

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки та телекомунікацій

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»
РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОГО РЕЛЕ КОНТРОЛЮ
НАПРУГИ
DEVELOPMENT OF A MICROPROCESSOR VOLTAGE
CONTROL RELAY**

спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Електроніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ЕЛМ-21

Мельник Олександр Володимирович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент

Приступа Станіслав Олексійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

« 05 » грудня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Заблоцький Валентин Юрійович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ доц. В. Заблоцький

«15» _____ січня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мельнику Олександру Володимировичу

1. Тема кваліфікаційної роботи *Розробка мікропроцесорного реле контролю напруги*

керівник роботи: *к.т.н., доцент Приступа Станіслав Олексійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «15» січня 2025 р. № 23/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи:
05.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи *Номінальна напруга живлення $U_n = 230 \text{ В}$, 50 Гц ; межі небезпечних відхилень, що потребують відключення: мінімальна допустима напруга – $170 \dots 215 \text{ В}$, максимальна допустима напруга – $220 \dots 280 \text{ В}$; Час спрацювання (відключення) – не більше $20\text{-}40 \text{ мс}$.*

Зміст розрахунково пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Розділ 1 Проблеми якості напруги та засоби захисту електрообладнання

Розділ 2 Теоретичні аспекти функціонування реле контролю напруги

Розділ 3 Розробка та схемотехнічна реалізація пристрою контролю напруги

Розділ 4 Прикладне програмне забезпечення

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу

10 слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Роздір 1	<i>Приступа С. О.</i>		
Розділ 2	<i>Приступа С. О.</i>		
Розділ 3	<i>Приступа С. О.</i>		
Розділ 4	<i>Приступа С. О.</i>		
Нормоконтроль	<i>Селетина Й. Р.</i>		
Гарант ОП	<i>Заблоцький В. Ю.</i>		
Показник запозичень тексту	<u>23,79</u>		
Академічна доброчесність	<i>Приступа С. О.</i>		

7. Дата видачі завдання 15.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд інформаційних джерел по темі кваліфікаційної роботи	<i>до 06.09.2025 р.</i>	
2.	Розділ 1	<i>до 25.09.2025 р.</i>	
3.	Розділ 2	<i>до 2.11.2025 р.</i>	
4.	Розділ 3	<i>до 20.11.2025 р.</i>	
5.	Розділ 4	<i>до 27.11.2025 р.</i>	
6.	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	<i>до 06.11.2025 р.</i>	
7.	Нормоконтроль	<i>до 04.12.2025 р.</i>	
8.	Інструментальна перевірка на академічний плагіат	<i>до 5.12.2025 р.</i>	
9.	Представлення кваліфікаційної роботи до захисту	<i>до 30.12.2025 р.</i>	

Здобувач вищої освіти

_____ Мельник В. О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ Приступа С. О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Мельник О. В. Розробка мікропроцесорного реле контролю напруги
Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У роботі розглянуто проблему захисту електрообладнання від неякісної напруги живлення, що є однією з основних причин виходу з ладу побутових та промислових електроприймачів. Запропоновано конструкцію мікропроцесорного пристрою контролю напруги, який забезпечує автоматичне відключення навантаження у разі виходу напруги за встановлені межі та повторне підключення після нормалізації параметрів мережі.

Описано принцип роботи пристрою, побудованого на основі мікроконтролера PIC16F873, симісторного оптрона, релейної комутації та допоміжних електронних компонентів. Наведено структурну та принципову електричну схеми, виконано вибір елементної бази, проаналізовано їх технічні характеристики.

У роботі також представлено етапи комп'ютерного моделювання, розробку друкованої плати у середовищі Sprint-Layout та рекомендації щодо налагодження пристрою. Отримані результати дозволяють створити надійний, швидкодіючий та економічний засіб захисту побутової та електронної техніки від перенапруги й зниження напруги в мережі 230 В.

Ключові слова: захист, напруга, показник, реле, якість.

ANNOTATION

Melnyk O. Development of a microprocessor voltage control relay. Manuscript.

Master's Qualification Thesis, Educational Program «Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's qualification thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, and a list of references.

The work addresses the problem of protecting electrical equipment from poor-quality supply voltage, which is one of the main causes of failures in household and industrial electrical devices. A design of a microprocessor-based voltage monitoring device is proposed. The device ensures automatic disconnection of the load when the voltage goes beyond the specified limits and its reconnection after network parameters return to normal.

The principle of operation of the device built on a PIC16F873 microcontroller, a triac optocoupler, relay-based switching, and supporting electronic components is described. Structural and circuit diagrams are presented, along with the selection of the component base and analysis of the technical characteristics of the elements used.

The thesis also includes stages of computer simulation, development of a printed circuit board in the Sprint-Layout environment, and recommendations for device calibration. The obtained results make it possible to create a reliable, fast-acting, and cost-effective means of protecting household and electronic equipment from overvoltage and undervoltage in a 230 V network.

Keywords: Protection, Voltage, Parameter, Relay, Quality.

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ НАПРУГИ ТА ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	10
1.1 Способи захисту електричних мереж та обладнання від аварійних режимів і неякісної напруги	10
1.2 Вплив якості електричної енергії на роботу електроприймачів..	13
1.3 Огляд існуючих систем контролю напруги.....	22
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ.....	28
2.1 Аналіз роботи реле контролю напруги в системах електропостачання.....	28
2.2 Характеристика теоретичних положень в контексті функціонування об'єкта дослідження.....	30
2.3 Математичне моделювання процесів об'єкта дослідження.....	35
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА СХЕМОТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ.....	39
3.1 Розробка структурної схеми пристрою контролю напруги.....	39
3.2 Опис елементної бази.....	40
3.3 Електрична принципова схема пристрою.....	48
3.4 Проектування друкованої плати.....	50
РОЗДІЛ 4 ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	53
4.1 Розробка алгоритму роботи об'єкта дослідження	53
4.2 Вибір середовища програмування та створення прикладної програми.....	59
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69
ДОДАТКИ.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ДСТУ – державний стандарт України;

КЗ – коротке замикання;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ЕП – електроприймач;

ЛЕП – лінія електропередач;

МК – мікроконтролер;

ПЗ – програмне забезпечення;

ЯЕ – якість електроенергії;

BOR – brown out reset;

POR – power on reset.

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку електроенергетики та широкого впровадження електронних і мікропроцесорних систем питання якості електричної енергії набуває особливої актуальності. Побутові, комерційні та промислові електроприймачі все частіше оснащуються чутливою електронікою, яка потребує стабільних параметрів напруги живлення. Водночас реальні умови експлуатації електричних мереж характеризуються наявністю перенапруг, провалів напруги, несиметрії фаз та інших порушень, що негативно впливають на роботу електрообладнання та можуть призводити до його передчасного виходу з ладу.

Одним із ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування автоматизованих пристроїв контролю напруги, здатних у реальному часі відстежувати параметри електромережі та забезпечувати своєчасне відключення навантаження у разі виникнення аварійних ситуацій.

У зв'язку з цим актуальним є завдання розробки мікропроцесорного пристрою контролю напруги, що забезпечує надійний захист електрообладнання від перенапруги та зниження напруги в мережі 230 В. Такий пристрій має відповідати сучасним вимогам щодо точності, надійності, простоти конструкції та економічної доцільності.

Метою роботи є розробка мікропроцесорного пристрою контролю напруги для захисту електрообладнання від аварійних режимів електромережі шляхом автоматичного відключення навантаження при виході напруги за встановлені межі та забезпечення повторного підключення після нормалізації параметрів живлення.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені наступні завдання.

1. Проаналізувати причини виникнення неякісної напруги в електромережах та їх вплив на роботу побутових і промислових електроприймачів.

2. Дослідити сучасні методи і засоби захисту електрообладнання від перенапруги та зниження напруги, визначити їх переваги й обмеження.

3. Розробити структурну схему мікропроцесорного пристрою контролю напруги та визначити принцип його функціонування.

4. Виконати обґрунтований вибір елементної бази та проаналізувати їх технічні характеристики.

5. Розробити електричну принципову схему пристрою та здійснити комп'ютерне моделювання його роботи.

6. Спроекувати топологію друкованої плати із застосуванням відповідних програмних продуктів.

7. Розробити алгоритми, що забезпечить роботу пристрою контролю напруги в мережі 230В.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні принципів побудови та алгоритмів функціонування пристрою контролю напруги на основі мікроконтролера, що забезпечує підвищену точність вимірювання та надійність захисту електрообладнання від перенапруги і зниження напруги в мережі змінного струму.

Об'єкт дослідження – процеси контролю та захисту електрообладнання від відхилень напруги в електричних мережах загального призначення.

Предмет дослідження – мікропроцесорний пристрій контролю напруги, його структурні рішення, алгоритми роботи та елементна база, що забезпечують автоматичний захист електроприймачів від перенапруги й зниження напруги.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні принципів побудови та алгоритмів функціонування пристрою контролю напруги на основі мікроконтролера, що забезпечує підвищену точність вимірювання та надійність захисту електрообладнання від перенапруги і зниження напруги в мережі 230 В.

Окремі результати роботи були представлені у тезах доповіді: Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання. XIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». м. Луцьк. ІВВ ЛНТУ, 28 листопада 2025 року. С. 134-137 (додаток А).

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ НАПРУГИ ТА ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1 Способи захисту електричних мереж та обладнання від аварійних режимів і неякісної напруги

Всі споживачі електроенергії стикаються з проблемами аварій в електромережі. Обладнання, що вийшло з ладу – це тільки мала частина проблем, які можуть виникнути внаслідок цих аварій: пожеж, вибухів, техногенних катастроф, – далеко не повний перелік трагічних наслідків. За даними МНС, більше третини всіх пожеж виникають внаслідок несправності систем і приладів, що працюють на електричному струмі. Важко оцінити матеріальний збиток, навіть якщо не відбулося трагедії. Вартість згорілого обладнання часом мізерне в порівнянні з витратами, пов'язаними з зупинкою виробництва, простоем технологічних процесів, демонтажем-монтажем, ремонтом або заміною установок, що вийшли з ладу.

Електричні мережі мають бути обладнані засобами захисту від струмів короткого замикання, які забезпечують мінімальний час відключення пошкодженої ділянки та виконання вимог селективності. Окрім цього, необхідно передбачати захист від перевантажень освітлювальних мереж у житлових і громадських будівлях, торговельних та службово-побутових приміщеннях промислових підприємств, у тому числі мереж, що живлять побутові та переносні електроприймачі, а також мереж у пожежонебезпечних зонах. Силові мережі промислових об'єктів, житлових і громадських будівель та торговельних приміщень підлягають захисту від перевантажень лише в тих випадках, коли за умовами технологічного процесу або режиму роботи можливе тривале перевищення допустимих струмів у провідниках. Таким чином, під поняттям «захист електрообладнання» розуміють комплекс заходів, спрямованих на запобігання пошкодженню електроустановок унаслідок дії струмів короткого замикання та перевантажень, що можуть виникати в електричних мережах. Це пов'язано з тим, що при виникненні короткого

замикання в мережі протікають струми, які набагато перевищують допустимі і що призводять до серйозних пошкоджень. Коротких замикань (КЗ) дуже багато і всіх їх передбачити і передбачити неможливо. Однак, якщо проаналізувати причини появи КЗ в електрообладнанні, можна стверджувати, що більшість з них – наслідок неякісної напруги. Наприклад в асинхронних електродвигунах понад 80% внутрішніх пошкоджень, пов'язані безпосередньо або опосередковано, з неякісною мережевою напругою. Під неякісною напругою будемо розуміти відхилення її параметрів, від строго встановлених діючими стандартами значеннями.

До засобів які встановлюють для захисту побутового електрообладнання від неякісної напруги висуваються наступні вимоги.

Селективність (вибірковість) дії – це властивість захисного пристрою спрацьовувати лише при пошкодженнях у межах зони його відповідальності та не реагувати на зовнішні аварії або допустимі робочі режими. Інакше кажучи, селективний захист забезпечує відключення виключно пошкодженого елемента за допомогою відповідних автоматичних вимикачів, тоді як інші ділянки електроенергетичної системи залишаються в роботі.

За ознакою селективності всі захисні пристрої поділяються на два класи:

– захист з відносною селективністю, у якому вибірковість досягається шляхом відповідного налаштування параметрів спрацювання. До цього класу належать максимальні струмові та дистанційні захисти;

– захист з абсолютною селективністю, де вибірковість визначається самим принципом дії пристрою, зокрема це всі види диференціального захисту.

Чутливість – це здатність захисного пристрою реагувати на мінімальні значення аварійних параметрів. Наприклад, при виникненні пошкоджень на лініях високої напруги, що працюють за умов малих навантажень або при значних перехідних опорах у місці аварії, струми короткого замикання можуть бути меншими за максимальні струми навантаження. У таких випадках застосування стандартних струмових захистів є неефективним, що зумовлює необхідність використання більш складних і дорогих схем захисту. Рівень чутливості оцінюється коефіцієнтом чутливості, зокрема для захистів, що

реагують на зростання контрольованих величин у разі виникнення пошкодження.

Швидкодія характеризує оперативність виявлення аварійного режиму та відключення пошкодженого елемента від електроенергетичної системи. Основним показником швидкодії є час спрацювання захисту — інтервал від моменту появи пошкодження до моменту роз'єднання з мережею аварійної ділянки. Цей час має бути мінімальним, однак водночас необхідно враховувати короточасні відхилення напруги, які виникають досить часто (наприклад, під час пуску електродвигунів або підключення навантаження) і не завдають суттєвої шкоди обладнанню.

Надійність – це властивість захисного пристрою забезпечувати правильну та безвідмовну роботу в усіх передбачених режимах експлуатації контрольованого об'єкта, а також не спрацьовувати за нормальних умов або в ситуаціях, для яких його дія не передбачена. Іншими словами, надійність визначає здатність захисту виконувати свої функції в різних умовах експлуатації. Основними показниками надійності є час безвідмовної роботи та інтенсивність відмов, що характеризує кількість відмов за одиницю часу.

На сьогоднішній день існує чимало схем реалізації пристроїв захисту від неякісної електроенергії, що засновані на використанні реле. Проте перед конструктором неминуче постає питання, за якими параметрами слід вибирати реле. З одного боку воно повинно стати надійним захистом на шляху неякісної енергії від електромережі до споживача, з іншого боку бути недорогим.

Захисні пристрої повинні бути цифровими і реалізувати складну логіку дій. Точність і надійність цих пристроїв можливо досягнути лише з використанням мікропроцесорної техніки.

Прийняття рішень про вихід за контрольовані параметри значення напруги повинно здійснюватися за дійсним або близьким до нього середнього за період значенням. Як правило робота за піковими значеннями напруги призводить до помилкових спрацьовувань.

Схема живлення пристрою повинна бути організована від самого вимірювача напруги. Наявність простої і логічної індикації, ступінь

захищеності від кліматичних умов це – весь перелік основних параметрів, за якими можна зробити порівняльний аналіз пристрою, контролю напруги [1].

Багато виробників реалізують у своїх реле захисту контроль за піковими значеннями напруги, що значно зменшує можливість використання їх продукції в енергонасичених виробництвах, де в електричних мережах часто зустрічаються «зайві» гармоніками, що виникають за рахунок комутаційних збурень, тривалих перехідних процесів, потужних електромагнітними перешкодами. Також часто зустрічається відсутність окремого регулювання часу, як правило, затримка на спрацьовування, є затримкою на включення, що зводить можливість використання таких реле для управління електроустаткуванням з тривалими перехідними процесами, наприклад, компресорним і холодильним обладнанням.

На сьогоднішній день стало можливим на базі мікропроцесорів створювати пристрої з логікою будь-якої складності. Про переваги цифрової технології, в тому числі, стосовно до захисних пристроїв, сказано багато і ні у кого не викликає сумнівів в явній перевазі техніки нового покоління перед аналоговими приладами. По-справжньому цифрові мікропроцесорні пристрої з широким набором захисних функцій і складною логікою дії для широкого споживання, тобто низькі за ціною, створити досить важко [1].

1.2 Вплив якості електричної енергії на роботу електроприймачів

Електричні прилади та обладнання розраховані на роботу в певних умовах електромагнітного середовища. Під електромагнітним середовищем розуміють систему електропостачання разом із під'єднаними до неї електричними апаратами й установками, які в процесі роботи створюють електромагнітні завади та можуть негативно впливати один на одного. Здатність технічних засобів функціонувати без порушень у такому середовищі визначається поняттям електромагнітної сумісності.

Вимоги до електромагнітного середовища встановлюються відповідними стандартами, що дає змогу розробляти електрообладнання та гарантувати його

надійну роботу за нормативних умов експлуатації. Стандарти регламентують допустимі рівні завад в електричних мережах, які характеризують якість електричної енергії (ЯЕ) і визначаються як показники якості електроенергії (ЯПЕ). На території України вимоги до якості електричної енергії визначаються міждержавним стандартом «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», а також державним стандартом України ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» (EN 50160:2022, IDT), затвердженим наказом від 04.12.2023 № 330 [2].

До основних показників якості електричної енергії належать:

- відхилення напруги, зумовлені графіком навантаження;
- коливання напруги при різкозмінному характері навантаження;
- несиметрія напруг у трифазних системах за нерівномірного розподілу навантаження по фазах;
- несинусоїдальність форми кривої напруги при нелінійному навантаженні;
- відхилення фактичної частоти змінної напруги від номінального значення в усталеному режимі роботи системи електропостачання;
- провали напруги – раптове значне зниження напруги (менше 90 % $U_{ном}$) тривалістю від кількох періодів до кількох десятків секунд із подальшим відновленням;
- тимчасові перенапруги – короткочасне підвищення напруги (понад 110 % $U_{ном}$) тривалістю більше 10 мс;
- імпульсні перенапруги – різкі короткочасні підвищення напруги тривалістю менше 10 мс, що можуть досягати значень у тисячі вольт [3].

Причин, що призводять до погіршення якості електроенергії, існує велика кількість. До основних з них належать аварії на лініях електропередач і підстанціях, короткі замикання в розподільних мережах, грозові та комутаційні перенапруги, нерівномірний розподіл навантаження між фазами, різкі зміни споживаної потужності, спрацювання засобів захисту й автоматики, а також

електромагнітні та мережеві збурення.

Погіршення якості електричної енергії призводить до суттєвих змін режимів роботи електроприймачів, що, у свою чергу, зумовлює зниження продуктивності робочих механізмів, погіршення якості продукції, скорочення строку служби електрообладнання та підвищення ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

Електроприймачі розраховані на тривалу роботу за номінальних електричних параметрів (f_n , U_n , I_n тощо), за яких забезпечуються їхні найкращі техніко-економічні показники. Проте під час передавання електроенергії від електростанцій до споживачів її якість погіршується через втрати напруги в мережах, несиметрію фазних навантажень, що спричиняє несиметрію напруг, наявність перетворювальних пристроїв, які викликають несинусоїдальність напруги, а також різкі зміни навантаження при підключенні та відключенні споживачів, що зумовлює коливання частоти й напруги. У сукупності ці чинники призводять до відхилення параметрів якості електроенергії від нормованих значень і негативно впливають на роботу електроприймачів.

Якість електроенергії тісно пов'язана з економічною ефективністю виробництва, оскільки відхилення її показників від номінальних значень спричиняє зниження коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності, продуктивності обладнання та скорочення строку його експлуатації.

Окрім цього, якість електроенергії безпосередньо впливає на сам об'єкт виробництва та якість готової продукції. Відхилення параметрів електроенергії від установлених норм можуть призводити до порушення технологічних процесів.

Проблеми якості електроенергії мають і соціальний характер. Так, недопустимі відхилення напруги в освітлювальних мережах зумовлюють зниження рівня освітленості, що негативно впливає на зорову систему людини. Наявність вищих гармонік у мережах електропостачання може спричинити порушення роботи теле- та радіоапаратури. Високочастотні вібрації робочого інструменту, зумовлені вищими гармоніками, можуть призводити до розвитку професійних захворювань.

Відхилення та коливання напруги в електричних мережах, викликані безперервною зміною електричних навантажень, призводять до зміни рівня освітленості, збільшення питомих витрат електроенергії, порушення технологічних процесів, зростання собівартості продукції, появи браку та інших негативних наслідків, що знижують загальну ефективність виробництва.

Найбільш чутливими до синусоїдальних коливань напруги є асинхронні електродвигуни, оскільки електромагнітний момент на їх валу пропорційний квадрату прикладеної напруги. За значних відхилень напруги можливе виникнення явища примусової зупинки двигуна. Зміна рівня живильної напруги також впливає на статичну стійкість електродвигуна та величину споживаної ним реактивної потужності.

Електроспоживачі з перетворювальними установками (керовані випрямлячі, перетворювачі частоти тощо) реагують на відхилення напруги зміною кута керування, що призводить до погіршення коефіцієнта потужності. В електротермічних установках зниження напруги спричиняє падіння продуктивності, яка пропорційна квадрату підведеної напруги [3].

