

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

До захисту допущено:

зав. кафедри Андрій МОВЧАНЮК

«___»_____2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології радіо-
електронної техніки»**

**за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: Електронний модуль контролю напруги в
побутовій електромережі**

Виконав:

студент IV курсу, групи РЕ-ХХ

Радішевський Андрій Віталійович

Прізвище, ім'я, по батькові

Керівник:

к.т.н., доцент

Лащевська Наталія Олександрівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент:

ст. викл. каф. РІ

Захарченко Оксана Степанівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

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

Студент _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PE22.621317.001.ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	PE22.621317.001.ПЗ	Пояснювальна записка	71	
4	A4	PE22.621317.001.Е1	Схема структурна	1	
3	A1	PE22.621317.001.Е3	Схема електрична принципова	1	
4	A4	PE22.621317.001.ПЕ	Перелік елементів	2	
5	A1	PE22.621317.001.СК	Складальний кресленик пристрою	1	
6	A1	PE22.621317.001.СК	Складальний кресленик друкованої плати	1	
7	A1	PE22.621317.001.СП	Специфікація на друкований вузол	2	
8	A1	PE22.621317.001.ДП	Друкована плата	1	
				PE22.621317.001 Електронний модуль контролю напруги в побутовій електромережі Лист 1 Листів 1 КП ім. Ігоря Сікорського Каф.ПРЕ,Гр.РЕ-22	
		ПІБ	Підп.		
		Розроб.			
		Керівн.			
		Н/контр.			
		Зав.каф.			

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: Електронний модуль контролю напруги в побутовій
електромережі

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 2026р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Радішевський Андрій Віталійович

1. Тема проєкту: «Електронний модуль контролю напруги в побутовій електромережі», керівник проєкту доцент, к.т.н. Лашевська Н.О., затверджені наказом по університету від від «29» травня 2026 р. № 1989-с

2. Термін подання студентом проєкту 8 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проєкту: Напруга живлення від +4.4 до + 5.25В струм до 0.1 А, наявність роз'єма CON-SOCJ-2155 можливість підключення до інтернету.

4. Зміст пояснювальної записки: вступ, аналіз технічного завдання, огляд існуючих рішень, синтез схеми пристрою, вибір елементної бази, проєктування друкованої плати, конструкція, працездатність пристрою, висновки, перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Складальний кресленик плати, складальний кресленик пристрою, презентація 10 сторінок.

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	14.04.26-06.05.26	виконано
2	Розробка та аналіз завдання на проєкт	07.05.26-10.05.26	виконано
3	Розробка функціональної схеми та вибір компонентів	11.05.26-18.05.26	виконано
4	Розробка схеми електричної принципової	19.05.26-23.05.26	виконано
5	Розробка друкованої плати	24.05.26-29.05.26	виконано
6	Розробка конструкторської документації	30.05.26-05.06.26	виконано
7	Оформлення текстової та графічної документації	06.06.26-08.06.26	виконано

Студент

Андрій РАДШЕВСЬКИЙ

Керівник

Наталія ЛАЦЕВСЬКА

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до дипломного проекту бакалавра на тему «Електронний модуль контролю напруги в побутовій електромережі» містить 71 сторінок, 13 рисунків, 10 таблиць, 21 використаних джерел.

У дипломному проєкті розроблено електронний модуль контролю напруги побутової електромережі 230 В.

Виконано аналіз особливостей побутових електромереж та існуючих засобів контролю і захисту від аварійних режимів. Розроблено структурну та принципову електричні схеми пристрою на базі мікроконтролера. Проведено вибір елементної бази та розрахунок основних параметрів схеми.

У роботі досліджено точність вимірювання напруги, швидкодію та надійність роботи пристрою в умовах перенапруги та заниженої напруги. Розроблено друковану плату та конструкцію пристрою. Проведено оцінку енергоефективності та економічної доцільності розробки.

Результати роботи можуть бути використані для захисту побутового електрообладнання від нестабільності параметрів електромережі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОНТРОЛЬ НАПРУГИ, ПОБУТОВА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖА, МІКРОКОНТРОЛЕР, РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, ПЕРЕНАПРУГА, ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА, ЕЛЕКТРОННИЙ МОДУЛЬ.

					РЕ22.621317.001			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Анотація			
Розроб.								
Перевір.								
Н. Контр.								
Затверд.								
					Літ.	Арк.	Аркушів	
						6	71	

ABSTRACT

The bachelor's thesis explanatory note on the topic "Electronic Voltage Monitoring Module for Household Electrical Network" contains 71 pages, 13 figures, 10 tables, 71 references.

The thesis is devoted to the development of an electronic voltage monitoring module for a 230 V household electrical network. The characteristics of household power networks and existing voltage protection methods were analyzed. Structural and schematic diagrams of the device based on a microcontroller were developed. The electronic component base was selected and the main circuit parameters were calculated.

The voltage measurement accuracy, response speed, and reliability of the device under overvoltage and undervoltage conditions were investigated. A printed circuit board and device construction were developed. The energy efficiency and economic feasibility of the proposed solution were evaluated.

The developed device can be used for protection of household electrical equipment against unstable power supply conditions.

KEYWORDS: VOLTAGE MONITORING, HOUSEHOLD ELECTRICAL NETWORK, MICROCONTROLLER, RELAY PROTECTION, OVERVOLTAGE, ELECTRICAL SAFETY, ELECTRONIC MODULE.

					PE22.621317.001							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.					ABSTRACT			Лім.	Арк.	Аркушів		
Перевір.										7	71	
Н. Контр.												
Затверд.												

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ В ПОБУТОВИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ	
1.1 Особливості побутових електромереж 230 В.....	12
1.2 Вплив нестабільної напруги на побутову техніку	14
1.3 Існуючі засоби контролю та захисту напруги.....	17
1.4 Постановка задачі розробки електронного модуля контролю напруги	21
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ	
2.1 Розробка структурної схеми модуля	24
2.2 Вибір елементної бази	27
2.3 Розробка принципової електричної схеми	34
2.4 Розрахунок основних параметрів схеми	36
2.5 Розробка алгоритму роботи пристрою.....	39
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ	
3.1 Моделювання роботи електронного модуля	40
3.2 Дослідження точності вимірювання напруги	46
3.3 Аналіз роботи пристрою при аварійних режимах	47
3.4 Аналіз швидкодії та надійності пристрою	49
3.5 Оцінка енергоефективності пристрою	50
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА ТА КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ	
4.1 Розробка друкованої плати.....	53
4.2 Розробка конструкції пристрою	55
4.3 Технологічні особливості виготовлення плати.....	58
4.4 Заходи електробезпеки	61
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ	
5.1 Розрахунок собівартості пристрою	63
5.2 Аналіз конкурентоспроможності.....	64
5.3 Оцінка доцільності впровадження пристрою.....	66
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

					РЕ22.621317.001			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.					Зміст	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.							8	71
Н. Контр.								
Затверд.								

АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

ДСТУ – Державний стандарт України.

РКІ – рідкокристалічний індикатор.

ККД – коефіцієнт корисної дії.

МК – мікроконтролер.

ПЗВ – пристрій захисного відключення.

ДП – друкована плата.

RC-фільтр – резистивно-ємнісний фільтр.

RMS – середньоквадратичне значення змінної напруги.

UART – універсальний асинхронний приймач-передавач.

АС – змінний струм.

DC – постійний струм.

LED – світлодіод.

LCD – рідкокристалічний дисплей.

PWM – широтно-імпульсна модуляція.

EEPROM – енергонезалежна пам'ять мікроконтролера.

Перенапруга – перевищення допустимого значення напруги електромережі.

Занижена напруга – зменшення рівня напруги нижче допустимого значення.

Аварійний режим – режим роботи електромережі, за якого контрольовані параметри виходять за допустимі межі.

Гальванічна розв'язка – електричне відокремлення силових та низьковольтних електричних кіл.

Релейний захист – автоматичне відключення навантаження при виникненні аварійного режиму роботи електромережі.

					РЕ22.621317.001								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Умовні позначки та скорочення				Літ.	Арк.	Аркушів		
Розроб.												9	71
Перевір.													
Н. Контр.													
Затверд.													

ВСТУП

Сучасні побутові електромережі характеризуються значною кількістю підключених електроспоживачів, підвищеним рівнем навантаження та наявністю перехідних процесів, що негативно впливають на стабільність параметрів електроживлення. У процесі експлуатації електричних мереж виникають короточасні та тривалі відхилення напруги від номінального значення, які можуть бути спричинені нерівномірним розподілом навантаження, аварійними режимами в енергосистемі, неякісними контактними з'єднаннями, перевантаженням ліній електропередачі або роботою потужного електрообладнання.

Нестабільність напруги є однією з основних причин передчасного виходу з ладу побутової електронної техніки, систем автоматизації та електроприладів із імпульсними джерелами живлення. Особливо чутливими до перепадів напруги є сучасні мікропроцесорні пристрої, холодильне обладнання, комп'ютерна техніка, газові котли та системи керування побутовими приладами. При перевищенні допустимого рівня напруги відбувається перегрів елементів силових кіл, пробій напівпровідникових компонентів та деградація ізоляції. Знижена напруга, у свою чергу, призводить до нестабільної роботи електродвигунів, збільшення струму споживання та погіршення режимів роботи електрообладнання.

В умовах нестабільного електропостачання особливої актуальності набуває застосування пристроїв автоматичного контролю параметрів електромережі.

Одним із найбільш ефективних способів захисту побутових споживачів є використання електронних модулів контролю напруги, які забезпечують безперервний моніторинг параметрів мережі та автоматичне відключення навантаження у випадку виникнення аварійних режимів.

					РЕ22.621317.001							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.					Вступ				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.											10	71
Н. Контр.												
Затверд.												

Використання мікроконтролерних засобів керування дозволяє реалізувати високу точність вимірювання, програмне налаштування порогів спрацювання, цифрову індикацію параметрів та підвищення функціональних можливостей пристрою.

Розвиток сучасної елементної бази, зокрема мікроконтролерів, інтегральних стабілізаторів, цифрових засобів індикації та силових комутаційних елементів, створює можливість розробки компактних, енергоефективних і надійних систем контролю електроживлення. При цьому важливими вимогами до таких пристроїв є електробезпека, швидкодія, точність вимірювання, завадостійкість та надійність роботи в умовах нестабільної електромережі.

Метою дипломного проєкту є розробка електронного модуля контролю напруги в побутовій електромережі, який забезпечує вимірювання параметрів мережі змінного струму, контроль допустимого діапазону напруги та автоматичний захист навантаження при виникненні аварійних режимів.

Об'єктом дослідження є процеси контролю параметрів побутової електромережі змінного струму.

Предметом дослідження є електронний модуль контролю напруги на базі мікроконтролерної системи керування.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості створення компактного пристрою захисту побутових електроприладів від аварійних режимів електроживлення. Розроблений модуль може бути використаний у складі систем електроживлення житлових приміщень, локальних електромереж та побутових розподільчих щитів.

У дипломному проєкті виконано аналіз принципів контролю напруги, розроблено електричну схему пристрою, проведено моделювання його роботи та досліджено основні технічні характеристики електронного модуля.

					РЕ22.621317.001			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.					Вступ	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.							11	71
Н. Контр.								
Затверд.								

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ В ПОБУТОВИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

1.1 Особливості побутових електромереж 230 В

Побутові електромережі змінного струму напругою 230 В є основною ланкою системи електропостачання житлових приміщень та призначені для живлення широкого спектра електротехнічного й електронного обладнання. Робота сучасних побутових електроспоживачів безпосередньо залежить від якості електричної енергії та стабільності параметрів мережі. До основних параметрів однофазної побутової електромережі належать діюче значення напруги, частота змінного струму, форма синусоїдального сигналу, рівень гармонічних спотворень та стабільність режиму навантаження. Відповідно до загальноприйнятих стандартів номінальна напруга однофазної побутової мережі становить 230 В при частоті 50 Гц. Змінний електричний струм характеризується періодичною зміною величини та напрямку струму, а його основними параметрами є амплітудне, миттєве та діюче значення напруги [6].

Особливістю побутових електромереж є значна нерівномірність навантаження протягом доби. У години пікового споживання виникає перевантаження окремих ділянок електромережі, що призводить до падіння напруги та збільшення струмового навантаження. При одночасному підключенні великої кількості потужних електроприладів відбувається збільшення струму в лініях електропередачі та контактних з'єднаннях, унаслідок чого зростають втрати напруги на активному опорі провідників. Втрати напруги у лініях електропостачання є одним із характерних явищ побутових електромереж та залежать від довжини провідників, їх перерізу, матеріалу та величини струму навантаження.

У сучасних умовах побутова мережа живить значну кількість споживачів із імпульсними джерелами живлення, електронними системами керування та мікропроцесорною технікою. Такі пристрої є чутливими до відхилень параметрів електроживлення та створюють додаткові нелінійні навантаження, які спричиняють появу гармонічних спотворень у мережі.

					ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На відміну від активного навантаження, нелінійні споживачі формують імпульсний характер струму, що погіршує форму синусоїдальної напруги та призводить до збільшення електромагнітних завад. Наявність гармонік викликає додатковий нагрів провідників, трансформаторів та комутаційної апаратури, а також негативно впливає на точність вимірювальних пристроїв і стабільність роботи систем автоматики.

Однією з характерних особливостей побутових електромереж є виникнення короткочасних перенапруг та перехідних процесів. Основними причинами таких явищ є комутація потужних індуктивних навантажень, аварійні режими в системах електропостачання, обрив нульового провідника, грозові імпульси та неякісні контактні з'єднання.

У випадку обриву нульового провідника в багатоквартирних будинках може виникати значне перевищення фазної напруги, яке досягає небезпечних значень для побутової техніки. Такі аварійні режими супроводжуються пробоем ізоляції, перегрівом силових елементів та виходом з ладу електронних компонентів.

Суттєвий вплив на параметри побутових мереж мають електричні апарати комутації та захисту. У системах електроживлення використовуються автоматичні вимикачі, реле, контактори, пристрої захисного відключення та стабілізатори напруги. Електромагнітні реле та комутаційні апарати забезпечують автоматичне керування силовими колами та використовуються для захисту електрообладнання від перевантаження й аварійних режимів. У побутових мережах також широко застосовуються реле контролю напруги, які виконують функцію автоматичного відключення навантаження при виході напруги за допустимі межі. Під час експлуатації побутових електромереж важливе значення має забезпечення електробезпеки. Ураження електричним струмом залежить від величини струму, тривалості впливу, частоти та умов контакту людини з провідними частинами електроустановок. Найбільш небезпечним є змінний струм частотою 50 Гц, який використовується у побутових мережах. [7]

					ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З метою захисту людини та електрообладнання застосовуються системи заземлення, занулення, пристрої захисного відключення та гальванічна розв'язка низьковольтних кіл. У побутових мережах напругою до 1000 В особливу увагу приділяють ізоляції струмоведучих частин, правильному вибору комутаційних апаратів та контролю технічного стану електропроводки [16].

Важливою характеристикою побутових електромереж є нестабільність параметрів живлення у сільській місцевості та районах зі значною протяжністю ліній електропередачі. Через збільшення опору проводів та нерівномірне навантаження спостерігаються значні коливання напруги, які можуть перевищувати допустимі межі. Для електронних систем керування та сучасної побутової техніки навіть короточасні відхилення напруги можуть спричиняти збої роботи, втрату даних або пошкодження елементної бази. У зв'язку з цим застосування електронних модулів контролю напруги є необхідною складовою сучасних систем електрозахисту.

1.2 Вплив нестабільної напруги на побутову техніку

Стабільність параметрів електроживлення є однією з основних умов надійної та безпечної роботи побутового електрообладнання. Більшість сучасних електроприладів розраховані на роботу при номінальному значенні напруги 230 В та частоті 50 Гц. Відхилення напруги від допустимого діапазону призводить до порушення режимів роботи електричних і електронних компонентів, що негативно впливає на функціональні характеристики обладнання, його ресурс та безпечність експлуатації. Особливо чутливими до нестабільності параметрів мережі є пристрої, що містять мікропроцесорні системи керування, імпульсні джерела живлення, електродвигуни та силову напівпровідникову електроніку. Одним із найбільш поширених режимів порушення роботи побутової електромережі є перенапруга. При підвищенні рівня напруги відбувається збільшення електричного струму у колах живлення та підвищення теплового навантаження на елементи електронних схем [6].

					ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для резистивних навантажень це супроводжується зростанням потужності розсіювання, що визначається залежністю $P = U \cdot I$. У результаті виникає перегрів провідників, прискорене старіння ізоляційних матеріалів та деградація напівпровідникових компонентів. Для імпульсних блоків живлення перенапруга є особливо небезпечною через можливість пробою вхідних випрямлячів, електролітичних конденсаторів і силових ключів. Короткочасні імпульсні перенапруги, що виникають під час комутації індуктивних навантажень або аварій у мережі, можуть досягати значень, небезпечних для інтегральних мікросхем і мікроконтролерних систем.

У сучасних побутових приладах широко застосовуються імпульсні джерела живлення, чутливі до якості електроенергії. Підвищення напруги понад допустимі межі призводить до перевищення робочої напруги фільтрувальних конденсаторів та напівпровідникових елементів випрямлячів. Унаслідок цього виникає локальний перегрів елементів, зростають струми витоку та прискорюються процеси деградації напівпровідникових переходів. Для мікропроцесорної техніки небезпечними є навіть короткочасні перенапруги, які можуть викликати збої логічних рівнів, пошкодження пам'яті або повне порушення роботи системи керування.

Не менш небезпечним режимом є заниження напруги живлення. При зменшенні напруги нижче номінального значення погіршуються умови роботи електродвигунів, компресорів та трансформаторних джерел живлення. Для асинхронних двигунів характерним є збільшення струму споживання при зниженні напруги, що супроводжується перегрівом обмоток та зменшенням пускового моменту. У холодильному обладнанні та кондиціонерах це може призводити до тривалого запуску компресора або його роботи в перевантаженому режимі. Підвищений струм навантаження викликає додаткове нагрівання провідників і контактних з'єднань, що знижує надійність роботи електрообладнання. Для електронних пристроїв заниження напруги супроводжується нестабільністю роботи імпульсних стабілізаторів та систем живлення цифрових мікросхем [7].

					ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При недостатньому рівні напруги можливе порушення синхронізації мікроконтролерів, виникнення помилок передачі даних та самовільне перезавантаження електронних систем. У телевізорах, комп'ютерній техніці та мережевому обладнанні це проявляється у вигляді зависань, втрати інформації та зниження стабільності функціонування. Особливо критичним є режим тривалого заниження напруги для пристроїв із трансформаторними блоками живлення, у яких виникає недостатній рівень вихідної напруги вторинних кіл.

Нестабільність електроживлення також негативно впливає на комутаційну апаратуру та елементи електрозахисту. Електромагнітні реле та контактори при недостатній напрузі можуть працювати в режимі неповного спрацювання, що супроводжується підгорянням контактів, підвищеним іскрінням та механічною вібрацією контактної групи. При перенапрузі зростає електричне навантаження на ізоляцію котушок та комутаційних елементів, що знижує термін їх експлуатації.

Особливу небезпеку для побутової техніки становлять аварійні режими, пов'язані з обривом нульового провідника в однофазних мережах багатоквартирних будинків. У таких випадках фазна напруга на окремих споживачах може значно перевищувати номінальне значення, що призводить до масового пошкодження електроприладів. Найбільш уразливими є телевізори, маршрутизатори, комп'ютерна техніка, системи автоматичного керування та газові котли, у яких використовуються низьковольтні електронні компоненти.

Крім відхилення діючого значення напруги, на роботу побутового обладнання впливають гармонічні спотворення та електромагнітні завади. Значна кількість сучасних споживачів використовує імпульсні перетворювачі та нелінійні навантаження, які спотворюють форму струму та напруги.

Унаслідок цього виникають додаткові втрати потужності, нагрівання трансформаторів та погіршення електромагнітної сумісності обладнання. Гармонічні складові особливо негативно впливають на вимірювальні системи, мікроконтролерні пристрої та цифрові інтерфейси передачі даних.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі експлуатації побутових електромереж значну роль відіграє електробезпека. Відхилення параметрів напруги можуть створювати небезпечні режими роботи електроустановок та підвищувати ризик ураження людини електричним струмом. Дія струму частотою 50 Гц є найбільш небезпечною для організму людини через вплив на нервову систему та роботу серцевого м'яза. При аварійних режимах та пошкодженні ізоляції виникає необхідність використання засобів автоматичного захисту, заземлення та пристроїв захисного відключення [16].

1.3 Існуючі засоби контролю та захисту напруги

Стабільність параметрів електроживлення є необхідною умовою надійної роботи сучасного побутового електрообладнання, тому в системах електропостачання широко застосовуються засоби контролю та захисту напруги. Основним призначенням таких пристроїв є забезпечення допустимого режиму роботи електромережі, попередження аварійних ситуацій та захист споживачів від перенапруги, зниження напруги, короткочасних імпульсних завад і перевантажень. Розвиток мікропроцесорної техніки та силової електроніки призвів до появи великої кількості пристроїв контролю параметрів електромережі, які відрізняються принципом дії, швидкодією, точністю вимірювання та функціональними можливостями.

Найпростішими засобами захисту побутових електромереж є плавкі запобіжники та автоматичні вимикачі. Їх основним призначенням є захист електропроводки та споживачів від перевищення допустимого струму навантаження і короткого замикання. Автоматичні вимикачі здійснюють відключення електричного кола при виникненні аварійного режиму за рахунок теплового або електромагнітного розчіплювача. Такі пристрої не забезпечують контролю рівня напруги, однак є обов'язковими елементами систем електрозахисту. Електромагнітні апарати комутації широко застосовуються в електротехнічних системах завдяки простоті конструкції та високій надійності роботи.

					ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для захисту людини від ураження електричним струмом у побутових мережах використовуються пристрої захисного відключення та системи заземлення. Принцип дії ПЗВ базується на контролі диференційного струму між фазним і нульовим провідниками. У випадку появи струму витoku пристрій автоматично вимикає живлення навантаження, що дозволяє зменшити небезпеку ураження людини електричним струмом. У побутових електроустановках напругою до 1000 В застосовуються також захисне заземлення та занулення, які забезпечують зниження небезпечної напруги на корпусах електроприладів [8].

Одним із найбільш поширених засобів контролю параметрів електромережі є реле контролю напруги. Такі пристрої забезпечують автоматичне відключення навантаження при перевищенні або зниженні напруги відносно встановлених меж. Принцип роботи реле контролю напруги базується на безперервному вимірюванні діючого значення напруги мережі та порівнянні отриманого значення із заданими порогоми спрацювання. У сучасних пристроях контроль параметрів виконується за допомогою мікроконтролера або спеціалізованих інтегральних схем. При виході напруги за допустимі межі мікроконтролер формує сигнал керування силовим реле або симісторним ключем, який відключає навантаження від мережі.



Рисунок 1.1– Реле контролю напруги

					ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Релейні пристрої контролю напруги характеризуються порівняно високою швидкістю, простотою реалізації та можливістю програмного налаштування параметрів. Більшість сучасних моделей мають цифрову індикацію напруги, регулювання часу затримки повторного ввімкнення та функцію захисту від короткочасних імпульсних завад. Недоліком електромеханічних реле є обмежений ресурс контактної групи, механічний знос та виникнення іскріння під час комутації індуктивних навантажень.

Для забезпечення стабільної напруги живлення електроприладів застосовуються стабілізатори напруги. Основною функцією стабілізатора є підтримання вихідної напруги в заданому діапазоні незалежно від коливань вхідної напруги. У побутових системах електроживлення використовуються релейні, сервопривідні та електронні стабілізатори. Релейні стабілізатори здійснюють ступінчасте перемикання обмоток автотрансформатора за допомогою електромагнітних реле. Сервопривідні стабілізатори використовують електромеханічний регулятор із рухомим контактним вузлом, що забезпечує плавне регулювання напруги. Електронні стабілізатори виконуються на основі тиристорних або симісторних ключів і характеризуються високою швидкістю та відсутністю механічного зносу [7].



Рисунок 1.2 – Стабілізатор напруги

Стабілізатори напруги дозволяють підтримувати працездатність електроприладів навіть при значних коливаннях параметрів мережі, однак мають більші габарити, вищу вартість та складнішу конструкцію порівняно з реле контролю напруги. Для систем побутового електрозахисту часто доцільнішим є використання саме релейних модулів контролю напруги, які здійснюють аварійне відключення навантаження без стабілізації рівня напруги. Для захисту електронного обладнання від короткочасних імпульсних перенапруг застосовуються мережеві фільтри та обмежувачі перенапруги [16].

Мережеві фільтри містять варистори, LC-фільтри та RC-ланцюги, які знижують рівень високочастотних завад і поглинають імпульсні перенапруги. Варисторні елементи змінюють свій опір залежно від рівня прикладеної напруги та забезпечують обмеження небезпечних імпульсів. Такі засоби захисту широко використовуються для комп'ютерної техніки, телекомунікаційного обладнання та систем автоматизації. У сучасних системах електроживлення також використовуються джерела безперебійного живлення, які забезпечують резервне живлення електроприладів при повному зникненні напруги мережі. Більшість побутових UPS-систем містять вбудований стабілізатор напруги та систему фільтрації електромагнітних завад. Такі пристрої дозволяють підтримувати роботу комп'ютерної техніки, мережевого обладнання та систем автоматичного керування під час аварійних режимів електропостачання. Порівняльний аналіз основних засобів контролю та захисту напруги наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Порівняльний аналіз основних засобів контролю та захисту напруги

Тип пристрою	Основне призначення	Переваги	Недоліки
Автоматичний вимикач	Захист від перевантаження та КЗ	Простота, надійність	Не контролює напругу
ПЗВ	Захист від струму витоку	Підвищення електробезпеки	Не захищає від перенапруги

Реле контролю напруги	Відключення при аварійній напрузі	Швидкодія, компактність	Не стабілізує напругу
Стабілізатор напруги	Підтримання стабільної напруги	Стабілізація живлення	Висока вартість
Мережевий фільтр	Захист від імпульсних завад	Простота підключення	Обмежений рівень захисту
UPS	Резервне живлення та стабілізація	Автономна робота	Значні габарити та ціна

Аналіз існуючих засобів контролю та захисту напруги показує, що найбільш раціональним рішенням для побутових електромереж є використання електронних реле контролю напруги з мікроконтролерним керуванням. Такі пристрої забезпечують достатню точність вимірювання, високу швидкодію та можливість реалізації додаткових функцій захисту.

Використання мікроконтролерної системи дозволяє реалізувати цифрову обробку сигналів, програмне налаштування параметрів та підвищення надійності функціонування пристрою в умовах нестабільної електромережі.

1.4 Постановка задачі розробки електронного модуля контролю напруги

Проведений аналіз режимів роботи побутових електромереж та існуючих засобів захисту показав, що основною проблемою сучасних систем електроживлення є недостатня ефективність захисту електронного обладнання від тривалих відхилень напруги та короточасних аварійних процесів. Використання автоматичних вимикачів і пристроїв захисного відключення забезпечує переважно струмовий захист електроустановок, однак такі пристрої не здійснюють безперервного контролю діючого значення напруги мережі [7].

Стабілізатори напруги дозволяють підтримувати напругу в заданих межах, проте характеризуються значними габаритами, підвищеним енергоспоживанням і складністю конструкції, що обмежує їх застосування у компактних побутових системах захисту.

Релейні модулі контролю напруги є більш раціональним рішенням для побутових електромереж, однак значна частина існуючих пристроїв має обмежену функціональність, недостатню точність вимірювання та невисоку завадостійкість при роботі в умовах нестабільної мережі.

У процесі експлуатації побутових електромереж виникають режими, пов'язані з перевищенням допустимого рівня напруги, її зниженням, імпульсними перенапругами та короткочасними провалами живлення. Особливо небезпечними є аварійні режими, спричинені обривом нульового провідника, унаслідок яких напруга мережі може значно перевищувати номінальне значення 230 В. Для сучасної побутової техніки, що містить імпульсні джерела живлення, мікроконтролери та силові напівпровідникові елементи, навіть короткочасне перевищення допустимої напруги призводить до пробою електронних компонентів, перегріву силових кіл та порушення роботи систем керування. Особливо чутливими до таких режимів є мікропроцесорні пристрої, телекомунікаційне обладнання, цифрові системи автоматики та побутові прилади з електронним керуванням.

З урахуванням особливостей побутових електромереж виникає необхідність розробки електронного модуля контролю напруги, який забезпечуватиме безперервне вимірювання параметрів мережі змінного струму та автоматичне відключення навантаження при виході напруги за встановлені межі.

Розроблюваний пристрій повинен функціонувати в однофазній мережі 230 В частотою 50 Гц та забезпечувати контроль діючого значення напруги з достатньою точністю для роботи з побутовим електрообладнанням. При перевищенні або зниженні напруги відносно встановлених порогових значень модуль повинен формувати сигнал аварійного відключення силового кола з мінімальним часом спрацювання.

Однією з основних вимог до пристрою є забезпечення гальванічної розв'язки між силовою частиною та низьковольтними колами керування.

					ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це необхідно для підвищення електробезпеки, захисту мікроконтролерної системи від імпульсних перенапруг та забезпечення стабільної роботи вимірювального тракту. Для реалізації функцій контролю доцільним є використання мікроконтролера з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем, який забезпечує цифрову обробку сигналів, програмне встановлення порогів спрацювання та реалізацію часових затримок повторного ввімкнення навантаження. Застосування мікроконтролерного керування дозволяє зменшити похибку вимірювання, підвищити швидкодію системи та реалізувати додаткові функції індикації і самодіагностики.

У процесі проектування необхідно виконати вибір елементної бази модуля, розробити структурну та принципову електричну схеми, розрахувати параметри вимірювального кола, джерела живлення та силового комутаційного вузла. Особливу увагу необхідно приділити завадостійкості пристрою, оскільки наявність гармонічних спотворень та імпульсних завад у побутовій електромережі негативно впливає на точність вимірювання напруги та стабільність роботи цифрових систем керування. Для підвищення надійності роботи доцільним є використання RC-фільтрів, схем обмеження перенапруги та елементів електромагнітного захисту.

					ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПРИБОРУ

2.1 Розробка структурної схеми модуля

Розробка структурної схеми електронного модуля контролю напруги є одним із основних етапів проєктування пристрою.

Структурна схема електронного модуля контролю напруги побутової електромережі наведена на рисунку 2.1.

