

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»


Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-24-1


Підпис


Липовецький Т.М.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

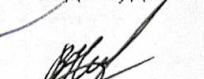
доц. Поліщук А.О.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

доц. ТИМОЩУК О.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

10 12 2025 р.


ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр і назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

 12 .2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Липовецький Тарас Михайлович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора

керівник роботи доц. Поліщук А.О.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025р

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики побутових зварювальних трансформаторів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора. 3. Розрахунок вузлів мікроконтролерного регулятора струму. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Регулятори струму. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Регулятори струму. Схема структурна (A1). Аркуш 3. Мікроконтролерний регулятор струму побутового зварювального трансформатора. Схема структурна (A1). Аркуш 4. Мікроконтролерний регулятор струму побутового зварювального трансформатора. Схема електрична принципова (A1). Аркуш 5. Плата друкована (A1). Аркуш 6. Мікроконтролерний регулятор струму побутового зварювального трансформатора. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

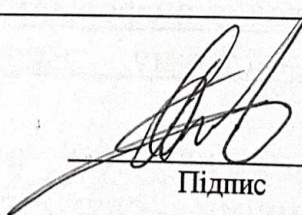
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 28.10.24р.	
2. Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора	до 15.11.24р.	
3. Розрахунок вузлів мікроконтролерного регулятора струму	до 17.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент


Підпис

Т.М. Липовецький
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

А.О. Поліщук
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Липовецький Тарас Михайлович

2. Тема магістерської роботи Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 89

5. Сучасні побутові зварювальні трансформатори широко застосовуються для виконання монтажних і ремонтних робіт, однак традиційні системи регулювання зварювального струму часто характеризуються обмеженою точністю, значними енергетичними втратами та недостатньою гнучкістю налаштувань. Використання застарілих індукційних або електромеханічних методів регулювання ускладнює стабілізацію зварювальної дуги та знижує якість зварних з'єднань, особливо за змінних умов навантаження. У зв'язку з цим актуальним є створення мікроконтролерного регулятора струму, який поєднує простоту схемної реалізації, надійність роботи та можливість програмного керування параметрами зварювання. Розробка такого пристрою є важливою науково-технічною задачею, зумовленою необхідністю підвищення енергоефективності, стабільності зварювального процесу та доступності сучасних керованих рішень для побутового і малосерійного зварювального обладнання.

В магістерській роботі розроблено мікроконтролерний регулятор струму побутового зварювального трансформатора. В першому розділі зроблено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора. В третьому розділі виконано розрахунок вузлів мікроконтролерного регулятора струму.

Підпис студента _____

" 10 " 12 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від " 23 " 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК добре / с / 78

Рекомендації ЕК впровадитися з виробництвом




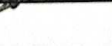
Особливі відмітки -

Технічний секретар Буряк Т.В.

" 23 " 12 20 25 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1 Загальні відомості про зварювання	8
1.2 Класифікація видів електричного зварювання	10
1.3 Загальні відомості про електродугове зварювання	13
1.4 Ручне дугове зварювання	15
1.5 Огляд схем регуляторів струму	17
1.6 Технічне завдання та вимоги до розробки мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора	35
1.7 Висновки до першого розділу	37
2 Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора	
2.1 Розробка варіантів структурних схем регулятора струму	38
2.2 Розробка електричної принципової схеми регулятора струму	42
2.3 Вибір джерела змінного струму для ручного дугового зварювання	60
2.4 Схема електрична принципова та її принцип дії	63
2.5 Розробка програмного забезпечення	64
2.6 Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора	67
2.7 Призначення та технічні характеристики мікроконтролерного регулятора струму	70

MPMA25.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	
Виконав		Липовецький			Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора Пояснювальна записка
Перевір.		Поліщук			
Н.контр.		Поліщук			Літера
Затвер.		Неймак			Аркуш
					Аркушів
					М
					4
					89
					ХНУ гр.ЕТм-24-1

2.8	Умови експлуатації мікроконтролерного регулятора струму	71
2.9	Підготовка до роботи та порядок роботи з мікроконтролерним регулятором струму	71
2.10	Висновки до другого розділу	72
3	Розрахунок вузлів мікроконтролерного регулятора струму	74
3.1	Розрахунок трансформатора живлення регулятора	74
3.2	Розрахунок фільтра	77
3.3	Розрахунок потужності споживання	78
3.4	Розрахунок надійності схеми	79
3.5	Висновки до третього розділу	84
	Висновки	85
	Перелік джерел посилання	87
	Додаток А	

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Електричне зварювання металів є одним із найпоширеніших і найефективніших методів з'єднання деталей у сучасному машинобудуванні, будівництві, приладобудуванні та побутових ремонтних роботах [1]. Це безперервний технологічний процес, що постійно вдосконалюється завдяки розвитку електротехніки, електроніки та систем автоматичного керування [2]. З кожним роком зростає обсяг виробництва зварювальних конструкцій, розширюється номенклатура матеріалів і впроваджуються нові способи зварювання, що сприяє підвищенню продуктивності праці та розширенню технологічних можливостей галузі [1, 2].

Застосування зварювання дозволяє значно зменшити витрати матеріалів, знизити масу виробів і скоротити час виготовлення конструкцій [1]. Поряд із розробленням нових способів зварювання відбувається суттєве вдосконалення традиційних, зокрема дугового зварювання, яке залишається найбільш розповсюдженим у промисловості та побуті [2]. Завдяки розвитку науково-технічного прогресу можливості дугового зварювання поширилися від мікроз'єднань у мікроелектроніці до товстостінних деталей важкого машинобудування, що потребує стабільного джерела живлення та точного регулювання зварювального струму [3].

Сучасні тенденції у зварювальному виробництві орієнтовані на підвищення ступеня механізації та автоматизації [2]. Це стосується не лише самого процесу зварювання, а й допоміжних операцій - підготовки, складання, подачі електродів, контролю режимів і якості з'єднання [2]. У таких умовах підвищуються вимоги до зварювального обладнання, зокрема до джерел живлення, стабільності зварювальної дуги та систем регулювання зварювального струму [3].

Важливе значення має створення сучасних регуляторів зварювального струму, що забезпечують оптимальні параметри процесу та дозволяють стабілізувати дугу при змінних навантаженнях [4]. Традиційні аналогові регулятори, які застосовуються у побутових зварювальних трансформаторах, часто мають низьку

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

точність, великі габарити та обмежену функціональність [5]. Впровадження мікроконтролерних систем дає змогу суттєво підвищити ефективність керування, забезпечити гнучке налаштування режимів, індикацію параметрів, автоматичний захист та економне використання електроенергії [4, 5].

Розробка мікроконтролерного регулятора струму для побутового зварювального трансформатора є актуальним завданням, що відповідає сучасним вимогам енергозбереження, безпеки праці та технологічної ефективності [1, 4]. Такий пристрій дозволяє стабілізувати процес горіння дуги, зменшити коливання зварювального струму, покращити якість шва та продовжити термін служби електродів і самого трансформатора [3, 5]. Крім того, використання мікроконтролера відкриває можливості для подальшої автоматизації зварювального процесу, зокрема реалізації функцій плавного пуску, захисту від перевантаження, цифрової індикації та дистанційного керування [4].

Актуальність теми полягає у необхідності створення енергоефективного, надійного та компактного мікроконтролерного регулятора струму, призначеного для побутових зварювальних трансформаторів [1-5]. Його впровадження сприятиме підвищенню стабільності дуги, зниженню споживання електроенергії, покращенню умов праці зварювальника та підвищенню якості зварних з'єднань у побутовому й малому виробництві.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про зварювання

Зварювання - це технологічний процес створення нероз'ємного з'єднання матеріалів шляхом виникнення міжатомних або міжмолекулярних зв'язків у місці контакту деталей під дією тепла, тиску або їх поєднання [6, 7]. Під час зварювання формується спільна кристалічна структура металу в зоні шва, що забезпечує механічну міцність, герметичність та однорідність з'єднання [8].

Процеси зварювання відіграють ключову роль у сучасному машинобудуванні, будівництві, приладобудуванні, суднобудуванні та енергетиці. Вони дозволяють виготовляти конструкції складної форми з мінімальними витратами матеріалів і трудових ресурсів, замінюючи болтові, заклепкові або паяні з'єднання [6]. Завдяки високій економічній ефективності, технологічній гнучкості та можливості механізації, зварювання стало невід'ємною частиною виробничих процесів практично у всіх галузях промисловості [7].

Фізична сутність процесу полягає у формуванні міжатомних зв'язків між поверхнями деталей, що контактують. Для виникнення таких зв'язків необхідне очищення поверхонь від оксидів і забруднень, їхня активація шляхом теплового або механічного впливу та зближення на відстань, меншу за параметри міжатомної взаємодії [8, 9]. Утворення суцільного з'єднання відбувається в результаті дифузії атомів і рекристалізації металу в зоні шва.

Залежно від виду енергії, яка використовується для утворення з'єднання, усі види зварювання поділяють на три основні класи: термічне, термомеханічне та механічне [6, 9].

Термічне зварювання - це зварювання плавленням, у якому теплова енергія виступає основним джерелом нагріву металу. До цього класу належать:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- електродугове зварювання - найпоширеніший метод, що використовує енергію електричної дуги;
- плазмове зварювання, у якому теплота утворюється за рахунок високотемпературної плазми;
- електронно-променеве, лазерне, електрошлакове та газове зварювання, які забезпечують високу точність, глибоке проплавлення та мінімальну зону термічного впливу [7, 10].

Термомеханічне зварювання передбачає одночасну дію тепла та тиску. До нього належать контактне, дифузійне, індукційне й третяє зварювання. Ці методи дозволяють отримати з'єднання високої якості без розплавлення матеріалу [6, 9].

Механічне зварювання здійснюється шляхом використання механічної енергії, яка викликає пластичну деформацію без суттєвого нагріву. До цього класу належать ультразвукове, вибухове, холодне зварювання та інші методи, що широко застосовуються для з'єднання різнорідних металів, неметалів і у мікроелектроніці [8].

Залежно від особливостей матеріалів і вимог до виробу, зварювання може виконуватись у середовищі захисних газів (інертних або активних), під флюсом або у вакуумі, що забезпечує стабільність дуги та захист рідкого металу від окислення [9, 10].

У практиці машинобудування дедалі ширше застосовуються гібридні методи зварювання, які поєднують два або більше джерел енергії (наприклад, лазерно-дугове або плазмове-контактне зварювання). Вони дозволяють досягати високої продуктивності, стабільності процесу та покращеної якості з'єднання [7, 10].

Важливою характеристикою будь-якого металу є зварюваність, тобто його здатність утворювати при встановленій технології зварювання з'єднання, що відповідає вимогам міцності, пластичності та надійності конструкції [6, 8]. Зварюваність визначається хімічним складом металу, фазовими перетвореннями, теплоп-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ровідністю, пластичністю, а також правильно підібраними технологічними параметрами процесу - силою струму, напругою, швидкістю зварювання та типом захисного середовища [9].

Розуміння фізичної сутності, класифікації та технологічних особливостей процесів зварювання є теоретичною основою для подальшого аналізу методів регулювання зварювального струму. Вибір оптимальної системи керування, зокрема мікроконтролерного типу, безпосередньо впливає на стабільність дуги, якість зварного з'єднання та енергоефективність роботи зварювального трансформатора [7, 10].

1.2 Класифікація видів електричного зварювання

Електричне зварювання є одним із найпоширеніших методів утворення нероз'ємних з'єднань металів завдяки високій ефективності перетворення електричної енергії в теплову, точності регулювання параметрів і можливості автоматизації процесу [6, 7]. Принцип його дії полягає у використанні електричного струму для локального нагрівання матеріалу до температури плавлення або пластичного стану, після чого утворюється суцільний шов.

За способом перетворення енергії, фізичними особливостями процесу та видом джерела нагріву розрізняють кілька основних видів електричного зварювання (рис. 1.1): дугове, плазмове, контактне, електронно-променеве та лазерне [6-10].

1.2.1 Дугове зварювання

Дугове зварювання ґрунтується на використанні електричної дуги, яка виникає між електродом і виробом. Теплова енергія дуги (5000–6000 °С) забезпечує розплавлення країв деталей і електродного металу [6, 8].

Основні різновиди дугового зварювання:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- MMA (SMAW) - ручне дугове зварювання покритим електродом;
- TIG (GTAW) - зварювання неплавким вольфрамовим електродом у середовищі інертного газу;
- MIG/MAG (GMAW) - зварювання плавким дротом у середовищі активного або інертного газу.

Дугове зварювання характеризується простотою апаратури, універсальністю й можливістю зварювання різних металів. Недоліки — утворення бризок, наявність шлаку та залежність якості від кваліфікації оператора [7-8].



Рисунок 1.1 – Класифікація основних видів електричного зварювання [6–10]

1.2.2 Плазмове зварювання

Плазмове зварювання є різновидом дугового, у якому джерелом тепла виступає плазмований струмінь - потік іонізованого газу з температурою понад 10 000 °С [8], [9]. Плазма формується між вольфрамовим електродом і соплом плазмотрона, а потім спрямовується в зону зварювання.

Метод забезпечує високу концентрацію теплової енергії, малу зону термічного впливу та стабільність процесу. Його застосовують для зварювання тонких, тугоплавких і різнорідних металів у приладобудуванні та авіаційній техніці [7, 9].

1.2.3 Контактне зварювання

Контактне (резистивне) зварювання ґрунтується на виділенні тепла за законом Джоуля–Ленца у місці контакту деталей під дією електричного струму великої сили. Нагрітий метал переходить у пластичний стан, після чого зусилля стиснення забезпечує утворення з'єднання [6].

Основні різновиди методу: точкове зварювання - для тонколистових заготовок; шовне зварювання - для герметичних з'єднань; стикове зварювання - для труб, прутків, профілів.

Контактне зварювання відзначається високою продуктивністю, можливістю автоматизації та стабільністю якості [7-8].

1.2.4 Електронно-променеве зварювання

Електронно-променеве зварювання виконується у вакуумній камері за допомогою пучка електронів, прискорених до енергій 60–200 кВ. При ударі електронів об метал енергія кінетичного руху переходить у теплову, забезпечуючи локальне плавлення матеріалу з глибиною проплавлення до кількох сантиметрів [9].

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Переваги: надвисока якість шва, мінімальна зона термічного впливу, можливість з'єднання різнорідних металів. Недоліки: складність апаратури, висока вартість і потреба у вакуумі [8, 9].

1.2.5 Лазерне зварювання

Лазерне зварювання - це процес, у якому нагрівання зони шва здійснюється концентрованим оптичним випромінюванням лазера. Потік енергії з потужністю до 10^7 Вт/см² забезпечує утворення вузького, глибокого шва з мінімальними деформаціями [9, 10].

Метод має високу точність, швидкість і придатність до роботизованого виконання. Його широко застосовують у приладо- та автомобілебудуванні, електроніці й медицині [10].

Отже, електричне зварювання охоплює широкий спектр методів, що різняться типом джерела енергії, рівнем концентрації тепла, продуктивністю та складністю обладнання. Вибір конкретного виду визначається вимогами до якості шва, товщиною матеріалу та умовами експлуатації виробу. Ці технологічні особливості є основою для подальшого аналізу систем регулювання зварювального струму, які визначають стабільність дуги та енергетичну ефективність процесу.

1.3 Загальні відомості про електродугове зварювання

Електродугове зварювання - це процес створення нероз'ємного з'єднання металів за допомогою теплової енергії, що виникає під час горіння електричної дуги між електродом і виробом. Дуга є потужним і стабільним електричним розрядом у середовищі іонізованих газів і парів металу, температура якого досягає 6000–7000 °С [11].

Процес запалювання дуги складається з трьох етапів: короткого замикання електрода на заготовку, розігріву місця контакту та відведення електрода на 3–6

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

мм, що викликає термоелектронну емісію електронів. У результаті багаторазових зіткнень електронів із молекулами газу відбувається іонізація проміжку між електродом і виробом, який стає електропровідним. Таким чином формується стійкий дуговий розряд, що перетворює електричну енергію в теплову.

У стовпі дуги виділяють три зони:

- катодну - зона випромінювання електронів із поверхні електрода;
- анодну - зона гальмування електронів і виділення тепла;
- середню (стовп дуги) - зона максимальної температури (до 7000 °С).

Теплова енергія, що утворюється, використовується для розплавлення кромки металу і присадного дроту, який заповнює зварювальну ванну. Для запобігання окисненню металу застосовують захисні гази (аргон, вуглекислий газ, гелій) або шлакове покриття електрода [11].

Класифікація способів дугового зварювання.

Залежно від типу електрода, схеми підключення і способу утворення дуги розрізняють основні методи:

- зварювання неплавким електродом (вольфрамовим або графітним) - дуга горить між електродом і виробом; для утворення шва використовується окремий присадний дріт;

- зварювання плавким електродом - електрод і деталь плавляться одночасно, формуючи зварювальну ванну з рідкого металу;

- зварювання непрямою дугою - дуга горить між двома неплавкими електродами, а основний метал нагрівається теплотою плазмового стовпа;

- зварювання трифазною дугою - одночасне горіння трьох дуг між електродами, що дозволяє рівномірно прогрівати великі заготовки.

Живлення дуги.

Дуга може живитися постійним або змінним струмом.

При постійному струмі прямої полярності електрод підключається до негативного полюса, що забезпечує краще проплавлення металу.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

При зворотній полярності (електрод під'єднано до позитивного полюса) нагрів електрода зростає, що корисно для тонких листових матеріалів [12].

Сучасні зварювальні апарати побутового типу, зокрема інверторні, працюють на основі імпульсних джерел постійного струму, у яких параметри дуги регулюються мікроконтролером. Це забезпечує стабільність горіння дуги, зменшує розбризкування металу та економить електроенергію [12].

Електродугове зварювання - складний електрофізичний процес, у якому взаємодіють теплові, електричні та хімічні явища. Якість шва та стабільність горіння дуги залежать від правильного вибору полярності, сили струму, напруги та системи керування. Тому розробка мікроконтролерного регулятора струму для побутових зварювальних трансформаторів є технічно обґрунтованим напрямом підвищення ефективності та надійності зварювальних процесів.

1.4 Ручне дугове зварювання

Ручне дугове зварювання (РДЗ) - це процес утворення нероз'ємного з'єднання металів, під час якого зварювальник вручну керує електродом, підтримуючи стабільне горіння дуги між електродом і виробом. Дуга створює високу температуру (понад 6000 °C), за якої металевий стрижень електрода плавиться, утворюючи зварювальну ванну [13].

Під час зварювання покритим металевим електродом дуга горить між стрижнем електрода і основним металом. Розплавлений метал із крапель електродного стрижня переходить у ванну, заповнюючи зону з'єднання. Одночасно з плавленням металу розплавляється покриття електрода, яке створює захисну атмосферу з газів (вуглекислий газ, водяна пара, азот) та шлакову ванну, що захищає розплавлений метал від окиснення [14].