Колівання напруги, що виникають під час пуску потужних електродвигунів, роботи зварювальних агрегатів, дугових печей, вентильних установок та інших навантажень, мають низку негативних наслідків: в освітлювальних мережах спостерігається мерехтіння ламп; у системах автоматики виникають помилкові сигнали; порушується робота пускової апаратури. Такі коливання погіршують зорове сприйняття та знижують продуктивність праці. Періодичні потужні навантаження можуть викликати коливання електромагнітного моменту, активної та реактивної потужностей генераторів ТЕЦ.

Несиметричний режим багатофазних систем електропостачання зумовлює появу напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей. Основними причинами несиметрії є нерівномірний розподіл навантаження по фазах, відмінності параметрів фаз на окремих ділянках мережі, а також відсутність транспозиції фаз на протяжних лініях електропередачі. Найчастіше несиметрія напруг виникає через підключення потужних однофазних

електроприймачів.

Порушення симетрії напруг негативно впливає на умови роботи електроспоживачів, знижує їх економічність та технічні показники, спричиняє додаткові втрати потужності й скорочує термін служби електрообладнання. В електричних машинах несиметрія напруг призводить до виникнення магнітних полів прямої та зворотної послідовностей, унаслідок чого з'являється гальмівний момент і додатковий нагрів активних частин. Це змушує знижувати навантаження двигунів для збереження нормативного ресурсу.

Крім того, несиметрія напруг може викликати вібрації ротора через знакозмінні електромагнітні моменти, що створює загрозу механічних пошкоджень. Підвищене нагрівання трансформаторів і вплив на роботу батарей конденсаторів також є наслідками цього явища. Хоча робота повітряних і кабельних ліній істотно не порушується, термін служби їх обладнання може значно скорочуватися.

Спотворення синусоїдальної форми напруги виникає в мережах із нелінійними навантаженнями – випрямними установками, перетворювачами частоти, обладнанням із насиченими магнітопроводами. Вищі гармоніки струму та напруги спричиняють додаткові втрати в електричних машинах і трансформаторах, підвищують аварійність кабельних мереж, перевантажують конденсаторні установки та прискорюють старіння ізоляції.

Відхилення частоти найбільше впливають на синхронні двигуни, кутова швидкість яких прямо пропорційна частоті напруги живлення. Аналогічна залежність характерна і для асинхронних двигунів. Зниження частоти призводить до зменшення продуктивності електроприводів і може спричинити порушення технологічних процесів, а також нестабільність роботи допоміжних механізмів електростанцій.

Коливання частоти в енергосистемі зумовлені короткими замиканнями, комутаційними процесами та змінами навантаження великої потужності, що може викликати коливальні режими роботи двигунів і генераторів.

Отже, проблема контролю та підтримки якості електроенергії є надзвичайно актуальною. Статистичні дані свідчать, що найчастіше

порушуються такі показники, як відхилення напруги та коефіцієнти її несиметрії за нульовою і зворотною послідовностями.

Фактична напруга в різних вузлах електричної мережі відрізняється від номінальної залежно від балансу реактивної потужності, графіка навантаження, втрат напруги та режимів роботи трансформаторів і компенсуювальних пристроїв. Повільні зміни напруги, тривалістю понад 1 хв, зазвичай зумовлені змінами навантаження мережі.

Розглянемо, на прикладі відхилення напруги від номінальних значень, чим загрожує електроустаткуванню вихід за допустимі значення (табл. 1.1) ДСТУ встановлює нормально і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроприймачів [2].

Таблиця 1.1 – Аналіз впливу відхилення напруги на електрообладнання []

Електрообладнання	Зниження на 10% від U_n	Підвищення на 10% від U_n
Електрообладнання Крутий момент електрообладнання змінюється пропорційно квадрату напруги	Крутий момент електрообладнання знижується на 19%. температура підвищується на 70С. збільшується час пуску. Ковзання підвищується на 27,5%, струм механізму – на 14%, струм пристрою 10%.	Збільшений крутий момент електрообладнання, служить причиною перевантаження валів, ремінних передач, збільшується пусковий удар. Пусковий струм підвищується на 12%, роботи момент на 21%, коефіцієнт потужності знижується на 5%.
Освітлювальні прилади (лампи розжарювання, люмінесцентні, інфрачервоні, ртутні, газонаповнені, баластні опору, стартери, конденсатори) Термін служби ламп розжарювання змінюється пропорційно напрузі в ступені 13,1, світловіддача – 3,4, світловіддача на 1кВт-год – в ступені 1,8	Для нормального освітлення потрібно на 30% більше ламп розжарювання, на 15% – люмінесцентних. Світловий потік знижується на 10%.	Термін служби ламп розжарювання знижується в 2,5 рази. Зростає температура баластних опорів, інфрачервоні джерела світла збільшують виділення тепла на 21%.
Електронна апаратура Термін служби електронних компонентів скорочується в 4 рази.	Виникають помилки цифрової техніки. Виходить з ладу програмне забезпечення.	Виходять з ладу мережеві фільтри, блоки живлення, адаптери

Для електричних мереж низької напруги номінальними значеннями є 230 В та 400 В, тоді як у мережах середньої та високої напруги застосовується узгоджене значення напруги. Відповідно до стандартів, позитивні та негативні відхилення напруги не повинні перевищувати $\pm 10\%$ протягом усього контрольного інтервалу.

Робота електрообладнання навіть на межі допустимих відхилень призводить до зниження ефективності та скорочення ресурсу, а в багатьох випадках – до виходу його з ладу. У кінцевому підсумку це зводиться до пробою ізоляції внаслідок її прискореного старіння, спричиненого нагріванням, несиметрією або різким підвищенням напруги.

Коливання напруги створюються під дією швидких змін навантаження, струм якої, протікаючи за елементами мережі живлення, створює на них швидко змінюються втрати напруги. Фізично цей процес аналогічний процесу, що викликає відхилення напруги, але протікає з більшою швидкістю.

Джерелами коливань напруги в системах електропостачання є потужні електроприймачі, які характеризуються різкозмінним споживанням активної та реактивної потужності. Для таких електроприймачів типовими є умови живлення від мереж напругою 35/220 кВ, при яких зміни споживаної потужності в межах 10...130 % відбуваються з високою швидкістю – до 200 МВА/с. Як правило, ці споживачі мають нелінійну вольт-амперну характеристику, унаслідок чого є також джерелами вищих гармонік струму.

Найбільший вплив на погіршення якості електроенергії мають дугові сталеплавильні та рудно-термічні печі, потужні електродвигуни (зокрема приводи прокатних станів), індукційні печі, установки контактного зварювання та інші електротехнологічні агрегати.

У системах електропостачання комунально-побутового призначення джерелами коливань напруги виступають електроплитки, кухонне обладнання, грилі, мікрохвильові печі, освітлювальні прилади, пральні машини, сушильні центрифуги, холодильники, копіювальні апарати, пилососи, міксери, переносний електроінструмент, фени та водонагрівачі.

Необхідність введення показників якості електроенергії, що

характеризують коливання напруги, зумовлена встановленням їх негативного впливу на зорову систему людини. Коливання світлового потоку штучних джерел освітлення викликають фізіологічну втому, відому як флікер. Цей ефект має кумулятивний характер, інтенсивність якого зростає зі збільшенням амплітуди коливань напруги та частоти їх повторення (рис. 1.1).

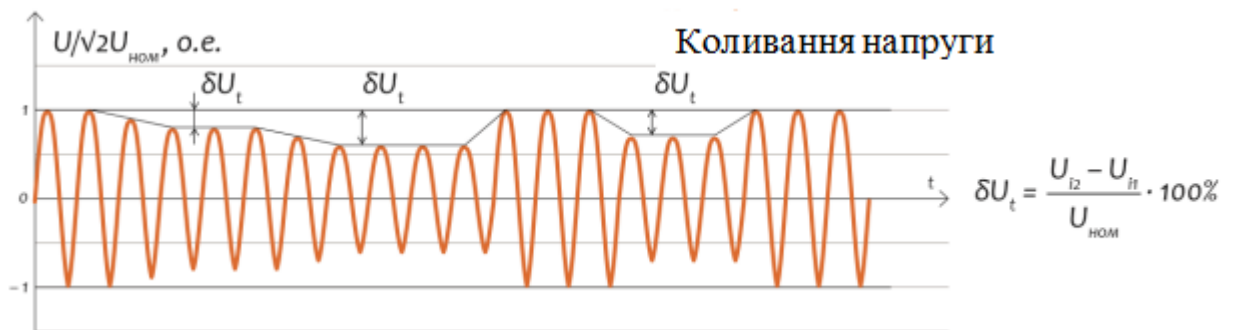


Рисунок 1.1 – Коливання напруги розмахом δU_t

Одиницею вимірювання коливань напруги, як мірою сприйнятливості людини до впливу флікера за встановлений проміжок часу, є доза флікера PSt і PLt , яка вимірюється відповідно на короткочасних (10 хв) і тривалих (120 хв) інтервалах часу.

На відміну від розмахів і частоти напруги дозою флікера оцінюються не їхня амплітуда і кількість, а інтегральне кумулятивне сприйняття світлового потоку, створюваного електричними джерелами освітлення, зором людини. Вимірювання дози флікера проводиться флікерметром, спеціалізованим приладом, що відтворює математичну модель каналу впливу цього процесу на зір, і утворений джерелом світла, оком і мозком людини.

Коливання напруги негативно впливають на зорове сприйняття об'єктів, деталей і графічної інформації, що в підсумку призводить до зниження продуктивності праці та погіршення стану зору працівників. Ступінь впливу мерехтіння світла значною мірою залежить від типу освітлювальних приладів. За однакових значень коливань напруги лампи розжарювання спричиняють більш виражений негативний ефект порівняно з газорозрядними лампами. За змін напруги понад 10% можливе згасання газорозрядних ламп, а при

коливаннях більше 15% – відпадання контактів магнітних пускачів. За таких умов також фіксуються відмови конденсаторів і вентилів перетворювальних установок.

Коливання амплітуди та фази напруги, спричинені роботою прокатних станів, призводять до змін електромагнітного моменту, а також активної й реактивної потужностей синхронних генераторів блокстанцій (ТЕС) промислових підприємств, що негативно відбивається на загальній економічності роботи електростанцій. Зафіксовані випадки нестійкої роботи систем автоматичного регулювання збудження та реактивної потужності синхронних генераторів і двигунів, а також помилкове спрацювання режимів форсування збудження (рис. 1.2).

Короточасні коливання напруги під час дугового електрозварювання, як правило, не впливають на якість зварного шва, що пояснюється тепловою інерційністю процесів у металі. Водночас відхилення і коливання напруги в мережах, які живлять машини контактного зварювання, суттєво позначаються на якості точкового зварювання. Результати досліджень показують, що для різних типів зварюваних деталей допустимі коливання напруги не повинні перевищувати 3...5 %.

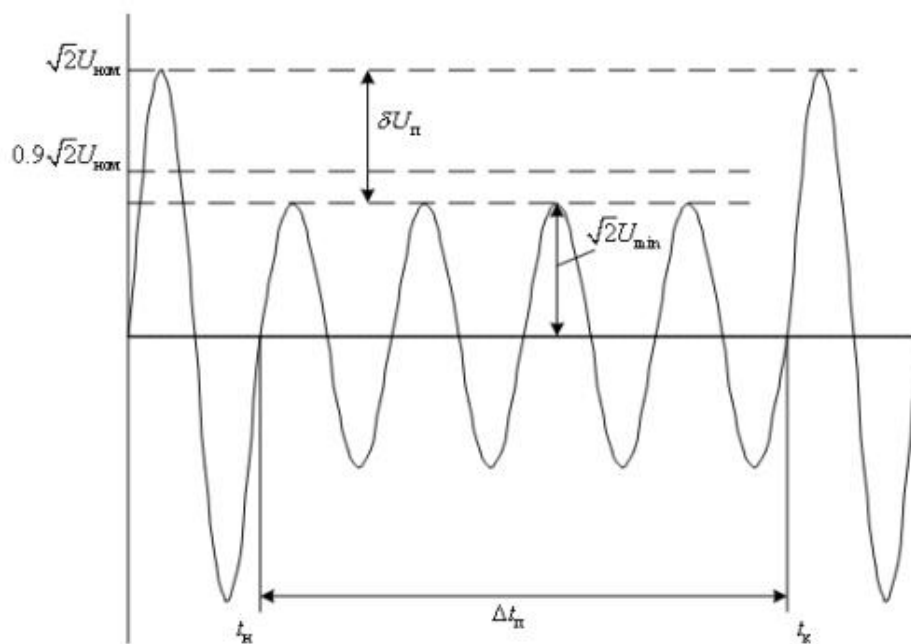


Рисунок 1.2 – Провал напруги глибиною δU_n і тривалістю δt_n

Коливання амплітуди, а особливо фази напруги, призводять до виникнення вібрацій електродвигунів, механічних конструкцій і трубопровідної арматури. У випадку трубопроводів це супроводжується зменшенням втомної міцності металу та скороченням строку його експлуатації. Зокрема, за умов зміни напруги з частотою близько 1 Гц, яка у два рази перевищує допустимі значення, термін служби трубопроводів через пульсації напору насосів зменшується приблизно на 5...7 %.

Телекомунікаційні та інформаційні системи чутливі до багатьох видів перешкод і, особливо, до провалів напруги. Чутливість цих систем до таких перешкод проявляється, головним чином, через їх блоки живлення. По надійності електропостачання телекомунікаційні та інформаційні системи відносяться до електроприймачів І категорії, які в силу покладених на них функцій поділяються на три групи: А, В і С. До електроприймачів групи А, перерва в електропостачанні яких неприпустимий відносяться: інформаційно-обчислювальні та телекомунікаційні системи, системи голосового оповіщення та АТС, системи охоронної та пожежної сигналізації, системи контролю та управління доступом, відеоспостереження, освітлення безпеки, системи диспетчерського управління. До електроприймачів групи В, щодо яких тривалість провалу напруги визначається часом спрацьовування АВР, відносяться електроустановки, що забезпечують охорону здоров'я і життя людей: пожежні насоси, системи димовидалення та кондиціонування, холодильні камери, сигнальні вогні.

1.3 Огляд існуючих систем контролю напруги

Одним із найбільш ефективних і водночас економічно доцільних способів контролю напруги живлення під час розроблення мікропроцесорних систем є застосування зовнішньої мікросхеми – супервізора живлення. Такий пристрій забезпечує утримання мікроконтролера в режимі скидання до моменту досягнення та стабілізації напруги живлення (функція POR – power-on reset), здійснює контроль рівня та стабільності живлення в процесі виконання

програми (функція BOR – brown-out reset), може виконувати функції сторожового таймера (WDT), а також реалізовувати додаткові сервісні можливості, зокрема зовнішнє скидання.

Супервізори живлення мікроконтролерів знаходять застосування в різних електронних пристроях, однак основними завданнями, які вони вирішують, є:

- утримання мікроконтролера в стані скидання до моменту досягнення напругою живлення заданого рівня та її стабілізації (POR);

- автоматичне скидання мікроконтролера у разі зниження напруги живлення нижче критичного значення або при виникненні раптових провалів напруги (BOR).

Незважаючи на те, що більшість сучасних мікроконтролерів оснащені вбудованими модулями POR і BOR, використання зовнішніх супервізорів є доцільним з наступних причин:

- кількість контрольних точок скидання при використанні вбудованих засобів є обмеженою порівняно з можливостями зовнішнього супервізора;

- споживаний струм зовнішнього супервізора у сотні разів менший, ніж при задіянні внутрішніх функцій POR і BOR, що пояснюється особливостями технологій виготовлення мікроконтролерів та аналогових інтегральних схем.

Найбільш ефективним і водночас економічно доцільним способом контролю напруги живлення під час розроблення мікропроцесорних систем є застосування зовнішньої мікросхеми – супервізора живлення. Такий пристрій забезпечує утримання мікроконтролера в режимі скидання перед запуском (функція POR – power on reset), здійснює контроль рівня та стабільності напруги під час виконання програми (функція BOR – brown out reset), може виконувати функції сторожового таймера (WDT), а також реалізовувати додаткові сервісні можливості, зокрема зовнішнє скидання.

Супервізори живлення мікроконтролерів застосовуються у широкому спектрі електронних пристроїв, проте основними завданнями, які вони забезпечують, є утримання мікроконтролера в стані скидання до моменту, поки напруга живлення не досягне заданого рівня та не стабілізується (функція POR), а також автоматичне скидання контролера у разі зниження напруги

живлення нижче критичного порога або при раптовому провалі напруги (функція BOR).

Попри те, що більшість сучасних мікроконтролерів уже мають вбудовані механізми POR і BOR, використання зовнішніх супервізорів є доцільним. Це пояснюється, по-перше, обмеженою кількістю контрольних точок скидання при застосуванні внутрішніх функцій мікроконтролера порівняно з можливостями зовнішнього супервізора, а по-друге, значно меншим струмом споживання зовнішніх супервізорів.

Зменшене енергоспоживання зовнішніх мікросхем у сотні разів нижче, ніж при використанні вбудованих функцій BOR і POR, що зумовлено особливостями технології виготовлення мікроконтролерів і спеціалізованих аналогових мікросхем.

Ці функції життєво необхідні для мікропроцесорних систем, оскільки гарантують стійкість від відмов, пов'язаних зі збоями в колах живлення.

Щоб система була ефективною і надійною, схема моніторингу живлення повинна бути побудованою на зовнішньому супервізорі.

Розглянемо функції, що виконує супервізор, більш детально. Якщо напруга живлення системи наростає відносно повільно, то просте RC-коло не зможе сформувати сигнал скидання з необхідної малою тривалістю фронтів. Схема формування сигналу скидання супервізора включає в себе джерело опорної напруги, компаратор, таймер і буферний елемент, який формує сигнал скидання.

Внаслідок нерівномірного розподілу навантаження на лінії (перекосу фаз), невідповідності навантаженню або застарілості лінії електропередачі та трансформатора, несправностей обладнання підстанції, обриву нуля, непередбачених аварійних ситуацій, напруга в електромережі може раптово зменшитись або збільшитись від номінальної на значну величину. Зниження напруги до значень менше 180 В або зростання до значень більше 260 В може призвести до виходу з ладу побутового однофазного електрообладнання. Особливо чуттєві до скачків напруги пристрої з електронікою. На практиці, бувають випадки, коли, наприклад, при обриві загального нуля в розподільчому

щиту багатоповерхового будинку, напруга в квартирі може сягнути близько 380 В, що, однозначно, виведе з ладу усю побутову техніку. А вартісної електронної техніки в наших будинках стає все більше і більше. Тому, цілком логічно, виникає питання: як уникнути проблем, пов'язаних з нестабільністю напруги?

Звичайно, для надійної і стабільної роботи будь-якої електричної техніки і усунення неприємностей, пов'язаних із скачками напруги, найкраще використовувати стабілізатор напруги. Проте, це дорога річ, яка, крім того, потребує додаткового місця для встановлення. Альтернативою може слугувати реле напруги, також зустрічаються назви відсікач напруги, реле контролю напруги.

Реле напруги (відсікач напруги) – це швидкодіючий електричний апарат, призначений для захисту електроспоживачів від значних відхилень напруги мережі від номінальної (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Варіанти виконання реле напруги [4]

Принципом роботи реле напруги є відключення електромережі від живлення на певний час при відхиленнях напруги від номінальної, тобто не вирівнювати напругу, а відключити споживачів при небезпечних її значеннях [4].

Основною характеристикою реле напруги є швидкодія його спрацьовування. Сучасні реле реагують практично миттєво – за кілька наносекунд. Необхідний рівень чутливості пристрою встановлюється за

допомогою потенціометра відповідно до градуьованої шкали.

Ключова відмінність реле контролю напруги від стабілізатора полягає в принципі дії – реле негайно відключає навантаження при виході напруги за допустимі межі, тоді як стабілізатор намагається вирівняти напругу. Після нормалізації параметрів мережі реле автоматично відновлює живлення споживача. Особливо важливою є робота реле в аварійних режимах – при обривах лінії, різких перенапругах або перевантаженнях, коли необхідне швидке відключення електрообладнання.

Залежно від типу підключення реле напруги випускаються як для одного приладу (з установкою в розетку), так і для групи приладів (у формі подовжувача або трійника) і, звичайно ж, для всієї квартири / будинку (з можливістю установки в електрошафі).

За типом підключення реле контролю напруги поділяються на кілька основних різновидів. Реле типу «вилка–розетка» встановлюються безпосередньо в електричну розетку. У таких пристроях мікроконтролер здійснює постійний контроль рівня напруги та відображає її значення на цифровому індикаторі, а відключення навантаження виконується за допомогою електромагнітного реле. Налаштування допустимого діапазону напруги та часу затримки повторного ввімкнення здійснюється за допомогою кнопок керування.