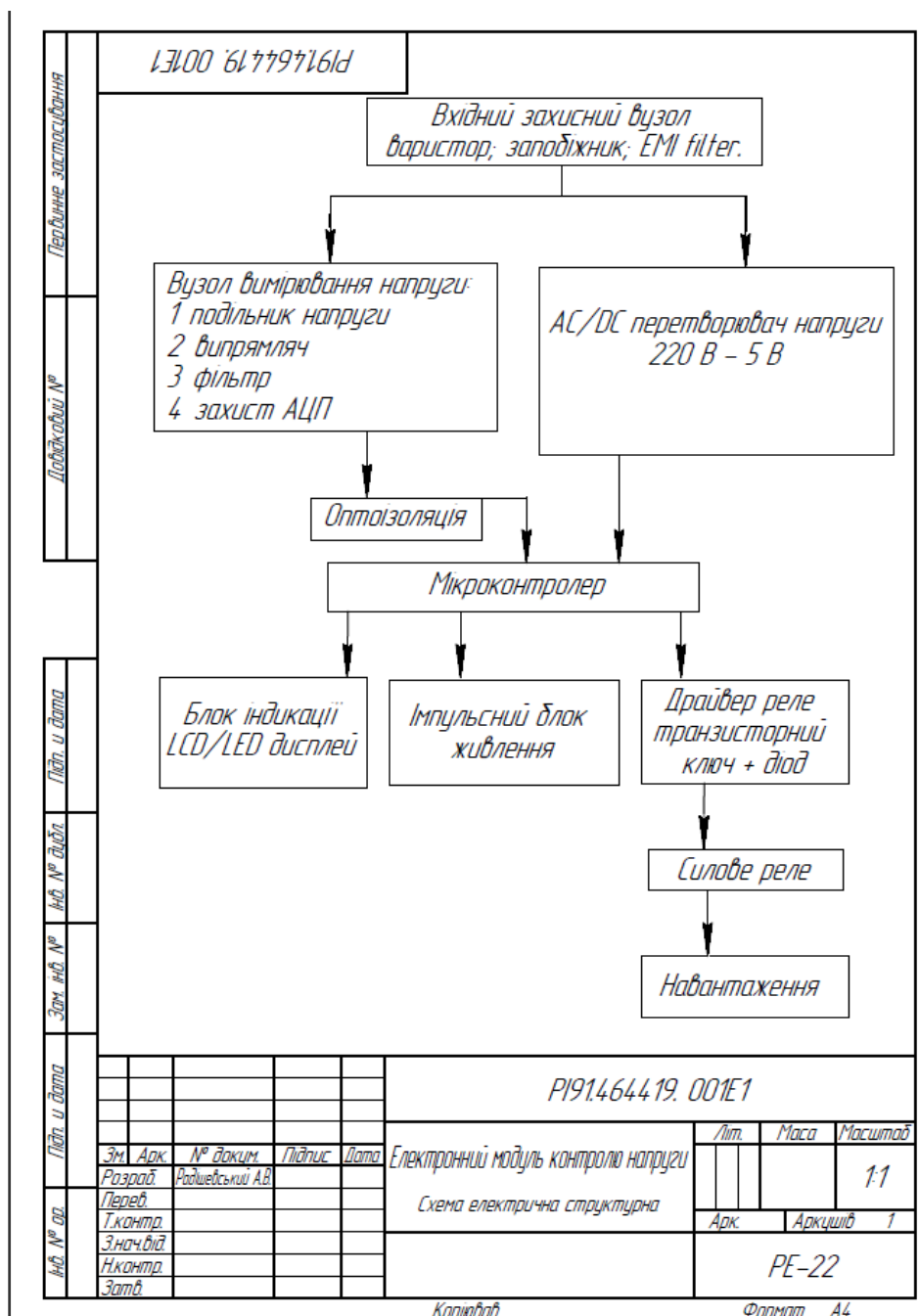


Рисунок 2.1 – Структурна схема електронного модуля контролю напруги

Під час роботи пристрою вхідна напруга побутової мережі 230 В частотою 50 Гц одночасно подається до вузла вимірювання напруги та блока живлення. Основним призначенням вузла вимірювання є зниження рівня мережевої напруги до значення, допустимого для подальшої цифрової обробки мікроконтролером. Для цього у складі вузла передбачається використання резистивного подільника напруги, випрямляча, фільтра та елементів захисту від перенапруги. Застосування фільтрації дозволяє зменшити вплив високочастотних завад та імпульсних спотворень, характерних для сучасних побутових електромереж. Додатково у вимірювальному колі використовуються елементи захисту аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера від аварійних режимів роботи мережі [3].

Після узгодження рівня сигналу інформація про значення напруги надходить до мікроконтролерного блока, який є центральним елементом системи керування. Мікроконтролер виконує аналого-цифрове перетворення сигналу, обчислення діючого значення напруги та порівняння отриманих результатів із заданими пороговими значеннями. У випадку перевищення верхньої межі напруги або її зниження нижче допустимого рівня формується сигнал аварійного відключення навантаження. Крім цього, мікроконтролер реалізує часову затримку повторного ввімкнення після нормалізації параметрів електромережі, що дозволяє запобігти багаторазовим циклам комутації при нестабільному режимі живлення.

Для забезпечення комутації навантаження у структурній схемі передбачається блок силової комутації, який складається з драйвера реле та силового електромагнітного реле. Драйвер реле забезпечує узгодження вихідного сигналу мікроконтролера з параметрами котушки реле та виконується на основі транзисторного ключа із захисним діодом. При виникненні аварійного режиму мікроконтролер подає сигнал на драйвер, унаслідок чого реле відключає навантаження від мережі 230 В. Після стабілізації параметрів мережі виконується автоматичне повторне підключення навантаження із встановленою затримкою.

					ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для відображення параметрів роботи пристрою до мікроконтролерного блока підключається блок індикації.

Основним призначенням цього вузла є виведення поточного значення напруги мережі, індикація стану навантаження та відображення аварійних режимів роботи системи. Як елемент індикації доцільно використовувати світлодіодний або рідкокристалічний дисплей, що забезпечує достатню інформативність та простоту візуального контролю параметрів мережі.

Налаштування режимів роботи пристрою здійснюється за допомогою блока керування, який містить кнопки встановлення верхньої та нижньої межі спрацювання захисту, а також параметрів затримки повторного ввімкнення.

Сигнали з кнопок надходять безпосередньо до входів мікроконтролера, де обробляються програмним алгоритмом керування.

Живлення низьковольтної частини пристрою здійснюється за допомогою AC/DC-перетворювача, який забезпечує перетворення мережевої напруги 230 В у стабілізовану напругу постійного струму для живлення мікроконтролера, блока індикації та допоміжних електронних вузлів. Використання окремого джерела живлення з гальванічною розв'язкою підвищує електробезпеку пристрою та зменшує вплив імпульсних завад силового кола на цифрову частину системи [7].

Запропонована структура електронного модуля забезпечує безперервний контроль параметрів побутової електромережі, цифрову обробку вимірювальної інформації та автоматичне відключення навантаження при аварійних режимах роботи.

Використання мікроконтролерного керування дозволяє підвищити точність контролю напруги, забезпечити гнучке налаштування параметрів захисту та реалізувати функції індикації й автоматичного відновлення живлення.

На основі розробленої структурної схеми виконується подальший вибір елементної бази та розробка принципової електричної схеми пристрою.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Вибір елементної бази

Для реалізації електронного модуля контролю напруги побутової електромережі обрано мікроконтролерну структуру побудови пристрою з цифровою обробкою вимірювального сигналу та електромеханічною комутацією навантаження.

Вибір елементної бази здійснювався з урахуванням умов роботи пристрою в однофазній мережі змінного струму 230 В частотою 50 Гц, необхідності забезпечення стабільності вимірювання, стійкості до імпульсних перенапруг, електромагнітної сумісності та надійної роботи пристрою в умовах тривалої експлуатації.



Рисунок 2.2 – ATmega328P

Центральним елементом системи є мікроконтролер ATmega328P виробництва Microchip Technology. Даний мікроконтролер побудований на AVR RISC-архітектурі та містить вбудований 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач, EEPROM-пам'ять, апаратні таймери та цифрові інтерфейси UART, SPI і I²C [11].

Використання ATmega328P дозволяє реалізувати вимірювання напруги мережі, цифрову обробку сигналу, формування порогів спрацювання захисту, часові затримки повторного ввімкнення навантаження, керування індикацією та силовою комутацією без застосування додаткових спеціалізованих мікросхем [12].

Наявність EEPROM-пам'яті забезпечує збереження встановлених

					ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

користувачем параметрів після вимкнення живлення пристрою.

Для підвищення надійності функціонування системи використовується апаратний watchdog-таймер мікроконтролера, який виконує автоматичне перезавантаження системи у випадку програмного збою або впливу потужних електромагнітних завад [13].

Основні характеристики мікроконтролера ATmega328P наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Характеристики мікроконтролера ATmega328P

Параметр	Значення
Архітектура	AVR 8-bit RISC
Тактова частота	до 20 МГц
Напруга живлення	1,8...5,5 В
Розрядність АЦП	10 біт
Кількість каналів АЦП	8
Flash-пам'ять	32 КБ
EEPROM	1 КБ
SRAM	2 КБ
Інтерфейси	UART, SPI, I ² C
Робоча температура	−40...+85 °С

Вузол контролю напруги побудований на основі резистивного подільника напруги з подальшим випрямленням та фільтрацією сигналу. Для формування подільника використовуються металоплівкові резистори з малим температурним коефіцієнтом опору та підвищеною довготривалою стабільністю параметрів.

У високовольтній частині вимірювального кола застосовується послідовне з'єднання резисторів, що дозволяє зменшити електричне навантаження на окремі елементи та підвищити електричну міцність кола.

Використання металоплівкових резисторів забезпечує стабільність коефіцієнта поділу напруги та зменшує температурну похибку вимірювання.

Для випрямлення вимірювального сигналу використовується швидкодіючий випрямний діод UF4007 [14].

Даний діод характеризується допустимою зворотною напругою до 1000 В, малим часом відновлення та високою стійкістю до імпульсних перенапруг. Застосування UF4007 забезпечує стабільну роботу вимірювального вузла в умовах комутаційних завад та короткочасних імпульсів у мережі живлення.

Для захисту входу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера використовуються сигнальні діоди 1N4148, які виконують функцію обмеження рівня напруги на вході АЦП при аварійних режимах роботи.

Фільтрація вимірювального сигналу виконується RC-фільтром низьких частот, побудованим на основі керамічних конденсаторів типу X7R та електrolітичних конденсаторів з низьким еквівалентним послідовним опором ESR. Використання RC-фільтра дозволяє зменшити вплив високочастотних імпульсних завад, що виникають під час роботи імпульсних джерел живлення та комутації навантаження.

У колах живлення аналогової та цифрової частини застосовуються керамічні конденсатори розв'язки, встановлені безпосередньо біля виводів живлення мікроконтролера, що забезпечує стабільність роботи аналого-цифрового перетворювача та цифрової системи керування.

Живлення низьковольтної частини пристрою реалізується за допомогою ізольованого імпульсного AC/DC-перетворювача HLK-PM01.

Використання готового AC/DC-модуля дозволяє забезпечити стабілізовану вихідну напругу 5 В та реалізувати гальванічну розв'язку між мережею змінного струму та цифровою частиною пристрою. Модуль HLK-PM01 характеризується компактними габаритами, достатньою вихідною потужністю та стабільністю параметрів при значних коливаннях мережевої напруги [15].

Для зменшення рівня електромагнітних завад у вхідному колі блока живлення використовується ЕМІ-фільтр, до складу якого входять конденсатор класу X2 та синфазний дросель. Застосування ЕМІ-фільтра дозволяє зменшити проникнення високочастотних завад із мережі живлення до цифрової частини пристрою та підвищити завадостійкість системи керування.

					ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

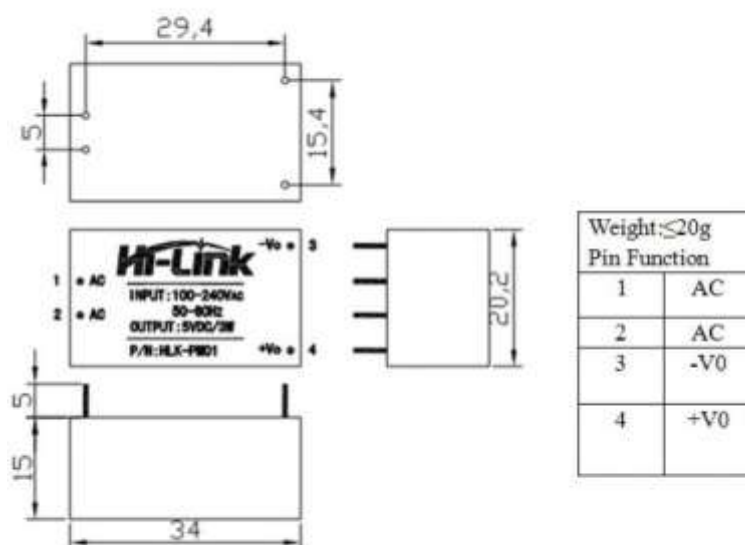


Рисунок 2.3 – AC/DC-перетворювач HLK-PM01

Основні характеристики AC/DC-перетворювача HLK-PM01 наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Характеристика HLK-PM01

Параметр	Значення
Вхідна напруга	100...240 В AC
Вихідна напруга	5 В DC
Максимальний вихідний струм	0,6 А
Номінальна потужність	3 Вт
Тип ізоляції	гальванічна
ККД	до 70 %
Робоча температура	-25...+60 °C

Для захисту пристрою від аварійних режимів роботи у вхідному колі мережі використовується плавкий запобіжник F1 типу slow-blow номіналом 1 А. Запобіжник забезпечує відключення пристрою при перевищенні

допустимого струму споживання або виникненні короткого замикання. Додатковий захист від імпульсних перенапруг реалізується за допомогою варистора MOV-14D471K, встановленого паралельно мережевому входу.

Варистор обмежує амплітуду короткочасних імпульсів напруги, що виникають унаслідок комутаційних процесів або грозових перенапруг, та знижує ймовірність пошкодження силових елементів і блока живлення.

Для комутації навантаження використовується електромагнітне реле Songle SRD-05VDC-SL-C з напругою котушки 5 В. Контактна група реле розрахована на комутацію змінної напруги 230 В при струмі до 10 А, що дозволяє використовувати пристрій для роботи з більшістю типових побутових навантажень. Перевагою електромеханічного реле є повне гальванічне відокремлення силового кола від цифрової системи керування та висока стійкість до короткочасних перевантажень [16].

Керування котушкою реле здійснюється транзисторним драйвером на основі біполярного NPN-транзистора 2N2222. Використання транзистора 2N2222 забезпечує необхідний запас по струму колектора та стабільну роботу драйвера у тривалому комутаційному режимі. Для захисту транзисторного ключа від перенапруг самоіндукції котушки реле використовується захисний діод, підключений паралельно обмотці реле.

Для зменшення рівня електромагнітних завад та підвищення ресурсу контактної групи реле у силовому колі передбачається використання RC-snubber-ланцюга. Застосування снабберного кола дозволяє зменшити перенапругу на контактах реле під час комутації індуктивного навантаження, знизити рівень іскроутворення та підвищити довговічність силових контактів.

Для відображення параметрів роботи пристрою використовується рідкокристалічний дисплей LCD1602 з інтерфейсом I²C. Використання інтерфейсу I²C дозволяє зменшити кількість сигнальних ліній мікроконтролера та спростити трасування друкованої плати [17].

Дисплей забезпечує відображення поточного значення напруги мережі, стану навантаження, аварійних повідомлень та параметрів налаштування пристрою.

Для налаштування режимів роботи пристрою використовуються тактові кнопки типу tact switch із програмною обробкою сигналів натискання.

					ІІЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У колах живлення цифрової частини застосовуються керамічні конденсатори розв'язки номіналом 0,1 мкФ, встановлені безпосередньо біля виводів живлення мікроконтролера та цифрових вузлів, що забезпечує стабільність роботи системи керування при наявності високочастотних імпульсних завад.

Таблиця 2.3 – Перелік основних елементів електронного модуля контролю напруги

Позначення	Найменування елемента	Тип / Модель	Основні характеристики	Призначення
DD1	Мікроконтролер	ATmega328P	AVR 8-bit, 10-bit ADC, 32 КБ Flash, 5 В	Центральний вузол керування та обробки сигналів
PS1	AC/DC-перетворювач	HLK-PM01	230 В AC / 5 В DC, 3 Вт, гальванічна розв'язка	Живлення цифрової частини пристрою
K1	Електромагнітне реле	Songle SRD-05VDC-SL-C	5 В, 10 А, 250 В AC	Комутація навантаження
VT1	NPN-транзистор	2N2222	I _c до 600 мА	Драйвер керування реле
VD1	Випрямний діод	UF4007	1000 В, 1 А	Випрямлення вимірювального сигналу
VD2, VD3	Сигнальні діоди	1N4148	Швидкодіючі	Захист входу АЦП мікроконтролера
FU1	Плавкий запобіжник	Slow-blow 1A	250 В	Захист від перевантаження та КЗ
RV1	Варистор	MOV-14D471K	470 В	Захист від імпульсних перенапруг

LF1	Синфазний дросель	EMI choke	EMI suppression	Зменшення електромагнітних завад
Cx1	Конденсатор класу X2	X2 Safety Capacitor	275 В AC	ЕМІ-фільтрація мережі
C1–C3	Керамічні конденсатори	X7R	0,1 мкФ	ВЧ-фільтрація та розв'язка живлення
C4, C5	Електролітичні конденсатори	Low ESR	10–100 мкФ	Згладжування пульсацій
R1–R4	Металоплівкові резистори	Metal Film	0,25 Вт, 1 %	Подільник напруги
R5	Базовий резистор	Metal Film	1 кОм	Обмеження струму бази транзистора
R6	Pull-up/Pull-down резистор	Metal Film	10 кОм	Формування логічного рівня
LCD1	РК-дисплей	LCD1602 I ² C	16×2 символи	Відображення параметрів роботи
SB1–SB3	Тактові кнопки	Tact Switch	5 В	Налаштування параметрів пристрою
XT1	Кварцовий резонатор	16 MHz Crystal	±20 ppm	Тактування мікроконтролера
C6, C7	Конденсатори кварцу	Ceramic	22 пФ	Стабілізація роботи кварцу
RC1	RC-snubber	RC suppression network	100 Ом + 100 нФ	Захист контактів реле від перенапруг
VD4	Захисний діод реле	1N4007	1000 В, 1 А	Захист транзистора

Обрана елементна база забезпечує необхідну точність контролю параметрів побутової електромережі, стійкість до імпульсних і комутаційних завад, електричну міцність високовольтних кіл та надійне функціонування пристрою в умовах тривалої експлуатації.