Після застигання утворюється зварний шов, а застиглий шлак формує тверду шлакову кірку, яку видаляють після охолодження. Такий процес забезпечує

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

якісний, герметичний шов і мінімальну кількість дефектів за умови правильного підбору електрода та режиму струму.

Електроди для ручного зварювання.

Електрод для ручного дугового зварювання складається зі стрижня та покриття.

Стрижень виготовляють із зварювального дроту високої чистоти, який служить одночасно провідником струму та джерелом металу для шва.

Покриття утворює газовий і шлаковий захист, стабілізує дугу, рафінує метал і забезпечує легування шва.

Залежно від хімічного складу дроту розрізняють три основні групи електродів:

- низьковуглецеві (для конструкційних сталей);
- леговані (для підвищеної міцності або жаростійкості);
- високолеговані (для корозійностійких і жароміцних сталей) [13].

Для зварювання використовують електроди типів E42, E46, E50, що відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 2560:2021. Тип покриття (рутилове, основне, целюлозне) визначає умови зварювання та характеристики шва.

Технологічні особливості.

Ручне дугове зварювання зручне для виконання коротких, криволінійних або монтажних швів, особливо у складних просторових положеннях - нижньому, вертикальному, горизонтальному або стельовому. Його застосовують під час складання конструкцій, ремонту техніки, монтажу трубопроводів, резервуарів та опорних елементів [14].

Основним технологічним параметром процесу є зварювальний струм, який визначає швидкість плавлення електрода й глибину проплавлення металу. Проте підвищення струму понад допустимі межі може спричинити:

- перегрів стрижня електрода;
- відшарування покриття;
- інтенсивне розбризкування металу;

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- погіршення формування шва.

Зменшення струму, навпаки, призводить до нестійкого горіння дуги та неповного проплавлення кромок. Тому для кожного типу електрода встановлюється оптимальний діапазон струму (зазвичай 70–160 А для електродів діаметром 2–4 мм).

Переваги та недоліки.

Переваги ручного дугового зварювання:

- універсальність і мобільність обладнання;
- можливість виконання зварювання у будь-якому положенні шва;
- висока якість та міцність з'єднань;
- мінімальна потреба в складному оснащенні.

- Недоліки:

- низька продуктивність у порівнянні з автоматичним або напівавтоматичним зварюванням;
- велика залежність якості від кваліфікації зварника;
- потреба у видаленні шлаку після кожного проходу [13].

Сучасна тенденція розвитку полягає у поступовій заміні ручного зварювання на напівавтоматичне зварювання у середовищі захисних газів, що дозволяє підвищити продуктивність без втрати якості. Водночас ручне зварювання залишається незамінним при ремонтних і монтажних роботах, де потрібна гнучкість і універсальність процесу.

1.5 Огляд схем регуляторів струму

Однією з основних функцій зварювального апарата є регулювання робочого струму, яке забезпечує стабільне горіння дуги, рівномірний проплав і якісний зварний шов. Від способу регулювання струму залежать енергетичні втрати, надійність та габаритні показники апарата.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У зварювальних трансформаторах використовують декілька основних способів регулювання зварювального струму:

1. Шунтування дроселями - зміна індуктивного опору кола для плавного регулювання струму. Недоліки: громіздкість і втрати енергії через нагрів елементів.

2. Магнітне шунтування або зміна положення обмоток - дозволяє регулювати магнітний потік і взаємний індуктивний зв'язок між первинною та вторинною обмотками. Метод забезпечує стабільність, але ускладнює конструкцію.

3. Регулювання активними опорами (реостатами або баластами) - найпростіше, але неекономічне рішення, оскільки значна частина потужності розсіюється у вигляді тепла.

Більш досконалим методом є ступеневе регулювання струму, яке реалізується зміною кількості витків вторинної обмотки. При цьому перемикач підключається до спеціальних відводів, виконаних на вторинній обмотці трансформатора. Метод простий у виконанні, але не забезпечує плавного регулювання, тому використовується для попередньої настройки струму.

Регулювання у вторинному колі зварювального трансформатора ускладнюється через великі значення струмів (до 250–300 А). Це потребує використання потужних комутаційних пристроїв, що збільшує масу та габарити апарата. Для уникнення цих проблем у сучасних побутових і промислових апаратах використовують електронні або тиристорні регулятори струму, які дозволяють плавно змінювати струм, стабілізувати дугу й зменшувати втрати потужності [15].

Залежно від типу струму зварювальні апарати поділяються на установки постійного та змінного струму.

При постійному струмі дуга горить стійкіше, що особливо важливо при зварюванні тонколистових металів.

При змінному струмі конструкція апарата спрощується, проте стабільність дуги зменшується. Для забезпечення надійного запалювання необхідно підвищити напругу холостого ходу до $U_{х.х.} = 70 \dots 75В$.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для випрямлення змінного струму у трансформаторних апаратах застосовують мостові випрямлячі на потужних діодах із системою охолодження. Типова схема такої випрямної установки наведена на рисунку 1.2, а також представлена на аркуші [МРМА 25.00.00.000 ДО].

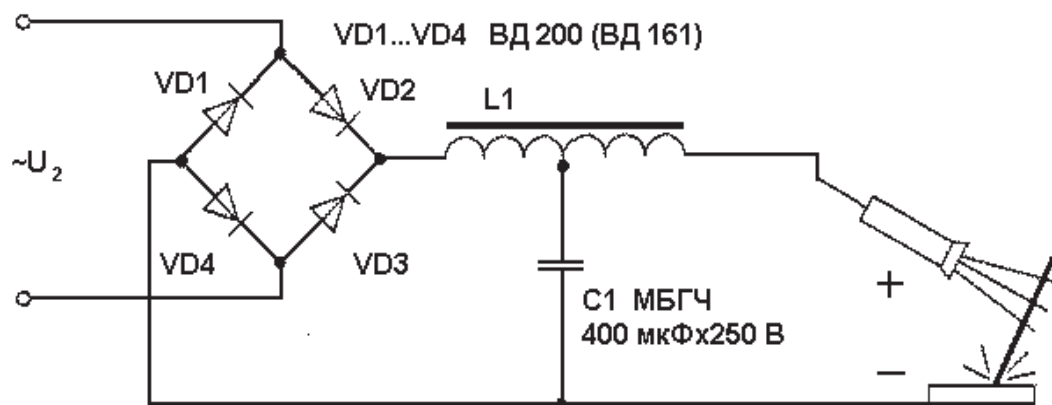


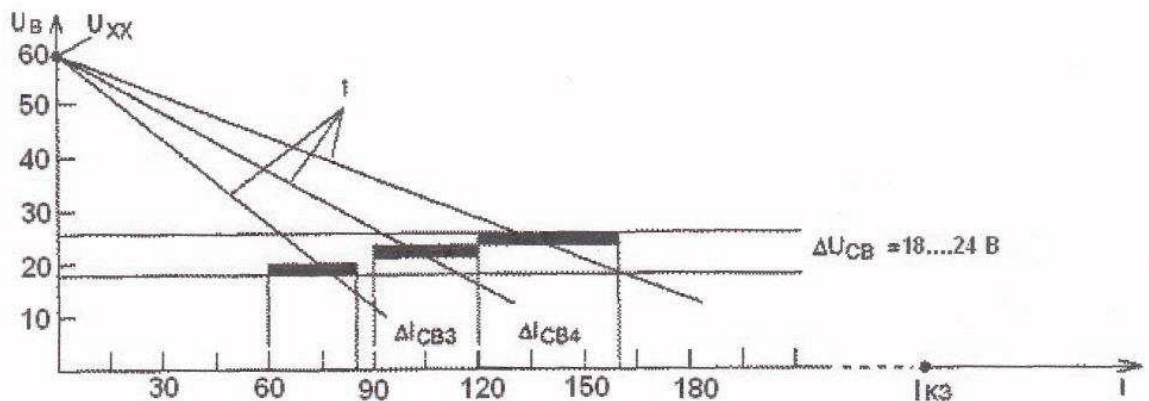
Рисунок 1.2– Схема мостового випрямляча

Для підвищення стабільності зварювального процесу і поліпшення якості шва у схемах випрямлення зварювального струму застосовують фільтри згладжування пульсацій напруги. Основним завданням таких фільтрів є усунення коливань випрямленої напруги, які виникають після діодного або тиристорного випрямляча, і забезпечення рівномірного струму дуги.

Одним з найпростіших варіантів є Т-подібний LC-фільтр, який складається з дроселя L1 і конденсатора C1. Один з виводів силового агрегата (СА) приєднують до затискача електродів саме через цей фільтр (рис. 1.3).

Дросель L1 являє собою котушку з 50...70 витків мідної шини з відводом від середини, перерізом приблизно $S = 50 \text{ мм}^2$, намотану на магнітопровід типу ОСО-12 або аналогічний від понижувального трансформатора. Чим більший переріз осердя дроселя, тим менше ймовірність насичення його магнітної системи при великих струмах. Якщо при різанні або роботі з товстими деталями магнітна система входить у насичення, індуктивність різко зменшується, а фільтрувальна

здатність дроселя падає. У результаті цього дуга стає нестійкою, а якість шва погіршується [15].



1 - сімейство характеристик для різних діапазонів зварювання; $U_{х.х.}$ - напруга холостого ходу зварювального апарата; $I_{кз}$ - струм короткого замикання; $U_{св}$ - діапазон напруг зварювання (18.. .24В); $U\Delta I_{св2}$, $U\Delta I_{св3}$, $U\Delta I_{св4}$ - діапазони струмів зварювання для електродів діаметром 2, 3, 4 мм відповідно.

Рисунок 1.3 - Зовнішня характеристика (падаюча) зварювального апарата

Конденсатор С1 підключається паралельно вихідним клемам і служить для накопичення заряду та компенсації пульсацій струму. У схемах зварювальних випрямлячів часто використовують батареї конденсаторів типів МБМ, МБГ або аналогічних, загальною ємністю 350–400 мкФ, розрахованих на робочу напругу не менше 200 В. Комбінована дія L1 і С1 забезпечує ефективне згладжування випрямленої напруги до рівня залишкових пульсацій менше 10 %.

Для випрямлення і плавного регулювання зварювального струму у сучасних схемах застосовують керовані тиристри, які дозволяють змінювати напругу в діапазоні $0,1 U_{х.х.} - 0,9 U_{х.х.}$. Такі регулятори забезпечують м'який пуск, захист від перевантажень і стабілізацію струму під час зварювання. Окрім власне зварювальних робіт, вони можуть використовуватись для заряджання акумуляторів, живлення електронагрівальних елементів або керування електрохімічними процесами [15].

У побутових апаратах змінного струму зазвичай застосовують електроди діаметром понад 2 мм, що дає можливість зварювати матеріали товщиною понад 1,5 мм. При цьому зварювальний струм сягає десятків ампер, і дуга горить достатньо стійко за умови правильного налаштування напруги та полярності. Для надійного запалювання дуги напруга холостого ходу $U_{x \cdot x}$ у таких апаратах повинна бути не нижче 60...65 В, тоді як для промислових моделей допускається 70...75 В.

Зварювальний струм I_{sv} вибирають відповідно до діаметра електрода, забезпечуючи стабільне горіння дуги та якісний проплав. Робоча напруга дуги U_{sv} зазвичай становить 18...24 В, що відповідає нормальному тепловому балансу для сталевих деталей середньої товщини.

Номінальний зварювальний струм складає:

$$I_{cv} = KK1 \cdot d_e, \quad (1.1)$$

де I_{cv} - величина зварювального струму, А;

$KK1 = 30...40$ - коефіцієнт, який залежить від типу та розміру електрода.

При проектуванні побутових зварювальних трансформаторів важливо забезпечити стабільність процесу горіння дуги та безпечну роботу користувача. Одним із ключових параметрів є струм короткого замикання, який не повинен перевищувати номінальний зварювальний струм більш ніж на 30...35 %. При перевищенні цієї межі спостерігається різке збільшення теплових втрат у вторинній обмотці трансформатора, перегрів елементів кола та нестабільність дуги.

Стійке горіння зварювальної дуги можливе лише за умови, якщо апарат має падаючу зовнішню вольт-амперну характеристику. Така характеристика описує залежність між силою струму I_{zv} та напругою U_{zv} у зварювальному колі. При зменшенні напруги в дузі сила струму автоматично знижується, що запобігає розбризкуванню металу й сприяє стабілізації процесу. Типова форма цієї залежності показана на рисунку 1.3, де видно, що спад напруги зростає зі збільшенням струму, формуючи робочу ділянку для дугового процесу [15].

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення плавного регулювання зварювального струму та стабільної роботи побутового зварювального трансформатора було розглянуто схему тиристорного регулятора струму [15], представлену на рисунку 1.4 (аркуш [МРМА25.00.00.000 ДО]).

Конструктивно така схема побудована за принципом фазового керування тиристорами, коли момент відкриття кожного тиристора регулюється в межах кожного півперіоду синусоїдальної напруги. Змінюючи кут відкриття α , можна плавно змінювати середнє значення вихідної напруги, а отже - і зварювальний струм, що подається на електрод.

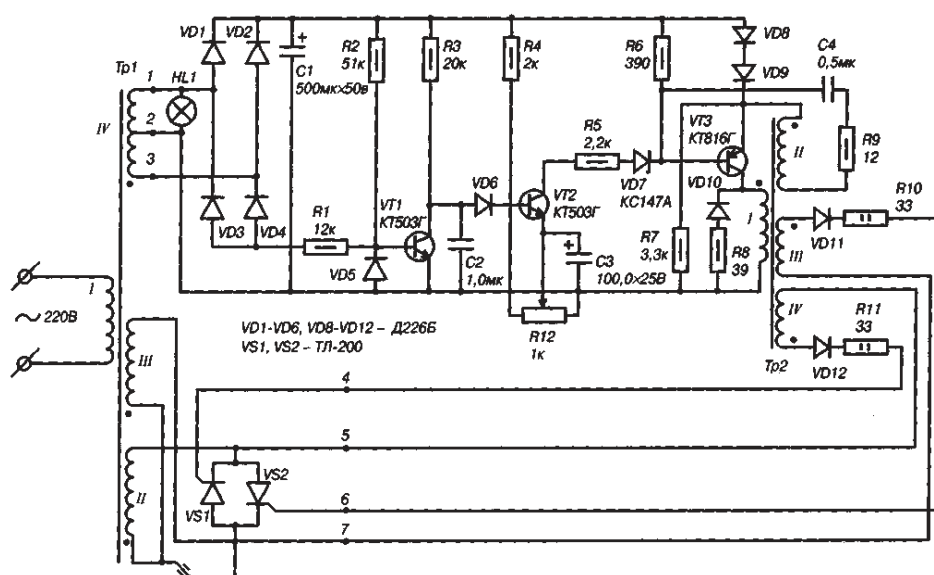


Рисунок 1.4 – Схема тиристорного регулятора струму

Розглянутий зварювальний трансформатор призначений для електродугового зварювання виробів із конструкційних сталей за допомогою покритих електродів діаметром 2–5 мм. Завдяки вбудованому електронному регулятору апарат забезпечує плавне регулювання зварювального струму в діапазоні від 20 до 200 А, що дозволяє виконувати зварювання деталей різної товщини та конфігурації.

Електрична схема установки складається з трансформатора Tr1, пари тиристорів VS1 і VS2, увімкнених у коло силової обмотки 2, а також блоку електрон-

ного керування, який формує керуючі імпульси для відкриття тиристорів. Напруга холостого ходу на обмотках 2 і 3 становить 60 В, а на допоміжній обмотці 4 - 40 В, що забезпечує стабільне запалювання дуги та безпечні умови роботи.

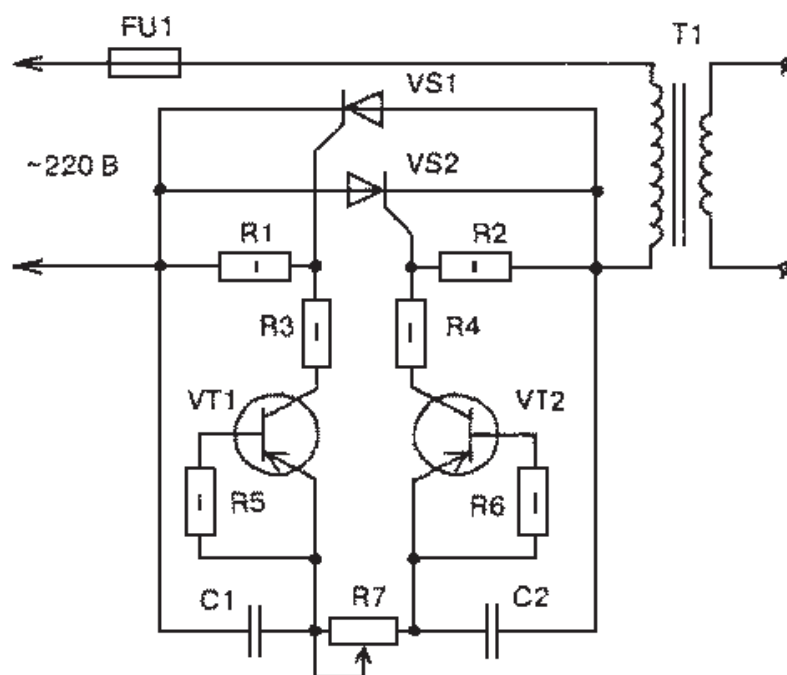


Рисунок 1.5 – Схема тиристорного регулятора струму

У базовій схемі тиристорного регулятора для формування імпульсів керування використовуються транзистори VT1 і VT2, що працюють у лавинному режимі пробую. Разом із резисторами R5 і R6, підключеними до їхніх базових ланцюгів, ці елементи утворюють вузол генерації імпульсів запуску тиристорів.

Таку схему можна спростити шляхом заміни лавинних транзисторів диністорами, як показано на рисунку 1.6. При цьому аноди диністорів під'єднують до крайніх виводів змінного резистора R7, а їх катоди - до резисторів R3 і R4 відповідно. Диністор відкривається автоматично, коли напруга на ньому досягає порогового рівня пробую, формуючи короткий імпульс струму на керуючому електроді тиристора.

Для складання регулятора на таких елементах доцільно застосовувати диністори типу КН102А, які забезпечують стабільний пробій у межах 25–32 В і

мають добру повторюваність характеристик. Їх використання дозволяє підвищити надійність та спростити налагодження схеми, оскільки вони не потребують балансування базових струмів, на відміну від транзисторів у лавинному режимі.