Реле у виконанні подовжувача за принципом дії є аналогічними реле типу «вилка-розетка», проте їх особливістю є наявність кількох розеток. Це дозволяє одночасно захищати декілька побутових електроприладів, що робить такі пристрої більш універсальними для використання в побутових умовах.

Реле, призначені для встановлення на DIN-рейку, монтуються в розподільчих щитах або шафах. Вони забезпечують захист від перепадів напруги не окремих приладів, а цілих груп споживачів, наприклад електромережі квартири або будинку. Завдяки конструктивним особливостям такі реле можуть працювати в різних режимах: як реле контролю напруги, реле максимального або мінімального значення напруги, а також як реле часу з функцією затримки на ввімкнення.

Якщо потужність навантаження не піднімається вище 8,5 кВА, то її комутація здійснюється самими контактами реле напруги. У разі, коли навантаження перевищує 8,5 кВА, тоді вона відключається за допомогою магнітного пускача чи автоматичного вимикача необхідної потужності.

Ще однією вагомою особливістю реле є наявність однофазних і трифазних реле напруги.

Однофазні реле напруги призначені для захисту однофазних споживачів від недопустимих відхилень напруги в електричній мережі. Вони характеризуються широкими можливостями налаштування, зокрема регулюванням часу затримки повторного ввімкнення, що є особливо важливим для захисту холодильного, компресорного та кондиційного обладнання. Такі реле можуть використовуватися як самостійні комутаційні пристрої або виконувати керуючу функцію для інших апаратів комутації, наприклад магнітних пускачів.

Відповідно трифазні реле напруги, в основному, використовуються в промисловості і на підприємствах, де вони оберігають від виходу з ладу трифазне обладнання та трифазні двигуни. Таким чином, вони підходять для всього промислового обладнання, як верстатів, так і різних компресорних, холодильних, установок, які мають електропривод.

Також поширене застосування таких приладів для контролювання фазності і якості напруги в робочій мережі. Недоліком трифазного реле є те, що при коливаннях напруги на одній фазі, автоматично будуть відключатися і дві інші, так як робота трифазних двигунів без однієї фази не припустима. При наявності перекосів в фазах, таке реле також зробить повне відключення всього обладнання, так як це неприпустимо при роботі двигунів. Хоча решта приладів при таких коливаннях могли б спокійно працювати. Тому в житлових будинках, де немає трифазних споживачів, практикують установку однофазного реле на кожен фазу окремо.

При доборі реле напруги рекомендується передбачати запас по струму на рівні 20...30 %. Це пояснюється тим, що значення струму, вказане на реле, відповідає максимальному струму, який пристрій може тривало пропускати без

пошкоджень. Під час розмикання контактів фактичний струм короткочасно перевищує номінальний, що створює додаткове навантаження на елементи реле. Тому, наприклад, для кола з номінальним струмом 25 А доцільно використовувати реле, розраховане щонайменше на 32 А, а для підвищення надійності та безпеки експлуатації – навіть на 40 А.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ

2.1 Аналіз роботи реле контролю напруги в системах електропостачання

Для захисту побутової та електронної техніки від стрибків напруги, в наслідок яких можлива їх поломка, використовується реле контролю напруги. Даний пристрій забезпечує номінальну напругу в електромережі.

Принцип роботи реле контролю напруги (рис. 2.1) полягає в тому, щоб не допустити перенапруження або недостатню напругу електромережі.

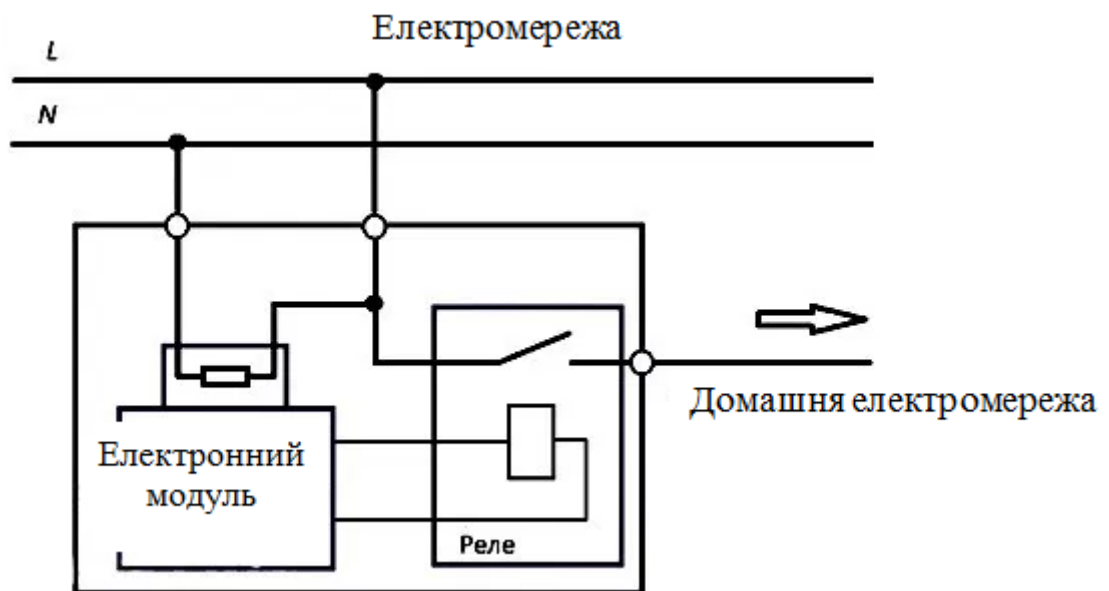


Рисунок 2.1 – Принцип роботи реле контролю напруги

У відповіді на питання, чому встановлювати реле контролю напруги, виділимо кілька причин:

1) під час обриву повітряної лінії на території приватного сектора, можливий стрибок напруги на 160 Вт більше звичайного, в наслідок цього деякі легко вразливі електроприлади з легкістю перегорають і вимагають ремонту;

2) в негоду або з інших причин обрив нейтрального проводу веде до зростання навантаження і пошкодження електротехніки;

3) при розташуванні будинку далеко трансформатора, напруга падає до критично низького рівня, це також негативно позначається на роботі електротехніки;

4) під час включення потужного споживача електрики, фаза перевантажується, в результаті через нестачу напруги можлива поломка приладів.

Реле складається з мікросхеми, яка керує його роботою. Мікросхема визначає зниження або підвищення напруга, передає сигнал електромагнітного реле, і відбувається миттєве включення приладу, яких вирівнює напругу.

Діапазон роботи реле контролю напруги становить від 100 до 400 Вт. Під час грози, розряди блискавки перевищують ці показники, тому не рекомендується сподіватися на реле контролю напруги, і включати електроприлади в негоду. Для таких цілей існують обмежувачі напруги.

Реле контролю напруги складається з двох частин: електронної і силової.

Перша частина контролює напругу, а друга – виконує дії з розподілу навантаження.

Основна частина реле – це мікропроцесор або компактор. Реле на основі мікропроцесора, є найкращим, тому що здатне плавно регулювати зміни напруги.

Основною властивістю реле контролю напруги є швидкодія спрацювання. Поріг спрацювання залежить від налаштування потенціометра.

Реле контролю напруги відрізняється від стабілізаторів принципом дії. Під час стрибків напруги реле відключає ті ділянки, на яких напруга не досягає норми. Стабілізатори – регулюють і розподіляють напругу рівномірно по всій мережі.

Тому під час виникнення аварійних ситуацій більш ефективним є використання реле контролю напруги, яке відключить аварійні ділянки.

Переваги використання реле контролю напруги:

– високий діапазон робочої температури від -20 до $+40$, дозволяє використовувати пристрої, як зовні так і всередині приміщень;

– різноманітність видів даних пристроїв дозволяє вибрати реле контролю

напруги в співвідношенні з матеріальними перевагами;

- реле контролю напруги забезпечує надійний захист дорогої техніки від пере- або недонапругу і запобігає виходу її з ладу;

- широкий вибір моделей і виробників реле контролю напруги відкриває перед покупцем багато можливостей по задоволенню індивідуальних запитів;

- легкість монтажу дозволяє встановити цей прилад самостійно, не вдаючись до допомоги електрика;

- сучасні моделі відрізняються наявністю оригінального дизайну, який з легкістю вписується в загальний інтер'єр приміщення;

- під час стрибків напруги відсутня збільшення або зниження інтенсивності світла;

- прилад автоматично відключає ділянки електромережі, які пошкоджені в разі аварії або поганої погоди.

2.2 Характеристика теоретичних положень в контексті функціонування об'єкта дослідження

Сучасна цифрова апаратура потребує високої точності, тому часто в цифрових пристроях міститься кварцовий резонатор, який є стабільним і надійним генератором гармонійних коливань. Цифрові мікроконтролери працюють на основі цієї постійної частоти, і використовуює її для роботи цифрового приладу. Кварцові резонатори є надійною заміною контуру коливань, зібраного на конденсаторі і котушці індуктивності.

Добротність контуру коливань на основі котушки і конденсатора не перевищує 300. Вона є характеристикою контуру коливань, що визначає величину: смуги резонансу. Добротність показує, у скільки разів енергія коливальної системи перевищує втрати енергії протягом одного періодного коливання. Чим більше добротність, тим менше втрачається енергії за один період, і повільніше загасають коливання. Ємність конденсатора в звичайному контурі коливається в залежності від температури середовища. Величина індуктивності котушки також залежить від багатьох факторів. Існують навіть

відповідні коефіцієнти, що визначають залежність параметрів цих елементів від температури.

Природний кристал кварцу має форму шестикутної призми з пірамідальними вершинами на кінцях (рис. 2.2, а). Такий кристал характеризується наявністю кількох осей симетрії: оптичної ZZ , електричної XX та механічної YY .

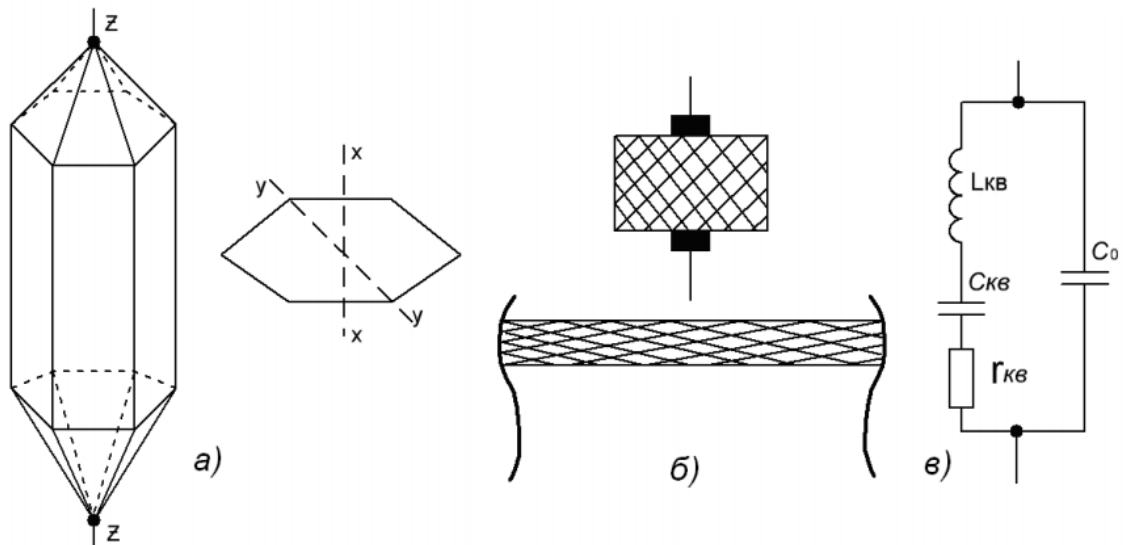


Рисунок 2.2 – Кварц, його конструкція і еквівалентна схема [5]

З кристалу кварцу шляхом вирізання отримують тонку пластину. Фізичні властивості цього мінералу значною мірою визначаються напрямом зрізу пластини відносно його кристалографічних осей, що дає змогу формувати пластини з наперед заданими характеристиками. Найпоширенішим є косий зріз, за якого ребра кварцової пластини утворюють певні кути з осями кристалу. Перед включенням в електричну схему кварцову пластину розміщують між двома електродами. Зазвичай електроди виготовляють методом металізації протилежних поверхонь пластини шляхом нанесення тонкого шару срібла або золота, до якого припаюють електричні виводи. Кварцова пластинка також може бути закріплена між двома пружними контактами. Така конструкція утворює кварцовий резонатор, який розміщують у герметичному металевому або скляному корпусі, заповненому інертним газом.

Кварцова пластинка проявляє як прямий, так і зворотний п'єзоелектричний

ефект. Сутність прямого п'єзоефекту полягає у виникненні електричних зарядів на гранях пластини внаслідок механічної деформації, тоді як зворотний п'єзоефект полягає у виникненні механічних коливань під дією змінного електричного поля. Амплітуда цих коливань залежить від параметрів прикладеного електричного сигналу.

Кварцова пластинка має власну резонансну частоту механічних коливань, при якій інтенсивність коливального процесу досягає максимального значення. Значення цієї частоти визначається співвідношенням (2.1):

$$f = 2,7/L, \quad (2.1)$$

де L – товщина кварцової пластинки.

Із наведеної формули випливає, що підвищення резонансної частоти кварцової пластинки досягається шляхом зменшення її товщини. Однак виготовлення пластинок товщиною менше ніж 0,1 мм є неможливим, оскільки за умов механічних коливань вони руйнуються. У зв'язку з цим частота основних коливань кварцової пластинки, як правило, не перевищує 15...30 МГц. Як і для будь-якої механічної коливальної системи, у кварцовому резонаторі, окрім основного резонансу, виникають коливання на вищих частотах – так звані механічні гармоніки, кількість яких залежить від кута зрізу пластинки та може становити від 7 до 11.

У разі підключення кварцової пластинки до кола змінної напруги, відповідно до зворотного п'єзоефекту, змінне електричне поле спричиняє періодичну зміну її геометричних розмірів, величина якої пропорційна напруженості поля. Виниклі механічні деформації, у свою чергу, згідно з прямим п'єзоефектом, призводять до появи електричних зарядів q на поверхнях пластинки. Зміна цих зарядів у часі формує електричний струм у колі.

За умови наближення частоти прикладеної напруги до власної частоти механічного резонансу кварцової пластинки спостерігається різке зростання амплітуди механічних коливань, а відповідно й струму, що протікає через пластинку. Така поведінка кварцової пластинки в змінному електричному полі є

аналогічною роботі послідовного коливального контуру.

На цій підставі електричну еквівалентну схему кварцового резонатора подають у вигляді послідовно з'єднаних елементів $L_{кв}$, $C_{кв}$ та $гкв$, паралельно до яких підключена ємність кварцотримача C_0 . Значення C_0 зумовлене конструктивними особливостями резонатора та діелектричною проникністю пластини і зазвичай становить приблизно 3...50 пФ.

У разі моделювання такої схеми з урахуванням струму зміщення, що виникає в пластині під час механічного резонансу, параметри еквівалентного контуру набувають специфічних значень: $L_{кв} \approx 0,01...10$ Гн, $C_{кв} \approx 0,007...0,1$ пФ, $гкв \approx 2...150$ Ом.

Очевидно, що ці параметри суттєво відрізняються від характеристик звичайного коливального контуру, зокрема значно більшою індуктивністю та істотно меншою ємністю. За такого співвідношення добротність кварцової пластини як коливальної системи визначається виразом (2.2):

$$Q_{кв} = P_{кв} / r_{кв}. \quad (2.2)$$

Добротність кварцового резонатора є надзвичайно високою й становить приблизно $Q_{кв} \approx 1 \cdot 10^4...1 \cdot 10^6$, що суттєво перевищує добротність звичайного паралельного коливального контуру, для якого $Q = 50...200$. Унаслідок цього частотна характеристика кварцової коливальної системи має різко виражений, «голкоподібний» вигляд (рис. 2.3) із дуже вузькою смугою пропускання порядку одиниць герц, незважаючи на порівняно великий активний опір втрат кварцу $гкв$. Така особливість забезпечує значно вищу стабільність частоти при використанні кварцового резонатора як елемента автогенераторних схем.

Для виробництва кварцових резонаторів використовують низькотемпературний кварц. Хімічна стійкість кварцу дуже висока, розчинити кварц здатна тільки гідрофторадна кислота. Кварцову пластинку для резонатора виготовляють шляхом вирізання з кварцу шматочка під заданим кутом. Залежно від цього кута зрізу кварцова платівка відрізняється різними електромеханічними параметрами. Від виду зрізу залежить наявність або

відсутність паразитних частот, стабільність роботи при будь-яких температурах, частота коливань. На обидві сторони кварцової пластинки наносять шар одного з дорогих металів: срібла, платина, або навіть золота. Після цього пластинку фіксують в корпусі резонатора (рис. 2.4).

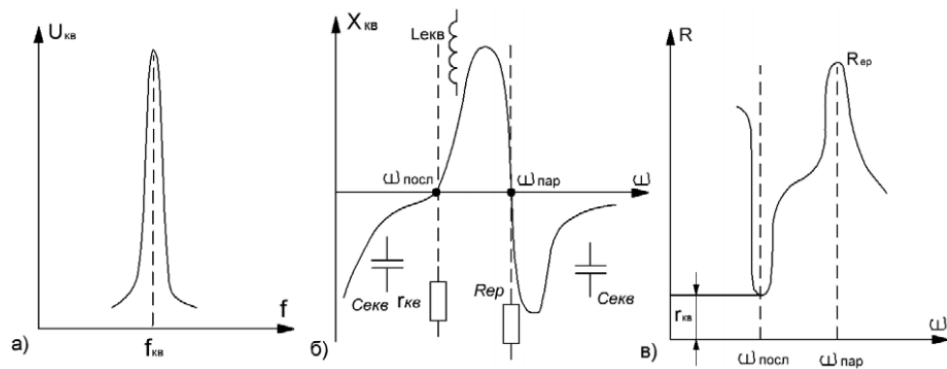


Рисунок 2.3 – Резонансні характеристики кварцу і його резонансні частоти [5]

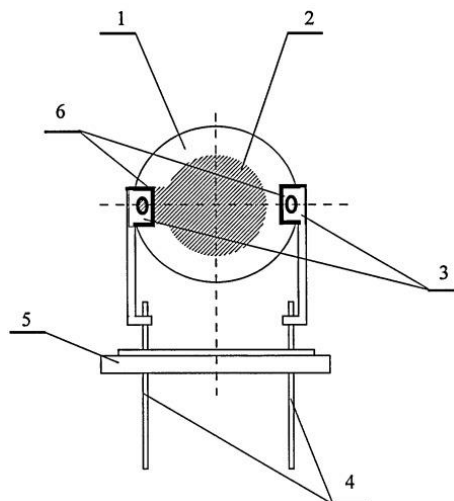


Рисунок 2.4 – Структурна схема найпростішого кварцового резонатора (1 – кварцовий п'єзоелемент, 2 – збуджуючі електроди, 3 – кріплення електродів, 4 – зовнішні вводи, 5 – ізоляційна основа, 6 – кварцотримачі)

При монтажі кварцового резонатора на друковану плату варто подбати про те, щоб не перегріти його, це пов'язано з тим, що конструкція кварцового резонатора досить тонка. Температурний перегрів може викликати деформацію кварцотримача і пластинок електродів. Також відомо, що якщо кварц нагріти понад 5730°C , то він перетворюється в високотемпературний кварц і позбавляється своїх п'єзоелектричних властивостей.

2.3 Математичне моделювання процесів об'єкта дослідження

Більшість кварцових генераторів, виконаних в рамках КМОП технології в інтегральному виконанні, розроблені за схемою генератора Пірса. Для оцінки можливості генерації і регулювання потужності, розсіюється на кварцовому резонаторі, і коефіцієнта петлевого підсилення виконаємо теоретичний розрахунок лінійної моделі генератора Пірса (рис. 2.5).