2.3 Розробка принципової електричної схеми

На основі розробленої структурної схеми була створена принципова електрична схема електронного модуля контролю напруги побутової електромережі. Принципова схема визначає склад елементів пристрою, електричні зв'язки між функціональними вузлами та реалізує алгоритм контролю напруги мережі з автоматичним відключенням навантаження при аварійних режимах роботи.

Принципова електрична схема пристрою наведена на рисунку 2.2.

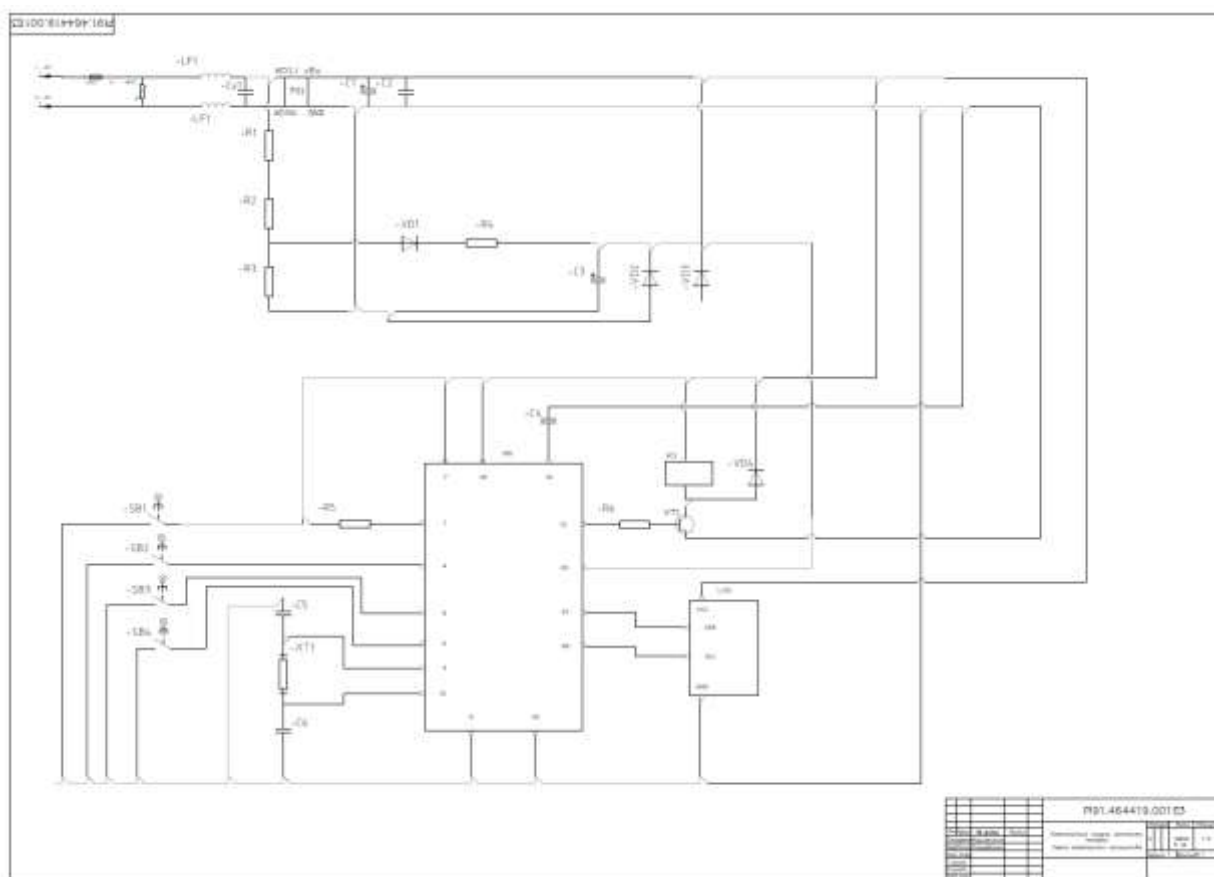


Рисунок 2.2 – Принципова електрична схема електронного модуля контролю напруги

Схема містить вузол захисту мережевого входу, вимірювальний вузол, блок живлення, мікроконтролерний блок керування, вузол індикації та силовий комутаційний вузол.

Захист вхідного кола реалізований за допомогою плавкого запобіжника FU1 та варистора RV1, які забезпечують захист пристрою від перевантаження та імпульсних перенапруг.

Для зменшення рівня високочастотних завад у мережевому колі використовується ЕМІ-фільтр на основі синфазного дроселя та конденсатора класу Х2.

Живлення цифрової частини схеми здійснюється за допомогою АС/DC-перетворювача HLK-PM01, який формуює стабілізовану напругу 5 В для живлення мікроконтролера та допоміжних вузлів [14].

Контроль напруги мережі виконується за допомогою резистивного подільника напруги, випрямного діода UF4007 та RC-фільтра низьких частот.

Після узгодження рівня сигнал надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера ATmega328P. Для захисту входу АЦП використовуються сигнальні діоди 1N4148 [3].

Керування навантаженням реалізується електромагнітним реле SRD-05VDC-SL-C, яке підключається через транзисторний драйвер на основі транзистора 2N2222. Для захисту транзистора від перенапруг самоіндукції використовується діод VD4.

Зменшення перенапруг на контактах реле забезпечується RC-snubber-ланцюгом. Для відображення параметрів роботи пристрою використовується дисплей LCD1602 з інтерфейсом І²С. Налаштування режимів роботи виконується за допомогою кнопок керування, підключених до цифрових входів мікроконтролера [11].

Розроблена принципова електрична схема забезпечує реалізацію функцій контролю напруги побутової електромережі, індикації режимів роботи та автоматичного відключення навантаження при аварійних режимах роботи мережі.

2.4 Розрахунок основних параметрів схеми

Розрахунок основних параметрів електронного модуля контролю напруги виконується з метою забезпечення коректної роботи вимірювального вузла, узгодження рівнів сигналів із входом аналого-цифрового

перетворювача мікроконтролера та перевірки працездатності силового комутаційного вузла.

Під час розрахунків враховуються параметри побутової електромережі 230 В частотою 50 Гц, допустимі режими роботи елементної бази та вимоги електробезпеки. Основні методики розрахунку електричних кіл базуються на законах Ома та Кірхгофа, а також принципах аналізу електричних ланцюгів змінного струму [4].

Основним вузлом пристрою є коло вимірювання напруги мережі, побудоване на основі резистивного подільника. Для забезпечення безпечного підключення до входу АЦП мікроконтролера необхідно знизити амплітуду мережевої напруги до рівня не більше 5 В.

У схемі використовується подільник напруги на резисторах:

$$R1 = 330 \text{ кОм};$$

$$R2 = 330 \text{ кОм};$$

$$R3 = 10 \text{ кОм}.$$

Еквівалентний верхній опір подільника:

$$R_{TOP} = R1 + R2 = 330 + 330 = 660 \text{ кОм}$$

Коефіцієнт поділу напруги:

$$K = \frac{R3}{R_{TOP} + R3} \quad (2.1)$$

$$K = \frac{10}{660 + 10} = 0.0149$$

Діюче значення максимальної мережевої напруги приймається:

$$U_{MAX} = 250 \text{ В}$$

Амплітудне значення напруги:

$$U_m = U_{MAX} \sqrt{2} \quad (2.2)$$

$$U_m = 250 \cdot 1.414 = 353.5 \text{ В}$$

Напруга на виході подільника:

$$U_{DIV} = U_m \cdot K \quad (2.3)$$

$$U_{DIV} = 353.5 \cdot 0.0149 = 5.27 \text{ В}$$

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після проходження через випрямний діод UF4007 відбувається падіння напруги приблизно 0,7 В:

$$U_{ADC} = 5.27 - 0.7 = 4.57 \text{ В}$$

Отримане значення не перевищує максимально допустиму вхідну напругу АЦП мікроконтролера АТmega328Р, що підтверджує правильність вибору параметрів подільника.

Струм через резистивний подільник визначається за законом Ома:

$$I_{DIV} = \frac{U_{MAX}}{R_{TOP} + R_3} \quad (2.4)$$

$$I_{DIV} = \frac{250}{670000} = 0.000373 \text{ А} = 0.373 \text{ мА}$$

Потужність, що розсіюється на резисторах R1 та R2:

$$P_{R1} = I_{DIV}^2 \cdot R1 \quad (2.5)$$

$$P_{R1} = 0.000373^2 \cdot 330000 = 0.046 \text{ Вт}$$

Отримане значення значно менше допустимої потужності резистора 0,25 Вт, тому використання металоплівкових резисторів потужністю 0,25 Вт є достатнім. Для згладжування пульсацій після випрямлення використовується RC-фільтр на елементах R4 та C3:

$$R4 = 4,7 \text{ кОм};$$

$$C3 = 10 \text{ мкФ}.$$

Постійна часу фільтра:

$$\tau = R \cdot C \quad (2.6)$$

$$\tau = 4700 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0.047 \text{ с}$$

Частота зрізу RC-фільтра:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.7)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 4700 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 3.39 \text{ Гц}$$

Отримане значення забезпечує ефективне згладжування високочастотних завад та пульсацій випрямленого сигналу. Для керування

					ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітним реле використовується транзисторний ключ на основі 2N2222. Струм котушки реле SRD-05VDC-SL-C становить:

$$I_{RELAY} = 70 \text{ мА}$$

Для забезпечення режиму насичення транзистора коефіцієнт передачі струму приймається:

$$\beta_{sat} = 10$$

Необхідний струм бази:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{sat}} \quad (2.8)$$

$$I_B = \frac{70}{10} = 7 \text{ мА}$$

Напруга логічної одиниці мікроконтролера:

$$U_{OUT} = 5 \text{ В}$$

Падіння напруги база-емітер транзистора:

$$U_{BE} = 0.7 \text{ В}$$

Необхідний опір базового резистора:

$$R_B = \frac{U_{OUT} - U_{BE}}{I_B} \quad (2.9)$$

$$R_B = \frac{5 - 0.7}{0.007} = 614 \text{ Ом}$$

У схемі використовується стандартне значення:

$$R_6 = 1 \text{ кОм}$$

Споживаний струм низьковольтної частини пристрою визначається сумарним струмом усіх електронних вузлів:

Вузол	Струм споживання
ATmega328P	20 мА
LCD1602 I ² C	25 мА
Реле	70 мА
Допоміжні вузли	15 мА

Сумарний струм:

$$I_{TOTAL} = 20 + 25 + 70 + 15 = 130 \text{ мА}$$

Потужність споживання низьковольтної частини:

$$P = U \cdot I \quad (2.10)$$

$$P = 5 \cdot 0.13 = 0.65 \text{ Вт}$$

Оскільки AC/DC-перетворювач HLK-PM01 має допустиму потужність 3 Вт, запас по потужності є достатнім для стабільної роботи пристрою.

Отримані результати розрахунків підтверджують правильність вибору елементної бази та працездатність розробленої принципової схеми електронного модуля контролю напруги.

Розраховані параметри забезпечують безпечне узгодження мережевої напруги з входом мікроконтролера, стабільну роботу вузлів керування та надійну комутацію навантаження.

2.5 Розробка алгоритму роботи пристрою

Алгоритм роботи електронного модуля контролю напруги визначає послідовність функціонування окремих вузлів пристрою, порядок обробки вимірювальної інформації та логіку прийняття рішень щодо підключення або відключення навантаження [9].

Розробка алгоритму є необхідною для забезпечення стабільної роботи системи в умовах нестабільної побутової електромережі та реалізації функцій автоматичного захисту навантаження від аварійних режимів.

Функціонування пристрою починається після подачі напруги живлення на AC/DC-перетворювач.

Після формування стабілізованої напруги 5 В виконується ініціалізація мікроконтролера ATmega328P, налаштування портів введення-виведення, запуск аналого-цифрового перетворювача, ініціалізація дисплея LCD1602 та завантаження встановлених користувачем параметрів роботи із енергонезалежної пам'яті мікроконтролера [10].

Після завершення ініціалізації пристрій переходить у режим безперервного контролю параметрів електромережі.

Аналоговий сигнал із вимірювального вузла надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера, де виконується періодичне вимірювання рівня напруги мережі. Отримані значення проходять програмну обробку та масштабування відповідно до коефіцієнта поділу вимірювального кола.

Після обчислення діючого значення напруги виконується порівняння отриманого результату із встановленими верхньою та нижньою межами допустимого діапазону роботи. У нормальному режимі, коли напруга мережі знаходиться в допустимих межах, мікроконтролер формує сигнал керування транзисторним ключем, унаслідок чого силове реле підключає навантаження до мережі. Одночасно на дисплеї відображається поточне значення напруги та стан навантаження.

У випадку перевищення верхнього порогу напруги або зниження напруги нижче встановленого мінімального значення мікроконтролер формує сигнал аварійного відключення реле.

У результаті навантаження відключається від мережі, а на дисплей виводиться повідомлення про аварійний режим роботи. Відключення навантаження виконується з метою захисту побутової техніки від пошкодження внаслідок перенапруги або недопустимого зниження напруги живлення.

Після переходу пристрою в аварійний режим виконується безперервний контроль стану мережі. Якщо параметри напруги повертаються до допустимого діапазону, запускається таймер затримки повторного ввімкнення. Використання часової затримки дозволяє уникнути багаторазового перемикання реле при короткочасних коливаннях напруги та підвищує надійність роботи системи. Після завершення встановленого інтервалу затримки мікроконтролер повторно вмикає навантаження та повертає пристрій у штатний режим роботи. Налаштування параметрів роботи пристрою виконується за допомогою кнопок керування. Користувач має

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливість змінювати верхню та нижню межі спрацювання захисту, а також час затримки повторного ввімкнення навантаження.

Після зміни параметрів нові значення записуються до енергонезалежної пам'яті EEPROM мікроконтролера, що забезпечує збереження налаштувань після вимкнення живлення.

Для графічного представлення послідовності роботи пристрою була розроблена блок-схема алгоритму функціонування електронного модуля контролю напруги, наведена на рисунку 2.3.

