт. Однак мікросхема серії MAX5922 не стане обмежувати струм. Вона виконує класифікацію тільки для того, щоб надати інформацію зовнішньому контролеру про клас підключеного PD. Обмеження настане тільки при перевищенні струмом споживання порога, що задається резистором R17. Захист спрацює, коли напруга на цьому резисторі перевищує 212 мВ протягом 60 мс. При його номіналі, зазначеному на схемі, це 424 мА. Це дозволяє передавати в навантаження потужність до 19,8 Вт.

Слід зазначити, що стандарт 802.3at наказує контролеру PSE забезпечувати потужність не менше 30 Вт, а PD споживати потужність не більше 25,5 Вт. Тому пристрої, призначені для роботи від інжектора стандарту

802.3at і не сумісні з 802.3af, іноді можуть працювати з перебоями, викликаними перевантаженням інжектора на мікросхемі серії MAX5922.

Для подачі живлення використані контакти 4, 5, 7 і 8 роз'єму XS2, які, згідно зі стандартами IEEE 802.3i і 802.3u, призначені відповідно для підключення синьою і коричневої пар проводів. До синьої пари (виводи 4 і 5 роз'єму) підключений плюсовій полюс інжектора, до коричневої пари (виводи 7 і 8 роз'єму) - мінусовий. Для передачі інформації призначені помаранчева і зелена пари, що підключаються відповідно до контактів 1-2, 3 і 6, інжектор забезпечує її пряму передачу між роз'ємами XS1 і XS2.

Живлять інжектор від зовнішнього джерела напругою 48 В з максимальним струмом навантаження близько 0,5 А. Його напруга може бути знижена до 32 В без порушення роботи інжектора. Вибране значення максимального струму навантаження забезпечує працездатність PD класу 4 потужністю не більше 20 Вт. При перевищенні цього значення контролер переходить в аварійний стан і відключає живлення споживача.

Дільник R17 R18 задає нове значення нижнього порогу робочої напруги, який при вказаних на схемі номіналах цих резисторів дорівнює 10 В. Режим пасивного PoE включають, розмикаючи вимикач SA1. Коли він замкнутий, інжектор працює відповідно до стандарту 802.3af.

Індикатор стану інжектора - двоколірний світлодіод HL2. Можливе використання двох окремих світлодіодів. В цьому випадку резистори. На рисунку 2.3 зображено схему електричну принципову даного пристрою.

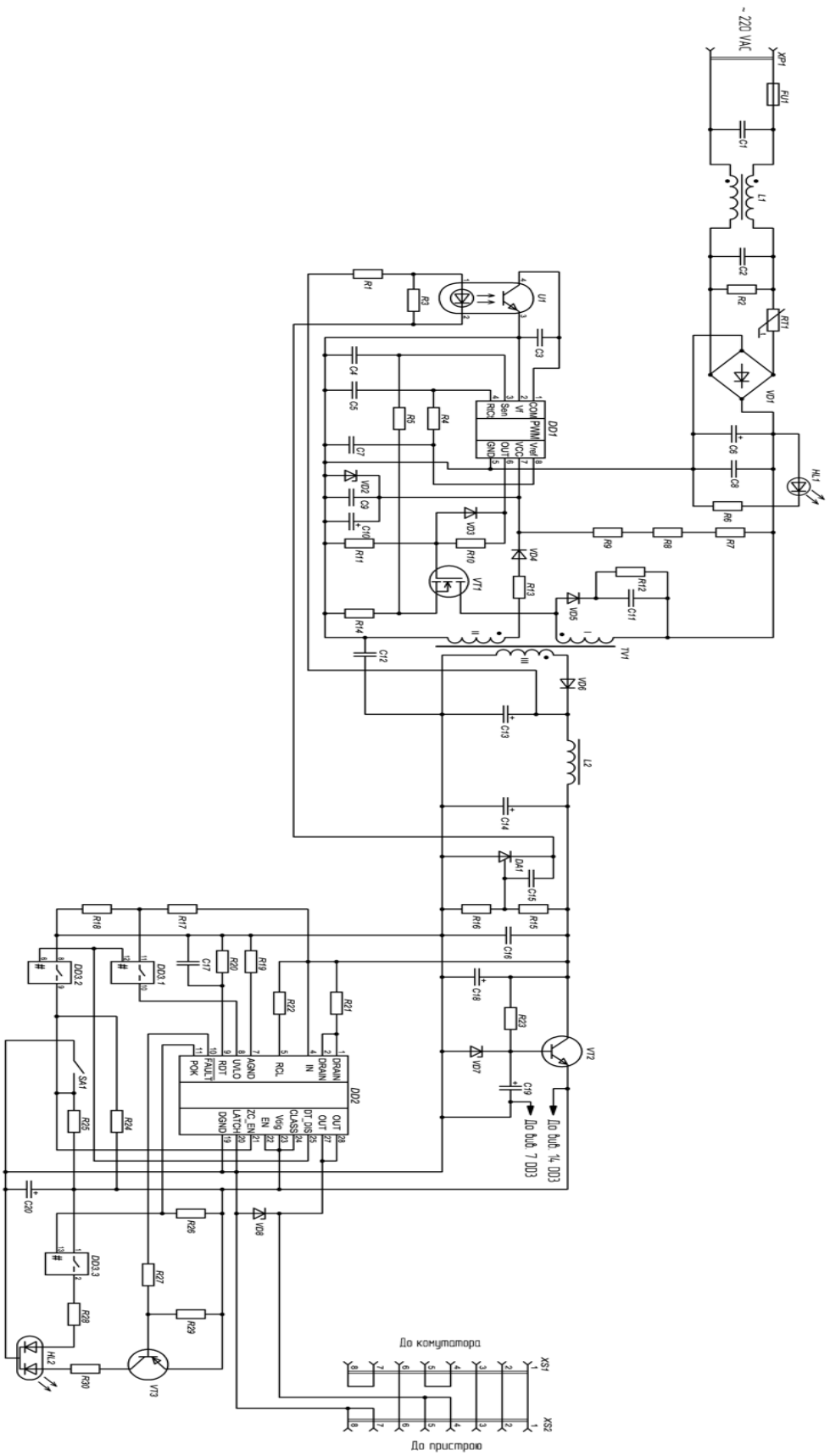


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet

2.3 Розрахунок параметрів пристрою

Розрахунок навантажувального резистора для світлодіодів проводиться за формулою:

$$R_h = \frac{U_{ж} - U_{пр}}{I_{пр}}; \qquad (2.1)$$

де Uж – напруга живлення ланцюга, у якому знаходиться світлодіод, В;

Uпр – падіння напруги на світлодіоді при прямому вмиканні;

Приймається Uпр = 2 В для світлодіода L-3WEGW (червоного кольору світіння, один з кристалів);

Iпр – прямий струм світлодіоду;

Приймається Iпр = 0,015 А для світлодіодів цього типу.

Опір навантаження R28 складає:

$$R_{28} = \frac{5-2}{0.015} = 200 \text{ Ом}.$$

Приймаємо опір навантаження для світлодіода зі стандартного ряду, яке дорівнює 200 Ом.

На рисунку 2.4 зображена елементи пристрою для розрахунку параметрів.

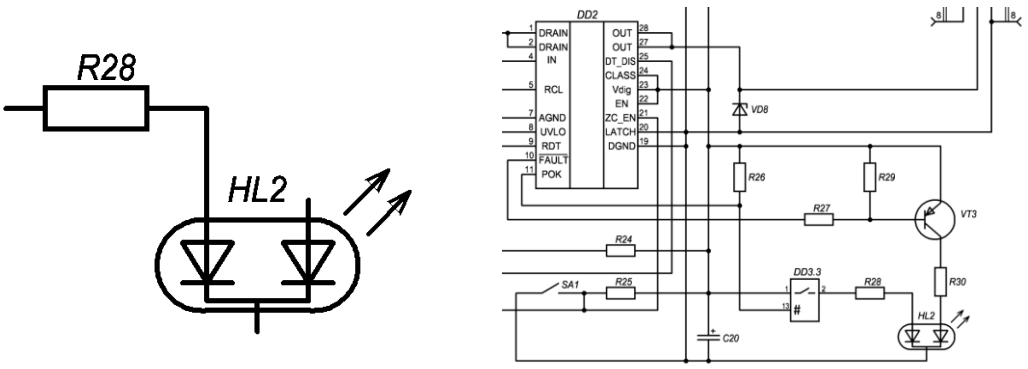


Рисунок 2.4 – Елементи пристрою для розрахунку параметрів

Визначення тривалості стадії переключення транзисторного ключа, якщо Ее = 5 В, де Ее – напруга ємітера. Для розрахунків приймаємо опір R30 = Rк = 300 Ом, R27 = Rб = 43 кОм, $|Um|$=1 В, τβ =10 нс, β = 500, Ск = 4,5 пФ, Се = 3 пФ, Uпор=0.