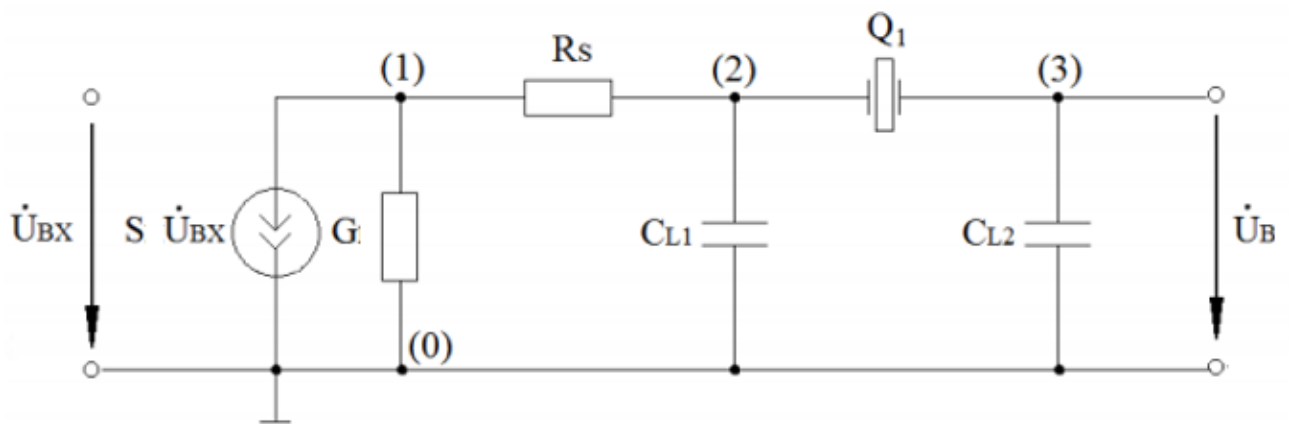


Рисунок 2.5 – Лінійна модель кварцового генератора з розірваним зворотнім зв'язком [5]

У даній моделі підсилювальний каскад (інвертор) в генераторі Пірса представлений еквівалентною схемою, що містить джерело струму, кероване напругою $I = S_i U_{BX}$ і провідність інвертора G_i . Крутизна інвертора S_i і провідність інвертора G_i пов'язані співвідношенням (2.3):

$$\frac{S_i}{G_i} = K_i, \quad (2.3)$$

де K_i – коефіцієнт підсилення інвертора по постійному струму в діапазоні низьких частот.

Для забезпечення автогенерації потрібно виконати баланс фаз і баланс амплітуд. Знайдемо амплітудно-фазочастотну характеристику (АФЧХ) даного кола. Його можна визначити з передатної функції (2.4):

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вix}}(j\omega)}{\dot{U}_{\text{ex}}(j\omega)}, \quad (2.4)$$

де j – уявна одиниця;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Для розрахунку АФЧХ скористаємося методом комплексних амплітуд. Опускаючи математичні викладки, отримуємо вираз (2.5):

$$H(j\omega) = \frac{S_i R_i}{\left(\frac{Z_{Q1}(j\omega)}{Z_{CL2}(j\omega) Z_{CL}(j\omega)} + \frac{1}{Z_{CL1}(j\omega)} + \frac{1}{Z_{CL}(j\omega)} \right) (R_S + R_i) + \frac{Z_{Q1}(j\omega)}{Z_{CL2}(j\omega)} + 1}, \quad (2.5)$$

де $R_i = 1/G_i$.

Комплексні опору резистора, конденсатора і котушки індуктивності відповідно рівні $Z_R(j\omega) = R$, $Z_C(j\omega) = 1 / (j\omega C)$, $Z_L(j\omega) = j\omega L$ і кварцового резонатора визначаються за виразом (2.6):

$$Z_{Q1}(j\omega) = \frac{(R_1 + Z_{L1}(j\omega) + Z_{C1}(j\omega)) Z_{C0}(j\omega)}{R_1 + Z_{L1}(j\omega) + Z_{C1}(j\omega) + Z_{C0}(j\omega)}, \quad (2.6)$$

де R_1, L_1, C_1, C_0 – параметри кварцового резонатора.

Для подальшого розрахунку підставимо вирази комплексних опорів в (2.4). Отриманий вираз АФЧХ приймає складний вид, спрощення якого не представляється можливим. Тому наступні обчислення виконані в математичному пакеті MathCAD.

АЧХ $A(\omega)$ – це модуль АФЧХ $H(j\omega)$ (2.5). ФЧХ $\Phi(\omega)$ – аргумент АФЧХ $H(j\omega)$ (2.7):

$$A(\omega) = |H(j\omega)|. \quad (2.7)$$

Далі знайдемо частоту (2.8), на якій дотримується баланс фаз використовуючи умову балансу фаз (2.9) і відповідний цій частоті коефіцієнт петлевого підсилення $K(f_0)$ (2.10):

$$\Phi(\omega) = \arg(H(j\omega)), \quad (2.8)$$

$$\Phi(2\pi f_0) = \arg(H(j2\pi f_0)) = 2\pi n, \quad (2.9)$$

$$K(f_0) = A(2\pi f_0) = |H(j2\pi f_0)|. \quad (2.10)$$

Виконаємо обчислення характеристик для наступних параметрів лінійної моделі: $R1 = 20$ Ом, $L1 = 3,166$ мГн, $C1 = 20$ ФФ, $C0 = 6$ пФ, $CL1 = CL2 = 25$ пФ, $RS = 0$ Ом, $S_{и} = 18$ мСм, $k_{и} = 15$, тоді $G_{I} = 0,833$ мСм. Дані параметри обрані з наступних принципів: параметри кварцового резонатора взяті виходячи з аналізу серійних кварцових резонаторів; навантажувальні ємності – середні рекомендовані значення [5]; без обмеження потужності, що розсіюється на КР; крутизна S_i і коефіцієнт підсилення K_i – на підставі реальних інверторів, виконаних в рамках технології ХН-035. АЧХ і ФЧХ представлені на рисунку 2.6.

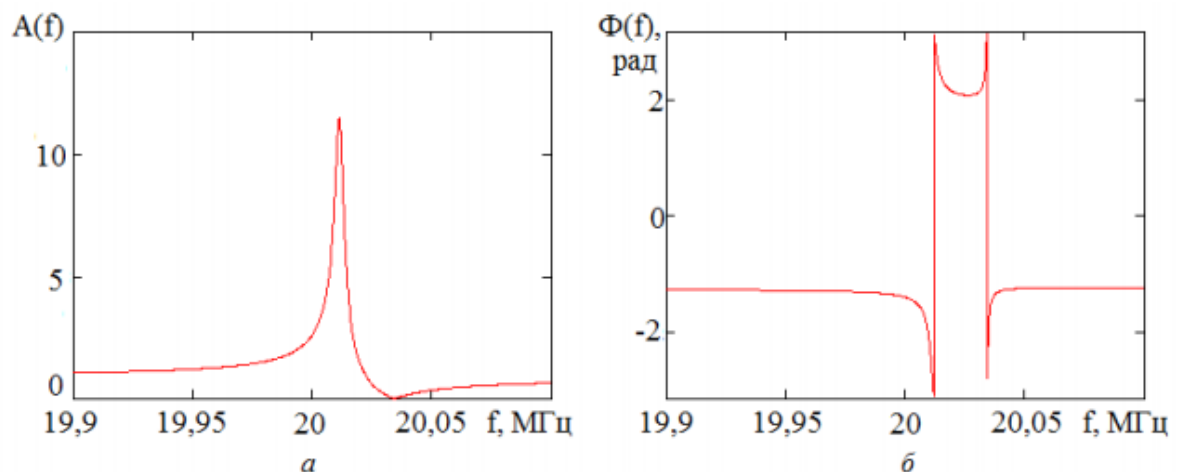


Рисунок 2.6 – Частотні характеристики лінійної моделі а) – амплітудно-частотна характеристика, б) – фазочастотна характеристика

Як видно з рисунка 2.6, б баланс фаз дотримується при двох частотах: $f_{01} = 20,011919$ МГц і $f_{02} = 20,0340087$ МГц. Однак коефіцієнт петлевого підсилення

задовольняє умові балансу амплітуд тільки для частоти f_{01} : $K(f_{01}) = A(f_{01}) = 10,558$, $K(f_{02}) = A(f_{02}) = 0,021$. Причому на частоті f_{02} коефіцієнт підсилення значно менше одиниці, що дозволяє зробити достовірний висновок, що частота генерації f_{01} .

З'ясуємо, де знаходяться дані частоти щодо частот паралельного і послідовного резонансів кварцового резонатора: $f_P = 20,034213$ МГц, $f_S = 20,000906$ МГц. В [5] зазначено, що частота генерації в схемі ємнісний знаходиться між частотами послідовного і паралельного резонансів і, дійсно, це підтверджується: $f_S < f_{01} < f_P$.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА СХЕМОТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ

3.1 Розробка структурної схеми пристрою контролю напруги

Для вирішення завдання щодо захисту електрообладнання від неякісної напруги живлення, пропонується мікропроцесорний пристрій контролю напруги, який виконує функції автомата захисту від перепадів напруги, вимикає навантаження за допомогою реле: якщо напруга в мережі буде виходити за межі встановленого значення, і вмикати її після зникнення аварійної ситуації. Діапазон встановлюваних значень по мінімуму – 170 ... 215 В, по максимуму – 220 ... 280 В. Похибка спрацьовування захисту 1 В і залежить від стабільності напруги живлення мікроконтролера. Автомат можна встановлювати як для захисту одного або декількох приладів.

Структурна схема пристрою показана на рисунку 3.1.

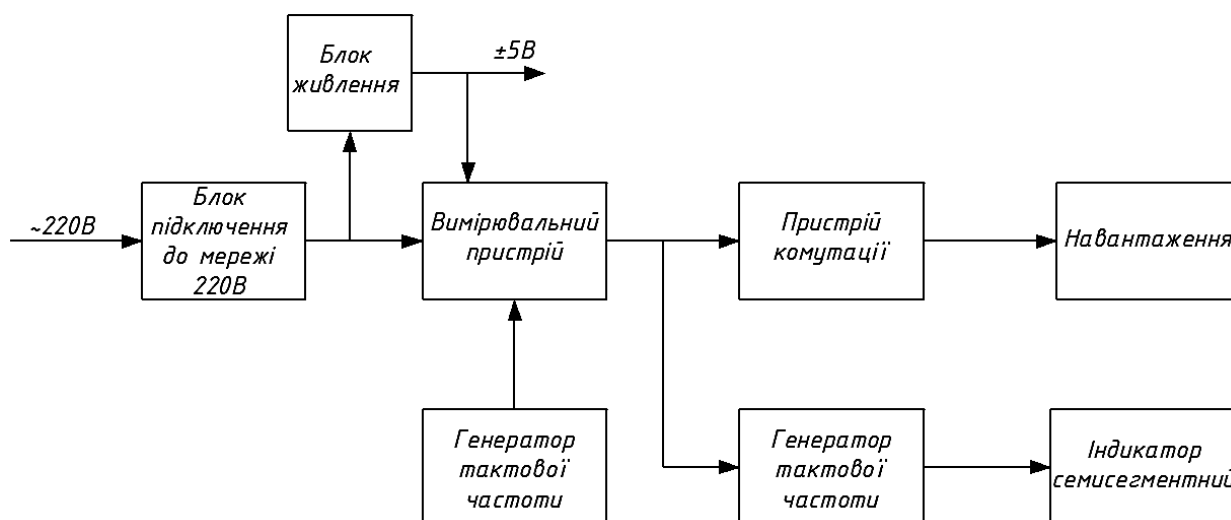


Рисунок 3.1 – Структурна схема мікроконтролерного пристрою контролю напруги

В структурну схему входять наступні елементи:

- 1) вхідний блок, що забезпечує підключення пристрою до мережі місцевого живлення;
- 2) блок живлення з вбудованим трансформатором, що підключається до

відповідних фаз мережі, до виходу трансформатора приєднаний випрямляч;

- 3) вимірювальний пристрій, виконаний на основі мікроконтролера;
- 4) генератор тактових частот;
- 5) комутуючий пристрій, який відключає споживача від мережі;
- 6) блок індикації;
- 7) індикатор семисегментний, призначений для, виведення показань поточного значення напруги;
- 8) навантаження.

3.2 Опис елементної бази

Аналіз структурної схеми пристрою показав, що для його реалізації необхідний контролер, який має два повноцінних 8-ми розрядних порти і один усічений. Цим вимогам відповідає мікроконтролер PIC16F873 (рис. 3.2).

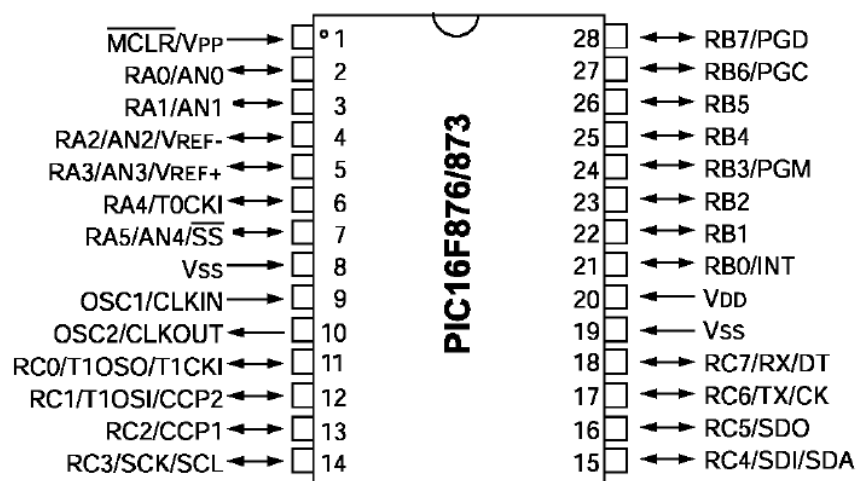


Рисунок 3.2 – Розміщення виводів PIC16F873 [6]

Мікроконтролер PIC16F873 побудований на високопродуктивній RISC-архітектурі, що забезпечує виконання більшості інструкцій за один машинний цикл, за винятком команд переходу, для яких необхідно два цикли. Максимальна тактова частота контролера становить 20 МГц, що відповідає тривалості одного машинного циклу 200 нс. Обсяг FLASH-пам'яті програм складає до $8K \times 14$ слів, оперативної пам'яті – до 368×8 байт, а EEPROM-

пам'яті даних – до 256×8 байт [6].

Мікроконтролер оснащений восьмирівневим апаратним стеком, підтримує прямий, непрямий та відносний режими адресації, має сторожовий таймер WDT з власним RC-генератором, режим зниженого енергоспоживання SLEEP та реалізований за високошвидкісною енергоощадною CMOS FLASH / EEPROM технологією [6].

Передбачена можливість програмування мікроконтролера безпосередньо у складі готового пристрою із використанням двох його виводів, а також підтримується низьковольтний режим програмування та внутрішньосхемне налагодження, для якого задіюються два контакти.

Діапазон напруги живлення PIC16F873 становить від 2,0 В до 5,5 В. Струм споживання не перевищує 0,6 мА при напрузі 3,0 В і тактовій частоті 4,0 МГц, близько 20 мкА при частоті 32 кГц, а в режимі енергозбереження – менше 1 мкА.

До складу периферійних модулів мікроконтролера входять:

- таймер/лічильник Timer0 з розрядністю 8 біт і програмованим переддільником;
- 16-розрядний таймер/лічильник Timer1 з можливістю підключення зовнішнього кварцового резонатора;
- 8-розрядний таймер/лічильник Timer2 з програмованим переддільником та вихідним дільником;
- два модулі захоплення, порівняння та широтно-імпульсної модуляції (ССР), що забезпечують 16-розрядне захоплення з максимальною роздільною здатністю 12,5 нс; 16-розрядне порівняння з роздільною здатністю до 200 нс; 10-розрядний режим ШІМ;
- багатоканальний 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач;
- синхронний послідовний порт MSSP з підтримкою протоколів SPI та I²C у режимах ведучого і веденого;
- універсальний синхронно-асинхронний приймач-передавач USART із функцією визначення адреси;
- ведений 8-розрядний паралельний порт PSP із зовнішніми сигналами

керування -RD, -WR, -CS (реалізований лише у мікроконтролерах із 40 та 44 виводами);

– детектор зниження напруги живлення (BOD), який забезпечує скидання пристрою при падінні напруги (BOR).

Структурна схема мікроконтролера PIC16F873 наведена на рисунку 3.3, а детальний опис призначення його виводів подано в додатку Б.

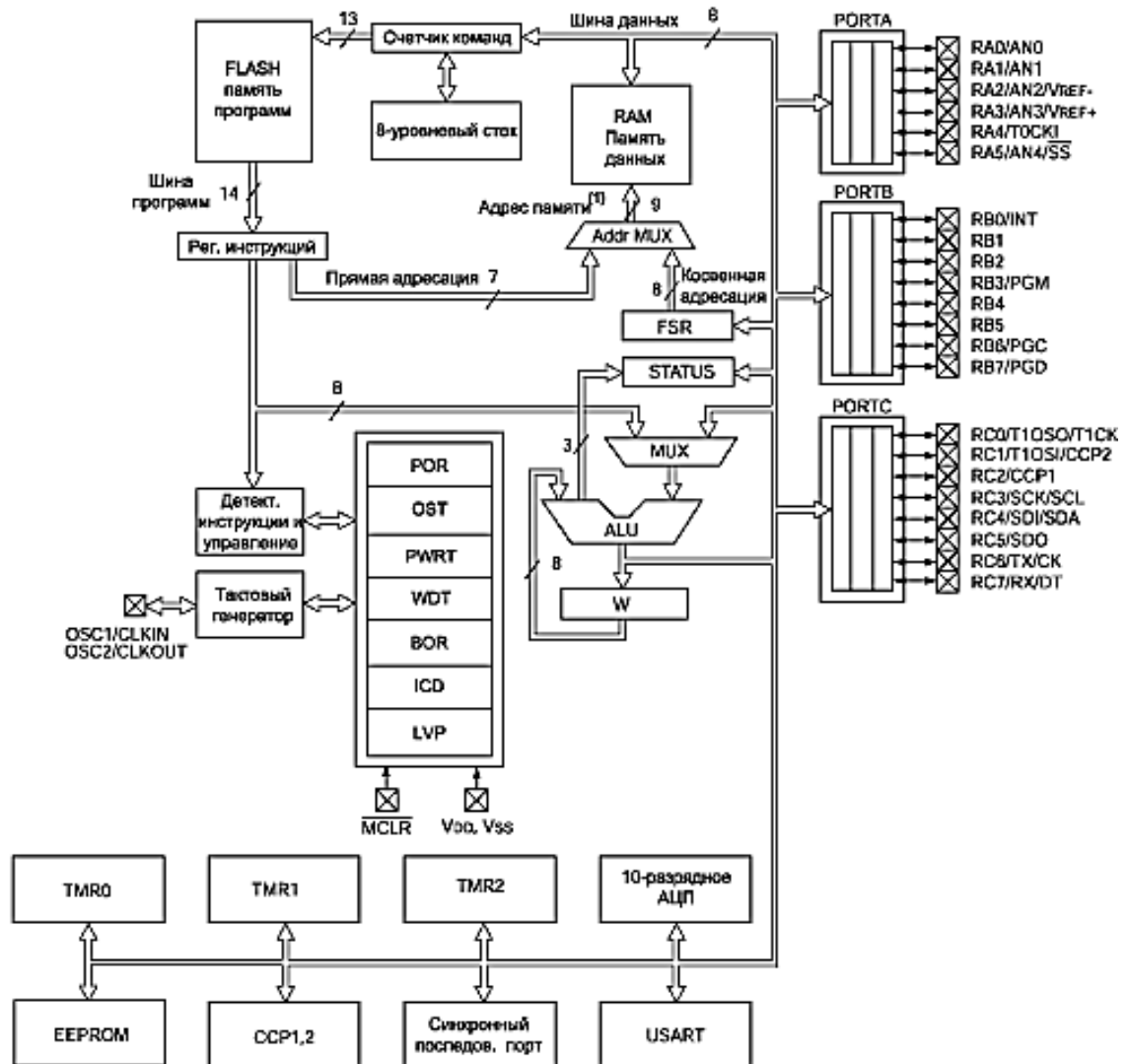


Рисунок 3.3 – Структурна схема мікроконтролера PIC16F873 [6]

«Симісторний оптрон МОС3043 – оптопара (оптрон) з симісторним виходом. МОС3043 може використовуватися як малопотужний симістор з оптичною розв'язкою керуючого кола або ж в якості драйвера для керування потужними симісторами» [7] (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Симісторний оптрон МОС3043 [7]

МОС3043 відноситься до серії оптосимісторів з вбудованою «Zero crossing circuit» – схемою, що дозволяє відкриття симістора тільки в момент проходження напругою «0», що значно знижує перешкоди, що виникають під час включення потужних навантажень. Технічні характеристики симісторного оптрона МОС3043 наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики МОС3043

Максимальна напруга ізоляції вхід-вихід	7500 В
Максимальна напруга, що комутується	600 В
Максимальний струм (імп.)	1 А
Максимальна потужність, що розсіюється	250 мВт
Діапазон робочих температур	-40 ° С .. +100 ° С
Тип корпусу	DIP-6

Схема електрична принципова і стандартна схема включення симісторного оптрона МОС3043 наведені на рисунках 3.5 та 3.6 відповідно.