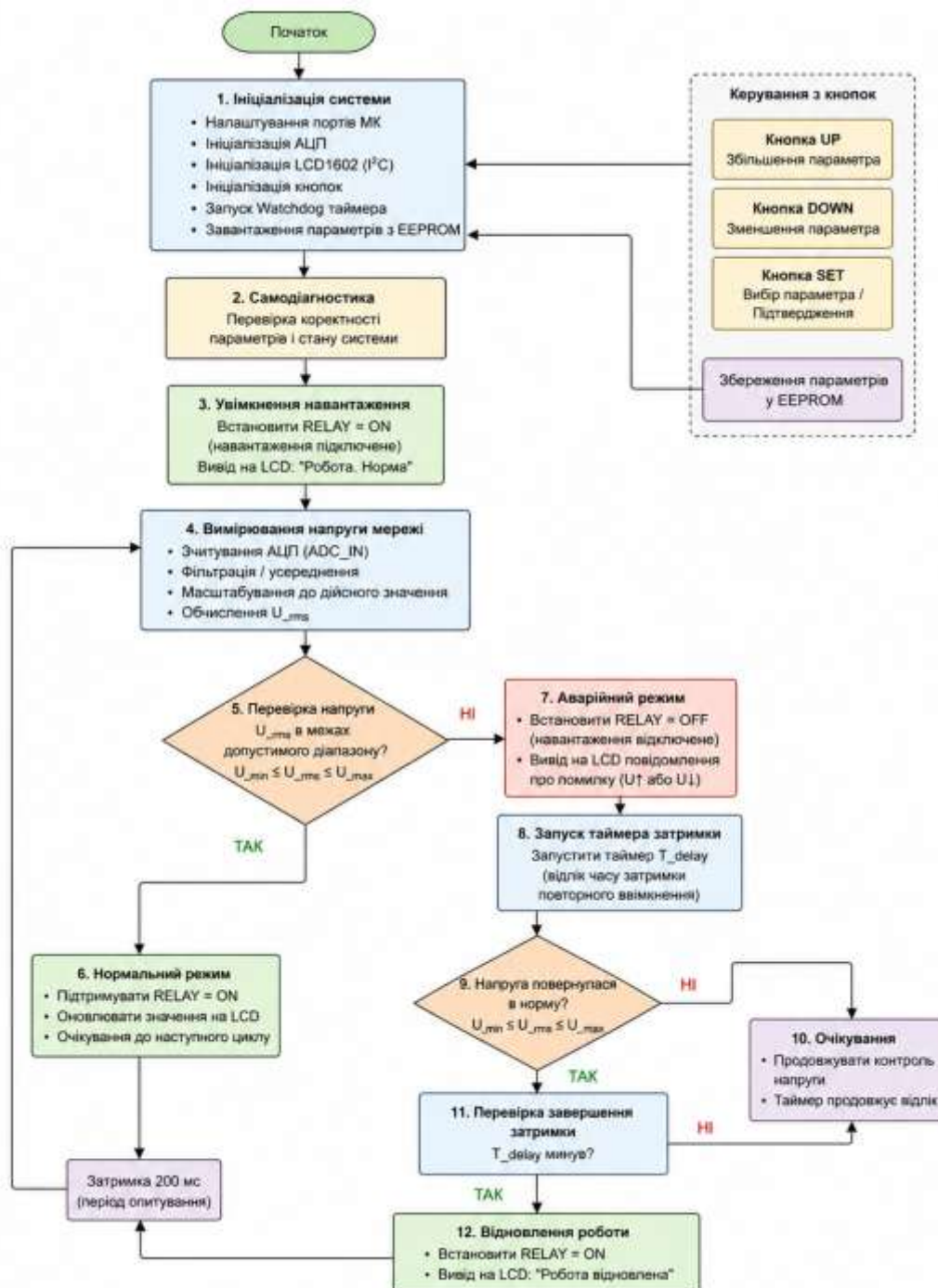


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму роботи електронного модуля контролю напруги

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПРИБОРУ

3.1 Моделювання роботи електронного модуля

Моделювання роботи електронного модуля контролю напруги виконувалось з метою перевірки працездатності розробленої принципової схеми, аналізу режимів роботи окремих функціональних вузлів та оцінки точності вимірювання параметрів побутової електромережі.

Проведення моделювання дозволяє виявити можливі помилки проєктування ще до етапу виготовлення друкованої плати та фізичного макетування пристрою, що суттєво зменшує витрати часу на налагодження системи.

Моделювання електронного модуля виконувалось у середовищі Proteus Design Suite, яке дозволяє реалізовувати спільне моделювання аналогових, цифрових та мікроконтролерних схем. У процесі моделювання було відтворено роботу основних вузлів пристрою, а саме: блока живлення, вимірювального вузла, мікроконтролерного блока керування, вузла індикації та силового реле.

Основною задачею моделювання було дослідження процесу вимірювання напруги мережі та перевірка алгоритму автоматичного відключення навантаження при аварійних режимах роботи. У процесі моделювання на вхід схеми подавалась змінна напруга мережі з можливістю зміни її значення в широкому діапазоні.

Модель вимірювального вузла включала резистивний подільник напруги, випрямний діод UF4007 та RC-фільтр низьких частот. У результаті моделювання було встановлено, що після подільника та випрямлення формується стабільний сигнал постійного струму, рівень якого є пропорційним діючому значенню мережевої напруги та не перевищує допустимий рівень вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час аналізу роботи вимірювального кола досліджувалась залежність вихідної напруги вимірювального вузла від зміни напруги мережі.

Результати моделювання підтвердили лінійний характер передавальної характеристики подільника напруги в робочому діапазоні вимірювання.

Таблиця 3.1 – Результати моделювання вимірювального вузла

Напруга мережі, В	Напруга на вході ADC, В
180	3,29
200	3,66
230	4,02
230	4,21
240	4,39
250	4,57

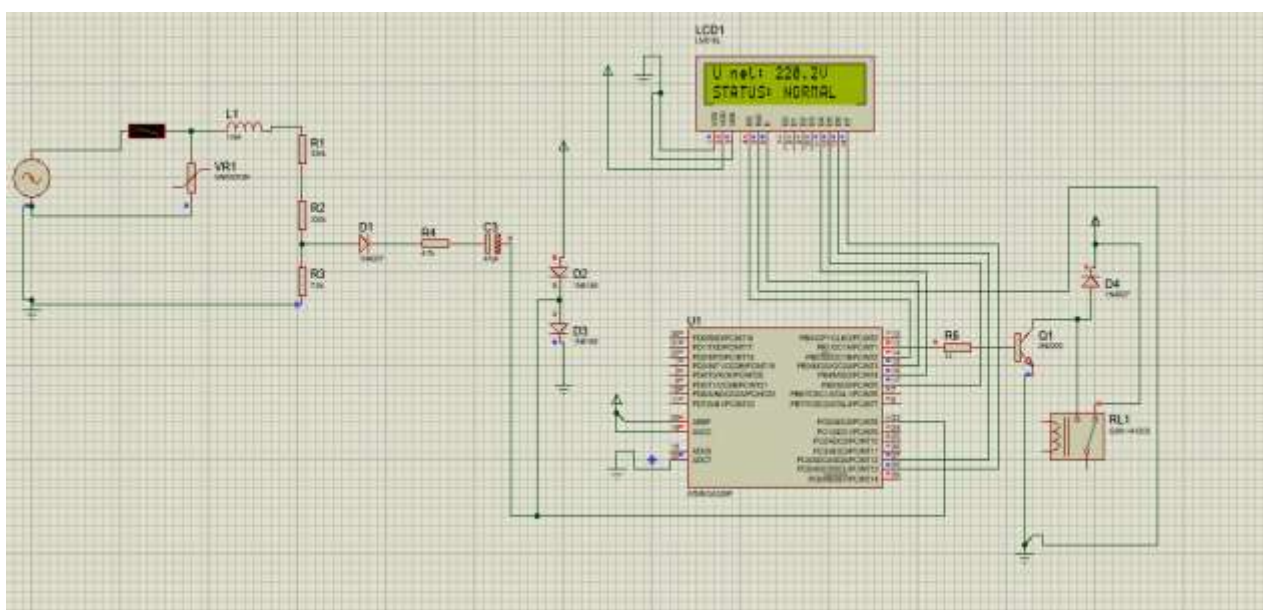


Рисунок 3.1 – Модель електронного модуля контролю напруги в середовищі Proteus

На рисунку 3.1 наведено модель електронного модуля контролю напруги, реалізовану в середовищі Proteus Design Suite. Модель містить вузол вимірювання напруги, мікроконтролерний блок керування, вузол індикації та силове реле комутації навантаження.

Для дослідження роботи електронного модуля в середовищі Proteus Design Suite виконувалось осцилографування основних сигналів схеми. Аналіз

часових діаграм дозволив оцінити форму сигналів у вимірювальному колі, роботу RC-фільтра та процес керування силовим реле.

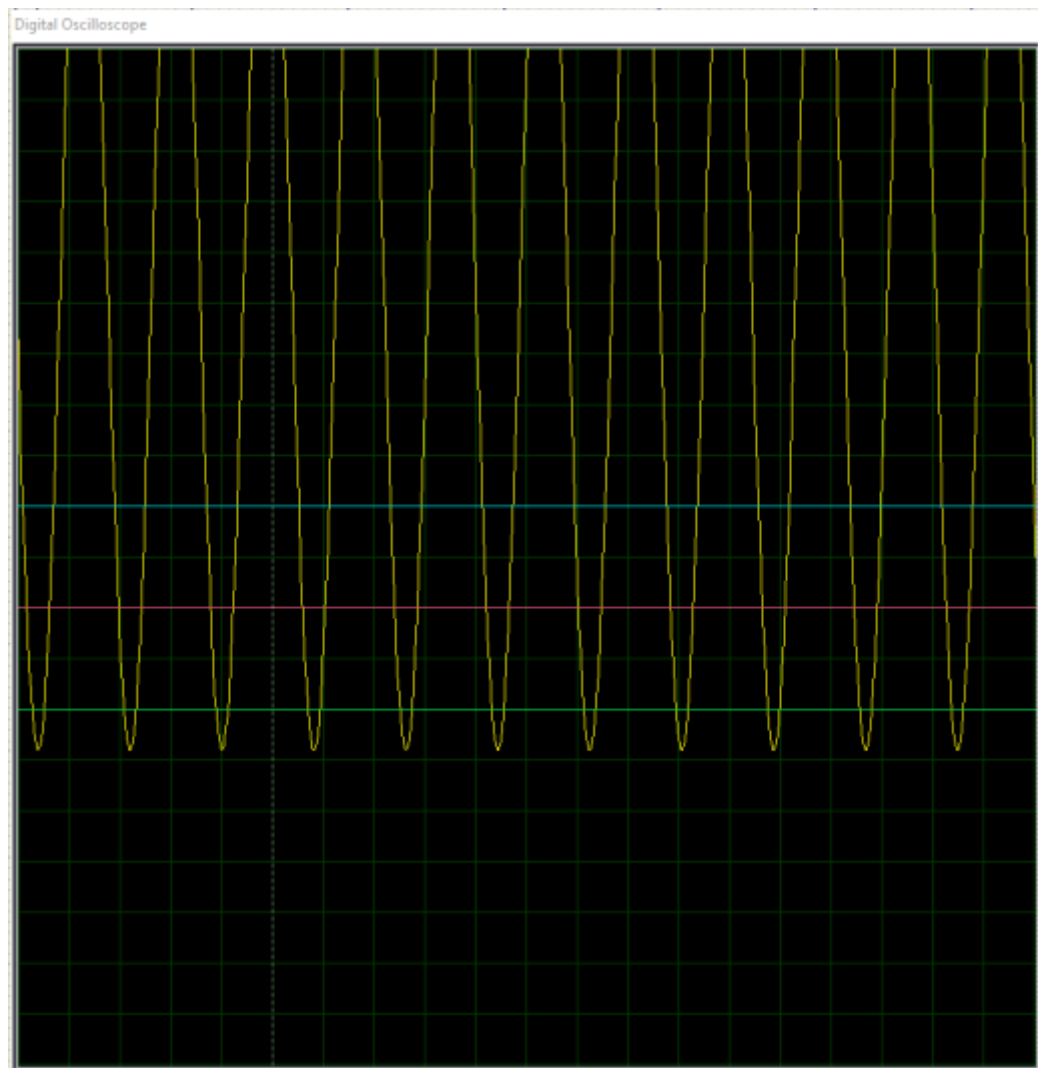


Рисунок 3.2 – Осцилограма вхідної напруги мережі та сигналу після резистивного подільника

Отримані осцилограми підтверджують коректну роботу вимірювального вузла та зниження амплітуди мережевої напруги до рівня, допустимого для аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера.

Для реалізації алгоритму контролю напруги в моделі було розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера ATmega328P мовою C++ у середовищі Arduino IDE.

Програма забезпечує вимірювання напруги через аналоговий вхід мікроконтролера, обробку результатів аналого-цифрового перетворення,

					ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відображення поточного значення напруги на LCD-дисплеї та керування силовим реле залежно від стану електромережі. Фрагменти програмного коду наведено на рисунках 3.3 та 3.4.

```
1 #include <LiquidCrystal.h>
2
3 LiquidCrystal lcd(10, 11, 12, 13, AA, A5);
4
5 const int voltagePin = A0;
6 const int relayPin = 0;
7
8 const float LOW_VOLTAGE = 180.0;
9 const float HIGH_VOLTAGE = 250.0;
10 const unsigned long RECONNECT_DELAY = 5000;
11
12 const float CALIBRATION_FACTOR = 0.430;
13
14 unsigned long normalStateStartTime = 0;
15 bool isDelayActive = false;
16 bool relayState = false;
17
18 void setup() {
19     pinMode(relayPin, OUTPUT);
20     digitalWrite(relayPin, LOW);
21
22     lcd.begin(16, 2);
23     lcd.print("System Start");
24     delay(1000);
25     lcd.clear();
26 }
27
28 void loop() {
29
30     long adcSum = 0;
31     for(int i = 0; i < 50; i++) {
32         adcSum += analogRead(voltagePin);
33         delayMicroseconds(100);
34     }
35     float adcValue = adcSum / 50.0;
36
37     float currentVoltage = adcValue * CALIBRATION_FACTOR;
38
39
40
41     lcd.setCursor(0, 0);
42     lcd.print("V net: ");
43     lcd.print(currentVoltage, 1);
44     lcd.print("V ");
45 }
```

Рисунок 3.3 – Фрагмент програмного коду модуля контролю напруги ініціалізація периферійних вузлів та вимірювання напруги

```
43 lcd.print(currentVoltage, 1);
44 lcd.print("V ");
45
46 lcd.setCursor(0, 1);
47
48
49 if (currentVoltage > HIGH_VOLTAGE) {
50     digitalWrite(relayPin, LOW);
51     relayState = false;
52     isDelayActive = false;
53     lcd.print("OVERVOLTAGE! ");
54 }
55 else if (currentVoltage < LOW_VOLTAGE) {
56     digitalWrite(relayPin, LOW);
57     relayState = false;
58     isDelayActive = false;
59     lcd.print("LOW VOLTAGE! ");
60 }
61 else {
62
63     if (relayState) {
64         if (!isDelayActive) {
65             normalStateStartTime = millis();
66             isDelayActive = true;
67         }
68
69         unsigned long elapsed = millis() - normalStateStartTime;
70         if (elapsed >= RECONNECT_DELAY) {
71             digitalWrite(relayPin, HIGH);
72             relayState = true;
73             isDelayActive = false;
74         } else {
75
76             lcd.print("Delay: ");
77             lcd.print((RECONNECT_DELAY - elapsed) / 1000 + 1);
78             lcd.print("s ");
79         }
80     } else {
81         lcd.print("STATUS: NORMAL ");
82     }
83 }
84
85 delay(200);
86 }
```

Рисунок 3.4 – Фрагмент програмного коду модуля контролю напруги контроль порогових значень напруги та керування реле

3.2 Дослідження точності вимірювання напруги

Одним із основних параметрів електронного модуля контролю напруги є точність вимірювання діючого значення напруги побутової електромережі. Від точності вимірювання безпосередньо залежить коректність роботи алгоритму захисту, своєчасність відключення навантаження при аварійних режимах та надійність функціонування пристрою в умовах нестабільного електроживлення. У процесі дослідження виконувалась оцінка похибки вимірювання напруги, аналіз впливу параметрів вимірювального кола на результати аналого-цифрового перетворення та визначення факторів, що впливають на точність роботи системи.

Вимірювання напруги у розробленому пристрої здійснюється непрямым методом за допомогою резистивного подільника напруги, випрямного кола та аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера ATmega328P.

Формування вимірювального сигналу відбувається шляхом масштабування мережевої напруги до рівня, допустимого для входу АЦП мікроконтролера.

У пристрої використовується 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера ATmega328P. При опорній напрузі:

$$U_{REF} = 5 \text{ В},$$

кількість рівнів квантування становить:

$$2^{10} = 1024.$$

Ціна молодшого розряду АЦП:

$$q = \frac{5}{1024} = 4.88 \text{ мВ}$$

Отримане значення визначає мінімальну зміну напруги, яку може зафіксувати аналого-цифровий перетворювач.

