

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Метод керування автоматизованим процесом контролю та випробовування
мікрохвильових печей

Назва теми

КвРАКІТР.2024083.01.06.ПЗ

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Шифр, назва

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Назва

Виконав: студент II курсу, група АКІТРм-24-1



Підпис

Андрій МАРМІЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, доцент



Підпис

Ірина ФОРКУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

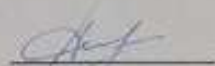


Підпис

Галина РАДЕЛЬЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри АКІТтаР



Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 15 » грудня 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)


Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

Людмила КОРЕЦЬКА 

01 вересня 2025р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Мармію Андрію Юрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Метод керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей

Керівник роботи Форкун Ірина Валеріївна, канд. техн. наук, доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 25.08.2025 р. № 65

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 06.12.2025р.

3 Вихідні дані до роботи стандарти безпеки мікрохвильових печей ДСТУ EN 60335-2-25:2015


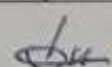

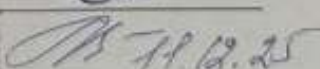
Прилади побутові та аналогічні електричні. Безпека та 21 CFR 1030.10

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

Проблематика застосування та випробовування мікрохвильових печей. Математичне моделювання автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей. Підбір обладнання для автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей. Дослідження методу керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКИТтаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г.І., доцент кафедри АКИТтаР	 10.12.25	 11.12.25

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вступ	15.09.2025 р.	Виконано
2 Проблематика застосування та випробовування мікрохвильових печей	30.09.2025 р.	Виконано
3 Математичне моделювання автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей	16.10.2025 р.	Виконано
4 Підбір обладнання для автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей	1.11.2025 р.	Виконано
5 Дослідження методу керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей	12.11.2025 р.	Виконано
6 Висновки	14.11.2025 р.	Виконано
7 Написання тез доповідей	25.11.2025р.	Виконано
8 Оформлення пояснювальної записки до КРМ	01.12.2025р.	Виконано
9 Оформлення презентаційних матеріалів	01.12.2025р.	Виконано

Студент


Підпис

Андрій МАРМІЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Ірина ФОРКУН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей».

Автор роботи: Мармій Андрій Юрійович

Керівник роботи: Форкун Ірина Валеріївна, канд. техн. наук, доцент

Пояснювальна записка: 108 с., 79 рис., 11 табл., 6 дод., 70 джерел.

Графічна частина: 16 презентаційних слайдів.

МІКРОХВИЛЬОВА ПІЧ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, КРОКОВИЙ ДВИГУН, ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИПРОБОВУВАНЬ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Об'єкт дослідження: автоматизований процес контролю та випробовування мікрохвильових печей.

Мета роботи: розроблення методу керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей. В роботі виконано математичне моделювання процесу нагрівання їжі в мікрохвильових печах, виконано підбір обладнання для автоматизованого процесу контролю та випробовування мікрохвильових печей, проведено дослідження розробленого методу та розроблено програмне забезпечення для проведення випробовувань мікрохвильових печей.



Підпис студента

05.12.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПРОБЛЕМАТИКА ЗАСТОСУВАННЯ ТА ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ.....	9
1.1 Конструкція мікрохвильових печей.....	9
1.2 Види контролю та випробовування мікрохвильових печей.....	15
1.3 Підходи до вирішення задачі автоматизованого випробовування мікрохвильових печей.....	22
1.4 Висновки до першого розділу.....	28
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЦЕСУ ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ.....	29
2.1 Моделювання процесу нагрівання їжі в мікрохвильовій печі.....	29
2.2 Математичне моделювання понижувального перетворювача мікрохвильової печі.....	38
2.3 Перевірка адекватності математичного моделювання.....	44
2.4 Висновки до другого розділу.....	48
3 ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЦЕСУ ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ.....	50
3.1 Підбір основного обладнання.....	50
3.2 Мікроконтролер.....	55
3.3 Джерело живлення.....	62
3.4 Підключення мікроконтролера.....	69
3.5 Підключення крокового двигуна та інших елементів системи.....	79
3.6 Висновки до третього розділу.....	86