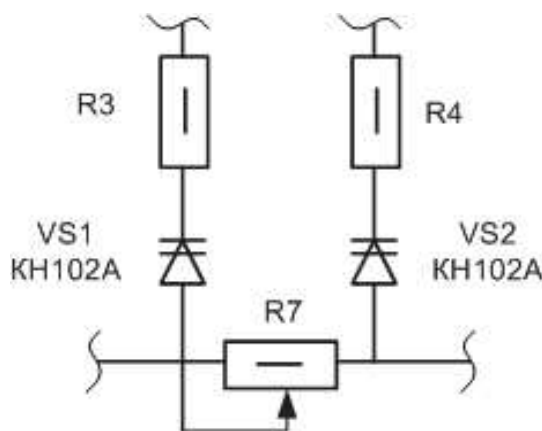


Рисунок 1.6 - Принципова схема заміни транзисторів з резисторами диністорами

Оскільки пристрій має гальванічний зв'язок із мережею 220 В, усі елементи, включаючи тепловідводи тиристорів, повинні бути надійно ізольовані від корпусу. Це стосується також монтажних пластин, кріплень і металевих деталей конструкції, щоб запобігти небезпеці ураження електричним струмом.

Правильно зібраний регулятор зварювального струму не потребує складного налагодження. Після складання необхідно лише перевірити стабільність спрацьовування лавинних транзисторів (або диністорів при їх використанні) у межах заданих параметрів пробою, а також відсутність паразитних коливань у колі керування.

Розглянемо схему [15] симісторного регулятора струму, подану на рисунку 1.7. Така схема реалізує принцип фазового керування змінною напругою та забезпечує плавне регулювання зварювального струму при живленні від побутової мережі 220 В.

У колі керування можуть застосовуватися потужні симістори типу ТС80, ТС125 або їхні сучасні аналоги, що розраховані на струм до 80–125 А. Напруга,

прикладена до симістора VD3, подається через струмообмежувальний резистор R8 на випрямний міст VD8–VD11, який перетворює змінну напругу на пульсуючу постійну.

Далі на стабілітроні VD1 формується трапецеїдальна напруга з максимальною амплітудою, рівною напрузі стабілізації стабілітрона, і періодом повторення 0,01 с, що відповідає частоті 100 Гц. Цей сигнал визначає часовий інтервал формування імпульсів керування симістором.

На початку кожного періоду напруга на конденсаторі C1 починає зростати за законом експоненти з постійною часу $(R1+R2) \cdot C1$. Коли напруга на конденсаторі перевищує потенціал точки подільника R3–R4, спрацьовує вузол на транзисторах VT2 та VT3, увімкнених за схемою аналога одноперехідного транзистора.

Після відкриття транзисторів VT2 і VT3 конденсатор C1 швидко розряджається через них та емітерний перехід транзистора VT6, який запускає наступний каскад підсилення імпульсу. Одночасно конденсатор C3, що до цього був заряджений через ланцюг R7, VD7, VD4, VD5 і C2, розряджається через відкритий транзистор VT6 і первинну обмотку імпульсного трансформатора T1.

На вторинній обмотці T1 при цьому індукуються короткий імпульс напруги, який відкриває симістор VD3. Завдяки цьому в мережевому колі формується відрізок синусоїдальної напруги, який подається на зварювальний трансформатор, забезпечуючи плавне регулювання струму в межах від 0,1 $U_{x.x}$ до 0,9 $U_{x.x}$.

Конструктивні особливості трансформатора T1.

Як імпульсний трансформатор у схемі застосовується елемент типу МІТ-2 або МІТ-3. За відсутності готового трансформатора його можна виготовити самостійно на феритовому кільці K16×8×6 або іншого типорозміру з подібним перерізом магнітопроводу з матеріалу М100 – М600.

Обмотки трансформатора містять 100–200 витків дроту типу ПЕЛШО або ПЕВ-2 діаметром 0,15–0,2 мм. Під час намотування необхідно забезпечити надійну ізоляцію між обмотками та магнітопроводом, використовуючи лакотканину або каптонову стрічку.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для правильного функціонування схеми важливо дотримати фазування обмоток - у цьому випадку регулятор починає працювати без додаткового налагодження.

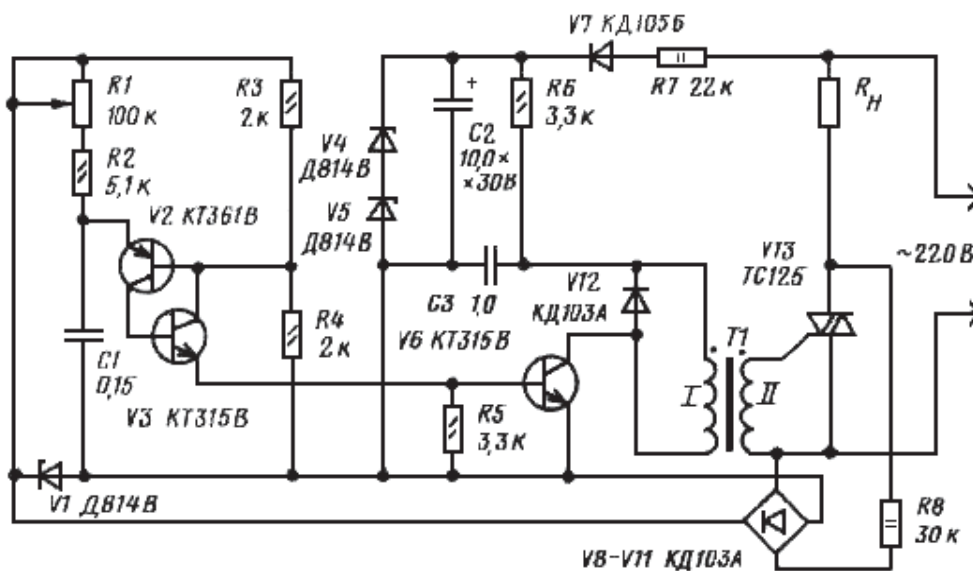


Рисунок 1.7 – Схема регулятора струму на симісторі

Для керування інерційним навантаженням (наприклад, зварювальними трансформаторами, електронагрівальними елементами або індукційними котушками) широко застосовуються тиристорні регулятори потужності, що працюють за принципом подачі на навантаження групи напівперіодів мережевої напруги, після яких слідує пауза.

У такій схемі тиристори комутуються в моменти переходу мережевої напруги через нуль, що істотно знижує рівень електромагнітних і радіоперешкод у порівнянні з фазовими регуляторами. Це пояснюється відсутністю крутих фронтів струму при комутації, завдяки чому зменшується навантаження на елементи кола та підвищується електромагнітна сумісність пристрою.

Ще однією перевагою таких схем є те, що вони не містять аналогових граничних елементів (як у фазових регуляторах), а отже, не потребують точного балансування чи стабілізації рівнів спрацьовування. Це спрощує налаштування, підвищує надійність і стійкість параметрів у процесі тривалої експлуатації.

Принцип дії.

Суть роботи полягає в тому, що тиристор подає на навантаження кілька послідовних напівперіодів змінної напруги, після чого робиться пауза, під час якої тиристори залишаються закритими. Таким чином, середнє значення потужності на навантаженні регулюється співвідношенням кількості провідних напівперіодів до загальної тривалості циклу.

Оскільки комутація навантаження здійснюється лише в моменти, коли напруга мережі дорівнює нулю, мінімальна порція енергії, що подається до навантаження, дорівнює енергії одного напівперіоду. Це забезпечує високу стабільність регулювання і мінімальні спотворення струму, проте водночас збільшує крок зміни потужності.

Для зменшення кроку регулювання доводиться подовжувати повторювану послідовність напівперіодів. Наприклад, щоб отримати крок у 10 % від номінальної потужності, необхідно сформувати послідовність із 10 напівперіодів, з яких певна частина буде активною, а решта - паузами.

Приклад режиму роботи.

На рисунку 1.8 наведено приклад послідовності імпульсів керування тиристором при передачі потужності 30 %.

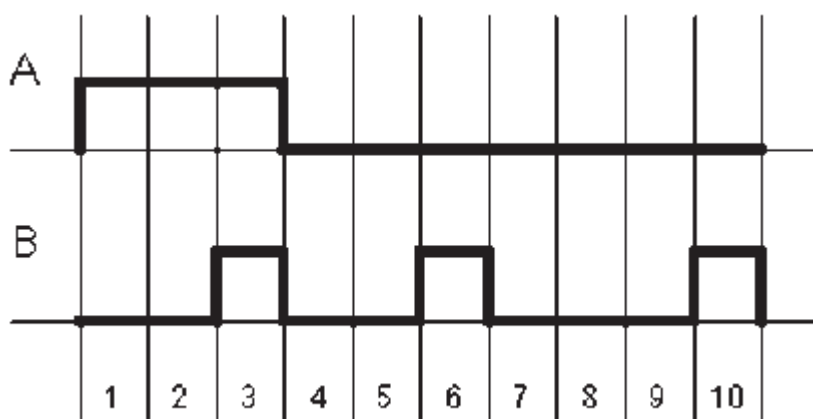


Рисунок 1.8 - Часова діаграма послідовності імпульсів на керуючому електроді тиристора

У цьому випадку тиристор залишається відкритим протягом перших трьох напівперіодів, після чого закривається на наступні сім напівперіодів. Далі цей цикл повторюється періодично, утворюючи дискретно-кроковий режим регулювання потужності.

Такий принцип роботи є компромісом між простотою схеми та плавністю регулювання. Він особливо ефективний у випадках, коли навантаження має велику теплову інерцію - наприклад, у побутових або напівпромислових зварювальних трансформаторах.

У наведеному вище тиристорному регуляторі потужності частота комутації для будь-якого рівня потужності, меншого за 100 %, становить 1/10 частоти проходження напівперіодів мережевої напруги. Це означає, що кожен повний цикл регулювання містить десять напівперіодів, після чого послідовність повторюється.

Однак такий підхід має суттєвий недолік - неоднорівномірний розподіл енергії в часі. Подача кількох послідовних напівперіодів із подальшою паузою створює теплові коливання у навантаженні, що може негативно впливати на стабільність зварювальної дуги або рівномірність нагріву.

З точки зору енергетичної та динамічної стабільності, більш доцільним є рівномірний розподіл активних напівперіодів протягом усього циклу. Тобто ті напівперіоди, коли тиристор відкритий, повинні бути розташовані рівномірно в межах послідовності з M напівперіодів. Такий підхід дозволяє мінімізувати коливання потужності на виході, забезпечуючи плавніше керування енергією, що особливо важливо для інерційних або термочутливих навантажень.

Алгоритмічна реалізація рівномірного розподілу.

У загальному випадку завдання рівномірного розподілу N активних напівперіодів у послідовності довжиною M (де $N \leq M$) може бути вирішене алгоритмічно. Для цього ефективно використовується алгоритм Брезенхема, який широко застосовується в растровій комп'ютерній графіці для побудови похилих ліній із рівномірним кроком.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Суть алгоритму полягає в тому, що він використовує цілочисельну арифметику для визначення моментів, коли необхідно вмикати або вимикати сигнал керування, зберігаючи рівномірність розподілу імпульсів. Це робить його простим у програмуванні та високоефективним для реалізації в мікроконтролерних системах, зокрема у схемах керування тиристорами або симісторами.

Таким чином, реалізація алгоритму Брезенхема в цифровій системі керування дозволяє забезпечити рівномірний розподіл енергії у навантаженні при збереженні простої логіки керування та високої швидкодії обчислень.

Основою мікроконтролерного регулятора зварювального струму [15], зображеного на рисунку 1.9, є мікроконтролер U1 типу AT89C2051 фірми ATMEL. Це 8-бітовий мікроконтролер із флеш-пам'яттю обсягом 2 Кбайти, який забезпечує достатню продуктивність для реалізації алгоритмів керування тиристорами та динамічної індикації.

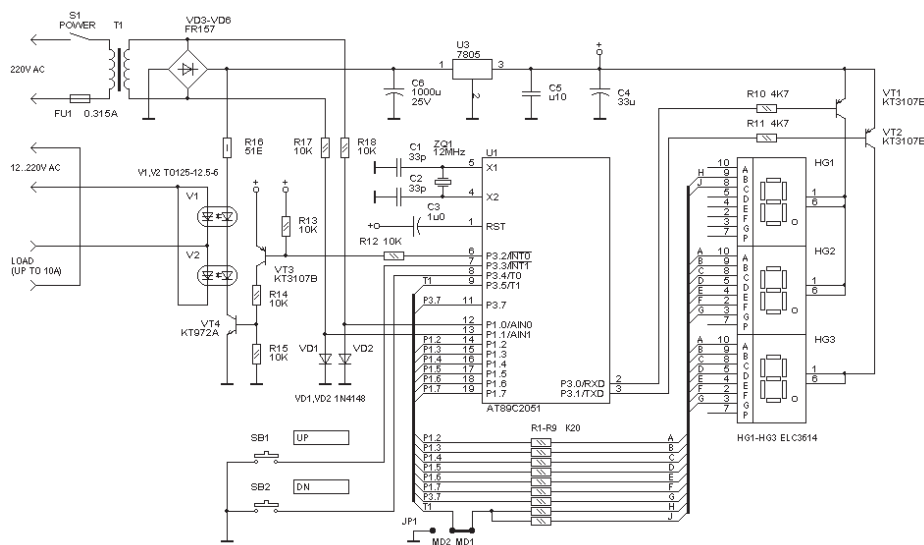


Рисунок 1.9 - Схема регулятора струму на мікроконтролері

Для живлення електронної частини використовується малопотужний трансформатор Т1, який разом із оптотиристорними розв'язками забезпечує гальванічну ізоляцію від мережі 220 В. Це істотно підвищує електробезпеку користу-

вача, запобігаючи прямому контакту між низьковольтним колом керування та силовим колом. Однією з важливих особливостей цього регулятора є його універсальність - він може працювати з різними типами навантажень, розрахованими на різні робочі напруги. Для цього достатньо подати на вхід тиристорів напругу від додаткового силового трансформатора, що дає змогу використовувати пристрій, наприклад, для живлення низьковольтного паяльника або аналогічних побутових інструментів. Єдина умова - напруга та струм навантаження не повинні перевищувати максимально допустимі параметри застосованих тиристорів.

Регулювання потужності в навантаженні здійснюється кнопками SB1 і SB2. Коротке натискання будь-якої з кнопок змінює потужність на один дискретний крок, тривале натискання забезпечує плавну монотонну зміну потужності в одному напрямку. Одночасне натискання обох кнопок виконує функцію швидкого перемикання: якщо навантаження було увімкнене, воно вимикається, і навпаки - при вимкненому стані активується максимальний рівень потужності. Для індикації поточного рівня потужності використовуються три семисегментні світлодіодні індикатори HG1–HG3. Щоб зменшити кількість виводів мікроконтролера та спростити схему, застосовано динамічну індикацію, реалізовану програмним мультиплексуванням.

У мікроконтролері використовується вбудований аналоговий компаратор, який забезпечує синхронізацію роботи регулятора з фазою мережевої напруги. На його входи подається сигнал із вторинної обмотки трансформатора живлення через обмежувальний ланцюг R17, R18, VD1, VD2. Для негативних напівперіодів роль обмежувача виконують діоди випрямного моста, що захищають входи мікроконтролера від перевищення допустимої напруги. Компаратор змінює свій стан у моменти, коли мережева напруга проходить через нуль. Ці переходи відстежуються програмно, і кожного разу, коли фіксується зміна стану компаратора, на вихід порту INTO мікроконтролера подається керуючий імпульс для відкриття тиристорів. Якщо поточний напівперіод має бути пропущений відповідно до заданої потужності, керуючий імпульс не формується.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Після формування імпульсу керування тиристорами система виконує послідовність операцій індикації та опитування кнопок. Спочатку на 4 мс активується індикатор HG3 - у цей час перевіряється натискання кнопок SB1 і SB2. Якщо виявлено зміну стану кнопок, програма оновлює поточне значення потужності. Потім керуючий сигнал із порту INTO знімається, і на наступні 4 мс активуються індикатори HG1 та HG2. Після цього система протягом ще 4 мс очікує нового переходу напруги через нуль. Якщо зміни не відбулося, цикл повторюється, зберігаючи поточний режим без прив'язки до мережі. Один повний цикл роботи системи становить 12 мс, що забезпечує реальний час оновлення відображення і стабільну синхронізацію з мережею живлення.

Якщо під час роботи мікроконтролер не отримує імпульсів синхронізації з мережі (наприклад, при її відсутності або зниженій амплітуді), тиристори залишаються закритими. Це зроблено для того, щоб індикація працювала коректно навіть за відсутності мережевих імпульсів, зберігаючи відображення поточного стану системи. Частота мережі повинна відхилитися від номінальних 50 Гц не більш ніж на $\pm 20\%$, що є допустимим, оскільки фактичні коливання в побутових умовах не перевищують $\pm 1\%$.

Сигнал із порту INTO мікроконтролера подається на транзисторний ключ, реалізований на транзисторах VT3 і VT4, який керує світлодіодами оптотиристорів. Коли мікроконтролер перебуває в стані RESET, на цьому порту присутній логічний рівень "1", тому для активації обрано інверсний рівень — логічний нуль. Для комутації навантаження застосовуються два оптотиристори, з'єднані паралельно для симетричної роботи в обох півперіодах змінної напруги. Світлодіоди оптотиристорів з'єднані послідовно, а струм їхнього живлення, який задає резистор R16, становить близько 100 мА.

Регулятор підтримує два режими керування потужністю, що вибираються перемичкою JP1, стан якої зчитується після обнулення мікроконтролера. У першому режимі крок регулювання становить 1 %, на індикаторі HG1–HG3 відображаються значення від 0 до 100 %. У другому режимі крок становить 10 %, і на

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

індикаторі показуються значення від 0 до 10. Такий режим доцільний для керування нагрівальними приладами, де не потрібна висока точність регулювання. Якщо передбачається робота лише у другому режимі, індикатор HG1 і резистори R8, R9 можна не встановлювати. Кількість градацій у кожному режимі задається програмно - за адресою 0005H для першого режиму і 000BH для другого, з обмеженням до 127 і 99 рівнів відповідно.

При струмі навантаження до 2 А оптотиристири можуть працювати без радіаторів, а при більшому струмі їх встановлюють на тепловідводи площею 50–80 см². Для низьковольтних навантажень (до 50 В) можна застосовувати оптотиристири будь-якого класу, але для роботи з мережею 220 В їхній клас напруги має бути не нижче шостого. Як трансформатор живлення використовується будь-який малопотужний тип із вторинною напругою 8–10 В і струмом не менше 200 мА. Діоди VD3–VD6 можна замінити на КД208, КД209 або на міст КЦ405. Стабілізатор напруги U2 типу 7805 (або аналоги КР142ЕН5А, КР1180ЕН5) не потребує радіатора.