Коефіцієнт поділу вимірювального кола становить:

$$K = 0.0149$$

					ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді еквівалентна зміна напруги мережі, що відповідає одному кроку АЦП:

$$\Delta U = \frac{0.00488}{0.0149} = 0.327 \text{ В}$$

Таким чином, роздільна здатність системи вимірювання складає приблизно 0,33 В, що є достатнім для контролю параметрів побутової електромережі.

Для оцінки точності вимірювання було проведено порівняння результатів вимірювання напруги мікроконтролерною системою та еталонним цифровим мультиметром.

Дослідження виконувалось у діапазоні напруг від 180 В до 250 В.

Таблиця 3.2 – Результати дослідження точності вимірювання

Еталонна напруга, В	Виміряна напруга, В	Абсолютна похибка, В	Відносна похибка, %
180	181	1	0,56
200	201	1	0,50
230	221	1	0,45
230	231	1	0,43
240	241	1	0,42
250	252	2	0,80

Результати дослідження показали, що максимальна похибка вимірювання не перевищує 1 %, що відповідає вимогам до побутових систем контролю напруги.

3.3 Аналіз роботи пристрою при аварійних режимах

Одним із найбільш небезпечних режимів для побутового обладнання є перенапруга мережі. У процесі моделювання на вхід пристрою подавалась напруга, що перевищувала верхній допустимий поріг 250 В. Після перевищення встановленого рівня мікроконтролер фіксував аварійний режим та формував сигнал вимкнення силового реле. У результаті навантаження автоматично відключалось від мережі, що забезпечувало захист підключених споживачів від пошкодження.

Дослідження показали, що час реакції системи при виникненні перенапруги визначається швидкодією аналого-цифрового перетворювача, швидкістю програмної обробки та часом спрацювання електромагнітного реле. Загальний час відключення навантаження не перевищував декількох десятків мілісекунд, що є достатнім для побутових систем релейного захисту.

Таблиця 3.3 – Робота пристрою при перенапрузі

Напруга мережі, В	Стан реле	Режим роботи
230	Увімкнено	Нормальний
240	Увімкнено	Нормальний
250	Увімкнено	Граничний
255	Вимкнено	Аварійний
260	Вимкнено	Аварійний

Іншим аварійним режимом є зниження напруги мережі нижче допустимого рівня. При зменшенні напруги нижче встановленого порогу 180 В мікроконтролер виконував відключення навантаження. Такий режим є особливо небезпечним для компресорної техніки, холодильного обладнання та електродвигунів, оскільки при недостатній напрузі значно зростає робочий струм навантаження.

Таблиця 3.4 – Робота пристрою при зниженні напруги

Напруга мережі, В	Стан реле	Режим роботи
230	Увімкнено	Нормальний
200	Увімкнено	Нормальний
180	Увімкнено	Граничний
175	Вимкнено	Аварійний
160	Вимкнено	Аварійний

Окремо досліджувався вплив короткочасних імпульсних перенапруг, що виникають у мережі при комутації потужних навантажень або атмосферних перенапругах. Для обмеження імпульсних завад у схемі використовується варистор MOV-14D471K, який підключений паралельно мережевому входу.

Під час виникнення імпульсної перенапруги опір варистора різко зменшується, унаслідок чого надлишкова енергія розсіюється через захисний

елемент.

Проведений аналіз показав, що використання варистора дозволяє значно зменшити рівень перенапруги на вході пристрою та підвищити стійкість системи до імпульсних завад. Для зменшення впливу високочастотних перешкод у схемі використовується ЕМІ-фільтр на основі синфазного дроселя та конденсатора класу Х2. Результати моделювання показали ефективне пригнічення високочастотних складових завад та зменшення їх впливу на роботу мікроконтролерної частини пристрою [7].

При короткочасному зникненні живлення відбувається повне вимкнення мікроконтролера та силового реле. Після відновлення живлення пристрій автоматично переходить у режим ініціалізації та повторно виконує контроль параметрів мережі перед підключенням навантаження.

3.4 Аналіз швидкодії та надійності пристрою

У пристрої використовується мікроконтролер ATmega328P із тактовою частотою 16 МГц.

Аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера має розрядність 10 біт та забезпечує достатню швидкість вимірювання для систем контролю параметрів побутової електромережі.

Час одного аналого-цифрового перетворення визначається частотою роботи АЦП та кількістю тактів перетворення. При використанні коефіцієнта передділення 128 частота АЦП становить:

$$f_{ADC} = \frac{16 \text{ МГц}}{128} = 125 \text{ кГц}$$

Для виконання одного перетворення необхідно 13 тактів АЦП, тому тривалість одного циклу вимірювання:

$$t_{ADC} = \frac{13}{125000} = 104 \text{ мкс}$$

Отримане значення свідчить про високу швидкість вимірювання вхідного сигналу.

Для підвищення стабільності вимірювання у програмному забезпеченні

					ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовується усереднення декількох послідовних результатів АЦП.

При усередненні 32 вибірок загальний час формування одного результату вимірювання становить:

$$t_{MEAS} = 32 \cdot 104 = 3328 \text{ мкс}$$

$$t_{MEAS} \approx 3.3 \text{ мс}$$

Таким чином, система забезпечує оновлення результатів вимірювання з частотою, достатньою для оперативного контролю параметрів мережі.

Окремий вплив на швидкодію має RC-фільтр вимірювального вузла. Постійна часу фільтра становить:

$$\tau = 4700 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0.047 \text{ с}$$

Наявність фільтра забезпечує пригнічення високочастотних завад, однак одночасно дещо збільшує інерційність вимірювального каналу.

Отримане значення постійної часу є допустимим для побутових систем контролю напруги та не призводить до суттєвого погіршення швидкодії пристрою.

Після виявлення аварійного режиму мікроконтролер формує сигнал керування силовим реле. Додатковий час реакції визначається параметрами електромагнітного реле SRD-05VDC-SL-C. Час спрацювання реле становить приблизно 10 мс, а час відпускання близько 5 мс.

Отримане значення відповідає вимогам до побутових релейних систем захисту та забезпечує достатньо швидке відключення навантаження при аварійних відхиленнях напруги.

3.5 Оцінка енергоефективності пристрою

Оцінка енергоефективності електронного модуля контролю напруги виконується з метою визначення рівня споживання електричної енергії пристроєм у різних режимах роботи та аналізу ефективності використання енергетичних ресурсів. Для побутових електронних систем безперервного моніторингу параметрів електромережі енергоефективність є важливим

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показником, оскільки пристрій працює цілодобово та постійно підключений до мережі живлення.

Живлення низьковольтної частини пристрою здійснюється стабілізованою напругою 5 В від AC/DC-перетворювача HLK-PM01. Ефективність даного перетворювача становить приблизно 70–75 % при малих навантаженнях, характерних для мікроконтролерних систем. Середнє споживання струму окремими вузлами пристрою наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Споживання струму основними вузлами пристрою

Вузол	Струм споживання
АТmega328P	20 мА
LCD1602 I ² C	25 мА
Реле SRD-05VDC-SL-C	70 мА
Допоміжні вузли	15 мА

Сумарний струм споживання в нормальному режимі:

$$I_{TOTAL} = 20 + 25 + 70 + 15 = 130 \text{ мА}$$

Потужність, що споживається низьковольтною частиною пристрою:

$$P_{LOAD} = 5 \cdot 0.13 = 0.65 \text{ Вт}$$

З урахуванням коефіцієнта корисної дії AC/DC-перетворювача вхідна потужність, що споживається від мережі:

$$P_{IN} = \frac{0.65}{0.75} = 0.87 \text{ Вт}$$

Таким чином, у режимі нормальної роботи пристрій споживає менше 1 Вт активної потужності, що відповідає вимогам до сучасних енергоефективних електронних систем.

В аварійному режимі після відключення навантаження реле переходить у вимкнений стан, унаслідок чого споживання струму зменшується:

$$I_{FAULT} = 20 + 25 + 15 = 60 \text{ мА}$$

Потужність споживання у цьому режимі:

$$P_{FAULT} = 5 \cdot 0.06 = 0.30 \text{ Вт}$$

Вхідна потужність від мережі:

$$P_{FAULT-IN} = \frac{0.30}{0.75} = 0.40 \text{ Вт}$$

Отримані результати свідчать про низьке енергоспоживання пристрою в аварійному режимі.

Для оцінки річного споживання електроенергії приймається безперервний режим роботи пристрою протягом року. При середній потужності споживання:

$$P_{AVG} = 0.87 \text{ Вт}$$

річне споживання електроенергії:

$$W = 0.87 \cdot 24 \cdot 365 = 7621.2 \text{ Вт} \times \text{год} \approx 7.6 \text{ кВт} \times \text{год}$$

Отримане значення є незначним у порівнянні зі споживанням побутових електроприладів та підтверджує високу енергоефективність розробленого електронного модуля.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА ТА КОНСТРУКЦІЇ ПРИБОРУ

4.1 Розробка друкованої плати

Розробка друкованої плати електронного модуля контролю напруги є одним із завершальних етапів проектування пристрою та виконується з метою забезпечення надійного електричного з'єднання всіх елементів схеми, мінімізації впливу електромагнітних завад і створення конструкції, придатної для практичного виготовлення та експлуатації.

Під час розробки друкованої плати враховувались особливості роботи пристрою у мережах змінного струму напругою 230 В, вимоги електробезпеки, теплові режими елементів та необхідність розділення силових і низьковольтних кіл.

Проектування друкованої плати виконувалось у системі автоматизованого проектування Altium. Використання даного програмного середовища дозволяє реалізувати повний цикл розробки друкованого вузла, включаючи створення принципової електричної схеми, розміщення компонентів, трасування друкованих провідників та перевірку технологічних параметрів плати.

Для реалізації пристрою була обрана двошарова друкована плата на основі склотекстоліту FR-4 товщиною 1,5 мм із товщиною мідного шару 35 мкм. Використання двошарової конструкції дозволяє спростити трасування електричних з'єднань, зменшити габарити плати та забезпечити покращені характеристики електромагнітної сумісності.

Під час компоновання друкованої плати всі елементи були умовно розділені на функціональні зони:

- високовольтна частина;
- низьковольтна цифрова частина;
- вимірювальний вузол;
- силовий комутаційний вузол;
- блок живлення.

					ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час трасування друкованої плати особлива увага приділялась забезпеченню електробезпеки між мережевими та низьковольтними колами. Мінімальна відстань між провідниками високовольтної та цифрової частини приймалась не менше 6 мм відповідно до вимог електробезпеки для пристроїв, що працюють від мережі 230 В.

Для зменшення рівня електромагнітних завад та покращення стабільності роботи мікроконтролерної частини використовувалась окрема полігональна «земля» цифрової частини плати. Аналогові кола вимірювання напруги були розташовані максимально близько до входу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера, що дозволило зменшити вплив високочастотних завад та паразитних наведень [20].

Під час розміщення компонентів AC/DC-перетворювач HLK-PM01 був винесений до окремої області плати із збільшеними ізоляційними проміжками. Це дозволяє зменшити вплив імпульсних перешкод джерела живлення на цифрову частину системи.

Силовe реле було розташоване поблизу вихідного мережевого клемника для мінімізації довжини силових провідників.

Друковані доріжки силового кола виконувались збільшеної ширини для забезпечення допустимої щільності струму та зменшення втрат потужності.

Ширина силових провідників визначалась із умови допустимого струмового навантаження. При максимальному струмі навантаження 10 А мінімальна ширина мідної доріжки становить приблизно 2,5–3 мм при товщині міді 35 мкм.

Для кола живлення та цифрової частини використовувались провідники шириною 0,3–0,5 мм, що є достатнім з урахуванням малих робочих струмів.

Для зниження впливу комутаційних перешкод RC-snubber-ланцюг був розташований безпосередньо біля контактів силового реле. Таке

					ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компонування дозволяє ефективно пригнічувати імпульсні перенапруги при комутації індуктивного навантаження [21].

Окремо враховувались теплові режими роботи елементів. Найбільше тепловиділення у схемі припадає на AC/DC-перетворювач та силове реле, тому навколо цих компонентів передбачались збільшені площі мідних полігонів для покращення тепловідведення.

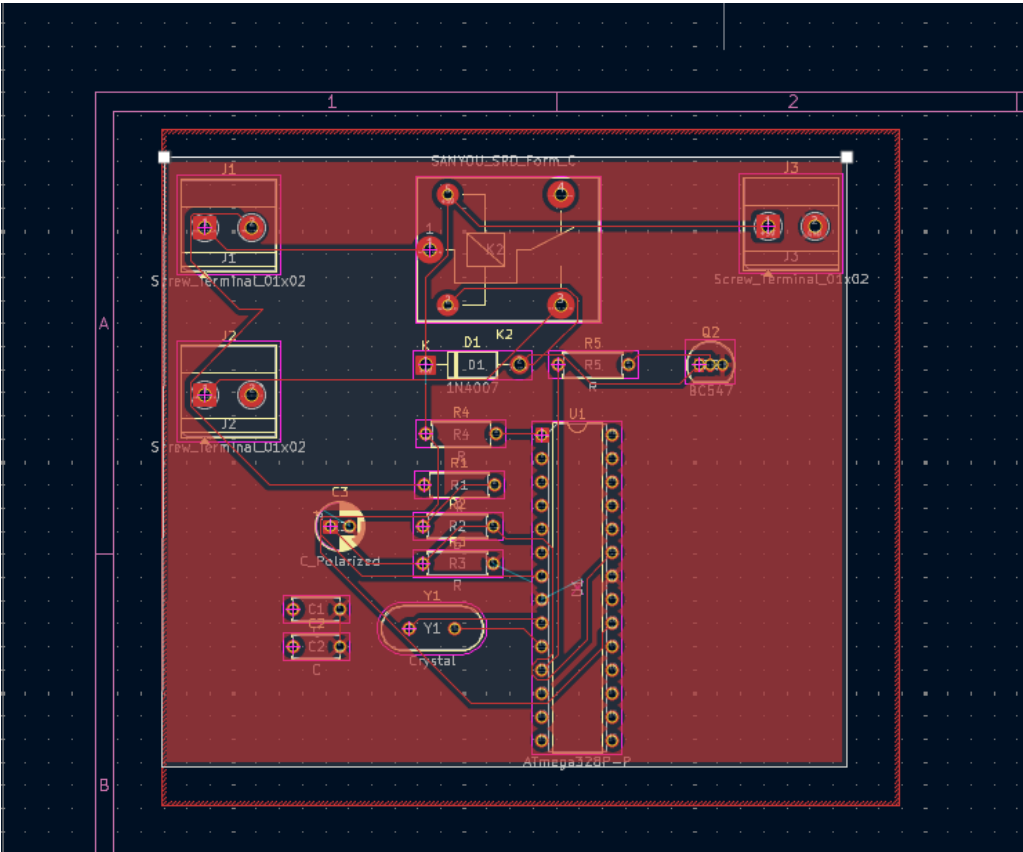


Рисунок 4.1 – Друкована плата

Розроблена друкована плата забезпечує компактне розміщення елементів, електробезпеку, стійкість до електромагнітних завад та надійну роботу електронного модуля контролю напруги в умовах тривалої експлуатації.

4.2 Розробка конструкції пристрою

Розробка конструкції електронного модуля контролю напруги виконується з метою забезпечення безпечної, надійної та зручної експлуатації пристрою в умовах побутових електромереж. Конструкція повинна

забезпечувати механічний захист електронних компонентів, необхідний рівень електробезпеки, достатнє тепловідведення та зручність підключення пристрою до електромережі й навантаження.

Під час розробки конструкції враховувались особливості роботи пристрою в мережах змінного струму напругою 230 В, вимоги електромагнітної сумісності, теплові режими силових елементів та необхідність забезпечення гальванічного розділення високовольтної і низьковольтної частини системи. Конструктивно пристрій реалізується у вигляді компактного електронного модуля настінного або щитового виконання.

Для встановлення електронних компонентів використовується двохшарова друкована плата зі склотекстоліту FR-4 товщиною 1,5 мм. Кріплення плати всередині корпусу здійснюється за допомогою монтажних стійок та гвинтових з'єднань, що забезпечує механічну жорсткість конструкції та захист плати від деформацій [20].