Де Rк – опір колектора;

Rб – опір бази;

|Um|– амплітуда;

τβ – тривалість коефіцієнта підсилення по струму;

β – коефіцієнт підсилення по струму;

Ск – ємність колектора;

Се – ємність ємітера;

Uпор – порогова напруга.

Затримка увімкнення транзистора при Uпор =0,0

$$t_{з.увім.} = 0{,}7\tau_{вх} = 0{,}7(Ск+Се)\,Rб \qquad (2.2)$$

де t з. увім. – час затримки увімкнення.

$$t_{з.увім.} = 0{,}7*7{,}5*10^{-12}*43000 = 225{,}75 \text{ нс}$$

Для визначення тривалості фронту включення найдемо еквівалентну постійну транзистора:

$$\tau_{ек} = \tau\beta + R_к * C_к\,(\beta+1) \qquad (2.3)$$

де $\tau_{ек}$ – час спаду,

$$\tau_{ек} = 10*10^{-9}+300*4{,}5*10^{-12}*501 = 676{,}36 \text{ мкс},$$

і ступень насичення – S:

$$S = (Iб*\beta)\,/Iкн \qquad (2.4)$$

$$Iкн = Ее/Rк \qquad (2.5)$$

де Ікн – струм колектора початковий.

$$Iкн = 5/300 = 17 \text{ мА}$$

$$Iб^{+}=Iб^{-}=|Um|/Rб \qquad (2.6)$$

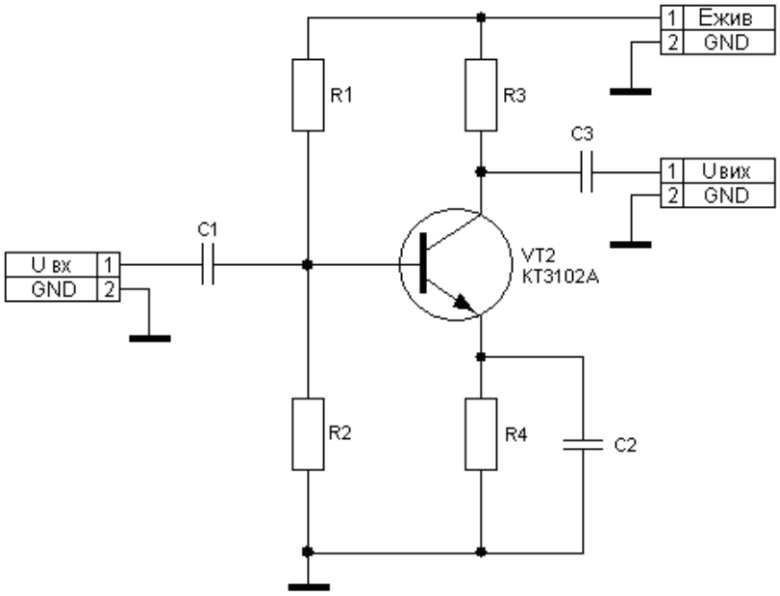
де Іб – ток бази.

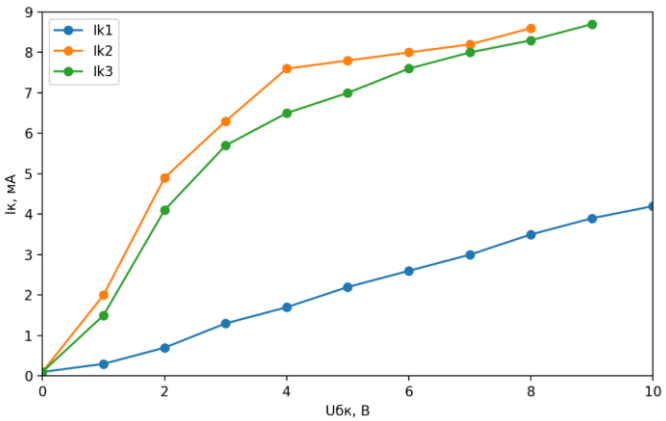
$$Iб^{+}=Iб^{-}=\frac{1}{43000}=23 \text{ мкА}$$

$$S=\frac{(23*10^{-6}*500)}{17*10^{-3}}=0,68$$

$$tф \text{ увім.} = \tau \text{ ек/S} \qquad (2.7)$$

$$tф \text{ увім.} = 676,36*10^{-6}/\ 0,68 = 994,65 \text{ мкс}$$





Uбк	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Iк1	0,1	0,3	0,7	1,3	1,7	2,2	2,6	3,0	3,5	3,9	4,2
Iк2	0,1	2,0	4,9	6,3	7,6	7,8	8,0	8,2	8,6		
Iк3	0,1	1,5	4,1	5,7	6,5	7,0	7,6	8,0	8,3	8,7	

Рисунок 2.5 – Елементи пристрою для розрахунку транзисторного ключа

Загальний час увімкнення транзистора:

$$t \text{ увім.} = t \text{ з.увім.} + t \text{ ф.увім.} \qquad (2.8)$$

$$t \text{ увім.} = 225,75*10^{-9} + 994,65*10^{-6} = 994,88 \text{ мкс}$$

Затримка вимкнення згідно з виразом:

$$t_{з.вим} = 2{,}3\ \tau_{ек} * \lg[\beta(I_б + I_б)/\beta I_б + I_{кн}] \quad (2.9)$$

$$t_{з.вим} = 2{,}3*676{,}36*10^{-6}*\lg\left[\frac{500(23*10^{-6}+23*10^{-6})}{500*23*10^{-6}+17*10^{-3}}\right] \approx 144{,}86 \text{ мкс}$$

Тривалість фронту вимкнення згідно з виразом:

$$t_{ф.вим} = 2{,}3\ \tau_{ек} * \lg[I_{кн} + \beta I_б/\beta * I_б] \quad (2.10)$$

$$t_{ф.вим} = 2{,}3*676{,}36*10^{-6}*\lg\left[\frac{17*10^{-3}+500*23*10^{-6}}{500*23*10^{-6}}\right] \approx 613{,}15 \text{ мкс}$$

Загальний час вимкнення транзистора:

$$t_{вим.} = t_{з.вим} + t_{ф.вим} \quad (2.11)$$

$$t_{вим.} = 144{,}86*10^{-6}+613{,}15*10^{-6} = 758{,}01 \text{ мкс}$$

Обов'язковою частиною будь-якого електричного пристрою чи пристрою апаратури є джерело вторинного живлення призначення яких безперебійно забезпечувати його електричною енергією необхідної якості і виду.

Для забезпечення пристрою живленням було прийнято рішення використати імпульсний блок живлення, який має значні переваги перед традиційними трансформаторними блоками живлення, а саме: високий ККД, менші маса та габарити, просте масштабування, більш універсальне використання. Обраний імпульсний блок живлення забезпечує наступні характеристики:

- вхідна напруга: ~ 220 В ± 20%, 50 - 60 Гц;
- вихідна напруга: 48 В постійного струму;
- максимальний струм навантаження: 0,5 А;
- вихідна пульсація напруги, не більше: 20 мВ.

У якості схеми блоку живлення було обрано стандартний блок живлення від компанії Mean Well з вихідною напругою 48 В та струмом навантаження 4 А. Оригінальна схема була трохи спрощена, а саме: було використано імпульсний трансформатор меншого типорозміру,

спрощена схема контроль вихідного струму, розроблено свою друковану плату.

2.4 Розрахунок та розробка друкованої плати пристрою

На першому етапі конструювання вибирається типорозмір друкованої плати, площа якої складає 5850 мм^2. У якості матеріалу друкованої плати приймається склотекстоліт, що менше підданий короблению. Товщина друкованої плати вибирається з ряду, що рекомендується, попередньо приймається $H_м$ =1,5 мм.

У відповідності з ГОСТ 23751-79 вибирається перший клас точності провідного малюнка, для якого ширина провідника і відстань між провідниками, контактними площадками (КП) і провідником складає t_{min} = S = 0,4 мм; відстань від краю просвердленого отвору до краю контактної площадки $b_м$ = 5 мм і відношення мінімального діаметра металізованого отвору до товщини плати у = 0,5 мм.

Приймається товщина провідного шару друкованого провідника $h_ф$ = 35 мкм. Тоді для обраного класу точності гранична робоча напруга складає $U_р$= 100 В (для схеми електронного захисту (7 ≤ 30 В), граничний струм $I_{гр}$ = 2600 мА і погонний опір - 1,1 мОм/мм .

При топологічному проектуванні розробляється малюнок друкованої плати, включаючи розміщення ЕРЕ на робочій площі друкованої плати і трасування з'єднань між контактними площадками. Приймається крок координатної сітки 0,625 мм. Приймаються допуски на між центрову відстань отворів для кріплення елементів ±0,2 мм.

Відповідно до ГОСТ 23751-79 розрахунок розмірів провідного малюнка друкованої плати повинний включати розрахунки:

- діаметрів монтажних не металізованих і металізованих отворів;

- діаметра контактних площадок і ширини провідників;

- мінімальної відстані між елементами провідного малюнка.