4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИМ ПРОЦЕСОМ КОНТРОЛЮ ТА ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ.....	87
4.1 Протоколи передачі даних в системі автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильових печей	87
4.2 Розроблення прототипів складових автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей	96
4.3 Розроблення експериментального стенду автоматизованого процесу контролю та випробовування мікрохвильових печей.....	99
4.4 Висновки до четвертого розділу	102
ВИСНОВКИ	104
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	106
Додаток А Скрипт для MATLAB	113
Додаток Б Код програми для відображення результатів тестувань мікрохвильових печей	119
Додаток В База даних моделей мікрохвильових печей для технології RFID.....	124
Додаток Г Програмний код зчитування моделі мікрохвильової печі за допомогою RFID технології	125
Додаток Д Програмний код керування механічним пальцем для відкривання дверцят та натискання на клавіші	127
Додаток Е Тези в науковому збірнику «Технічна творчість».....	130

ВСТУП

Одним із найбільш поширених видів електропобутової техніки є мікрохвильова піч, яка призначена для підігрівання та приготування їжі. Мікрохвильові печі набули широкого поширення, оскільки значно спрощують побутове життя.

Мікрохвильові печі призначені для швидкого приготування та розігрівання їжі за допомогою електромагнітних хвиль високої частоти. Вони суттєво скорочують час приготування страв, що робить їх незамінними в побуті та на виробництві. Мікрохвильовки широко застосовуються в квартирах, закладах громадського харчування, офісах та навіть у транспортних засобах із кухонним обладнанням. Їх популярність пояснюється простотою використання, економічністю та можливістю готувати різноманітні страви без складної термічної обробки.

Перед випуском на ринок мікрохвильові печі проходять суворі випробування на безпеку та надійність. Одним із ключових тестів є перевірка рівня електромагнітного випромінювання, щоб воно не перевищувало допустимих норм. Також проводяться електричні та механічні випробування, перевіряється якість дверного замка, цілісність металевої камери та системи блокування. Виробники тестують продуктивність печі, рівномірність нагрівання їжі та точність налаштування потужності. Крім того, здійснюється перевірка на стійкість до тривалого навантаження, перегрівання та короткого замикання. Лише після проходження всіх випробувань мікрохвильова піч отримує сертифікат якості та допускається до продажу.

Значно ефективніше проводити випробування мікрохвильових печей автоматизованим методом на спеціальних стендах, оскільки це забезпечує високу точність вимірювань. Автоматизовані системи дозволяють виключити людський фактор, що знижує ризик помилок під час тестування. Стенди можуть одночасно контролювати десятки параметрів, включаючи напругу, температуру, рівень

випромінювання та час нагрівання. Крім того, автоматизація прискорює процес серійної перевірки, що важливо для великих виробництв. Такі системи забезпечують повторюваність випробувань, що дозволяє отримувати стабільні та порівнювані результати для кожної моделі. Автоматизовані стенди також підвищують безпеку персоналу, адже оператор не контактує безпосередньо з обладнанням під час тестів.

Метою роботи є розроблення методу керування автоматизованим процесом контролю та випробування мікрохвильових печей.

Досягнення поставленої мети можна досягнути розв'язавши наступні задачі:

- визначення моделі мікрохвильової печі;
- автоматизоване натискання на кнопки на мікрохвильовій печі;
- відкриття дверцят мікрохвильової печі;
- заміна води з посудини в мікрохвильовій печі в процесі випробувань;
- виконання візуального огляду мікрохвильової печі;
- вимірювання мікрохвиль на наявність витоків з площини камери мікрохвильової печі;
- автоматична зупинка роботи системи випробувань у випадку виявлення несправностей.

Методи досліджень.

Проводився аналіз і синтез систем керування, математичне моделювання процесів випробувань для опису впливу параметрів режиму роботи на якість випромінювання, методи оптимізації, комп'ютерного та імітаційного моделювання, статистичні методи обробки даних та системного проектування автоматизованих комплексів.

Об'єкт дослідження - автоматизований процес контролю та випробування мікрохвильових печей.

Предмет дослідження - методи та алгоритми керування автоматизованою системою контролю і випробовування мікрохвильових печей, а також технічні засоби, що забезпечують її реалізацію.