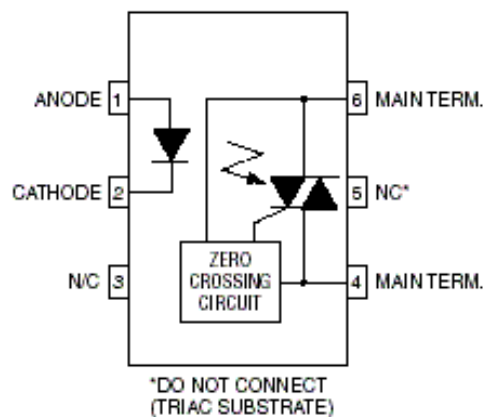


Рисунок 3.5 – Схема електрична принципова МОС3043 [7]

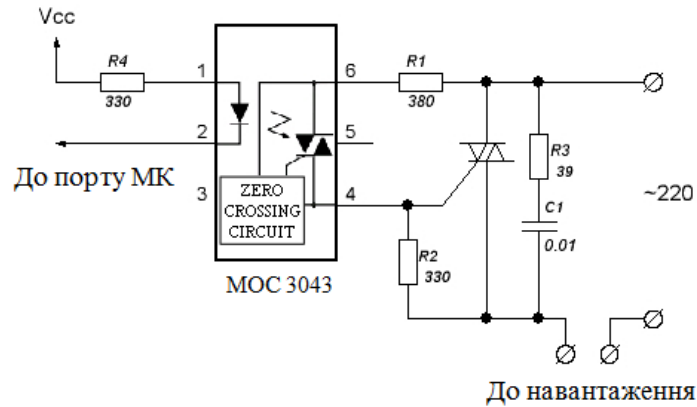


Рисунок 3.6 – Типова схема включення [7]

Кварцовий резонатор – пристрій, який має резонансні властивості, тобто відклик якого на коливання певних частот сильніший, ніж на коливання з іншими частотами.

«Кварцовий резонатор є найефективнішим при розробці годинника. Так як пластинка резонатора закріплена і має власну резонансну частоту механічних коливань. При подачі напруги на електроди завдяки п'єзоелектричному ефекту виникає згин, стискання або зсув в залежності від того, яким чином вирізали пластину (або кільце, або брусок)» [8].

Для конструювання пристрою контролю напруги в мережі 230 В було обрано кварцовий резонатор НС-49S.

Габаритні розміри кварцового резонатора НС-49S зображені на рисунку 3.7.

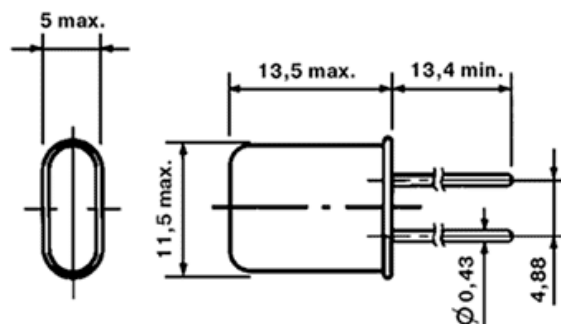


Рисунок 3.7 – Габаритні розміри кварцового резонатора [8]

Основні технічні характеристики транзистору НС-49S наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики транзистору HC-49S

Резонансна частота, МГц	12
Номер гармоніки	1
Номінальна ємність, пФ	32
Робоча температура	-20...+70
Довжина корпусу, мм	11,05
Діаметр корпусу, мм	4,65

«Конденсатор – система з двох чи більше електродів, які розділені діелектриком, товщина якого менша у порівнянні з розміром обкладок. Така система має взаємну електричну ємність і здатна зберігати електричний заряд» [8].

Для конструювання пристрою контролю напруги в мережі 230 В були обрано керамічні та електролітичний конденсатори. Для згладжуючого конденсатора було обрано електролітичний конденсатор на 10 мФ 25 В. Габаритні розміри електролітичного конденсатора зображені на рисунку 3.8.

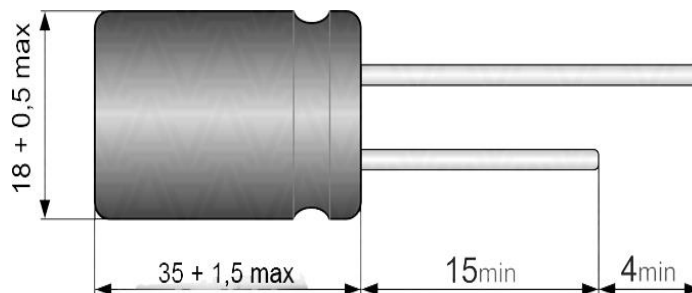


Рисунок 3.8 – Габаритні розміри електролітичного конденсатора [8]

Технічні характеристики обраного конденсатора наведені в таблиці 3.3.

Таблиці 3.3 – Технічні характеристики конденсатора

Номінальна ємність, мФ	10
Номінальна напруга, В	20
Максимальна робоча температура, °С	105
Допустиме відхилення ємності, %	± 20
Напрацювання до відмови, не менше	20000

Керамічний конденсатор – конденсатор, у якому як діелектрик використано керамічний матеріал. Керамічні конденсатори є природним елементом практично будь-якої електронної схеми (рис. 3.9).

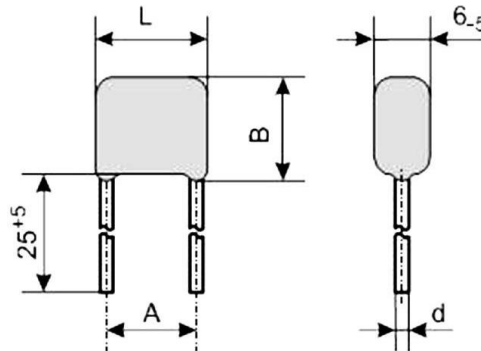


Рисунок 3.9 – Зображення керамічного конденсатора [8]

Технічні характеристики наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики конденсатора

Номінальна ємність, пФ	30...104
Номінальна напруга, В	50
Тип конденсатора	низьковольтний
Тип діелектрика	кераміка
Допустиме відхилення ємності, %	±20

«Діод – електронний прилад з двома електродами, що пропускає електричний струм лише в одному напрямі» [8].

Для конструювання пристрою контролю напруги в мережі 230 В було обрано діоди 1N5408 та 1N4148.

Габаритні розміри діода 1N5408 зображені на рис 3.10:

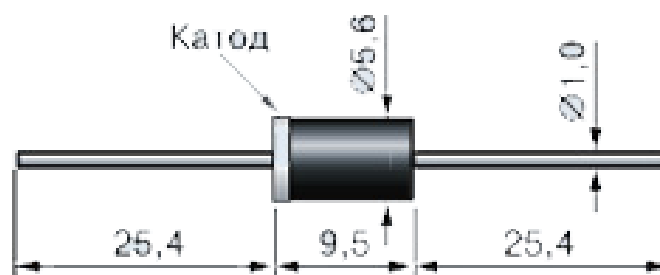


Рисунок 3.10 – Діод 1N5408 [8]

Технічна характеристика діоду наведена в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічна характеристика діода 1N5408

Матеріал	Кремній
Максимальна постійна зворотна напруга, В	1000
Максимальна імпульсна зворотна напруга, В	1200
Максимальний струм, А	3
Максимальна пряма напруга, В	1,2
Робоча температура, °С	-50 ... +150

Габаритні розміри діода 1N4148 зображені на рисунку 3.11.

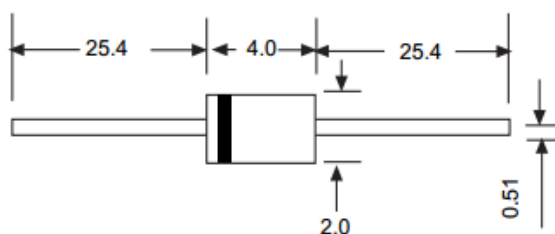


Рисунок 3.11 – Габаритні розміри діода 1N4148

Технічна характеристика діода наведена в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Технічна характеристика діоду 1N4148

Матеріал	Кремній
Максимальний струм, мА	500
Швидкість перемикання, менше нс	4
Максимальна зворотна напруга, В	75
Ємність переходу, пФ	4
Діюче значення зворотної напруги, В	53

«Стабілітрон – напівпровідниковий діод, напруга на якому в області електричного пробую слабо залежить від струму, і який застосовується для стабілізації напруги» [8].

Для конструювання блоку живлення було обрано стабілітрони 1N4733А, схематичне зображення і габаритні розміри якого зображені на рисунку 3.12.

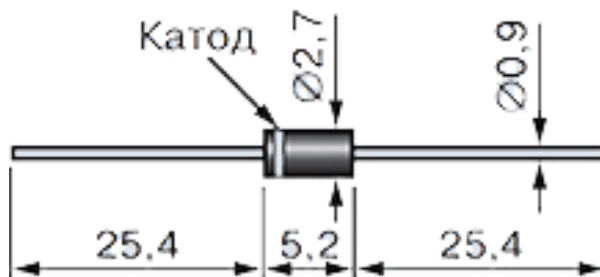


Рисунок 3.12 – Габаритні розміри стабілітрона 1N4733A

Параметри стабілітрону наведені у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Параметри стабілітрону 1N4733A

Матеріал	Кремній
Розсіювальна потужність, Вт	1
Номінальна напруга стабілізації, В	4,8
Мінімальна напруга стабілізації, В	5,1
Максимальна напруга стабілізації, В	5,3
Мінімальний струм стабілізації, мА	49
Максимальний струм стабілізації, мА	148

3.3 Електрична принципова схема пристрою

Електрична принципова схеми пристрою показана на рисунку 3.13. Напруга, що вимірюється ділиться дільником напруги R1, R9 і в разі необхідності обмежується стабілітроном VD2. Діод VD3 зменшує значення амплітуди напруги негативного напівперіоду до допустимого значення, на аналоговий вхід. Діод VD1 пропускає на вимірювальний вхід мікроконтролера тільки позитивну частину поділеної мережевої напруги. Дільник напруги R7, R8 спільно з стабілітроном VD3 формує прямокутні імпульси на вході RB0. По передньому фронту цих імпульсів відбувається синхронізація роботи внутрішнього генератора 5мс. Сімісторний отпрон U1 MOC3043 включає реле K1. До мережі, навантаження $R_{нав}$ може підключатися через контакти реле K1.1 або перемикач SA1. У режимі очікування світлодіод HL1 блимає з частотою 1Гц. Регулювання вихідної напруги стабілізатора DA1 виконується резистором R6. Світлодіод HL1 – будь-який яскравий діод з малим споживаним струмом.

Контакти реле повинні витримувати струм, споживаний всіма приладами, включеними одночасно. Якщо в аварійному режимі буде працювати тільки освітлення, то в якості перемикача SA1 можна використати побутовий вимикач освітлення.

Мікроконтролер PIC16F873 без переробки плати можна замінити мікроконтролерами PIC16F873A, PIC16F876A. Можна використовувати й 40-выводні мікроконтролери PIC16F874, PIC16F877 зі зміною малюнка друкованої плати. При цьому програма МК змін не потребує, необхідно тільки правильно встановити тип МК в програмі програматора.

Налагодження пристрою зводиться до установки необхідної напруги живлення мікроконтролера. Оскільки джерелом опорної напруги для АЦП є напруга живлення мікроконтролера, то і показання індикатора будуть залежати від встановленої напруги. При збільшенні напруги живлення вага розряду квантування збільшується, а отже, зменшуються показання індикатора, і навпаки при зменшенні напруги живлення показання індикатора збільшуються.

У зібраному пристрої витягують мікроконтролер і включають пристрій в мережу. На виводі 2 стабілізатора DA1 резистором R6 встановлюють напруга живлення 5 В. Відключають пристрій з мережі і встановлюють мікроконтролер в панельку. Підключають пристрій до мережі і контролюють напруга мережі цифровим вольтметром.

Переміщенням коми за межі індикатора кнопкою «Розряд» входять в режим вимірювання. Зміною номіналу резистора R6 домагаються рівності показань в мережі і з виходу мікроконтролера. При цьому необхідно стежити, щоб напруга живлення мікроконтролера не перевищувала 5,5 В.

Цей варіант можливий, якщо номінали резисторів подільника R1, R9 не відповідають зазначеним на схемі.

3.4 Проектування друкованої плати

Для розроблення топології друкованих плат застосовується широкий спектр спеціалізованих САПР, зокрема EAGLE, Altium Designer, Proteus Design,

AutoCAD та Sprint-Layout. Сучасна радіоелектронна апаратура відіграє важливу роль у повсякденному житті, тому її дослідження та вдосконалення є невід'ємною складовою науково-технічного прогресу.

У сучасній електроніці на основі обмеженого набору базових елементів – резисторів, конденсаторів, транзисторів, інтегральних схем – створюється велика кількість електронних пристроїв різного призначення. Ключову роль у цьому процесі відіграє друкована плата, яка забезпечує механічне кріплення та електричне з'єднання компонентів.

Програмний пакет Sprint-Layout є простим і зручним інструментом для проєктування односторонніх і двосторонніх друкованих плат. Він містить повний набір функцій, необхідних для конструювання плат, зокрема засоби створення отворів, контактних майданчиків, провідних доріжок, полігонів, текстових позначень та інших елементів [9].

Програма підтримує формування окремих шарів металізації та шовкотрафаретного друку для кожної сторони плати, а також маски припою, заземлення і тестових точок. Вбудований автомаршрутизатор полегшує процес трасування з'єднань між компонентами, а режим візуалізації «фотографія» дозволяє переглянути плату в вигляді готового виробу та виявити можливі помилки.

Sprint-Layout має розширену бібліотеку радіокомпонентів і контактних майданчиків. Розміщення елементів здійснюється безпосередньо на макеті плати з використанням координатної сітки, яка забезпечує точне позиціонування. Крок сітки може змінюватися залежно від типу компонентів, при цьому рекомендується використовувати стандартні значення 2,54 мм або 1,27 мм для цифрових мікросхем.

Програма дозволяє створювати отвори різних типів, у тому числі металізовані наскрізні, автоматично відображаючи їх на обох сторонах плати. Ширина доріжок, діаметри отворів та інші параметри задаються через панель інструментів і можуть зберігатися для подальшого використання [9].

Отже використовуючи Sprint-Layout була спроектована топологія двохсторонньої плати пристрій контролю напруги в мережі 230 В (рис. 3.14).

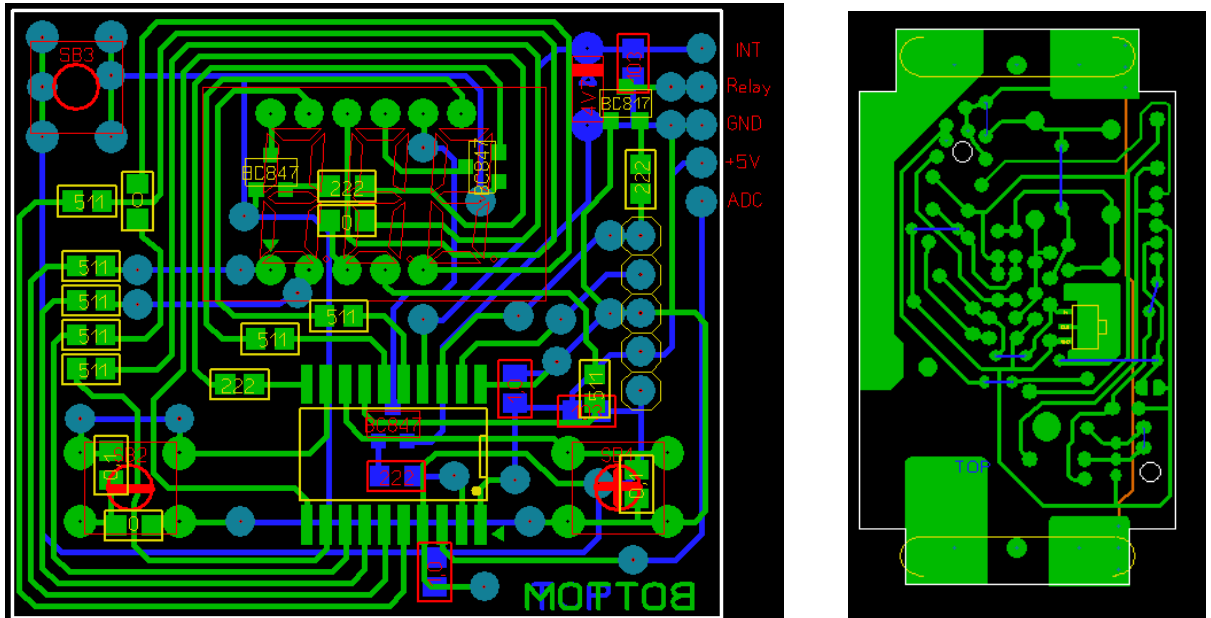


Рисунок 3.14 – Топологія двохсторонньої плати пристрою контролю напруги в мережі 230 В

Таким чином, використання Sprint-Layout забезпечує ефективне та наочне проєктування друкованих плат, що є важливим етапом у розробленні сучасних електронних пристроїв.

РОЗДІЛ 4

ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Розробка алгоритму роботи об'єкта дослідження

В роботі програми мікроконтролера використовуються три підпрограми «Переривання». Переривання за таймером 0 необхідні для відліку інтервалів часу 5мс. Це час, що дорівнює чверті періоду частоти напруги, необхідно для прив'язки включення модуля АЦП на вершині синусоїди. Переривання по зміні сигналу на вході КВ0 синхронізує генератор 5 мс з частотою мережі. Переривання за таймером 1 відпрацьовують інтервали часу повторного включення автомата для вимірювання напруги в режимі очікування.

Якщо напруга мережі перевищує встановлене значення, то автомат вимикає реле, індикацію і переходить в режим очікування. Повторне вимірювання напруги буде виконано через 2 хв. Якщо величина напруги не прийшла в норму, то наступне вимірювання буде виконане через 10 хв. Останній інтервал часу можна встановлювати програмно до 8,5 год.

Після пуску і ініціалізації мікроконтролера вмикається лічильник переривань, побудований на послідовному включенні попереднього дільника з $K = 4$ і таймера ТМК0 з $K = 256$. При використанні кварцового резонатора на частоту 4,096МГц переривання таймера відбуватимуться через 1мс. Після переривання інкрементуються лічильники 5 мс; 0,5 с; 1 с.

Алгоритм роботи програми автомата захисту від перепадів мережевої напруги показаний на рисунках 4.1-4.4.

Після пуску та ініціалізації мікроконтролера (рис. 4.1) вмикається лічильник переривань, побудований на послідовному включенні попереднього дільника з $K = 4$ і таймера ТМК0 з $K = 256$. При використанні кварцового резонатора на частоті 4,096 МГц переривання за таймером відбуватимуться через 1мс. Після переривання інкрементуються лічильники 5 мс; 0,5 с; 1 с. Після переповнення лічильників встановлюються прапорці 5 мс; 0,5 с; 1 с. Відмітки часу 5 мс використовуються для індикації одного розряду, а 0,5 і 1 с для зміни індикації в режимі вимірювання.

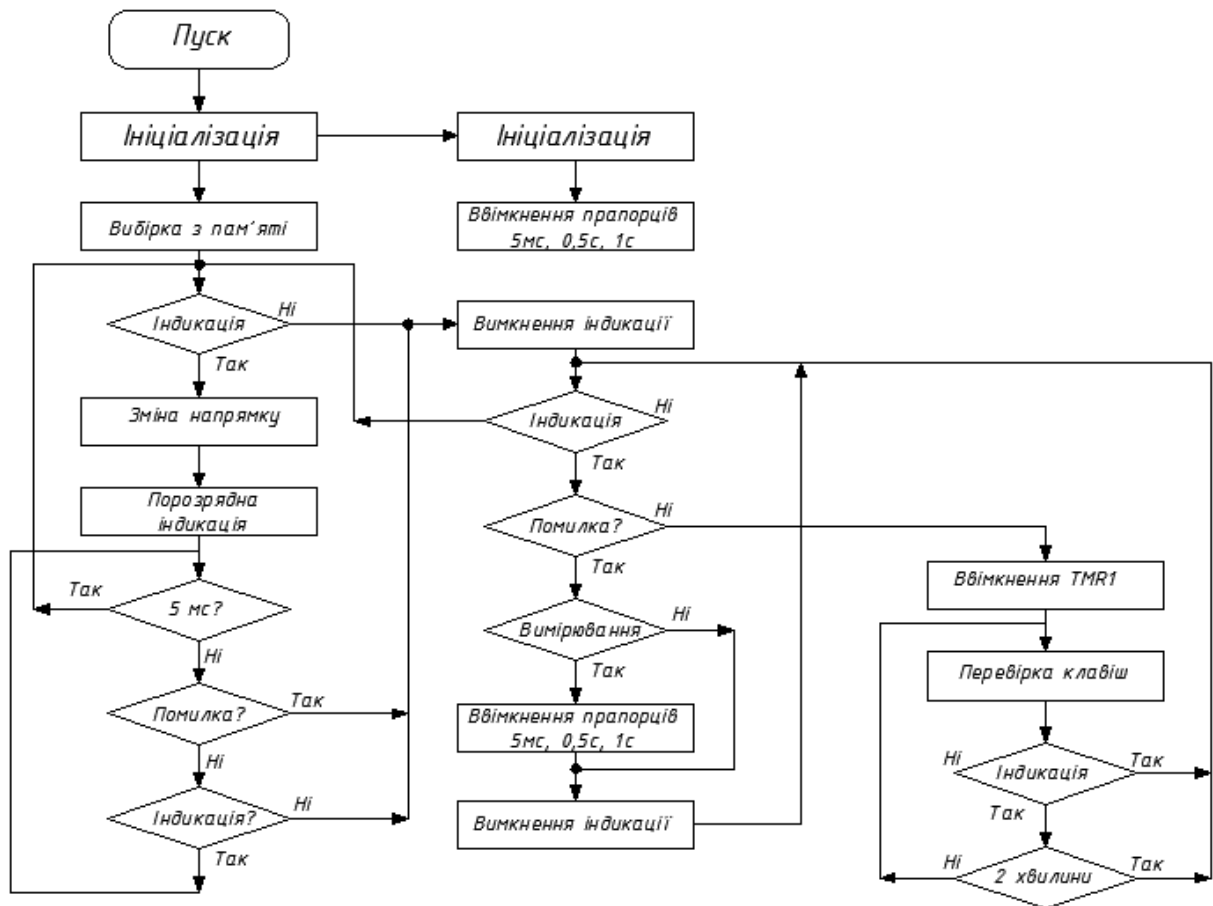


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи програми автомата захисту від перепадів напруги

Далі процесор звіряє вибірку з пам'яті раніше встановлених мінімального і максимального значень. Якщо індикація дозволена, то вибрані з пам'яті значення максимальної установки виводяться на індикацію. Після виведення на індикацію кожного розряду очікується установка прапорця 5мс. Після індикації третього розряду виконується перевірка стану кнопок. Під час очікування переривання постійно перевіряються прапорці помилки і виключення індикації. Якщо вони включені, то програма переходить до вимикання індикації.