Так само розраховуються електричні параметри друкованої плати: значення паразитної ємності між двома провідниками, взаємоіндукції між друкованими провідниками, падіння напруги в провідниках, потужності втрат.

Проводиться розрахунок діаметрів монтажних отворів. При H_n=1,5 мм діаметри монтажних отворів

$$d_n = d_B + r + |\Delta d_{H.O}|, \tag{2.12}$$

де r ≤ 0,4 мм для d = 0,4...0,8 мм та r ≤ 0,6 для d > 0,8 мм.

Для ЕРЕ з діаметрами виводів d_B = 0,4, 0,5 мм d_{H1} = 0,6 мм.; для d_B = 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 мм d_{H2} = 1,0 мм, усі інші - d_{H3} = 1,2 мм

Допуски на обробку отворів встановлюються у відповідності до ГОСТ 23757-79: для діаметрів понад 0,8 мм

$\Delta d_m \geq$=0,12мм; приймається d_{H1}= 0,6 + 0,2мм, d_{H2}= 1,0 + 0,2мм, d_{H3}= 1,2 + 0,2мм

Допуски на параметри друкованої плати приймаються:

- на габаритний розмір друкованої плати > ±0,2 мм (приймається - 0,5 мм);

- на товщину друкованої плати - 1,5±0,08 мм;

- на погрішність розташування отворів щодо координатної сітки, менш ±0,005 мм;

Контактні площадки розраховуються з урахуванням технологічних факторів. Відповідно до ГОСТ 23751-79 мінімальний діаметр контактної площадки (КП) ДДП, виготовленої комбінованим методом, складає

$$D_{k\min} = \sqrt{1.28 * ПО + d_{\max}} \tag{2.13}$$

де ПО - мінімальна площа КП, мм^2;

d_{max} - максимальний діаметр металізованого отвору, мм

При виготовленні отворів свердлінням ПО = 2,5 мм^2

$$D_{k\min} = \sqrt{1.28 * 2.5 + 0.6} = 1{,}95 \text{ мм};$$

$$D_{k\min} = \sqrt{1.28 * 2.5 + 1.0} = 2{,}05 \text{ мм};$$

$$D_{k\min} = \sqrt{1.28 * 2.5 + 1.2} = 2{,}1 \text{ мм};$$

При виготовленні друкованої плати сітчастим методом максимальний діаметр контактної площадки:

$$D_{k\max} = D_{k\min} + C_3 \qquad (2.14)$$

де C_3 = 0,44 мм - обумовлено погрішністю через розтікання фарби і розтягування сітки.

Приймається метод виготовлення отворів свердлінням, тоді

для d_{H1} =0,6 мм

$D_{k\max} = 1.95 + 0.44 = 2{,}39$ мм;

для d_{H2} =1,0 мм

$D_{k\max} = 2.05 + 0.44 = 2{,}49$ мм;

для d_{H3} =1,2 мм

$D_{k\max} = 2.1 + 0.44 = 2{,}54$ мм;

Для прямокутних КП з урахуванням діаметра отвору приймається розмір контактної площі 2 мм, для круглих КП - 2,6 мм.

Друковані провідники повинні мати припустиму у виробництві ширину, мінімальне значення якої визначається, насамперед, адгезіонними властивостями матеріалу підстави і гальваностійкістю оксидованого шару

фольги. Для провідників на ДДП, виготовлених субтрактивним методом, мінімальна вимірювана ширина провідника повинна складати

$$b_{\min} = b_{зад} + 1{,}5h_{ф} \qquad (2.15)$$

де $b_{зад}$ - задана мінімальна ефективна ширина провідника, мм;

$h_ф$ - товщина провідного шару, мм;

$b_{\min} = 0{,}4 + 1.5 * 0{,}035 = 0{,}453$ мм.

Відповідно до ГОСТ 23751-79 максимальна ширина провідника для ДДП, виготовленого хімічним методом:

$$b_{\max} = b_{\min} + C_{16} \qquad (2.16)$$

де C_{16} = 0,12 для першого класу точності рисунку. При використанні сіткографії C_{16} = 0,32. Тоді $b_{\max}$ = 0,453 + 0,32 = 0,773 мм. Приймається $b_{\max}$ = 0,8 мм і $b_{\min}$ = 0,5 мм. При розрахунку ширини друкованих провідників необхідно враховувати нагрівання друкованих провідників, що при нормальних умовах не повинно перевищувати 353°К.

Ця межа зберігається за умови $b \geq I_{доп} 10^3 / i h_{ф}$, *де* $I_{доп}$ - припустимий струм, для шин живлення мікросхем $I_{доп}$ = 0,1 А; i - мінімальна щільність струму, А/мм^2 ;

$$b \geq 0.1 * 10^3 / 20 * 35 \geq 0.14 \text{ мм.}$$

Так як $b_{\min}$ = 0,3 мм, тобто 0,3 мм > 0,14 мм, то умова нагрівання виконується.

Падіння напруги ΔU провіднику довжиною l не повинне перевищувати 1...2% номінальної напруги. Тоді з урахуванням питомого опору матеріалу p_n ширина провідника повинна складати

$$b \geq 10 p_n l I_{доп} / h_{ф} \Delta U \qquad (2.17)$$

$$b \geq 10 * 0{,}0175 * 50 * 0{,}1 / 35 * 1 = 0{,}028 \text{ мм}$$

Таким чином, при $b_{\min} = 0{,}5$ мм падіння напруги складає

$$\Delta U = 10 p_n l I_{доп} / b h_ф \qquad (2.18)$$

Для самого довгого провідника:

$$\Delta U = 10 * 0.0175 * 50 * 0.1 / 0.3 * 35 = 0.083 \text{ В}$$

$$\Delta U = 0.083 * 100 / 12 = 0{,}69\%$$

Умова виконується.

Проводиться перевірка ширини провідника по припустимому струмі в залежності від методу виготовлення. Відповідно до ГОСТ 23751-79 при $b_{\min} =$ 0,3 мм. і $h_ф = 35$ мкм $I_{доп} = 0{,}32$ А, що задовольняє вихідним умовам.

Припустима робоча напруга при відстані між провідниками S ~ 0,4 мм згідно $U_{don} \sim 100$, що більше робочого $U_p = 12$ В.

Паразитна ємність між двома друкованими провідниками S = 0,4 мм визначається з формули

$$C_{пар} = 0{,}12 \varepsilon \ l_n / (\ln 2S / h_ф + b) \qquad (2.19)$$

де ε - діелектрична проникність;

l_n - довжина взаємного перекриття провідників, см;

S — ширина зазору між краями друкованих провідників, мм.

$$C_{пар} = 0.12 * 6 * 25 / (\ln 2 * 1 / 0.035 + 1) = 38{,}7 \text{ пФ}$$

Припустиме значення $C_{пар}$ для випадку використання ІМС складає $C_{пар} =$ 60 пФ. Так як 38,7 пФ < 60 пФ, то умова виконується: $C_{пар} < C_{пар.зад}$

Таким чином, паразитна ємність менше припустимої.

Паразитна взаємоіндукція між друкованими провідниками характеризується коефіцієнтом взаємоіндукції М, обумовленої по формулі

$$M = 2 l_n (l_n 2 l_n / S + 0.5(t_1 + t_2)) \qquad (2.20)$$

де l_n - довжина провідника, см; t_1, t_2 - ширина провідника першого і другого відповідно, мм.

$$M = 2*50(l_n 2*10/1+0.5(0,2+0,6)) = 0,213 \text{мкГн/см}$$

Індуктивність друкованого провідника визначається:

$$L = L_{пог} l_n \qquad (2.21)$$

де для провідника шириною *б* =1 мм погонна індуктивність

M = 0,213 мкГн/см; L = 0,213*25 = 5,33 мкГн.

При даній індуктивності перепад імпульсного струму в шині заземлення не повинний перевищувати 140...120 мА для ІМС. При спрацьовуванні логічних елементів електронного захисту перепад струму не перевищує 24...30 мА. Тому прийняття довжини друкованих провідників припустимі. Припустима довжина трьох паралельно розташованих провідників при одночасному переключенні ІМС у двох активних ланцюгах $l'_{доп} = 0.5 l_{доп}$. Тому що при перепаді імпульсного струму 80. .90 мА припустима довжина складає 22 ..45 см, то $l'_{доп}$ = 11...22 см, що враховано при трасуванні друкованих провідників. Визначається потужність утрат друкованої плати:

$$P_n = 2\pi f C U^2 tg\delta \qquad (2.22)$$

де f - частота живильної напруги схеми, при постійному струмі живлення;

U - напруга живлення схеми;

$tg\delta$ — тангенс кута діелектричних втрат;

C - ємність друкованої плати, мкФ, що розраховується по формулі:

$$C = 0,02 * tg\delta \, F/H_m \qquad (2.23)$$

F - сумарна площа друкованих провідників, мм^2 ;

H_m - товщина плати, мм.

$$C = 0{,}009 * 6 * 2231/1{,}5 = 80{,}32 \text{ мкФ}$$

$$P_n = 2 * 3.14 * 1 * 80{,}32 * 48^2 * 0.002 * 10^{-6} = 2{,}3 \text{ мВт}$$

Таким чином, втрати потужності несуттєві

На рисунку 2.6 зображено друковану плату даного пристрою.