Наукова новизна отриманих результатів: розроблено модуль триланкового міні робота-маніпулятора для переміщення дрібних об'єктів у трьох варіантах керування.

Практична значимість отриманих результатів: результати роботи можуть бути використані в процесі виробництва електропобутової техніки, лабораторіях технічного контролю побутової техніки, сервісних центрах сертифікації та випробовування електропобутових приладів, підприємствах з масового автоматизованого контролю якості продукції та навчальних лабораторіях автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих систем.

Апробація результатів дослідження: опубліковано тези доповіді «Розробка автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей» у збірнику наукових праць «Технічна творчість».

Кваліфікаційна робота складається із наступних елементів: вступ, чотири розділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних джерел, додатки. Загальний обсяг роботи складає 108 сторінок, у тому числі: 79 рисунків, 11 таблиць, 6 додатків, список використаних джерел містить 70 найменувань.

В першому розділі було виконано огляд та аналіз існуючих конструкцій мікрохвильових печей та їх класифікацію. На основі такого огляду було встановлено, що в автоматизованій системі контролю та випробовування мікрохвильових печей обов'язково необхідно передбачити наявність модулю, який би отримував інформацію про модель мікрохвильової печі, яка буде випробовуватись в системі.

Крім того, було наведено види контролю та методи випробовування мікрохвильових печей. Проведений аналіз стандартів безпеки в Україні, Європі та США дозволив визначити основні етапи випробовувань та результати, яким

повинна відповідати мікрохвильова піч. Також в розділі наведені підходи до вирішення задачі автоматизованого випробовування мікрохвильових печей.

В другому розділі проведено математичне моделювання автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей. Оскільки основною задачею мікрохвильової печі є нагрівання їжі, то для побудови математичної моделі за основу було взято процес нагрівання їжі в камері мікрохвильової печі. Було виконано математичне моделювання нагрівання їжі на основі теорії електричних кіл, теоретичних основ електротехніки.

Отримана математична модель була перевірена із реальними експериментальними даними щодо питомої потужності та нагрівання трьох продуктів харчування у мікрохвильовій печі - м'яса, агар-агару та хліба. Хоча наявні невеликі відхилення даних за математичною моделлю від експериментальних досліджень, вони незначні і ними можна знехтувати.

Також було виконано математичне моделювання понижувального трансформатора мікрохвильової печі, оскільки саме він відповідає за передачу необхідної напруги на магнетрон, а магнетрон виступає нагрівальним елементом мікрохвильової печі для розігріву харчових продуктів.

В третьому розділі було виконано підбір обладнання для автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей. До основного обладнання відносяться камера, для відслідковування процесу випробовування в режимі реального часу, комп'ютер, який виступає основним елементом керування всією системою, напрямні на ремінній передачі.

В якості мікроконтролера було обрано STM32F103VBT6, а також розроблено схеми живлення від джерела, які потребують використання трьох понижувачів напруги, а саме 24/12 В, 24/5 В та 24/3,3 В. Для живлення системи та підключення інших компонентів, таких як плати керування додатковими підсистемами, було розроблено електричні схеми підключення. В четвертому розділі.

В четвертому розділі виконано дослідження методу керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей. Було описано та перевірено передачу даних по протоколам в рамках функціонування розробленої автоматизованої системи.

Також було виготовлено плати керування для основного керуючого елемента автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей та розроблено відповідні прототипи. Наостанок, було виготовлено експериментальний стенд для проведення досліджень мікрохвильових печей.

Крім того, в розділі наведено програму для проведення контролю та випробовування мікрохвильових печей за допомогою розробленої системи.

1 ПРОБЛЕМАТИКА ЗАСТОСУВАННЯ ТА ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ

1.1 Конструкція мікрохвильових печей

Перша створена в світі мікрохвильова піч (МП) з'явилась у 1947 році. Її першочергове призначення полягало не у приготуванні їжі, а спочатку вона планувалась як засіб для швидкого розморожування їжі. Використання таких печей спочатку планувалось виключно у військовому секторі для столових та їдальнь [1].

Ця МП мала крупногабаритні розміри, вага становила 340 кг, висота відповідала приблизно висоті людського зросту, а потужність становила майже вдвічі більше від потужності сучасних МП, а саме 3 кВт.