Транзистори VT1–VT3 можуть бути будь-які малопотужні р–n–р, а VT4 - КТ815 або КТ817. Діоди VD1, VD2 - малопотужні кремнієві типу КД521, КД522. Кнопки SB1 і SB2 - малі безфіксаційні типу ПКН-159. Індикатори HG1–HG3 - семисегментні із загальним анодом, з підвищеною яскравістю світіння. Конденсатори С3, С4, С6 - електролітичні, інші - керамічні. Резистори R16 - типу МЛТ-0,5, решта - МЛТ-0,125 або SMD-резистори Р1-12. Мікроконтролер U1 встановлений на панелі для зручності заміни або перепрограмування.

Пристрій не потребує додаткового налагодження за умови справності компонентів і правильного програмування. Для перевірки синхронізації з частотою мережі слід підключити осцилограф до мережевої напруги й переконатися, що імпульси сканування індикатора на виходах RXD і TXD мікроконтролера синхронізовані з мережею і мають подвоєну частоту 100 Гц. Якщо при підключенні навантаження спостерігаються порушення синхронності, між входами компаратора

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		32

(виводи 12 і 13 мікроконтролера) підключають конденсатор ємністю 1–4,7 нФ для покращення фільтрації перешкод.

Розглянемо схему [15] іншого мікроконтролерного регулятора струму, подану на рисунку 1.10. За принципом роботи вона подібна до описаної раніше, проте має вдосконалену систему керування і побудована з урахуванням дефіциту портів введення-виведення мікроконтролера. З цієї причини у пристрої відмовилися від використання вбудованого компаратора, замінивши його зовнішнім здвоєним компаратором LM393 (U2).

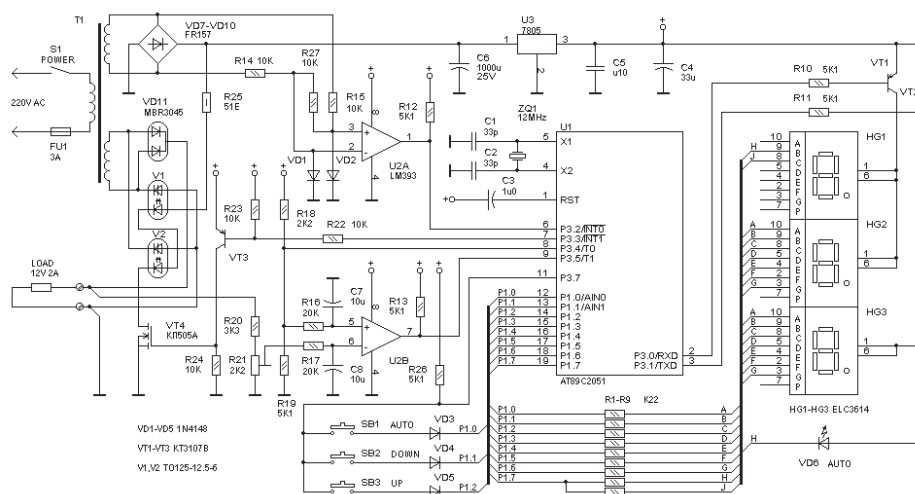


Рисунок 1.10 - Схема регулятора струму на мікроконтролері

Перша половина компаратора U2A забезпечує прив'язку до мережевої напруги. Для цього на його входи через дільник R27, R14, R15 подається сигнал, який формує на виході меандр частотою 50 Гц, що надходить на вхід INT0 мікроконтролера. Друга половина компаратора U2B використовується у петлі зворотного зв'язку — вона формує сигнал помилки потужності, який надходить на вхід T1. Для стабільності роботи на входах компаратора встановлено фільтри нижніх частот на елементах R16–C7 та R17–C8. Імпульси з виводу T0 мікроконтролера надходять на вхід фільтра через дільник R18–R19, який знижує амплітуду сигналу до приблизно 3,5 В, що є оптимальною для роботи LM393. Напруга живлення +5 В використовується як опорна, тому амплітуда сигналів залишається стабільною. Напруга, знята з навантаження, подається на вхід другого фільтра через дільник

R20–R21, який підібраний так, щоб при номінальній напрузі мережі та потужності 100 % напруга на виході фільтра становила близько 3,5 В.

Сигнал з виходу мікроконтролера INT1 через транзисторний ключ керує опотиристорами V1 і V2, які разом із діодною збіркою VD11 утворюють керований випрямляч, що живить навантаження. При струмі навантаження понад 2 А опотиристори встановлюють на спільний тепловідвід, оскільки їхні аноди з'єднані з основами. Як VD11 рекомендується використовувати діоди Шоткі, наприклад КД2998, або, за потреби, звичайні потужні діоди КД2997, КД2999, КД213.

Для економії портів мікроконтролера система керування кнопками реалізована через ті самі лінії, що й індикатори. У моменти, коли індикатори вимикаються, мікроконтролер проводить опитування кнопок через лінію P3.7. Така схема дозволяє підключити три кнопки, серед яких третя відповідає за активацію автоматичного режиму. Після вмикання живлення регулятор працює у ручному режимі. Для переходу в автоматичний режим необхідно натиснути одночасно кнопки AUTO та UP, після чого загоряється індикатор AUTO. У цьому режимі пристрій автоматично підтримує встановлену потужність. Якщо утримувати кнопку AUTO, на індикаторах відображається поточний рівень потужності, який коригується відповідно до коливань мережевої напруги. Якщо підтримання потужності неможливе, індикатор AUTO блимає. Для виходу з режиму необхідно натиснути одночасно AUTO та DOWN.

Для налаштування регулятора слід підключити навантаження, подати номінальну напругу живлення, встановити потужність 100 % і підстроїти резистор R21 до нульової різниці напруг на входах компаратора U2B. Потім, зменшивши потужність до 90 % і увімкнувши режим AUTO, регулюванням R21 досягають збігу показів індикаторів із заданим значенням.

Використання мікроконтролера з зовнішнім компаратором LM393 забезпечує ширший діапазон регулювання, підвищену стабільність і точність підтримання параметрів зварювального струму. Такий підхід спрощує модернізацію -

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

алгоритм роботи задається програмно, що дозволяє швидко змінювати режими регулятора без втручання в його апаратну частину.

1.6 Технічне завдання та вимоги до розробки мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора

Технічним завданням даної роботи є розроблення, моделювання та виготовлення мікроконтролерного регулятора струму для побутового зварювального трансформатора. Такий тип регулятора покликаний забезпечити більш точне, стабільне та енергоефективне керування зварювальним процесом у порівнянні з традиційними аналоговими або електромеханічними способами регулювання струму [1, 2].

Розроблений пристрій має забезпечувати плавну зміну зварювального струму в широкому діапазоні, підвищувати стабільність горіння дуги, а також зменшувати втрати електроенергії та споживання активних матеріалів. Основною метою є створення малопотужного електронного регулятора струму з програмним керуванням на базі сучасного мікроконтролера, який здійснює аналіз параметрів навантаження та формує керуючі сигнали відповідно до заданих алгоритмів [3, 4].

Пристрій призначений для роботи з побутовим трансформаторним зварювальним апаратом змінного струму і реалізує функцію плавного регулювання вихідного струму в межах від 0 % до 100 % номінального значення. Номінальний зварювальний струм складає $I_{ном} = 150 \text{ А}$, при напрузі живлення $U_{жив} = 220 \text{ В} \pm 10 \%$, частоті мережі $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$, з вмістом гармонік не більше 5 %.

Мікроконтролерна система повинна передбачати можливість оновлення або заміни програмного забезпечення через персональну ЕОМ, що дозволяє адаптувати регулятор до різних типів навантажень або режимів зварювання. Це відповідає сучасним тенденціям побудови «інтелектуальних» систем керування, де програмна логіка визначає адаптивну поведінку пристрою [5].

До конструктивно-експлуатаційних вимог належать:

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- усі елементи, встановлені на друкованих платах і панелях, повинні мати маркування позиційних позначень, які відповідають електричній схемі та переліку елементів;

- прилад заборонено встановлювати на передню або задню панель, оскільки це може призвести до механічного пошкодження органів керування, корпусу або мережевого шнура;

- допустимий температурний діапазон експлуатації становить від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ при відносній вологості не більше 75 %;

- робота приладу допускається лише за умов відсутності різких коливань напруги мережі живлення протягом тривалого періоду;

- регулювання часу й величини вихідного струму має здійснюватися у ручному режимі за допомогою елементів керування на панелі приладу;

- пристрій повинен відповідати вимогам електробезпеки та пожежної безпеки, установленим стандартом ОСТ 4.275.003-77, забезпечувати безпечність під час монтажу, експлуатації, обслуговування та ремонту.

Крім того, прилад повинен мати ступінь захисту IP-44 і кліматичне виконання У2, що передбачає можливість експлуатації під навісом або в сухих приміщеннях. Таке виконання забезпечує захист від потрапляння твердих часток і бризок води з будь-якого напрямку, що є важливою умовою безпечної роботи у побутових умовах.

Усі параметри регулятора повинні відповідати нормам експлуатаційної надійності й стабільності, а також гарантувати сумісність з побутовими зварювальними трансформаторами потужністю до 3 кВА. Робота пристрою має проходити в межах встановлених експлуатаційних режимів без перевищення допустимих температур елементів силового ланцюга.

Таким чином, технічне завдання на розробку мікроконтролерного регулятора струму визначає створення сучасного електронного пристрою з високою то-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

чністю, стабільністю та функціональністю, здатного покращити якість зварювального процесу, зменшити енергоспоживання та забезпечити безпечні умови експлуатації у побутовому середовищі.

1.7 Висновки до першого розділу

У результаті проведеного огляду встановлено, що сучасне зварювальне виробництво характеризується широким використанням електродугових технологій, які забезпечують високу якість з'єднань і універсальність застосування в різних галузях промисловості. Аналіз існуючих способів регулювання зварювального струму показав, що традиційні методи — магнітне шунтування, застосування дроселів, реостатів або ступеневе перемикання обмоток — мають суттєві недоліки, зокрема значні енергетичні втрати, обмежену плавність регулювання та складність конструкції.

Розглянуті електронні схеми керування, побудовані на тиристорних і симісторних елементах, забезпечують вищу стабільність зварювального процесу, плавне регулювання струму та зменшення теплових втрат. Особливу увагу приділено сучасним мікроконтролерним системам, які дозволяють реалізувати програмно-керовані алгоритми стабілізації струму та автоматичне регулювання потужності.

З аналізу схемних рішень можна зробити висновок, що використання мікроконтролера як основного елемента керування є технічно доцільним, оскільки він забезпечує адаптивність, високу точність і гнучкість у налаштуванні режимів. Впровадження таких систем у побутові зварювальні апарати дозволяє підвищити їхню надійність, енергоефективність та безпечність експлуатації.

Отже, подальший розвиток і вдосконалення регуляторів струму доцільно здійснювати на основі мікроконтролерних технологій, що відкриває можливість створення інтелектуальних систем керування побутовими та промисловими зварювальними трансформаторами нового покоління.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ПОБУТОВОГО ЗВАРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

2.1 Розробка варіантів структурних схем регулятора струму

2.1.1 Структурна схема регулятора струму за першим варіантом

У процесі розробки мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора було проаналізовано кілька можливих варіантів побудови структурних схем, які відрізняються складністю, принципом регулювання та рівнем автоматизації процесу керування. На основі проведеного аналізу розроблено три послідовні варіанти схем, що еволюційно демонструють перехід від найпростішого індукційного регулювання до сучасного мікроконтролерного керування струмом.

Перший варіант структурної схеми, представлений на рисунку 2.1, є найпростішим і ґрунтується на класичному принципі регулювання струму за допомогою зварювального трансформатора ЗТр та індукційного регулятора струму (ІРС). У такій схемі регулювання струму відбувається шляхом зміни індуктивного опору за допомогою магнітного шунта, який являє собою електромагнітний апарат з рухомим осердям. Під час переміщення осердя змінюється магнітний зазор між ярмом і якорем, що впливає на величину індуктивного опору та, відповідно, на струм зварювання.



Рисунок 2.1 - Найпростіший зварювальний трансформатор

Основною перевагою такого рішення є його простота, надійність та низька вимогливість до обслуговування. Однак дана схема має суттєві недоліки: вона характеризується значною масою та габаритами, високою собівартістю через використання великої кількості міді, а також обмеженим діапазоном регулювання струму. Такі недоліки обмежують можливість її використання в сучасних побутових установках. У сучасних зварювальних системах дедалі частіше застосовуються електронні схеми з використанням тиристорів або симісторів, що забезпечують плавне регулювання зварювального струму без механічних рухомих частин. Проте в межах даної магістерської роботи основна увага приділяється розробці системи керування на основі мікроконтролера, тому більш доцільним є розгляд наступних схем, що мають цифрову структуру керування [13, 15].

2.1.2 Структурна схема регулятора струму за другим варіантом

Другий варіант структурної схеми, зображений на рисунку 2.2, ґрунтується на використанні мікроконтролера, який здійснює керування процесом зварювання програмно.

У даній схемі реалізовані два програмні модулі модуляції – Брезенхемівські модулятори Бр.Мод.1 і Бр.Мод.2. На вхід першого модулятора надходить код необхідної потужності, який задається кнопками керування. На його виході формується імпульсна послідовність, що після фільтрації у фільтрі нижніх частот (ФНЧ 1) надходить на один із входів компаратора. На другий вхід компаратора подається напруга, знята з навантаження, яка проходить через другий фільтр нижніх частот (ФНЧ 2). Таким чином, компаратор формує сигнал похибки, який надходить на вхід мікроконтролера, де піддається цифровій фільтрації (ЦФ). Завдяки синхронній роботі фільтра й модуляторів забезпечується ефективно придушення пульсацій напруги та струму, що підвищує стабільність зварювального процесу.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

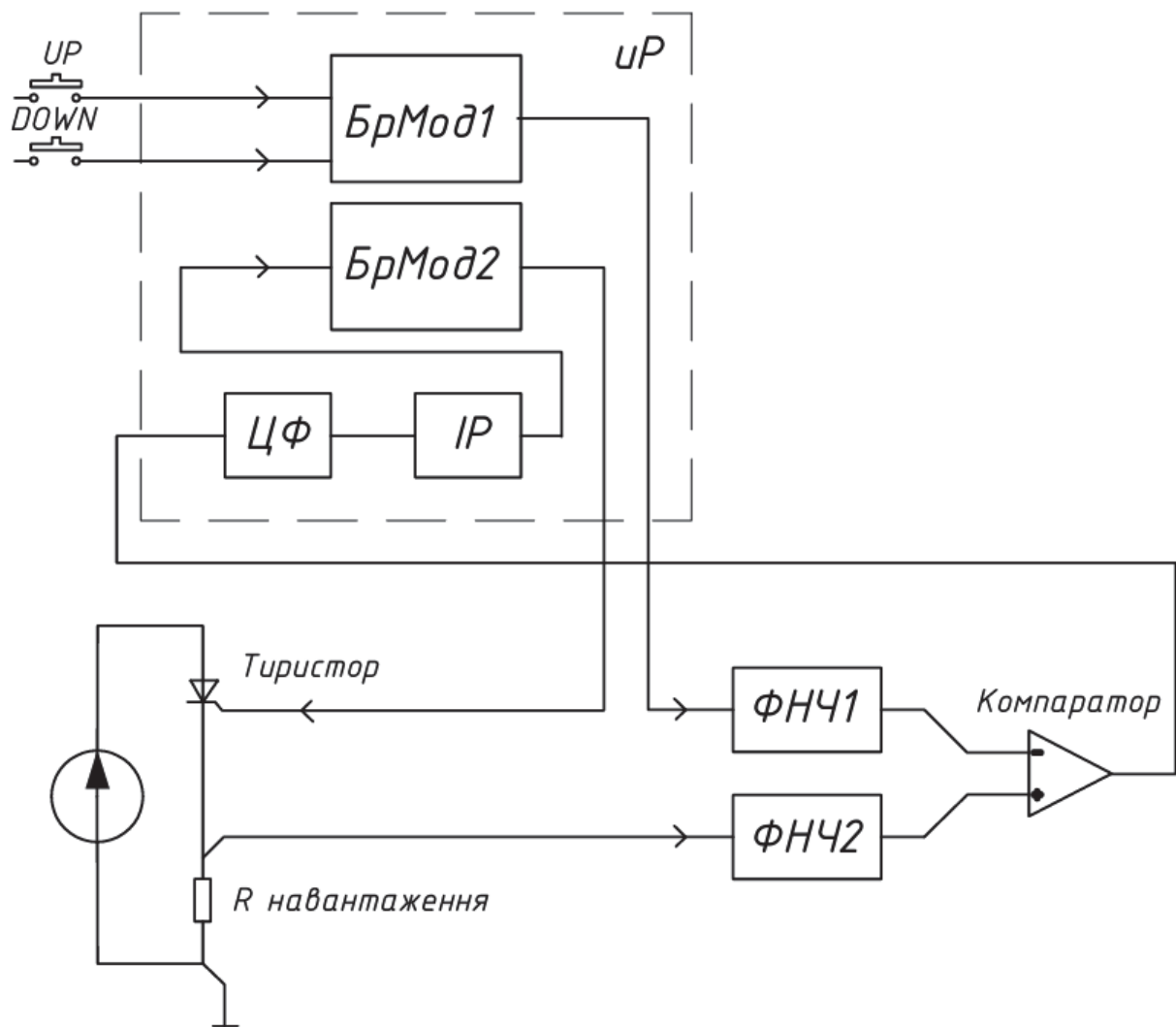


Рисунок 2.2 - Блок - схема пристрою

Сформований мікроконтролером восьмирозрядний сигнал похибки передається на інтегруючий регулятор (ІР), який працює у 16-розрядному режимі для підвищення точності регулювання. Молодші біти вихідного коду регулятора надходять на другий модулятор Бр.Мод.2, що формує керуючі імпульси для тиристорів. Таке рішення забезпечує високу точність регулювання струму, мале енергоспоживання, компактність і зручність експлуатації. До недоліків цієї схеми належить підвищена складність виготовлення, необхідність високої точності при налагодженні елементів і підборі параметрів цифрових вузлів. Проте дана схема де-

1:30; вузол зворотного зв'язку (ВЗЗ), який формує сигнал для мікроконтролера; вузол керування (ВК), що дозволяє вручну змінювати параметри роботи; вузол звукової сигналізації (ВЗС), який інформує користувача про перевищення номінального струму; зварювальний трансформатор (ЗТр), який є основним джерелом струму; і, нарешті, мікроконтролер (МК) - центральний керуючий елемент, який виконує всі функції контролю, стабілізації та керування регулятором струму.

Дана структурна схема має суттєві переваги порівняно з попередніми рішеннями. Вона забезпечує плавне регулювання струму, автоматичний контроль перевантажень, високу точність підтримання параметрів дуги та захист від аварійних режимів. Завдяки застосуванню мікроконтролера досягається можливість програмного налаштування алгоритму роботи, що дозволяє адаптувати систему до різних умов зварювання. Крім того, конструкція характеризується малою масою, енергоефективністю та підвищеною надійністю при експлуатації. Таким чином, третій варіант структурної схеми є найбільш доцільним для реалізації у побутових зварювальних трансформаторах, оскільки поєднує простоту апаратної частини з гнучкістю програмного керування.