Вимикається індикація і перевіряється прапор індикації. якщо прапорець включений, то програма повертається до індикації, але така ситуація можлива тільки після того, як буде натиснута кнопка «індикація». Далі перевіряється стан прапорця помилки. Якщо прапорець вимкнений, але встановлений прапорець включення АЦП, то проводиться вимірювання напруги і перевіряються кнопки.

Цикл повторюється з перевірки прапора включення індикації. Вихід з цієї підпрограми можливий або на індикацію за станом прапорця індикації, або на включення таймера 1. Цей таймер відпрацьовує часовий інтервал, через який буде виконано вимірювання входної напруги при встановленому прапорці помилки. При цьому забороняються переривання по входу КВ0.

Розглянемо докладніше алгоритм роботи підпрограми вимірювання напруги, наведений на рисунку 4.2. Аналого-цифрове перетворення в мікроконтролері виконується методом проб і помилок.

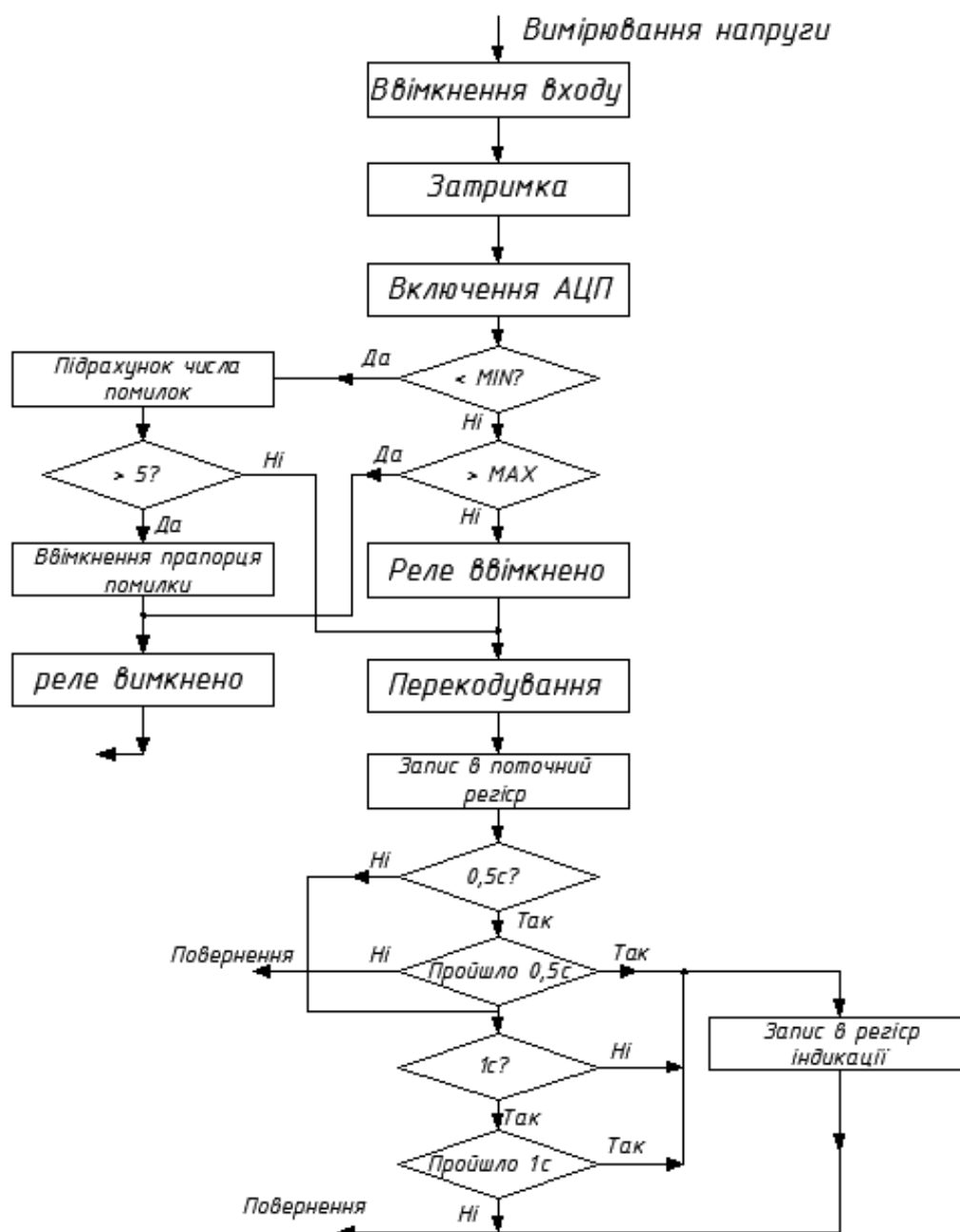


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи програми автомата захисту від перепадів напруги. Вимірювання напруги

На час перетворення величина вхідної напруги запам'ятовується на конденсаторі пристрою вибірки-зберігання (ПВЗ). Тому після включення обраного входу необхідна затримка для повного заряду конденсатора.

Після виконання затримки вмикається АЦП-перетворення. Молодший розряд перетворення відкидається як недостовірний через можливе «тремтіння» амплітуди вимірюваної напруги. Двійкове значення молодшого восьмирозрядного регістра перетворення перевіряється на перевищення максимального або мінімального встановленого значення.

У разі позитивного результату порівняння вмикається вихід, який керує реле навантаження. Інакше підтверджується включення реле і програма повертається з підпрограми. Якщо дев'ятий розряд дорівнює одиниці, то порівняння молодших восьми розрядів не виконується і програма вмикає реле.

Для зменшення числа помилкових спрацьовувань автомата при виникненні мережеских перешкод вимикання реле відбувається за серією безперервних помилок. Залежно від стану мережі це число може коливатися в невеликих межах. Автором вибрано число безперервних помилок, рівне п'яти, що відповідає затримці виключення виконавчого реле 100мс після виникнення першої помилки. При заповненні лічильника помилок включається прапорець помилки.

Перевіряються прапорці індикації 0,5 і 1 с. Якщо жоден прапорець не включений, то кожне вимірне значення виводиться на індикацію. У цьому режимі добре спостерігати стабільність напруги. Однак при коливаннях напруги буде відбуватися миготіння від одного до трьох розрядів, що ускладнить читання показань індикатора. Для полегшення читання індикатора введена можливість поновлення індикації через 0,5 і 1 с. Якщо один з прапорців включений, то поточні вимірні значення напруги переписуються в регістри індикації. При цьому скидаються прапорці і такий вивід на індикацію буде після їх включення в блоці підпрограми установки прапорців.

Розглянемо роботу підпрограми перевірки кнопок (рис. 4.3). Після першого проходження підпрограми виявляються натиснуті кнопки і встановлюються відповідні прапорці кнопок. Поки кнопка натиснута, подальше

виконання програми не проводиться. При подальших проходженнях підпрограми, якщо виявляються включені прапори, програма переходить до зміни розряду або вимикання індикації або до установки.

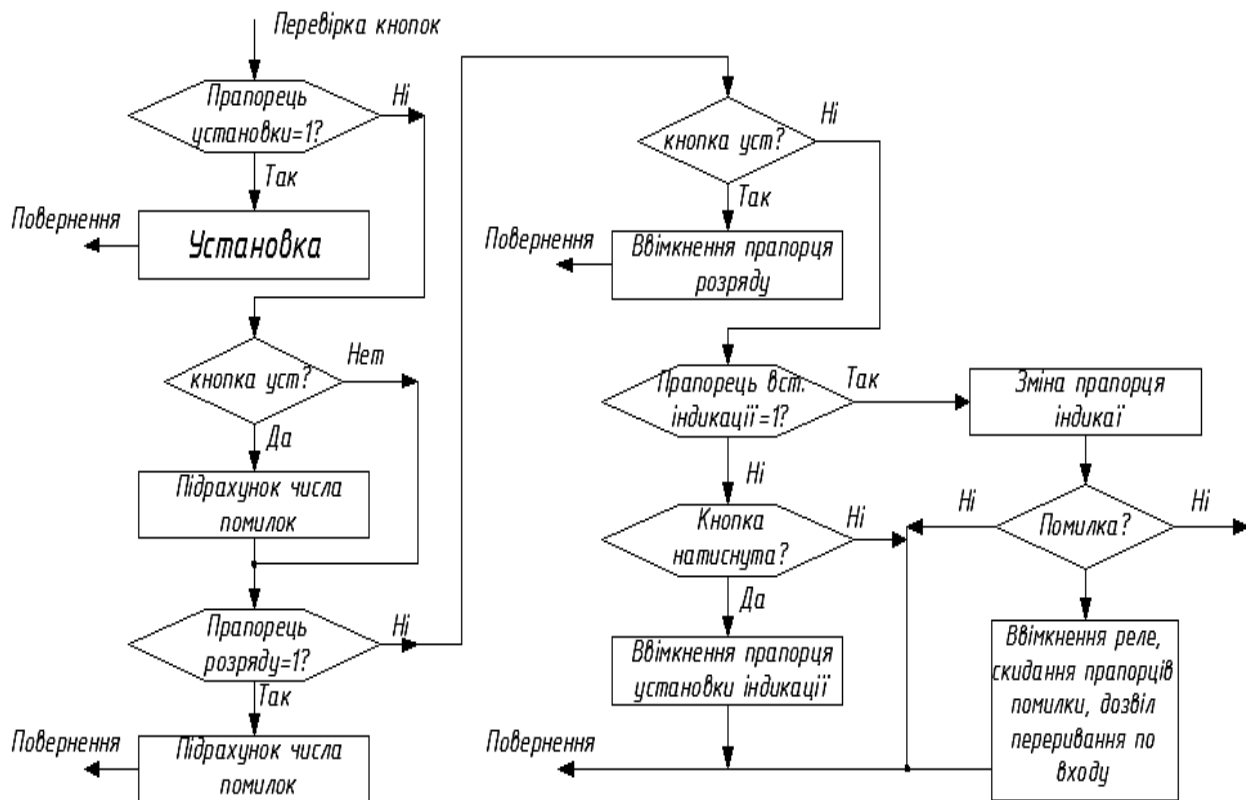


Рисунок 4.3 – Алгоритм роботи програми автомата захисту від перепадів мережевої напруги. Перевірка кнопок

Вибір розряду ніяких особливостей не має, крім того, що напрямок переміщення коми походить від старшого розряду до молодшого. Якщо включений прапорець установки включень індикації, то стан прапорця індикації змінюється на протилежний. Якщо індикація була включена, то вона вимикається, і навпаки. Якщо при зміні прапорця індикації буде включений прапорець помилки, то включаються індикація і виконавче реле, скидається прапор помилки і вирішуються переривання по зміні сигналу на вході. Це відбувається в момент тайм-ауту. Алгоритм роботи підпрограми установки показаний на рисунку 4.4.

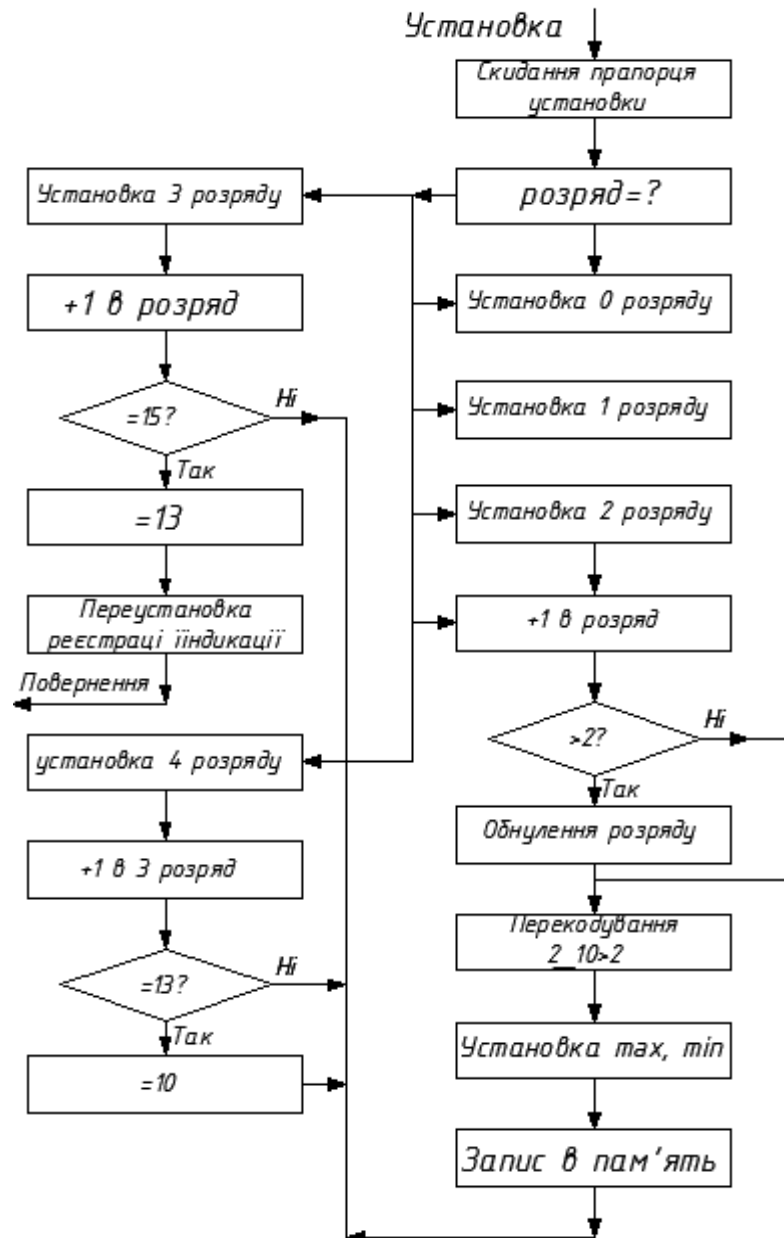


Рисунок 4.4 – Алгоритм роботи програми автомата захисту від перепадів напруги

Отже в підпрограмі встановлення параметрів користувач може змінювати розряд налаштувань, переміщуючи десяткову кому від старшого до молодшого розряду. У випадку, коли під час зміни параметрів виявлено прапорець помилки, автоматично вмикаються індикація та виконавче реле, помилка скидається, а переривання по входу знову дозволяються. Це відбувається в момент завершення тайм-ауту. Такий алгоритм забезпечує коректне переключення режимів і запобігає неконтрольованому спрацюванню пристрою.

4.2 Вибір середовища програмування та створення прикладної програми

«MPLAB – інтегроване середовище розробки, що представляє собою набір програмних продуктів, призначене для полегшення процесу створення, редагування та налагодження програм для мікроконтролерів сімейства PIC, вироблених компанією Microchip Technology. Середовище розробки складається з окремих додатків, пов'язаних один з одним, і включає в себе компілятор з мови асемблер, текстовий редактор, програмний симулятор і засоби роботи над проектами, також середовище дозволяє використовувати компілятор з мови C» [10] (рис. 4.5-4.11).