Перша МП побутового призначення була представлена лише 8 років потому американською компанією Tappan Company. В серійне виробництво МП потрапили не в США, а в Японії у 1962 році.

Сучасні МП мають порівняно невеликі розміри, які коливаються в залежності від моделі, але в загальному становлять приблизно висоту приблизно 30 см, ширину 45-50 см, глибину 35-45 см. Об'єм камери таких МП варіюється в межах від 15 до 30 літрів.

Конструктивні складові МП наведені на рисунку 1.1 [2]. Ця конструкція включає в себе основні елементи, але сучасні моделі часто доповнюються рядом додаткових функцій, наприклад, можливістю приготування їжі на грилі. Головним елементом кожної МП є магнетрон, який представляє собою лампу, що створює мікрохвильове випромінювання. Нагрівання їжі в мікрохвильовій печі відбувається саме завдяки роботі магнетрону.

Випромінювання магнетрону потрапляє в камеру МП через пристрій, який називається хвильовід. Для зменшення перегріву цього пристрою в МП наявна вентиляція. Ряд моделей містять в своїй конструкції диссектор - це спеціальний

модель, призначення якого полягає в рівномірному розподілі тепла в площині робочого об'єму МП [3].

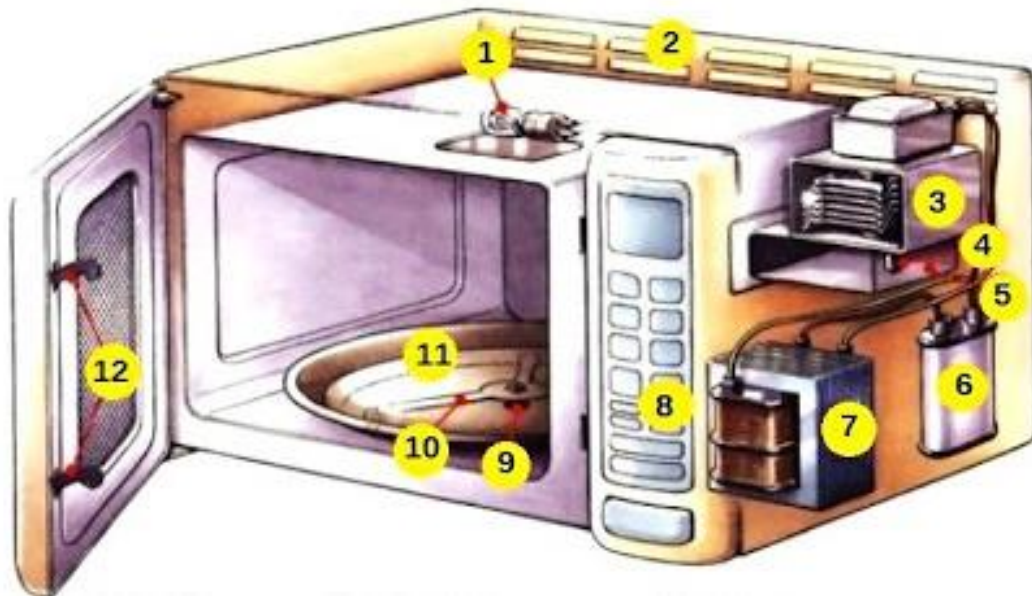


Рисунок 1.1 - Конструкція мікрохвильової печі

(1 - лампа; 2 - вентиляція; 3 - магнетрон; 4 - антена; 5 - хвильовід;
6 - конденсатор; 7 - трансформатор; 8 - панель керування; 9 - привід;
10 - піддон; 11 - сепаратор з роликами; 12 - защіпка дверей)

Дверцята МП та внутрішня камера мають надійний екран та ще один шар екранування розміщується під металевим корпусом. Завдяки цьому мікрохвилі не поширюються поза межами камери. Крім того, наявний запобіжник, який не дозволяє ввімкнути магнетрон для нагрівання якщо дверцята відкриті та не спрацювала защіпка дверей [4].