Використання мікроконтролерних технологій у системах регулювання струму дозволяє створювати інтелектуальні зварювальні пристрої нового покоління, які здатні автоматично стабілізувати струм, адаптуватися до зміни навантаження, а також забезпечувати користувача інформацією про поточний стан системи. Такі рішення відповідають сучасним вимогам до побутового зварювального обладнання - енергоефективність, компактність, безпечність та універсальність використання.

2.2 Розробка електричної принципової схеми регулятора струму

Основою функціональної частини розроблюваного пристрою є однокристальний мікроконтролер, який виконує роль центрального елемента системи керування. Саме він забезпечує генерацію керуючих сигналів, обробку зворотного

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		42

зв'язку, реалізацію алгоритмів стабілізації струму та індикацію поточного режиму роботи. Вибір мікроконтролера - це надзвичайно важливий етап у проектуванні, адже від нього безпосередньо залежать точність регулювання, швидкодія, надійність, енергоспоживання та собівартість усього зварювального регулятора.

На сьогодні ринок мікроконтролерів представлений великою кількістю виробників, серед яких Microchip Technology, Atmel, STMicroelectronics, Texas Instruments, NXP, Renesas, Infineon та інші. Мікроконтролери різняться між собою архітектурою, обсягом пам'яті, кількістю периферійних пристроїв, інтерфейсами введення-виведення, енергоспоживанням і продуктивністю. Тому для розробки пристроїв керування, особливо в енергетичних і зварювальних установках, важливо обрати мікроконтролер, який поєднує високу швидкодію, стійкість до електромагнітних завад і доступність програмних засобів для розробки [16, 17].

Серед існуючих мікроконтролерів розрізняють два основні типи архітектур - CISC (Complex Instruction Set Computer) та RISC (Reduced Instruction Set Computer). Мікроконтролери з CISC-архітектурою мають велику кількість команд (до 111 для серії MCS-51), розвинену систему адресації та гнучке програмування. Проте аналіз практичного використання показав, що близько 20 % команд застосовуються в понад 80 % випадків, тоді як складний дешифратор команд займає понад 70 % площі кристала. Це призводить до підвищення споживання енергії, збільшення розмірів і вартості мікросхеми. У зв'язку з цим виникла потреба у створенні спрощеної архітектури - RISC, що дозволяє зменшити набір команд, уніфікувати їхній формат і зменшити апаратну складність мікроконтролера.

RISC-архітектура (Reduced Instruction Set Computer) характеризується коротким та ефективним набором команд, зменшеним часом виконання і високим ступенем паралелізму. Команди RISC виконуються за один або кілька тактів, тоді як у CISC-контролерах для виконання однієї операції може знадобитися кілька машинних циклів. Наприклад, у популярних мікроконтролерах сімейства MCS-51 (CISC-тип) один машинний цикл складається з 12 тактів, тоді як у RISC-конт-

ролерах AVR кожна команда може виконуватися за один такт. Це дає змогу підвищити продуктивність у декілька разів, що особливо важливо при реалізації систем керування з реальним часом, де швидкість реакції є критичною [18].

Серед найбільш відомих представників RISC-архітектури є PIC-контролери компанії Microchip Technology. Вони застосовуються у високошвидкісних системах керування електродвигунами, у побутових електронних пристроях, системах сигналізації, телефонних комутаторах, охоронних системах та автомобільній електроніці. PIC-контролери відзначаються простою структурою команд (33–35 інструкцій), малим часом виконання (4 такти - один цикл при частоті 20 МГц) та високим рівнем інтеграції. Більшість мікроконтролерів мають апаратно реалізований стек (2–16 рівнів), підтримку переривань, таймери, АЦП і можливість захисту Flash-пам'яті від несанкціонованого копіювання. Крім того, вони мають широкий діапазон робочих температур, що робить їх придатними для використання у промислових умовах.

Іншим важливим представником RISC-систем є AVR-мікроконтролери, розроблені компанією Atmel (нині Microchip). Вони є високопродуктивними 8-розрядними контролерами загального призначення, створеними за гарвардською архітектурою, що передбачає фізичне розділення пам'яті програм і пам'яті даних. Це дозволяє одночасно здійснювати вибірку інструкцій і доступ до даних, підвищуючи швидкодію системи.

Мікроконтролери AVR відзначаються широкою номенклатурою, що дозволяє користувачеві вибрати оптимальний варіант за співвідношенням продуктивність – вартість – енергоспоживання. Усі AVR-контролери мають спільну архітектуру ядра, але різняться обсягом пам'яті, кількістю портів введення-виведення та периферійних пристроїв. Основні сімейства AVR - це Tiny, Classic і Mega. Серія Tiny орієнтована на недорогі, прості пристрої з невеликим обсягом пам'яті (до 2 КБ Flash) і мінімальною периферією. Сімейство Classic - найпоширеніше, має Flash-пам'ять до 8 КБ, EEPROM до 512 байт, SRAM до 512 байт, два таймери, 15 ліній введення-виведення і продуктивність до 16 MIPS. Серія Mega

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

призначена для складніших систем, має розширений набір периферійних модулів, АЦП з більшою розрядністю, апаратні інтерфейси I²C, UART, SPI і підтримку прямих переривань.

Для розроблюваного мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора найбільш оптимальним є AVR-контролер серії Classic, оскільки він забезпечує достатню функціональність при низькій вартості та споживанні енергії. Особливу увагу при виборі звернено на наявність апаратних таймерів для керування імпульсами тиристорів, кількість ліній введення-виведення для зв'язку з індикацією, кнопками керування і вузлом зворотного зв'язку, а також обсяг пам'яті для реалізації алгоритмів регулювання.

У результаті аналізу було обрано мікроконтролер типу AT90S2313, який належить до сімейства Classic AVR. Він має 15 ліній введення-виведення, 2 КБ Flash-пам'яті програм, 128 байт SRAM, 128 байт EEPROM, два таймери/лічильники, підтримку послідовного інтерфейсу UART та SPI, а також вбудований генератор тактових імпульсів. Його гарвардська архітектура забезпечує ефективне виконання команд, а регістровий файл із 32 регістрів дозволяє реалізувати швидкий доступ до даних без затримок у пам'яті. Мікроконтролер підтримує програмування через стандартний SPI-інтерфейс безпосередньо на платі пристрою, що спрощує розробку та оновлення прошивки. Flash-пам'ять розрахована на щонайменше 1000 циклів запису/стирання, що забезпечує високу надійність у тривалій експлуатації.

Крім цього, AT90S2313 має низку додаткових переваг: низьке енергоспоживання (менше 10 мА при частоті 4 МГц), широкий діапазон робочих температур (-40...+85 °С), напругу живлення 2,7–6,0 В, а також можливість переходу у сплячі режими для зменшення енергозатрат. Мікроконтролер сумісний із популярним середовищем розробки Atmel Studio, що дає можливість зручно налагоджувати програмне забезпечення і проводити відлагодження у реальному часі.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Отже, обраний мікроконтролер AT90S2313 повністю відповідає вимогам до проєктованого пристрою. Він забезпечує необхідний рівень швидкодії для формування керуючих імпульсів, має достатній обсяг пам'яті для реалізації алгоритмів автоматичного регулювання, підтримує інтерфейси для комунікації з іншими вузлами системи та характеризується високою стабільністю при роботі у складних умовах зварювального середовища. Застосування цього мікроконтролера дозволяє створити компактний, надійний, економічний і функціонально гнучкий регулятор струму, який може бути легко модернізований шляхом оновлення програмного забезпечення без зміни апаратної частини.

Технічні характеристики мікроконтролерів AVR сімейства Classic наведено в табл.2.1.

Таблиця 2.1 - Мікроконтролери AVR сімейства Classic

Тип	Напруга живлення, В	Тактова частота, МГц	I/O	Flash	EEPROM	EEPROM	SRAM	Інтерфейси	Аналогові входи	Таймери
AT90S23	2,1-6,0 4,0-6,0	4,10	15	2K	128	128	128	UART	-	1x8 1x16
A790Z2323	2,7-6,0	4	3	2K	128	128	128	-	-	1x8
AT90S2323	4,0-6,0	10	3	2K	128	128	128	-	-	1x8
AT90LS2343	2,7-6,0	4	5	2K	128	128	128	-	-	1x8
A7W52343	4,0-6,0	10	5	2K	128	128	128	-	-	1x8
A790LS4433	2,7-6,0	4	20	4K	256	128	128	UART SPI	ADC 6x10	1x8 1x16
AT90SWS	4,0-6,0	8	20	4K	256	128	128	UART SPI	ADC 6x10	1x8 1x16
A790S8515	4,0-6,0	8	32	8K	512	512	512	UART SPI	-	2x8 1x16
A790LSS535	2,7-6,0	4	32	8K	512	512	512	UART SPI	ADC 8x10	2x8 1x16
A790.S8535	4,0-6,0	8	32	8K	512	512	512	UART SPI	ADC 8x10	2x8 1x16
AT90.S8534	1,8-6,0	4	32	8K	256	512	512	UART SPI	ADC 6x10	2x8 1x16

Пам'ять даних є одним із ключових елементів мікроконтролерів серії AVR, оскільки саме вона забезпечує збереження проміжних результатів обчислень, калібрувальних коефіцієнтів, таблиць, а також конфігураційних параметрів програми. В усіх AVR-мікроконтролерах передбачено енергонезалежну пам'ять EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), що дозволяє зберігати інформацію навіть при повному знеструмленні пристрою. Цей тип пам'яті використовується для збереження постійних даних, які не повинні змінюватися під час звичайної роботи системи - наприклад, заводських налаштувань, коефіцієнтів перетворення, калібрувальних таблиць чи користувацьких параметрів. Дані в пам'ять EEPROM можуть записуватись як під час програмування пристрою через інтерфейс SPI, так і безпосередньо в процесі роботи за допомогою спеціальних підпрограм. Кількість гарантованих циклів запису і стирання перевищує 100 000, що є високим показником довговічності. Для захисту від несанкціонованого доступу мікроконтролери оснащено двома програмованими бітами захисту, які блокують зчитування як коду програми, так і вмісту енергонезалежної пам'яті EEPROM [18].

У мікроконтролері AT90S2313 реалізовано 15 незалежних ліній введення-виведення, кожна з яких може бути сконфігурована як вхід або вихід. Завдяки потужним вихідним драйверам, кожен вивід здатен витримувати струм навантаження до 20 мА, а короткочасно - до 40 мА, що дозволяє безпосередньо підключати до мікроконтролера світлодіоди, транзистори або логічні мікросхеми без необхідності проміжних каскадів підсилення. Сукупне навантаження на всі лінії одного порту не повинно перевищувати 80 мА, що відповідає рекомендаціям виробника при напрузі живлення 5 В. Така конфігурація дозволяє реалізувати як керування індикацією, так і підключення кнопок, датчиків або інших зовнішніх пристроїв без складних узгоджувальних схем [18].

Система таймерів/лічильників є важливою складовою AVR-мікроконтролера, оскільки саме вона визначає часові інтервали, формує імпульси керування та забезпечує точність роботи програмних циклів. Кожен таймер має власний

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дільник частоти (prescaler), який можна підключити як до внутрішнього генератора, так і до зовнішнього джерела опорної частоти. Мікроконтролер має два виводи для підключення асинхронного джерела тактових імпульсів, що дає змогу використовувати зовнішній кварцовий резонатор на частоті 32,768 кГц для реалізації режимів реального часу (RTC). Така гнучкість дозволяє вибрати оптимальний режим роботи між високошвидкісним тактуванням під час зварювального процесу і низькочастотним - у режимах енергозбереження [17, 18].

Внутрішній генератор тактової частоти AVR-контролера може запускатися від кількох джерел: зовнішнього кварцового резонатора, зовнішнього генератора, RC-ланцюга або вбудованого RC-осцилятора. Оскільки архітектура AVR повністю статична, мікроконтролер здатен працювати при будь-якій частоті - від одиниць герців до максимальної межі, визначеної типом пристрою. Це дає можливість реалізувати покроковий режим виконання програм, що є зручним при відлагодженні або тестуванні. Залежно від моделі, максимальна частота може досягати 16–20 МГц, що забезпечує швидкодію до 16 MIPS (мільйонів інструкцій за секунду). Додатково мікроконтролери можуть переходити в один із шести режимів енергозбереження, включаючи Idle, ADC Noise Reduction, Power-down, Power-save, Standby та Extended Standby, що дозволяє істотно зменшити енергоспоживання у паузах між циклами роботи.

Система команд AVR-мікроконтролерів налічує до 133 інструкцій, згрупованих у п'ять основних категорій: команди умовного та безумовного розгалуження, арифметичні, логічні, команди пересилки даних і команди роботи з бітами. Завдяки RISC-архітектурі та наявності регістрового файлу з 32 регістрів загального призначення забезпечується швидке виконання більшості команд за один такт, що істотно підвищує загальну продуктивність системи. Така структура дозволяє створювати компактні програми з високою швидкістю виконання та мінімальними затримками, що є критично важливим при формуванні керуючих імпульсів для зварювального трансформатора [16].

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для порівняння, мікроконтролери сімейства PIC компанії Microchip Technology Inc. також побудовані на RISC-архітектурі й відзначаються винятковою продуктивністю - до 5 MIPS, що встановлює промисловий стандарт для 8-бітових пристроїв аналогічного класу [17]. PIC-контролери широко застосовуються у системах автоматизації, побутовій електроніці, автомобільних приладових панелях, вентиляційних установках і компресорах. Більшість мікроконтролерів серії PIC18 оснащено 10-розрядним модулем CCP/PWM (Capture/Compare/PWM), який дає змогу керувати кількома вихідними каналами одночасно та реалізовувати мостові й напівмостові схеми. Така функціональність дозволяє PIC-контролерам ефективно керувати електродвигунами, інверторами, системами освітлення або температурними регуляторами.

Залежно від функціонального рівня, мікроконтролери PIC16/17 поділяються на три сімейства: PIC16C5X (базове, 12-розрядні команди), PIC16C6X/7X/8X (розширене, 14-розрядні команди) і PIC17CXX (високопродуктивне, 16-розрядні команди). Наприклад, PIC16C5X при тактовій частоті 20 МГц забезпечує продуктивність, що у чотири рази перевищує показники аналогів таких виробників, як Motorola, Intel, SGS-Thomson, Zilog, які працюють на нижчих частотах (8–12 МГц). Це дає можливість використовувати PIC-контролери для створення систем реального часу, керування двигунами, сканерами, касовими апаратами, відеоігровими консолями та іншими пристроями, де потрібна висока швидкодія.

Таким чином, аналіз властивостей AVR- і PIC-мікроконтролерів показує, що обидва типи мають високі показники продуктивності, стабільності та гнучкості. Проте, для задачі розробки мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора доцільніше використовувати AVR-сімейство, яке має гарвардську архітектуру, потужну систему введення-виведення, підтримку зовнішніх інтерфейсів і простоту програмування. Це дозволяє реалізувати як функції стабілізації струму, так і систему захисту від перевантаження, з одночасним мінімальним енергоспоживанням і високою надійністю [15, 17, 18].

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

машинний цикл (400 нс при тактовій частоті 10 МГц), а команди переходу - за два цикли (приблизно 800 нс). Така структура дозволяє досягти продуктивності до 2,5 MIPS, що для свого часу було одним із найвищих показників серед 8-бітових контролерів.

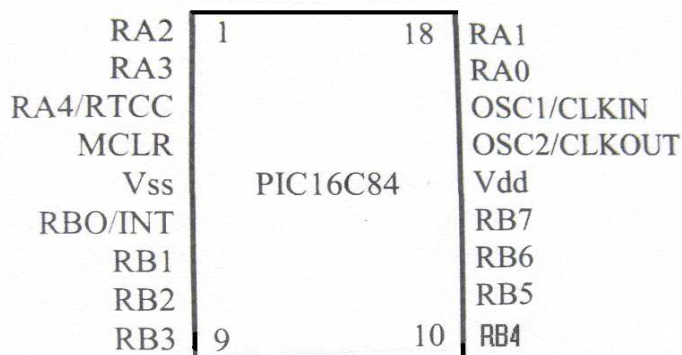


Рисунок 2.5 - Тип корпусу мікроконтролера PIC16C84

Мікроконтролер оснащено чотирма джерелами переривань (таймер, зовнішній сигнал, зміна рівня на порту, завершення запису в EEPROM) і восьмирівневим апаратним стеком, який забезпечує швидке збереження адрес повернення під час виконання вкладених підпрограм. У складі периферійного модуля є 8-бітовий таймер/лічильник з програмованим попереднім дільником, що дозволяє реалізувати функціональність 16-бітного лічильника для вимірювання часових інтервалів або частоти зовнішніх сигналів.

Контролер має 13 двонаправлених ліній введення-виведення, кожна з яких може бути сконфігурована як вхід або вихід програмним способом. Завдяки високій навантажувальній здатності (до 25 мА у вхідному та 20 мА у вихідному режимах) PIC16C84 дозволяє безпосередньо підключати світлодіоди, реле або транзисторні ключі без використання зовнішніх драйверів, що суттєво спрощує схему та зменшує вартість пристрою.

Окрему перевагу становить гнучкість у розробці програмного забезпечення: мікроконтролер підтримується фірмовим асемблером MPLAB ASM, програмним емулятором, внутрішньосхемним налагоджувачем (In-Circuit Debugger) та апаратними програматорами Microchip. Це дає змогу проводити як початкове

програмування, так і налагодження мікроконтролера безпосередньо в робочій схемі.

Завдяки поєднанню високої швидкодії, невеликої кількості команд, широких можливостей введення-виведення, вбудованої EEPROM-пам'яті та простої архітектури, PIC16C84 став базовою платформою для навчальних і промислових розробок у сфері мікропроцесорного керування. Його успіх започаткував подальший розвиток сімейства PIC16F84, PIC16F87X та PIC18FXX, які й нині залишаються популярними у проектуванні систем керування електроприводами, освітленням, температурними контролерами та регуляторами струму [17, 18].

Наявність у мікроконтролері PIC16C84 вбудованої пам'яті програм (ПЗП) забезпечує гнучкість у налаштуванні прикладних параметрів системи, що дозволяє адаптувати роботу пристрою під конкретні умови експлуатації. Завдяки цій пам'яті можливе збереження користувацьких параметрів, таких як коди передавачів, частоти приймачів, швидкості обертання двигунів, часові затримки чи коефіцієнти калібрування. Це особливо важливо при створенні систем, де необхідна персоналізація або тонке налаштування після складання пристрою.