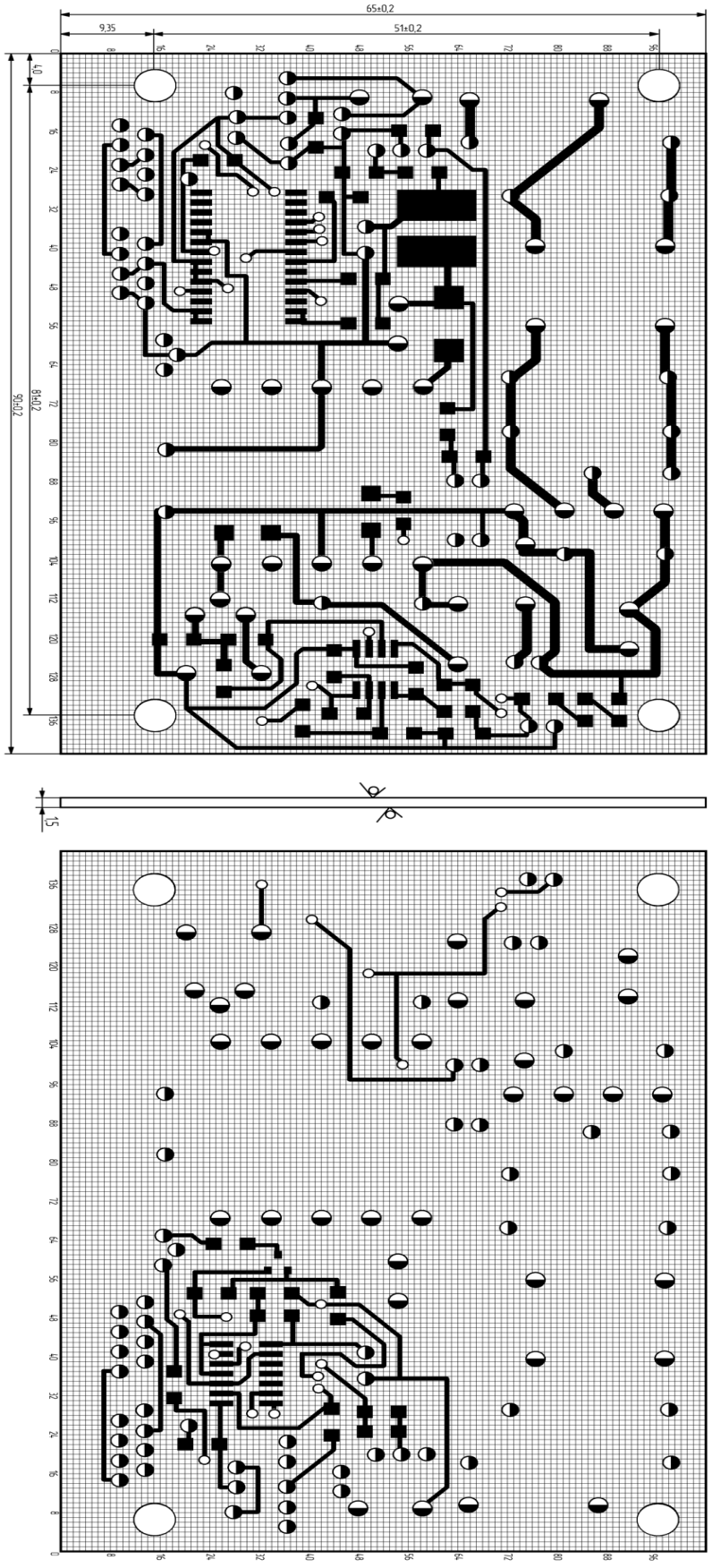


Рисунок 2.6 – Друкована плата блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet

2.5 Розрахунок сумарної інтенсивності відмов приладу

У зв’язку з підвищенням складності електронного обладнання перед конструкторами стала задача створення більш надійної та довговічної апаратури.

Надійність – властивість приладу безвідмовно функціонувати протягом заданого часу у визначених експлуатаційних умовах. Орієнтований розрахунок надійності полягає в перебуванні інтенсивності відмовлень пристрою – 2 роки безвідмовної роботи Т, а також імовірності безвідмовної роботи протягом часу t . Інтенсивність відмов за часом характеризується залежністю (рис. 2.7):

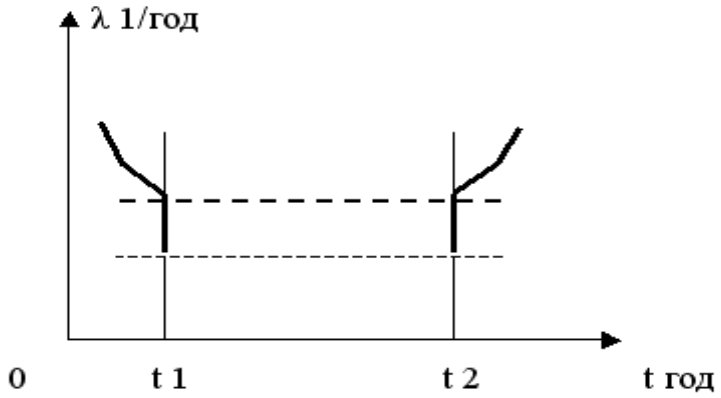


Рисунок 2.7 – Розрахункова залежність інтенсивності відмов приладу від часу

де 0 - t 1 – час приробітку відмови за рахунок прояви схованих дефектів елементної бази технології виготовлення;

t 2ос – збільшення інтенсивності відмов виробу за рахунок старіння діелектриків, елементів, год.;

Кількісна надійність характеризується імовірністю безвідмовної роботи:

$$P = e^{-\lambda * t} \qquad (2.24)$$

де Р – імовірність безвідмовної роботи приладу, год;

е – основа натурального логарифму;

λ – інтенсивність відмов приладу, 1/год;

t – час роботи, год.

Сумарна інтенсивність відмов виробу розраховуємо по формулі:

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^{M} Ni * \lambda i \qquad (2.25)$$

де λ_C – інтенсивність відмов приладу, 1/год;

λ_i – інтенсивність експлуатаційна, відмов і-тих елементів, 1/год.

Розрахунок значення експлуатаційної інтенсивності відмов елементів приладу:

$$\lambda_i = \lambda_o * K_p * K * K_e \qquad (2.26)$$

де λ_i – інтенсивність експлуатаційна, відмов і-тих елементів, 1/год;

λ_o – інтенсивність відмов типів (групи) приладів, яка відповідає температурі навколишнього середовища +25°С і номінальному електричному навантаженню, 1/год;

K_p – коефіцієнт режиму залежний від електричного навантаження та температури навколишнього середовища.

К – коефіцієнт, характерний для кожного елемента приладу окремо;

K_e – коефіцієнт, залежний від умов експлуатації приймаємо K_e=2,5;

Розрахунок значення експлуатаційної інтенсивності відмов електролітичних та керамічних конденсаторів:

$$\lambda_i = \lambda_o * K_p * K_e * K_C \qquad (2.27)$$

де λ_i – інтенсивність експлуатаційна, відмов і-тих елементів, 1/год;

λ_o – інтенсивність відмов типів (групи) приладів, яка відповідає температурі навколишнього середовища +25°С і номінальному електричному навантаженню, 1/год;

K_p – коефіцієнт режиму залежний від електричного навантаження та температури навколишнього середовища;

K_e – коефіцієнт, залежний від умов експлуатації;

K_C – коефіцієнт, залежний від ємності.

Розрахунок значення експлуатаційної інтенсивності відмов резисторів:

$$\lambda_i = \lambda_o * K_p * K_e * K_R * K_м \qquad (2.28)$$

де λ_i – інтенсивність експлуатаційна, відмов і-тих елементів, 1/год;

λ_o – інтенсивність відмов типів (групи) приладів, яка відповідає температурі навколишнього середовища +25°С і номінальному електричному навантаженню, 1/год;

$К_р$ – коефіцієнт режиму залежний від електричного навантаження та температури навколишнього середовища;

$К_е$ – коефіцієнт, залежний від умов експлуатації;

$К_R$ – коефіцієнт, залежний від величини номінального опору;

$К_м$ – коефіцієнт, залежний від потужності резистору.