Для того, щоб було краще видно вміст у внутрішній камері МП, в конструкції передбачена лампа. Поворотний механізм та привід розміщений в нижній частині камери МП, робота якого приводить до обертання піддону на сепараторі із роликами. Обертання передбачено для рівномірного нагріву їжі.

На передній панелі МП розміщується панель керування, яка призначена для регулювання роботи вузлів пристрою. У сучасних моделях для цього передбачений мікропроцесор.

Класифікація МП достатньо широка. Перша характеристика, за якою виконується класифікація - це по типу конструкції. Розрізняють МП, яка містить лише мікрохвилі (рис. 1.2, а), з конвекцією (рис. 1.2, б) та з грилем (рис. 1.2, в).



а)



б)



в)

Рисунок 1.2 - Класифікація мікрохвильових печей за конструкцією:

а - соло; б - з грилем; в - з конвекцією

Наступна характеристика - це за типом монтажу. Бувають настільні (окремостоячі) МП (рис. 1.3, а) та ті, що вбудовуються в кухонні меблі (рис. 1.3, б). Ті МП, що вбудовуються, вважаються більш сучасним та естетичним варіантом, але вартість їх значно вища.

Крім того, їм характерні більші розміри, а саме висота 30-45 см, ширина 59-50 см, яка відповідає стандартній ширині ніші, а глибина 30-40 см, що відповідає стандартній глибині кухонної шафи [5].



а)



б)

Рисунок 1.3 - Класифікація мікрохвильових печей за принципом монтажу:

а - настільна; б - та, що вбудовується



а)



б)



в)

Рисунок 1.4 - Класифікація мікрохвильових печей за обсягом:

а - компактна; б - середня; в - велика

За обсягом мікрохвильові печі бувають [6]:

- компактні, об'єм камери яких становить до 20 л (рис. 1.4, а);
- середні, об'єм камери яких становить від 20 до 30 л (рис. 1.4, б);
- великі, об'єм камери яких становить понад 30 л (рис. 1.4, в).

За типом керування розрізняють (рис. 1.5):

- кнопочкове;
- сенсорне;
- механічне.



а)



б)



в)

Рисунок 1.5 - Класифікація мікрохвильових печей за типом керування:

а - кнопочкове; б - сенсорне; в - механічне

В більшості моделей наявний ряд додаткових функцій, які можна узагальнити в наступний список:

- розморожування;
- захист від дітей;
- видалення неприємного запаху;
- гриль;
- пароварка;
- автоматичні програми, наприклад, для приготування піци чи попкорну;
- швидкий старт;
- самостійна чистка;
- експрес розігрів.

Наступний критерій, яким можуть відрізнитись МП - це внутрішнє покриття камери. Вибір матеріалу камери впливає не лише на естетичний вигляд МП, але й на термін експлуатації та простоту догляду за МП. Серед видів внутрішніх покриттів відрізняють [7]:

- нержавіюча сталь;
- термостійка емаль;
- забарвлення під емаль;
- антибактеріальне або керамічне покриття.

Найменш довговічним матеріалом є забарвлення під емаль. Термостійка емаль представляє собою недорогий варіант покриття, якому характерна простота догляду. Серед недоліків відзначається те, що цей матеріал не підходить для підвищених температур, а також той факт, що емалі характерна підвищена чутливість до пошкоджень. Тобто, МП із таким покриттям передбачає обережного поводження та ретельного вибору засобу для чистки.

Більш міцним та надійним матеріалом є нержавіюча сталь. Його майже неможливо подряпати, він не чутливий до підвищених температур. При догляді МП із таким матеріалом не допускається використання миючих засобів із кислотою у вмісті, а також жорсткі губки та щітки.

Якісним, але в той же час дорогим видом покриття є антибактеріальне або керамічне покриття. Видалення бруду з цього покриття швидке і просте, матеріал важко подряпати. Основним недоліком є підвищена вага матеріалу, тому збільшується вага і самої МП.

1.2 Види контролю та випробовування мікрохвильових печей

При проведенні випробовувань МП наявний ряд відмінностей у підходах у тих випадках, коли випробовування виконуються для перевірки стану вже виготовленої продукції та для перевірки функціоналу МП в процесі розробки. Етап розробки нової моделі МП передбачає більшу кількість випробовувань. Наприклад, якщо виконується розробка нової конструкції механізму фіксації дверей МП спеціально для нової моделі, то виконуються дослідження експлуатаційних характеристик як для механізму окремо, так і в якості конструктивної складової МП.