Мікроконтролер відзначається малою енергоспоживаністю та компактними розмірами корпусів, доступних як для звичайного, так і для поверхневого монтажу. Це робить PIC16C84 придатним для використання у портативних і мобільних пристроях, включаючи побутові системи контролю, автономні сенсорні модулі, таймери або невеликі вимірювальні прилади. Завдяки поєднанню низької вартості, високої швидкодії, простоти програмування та широких можливостей вводу-виводу, даний мікроконтролер успішно використовується навіть у сферах, де раніше переважали апаратні логічні схеми. Його застосування доцільне у системах заміни жорсткої логіки, для реалізації допоміжних співпроцесорів, програмованих таймерів та керуючих модулів у складі великих систем автоматизації.

Важливою перевагою PIC16C84 є наявність вбудованого автомата програмування EEPROM, який дозволяє змінювати програму та параметри даних навіть після завершення процесу асемблювання або тестування пристрою. Це забезпечує

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

можливість оперативного внесення змін у програмне забезпечення без необхідності повного перепрограмування мікроконтролера. Така функція особливо корисна під час тиражування виробів, коли потрібно внести індивідуальні налаштування для кожного екземпляра, або при введенні калібрувальних даних після фінального тестування готової системи [17, 18].

Подальший розвиток сімейства PIC привів до появи серії PIC16F87X, корпус якої зображено на рисунку 2.6. Ці мікроконтролери, на відміну від PIC16C84, мають розширені функціональні можливості, серед яких — вбудований модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП). У моделях із 28 виводами передбачено п'ять каналів АЦП, а у версіях із 40 або 44 виводами — вісім каналів. Це дає змогу обробляти сигнали з кількох аналогових джерел одночасно, що є важливою перевагою для застосувань у системах автоматичного регулювання, контролю температури, струму чи напруги.

Вхідний аналоговий сигнал надходить на комутатор каналів АЦП, який вибирає активний вхід і подає його на перетворювач. Після цього аналоговий сигнал перетворюється в 10-бітовий цифровий код, що забезпечує високу роздільну здатність та точність вимірювань. Як джерело опорної напруги для АЦП може бути вибрано один із кількох варіантів: VDD, VSS, RA2 або RA3, що дозволяє адаптувати схему під різні рівні напруги та забезпечує гнучкість у проектуванні електричної частини системи.

Таким чином, серії PIC16C84 і PIC16F87X є еволюційними етапами розвитку 8-бітових мікроконтролерів Microchip Technology, що поєднують простоту архітектури з широкими функціональними можливостями. Якщо PIC16C84 орієнтований на прості системи керування з фіксованими алгоритмами, то PIC16F87X відкриває можливість реалізації багатоканального вимірювання аналогових параметрів, автоматичного керування й адаптивного регулювання, що робить його ефективним рішенням для побудови сучасних регуляторів струму побутових зварювальних трансформаторів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		53

Модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера PIC16C877 може функціонувати навіть у режимі SLEEP, що дозволяє зменшити енергоспоживання системи під час простою. У цьому режимі як джерело тактових імпульсів для роботи АЦП використовується вбудований RC-генератор, який забезпечує стабільність перетворення навіть за вимкненого основного тактового генератора.

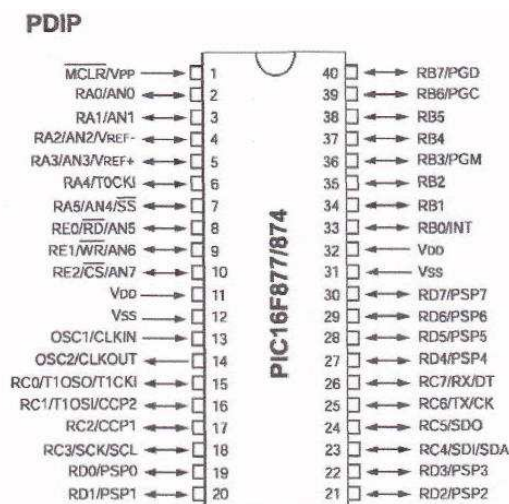


Рисунок 2.6 - Типи корпусу мікроконтролера PIC16F877

Для управління модулем АЦП у мікроконтролері застосовується чотири основні регістри:

- ADRESH - старший байт результату перетворення;
- ADRESL - молодший байт результату перетворення;
- ADCON0 - регістр керування №1, що задає режим роботи та запуск АЦП;
- ADCON1 - регістр керування №2, який визначає конфігурацію аналогових і цифрових входів, а також вибір джерела опорної напруги.

На рисунку 2.7 подано структурну схему мікроконтролера PIC16C877, у якій відображено зв'язки між модулями керування, системною шиною даних і периферійними пристроями. Регістр ADCON0 використовується для налаштування частоти вибірки, запуску процесу перетворення та вибору активного каналу АЦП. За допомогою ADCON1 програмно визначається, які виводи мікроконтролера будуть задіяні як аналогові входи для вимірювання сигналів, а які — працюватимуть

Основні технічні характеристики цього мікроконтролера наведено нижче. Усі інструкції виконуються за один машинний цикл, що забезпечує максимальну швидкість при тактовій частоті до 20 МГц. Пристрій підтримує до 14 джерел переривань, що дає змогу реалізувати складні системи керування з декількома незалежними подіями. Апаратна структура містить 8-рівневий стек, який використовується для збереження адрес під час виконання підпрограм. Підтримуються прямий і скісний (indexed) режими адресації, що розширює можливості роботи з пам'яттю.

До складу системи ініціалізації входять схема скидання при вмиканні живлення (POR), таймер затримки запуску PWRT та таймер стабілізації генератора OST, які гарантують надійний старт системи навіть при нестабільних умовах живлення. Передбачено програмований захист пам'яті програм для запобігання несанкціонованому копіюванню, а також режим енергозбереження (SLEEP), який дозволяє суттєво зменшити споживання енергії при тривалому простої системи.

Особливістю мікроконтролера є гнучкий вибір джерела тактування - можливе використання внутрішнього або зовнішнього генератора, кварцового резонатора чи RC-ланцюга. Використовується високошвидкісна CMOS-технологія у поєднанні з енергоефективною FLASH/EEPROM-пам'яттю. Архітектура RISC забезпечує високу швидкість при мінімальному числі команд, а повністю статична структура дозволяє зупиняти тактування без втрати даних. Для розробників передбачено можливість програмування безпосередньо у зібраному пристрої (In-Circuit Programming) та режим внутрішньосхемної відладки (In-Circuit Debugging), що значно полегшує процес тестування та оновлення прошивки.

Робоча напруга мікроконтролера становить 2,0–5,5 В, що дозволяє використовувати його як у портативних, так і у стаціонарних пристроях. Порти введення-виведення мають підвищену струмову навантажувальну здатність до 25 мА, що дозволяє безпосередньо підключати світлодіоди, транзисторні ключі або інші активні елементи без додаткових підсилювачів. При цьому споживання

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		56

струму у стандартному режимі не перевищує 0,6 мА, що свідчить про високу енергоефективність пристрою [17].

З урахуванням наведених характеристик, серед розглянутих у роботі мікроконтролерів, найбільш придатним для реалізації системи керування струмом побутового зварювального трансформатора є саме PIC16F877. Його потужна периферія, наявність вбудованого 10-бітного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), розширена система переривань та великий запас по кількості доступних портів введення-виведення роблять цей контролер оптимальним вибором для створення багатофункціонального та гнучкого регулятора струму. Крім того, його архітектура передбачає можливість модернізації пристрою в майбутньому - наприклад, шляхом додавання додаткових датчиків або реалізації функцій автоматичного калібрування зварювального процесу без зміни апаратної бази.

2.2.2 Вибір вузла індикації

У якості вузла індикації у системі мікроконтролерного регулятора струму доцільно використовувати рідиннокристалічний (LCD) дисплей виробництва компанії Microtips Technology, який забезпечує зручне та наочне відображення робочих параметрів пристрою. Такий тип індикатора відзначається низьким енергоспоживанням, високою контрастністю зображення та широкими можливостями відображення текстової та графічної інформації.

Для реалізації візуалізації поточного зварювального струму, напруги, режимів роботи, повідомлень про помилки або налаштувань доцільно застосувати графічний дисплей MTG12864X, структурна схема та зовнішній вигляд якого наведені на рисунку 2.8. Цей дисплей має матрицю 128×64 пікселі, що дозволяє відображати не лише символи, а й графічні елементи, наприклад, індикатори рівня струму або напруги, піктограми стану системи, шкали регулювання тощо.

Дисплей MTG12864X працює при напрузі живлення 5 В та споживає невеликий струм - близько 30 мА, що робить його енергоефективним і придатним

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дворядковий рідиннокристалічний дисплей типу МТС16207Х виробництва Microtips Technology, структурна схема якого подана на рисунку 2.9.

Дисплей МТС16207Х належить до класу алфавітно-цифрових індикаторів, що дозволяють відображати два рядки по 16 символів у кожному. Така структура забезпечує достатній обсяг інформації для виведення основних параметрів системи, таких як значення зварювального струму, напруга, вибраний режим роботи або повідомлення про помилки. Завдяки простій організації інтерфейсу, він може безпосередньо підключатися до мікроконтролерів серії PIC або AVR через стандартну 4- або 8-бітну шину даних, що значно спрощує електричну схему та скорочує час програмної розробки.

Основні технічні параметри дисплея МТС16207Х такі: напруга живлення становить 2,7...5,5 В, а споживаний струм - від 1,5 до 3,0 мА, що робить його надзвичайно економічним і придатним для використання навіть у системах із живленням від автономних джерел. Завдяки низькому енергоспоживанню, малим розмірам і високій контрастності зображення, цей дисплей є ідеальним рішенням для портативних або побутових вимірювальних пристроїв.

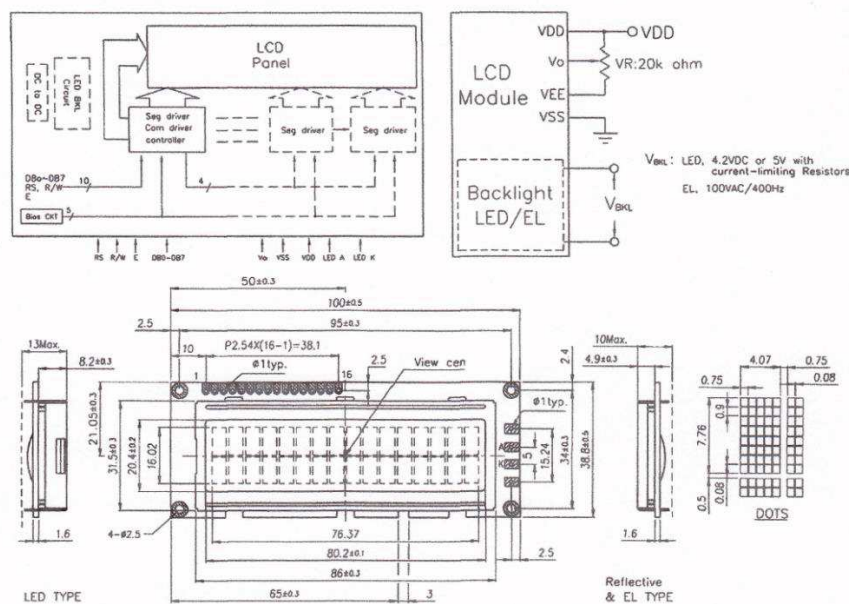


Рисунок 2.9 - Структурна схема та зовнішній вигляд індикатора МТС16207Х

Додатковою перевагою символічного дисплея є можливість відображення не лише числової, але й текстової інформації, що дозволяє реалізувати просту систему індикації стану пристрою. Наприклад, на дисплеї можуть виводитися повідомлення типу “Режим: Авто”, “Перевантаження” чи “Струм: 120А”, що значно підвищує зручність експлуатації. Завдяки невисокій вартості, простоті підключення та низьким вимогам до елементної бази, МТС16207Х є раціональним вибором для вузла індикації регулятора струму побутового зварювального трансформатора.

2.3 Вибір джерела змінного струму для ручного дугового зварювання

Під час вибору зварювального трансформатора [17] для різних способів ручного дугового зварювання змінним струмом першочергово визначають тип вольт-амперної характеристики дуги, що формується за конкретних умов процесу, та аналізують її основні параметри - робочу напругу, струм, довжину дуги, стабільність горіння. Виходячи з цього, здійснюють підбір джерела живлення, яке забезпечує оптимальну відповідність між вольт-амперною характеристикою дуги та зовнішньою характеристикою трансформатора, що є необхідною умовою стабільного процесу зварювання. Після цього, враховуючи експлуатаційні умови, тип зварювальних робіт і тривалість навантаження, обирають трансформатор відповідної потужності та режиму роботи - тривалого або повторно-короткочасного.

Для даного випадку розглядається вибір джерела живлення змінного струму, яке буде застосовуватись при ручному дуговому зварюванні покритими електродами марки АНО-3 діаметром 3 мм у нижньому положенні шва. Згідно з довідковими даними [5], для електродів такого діаметра оптимальний зварювальний струм становить 100–140 А. За цих умов вольт-амперна характеристика дуги є жорсткою, що потребує використання зварювального трансформатора з падаючою зовнішньою характеристикою.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Такі характеристики притаманні трансформаторам із рухомими обмотками, які дозволяють плавно регулювати зварювальний струм за рахунок зміни взаємного розташування первинної та вторинної обмоток. Зовнішня характеристика падаючого типу забезпечує, щоб струм короткого замикання лише незначно перевищував робочий струм, що гарантує стійке горіння дуги, навіть при частих змінах її довжини, характерних для ручного зварювання. Завдяки цьому тепловий режим зварювання залишається стабільним, а процес плавлення електрода - рівномірним.

Взаємне узгодження жорсткої вольт-амперної характеристики дуги з падаючою зовнішньою характеристикою джерела живлення є ключовим чинником забезпечення стабільного горіння дуги. У процесі ручного дугового зварювання робоча напруга дуги зазвичай перебуває в межах 20–36 В, і її величина залежить від просторового положення шва, типу електрода та товщини металу, що зварюється. Для правильного вибору джерела живлення дуги необхідно враховувати технічні характеристики трансформаторів, наведені у таблиці 2.2, що містить дані про вихідну напругу, робочий струм, коефіцієнт потужності, ККД та габаритні параметри.

Серед широкого асортименту зварювальних трансформаторів для даних умов найбільш придатними є моделі ТД-102 та ТД-306, які забезпечують робочий струм у межах 100–140 А при необхідній напрузі на дузі. Використання трансформаторів меншої потужності не дозволяє підтримувати стабільний режим зварювання, а застосування потужніших є економічно недоцільним, оскільки призводить до перевитрати електроенергії та збільшення маси обладнання.

З урахуванням стандартного робочого циклу для джерел живлення при ручному зварюванні (5 хвилин) трансформатор ТД-102 забезпечує режим 1 хвилина роботи та 4 хвилини паузи, тоді як ТД-306 - 3 хвилини роботи та 2 хвилини охолодження. Таким чином, ТД-102 доцільніше використовувати у монтажних або

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

пересувних умовах, де робота має короткочасний характер, тоді як ТД-306 раціональніше застосовувати у стаціонарних умовах, де потрібна тривала стабільна робота трансформатора.

Отже, для побутового зварювального регулятора, який працює на змінному струмі з електродами діаметром 3 мм, найбільш ефективним рішенням є використання трансформатора ТД-102, який забезпечує необхідний рівень стабільності зварювального струму, відповідає режиму повторно-короткочасної роботи й має оптимальне співвідношення між потужністю, габаритами та енергетичною ефективністю. Порівняльні технічні характеристики зварювальних трансформаторів із рухомими обмотками наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики трансформаторів з рухомими обмотками

Параметр	ТД-102	ТД-306
Номінальний зварювальний струм, А	160	250
Діапазон регулювання зварювального струму, А	60-175	100-300
Напруга; В; -холостого ходу	80	80
-номінальна	26	30
Потужність споживання, кВ-А	11,4	19,4
Маса, кг	38	67
Номінальний режим роботи, ПН%	20	20
Напруга мережі, В	220	220

2.4 Схема електрична принципова та її принцип дії

Схема електрична принципова мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора наведена на аркуші [МРМА25.00.00.000 ЕЗ]. Основним елементом керування в цій схемі є мікроконтролер DD1 типу PIC16F877 виробництва компанії Microchip Technology, який виконує функції формування сигналів керування, обробки зворотного зв'язку та реалізації алгоритму регулювання струму.

Живлення мікроконтролера забезпечує вузол живлення, який складається з трансформатора Т2, випрямного діодного моста VD3...VD6, стабілізатора напруги DA2 типу 78L05 та фільтруючих конденсаторів С4, С6. Трансформатор Т2 знижує напругу мережі до рівня, необхідного для живлення електронної частини схеми. Діодний міст VD3–VD6 виконує випрямлення змінної напруги, перетворюючи її на постійну. Стабілізатор DA2 підтримує стабільну напругу +5 В, необхідну для надійної роботи мікроконтролера. Конденсатори С4 і С6 виконують функцію згладжування високочастотних пульсацій, що запобігає виникненню електромагнітних перешкод і забезпечує стабільність живлення.

Регулювання потужності зварювального струму здійснюється за допомогою кнопок SA1 та SA2, які підключені до входів мікроконтролера. При ввімкненні пристрою автоматично встановлюється початковий рівень потужності - 50 % від номінальної робочої ($P_{роб}$). Коротке натискання будь-якої з кнопок викликає зміну потужності на ± 1 %, що забезпечує плавне й точне регулювання струму. Для відображення поточного рівня потужності застосовується цифровий індикатор CN1, який підключено до вихідних портів мікроконтролера.

Під час підключення зварювального навантаження струм проходить через симістор VS1. Для вимірювання зварювального струму використовується трансформатор струму Т1, який виконує функцію зменшення сигналу зворотного зв'язку у 30 разів. Отриманий сигнал подається на інвертуючий вхід операційного

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

підсилювача через розділовий конденсатор С1 та резистор R6, що формують ланцюг фільтрації високочастотних складових. Резистор R7 задає коефіцієнт підсилення операційного підсилювача, забезпечуючи необхідний рівень сигналу для подальшої обробки.

З виходу операційного підсилювача посилений сигнал зворотного зв'язку надходить на аналоговий вхід мікроконтролера PIC16F877, де за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП) відбувається його оцифрування. Оброблений цифровий сигнал аналізується керуючою програмою, проширеною в мікроконтролері, яка визначає різницю між заданим та фактичним значеннями зварювального струму. На основі цього формується сигнал керування для зміни кута відкривання симістора, що безпосередньо впливає на величину струму у зварювальному колі.

Для узгодження рівнів сигналів та захисту мікроконтролера від перевищення струму на керуючому електроді симістора в схемі застосовано транзистор VT1, який виконує функцію емітерного повторювача. Оскільки струм бази транзистора значно менший, ніж керуючий струм симістора, такий підхід забезпечує гальванічну розв'язку між мікроконтролером і силовим колом, підвищуючи електробезпеку й надійність схеми.