Розрахунок значення експлуатаційної інтенсивності відмов діодів, транзисторів:

$$\lambda_i = \lambda_o * К_р * К_е * К_S * К_ф * К_{д.н} \quad (2.29)$$

де λ_i – інтенсивність експлуатаційна, відмов і-тих елементів, 1/год;

λ_o – інтенсивність відмов типів (групи) приладів, яка відповідає температурі навколишнього середовища +25°С і номінальному електричному навантаженню, 1/год;

$К_р$ – коефіцієнт режиму залежний від електричного навантаження та температури навколишнього середовища;

$К_е$ – коефіцієнт, залежний від умов експлуатації;

$К_ф$ – коефіцієнт, який враховує функціональне призначення приладу;

$К_S$ – коефіцієнт, залежний від величини відношення робочої напруги до максимально допустимої напруги по ТУ;

$К_{д.н}$ – коефіцієнт, залежний від величини максимально допустимого по ТУ навантаження по потужності розсіювання (струму).

Розрахунок значення експлуатаційної інтенсивності відмов мікросхем:

$$\lambda_i = \lambda_o * К_р * К_е * К_{к.к} \quad (2.30)$$

де λ_i – інтенсивність експлуатаційна, відмов і-тих елементів, 1/год;

λ_o – інтенсивність відмов типів (групи) приладів, яка відповідає температурі навколишнього середовища +25°С і номінальному електричному навантаженню, 1/год;

$К_р$ – коефіцієнт режиму залежний від електричного навантаження та температури навколишнього середовища;

$К_е$ – коефіцієнт, залежний від умов експлуатації;

Таблиця 2.1 – Значення інтенсивності відмов елементів

Позиція	Тип	n	$\lambda_{о*10^{-6}}$ 1/год	$К_р$	$К_е$	$К_С$		$\lambda_{1*10^{-6}}$ 1/год
Конденсатори								
C1, C2	MKP-X2	2	0,08	0,02	2,5	0,89		0,0071
C3	SMD1206	1	0,012	0,09	2,5	1,59		0,0043
C4, C5	SMD1206	2	0,012	0,09	2,5	0,92		0,0050
C6	K50-35	1	0,13	0,2	2,5	1,0		0,0650
C7	SMD1206	1	0,012	0,09	2,5	2,10		0,0057
C8	MKP10	1	0,01	0,02	2,5	0,78		0,0004
C9	SMD1206	1	0,012	0,09	2,5	1,59		0,0043
C10	K50-35	1	0,13	0,2	2,5	1,0		0,0650
C11	MKP10	1	0,01	0,02	2,5	0,78		0,0004
C12	DEC	1	0,06	0,05	2,5	1,33		0,0100
C13	K50-35	1	0,13	0,2	2,5	1,0		0,0650
C14	K50-35	1	0,13	0,2	2,5	1,0		0,0650
C15	SMD1206	1	0,012	0,09	2,5	1,59		0,0043
C16	MKP10	1	0,01	0,02	2,5	0,78		0,0004
C17	SMD1206	1	0,012	0,09	2,5	2,0		0,0054
C18	K50-35	1	0,13	0,2	2,5	1,0		0,0650
C19	K50-35	1	0,13	0,2	2,5	1,0		0,0650
C20	K50-35	1	0,13	0,2	2,5	1,0		0,0650
Позиція	Тип	n	$\lambda_{о*10^{-6}}$ 1/год	$К_р$	$К_е$	$К_R$	$К_м$	$\lambda_{1*10^{-6}}$ 1/год
Резистори								
R1	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R2	CFR-2W	1	0.03	0.64	2,5	0,6	1,5	0,0432
R3, R4	SMD1206	2	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0125
R5	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R6	CFR-2W	1	0.03	0.64	2,5	0,7	1,5	0,0504
R7-R9	SMD1206	3	0.01	0.51	2,5	2,0	0,7	0,0179
R10	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089
R11	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R12	CFR-2W	1	0.03	0.64	2,5	0,7	1,5	0,0504
R13	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089
R14	CFR-2W	1	0.03	0.64	2,5	1,0	1,5	0,0720
R15	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R16	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089
R17	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R18	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R19	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089
R20	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R21	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089

Продовження таблиці 2.1

R22	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089
R23	CFR-0,5W	1	0.03	0.64	2,5	0,7	1,0	0,0336
R24-R27	SMD1206	4	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0250
R28	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089
R29	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	0,7	0,7	0,0062
R30	SMD1206	1	0.01	0.51	2,5	1,0	0,7	0,0089
Позиція	Тип	n	$\lambda_{o*10^{-6}}$ 1/год		Ке			$\lambda_{1*10^{-6}}$ 1/год
Мікросхеми								
DA1	TL431	1	0,68		2,5			1,7
DD1	UC2845BD	1	0,84		2,5			2,1
DD2	MAX5922CEU	1	1,0		2,5			2,5
DD3	74HC4066	1	0,54		2,5			1,35
Позиція	Тип	n	$\lambda_{o*10^{-6}}$ 1/год	Кр	Кф	Ке	Кs	Кд.н.	$\lambda_{1*10^{-6}}$ 1/год
Діоди, транзистори									
VD1	KBP210	1	0,045	0,115	0,6	2,5	0,7	0,6	0,0033
VD2	BZV55C18V	1	0,07	0,242	-	2,5	-	-	0,0424
VD3	PMLL4148	1	0,045	0,115	0,6	2,5	0,7	0,6	0,0033
VD4,VD5	ES1J	2	0,045	0,115	0,6	2,5	0,7	0,6	0,0065
VD6	ES3J	1	0,045	0,115	0,6	2,5	0,7	0,6	0,0033
VD7	BZV55C5V6	1	0,07	0,242	-	2,5	-	-	0,0424
VD8	SA100	1	0,07	0,242	-	2,5	-	-	0,0424
VT1	STP6NK90Z	1	0,3	0,21	0,7	2,5	-	-	0,1103
VT2	BC546	1	0,29	0,21	1,5	2,5	0,5	0,5	0,0571
VT3	BC857	1	0,29	0,21	0,7	2,5	0,5	0,5	0,0266
Позиція	Тип	n	λ o*10-6 1/год		Кр	Ке	Кк.к.		λ 1*10-6 1/год
Комутаційні вироби									
SA1	PBS-11A	1	0,07		0,27	2,5	1,0		0,0473
Позиція	Тип	n	λ o*10-6 1/год		Кр	Ке			λ 1*10-6 1/год
Світлодіоди									
HL1	L-53HD	1	0,77		0,067	2,5			0,1290
HL2	L-3WEGW	1	0,77		0,067	2,5			0,1290
Всього									9,2210

Сумарна інтенсивність відмов приладу знаходиться за формулою (2.25)

Розрахунок сумарної інтенсивності відмов приладу λ з урахуванням коефіцієнта $K_{ам}$. і $K_{обс.}$

$$\lambda = К_{ам} * К_{обс} * \lambda_С \quad (31)$$

λ_C – сумарна експлуатаційна інтенсивність відмов і-тих елементів приладу, 1/год;

$К_{ам}$ – коефіцієнт амортизації (приймаємо $К_{ам}$=0,85);

$К_{обс}$– коефіцієнт обслуговування (приймаємо $К_{обс}$=1)

$$\lambda = 0{,}85 * 1 * 9{,}221 * 10^{-6} = 7{,}84 * 10^{-6} \text{ (1/год.)}$$

Розрахунок середнього часу приробітку виробу на одну відмову, год.;

$$t_{сер} = \frac{1}{\lambda} \qquad (2.32)$$

де $t_{сер}$ – середній час приробітку виробу на одну відмову, год.

$$t_{сер} = \frac{1}{7{,}84 * 10^{-6}} = 127551 \text{ (год.)}$$

Розрахунок імовірності безвідмовної роботи приладу:

$$P = e^{-\lambda * t} \qquad (2.33)$$

Розрахунок шагу h для графіку P = f(t):

$$h = \frac{tcep}{5} \qquad 2.(34)$$

$$h = \frac{127551}{5} = 25510 \text{ год.}$$

Розрахунок приробітку виробу на одну відмову в роках:

Якщо прийняти, що у році 365 діб, то можна визначити загальну кількість годин року, яка становить 8760 годин на рік. Провівши розрахунок надійності пристрою за формулою $T = \frac{t}{8760}$ можна визначити термін працездатності блоку живлення мережевих пристроїв по лініях інтерфейсу Ethernet.

$$T = \frac{t}{8760} \qquad (2.35)$$

$$T = \frac{127551}{8760} \approx 14{,}5 \text{ роки}$$

де T – середній час приробітку виробу на одну відмову, год;

n – кількість днів в році;

t – кількість годин на добу.