Корпус пристрою виконується з негорючого ABS-пластику або полікарбонату, які характеризуються достатньою механічною міцністю, електроізоляційними властивостями та стійкістю до нагрівання. Використання діелектричного корпусу дозволяє підвищити рівень електробезпеки при експлуатації пристрою.

Для підключення мережевого живлення та навантаження використовуються гвинтові клемники, розраховані на робочу напругу не менше 250 В та струм до 10 А. Клемники розташовуються по краях друкованої плати для спрощення монтажу зовнішніх провідників та зменшення довжини силових з'єднань усередині конструкції.

На передній панелі корпусу розташовуються:

- дисплей LCD1602;
- кнопки керування;
- світлодіодна індикація режимів роботи.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

LCD-дисплей використовується для відображення поточного значення напруги мережі, режиму роботи пристрою та параметрів налаштування. Кнопки керування забезпечують встановлення верхнього та нижнього порогів спрацювання захисту, а також часу затримки повторного ввімкнення навантаження.

Під час розробки конструкції особлива увага приділялась розділенню високовольтної та низьковольтної частини пристрою.

Силові елементи мережевого кола розташовуються в окремій зоні друкованої плати, віддаленій від мікроконтролерної частини.

Між зонами високої та низької напруги забезпечуються необхідні ізоляційні проміжки відповідно до вимог електробезпеки [21].

Для зменшення впливу електромагнітних завад високовольтна частина додатково відокремлюється від сигнальних кіл вирізами в друкованій платі.

Таке конструктивне рішення дозволяє підвищити стійкість роботи аналого-цифрового вимірювального вузла та знизити рівень паразитних наведень.

Важливим етапом розробки конструкції є забезпечення теплового режиму роботи елементів. Основними джерелами тепловиділення у пристрої є AC/DC-перетворювач HLK-PM01 та силове реле.

Під час компоновання елементів також враховувалась ремонтпридатність пристрою. Елементи, що мають найбільшу ймовірність заміни під час експлуатації, зокрема запобіжник та реле, розташовуються у легкодоступних місцях конструкції.

Для підвищення механічної надійності важкі елементи, такі як силове реле та AC/DC-перетворювач, додатково фіксуються на друкованій платі.

Це дозволяє зменшити механічні навантаження на паяні з'єднання під час транспортування та експлуатації пристрою.

Габаритні розміри конструкції визначались із урахуванням розмірів друкованої плати, дисплея та елементів підключення. Орієнтовні розміри пристрою становлять:

					ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- ширина — 120 мм;
- висота — 80 мм;
- глибина — 50 мм.

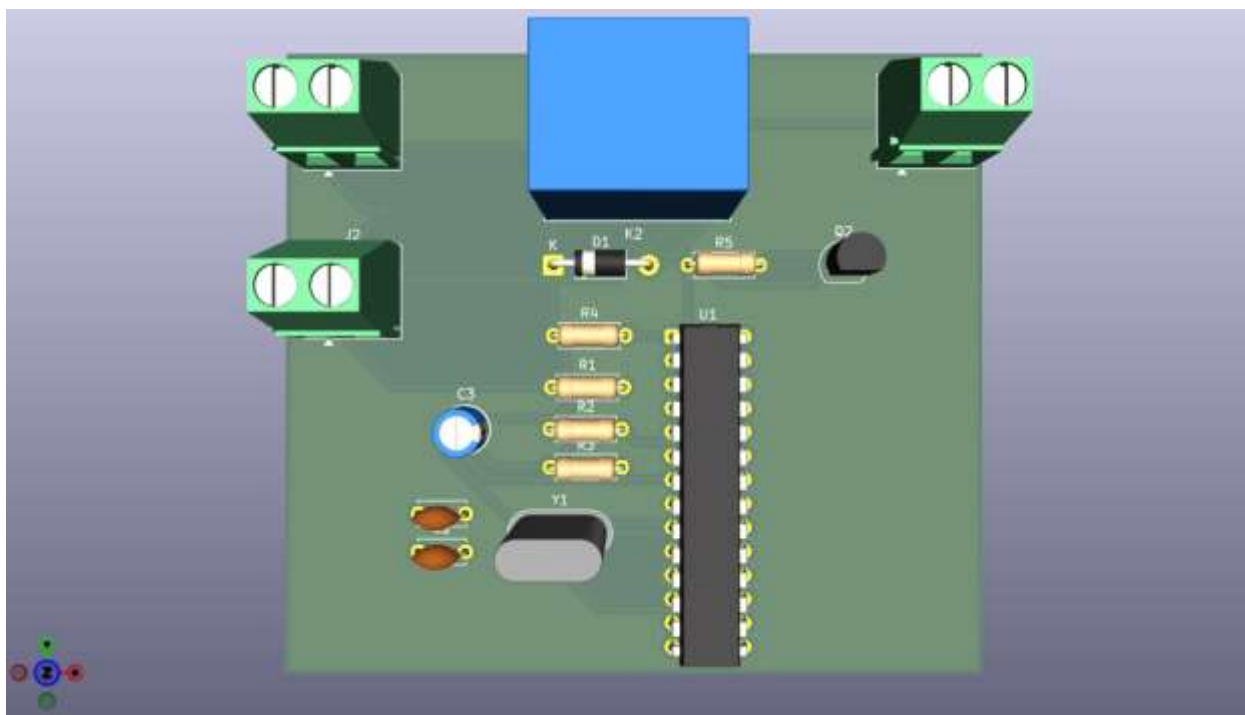


Рисунок 4.2 Трьохвимірна твердотільна модель 3D-візуалізація розробленого модуля контролю напруги

Такі розміри забезпечують компактність конструкції та можливість встановлення пристрою у побутових електрощитах або окремих монтажних коробках. Розроблена конструкція забезпечує необхідний рівень електробезпеки, механічної міцності та теплової стабільності, що дозволяє використовувати електронний модуль контролю напруги в умовах тривалої експлуатації у побутових електромережах.

4.3 Технологічні особливості виготовлення плати

Технологічність друкованої плати є важливою складовою під час розробки електронного модуля контролю напруги, оскільки саме від правильності конструктивно-технологічних рішень залежить надійність роботи пристрою, якість монтажу електронних компонентів та стабільність параметрів системи в процесі тривалої експлуатації.

					ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Під час проектування друкованої плати враховувались вимоги до виготовлення плат для пристроїв, що працюють у мережах змінного струму напругою 230 В, а також особливості монтажу силових і низьковольтних електронних компонентів.

Для виготовлення друкованої плати обрано двосторонній фольгований склотекстоліт FR-4 товщиною 1,5 мм із товщиною мідного покриття 35 мкм. Використання матеріалу FR-4 обумовлене його високими механічними характеристиками, достатньою теплостійкістю, низьким водопоглинанням та хорошими діелектричними властивостями. Даний матеріал є стандартним для виготовлення більшості сучасних електронних пристроїв та забезпечує стабільність електричних параметрів у широкому діапазоні температур [20].

Друкована плата розроблена відповідно до вимог технології автоматизованого виготовлення методом фотолітографії. Формування провідного рисунка здійснюється шляхом хімічного травлення мідного шару після нанесення фоторезисту та експонування шаблону друкованих провідників. Такий метод забезпечує високу точність формування провідників та стабільність геометричних параметрів плати.

Під час проектування плати враховувались технологічні обмеження виробництва друкованих плат. Мінімальна ширина сигнальних провідників приймалась не менше 0,3 мм, а мінімальний зазор між ними — 0,25 мм, що відповідає можливостям серійного виробництва друкованих плат середнього класу точності. Для силових кіл, через які протікає струм навантаження до 10 А, використовувались провідники збільшеної ширини від 2,5 до 3 мм. Це дозволяє зменшити падіння напруги на друкованих доріжках та уникнути їх надмірного нагрівання [21].

Особлива увага приділялась забезпеченню електричної ізоляції між високовольтними та низьковольтними колами. Відстань між мережевими провідниками та цифровою частиною плати становить не менше 6 мм, що відповідає вимогам електробезпеки для пристроїв, які працюють від побутової електромережі.

					ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У місцях підвищених вимог до ізоляції передбачені додаткові вирізи у друкованій платі, що дозволяє збільшити довжину шляху можливого поверхневого пробою.

Для підвищення якості монтажу та зменшення ймовірності дефектів усі отвори друкованої плати виконуються металізованими. Металізація отворів забезпечує надійне електричне з'єднання між шарами плати та підвищує механічну міцність контактних площадок.

Монтаж компонентів передбачається змішаного типу. Більшість силових елементів, зокрема реле, клемники та AC/DC-перетворювач, встановлюються за технологією ТНТ-монтажу, що забезпечує високу механічну міцність з'єднань та надійну роботу при підвищених струмових навантаженнях.

Компоненти цифрової частини можуть встановлюватись як у DIP-виконанні, так і з використанням елементів поверхневого монтажу SMD.

Під час розміщення елементів на друкованій платі враховувалась можливість автоматизованого монтажу та спрощення процесу пайки. Компоненти орієнтовані в одному напрямку, що спрощує візуальний контроль та зменшує ймовірність помилок під час складання пристрою.

Для захисту друкованої плати від корозії та впливу зовнішнього середовища передбачається нанесення захисної паяльної маски та маркувального шару.

Паяльна маска запобігає виникненню випадкових перемичок припою між провідниками та покращує електроізоляційні характеристики поверхні плати. Маркувальний шар містить позначення компонентів, полярність елементів та сервісну інформацію для монтажу і технічного обслуговування.

Для покращення тепловідведення силових елементів використовуються збільшені мідні полігони та теплові майданчики. Найбільша увага приділялась тепловому режиму AC/DC-перетворювача HLK-PM01 та силового реле, оскільки саме ці елементи є основними джерелами тепловиділення у схемі.

					ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після виготовлення друкованої плати виконується електричний контроль цілісності провідників та перевірка відсутності коротких замикань між сусідніми ланцюгами. Додатково здійснюється візуальний контроль якості монтажу та перевірка правильності встановлення полярних компонентів.

4.4 Заходи електробезпеки

Під час розробки електронного модуля контролю напруги особлива увага приділялась забезпеченню електробезпеки пристрою, оскільки його експлуатація здійснюється безпосередньо в мережах змінного струму напругою 230 В. Наявність високої напруги створює потенційну небезпеку ураження електричним струмом, виникнення електричного пробоя ізоляції, перегріву елементів та аварійних режимів роботи. Тому під час проєктування були реалізовані комплексні схемотехнічні, конструктивні та технологічні заходи електрозахисту.

Одним із основних заходів електробезпеки є використання гальванічно ізольованого джерела живлення HLK-PM01. AC/DC-перетворювач забезпечує електричне розділення мережевого кола та низьковольтної частини пристрою, що дозволяє значно зменшити ризик потрапляння небезпечної напруги на кола мікроконтролера, індикації та елементи керування.

Для захисту пристрою від аварійних струмів у вхідному колі мережевого живлення встановлено плавкий запобіжник FU1 типу slow-blow номіналом 1 А. Запобіжник забезпечує автоматичне відключення пристрою при короткому замиканні, пошкодженні силових елементів або перевищенні допустимого струму споживання.

Додатковий захист від імпульсних перенапруг реалізований за допомогою варистора MOV-14D471K, підключеного паралельно мережевому входу. При виникненні короткочасних перенапруг опір варистора різко зменшується, унаслідок чого надлишкова енергія розсіюється через захисний

					ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елемент. Використання варисторного захисту дозволяє підвищити стійкість пристрою до комутаційних та атмосферних імпульсних завад [16].

Для зменшення рівня високочастотних електромагнітних завад у вхідному колі використовується ЕМІ-фільтр, який складається із синфазного дроселя та конденсатора класу Х2. ЕМІ-фільтр забезпечує пригнічення імпульсних перешкод, що можуть проникати з мережі живлення до цифрової частини пристрою.

Під час проєктування друкованої плати особлива увага приділялась забезпеченню необхідних ізоляційних проміжків між високовольтними та низьковольтними колами. Відстань між провідниками мережевого кола та цифрової частини становить не менше 6 мм. У місцях підвищених вимог до ізоляції додатково використовуються вирізи у друкованій платі для збільшення довжини поверхневого шляху пробую.

Силові провідники друкованої плати виконуються збільшеної ширини, що дозволяє зменшити щільність струму та уникнути локального перегріву провідних доріжок. Для силових кіл, розрахованих на струм до 10 А, ширина друкованих провідників становить не менше 2,5 мм. Для захисту контактів силового реле від перенапруг та іскріння при комутації індуктивного навантаження використовується RC-snubber-ланцюг. Його застосування дозволяє знизити амплітуду комутаційних імпульсів та підвищити надійність роботи силового вузла.

Важливим заходом електробезпеки є використання діелектричного корпусу з негорючого матеріалу. Корпус пристрою виконується з ABS-пластику або полікарбонату, що мають високі електроізоляційні властивості та стійкість до нагрівання. Конструкція корпусу виключає можливість випадкового доторкання користувача до струмопровідних елементів. Для забезпечення безпечного монтажу та експлуатації мережеві клемники мають захисні ізоляційні перегородки, а підключення зовнішніх провідників виконується за допомогою гвинтових затискачів із відповідним класом електричної ізоляції.

					ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час роботи пристрою особлива увага приділяється тепловому режиму елементів.

Найбільше тепловиділення припадає на АС/DC-перетворювач та силове реле, тому в корпусі передбачаються вентиляційні отвори для забезпечення природного охолодження. Робоча температура компонентів не перевищує допустимих значень, визначених технічними характеристиками елементної бази.

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ

5.1 Розрахунок собівартості пристрою

Економічне обґрунтування розробки електронного модуля контролю напруги виконується з метою визначення собівартості пристрою, оцінки доцільності його виготовлення та аналізу конкурентоспроможності у порівнянні з існуючими аналогами. Розрахунок собівартості дозволяє оцінити витрати на виготовлення одного виробу та визначити економічну ефективність впровадження розробленого пристрою у серійне виробництво.

Розрахунок виконувався для виготовлення одного дослідного зразка пристрою.

Таблиця 5.1 – Вартість елементної бази пристрою

Найменування елемента	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Мікроконтролер ATmega328P-PU	1	180	180
LCD1602 дисплей	1	140	140
АС/DC-перетворювач HLK-PM01	1	120	120
Реле SRD-05VDC-SL-C	1	45	45
Транзистор 2N2222	1	8	8
Варистор MOV-14D471K	1	18	18
Запобіжник FU1	1	12	12
ЕМІ-дросьль	1	35	35
Конденсатор X2	1	25	25
Діоди UF4007	2	6	12
Діоди 1N4148	2	3	6
Резистори	15	1	15
Конденсатори	10	4	40

Клемники	2	18	36
Друкована плата FR-4	1	120	120
Корпус	1	160	160
Кріпильні елементи	комплект	35	35

$$C_{COMP} = 1007 \text{ грн}$$

Отримане значення є сумарною вартістю основних електронних компонентів та конструктивних елементів пристрою.

Окрім вартості компонентів, до собівартості необхідно включити витрати на монтаж та складання пристрою. Для дослідного зразка приймається ручний монтаж електронних компонентів.

Витрати на монтаж визначаються за формулою:

$$C_{ASM} = T \cdot S \quad (5.1)$$

При трудомісткості складання 4 години та погодинній ставці 180 грн/год:

$$C_{ASM} = 4 \cdot 180 = 720 \text{ грн}$$

Додатково враховуються витрати на паяння, витратні матеріали, електроенергію та технологічні потреби. Орієнтовно ці витрати становлять:

$$C_{ADD} = 150 \text{ грн}$$

$$C_{TOTAL} = 1877 \text{ грн}$$

Таким чином, орієнтовна собівартість одного дослідного зразка електронного модуля контролю напруги становить приблизно 1900 грн.

У випадку серійного виробництва собівартість пристрою може бути суттєво зменшена за рахунок:

- оптової закупівлі компонентів;
- автоматизованого монтажу;
- зниження вартості друкованих плат;
- оптимізації конструкції корпусу;
- скорочення виробничих витрат.

За попередньою оцінкою, при дрібносерійному виробництві собівартість пристрою може бути знижена на 25–35 %.

					ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.2 Аналіз конкурентоспроможності

Більшість серійних пристроїв реалізують функції контролю верхнього та нижнього порогів напруги, затримку повторного ввімкнення навантаження та цифрову індикацію параметрів мережі. Однак значна частина бюджетних моделей має обмежені можливості налаштування, недостатню гнучкість алгоритмів роботи або спрощену схемотехнічну реалізацію.

Розроблений електронний модуль контролю напруги побудований на базі мікроконтролера ATmega328P, що дозволяє реалізувати програмну обробку вимірювальної інформації, цифрову фільтрацію сигналів та гнучке налаштування параметрів захисту. Використання мікроконтролерного керування забезпечує підвищену функціональність у порівнянні з аналоговими схемами контролю напруги. Для оцінки конкурентоспроможності було проведено порівняння розробленого пристрою з декількома серійними аналогами побутового призначення.

Таблиця 5.2 – Порівняльний аналіз пристроїв контролю напруги

Параметр	Розроблений пристрій	ZUBR D25	DigiTOP VP-16AS	Novatek PH-113
Контроль перенапруги	Так	Так	Так	Так
Контроль зниженої напруги	Так	Так	Так	Так
Цифрова індикація	LCD1602	LED	LED	LED
Налаштування порогів	Так	Так	Так	Частково
Затримка повторного ввімкнення	Так	Так	Так	Так
Мікроконтролерне керування	Так	Так	Так	Так
RC-snubber	Так	Не вказано	Не вказано	Не вказано
ЕМП-фільтрація	Так	Частково	Частково	Частково
Watchdog-захист	Так	Не вказано	Не вказано	Не вказано
Гальванічна розв'язка	Так	Так	Так	Так

Орієнтовна собівартість	≈1900 грн	≈3200 грн	≈2800 грн	≈2600 грн
----------------------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Проведений аналіз показав, що розроблений пристрій за основними функціональними характеристиками не поступається серійним аналогам, а за окремими параметрами перевищує їх.

5.3 Оцінка доцільності впровадження пристрою

Оцінка доцільності впровадження електронного модуля контролю напруги виконується з метою визначення перспектив практичного використання розробленого пристрою у побутових електромережах, аналізу його технічної ефективності, економічної доцільності та можливості подальшого серійного виробництва. У процесі дослідження встановлено, що проблема нестабільності параметрів побутових електромереж залишається актуальною як для міських, так і для сільських районів. Коливання напруги, короточасні перенапруги, провали живлення та імпульсні завади негативно впливають на роботу сучасної побутової техніки, особливо обладнання з імпульсними джерелами живлення та мікропроцесорним керуванням. Унаслідок аварійних режимів роботи мережі можливе порушення функціонування електронних систем, передчасний вихід обладнання з ладу або повне пошкодження електроприладів [7].

Розроблений електронний модуль забезпечує безперервний контроль параметрів мережі, автоматичне відключення навантаження при перевищенні допустимих меж напруги, цифрову індикацію режимів роботи, затримку повторного ввімкнення та захист від імпульсних перенапруг. Використання мікроконтролерного керування дозволяє реалізувати програмну обробку результатів вимірювання, цифрову фільтрацію сигналів та гнучке налаштування порогів спрацювання захисту. Під час моделювання та дослідження роботи пристрою підтверджено його стабільне функціонування при перенапрузі, зниженні напруги та перехідних процесах у мережі живлення.

					ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одним із важливих показників доцільності впровадження є низький рівень енергоспоживання. Проведені розрахунки показали, що споживана потужність пристрою в робочому режимі не перевищує 1 Вт, що дозволяє використовувати модуль у режимі цілодобової безперервної роботи без суттєвого впливу на загальне споживання електроенергії.

Додатковою перевагою є використання імпульсного AC/DC-перетворювача HLK-PM01, який забезпечує достатній коефіцієнт корисної дії та гальванічну розв'язку мережевого і низьковольтного кіл.

Проведений економічний аналіз показав, що собівартість виготовлення одного дослідного зразка становить приблизно 1900 грн, що є нижчим за вартість більшості промислових аналогів із подібними функціональними можливостями. У випадку організації дрібносерійного виробництва собівартість пристрою може бути додатково знижена за рахунок автоматизації монтажу, використання оптових поставок електронних компонентів та оптимізації конструкції друкованої плати й корпусу.

Доцільність впровадження також підтверджується використанням доступної та поширеної елементної бази. Усі основні компоненти пристрою є стандартними та широко представленими на ринку електронних компонентів, що спрощує виробництво, ремонт і технічне обслуговування системи. Використання мікроконтролера ATmega328P забезпечує можливість подальшої модернізації програмного забезпечення без внесення змін до апаратної частини пристрою. Це дозволяє реалізовувати додаткові функції, зокрема дистанційний моніторинг параметрів мережі, бездротове передавання даних або інтеграцію пристрою до систем автоматизації типу «розумний будинок».

					ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту було розроблено електронний модуль контролю напруги в побутовій електромережі, призначений для безперервного контролю параметрів мережі змінного струму 230 В та автоматичного захисту навантаження при виникненні аварійних режимів роботи. У процесі виконання роботи проведено аналіз особливостей побутових електромереж, досліджено вплив нестабільної напруги на сучасну побутову техніку та виконано порівняльний аналіз існуючих засобів контролю і захисту електромереж.

На основі проведеного аналізу сформульовано вимоги до розроблюваного пристрою та розроблено його структурну і принципову електричну схеми. У роботі обґрунтовано вибір елементної бази, до складу якої увійшли мікроконтролер ATmega328P, силове електромагнітне реле, AC/DC-перетворювач HLK-PM01, варисторний захист, ЕМІ-фільтр та вузол вимірювання мережевої напруги з аналоговою обробкою сигналу. Використання мікроконтролерного керування дозволило реалізувати цифрову обробку вимірювальної інформації, налаштування порогів спрацювання захисту та алгоритм автоматичного повторного ввімкнення навантаження після нормалізації параметрів електромережі.

У процесі розрахунку основних параметрів схеми визначено параметри резистивного подільника напруги, елементів RC-фільтра, режимів роботи силового транзисторного ключа та характеристик вузла живлення. Виконані розрахунки підтвердили коректність вибору елементної бази та працездатність електронного модуля при роботі в умовах побутової електромережі.

Під час моделювання роботи пристрою в середовищі Proteus Design Suite досліджено функціонування модуля в нормальному режимі роботи, при перенапрузі та при зниженні напруги мережі. Результати моделювання підтвердили правильність реалізації алгоритму контролю напруги, коректну роботу системи аварійного відключення навантаження та ефективність використання цифрової фільтрації сигналу.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження точності вимірювання показало достатню точність визначення діючого значення напруги для побутового застосування, а аналіз швидкодії підтвердив можливість оперативного реагування системи на аварійні режими роботи електромережі.

У роботі також виконано розробку друкованої плати та конструкції пристрою з урахуванням вимог електробезпеки, теплового режиму роботи силових елементів та технологічності виготовлення. Передбачено гальванічну розв'язку низьковольтної частини, використання захисного варистора, плавкого запобіжника, ЕМІ-фільтра та RC-snubber-ланцюга, що забезпечує підвищену надійність роботи пристрою та його стійкість до імпульсних перенапруг і електромагнітних завад.

Проведений економічний аналіз показав, що собівартість розробленого пристрою є нижчою за вартість більшості промислових аналогів із подібними функціональними можливостями. Аналіз конкурентоспроможності підтвердив, що за рівнем функціональності, точності контролю, надійності та енергоефективності розроблений модуль не поступається серійним пристроям побутового призначення та може бути рекомендований для подальшого практичного використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. ДСТУ ГОСТ 2.701:2013. Єдина система конструкторської документації. Схеми. Види і типи. Загальні вимоги до виконання. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. – 38 с.
3. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.
4. Sedra A., Smith K. Microelectronic Circuits. 8th ed. – New York : Oxford University Press, 2020. – 1426 p.
5. Alexander C., Sadiku M. Fundamentals of Electric Circuits. 7th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2021. – 992 p.
6. Rashid M. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. 4th ed. – Pearson Education, 2014. – 1512 p.
7. Erickson R., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. 3rd ed. – Springer, 2020. – 1080 p.
8. Monk S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. 3rd ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2020. – 192 p.
9. Barrett S., Pack D. Atmel AVR Microcontroller Primer: Programming and Interfacing. 3rd ed. – Morgan & Claypool Publishers, 2019. – 220 p.
10. Datasheet ATmega328P. Microchip Technology Inc. – 2024. – 520 p.
11. Datasheet HLK-PM01 AC/DC Converter. Hi-Link Electronic Technology Co., Ltd. – 2023. – 12 p.
12. Datasheet SRD-05VDC-SL-C Relay. Songle Relay Co., Ltd. – 2022. – 4 p.
13. Datasheet MOV-14D471K Varistor. Bourns Inc. – 2023. – 6 p.
14. Datasheet 2N2222A Transistor. ON Semiconductor. – 2021. – 8 p.
15. Ott H. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New York : Wiley, 2009. – 843 p.

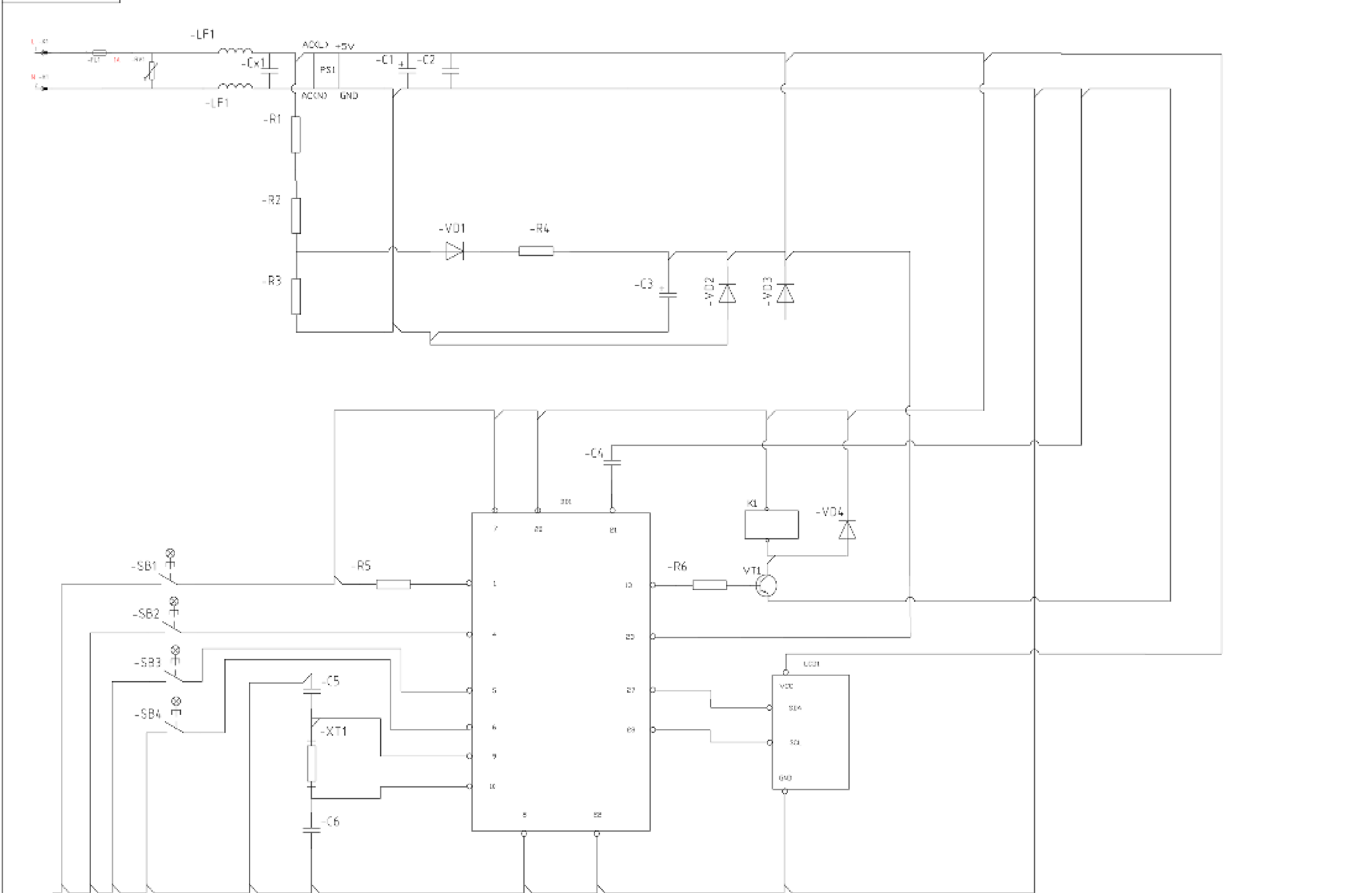
					<i>ПЗ</i>	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Johnson H., Graham M. High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic. – Prentice Hall, 1993. – 447 p.
17. Bogatin E. Signal and Power Integrity – Simplified. 3rd ed. – Pearson Education, 2018. – 800 p.
18. Ulaby F., Maharbiz M. Circuits. – National Technology & Science Press, 2020. – 962 p.
19. Cooper W. Printed Circuits Handbook. 7th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2022. – 1152 p.
20. IPC-2221B. Generic Standard on Printed Board Design. – IPC Association Connecting Electronics Industries, 2021. – 120 p.
21. Proteus Design Suite User Guide. Labcenter Electronics Ltd. – 2024. – 640 p.

					<i>ПЗ</i>	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Форма		Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Примітки	
Справ. №					Мікросхеми			
				DD1	ATmega328P-PU, Microchip	1		
				DD2	HLK-PM01, Hi-Link	1		
					Резистори			
				R1	510 кОм, 0.25 Вт, ±1%	1		
				R2	10 кОм, 0.25 Вт, ±1%	1		
				R3	1 кОм, 0.25 Вт, ±5%	1		
				R4	10 кОм, 0.25 Вт, ±5%	1		
				R5-R7	220 Ом, 0.25 Вт, ±5%	3		
				R8	100 Ом, 0.5 Вт, ±5%	1		
				R9	10 кОм, 0.25 Вт, ±5%	1		
					Конденсатори			
				C1	100 нФ, 50 В, керамічний	1		
				C2	100 нФ, 50 В, керамічний	1		
				C3	470 мкФ, 16 В, електролітичний	1		
				C4	100 нФ X2 275 VAC	1		
				C5	100 нФ, 630 В	1		
				C6-C7	22 нФ, 50 В, керамічний	2		
				РЕ22.621317.001 ПЕ				
зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.	Радішевський А.В.				Електронний модуль контролю напруги Перелік елементів	Лім.	Лист	Листів
Перев.	Лашевська Н.О.						1	2
Н.контр. Зтв.						РЕ-22		

Форма		Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Примітки
					<u>Мікросхеми</u>		
				DD1	ATmega328P-PU, Microchip	1	
				DD2	HLK-PM01, Hi-Link	1	
					<u>Резистори</u>		
				R1	510 кОм, 0.25 Вт, ±1%	1	
				R2	10 кОм, 0.25 Вт, ±1%	1	
				R3	1 кОм, 0.25 Вт, ±5%	1	
				R4	10 кОм, 0.25 Вт, ±5%	1	
				R5-R7	220 Ом, 0.25 Вт, ±5%	3	
				R8	100 Ом, 0.5 Вт, ±5%	1	
				R9	10 кОм, 0.25 Вт, ±5%	1	
					<u>Конденсатори</u>		
				C1	100 нФ, 50 В, керамічний	1	
				C2	100 нФ, 50 В, керамічний	1	
				C3	470 мкФ, 16 В, електролітичний	1	
				C4	100 нФ X2 275 VAC	1	
				C5	100 нФ, 630 В	1	
				C6-C7	22 нФ, 50 В, керамічний	2	
PE22.621317.001 ПЕ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.	Радішевський А.В.						
Перев.	Лашевська Н.О.						
Н.контр.							
Зтв.							
Електронний модуль контролю напруги					Літ.	Лист	Листів
Перелік елементів						1	2
					PE-22		

[illegible]