Таким чином, регулятор струму функціонує за принципом зворотного зв'язку з автоматичним коригуванням кута відкривання симістора, забезпечуючи стабільність зварювального струму незалежно від коливань напруги мережі чи зміни довжини дуги. Схема є енергоефективною, компактною та легкою в налагодженні, що робить її придатною для побутових і навчально-лабораторних зварювальних установок.

2.5 Розробка програмного забезпечення

Розробка програми для мікроконтролера виконується у середовищі Microchip MPLAB IDE [4], яке є основним інструментом розробки програмного

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		64

забезпечення для мікроконтролерів серії PIC. Це безкоштовне інтегроване середовище розробки (Integrated Development Environment), створене компанією Microchip Technology Inc., призначене для написання, компіляції, налагодження та тестування програм, що реалізуються у вбудованих системах.

MPLAB IDE забезпечує повний цикл розробки - від написання вихідного коду до прошивання мікроконтролера. Середовище містить редактор тексту з підсвічуванням синтаксису, асемблер/компілятор, симулятор для перевірки логіки роботи програми, а також менеджер проєктів, який дозволяє структурувати великі програми з кількох модулів. Програмне забезпечення підтримує роботу з різними моделями мікроконтролерів серій PIC10, PIC12, PIC16, PIC18, dsPIC та PIC32, що дає змогу легко адаптувати код для різних варіантів апаратних реалізацій.

MPLAB IDE інтегрується з низкою емуляторів та програматорів, зокрема MPLAB-ICE, PICMASTER, PICSTART Plus та PRO MATE, що дає можливість здійснювати апаратне налагодження та відлагодження у режимі реального часу. Крім того, середовище підтримує зовнішні налагоджувальні пристрої сторонніх виробників, що розширює функціональні можливості при створенні складних керуючих систем. У процесі налагодження програми MPLAB IDE дозволяє відстежувати роботу регістрів, змінних, таймерів, виконувати покрокову трасування команд і виявляти логічні помилки у програмному коді.

Після завершення написання програми вона компілюється у машинний код (файл із розширенням *.hex), який завантажується до мікроконтролера через програматор. Для прошивки мікроконтролера використовується зовнішній програматор, електрична принципова схема якого наведена на рисунку 2.10. Цей програматор підключається до COM-порту персонального комп'ютера або, у новіших реалізаціях, до порту USB. Програмування здійснюється у середовищі PonyProg2000 [7], яке забезпечує зручний інтерфейс для завантаження, верифікації та перевірки запису програмного коду в енергонезалежну пам'ять мікроконтролера.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Файл прошивки (hex-файл), згенерований у середовищі MPLAB, завантажується до PonyProg2000, після чого програма записується у FLASH-пам'ять мікроконтролера PIC16F877. Процедура програмування включає кілька етапів - ініціалізацію мікроконтролера, передавання даних, перевірку коректності запису та завершення циклу прошивки. Для запобігання пошкодженню мікроконтролера під час програмування у схемі програматора передбачено захисні діоди, струмообмежувальні резистори та стабілізоване джерело живлення.

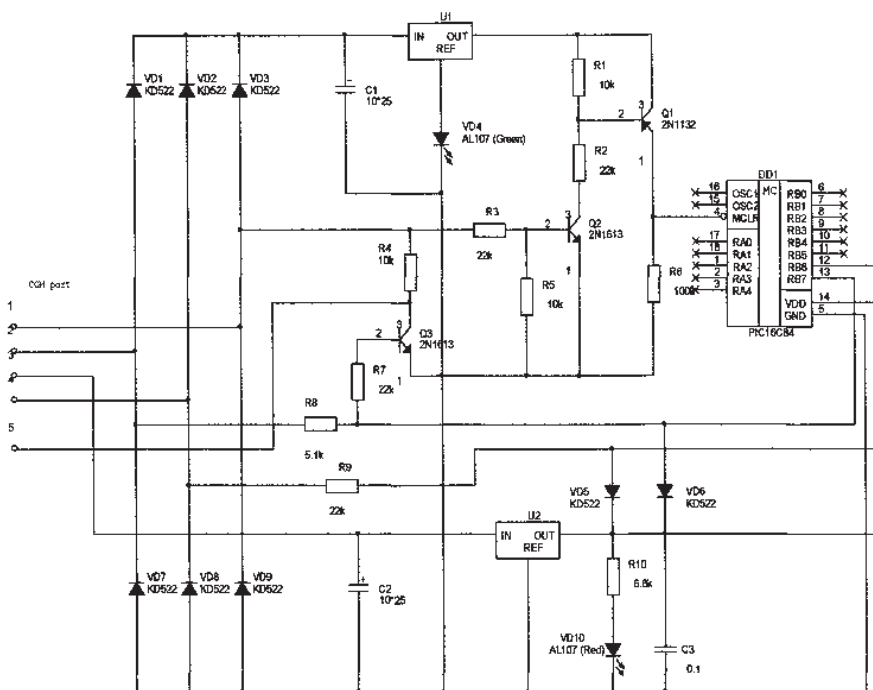


Рисунок 2.10 - Схема програматора для мікроконтролера

Таким чином, комбінація MPLAB IDE та PonyProg2000 забезпечує повний технологічний цикл - від розроблення програмного забезпечення до його реалізації у готовому пристрої. Такий підхід гарантує високу точність роботи регулятора струму, стабільність алгоритмів керування та можливість подальшої модифікації програмного коду без зміни апаратної частини системи.

2.6 Розробка мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора

2.6.1 Розробка друкованої плати

Друкована плата мікроконтролерного регулятора струму розроблена відповідно до принципової електричної схеми та призначена для монтажу елементів вузла керування зварювальним трансформатором. Конструкція плати забезпечує компактне розміщення мікроконтролера, елементів живлення, вузлів керування, індикації та формування керуючих сигналів, а також надійні електричні з'єднання між ними. Плата виконана односторонньою методом хімічного травлення, що спрощує її виготовлення в умовах навчальної або дрібносерійної лабораторії та знижує собівартість [19-21].

Загальний вигляд друкованої плати наведено на рис.2.11 (аркуш МРМА25.00.00.001).

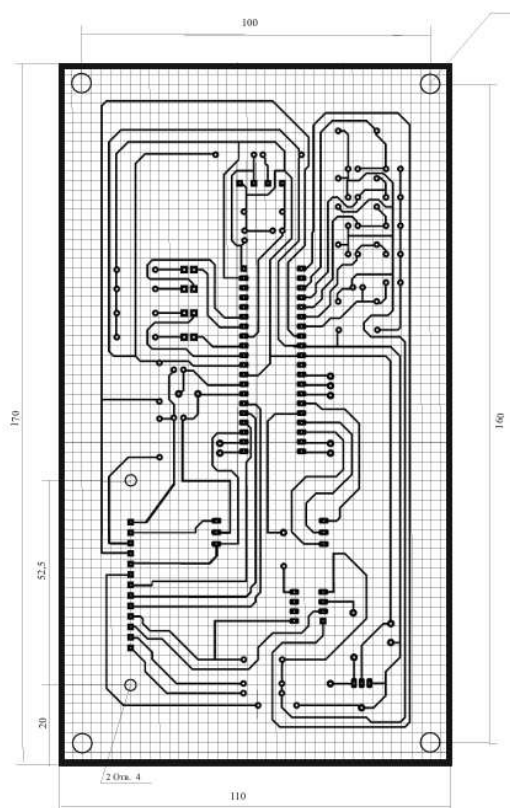


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд друкованої плати

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Габаритні розміри плати становлять приблизно 100×170 мм, товщина — стандартна для склотекстоліту типу СФ-2-35-2 згідно з ГОСТ 10316-78. Крок координатної сітки прийнято 2,5 мм, що полегшує трасування та розміщення елементів. Ширина друкованих провідників змінюється в межах від 0,6 до 4,4 мм залежно від величини струмів у відповідних колах, а відстань між провідниками становить від 0,5 до 6,9 мм, що відповідає вимогам електробезпеки та стандартам виготовлення друкованих плат. Форма і розміри контактних майданчиків, а також діаметри монтажних отворів підібрані з урахуванням типів застосованих радіоелементів і наведені в таблицях на кресленні плати.

Розроблена друкована плата відповідає вимогам ГОСТ 23752-79 і забезпечує механічну міцність, електричну надійність та зручність монтажу. Конструктивні рішення, прийняті при трасуванні, мінімізують довжину сигнальних ліній, зменшують вплив перешкод і забезпечують стабільну роботу мікроконтролерного регулятора струму в умовах експлуатації побутового зварювального обладнання, що підтверджується кресленням друкованої плати

2.6.2 Загальний вигляд мікроконтролерного регулятора струму

Загальний вигляд мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора наведено на рис.2.12 (аркуш МРМА24.00.00.000ДІ). Пристрій виконаний у компактному корпусі прямокутної форми, що забезпечує зручність розміщення елементів керування та підвищує безпеку експлуатації за рахунок ізоляції струмопровідних частин від користувача.

На передній панелі регулятора розташовані основні органи керування та індикації. Для задання режиму роботи передбачено дві кнопки: кнопка зменшення потужності та кнопка збільшення потужності, за допомогою яких здійснюється покрокове регулювання зварювального струму [22, 23]. Вмикання та вимикання

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

пристрою виконується тумблером «Мережа», який підключає регулятор до електричної мережі живлення 220 В. Захист електричної схеми від перевантажень і коротких замикань забезпечується запобіжником.

Для підключення навантаження, тобто зварювального трансформатора, на корпусі передбачені вихідні клеми, що дозволяють надійно та безпечно з'єднати регулятор із силовим колом. Поточне значення встановленої потужності або струму відображається на дисплеї, який забезпечує візуальний контроль режиму роботи пристрою та підвищує зручність його використання.

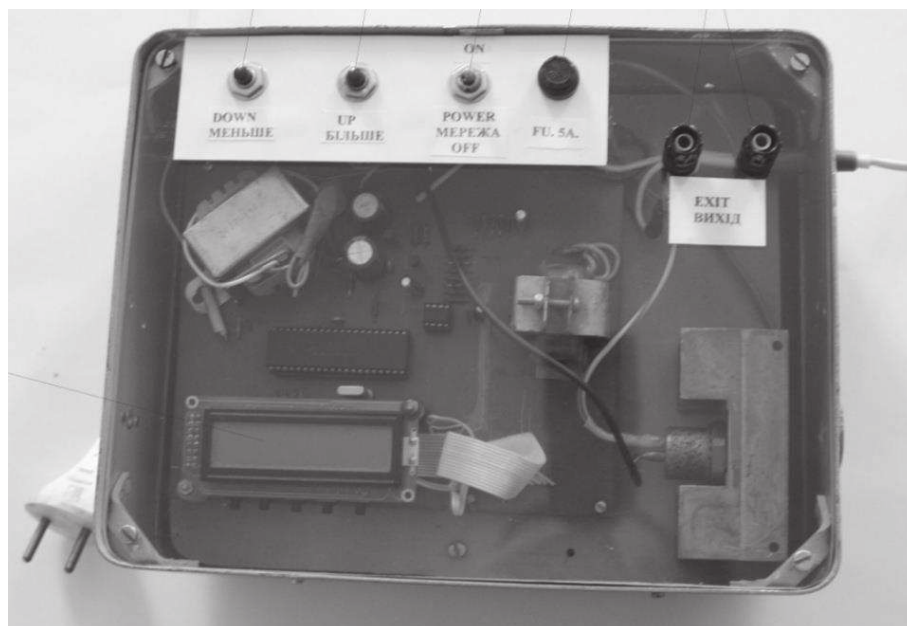


Рисунок 2.12 - Мікроконтролерний регулятор струму побутового зварювального трансформатора

Така конструкція забезпечує компактність, достатню жорсткість та можливість технічного обслуговування. Загалом розроблений регулятор має ергономічний зовнішній вигляд, простий і зрозумілий інтерфейс керування та відповідає вимогам до побутових і малих виробничих зварювальних установок.

2.7 Призначення та технічні характеристики мікроконтролерного регулятора струму

Відповідно до завдання на магістерську роботу, розроблено мікроконтролерний регулятор струму побутового зварювального трансформатора, який призначений для плавного регулювання та стабілізації зварювального струму під час ручного дугового зварювання покритими електродами. Основним завданням пристрою є забезпечення стабільного горіння дуги незалежно від коливань напруги живлення або змін довжини дуги, що підвищує якість шва, знижує витрати електродів і зменшує енергоспоживання.

Регулятор забезпечує плавну зміну струму в діапазоні від 0 % до 100 % номінального значення, що дозволяє адаптувати параметри процесу до типу електрода, товщини металу та умов зварювання.

Основні технічні параметри пристрою:

- діапазон регулювання зварювального струму - 0...100 %;
- напруга живлення - $U_{жив} = 220 \text{ В} \pm 10 \%$;
- номінальний струм регулювання - $I_{ном} = 150 \text{ А}$;
- частота мережі - $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$;
- рівень гармонічних спотворень - не більше 5 %.

Конструкція приладу передбачає можливість оновлення програмного забезпечення мікроконтролера через комп'ютер, що дозволяє реалізовувати нові режими роботи або змінювати алгоритми керування без заміни апаратної частини. Завдяки компактним розмірам, простому інтерфейсу керування та високій стабільності вихідних параметрів, пристрій може бути ефективно застосований у побутових умовах, навчальних лабораторіях та невеликих майстернях для зварювальних робіт різної складності.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2.8 Умови експлуатації мікроконтролерного регулятора струму

Прилад призначений для роботи в нормальних кліматичних умовах експлуатації згідно з вимогами стандартів ДСТУ 2226-93, що регламентують роботу електронного обладнання в умовах помірною клімату.

Нормальні кліматичні умови експлуатації:

- відносна вологість - $(75 \pm 15) \%$;
- температура навколишнього повітря - від $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- атмосферний тиск - 84–107 кПа.

Робочі (граничні) умови експлуатації:

- відносна вологість - 40–90 % при температурі $+30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура повітря - від $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+45 \text{ }^\circ\text{C}$;
- атмосферний тиск - 84–107 кПа.

Прилад розрахований на експлуатацію в закритих приміщеннях або під навісом, у місцях, захищених від прямого впливу атмосферних опадів, агресивних парів і пилу.

2.9 Підготовка до роботи та порядок роботи з мікроконтролерним регулятором струму

Перед початком роботи необхідно переконатися у справності зварювального трансформатора, правильності підключення навантаження та відсутності пошкоджень кабелів. Після цього здійснюється вмикання тумблера “Мережа”, розташованого на передній панелі пристрою (рис.2.12). Після ввімкнення індикатор сигналізує про готовність системи до роботи.

Керування зварювальним струмом виконується за допомогою двох кнопок:

- “UP” (більше) - для збільшення струму;
- “DOWN” (менше) - для зменшення струму.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Після ввімкнення регулятора автоматично встановлюється рівень потужності 50 % від номінального значення. Кожне коротке натискання кнопки змінює струм на 1 %, що дозволяє точно встановити необхідний режим зварювання. Поточне значення зварювального струму та стан системи відображаються на дисплеї.

Навантаження (зварювальний трансформатор або дугове коло) підключається до роз'єму "ЕХІТ" (вихід). Регулювання струму в зварювальному колі здійснюється за допомогою симісторного регулятора, який керується мікроконтролером і забезпечує стабільність параметрів при зміні навантаження.

2.10 Висновки до другого розділу

У другому розділі виконано комплексну розробку мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора, що охоплює структурне, схемотехнічне, програмне та конструктивне опрацювання пристрою. На основі аналізу кількох варіантів структурних схем обґрунтовано відмову від традиційних індукційних методів регулювання та обрано сучасну мікроконтролерну систему зі зворотним зв'язком, яка забезпечує вищу точність, стабільність і гнучкість керування зварювальним струмом.

Обґрунтовано вибір мікроконтролера PIC16F877 як центрального елемента системи керування, проаналізовано його архітектурні особливості, периферійні можливості та переваги для реалізації алгоритмів автоматичного регулювання. Також виконано вибір вузла індикації з урахуванням вартості, енергоспоживання та зручності експлуатації, а також підібрано джерело змінного струму для ручного дугового зварювання, визначивши доцільність застосування трансформатора з падаючою зовнішньою характеристикою типу ТД-102.

У розділі розроблено електричну принципову схему регулятора струму з симісторним силовим елементом, трансформатором струму та замкненою систе-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 72
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

мою зворотного зв'язку, описано принцип її дії та взаємодію основних вузлів. Особливу увагу приділено розробці програмного забезпечення у середовищі MPLAB IDE та організації процесу програмування мікроконтролера, що забезпечує гнучкість налаштувань і можливість подальшої модернізації пристрою.

У підсумку другий розділ формує завершене та обґрунтоване технічне рішення мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора, яке поєднує надійність, енергоефективність, компактність і адаптивність та слугує основою для подальших розрахунків і практичного впровадження розробки.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		73

3 РОЗРАХУНОК ВУЗЛІВ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ

3.1 Розрахунок трансформатора живлення регулятора

3.1.1 Для вибору діодів було визначено зворотню напругу [24]

$$U_{зв} = 1,5 \cdot U_0, \quad (3.1)$$

де U_0 – напруга живлення на вторинній обмотці трансформатора, В.

Відповідно:

$$U_{зв} = 1,5 \cdot 12 = 18 \text{ В}$$

Було вибрано діоди [25] типу КД209А з $I_{сп} = 1500 \text{ мА}$, $U_{зв} = 100 \text{ В}$.