T ≈ 14,5 років

Вихідні дані для побудови графіку P = f(t) заносимо у таблицю 2.2:

Таблиця 2.2 - Вихідні дані для побудови графіку

T, год	0	25000	50000	75000	100000	125000	150000	175000	200000	225000
λT	0	0,2	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18	1,37	1,57	1,76
P= $e^{-\lambda t}$	1	0,82	0,68	0,55	0,46	0,38	0,31	0,25	0,21	0,17

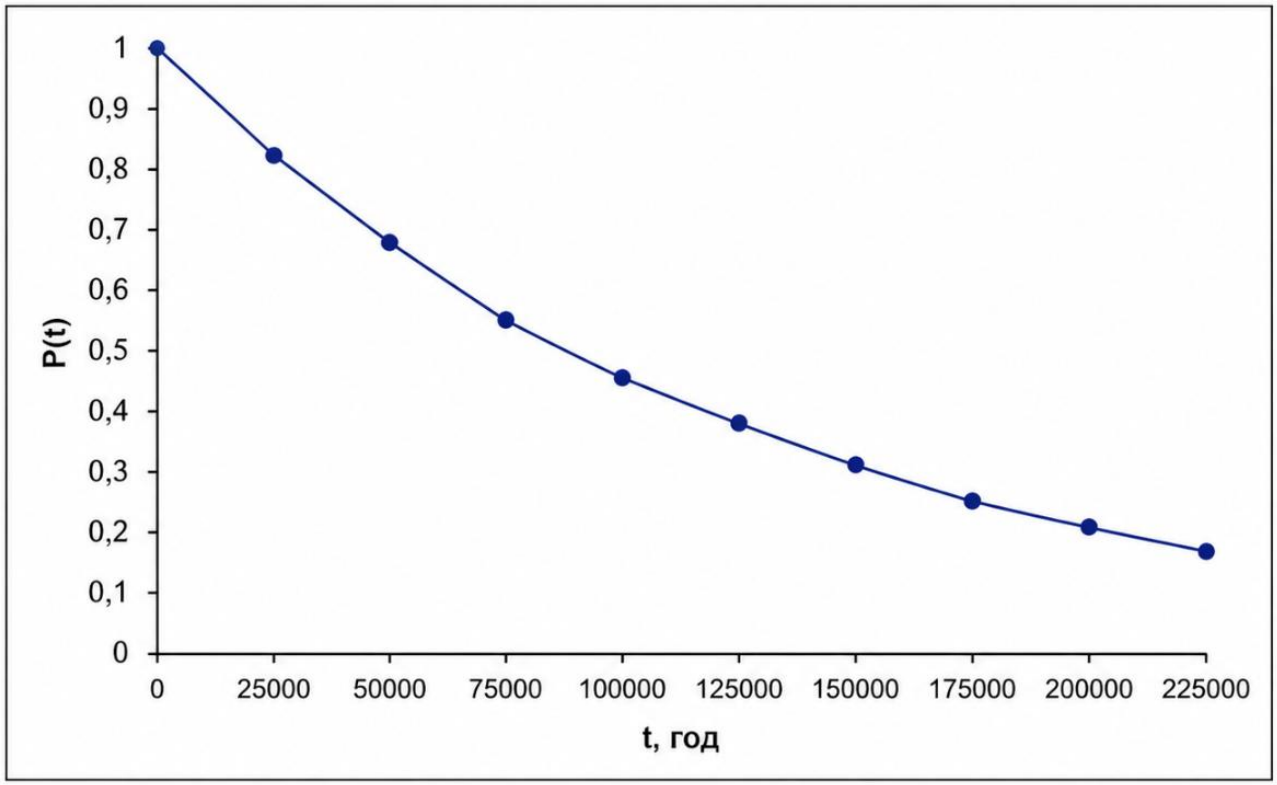


Рисунок 2.8 – Залежності інтенсивності відмов від часу

Проведено розрахунок надійності пристрою. Сумарна інтенсивність відмов становить $\lambda = 7{,}84 \cdot 10^{-6}$ год$^{-1}$, середній час безвідмовної роботи — близько 127 551 годин (≈14,5 років), що свідчить про достатній рівень надійності для практичного застосування в умовах стаціонарної експлуатації.

Для серійного виробництва рекомендовагно провести оптимізацію друкованої плати з метою зменшення габаритів пристрою та покращення

теплового режиму роботи силових компонентів. В умовах масштабного розгортання систем відеоспостереження, IoT-інфраструктури та бездротових мереж в Україні, розроблений пристрій має реальні перспективи комерціалізації як вітчизняний аналог імпортних PoE-інжекторів.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Вимоги до техніки безпеки

Охорона праці - система законодавчих актів, соціально-економічні, організаційних, технічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини у процесі праці.

Монтажний ділянка, на якій буде здійснюватися збірка і монтаж має ряд небезпечних і шкідливих факторів.

У відповідності з ГОСТ 12.0.003-74 (перевидання 1999 р.) небезпечні й шкідливі виробничі чинники підрозділяються по природі дії на наступні групи:

- фізичні;
- хімічні;
- біологічні;
- психофізіологічні.

Для захисту від окислювання місць пайки застосовують флюс каніфольно-спиртовий. При пайці радіоелементів відбувається забруднення повітряного середовища, поверхні одягу і шкіри рук свинцем, це може призвести до отруєння.

Вимоги безпеки при монтажу:

1) приміщення, в яких виробляються пайка і лудіння, повинні відповідати вимогам санітарних правил організації процесів пайки дрібних виробів сплавами, які містять свинець;

2) миття підлог на ділянках пайки та лужіння слід робити після кожної робочої зміни. Сухі способи прибирання не дозволяється;

3) робочі місця монтажників повинні бути обладнання спеціальними столами та пристроями, що забезпечують зберігання та розміщення

інструментів і матеріалів, необхідних для виробництва, а також збирання відходів виробництва;

4) на робочому місці монтажника повинні бути передбачені:

- електрощіток зі штепсельними гніздами для підключення електроінструменту на напругу 220 В;

- підставка для паяльника з лотком, що запобігає попадання припою, флюсу та нагару на поверхню столу.

5) ванни для лужіння пайки «хвилею» повинні мати спеціальні огородження, що запобігають розбризкування припою;

6) введення в експлуатацію ділянок пайки, не обладнаних вентиляцією, забороняється. Забороняється поєднувати в одну систему вентиляційні пристрої, що обслуговують ділянки пайки та інше виробниче обладнання;

7) робочі місця, на яких проходить пайка, лудіння, повинні бути обладнані ефективною місцевою витяжною вентиляцією, або робота повинна проводитися з використанням електроінструменту зі вбудованим у нього відсосом, причому:

- швидкість руху повітря безпосередньо на робочому місці пайки повинна бути не менше 0,6 м / сек.;

- швидкість руху повітря в зоні розміщення тіла працюючого не повинна перевищувати 0,2-0,3 м / сек.;

- внутрішні поверхні повітроводів витяжних систем і вентилятори повинні періодично очищатися від флюсу, забрудненням свинцем (очищення вентиляційних установок повинна проводитися з періодичністю від 0,5 до 1 місяця);

- паяльники, що знаходяться в робочому стані, повинні постійно перебувати в зоні дії витяжної вентиляції.

8) приміщення, в яких виробляється пайка і лудіння, повинні бути забезпечені проточним повітрям, що подається рівномірно у верхню зону в кількості, що становить приблизно 90% обсягу витяжки. Відсутні 10%

проточного повітря повинні подаватися у суміжні, більш чисті приміщення. Рециркуляція повітря в приміщеннях не допускається.

3.2 Вимоги до промсанітарії

На монтажній дільниці мають місце такі небезпечні та шкідливі фактори:

1) Небезпечні - опіки шкірних поверхонь нагрівальним обладнанням (паяльник) і використовуваними матеріалами;

2) підвищений рівень статичної електрики;

3) ураження електричним струмом.

4) шкідливі - недостатня освітленість робочої зони;

5) отруєння випаровування флюсу, припою, спирто-бензиновою сумішшю;

6) монотонність праці.

За визначенням, наведеним у ГОСТі, мікроклімат виробничих приміщень - це клімат внутрішнього середовища цих приміщень, що визначається діючими на організм людини сполученнями температури, вологості та швидкості руху повітря, а також температурою навколишніх поверхонь.

Загальний стан і продуктивність праці працюючих в значній мірі залежить від мікроклімату виробничого приміщення.

Температура повітря - одна з провідних факторів, що визначають мікроклімат виробничих приміщень.

Вологість повітря - це вміст в ньому пари води.

Фізіологічно оптимальною є відносна вологість в межах 40 ... 60%. Підвищена вологість повітря в поєднанні низькими температурами надає значну охолоджуючу дію, а в поєднанні з високими сприяє перегрівання організму.

Рухливість повітря. Людина починає відчувати рух повітря при його швидкості приблизно 0,1 м / с.

Освітленість. Світло, освітлення відноситься до одного з основних зовнішніх факторів, що постійно впливають на людину в процесі праці. Позитивний вплив освітлення на продуктивність праці і його якість не викликає сумніву. Так, сонячне освітлення збільшує продуктивність праці в середньому на 10%, а штучне на 13%, при цьому можливість браку знижується на 20-25%.

Вентиляція. Під вентиляцією розуміють систему заходів і пристроїв, призначених для забезпечення на постійних робочих місцях, в робочій і обслуговує зонах приміщень метеорологічних умов, що відповідають гігієнічним та технічним вимогам.

В залежності від способу переміщення повітря розрізняють вентиляцію природну і механічну.