Випробовування МП можна поділити на ряд різних видів, а саме [8]:

- електричні;
- електромагнітного випромінювання;
- теплові;
- функціональні;
- безпеки;
- механічні;
- на довговічність та надійність;
- експлуатаційні;
- екологічні;
- сертифікаційні.

Незалежно від виду випробовування МП, починається воно з перевірки цілісності корпусу, ущільнювачів та дверцят [9]. При проведенні візуального огляду виконується перевірка корпусу на наявність тріщин, іржі, підгоряння. На

наступному етапі перевіряються ущільнювачі на щільність прилягання до дверцят та корпусу МП, а також та наявність деформації в конструкції дверцят або ущільнювачі. Також в процесі візуального огляду виконується перевірка хвилеводу на наявність тріщин чи плям.

Проведення контролю та випробовувань мікрохвильових печей повинно підпорядковуватись вимогам ряду стандартів, залежно від країни, в якій виготовляється або в яку буде поставлятися МП. Наприклад, в Європі діє загальний стандарт для всіх побутових електроприладів, незалежно від їх призначення - це EN 60335 [10]. Основна мета введення такого стандарту полягає у забезпечення безпеки користувачів електропобутових приладів в процесі їх використання як в побутових умовах, так і на промисловостях.

Цей стандарт представляє собою серію міжнародних та європейських стандартів безпеки для побутових та аналогічних приладів електропобутової техніки. В стандарті встановлено вимоги щодо конструкції електропобутових приладів, яка б забезпечувала захист користувачів від перегріву приладу, мінімізувала можливість виникнення пожежі, а також короткого замикання, тощо.

Стандарт EN 60335 поділений на 2 основні частини. Перша частина, EN 60335-1, регламентує загальні положення до електропобутових приладів. Другий стандарт, EN 60335-2, регламентує деталізовані та конкретні вимоги в залежності від виду електропобутової техніки. Стандарт поширюється лише на техніку, яка живиться від напруги до 230 В.

Стандарт, якому підпорядковуються саме МП - це EN 60335-2-25. В Україні було введено Державний стандарт України ДСТУ EN 60335-2-25:2015 Прилади побутові та аналогічні електричні. Безпека [11], в яких встановлено вимоги до МП. Власне, він представляє собою переклад європейського стандарту з питань безпеки використання мікрохвильових печей.

При перевірці експлуатаційних та інших характеристик МП обов'язковим етапом випробовування є вимірювання рівню НВЧ-випромінювання та

проведення контролю витоків такого випромінювання [12]. Рівень випромінювання також регламентується відповідним стандартом, який було описано раніше. В інших країнах можуть діяти власні стандарти стосовно рівня випромінювання від МП, наприклад, у США діє стандарт 21 CFR 1030.10 [13]. В цьому стандарті зазначено, що максимально допустимий рівень мікрохвильового випромінювання МП становить 5 мВт/см^2 . Слід зазначити, що вимірювання виконується на відстані 2 дюйми, що відповідає приблизно 5 см у метричній системі.

Крім того визначено, що МП повинна мати в своїй конструкції дві незалежні між собою системи блокування дверцят. Тобто, у випадку якщо користувач відкриває дверцята при працюючій МП, вона повинна миттєво зупинити свою роботу.

Відповідність чи не відповідність МП встановленому стандарту виконується при перевірці відповідними органами та установчими документами. Наприклад, у керівництві U.S. Food and Drug Administration (FDA) США описано деталізовані процедури проведення контролю та випробовувань мікрохвильових печей. В ньому зазначені процедури вимірювання витоку мікрохвиль, робочі режими та принцип роботи блокування дверцят [14].

Лабораторна перевірка функціональних та експлуатаційних характеристик МП передбачає використання тестового навантаження з метою отримання більш реальних умов використання МП [15]. В випробовувань проводиться перевірка заземлення та ізоляції, що є складовою з перевірки приладу з питань електробезпеки. Також виконуються температурні випробовування, наприклад, перевірка термостійкості та нагріву корпусу. Крім того, обов'язковим є перевірка функціональних можливостей, наприклад стабільність роботи МП при різних навантаженнях та перевірка виконання МП основних функцій із розігріву їжі, розморожування, тощо.