1.1.2 Визначення опору трансформатора за формулою:

$$R_{mp} = \frac{830 \cdot U_0}{I_0 \sqrt[4]{U_0 \cdot I_0}} \quad (3.2)$$

Підставивши значення було отримано:

$$R_{mp} = \frac{830 \cdot 18}{250 \cdot \sqrt[4]{18 \cdot 250}} = 7,3 \text{ Ом.}$$

Напруга на вторинній обмотці трансформатора визначається за наступним виразом:

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$U_2 = 0.75 \cdot U_0 + \frac{I_0}{530} \cdot (2R_i + R_{mp}) \quad (3.3)$$

Відповідно:

$$U_2 = 0,75 \cdot 18 + \frac{250}{530} \cdot (2 \cdot 2 + 7,3) = 41,2 \text{ В.}$$

Визначення струму:

$$I_2 = 1.41 \cdot I_0 + \frac{16,6 \cdot U_0}{R_i + R_{mp}} \quad (3.4)$$

Тоді:

$$I_2 = 1,41 \cdot 250 + \frac{16,6 \cdot 18}{2 \cdot 2 + 7,3} = 379 \text{ мА};$$

Відповідно:

$$I_1 = \frac{1.2 \cdot I_2 \cdot U_2}{U_1} \quad (3.5)$$

Підставивши значення було отримано:

$$I_1 = \frac{1.2 \cdot 41 \cdot 2 \cdot 379}{220} = 85 \text{ мА.}$$

Потужність трансформатора для двохнапівперіодної мостової схеми визначається наступним виразом:

$$P = \frac{1.7 \cdot U_2 \cdot I_2}{1000} \quad (3.6)$$

Відповідно:

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		75

$$P = \frac{1.7 \cdot 41.2 \cdot 372}{1000} = 26.5 \text{ ВА.}$$

Далі було визначено добуток площі перерізу осердя трансформатора Q_c на площу вікна осердя Q_0 . Вибрано для нашого прикладу провід [26] марки ПЕЛ. При цьому було отримано:

$$Q_c \cdot Q_0 = 1.6 \cdot P_2 \quad (3.7)$$

Підставивши значення було отримано:

$$Q_c \cdot Q_0 = 1.6 \cdot 26.5 = 42.4 \text{ см}^4.$$

З технічної літератури [27], в якій приведені основні дані типових Ш-подібних пластин, по значенню $Q_c \cdot Q_0$ було вибрано для осердя трансформатора пластини типу Ш25 з $Q_0 = 15 \text{ см}^2$, шириною середнього стрижня осердя $a = 2.5 \text{ см}$, висотою вікна $h = 6 \text{ см}$ і шириною вікна $b = 2.5 \text{ см}$. При цьому було отримано:

$$Q_0 = Q_c / Q_0 \quad (3.8)$$

Тоді:

$$Q_0 = 42.4 / 15 = 2.8 \text{ см}^2.$$

Необхідна товщина пакета пластин визначається із формули:

$$C = Q_c / a \quad (3.9)$$

Відповідно:

$$C = 2.8 / 2.5 = 2.12 \text{ см.}$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Визначення числа витків w і товщини провідника d первинної і вторинної обмоток трансформатора здійснюється за наступною формулою:

$$w_1 = \frac{48 \cdot U_1}{Q_c} \quad (3.10)$$

Тоді:

$$w_1 = \frac{48 \cdot 220}{2.8} = 3770 \text{ витка,}$$

Відповідно:

$$w_2 = \frac{54 \cdot U_2}{Q_c}, \quad (3.11)$$

$$w_2 = \frac{54 \cdot 41.2}{2.8} = 794 \text{ витка,}$$

$$d_1 = 0.02 \sqrt{I_1}, \quad (3.12)$$

$$d_1 = 0.02 \sqrt{85} = 0.18 \text{ мм,}$$

$$d_2 = 0.02 \sqrt{I_2}, \quad (3.13)$$

$$d_2 = 0.02 \sqrt{379} = 0.38 \text{ мм.}$$

3.2 Розрахунок фільтра

Розрахунок ємності конденсатора [28] на вході стабілізатора здійснюється за формулою:

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$C = \frac{30 \cdot I_0}{U_0}. \quad (3.14)$$

Підставивши значення було отримано:

$$C = \frac{30 \cdot 250}{18} = 416 \text{ мкФ}.$$

Було вибрано електролітичний конденсатор [29] типу К50-35 з ємністю $C = 2200$ мкФ та напругою $U=25$ В. В якості високочастотного фільтра було вибрано конденсатор типу КМ-6б ємністю $C = 0.1$ мкФ та напругою $U = 25$ В.

3.3 Розрахунок потужності споживання

Для визначення потужності споживання слід визначити потужність, що споживається кожною окремою мікросхемою, яка входить в прилад та додати їх. Крім цього слід також встановити потужності, які споживаються транзисторами та іншими елементами схеми.

Потужність, що споживається всією схемою, визначається за формулою:

$$P_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m P_j, \quad (3.15)$$

де $P_{\text{заг}}$ – потужність в цілому всієї схеми, мВт;

P_i – потужність, що споживається окремою мікросхемою, мВт;

P_j – потужність, що споживається радіоелементом, мВт ;

n – кількість мікросхем, шт;

m – кількість елементів, шт.

Потужність споживання всієї електричної схеми буде рівною сумі потужностей, що споживаються кожним з елементів.

З технічної документації на основні елементи отримано струми, які вони споживають:

Мікроконтролер	DD1 PIC 16	1.0мА;
Операційний підсилювач	LM 358	5.0 мА;
Дисплей	MTC16207X	30 мА.

В сумі струм який буде споживатися зазначеними елементами буде дорівнювати:

$$I_{cn} = I_{cn.mк} + I_{cn.д} + I_{cn.on}, \quad (3.16)$$

Відповідно:

$$I_{cn} = 1.0 + 30 + 5 = 36\text{мА}.$$

Враховавши інші елементи (добавивши 10% від всієї схеми) було отримано:

$$I_{cn} = 36 + 3,6 \approx 40\text{мА}.$$

Таким чином споживана потужність буде дорівнювати:

$$P_{cn} = U \cdot I_{cn}, \quad (3.17)$$

$$P_{cn} = 5 \cdot 0,040 = 0,2\text{Вт}.$$

3.4 Розрахунок надійності схеми

Розрахунок надійності [30] системи мікроконтролерного регулятора струму виконується з припущення, що відмова будь-якого окремого елемента схеми призводить до порушення працездатності всього пристрою. У такому випадку інтенсивність відмов схеми визначається як сума інтенсивностей відмов

усіх її компонентів, що є базовим принципом розрахунку для послідовних структур електронних систем.

Надійність є комплексною якісною характеристикою електронного пристрою, яка визначає його здатність виконувати задані функції у встановлених межах параметрів і протягом певного часу. Вона залежить від умов експлуатації, якості виготовлення елементної бази, теплового режиму та конструктивного виконання. У загальному випадку надійність визначається чотирма складовими: безвідмовністю, довговічністю, збережуваністю та ремонтпридатністю. Перші три показники характеризують стійкість апаратури до фізико-хімічних, термічних та механічних впливів, тоді як ремонтпридатність відображає можливість швидкого виявлення та усунення відмов без порушення загальної структури системи.

У сучасних електронних пристроях, зокрема в системах керування зварювальними процесами, застосовується значна кількість компонентів - мікросхем, транзисторів, діодів, резисторів, конденсаторів, симісторів тощо. Велика щільність елементів підвищує ймовірність відмови через старіння матеріалів, температурні перевантаження, вологість, механічні вібрації або електричні перенапруги. При цьому навіть одинична відмова в силовому колі або у вузлі керування може призвести до порушення стабільності зварювального процесу або повного виходу пристрою з ладу.

Розвиток електроніки значно розширив сферу її застосування - від побутових систем до промислових установок, транспортного, медичного й авіаційного обладнання. Водночас зросли вимоги до стійкості електронних пристроїв до агресивних умов експлуатації: високих і низьких температур, вологості, пилу, радіації, а також роботи на відкритому повітрі. У таких умовах ймовірність відмов зростає, тому при проектуванні подібних систем, як-от мікроконтролерний регулятор струму, особливу увагу приділяють тепловій стабільності, захисту від перевантажень і відмові силових елементів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Вихід з ладу електронних пристроїв, особливо таких, що використовуються у виробничих процесах, може призвести не лише до зупинки технологічного циклу, а й до економічних втрат через витрати на ремонт, заміну деталей, час кваліфікованого персоналу та можливі пошкодження обладнання. Тому під час проектування електронних систем необхідно проводити розрахунок показників надійності, який дозволяє прогнозувати поведінку пристрою в реальних умовах експлуатації.

Розрахунок надійності радіоелектронного виробу полягає у визначенні таких основних кількісних показників, як ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого часу, середній час напрацювання на відмову (MTBF) та інтенсивність відмов (λ). Вихідними даними для розрахунку є середні значення інтенсивності відмов компонентів, отримані з довідкових джерел і стандартів надійності, таких як MIL-HDBK-217F або ГОСТ 27.002-2015. Заданий інтервал часу визначається призначенням пристрою - для побутових систем він зазвичай становить 5–10 тисяч годин безвідмовної роботи, а для промислових - не менше 20 тисяч годин.

У межах цієї роботи розрахунок виконується для блоку керування регулятора струму, який працює у режимі часткових і повних відмов. Повна відмова - це стан, за якого пристрій повністю втрачає працездатність (наприклад, пробій силового елемента або мікроконтролера), тоді як часткова відмова може проявлятися у вигляді спотворення сигналу, нестабільності керування або короткочасного збоїв у роботі.

Для оцінки надійності враховується також можливість раптових і поступових відмов. Раптові відмови зазвичай пов'язані з електричними пробоями або термічним руйнуванням, тоді як поступові спричиняються деградацією матеріалів, старінням напівпровідникових структур або зміною параметрів пасивних елементів.

Таким чином, розрахунок надійності дозволяє визначити ступінь технічної

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

стійкості розробленого регулятора струму, оцінити ймовірність його безвідмовної роботи в заданих умовах експлуатації та сформулювати рекомендації щодо підвищення довговічності системи, зокрема через резервування, термостабілізацію або використання елементів із підвищеною надійністю.

Послідовність розрахунку наступна:

- а) згрупування усіх елементів приладу з приблизно однаковими значеннями інтенсивності відмов λ_i , 1/год;
- б) визначення для кожної групи добутку $\lambda_i N_i$, 1/год;
- в) розрахунок інтенсивності відмов приладу, як суми добутків $\lambda_i N_i$, 1/год, за формулою:

$$\lambda_c = m \sum_{i=1} \lambda_i N_i, \quad (3.18)$$

- г) визначення середнього часу безвідмовної роботи (середній час до першої відмови) $T_{ср}$, год:

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda_c} \quad (3.19)$$

- д) знаходження згідно рівняння ймовірності безвідмовної роботи приладу для інтервалу часу t :

$$P(t) = e^{-(t/T_{ср})}. \quad (3.20)$$

Інтенсивність відмов радіо елементів, їх кількість та результати розрахунку загальної інтенсивності відмов радіо елементів мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1- Інтенсивності відмов елементів

Тип елемента	Кількість елементів, шт.	Інтенсивність відмов 10^{-6} год ⁻¹
Інтегральні мікро- схеми	3	4
Конденсатори	16	0,05
Діоди	8	0,25
Резистори	18	0,2
Кварцовий резонатор	1	16
Цифрове табло	1	1
Транзистори	2	1
Роз'єми	2	0,062
Комутаційні пристрої	5	1
Пайка	169	0,01

Сумарна інтенсивність відмов складає:

$$\lambda = (3 \cdot 4 + 16 \cdot 0,05 + 2 \cdot 1 + 18 \cdot 0,2 + 7 \cdot 0,25 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 16 + 2 \cdot 0,062 + 5 \cdot 1 + 169 \cdot 0,01) \cdot 10^{-6} = 44,2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Напрацювання на відмову визначається із виразу:

$$T = \frac{1}{\lambda_{\text{заг}}}. \quad (3.21)$$

Підставивши значення було отримано:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		83

$$T = \frac{1}{44.2 \cdot 10^{-6}} = 22624 \text{ год.}$$

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано інженерні розрахунки основних вузлів мікроконтролерного регулятора струму побутового зварювального трансформатора, що підтверджують працездатність і технічну обґрунтованість розробленого пристрою. Проведено розрахунок трансформатора живлення, у результаті якого визначено його електричні параметри, обґрунтовано вибір діодів випрямляча, осердя та обмотувальних даних, що забезпечує надійне та стабільне живлення електронної частини регулятора.

Розрахунок фільтра живлення дозволив підібрати ємності конденсаторів для ефективного згладжування пульсацій напруги та зниження впливу високочастотних завад, що позитивно впливає на стабільність роботи мікроконтролера і чутливих аналогових вузлів. Визначено сумарну потужність споживання пристрою, яка є незначною та підтверджує енергоефективність розробленої схеми.

Окрему увагу приділено розрахунку надійності регулятора струму. На основі аналізу елементної бази та інтенсивностей відмов визначено сумарну інтенсивність відмов і середній час безвідмовної роботи, що свідчить про достатній рівень надійності пристрою для побутових умов експлуатації. Отримані результати підтверджують доцільність обраних схемотехнічних і конструктивних рішень та створюють основу для подальшого впровадження і практичного використання мікроконтролерного регулятора струму.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи досягнуто поставленої мети - розроблено та обґрунтовано мікроконтролерний регулятор струму побутового зварювального трансформатора, який відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, стабільності та безпеки зварювального обладнання.

У першому розділі на основі аналізу існуючих технологій електродугового зварювання та методів регулювання струму встановлено, що традиційні індукційні й електромеханічні способи мають істотні недоліки, пов'язані з енергетичними втратами, низькою точністю та обмеженою гнучкістю. Показано, що використання електронних і мікроконтролерних систем керування є найбільш перспективним напрямом розвитку побутових зварювальних трансформаторів.

У другому розділі виконано повний цикл проєктування мікроконтролерного регулятора струму, включаючи вибір структури, елементної бази, принципової електричної схеми, програмного забезпечення та конструктивного виконання. Обґрунтовано вибір мікроконтролера PIC16F877 як центрального елемента системи керування, розроблено замкнену систему регулювання зі зворотним зв'язком і симісторним силовим елементом, а також визначено оптимальний вузол індикації та джерело живлення зварювальної дуги. Запропоноване рішення забезпечує плавне та стабільне регулювання струму, простоту керування й можливість подальшої програмної модернізації.

У третьому розділі проведено інженерні розрахунки основних вузлів регулятора, зокрема трансформатора живлення, фільтра, потужності споживання та показників надійності. Отримані результати підтвердили працездатність, енергоефективність і достатній рівень безвідмовної роботи пристрою в умовах побутової експлуатації, а також правильність прийнятих схемотехнічних і конструктивних рішень.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Загалом розроблений мікроконтролерний регулятор струму є завершеним технічним рішенням, яке поєднує компактність, надійність, економічність та гнучкість налаштувань. Результати магістерської роботи можуть бути використані для практичного впровадження в побутових і навчально-лабораторних зварювальних установках, а також слугувати основою для подальших досліджень і вдосконалення інтелектуальних систем керування зварювальними процесами.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		86

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Bowditch W. A., Bowditch K. E., Bowditch M. A. Welding Fundamentals, 7th ed. - Goodheart-Willcox, 2026. [Online]. Available: <https://www.vitalsource.com/products/welding-fundamentals-v9798894486932>.
2. Weman K. (Ed.). Welding Processes Handbook. - 2nd ed., Woodhead Publishing, 2008. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780857095107/welding-processes-handbook>.
3. Chute G. M. Electronic Control of Resistance Welding. - McGraw-Hill, 1943. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Electronic_Control_of_Resistance_Welding.html.
4. Controls & Transformers. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.howtoresistanceweld.info/controls-and-transformers.html>.
5. Resistance Welding Applications and Controls. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://resistanceweldsupplies.com/wp-content/uploads/media/quick_reference_guides/welding_manual_site_v2.pdf.
6. Савуляк В. І., Заболотний С. А. Зварювання. Вступ до фаху : навчальний посібник. - Вінниця : ВНТУ, 2015. - 252 с.
7. Власенко А. М. Технологія металів та зварювання. Модульний курс : навчальний посібник. - Вінниця : ВНТУ, 2013. - 280 с.
8. Кривцун І. В., Квасницький В. В., Максимов С. Ю. та ін. Спеціальні способи зварювання : підручник. - Миколаїв : Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2017. - 396 с.
9. Cary H. B. Modern Welding Technology. - 7th ed. - Pearson Education, 2014. — 704 p.
10. Paulo Davim J. (Ed.). Welding Technology. - Springer, Cham, 2021. - 300 p.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 87
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

11. Квасницький В. В., Кривцун І. В., Максимов С. Ю. Фізичні процеси при зварюванні : підручник. - Миколаїв : НУК, 2018. - 412 с.
12. Li Y., Xu W., Zhao J. Control Systems for Arc Welding Machines. - Singapore : Springer, 2021. - 312 p.
13. Грицюк В. І. Технологія зварювання та різання металів: навчальний посібник. - Київ : КНУТД, 2019. - 268 с.
14. Jeffus L. Welding: Principles and Applications. - 9th ed. - Boston : Cengage Learning, 2020. - 944 p.
15. Гуменюк І. В. Обладнання та технології зварювальних робіт : навч. посіб. / І. В. Гуменюк. - К. : Грамота, 2014. - 120 с.
16. Houldcroft P., John N. Welding and Cutting: Theory and Practice. - Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. - 324 p.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780081024428/welding-and-cutting>
17. Barrett S., Pack D. Microcontrollers Fundamentals for Engineers and Scientists. - CRC Press, 2020. - 412 p. <https://doi.org/10.1201/9781003045143>
18. Microchip Technology Inc. PIC16F87X Datasheet – 8-Bit CMOS Flash Microcontrollers. - Chandler, USA, 2022. - 324 p. <https://www.microchip.com/en-us/product/PIC16F877A>
19. Розробка і виробництво друкованих плат [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://biakom.com/production/pcbboards>
20. Розробка і проектування друкованих плат [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://dism.com.ua/proektuvannya-i-rozrobka/rozrobka-i-proektuvannya-drukovanih-plat/>
21. Як спроектувати макет друкованої плати [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://hilelectronic.com/uk/blog-pcb-layout/>
22. Елементна база радіоелектронної апаратури: Пасивні радіокомпоненти В 4 ч. Ч.1. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.О.Піддубний,

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 88
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

І.О.Товкач. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,05 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

23. Крилик, Л. В. Монтаж радіоелектронних приладів. Спеціальна технологія : навчальний посібник / Л. В. Крилик, О. О. Селецька. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 75 с.

24. Фізичні основи електроніки: курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К.С. Дрозденко, – Електронні текстові дані (1 файл: 8,58 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 153 с.

25. Елементна база електронних апаратів. Частина III. Напівпровідникові діоди та тиристори: навч. Посібник / Філінюк М.А., Лазарев О.О., Войцеховська О.В. та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 92с.

26. Провід обмотувальний ПЕЛ [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://pro100kabel.com.ua/ua/product/provod_obmotochnyj_pevtl_1_d_0_2/?srsltid=AfmBOoqKKPiBHjpMkgVeVpxhf2RO9atbJq9q-Xe9XaPhin0PYqzMAmeX

27. Розрахунок параметрів трансформатора [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://old-zdia.znu.edu.ua/gazeta/FOS_KR.pdf

28. Розрахунок ємності конденсатора [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://element-tm.com.ua/ua/raschet-emkosti-kondensatora?srsltid=AfmBOoroWVJIKcDbixOD7V7wjINje_gS6xEoTZmNVBN78_mY4Dza-B0U

29. Конденсатори алюмінієві електролітичні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.sea.com.ua/ua/elektronnye-komponenty/kondensatory-aluminievye-elektroliticeskie/?srsltid=AfmBOorUTnvUJgPu9XEtidfb-rsVyXBpts1pv2U09Fkz9X8f58YRnCCr>

30. Лазарев О.О. Теоретичні основи надійності електронних апаратів : навчальний посібник / О.О. Лазарев. - Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						89
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						90
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		