3.3 Вимоги до пожежної безпеки

Причиною пожежі на підприємствах радіоприладобудування можуть бути: коротке замикання, перевантаження електромережі, великий перехідний опір, щиро і електрична дуга, статичну електрику. Пожежна небезпека виникає при використанні вибухонебезпечних горючих рідин: бензину, ацетону, бензолу природного газу, легколетучих розчинників, лакофарбових матеріалів.

Пожежна безпека може бути забезпечена заходами пожежної профілактики та активного пожежного захисту.

Пожежна профілактика включає комплекс заходів, необхідних для попередження виникнення пожежі або зменшення його впливу. Активний пожежний захист забезпечує успішну боротьбу з виникаючими пожежами.

Для запобігання пожеж згідно з ГОСТ 12.01.004-91 (1999) «Пожежна безпека. Загальні вимоги» пожежна безпека повинна забезпечуватися системами запобігання пожежі та протипожежного захисту, у тому числі організаційно-механічними заходами.

У виробничих приміщеннях повинна застосовуватися комплексна структура протипожежного захисту, включаючи в себе:

- первинні засоби гасіння пожеж;
- автоматичні пристрої пожежної сигналізації;
- систему пожежного водопроводу;
- установки, що забезпечують видалення диму;
- системи управління евакуацією.

У кожному з виробничих приміщень розміщений план евакуації, який складається з двох частин: графічної та текстової, та табличка з П.І.Б. особи, відповідальної за пожежну та електробезпеку.

Організаційно-технічні заходи щодо забезпечення протипожежної безпеки передбачають ознайомлення робітників і обслуговуючого персоналу з правилами пожежної безпеки, дотримання протипожежного режиму, а також порядку дій при виникненні пожежі.

Для гасіння пожеж необхідно обладнати ділянку відповідно до ППБ 01-93 (1999) «Правила пожежної безпеки». На ділянці повинні бути передбачені первинні засоби пожежегасіння:

- вогнегасник вуглекислотний ВВ – 2 та ВВ – 5

У процесі експлуатації приміщень повинна бути забезпечена працездатність всіх інженерних засобів протипожежного захисту.

Автоматичну систему пожежної сигналізації слід передбачити відповідно до НПБ 110-99 (7001) «Перелік будівель, споруд, приміщень та обладнання, які підлягають захисту автоматичними установками пожежегасіння та автоматичної пожежної сигналізації ».

У виробничому приміщенні повинні бути передбачені система пожежного водопроводу. Пожежний водопровід служить для забезпечення подачі необхідної кількості технічної води і використовується у разі виникнення пожежі в будинку, або на найближчий прилеглий території. Пожежні крани в пожежному водопроводі повинні бути розташовані таким чином, щоб кожна точка приміщення зрошувалась не менш, ніж двома

струменями. Пожежні крани (Е50-65 мм) комплектуються приєднаними до них пожежними рукавами і стовбурами, з'єднаними між собою. Вони повинні зберігатися в шафках з дверцятами зі скла й розміщатися в помітних і доступних місцях: в самому виробничому приміщенні або в коридорі в безпосередній близькості від виходу.

3.4 Електроізоляція

Стан електричної ізоляції значною мірою визначає безпека експлуатації електроустановок, особливо – у мережах з ізольованої нейтраллю. Опір ізоляції в даному випадку визначає струм, що проходить через тіло людини. У мережах з напругою понад 1000 В ушкодження ізоляції приводить до замикання на землю. При заземленій нейтралі струм замикається на землю і струм, що проходить через людину, не залежать від опору ізоляції, але при ушкодженні ізоляції можливі замикання на корпус чи короткі замикання. При замиканні на корпус виникає небезпека поразки людей, тому що під напругою опиняються не струмоведучі частини. Кротке замикання може служити причиною пожежі.

Опір ізоляції кожної ділянки в межах з напругою до 1000 В повинен бути не нижче 500 кОм на фазу. Ділянкою вважається частина мережі між двома послідовно встановленими апаратами захисту чи за останнім захисним апаратом (автоматичне реле, плавкий запобіжник і т.п.). Для ізоляції електричних апаратів і машин норми інші.

Опір ізоляції залежить від багатьох факторів – від питомого електричного опору ізоляційного матеріалу, від товщини ізоляції і довжини ділянки. Опір ізоляції зменшується зі збільшенням вологості повітря. Підвищена температура прискорює старіння ізоляції, що призводить до зниження її опору і навіть до руйнування. Опір ізоляції нелінійно залежить від прикладеної напруги – з ростом напруги він знижується.

Для електроізоляції використовуються покривні лаки, фарби. Як електроізоляційні матеріали застосовуються бавовняна пряжа, гума,

поліхлорвініл, нейрит і інші пластмаси. При високих температурах використовується азбест.

З метою підвищення надійності застосовується подвійна ізоляція, що особливо ефективна в ручному електроінструменті. Тут використовується робоча ізоляція, тобто ізоляція струмоведучих частин усередині корпусу, і додаткова – ізольований сам корпус. Такі електроустановки маркіруються знаком:



Проводи повітряних ліній електропередач підвищують на порцелянових ізоляторах, щоб уникнути замикання через дугу.

Активний опір ізоляції на ділянці у випадку проводів круглого перетину можна визначити за формулою, Ом [13]:

$$R_{и} = \rho\delta/\pi d_{и} l \ , \tag{3.1}$$

де ρ – питомий електричний опір ізоляційного матеріалу, Ом • м; δ – товщина ізоляції, м; $d_{и}$ – діаметр ізоляції, м; l – довжина ділянки, м.

У випадку великої довжини ділянки необхідно враховувати ємнісну провідність. Ємнісний опір однієї фази щодо землі, Ом [13]:

$$X_c = 1 \ /2\pi f \tag{3.2}$$

Повний опір фазного проводу $Z_{ф}$ щодо землі можна представити як два паралельно включених опори – активний і ємнісний. Тоді одержуємо, Ом [13]:

$$Z_{ф} = \frac{1}{\sqrt{1}}/R_{и}^{\ 2} + 1/X_c^{\ 2} \tag{3.3}$$

3.5 Приклад розрахунку електроізоляції

Наприклад питомий електричний опір ізоляційного матеріалу ρ=20 Ом•м, товщина ізоляції δ=5 м, діаметр ізоляції $d_и$=6 м, довжина ділянки l=5 м, частота *f*=0,8 Гц. Треба визначити активний опір на ділянці, також у випадку коли велика довжина ділянки та розрахувати повний фазний опір.

Для розрахунку активного опору використаємо формулу [13]:

$$R_и = \rho\delta/\pi d_и l \tag{3.4}$$

Та отримаємо:

$$R_и = 20 \cdot 5/3{,}14 \cdot 6 \cdot 5$$

$$R_и = 1{,}061 \text{ Ом}$$

Потім розрахуємо ємнісний опір однієї фази за допомогою формули [13]:

$$X_c = 1\ /2\pi f \tag{3.5}$$

Отримуємо:

$$X_c = 1\ /2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}8$$

$$X_c = 0{,}199045 \text{ Ом}$$

Отримавши значення активного опору та ємнісного опору, можливо розрахувати повий опір фазного проводу за допомогою формули [13]:

$$Z_{ф} = \frac{1}{\sqrt{1}} / R_{и}{}^{2} + 1 / X_{c}{}^{2} \quad (3.6)$$

Підставляємо отримані дані у формулу:

$$Z_{ф} = \frac{1}{\sqrt{1}} / 1{,}061^{2} + 1 / 0{,}1990{,}45^{2}$$

$$Z_{ф} = 26{,}12 \text{ Ом}$$

Таким чином можливо розрахувати повний опір фазного проводу.

ВИСНОВОКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки та рекомендації.

1. Проведено аналіз технології Power over Ethernet та її стандартів. Встановлено, що стандарт IEEE 802.3af забезпечує вихідну потужність до 15,4 Вт на порт при напрузі 44–57 В постійного струму, що є достатнім для живлення IP-камер, точок доступу Wi-Fi та VoIP-телефонів. Технологія PoE дозволяє суттєво спростити монтаж мережевої інфраструктури та знизити витрати на розгортання систем відеоспостереження, телекомунікаційного та іншого мережевого обладнання.

2. Розроблено структурну схему блоку живлення мережевих пристроїв, що включає чотири основні функціональні вузли: основний блок живлення (імпульсний, вихідна напруга 48 В), вторинний блок живлення (+5 В для живлення логічної частини), комутатор (виконує функції електронного ключа, запобіжника та розпізнавання підключених пристроїв) і блок індикації.

3. Розроблено алгоритм функціонування пристрою, що реалізує стандартну процедуру виявлення PD відповідно до IEEE 802.3af: подача зондуючого струму 7,5 мА, ідентифікація підключеного пристрою за допомогою короткочасних імпульсів, подача живлення з необхідними параметрами та постійний контроль споживаного струму з відключенням при перевищенні допустимого рівня.