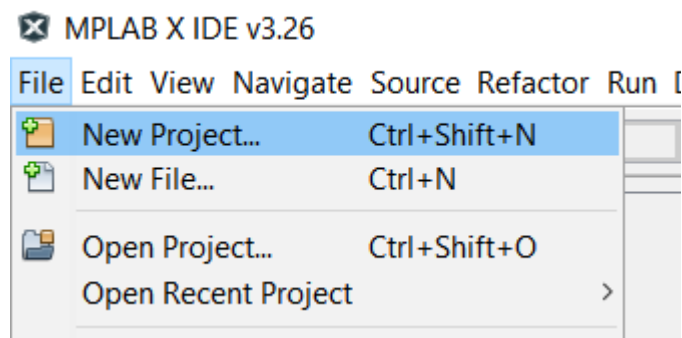


Рисунок 4.5 – Створення нового проекту

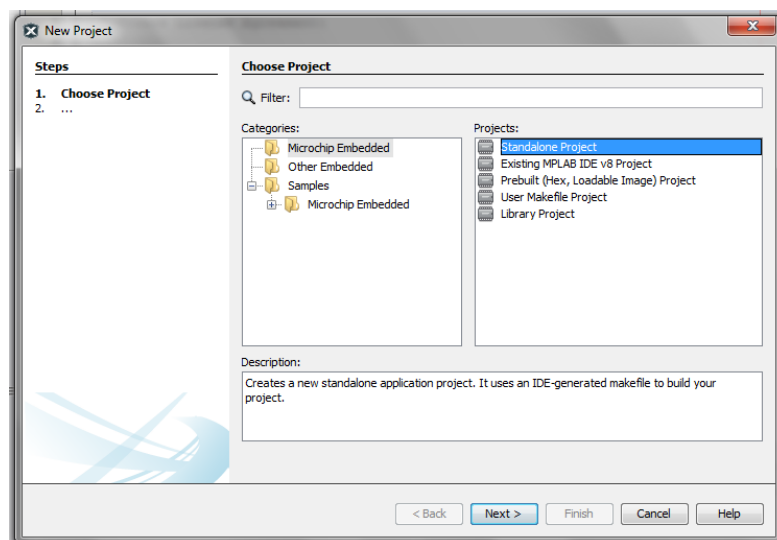


Рисунок 4.6 – Вибір типу проекту

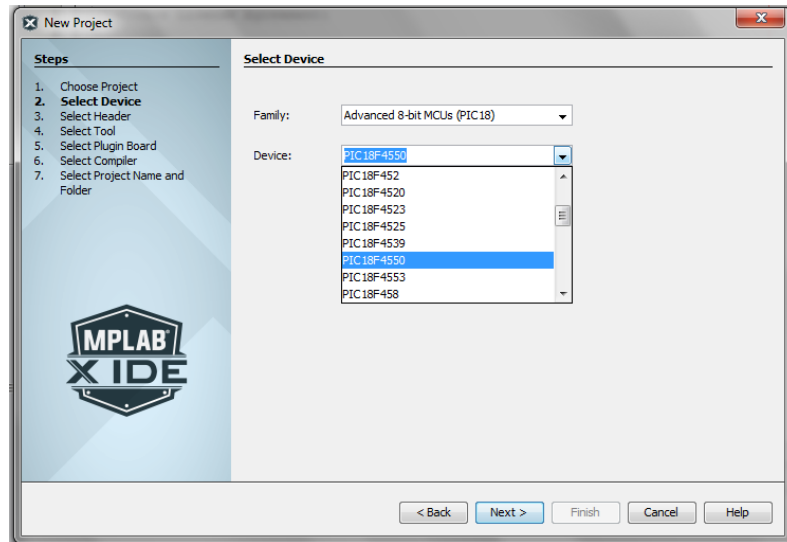


Рисунок 4.7 – Вибір типу мікроконтролера

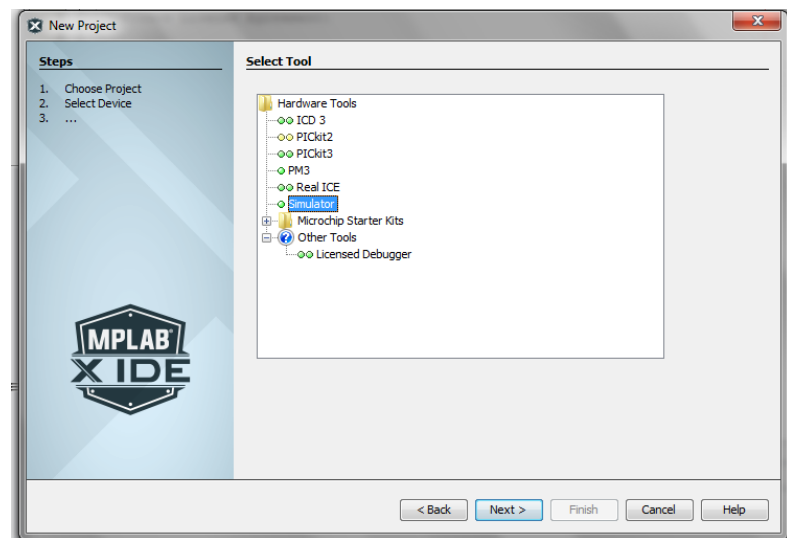


Рисунок 4.8 – Вибір відладчика

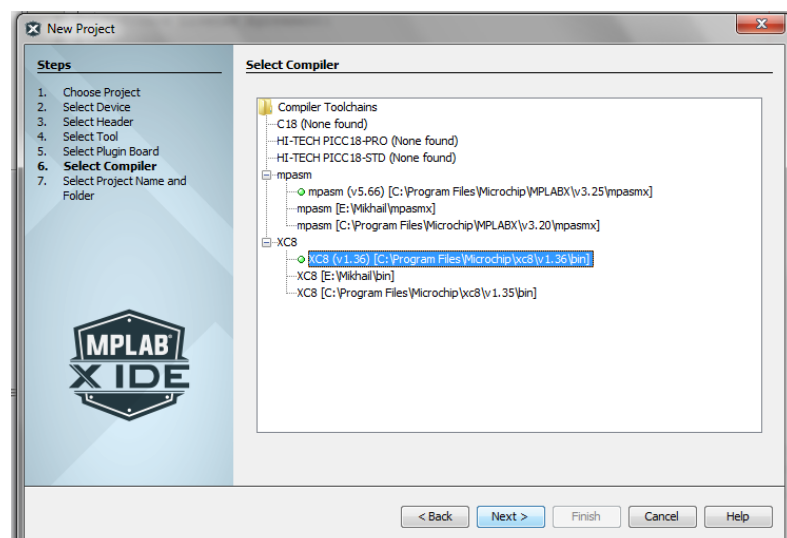


Рисунок 4.9 – Вибір компілятора

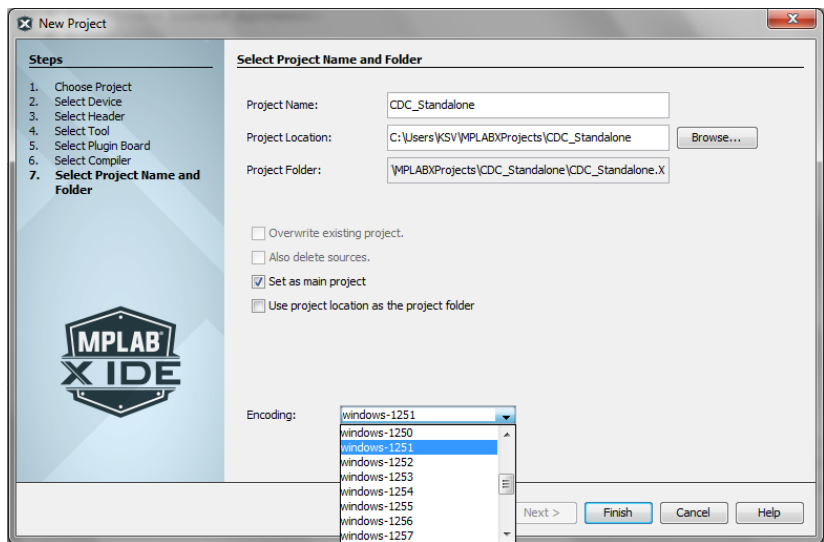


Рисунок 4.10 – Встановлення параметрів проекту

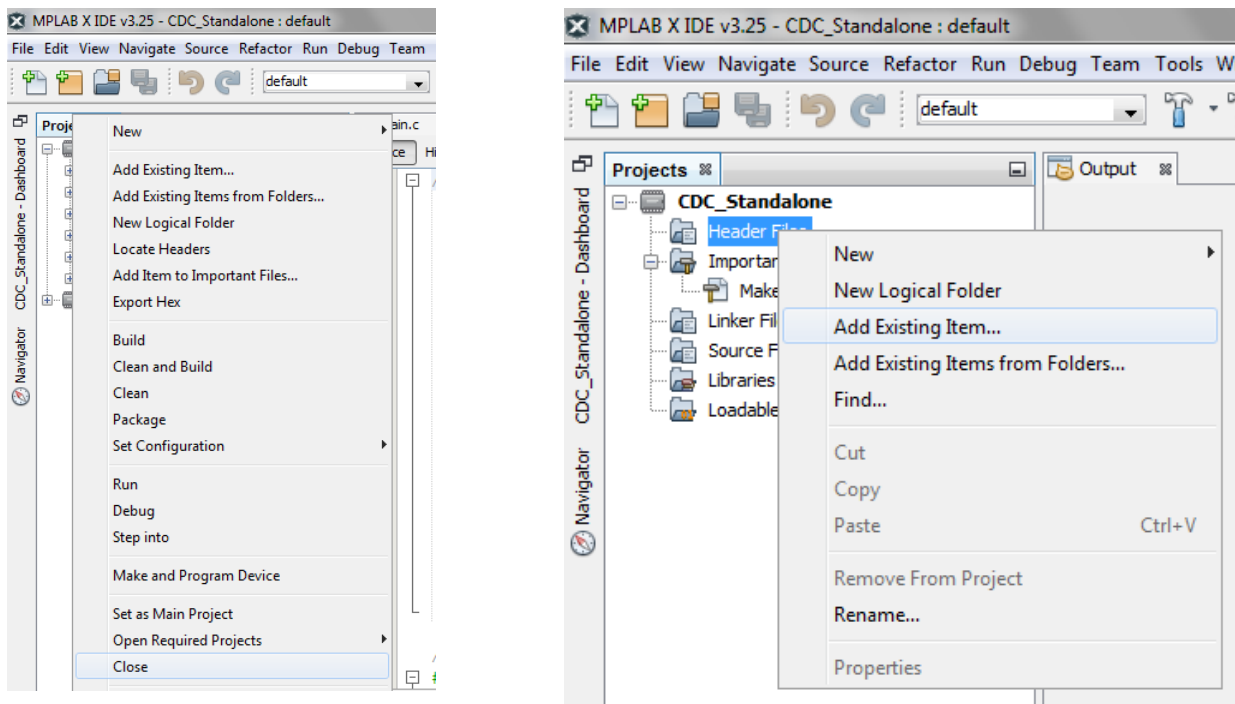


Рисунок 4.11 – Вікна прикріплення файлу до проекту і закриття проекту

Після компіляції виникнуть помилки. Це пов'язано, в основному, із зазначенням на розташування файлів. Для усунення помилок потрібно клацнути лівою кнопкою миші на описі помилки в вікні Output (рис. 4.12). Після цього з'явиться вказівник на помилку (рис. 4.13). Виправляємо рядок `#include <adc.h>` на `#include «adc.h»`, помилка зникає. Далі подібним чином виправляємо всі помилки, пов'язані з розташуванням файлів.

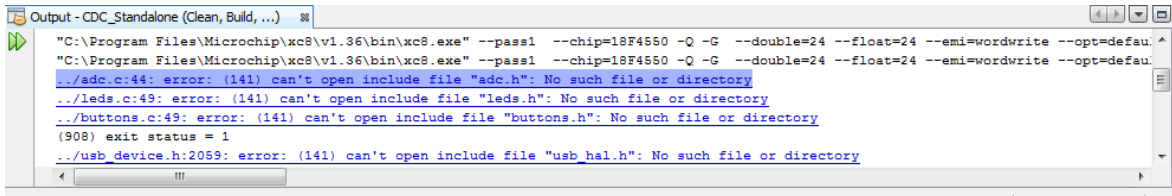


Рисунок 4.12 – Помилка після компіляції

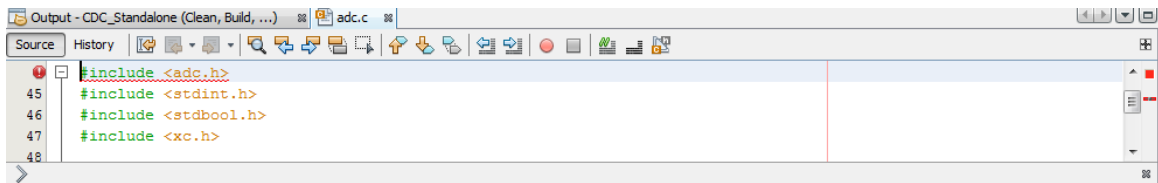


Рисунок 4.13 – Вказівка на помилку

Після того, як компіляція вдалася, залишиться велика кількість попереджень. Що легко пояснити, якщо порівняти рівень попереджень в нашому проекті і в вихідному проекті, який поставляється з бібліотекою MLA. Для цього відкриваємо проект, наводимо курсор, клацаємо правою кнопкою миші вибираємо Properties (рис. 4.14), потім заходимо в активний профіль і дивимося настройки компілятора, навівши курсор на рядок XC8 compiler і клацнувши лівою кнопкою миші. У графі Warning Level є установка «-3», а в бібліотеці MLA «0». Задамо рівень «0» в своєму проекті. Звичайно, було б дуже добре опрацювати кожне попередження, але залишимо велика кількість попереджень на совісті розробника. Поки для нас головне, що проект компілюється.

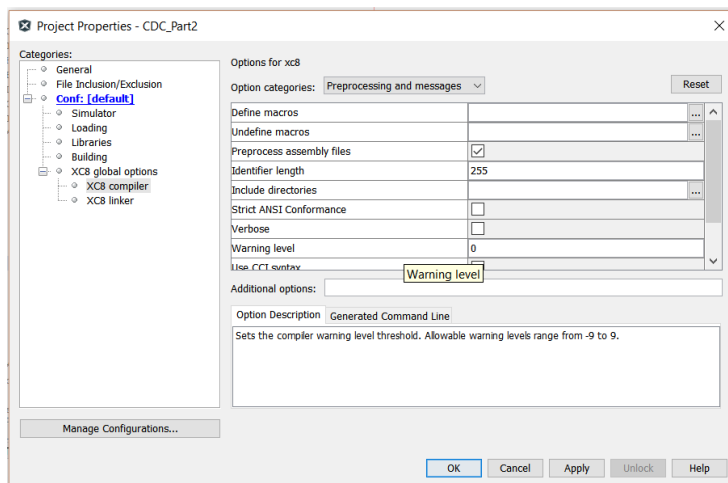


Рисунок 4.14 – Налаштування «Warning level» компілятора

Щоб проект успішно завантажився і працював з завантажувачем HiD Bootloader встановимо необхідні обмеження по розташуванню програми в пам'яті.

По-перше, зміщення для програми. Для цього наведемо мишку на папку нашого проекту (папка з зображенням мікросхеми) і клацнемо правою кнопкою. У вікні налаштувань проекту виберемо найнижчу рядок – Properties. Потім виділимо рядок XC-8 linker, в випадаючому списку Option categories вибираємо Additional options, в графу Code offset вписуємо адресу 0x1000, з якого буде починатися програма і натискаємо кнопку Apply.

По-друге, в випадаючому списку Option categories вибираємо Memory model, в графу ROM ranges поміщаємо запис default, -0-FFF, -1006-1007, -1016-1017, яка налаштує компілятор таким чином, що ці адреси пам'яті не будуть зайняті командами з нашої програми і натискаємо кнопку ОК.

Відкомпілюємо програму, тепер вона буде працювати спільно з завантажувачем, і можна правити проект без якихось побоювань, знаючи, що в разі потреби проект можна легко відновити, або перенести, при необхідності, на інший комп'ютер без установки всієї бібліотеки MLA.

Основу приладу складає мікроконтролер P1C16F873 який оснащений 10-розрядний АЦП послідовного наближення.

Джерелом опорної напруги для АЦП служить напруга живлення мікроконтролера, тому точність вимірювання буде залежати від стабільності напруги живлення. При нарузі живлення 5,12 В крок квантування АЦП дорівнює 5 мВ ($5,12 / 1024 = 0,005$). Якщо використовувати дільник напруги 1:20, то ціна поділки вольтметра буде дорівнює 0,1, а максимальна вимірювальна напруга 51,2 В. Якщо встановити дільник напруги 1:2, то ціна ділення поділки буде дорівнює 0,01 В при максимальній вимірювальній нарузі 5,12 В. При використанні шунта опором близько 0,5 Ом ціна ділення амперметра складе 0,01. При цьому якщо вимірюваний струм складе 1 А, то падіння напруги на шунт 0,5 В.

Очевидно, що для вимірювання великих струмів необхідно встановлювати підсилювач напруги. Так, застосувавши опір шунта, рівний 0,01,

і підсилювач напруги, можна отримати амперметр з межею вимірювання до 10 А. Для використання мілівольтметра в різних додатках положення коми в розрядах може бути встановлено за потребою.

Найефективніший спосіб налагодження програм для МК – застосування спеціалізованих професійних інструментальних оцінних засобів, до яких можна віднести:

- внутрішньосхемні емулятори – програмно апаратне засіб, здатний заміщати собою емульований процесор в реальному пристрої;

- програмні симулятори – програмний засіб здатне імітувати роботу МК і його пам'яті;

- монітори налагодження – спеціальна програма, що завантажується в пам'ять налагодженої системи;

- плати розвитку (Evaluation Boards – оціночні плати) – своєрідні конструктори для макетування прикладних систем;

- емулятори ПЗУ – програмно-апаратний засіб, що дозволяє замінити ПЗУ налагоджуваного пристрою на ОЗП, в яке можна завантажити програму з комп'ютера через один зі стандартних каналів зв'язку.

Окрім цього, існують комбіновані засоби та програмно-апаратні комплекси налагодження. Як правило, симулятор включає відладчик, модель центрального обчислювального блока та пам'яті. Більш функціональні системи додатково містять моделі вбудованих периферійних модулів, зокрема таймерів, портів введення-виведення, аналого-цифрових перетворювачів і систем переривань.

Програмний симулятор повинен підтримувати завантаження програмних файлів у найбільш поширених форматах, забезпечувати детальне відображення стану ресурсів змодельованого мікроконтролера та надавати можливість імітації виконання програми в різних режимах. Під час налагодження модель виконує програмний код, а поточний стан усіх елементів відображається на екрані комп'ютера.

Після завантаження програми користувач має змогу запускати її в покроковому або безперервному режимі, встановлювати умовні й безумовні

точки зупинки, а також контролювати й змінювати вміст регістрів і комірок пам'яті змодельованого мікроконтролера. Це дозволяє оперативно перевіряти логіку роботи програми та коректність виконання арифметичних операцій.

Залежно від рівня застосовуваного відладчика окремі симулятори підтримують також налагодження програм на високому рівні абстракції. Крім того, симулятор може містити додаткові програмні засоби, наприклад інтерфейс взаємодії із зовнішнім середовищем. Наявність такого інтерфейсу дає змогу створювати модель зовнішніх впливів на мікроконтролер і задавати їх поведінку відповідно до визначеного алгоритму.

У реальних системах мікроконтролер, як правило, виконує зчитування інформації з підключених датчиків, її обробку та формування керувальних сигналів для виконавчих пристроїв. У простих симуляторах для імітації роботи датчиків необхідно вручну змінювати стан відповідних периферійних модулів. Водночас сучасні програмні симулятори дозволяють моделювати зовнішні умови за допомогою спеціальних файлів вхідних впливів, які задають послідовність сигналів, що подаються на змодельований пристрій.

Наприклад, для мікроконтролерів сімейства PIC такий файл вхідних даних програмного симулятора наведено на рисунку 4.15.

```
000000000: 00  
000000006: F1  
000000015: 18  
000000109: 1C  
000000203: 61  
000000250: 10  
000000344: 1F  
000000391: 71  
999999999: ff
```

Рисунок 4.15 – Файл програмного симулятора

У деяких моделях симуляторів ця проблема імітації зовнішніх сигналів вирішена таким чином, що симулятор має вбудоване засіб для створення моделей підключених до МК зовнішніх пристроїв, включаючи засоби графічного відображення інформації.

Очевидною особливістю програмних симуляторів є те, що виконання завантажених у них програм відбувається в часовому масштабі, який не відповідає реальному. Проте невисока вартість, а також можливість налагодження програм навіть за відсутності фізичного макета пристрою роблять програмні симулятори надзвичайно зручним і привабливим інструментом для розробника. Крім того, слід зазначити, що існує окремий клас помилок, виявлення яких можливе виключно за допомогою симуляційного моделювання.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи магістра були вирішені всі поставлені завдання, що дало змогу отримати комплексний технічний результат щодо створення мікропроцесорного пристрою контролю напруги для мережі 230 В.

Проаналізовано причини виникнення неякісної напруги в електричних мережах та встановлено їх вплив на роботу побутових і промислових електроприймачів. Визначено, що основними факторами погіршення якості електроенергії є перенапруги, зниження напруги, несиметрія фаз, коливання частоти та поява вищих гармонік. Доведено, що ці відхилення призводять до зниження продуктивності устаткування, прискорення його зношення та зростання аварійності.

Досліджено сучасні методи та засоби захисту електрообладнання від ненормативної напруги. Проаналізовано реле напруги, стабілізатори, супервізори живлення та інші захисні пристрої. Визначено їхні переваги та обмеження, що дозволило обґрунтувати доцільність застосування мікропроцесорного контролера як оптимального рішення для захисту споживачів.

Розроблено структурну схему мікропроцесорного пристрою контролю напруги та визначено принципи його роботи. Встановлено послідовність функціонування основних блоків: вимірювальної частини, генератора тактових частот, комутаційного вузла, індикації та блоку живлення.

Виконано вибір елементної бази. Проаналізовано технічні характеристики мікроконтролера PIC16F873, симісторного оптрона МОС3043, кварцового резонатора, діодів, конденсаторів і стабілітронів. Обрані компоненти забезпечують необхідну швидкодію, точність вимірювань і надійність роботи пристрою.

Розроблено електричну принципову схему пристрою та проведено комп'ютерне моделювання його роботи. Моделювання підтвердило працездатність запропонованих технічних рішень, правильність вибору

параметрів і можливість реалізації пристрою в апаратному виконанні.

Спроектовано топологію друкованої плати у програмному середовищі Sprint-Layout. Визначено оптимальне розташування компонентів, прокладено провідники та сформовано двосторонню плату з урахуванням вимог електромагнітної сумісності та зручності монтажу.

Розроблено алгоритми функціонування мікропроцесорного пристрою контролю напруги. Сформовано логіку вимірювання, аналізу параметрів мережі, прийняття рішень щодо відключення та повторного увімкнення навантаження, що забезпечує надійний захист електроприймачів від аварійних режимів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білінський Й. Й., Книш Б. П. Цифрова схемотехніка. Електронно-обчислювальні пристрої: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ. 2021. 208 с.
2. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226 (дата звернення: 15.09.2025 р.).
3. Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання. XIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». м. Луцьк. ІВВ ЛНТУ, 28 листопада 2025 року. С. 134-137.
4. Реле напруги. Як працює, як вибрати. URL: https://activelectro.in.ua/rele-naprygi-porady-dlya-vyboru/?srsltid=AfmBOora4jL64_e0XOUdjFrzaps6JSKzMv-KB-YY9Y_8fVVSHv5kWKAD (дата звернення: 12.10.2025 р.).
5. Prystupa S., Tkachuk A., Seleryna Y., Moroz S., Vynnychenko I. and Zabolotnyi O., «Distribution of the Surface Current Density in the Plate of a Quartz Resonator». 2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2024, P. 1-6.
6. PIC16F873A Datasheet. URL: <https://www.datasheetcafe.com/pic16f873a-datasheet-microcontroller-microchip/> (дата звернення: 17.10.2025 р.).
7. MOC3043 Triac Coupler Datasheet. URL: <https://www.futurlec.com/LED/MOC3043.shtml> (дата звернення: 25.10.2025 р.).
8. Electronoff. Електронні компоненти та обладнання. URL: <https://electronoff.ua/ua/pages/about-electronoff> (дата звернення: 20.10.2025 р.).
9. Друковані плати підсилювачів в форматі lay. URL: <https://subcase.com/uk/pechatnye-platy-usilitelei-formate-lay-kakoi-programmoi-mozhno-otkryt-fail-lay.html> (дата звернення: 25.10.2025 р.).
10. MPLAB® X Integrated Development Environment (IDE). URL: <https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/mplab-x-ide> (дата звернення: 12.11.2025 р.).