4. Обґрунтовано вибір елементної бази та розроблено схему електричну принципову. Для реалізації пристрою використано спеціалізовану мікросхему MAX5922CEU (контролер PSE), ШІМ-контролер UC2845BD, стабілізатор TL431, а також пасивні та активні компоненти, що забезпечує економічну доцільність виробництва.

5. Проведено розрахунок надійності пристрою. Сумарна інтенсивність відмов становить $\lambda = 7{,}84 \cdot 10^{-6}$ год$^{-1}$, середній час безвідмовної роботи — близько 127 551 годин (≈14,5 років), що свідчить про достатній рівень надійності для практичного застосування в умовах стаціонарної експлуатації.

6. Для серійного виробництва рекомендовано провести оптимізацію друкованої плати з метою зменшення габаритів пристрою та покращення теплового режиму роботи силових компонентів. В умовах масштабного розгортання систем відеоспостереження, IoT-інфраструктури та бездротових мереж в Україні, розроблений пристрій має реальні перспективи комерціалізації як вітчизняний аналог імпортних PoE-інжекторів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEEE Std 802.3bt-2018. IEEE Standard for Ethernet — Amendment 2: Physical Layer and Management Parameters for Power over Ethernet over 4 pairs. — New York : IEEE, 2018. — 218 p.

2. Семенов Ю. А. Телекомунікаційні технології та обладнання : навч. посіб. / Ю. А. Семенов. — Київ : ТОВ «Юстон», 2019. — 412 с.

3. Закревський А. О. Проєктування цифрових пристроїв : підручник / А. О. Закревський, Ю. В. Тарасенко. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. — 352 с.

4. MAX5922 datasheet. High-Efficiency, Low-Voltage, Dual-Port IEEE 802.3af Power-Sourcing Equipment Controller. — Dallas : Maxim Integrated Products, 2005. — 28 p. — URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX5922.pdf (дата звернення: 05.04.2025).

5. UC2845B, UC3845B datasheet. Current Mode PWM Controller. — Dallas : Texas Instruments, 2003. — 22 p. — URL: https://www.ti.com/lit/ds/slus223f/slus223f.pdf (дата звернення: 05.04.2025).

6. TL431 datasheet. Programmable Precision Reference. — Dallas : Texas Instruments, 2019. — 30 p. — URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf (дата звернення: 05.04.2025).

7. Мелещук О. В. Силова електроніка : навч. посіб. / О. В. Мелещук. — Харків : НУЕТ, 2021. — 286 с.

8. Вітер В. С. Основи теорії надійності радіоелектронної апаратури : навч. посіб. / В. С. Вітер, О. М. Дяченко. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 168 с.

9. Корнієнко В. І. Надійність технічних систем та техногенний ризик : підручник / В. І. Корнієнко. — Дніпро : НГУ, 2019. — 317 с.

10. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. — Київ : Держстандарт України, 1994. — 95 с.

11. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). — Київ : Мінпаливенерго України, 2017. — 736 с.

12. Охорона праці та промислова безпека : навч. посіб. / за ред. К. Н. Ткачука, М. О. Халімовського. — Київ : Основа, 2021. — 480 с.

13. PoE: Power over Ethernet market research report 2023–2028. — London : MarketsandMarkets, 2023. — 124 p.

14. Horowitz P. The Art of Electronics / P. Horowitz, W. Hill. — 3rd ed. — Cambridge : Cambridge University Press, 2015. — 1224 p.

15. Analog Devices. Power over Ethernet Design Guide. — Norwood : Analog Devices, Inc., 2022. — 56 p. — URL: https://www.analog.com/en/design-center/landing-pages/001/power-over-ethernet.html (дата звернення: 12.04.2025).

16. Texas Instruments. Power over Ethernet (PoE) Solutions. Application Report SLVA689. — Dallas : Texas Instruments, 2021. — 42 p. — URL: https://www.ti.com/lit/an/slva689/slva689.pdf (дата звернення: 12.04.2025).

17. Лупій М. Г. Основи схемотехніки : підручник / М. Г. Лупій, О. В. Борисенко. — Суми : СумДУ, 2020. — 295 с.

18. Чабаненко П. П. Комп'ютерні мережі та телекомунікації : навч. посіб. / П. П. Чабаненко. — Запоріжжя : ЗНУ, 2021. — 220 с.

Додаток А

Поз. обозна-чение	Наименование	Кол.	Примечание
	Конденсатори SMD 1206 50В X7R		
	К50-35 ОЖО.464.214 ТУ		
	МКР-Х2 ВМ		
	МКР10 WIMA		
	DEC Murata		
С1, С2	МКР-Х2 100 нФ 275VAC±10%	2	
С3	SMD 1206 100 нФ±10%	1	
С4, С5	SMD 1206 1 нФ±10%	2	
С6	К50-35 47 мкФ 450 В±20%	1	
С7	SMD 1206 1 мкФ±10%	1	
С8	МКР10 100 нФ 630В±10%	1	
С9	SMD 1206 100 нФ±10%	1	
С10	К50-35 47 мкФ 35 В±20%	1	
С11	МКР10 10 нФ 630В±10%	1	
С12	DEC 2,2 нФ 2000В±10%	1	
С13	К50-35 1000 мкФ 63 В±20%	1	
С14	К50-35 100 мкФ 63 В±20%	1	
С15	SMD 1206 100 нФ±10%	1	
С16	МКР10 100 нФ 630В±10%	1	
С17	SMD 1206 680 нФ±10%	1	
С18	К50-35 47 мкФ 63 В±20%	1	
С19	К50-35 1 мкФ 16 В±20%	1	
С20	К50-35 10 мкФ 16 В±20%	1	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ІННІ 6.1763-с ПЕЗ		
Разраб.		Щербаков Р.А.			Перелік елементів	Лит.	Лист 1 / Листов 4
Пров.		Ніконова З.А.					
Н.контр.		Верьовкін Л.Л.				6.1763-с	
Утв.		Критська Т.В.					

Поз. обозна-чение	Наименование	Кол.	Примечание
	Мікросхеми		
DA1	TL431 Texas Instruments	1	
DD1	UC2845BD Texas Instruments	1	
DD2	MAX5922CEU MAXIM	1	
DD3	74HC4066 Nexperia	1	
FU1	Вставка плавка KLS5-1010-1000 1A KLS	1	
	Світлодіоди		
HL1	L-53HD Kingbright	1	
HL2	L-3WEGW Kingbright	1	
	Дроселі		
L1	PLA10A 3,5 мГн Murata	1	
L2	SR0805 3,3 мкГн Murata	1	
	Резистори SMD 1206		
	CFR-2W		
	CFR-0,5W		
R1	SMD 1206 3 кОм±5%	1	
R2	CFR-2W 1 МОм±5%	1	
R3, R4	SMD 1206 10 кОм±5%	2	

Поз. обозна-чение	Наименование	Кол.	Примечание
R5	SMD 1206 1 кОм±5%	1	
R6	CFR-2W 62 кОм±5%	1	
R7-R9	SMD 1206 100 кОм±5%	3	
R10	SMD 1206 13 Ом±5%	1	
R11	SMD 1206 10 кОм±5%	1	
R12	CFR-2W 24 кОм±5%	1	
R13	SMD 1206 13 Ом±5%	1	
R14	CFR-2W 1 Ом±5%	1	
R15	SMD 1206 10 кОм±5%	1	
R16	SMD 1206 560 Ом±5%	1	
R17	SMD 1206 18 кОм±5%	1	
R18	SMD 1206 2,7 кОм±5%	1	
R19	SMD 1206 1 Ом±5%	1	
R20	SMD 1206 18 кОм±5%	1	
R21	SMD 1206 0,51 Ом±5%	1	
R22	SMD 1206 150 Ом±5%	1	
R23	CFR-0,5W 22 кОм±5%	1	
R24-R27	SMD 1206 43 кОм±5%	4	
R28	SMD 1206 200 Ом±5%	1	
R29	SMD 1206 15 кОм±5%	1	
R30	SMD 1206 300 Ом±5%	1	
RT1	Термістор MF52 103F3950 Bochen	1	
SA1	Перемикач PBS-11A Mouser	1	
TV1	Транформатор імпульсний LPFC30WEF25N27	1	

Поз. обозна-чение	Наименование	Кол.	Примечание
U1	Оптрон PC817 Sharp	1	
	Діоди		
VD1	Діодний міст KBP210 YJ	1	
VD2	BZV55C18V DC Components	1	
VD3	PMLL4148L SOD-80	1	
VD4,VD5	ES1J SMA DC Components	2	
VD6	ES3J SMA DC Components	1	
VD7	BZV55CV6 DC Components	1	
VD8	SA100 TVS	1	
	Транзистори		
VT1	STP6NK90Z STMicroelectronics	1	
VT2	BC546 ON Semiconductor	1	
VT3	BC857 Nexperia	1	
XS1,XS2	Рознім KLS12-145-8P8C KLS	2	