ДОДАТКИ

Додаток А
Тези доповіді на конференції (копія)

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students

об'єктно-орієнтовані технології

ЕОМ

КОНТРОЛЕР

ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ

МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

**ACTUAL PROBLEMS
OF AUTOMATION AND CONTROL**

conference materials

АСУ

ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА

АСУ ТП

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ЕОМ

Інформаційні системи

Issue № 13

Lutsk - 2025

СЕКЦІЯ «МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ»

Крупський О. В., Приходько О. С., Вавринюк К. В. Розробка інструменту для генерації анотованих датасетів для навчання AI-агентів	83
Лишук В., Крутий П., Антонюк В. Найпростіша математична модель однофазного випростувача	86
Мищенко Д. О. Оцінка соціально-економічних переваг впровадження систем управління на базі DC-мікромереж у сільських населених пунктах з альтернативними джерелами енергії	89
Нечипорук Р. О. Система інтелектуальної діагностики стану електроенергетичного обладнання на основі багатосенсорних даних та гібридних моделей штучного інтелекту	92
Стьопкін В. В., Білий В. В., Морозов М. В. Розробка математичної моделі електропривода постійного струму зі спостерігачем стану та пружними ланками	94
Юрченко Ю. В., Заковоротний О. Ю. Підготовка та аналіз джерел фінансових даних, як початковий етап стохастичного моделювання часових рядів методами машинного навчання	99

СЕКЦІЯ «МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ»

Гончар А. В., Охримович М. Б. Вплив технологічних факторів на кінематичну точність циліндричних зубчатих коліс	104
Павлович А. О. Удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв та особливості їх проектування	108
Слабкий А. В., Котик С. І. Аналіз конструкцій та перспективи модернізації універсальних випробувальних машин	114

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИКА В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ»

Герман Б. А., Бартошик О. В., Цюнящук Я. В. Дистанційне керування сигналізацією за допомогою модуля GSM	117
Євсюк М. М., Ковалюк Н. В. Розроблення мікроконтролерного терміналу для автоматизованого керування системами вуличного освітлення	121
Заблоцький В. Ю., Гикавий С. В. Розроблення системи відеоспостереження промислового підприємства	124
Лишук В., Денисюк К. Застосування принципів спектрального ущільнення для збільшення пропускної здатності оптоволокна	131
Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання	134
Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В. Розроблення бездротового комунікаційного пристрою на основі STM32 та LoRa	137
Хвищун М. В., Сидорук В. В., Хвищун Д. М., Бернасюк М. В. Розроблення інтелектуальної системи керування домашнім опаленням з використанням Raspberry Pi 4	142
Шумік А. О., Шибенюк Р. А., Захарчук М.Д., Хвищун М. В. Система розпізнавання голосових команд на базі Raspberry Pi	148
Якимчук Н. М., Карпінський Н. К. Організація UART-комунікації в STM32 для системи комутації кінцевих пристроїв	152
Якимчук Н. М., Лишук В. В. Методологія інтегрованого моделювання та спільного проектування в сучасних електронних системах	156

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

УДК 681.514

Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О.

Луцький національний технічний університет

E-mail: s.moroz@lntu.edu.ua

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ПАЯЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті розглянуто проблему забезпечення точного та стабільного регулювання температури паяльного обладнання, що є критичним для отримання якісних паяних з'єднань та запобігання пошкодженню електронних компонентів. Проаналізовано особливості теплових процесів у нагрівачах паяльників, їхню нелінійність, інерційність та вплив зовнішніх збурень. Проведено огляд сучасних методів регулювання температури – від систем без зворотного зв'язку до П, ІІ та ПІІД-регуляторів, а також розглянуто апаратні й мікроконтролерні засоби їх реалізації. Виконано порівняльний аналіз точності, складності та динамічних характеристик різних підходів. Показано, що найвищу ефективність забезпечують мікроконтролерні системи зі зворотним зв'язком на основі ПІІ та ПІІД алгоритмів. Зроблено висновок про перспективність застосування адаптивних цифрових регуляторів для підвищення стабільності та швидкодії сучасних паяльних станцій.

Ключові слова: температура, закони регулювання, методи регулювання температури, паяльне обладнання.

V. Lototsky, O. Melnyk O. Vlasyk. Analysis of temperature control methods for soldering equipment. The article considers the problem of ensuring accurate and stable temperature control of soldering equipment, which is critical for obtaining high-quality solder joints and preventing damage to electronic components. The features of thermal processes in soldering iron heaters, their nonlinearity, inertia and the influence of external disturbances are analyzed. A review of modern temperature control methods is conducted - from systems without feedback to P, PI and PID regulators, and hardware and microcontroller means of their implementation are also considered. A comparative analysis of the accuracy, complexity and dynamic characteristics of different approaches is performed. It is shown that the highest efficiency is provided by microcontroller systems with feedback based on PI and PID algorithms. A conclusion is made about the prospects of using adaptive digital regulators to increase the stability and speed of modern soldering stations.

Keywords: temperature, regulation laws, temperature control methods, soldering equipment.

Постановка проблеми.

Паяльне обладнання широко застосовується у радіоелектронному монтажі, ремонті друкованих плат, мікропайці та виробничих процесах. Одним із ключових чинників, що визначає якість паяння, є стабільність та точність підтримання температури нагрівального елемента [1-3]. Нестабільність температури призводить до низки негативних наслідків: погіршення змочуваності припою, пошкодження електронних компонентів перегрівом, формування холодних або слабких паяних з'єднань. Отже, правильна реалізація системи регулювання температури паяльників має суттєве практичне значення.

Сучасні паяльні станції використовують різні методи регулювання: від простих терморегуляторів, таких як фазові або імпульсні регулятори потужності, до повноцінних систем на базі ПІІД-регуляторів із високоточними датчиками температури [4-6]. Кожен метод має свої переваги, обмеження та області застосування. Крім того, засоби реалізації регуляторів можуть бути як апаратними (аналогові схеми), так і мікропроцесорними, що суттєво впливає на функціональні можливості системи.

Точність керування температурою паяльника є складною інженерною задачею через такі чинники: нелінійність об'єкта керування; постійно змінне теплове навантаження; похибки датчиків температури; вплив мережевої напруги; вимоги до енергоспоживання.

Проблема полягає у виборі та реалізації методу регулювання, який забезпечить: достатню точність підтримання температури; швидку реакцію на зміни теплового навантаження; мінімальні коливання температури; стійкість системи в широкому діапазоні умов; низьку вартість і технологічність реалізації (за потреби).

Огляд актуальних досліджень з проблеми.

Системи регулювання температури широко застосовуються у промисловості, побутових приладах і науковому обладнанні. Для паяльних інструментів характерне використання двох груп

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

регуляторів [7-11].

Перша група – системи без зворотного зв'язку (відкриті системи). Такі регулятори контролюють лише подану потужність нагрівача, не вимірюючи фактичну температуру. До них належать: фазові регулятори на симісторах або тиристорах; імпульсні регулятори на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вони забезпечують лише зміну середньої потужності, не гарантують стабільної температури та не компенсують зовнішні збурення.

Друга група – системи зі зворотним зв'язком (закриті системи) (рисунк 1). Використовують датчики температури: термопари (тип К, тип J); терморезистори (RTD, наприклад Pt100); термістори (NTC); датчики Холла у спеціалізованих жалах Hakko/T12. Такі системи можуть реалізовувати простий релейний контроль або складніші закони регулювання.



Рисунок 1 – Узагальнена схема термостатування зі зворотним зв'язком

Формулювання цілей статті.

У контексті терморегулювання потрібно провести аналіз класичних законів керування (П, ПІ, ПІД) та методів регулювання. Також варто розглянути схемотехнічні рішення: фазових регуляторів, регуляторів на симісторах, широтно-імпульсних регуляторів і мікроконтролерних систем.

Метою цієї роботи є аналіз методів температурного регулювання, порівняння їх характеристик та дослідження технічних засобів, які застосовуються для створення регуляторів паяльного обладнання.

Основна частина.

Проаналізуємо закони регулювання.

Пропорційний (П-регулятор) формує керуючий сигнал, пропорційний відхиленню температури від заданої. Переваги: простота; висока швидкість реакції. Недоліки: статична помилка; можливі коливання при високому коефіцієнті підсилення.

Пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор) додає інтегральну складову, що усуває постійну похибку. Переваги: висока точність; стабільність. Недоліки: більша інерційність; складніша настройка.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД-регулятор) враховує швидкість зміни температури (диференціальну складову), що зменшує перерегулювання та покращує динаміку. Переваги: найкраща якість регулювання; мінімальні коливання. Недоліки: потребує точного налаштування; чутливий до шумів датчика.

Розглянемо поширені технічні засоби реалізації терморегулювання.

Фазові регулятори на симісторах здійснюють плавне регулювання потужності шляхом контролю кута відкривання симістора. Переваги: низька вартість; простота схеми. Недоліки: високий рівень електромагнітних завад; непридатні для прецизійного регулювання температури.

Імпульсні регулятори з ШІМ керують нагрівачем шляхом чергування увімкнених та вимкнених інтервалів. Переваги: низькі втрати; стабільна робота. Недоліки: нерівномірний нагрів у деяких режимах; потребують фільтрації завад.

Мікроконтролерні регулятори дають змогу реалізувати складні алгоритми, адаптивне керування, калібрування датчиків, автоматичні режими. Переваги: висока точність; цифрова фільтрація сигналів; можливість реалізації ПІД. Недоліки: складніша розробка; вища собівартість.

Нагрівач паяльника є нелінійним тепловим об'єктом зі значною інерційністю. Перехідні процеси відбуваються протягом: 1-3 секунд – для жала картриджного типу (Hakko T12 тощо); 10-30 секунд – для класичних паяльників з ніхромовим нагрівачем.

Модель можна описати аперіодичною ланкою першого або другого порядку. Основні фактори, що ускладнюють регулювання: змінний тепловідвід на жало; шум у сигналі термопари; залежність опору нагрівача від температури; зміна теплових параметрів під час старіння.

Проведемо порівняльний аналіз методів регулювання (таблиця 1).

Метод регулювання без зворотного зв'язку полягає в тому, що зміна потужності прямо

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

впливає на кінцеву температуру, але не враховує зовнішніх збурень. Переваги: дешевизна; мінімальна складність. Недоліки: температура нестабільна; неможливо встановити точне значення; висока залежність від напруги мережі. Цей метод підходить лише для побутових паяльників і не використовується у професійних станціях.

Метод релейного регулювання (двопозиційний закон) полягає в періодичному вмиканні та вимиканні нагрівача, що утворює температурну гістерезисну петлю. Переваги: дуже проста реалізація; стабільність у межах 5–30 °С. Недоліки: сильні коливання температури, непридатність для прецизійної пайки SMD.

Метод пропорційного регулювання плавно змінює подану потужність залежно від помилки. Переваги: швидка реакція; менші коливання. Недоліки: статична похибка, що особливо критично при зміненому тепловому навантаженні.

Метод ПІ-регулювання полягає в тому, що інтегральна складова поступово компенсує залишкове відхилення. Переваги: висока точність (1–3 °С); мінімальні перерегулювання. Недоліки: складніше налаштування; можливість інерційних коливань при поганих параметрах. ПІ-регулятори є найпоширенішими у цифрових паяльних станціях.

Метод ПІД-регулювання враховує динаміку зміни температури (рисунок 2). Переваги: найточніший метод; швидка реакція на тепловий удар (коли жало торкається масивного провідника); мінімальне перерегулювання. Недоліки: потреба у фільтрації диференціальної складової; потребує правильного підбору коефіцієнтів. ПІД-регулятори застосовуються у високоточних станціях для ремонту мікроелектроніки.

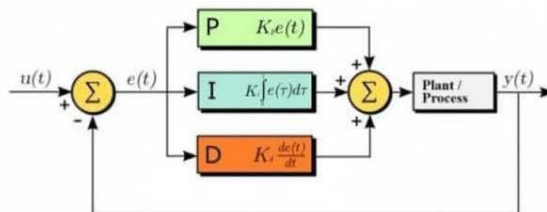


Рисунок 2 – Блок схема ПІД регулятора

Таблиця 1 - Порівняння підходів методів регулювання

Метод	Точність	Складність	Реакція на навантаження	Собівартість	Область застосування
Без зворотного зв'язку	Низька	Дуже низька	Немає компенсації	Найнижча	Побутові паяльники
Релейний	Середня	Низька	Повільна	Низька	Недорогі станції
ПІ-регулятор	Середня	Низька	Середня	Низька	Прості системи
ПІ-регулятор	Висока	Середня	Висока	Середня	Професійні станції
ПІД-регулятор	Дуже висока	Висока	Дуже висока	Вища	Найякісніше професійне обладнання

З аналізу видно, що найкращі результати дають системи зі зворотним зв'язком на основі ПІ та ПІД законів регулювання, реалізовані на мікроконтролерах.

Висновки.

У статті проведено аналіз методів регулювання температури та засобів реалізації регуляторів, що застосовуються у сучасному паяльному обладнанні. Встановлено, що вибір методу регулювання суттєво впливає на стабільність температури, якість паяних з'єднань і довговічність компонентів.

Системи без зворотного зв'язку не забезпечують необхідної точності температури та не компенсують змінне теплове навантаження, тому придатні лише для найпростіших задач. Релейне керування покращує стабільність, але все ще має значні коливання температури та непридатне для високоточного паяння. Пропорційне та ПІ-регулювання значно підвищують якість регулювання, при цьому ПІ-алгоритм дозволяє повністю усунути статичну похибку. ПІД-регулятор є найбільш

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

ефективним завдяки врахуванню швидкості зміни температури та забезпеченню найкращої динаміки. Мікроконтролерні регулятори дозволяють реалізувати точне вимірювання, цифрову фільтрацію шумів і складні алгоритми керування, що робить їх оптимальним рішенням для високоточного паяльного обладнання.

З технічної точки зору, найраціональніше поєднання — це використання швидкого датчика температури (термопари або датчика вбудованого типу) разом з ПІ або ПІД алгоритмом на базі мікроконтролера.

Таким чином, перспективним напрямом удосконалення паяльного обладнання є застосування адаптивних цифрових регуляторів, здатних компенсувати змінні теплові навантаження, прогнозувати поведінку системи та забезпечувати високоточне підтримання температури в реальних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аналогові дані, цифрові дані. Дія і застосування аналоговоцифрових і цифро-аналогових перетворювачів, введення і виведення інформації URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/16,05/other/tema_6_analogovi_dani_czifrovi_dani_diya_i_zastosuvannya_analogovo-czifrovix_i_czifro-analogovix_peretvoryuvachiv_vvedennya_i_vivedennya_informacziyi.pdf (дата звернення 18.11.2025р.).
2. Оптопара із симісторним виходом MOC3063 URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/optosimistor-moc3063>(дата звернення 19.11.2025р.).
3. Якимчук Н. М., Цизь Т. П., Оксентюк Б. В. Апаратне забезпечення методів температурного регулювання паяльної станції Actual Problems of Automation and Control.2023 №11. С 263-268.
4. Adamy J. Nonlinear Systems and Controls Berlin: Springer Vieweg, 2022. – 754 p.
5. ATMEGA8 Datasheet URL: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/80247/ATMEL/ATMEGA8/1305/10/ATMEGA8.html> (дата звернення 18.11.2025р.).
6. Developing a self-regulating soldering iron based on induction heating URL: <https://www.redalyc.org/journal/496/49645153021/html/#gf4> (дата звернення 8.11.2025р.).
7. Hunter Scott. Designing Electronics that Work. Digital version, v1. 2021. 311 p.
8. Dugdale, J.S. The electrical Properties of Metals and Alloys. Edward Arnold, London. 2020
9. Jäckle, J. Über die Ursache der Thermospannung. Fakultät für Physik, Universität Konstanz. 2020
10. Kanimba E. Modeling of a Thermoelectric Generator Device/ Zhiting Tian. Intechopen.com. 2021.
11. Цирульник С.М. Лисенко Г.Л. Проектування мікропроцесорних систем. Вінниця: ВНТУ, 2021 191с.

УДК 621.396.67:004.383.4

Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗДРОТОВОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ STM32 ТА LORA

У роботі представлено розроблення енергоефективного бездротового комунікаційного вузла на основі мікроконтролера сімейства STM32 та радіомодуля LoRa SX1278, призначеного для передавання телеметричних даних на великі відстані у системах Інтернету речей (IoT). Актуальність дослідження визначається зростаючою потребою у малопотужних автономних пристроях, здатних забезпечувати надійний радіозв'язок у складних електромагнітних та географічних умовах без застосування промізкої інфраструктури.

Проаналізовано обмеження традиційних бездротових технологій (Wi-Fi, BLE, ZigBee), які характеризуються недостатньою дальністю зв'язку або підвищеним енергоспоживанням, що ускладнює їх застосування у розподілених сенсорних мережах. Показано доцільність використання технології LoRa (Long Range), яка забезпечує передавання даних на відстань до кількох кілометрів при мінімальних витратах енергії, що робить її перспективною для систем промислового моніторингу, аграрних об'єктів, розумного міста та екологічного контролю.

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Призначення виводів мікроконтролера PIC16F873

Позначення входу	№ вивода DIP/ SOIC	Тип I/O/P	Тип буфера	Опис
OSC1/CLKIN	10	I	ST/CMOS ⁽³⁾	Вхід генератора / вхід зовнішнього тактового сигналу
OSC2/CLKOUT	9	O	–	Вихід генератора. Підключається кварцовий або керамічний резонатор. В RC режимі тактового генератора на виході OSC2 присутній тактовий сигнал CLKOUT, рівний $F_{osc}/4$
-MCLR/V _{PP}	1	I/P	ST	Вхід скидання мікроконтролера або вхід напруги програмування. Скидання мікроконтролера відбувається при низькому логічному рівні сигналу на вході.
RA0/AN0 RA1/AN1 RA2/AN2/V _{REF} - RA3/AN3/V _{RE} F+ RA4/T0CKI RA5/-SS/AN4	2 3 4 5 6 7	I/O I/O I/O I/O I/O I/O	TTL TTL TTL TTL ST TTL	Двохнаправлений порт введення / виводу PORTA. RA0 може бути налаштований як аналоговий канал 0 RA1 може бути налаштований як аналоговий канал 1 RA2 може бути налаштований як аналоговий канал 2 або вхід негативної опорної напруги RA3 може бути налаштований як аналоговий канал 3 або вхід позитивної опорної напруги RA4 може використовуватися в якості входу зовнішнього тактового сигналу для TMR0. Вихід з відкритим стоком. RA5 може бути налаштований як аналоговий канал 1 або вхід вибору мікросхеми в режимі веденого SPI
RB0/INT RB1 RB2 RB3/PGM RB4 RB5 RB6/PGC RB7/PGD	21 22 23 24 25 26 27 28	I/O I/O I/O I/O I/O I/O I/O	TTL/ST ⁽¹⁾ TTL TTL TTL TTL TTL TTL/ST ⁽²⁾ TTL/ST ⁽²⁾	Двохнаправлений порт введення / виведення PORTB. PORTB має програмно підключені підтягуючі резистори на входах. RB0 може використовуватися в якості входу зовнішніх переривань. RB3 може використовуватися в якості входу для режиму низьковольтного програмування. Переривання по зміні рівня вхідного сигналу Переривані по зміні рівня вхідного сигналу
RC0/T1OSO/T1CK	11 12	I/O I/O	ST ST	Двохнаправлений порт введення / виведення PORTC.

RC1/T1OSI/CC P2	13 14	I/O I/O	ST ST	RC0 може використовуватися в якості виходу генератора TMR1 або входу зовнішнього тактового сигналу для TMR1. RC1 може використовуватися в якості входу генератора для TMR1 або виведення модуля CCP2 RC2 може використовуватися в якості виводу модуля CCP1 RC3 може використовуватися в якості входу / виходу тактового сигналу в режимі SPI і I ² C. RC4 може використовуватися в якості входу даних в режимі SPI або вхід / вихід даних у режимі I ² C RC5 може використовуватися в якості виходу даних в режимі SPI RC6 може використовуватися в якості виходу передавачі USART в асинхронному режимі або виведення синхронізації USART в синхронному режимі.
RC2/CCP1	15	I/O	ST	
RC3/SCK/SCL	16	I/O	ST	
RC4/SDI/SDA	17	I/O	ST	
RC5/SDO	18	I/O	ST	
RC6/TX/CK				
RC7/RX/DT				
V _{SS}	8, 19	P	-	Загальний вихід для внутрішньої логіки і портів введення / виведення
V _{DD}	20	P	-	Позитивна напруга живлення для внутрішньої логіки і портів введення / виводу