Для перевірки витоків мікрохвильового випромінювання використовуються спеціальні прилади - радіочастотні детектори. Вони

дозволяють вимірювати щільність інтенсивності потоку мікрохвиль у мВт/см², на відстані людського корпусу від МП.

Приклад такого приладу наведено на рисунку 1.5. Цей цифровий портативний прилад призначений для виявлення витоків мікрохвиль від МП. Прилад працює в діапазоні 2450 МГц. Для зручності сприйняття інформації у приладу наявний дисплей, світлова та звукова сигналізація у випадку фіксування перевищення порогового значення мікрохвиль [16].

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики детектору мікрохвильового випромінювання Walcom НТ-М2 [16]

Параметр	Значення
Вага, г	112
Поріг тривоги, мВт/см ²	5
Частота калібрування, МГц	2450
Розміри, мм	140 x 58 x 35
Точність, дБ	±1
Діапазон вимірювання, мВт/см ²	0 - 10

В приладі наявна можливість зафіксувати та записати мінімальні та максимальні значення мікрохвиль. Оскільки прилад переносний, то працює він від акумуляторної батареї, також йому характерна компактність розмірів та невелика вага. Вартість його невисока і становить 1003 гривні. Технічні характеристики приладу наведені в таблиці 1.1.

Також для перевірки роботи магнетрону можна використати мультиметр. Для перевірки достатньо приєднати до мультиметра магнетрон в режимі вимірювання опору між двома контактами. За таких умов нормальний опір між контактами повинен лежати в межах від 0,5 до 0,5 Ом [17].

Для проведення такої перевірки МП достатньо буде використати мультиметр універсальний моделі UNI-T UT890D+, який наведено на

рисунку 1.6. Вартість цього мультиметру становить 986 гривень, а технічні характеристики наведені у таблиці 1.2 [18].



Рисунок 1.5 - Детектор мікрохвильового випромінювання Walcom HT-M2



Рисунок 1.6 - Мультиметр

Такий універсальний цифровий мультиметр дозволяє виконувати вимірювання ряду електричних параметрів, до яких відносяться:

- змінна та/або постійна напруга;
- змінний та/або постійний струм;
- температура;
- частота;
- цілісність коли;
- ємність конденсатора;
- опір.

Таблиця 1.2 - Технічні характеристики універсального мультиметру UNI-T UT890D+ [18]

Параметр	Значення
Тип	Цифровий
Розміри, мм	183 x 88 x 56
Живлення	2 батарейки ААА
Вага, г	346
Номінальна напруга, В	1000
Максимальний струм, А	20

Універсальність такого мультиметру забезпечується завдяки широкому ряду функцій, до яких відносяться:

- автоматичне вимкнення живлення;
- світловий та звуковий сигнал;
- фіксація останнього значення;
- підсвічування дисплею;
- сповіщення про перегорання запобіжника;
- повідомлення про перенавантаження;
- можливість виконання ручної зміни діапазону вимірювання;

- функція виявлення електричного поля;
- виявлення кабелів та проводів під напругою;
- зберігання в пам'яті мінімального та максимального значення.



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 1.7 - Конструктивні складові мікрохвильової печі:

а - магнетрон; б - високовольтний запобіжник; в - високовольтний трансформатор; г - слюда; д - двигун обертання

Основними видами несправностей МП, після яких обов'язково необхідно проводити випробовування, наступні [19]:

- відсутність функції нагрівання;
- наявність іскр всередині МП;

- відсутність обертання;
- відсутність підсвічування камери;
- не працюють елементи панелі керування.

Основні конструктивні елементи, які найчастіше виходять з ладу, наведені на рисунку 1.7.

Для вирішення проблеми того, що мікрохвильова піч не виконує своє основне призначення, а саме нагрівання їжі, в першу чергу необхідно виконати перевірку справності магнетрону (рис. 1.7, а). За умови щоденної експлуатації термін служби цього складового елемента МП становить 5-7 років.

Також причиною можливої несправності функції нагрівання їжі може стати вихід з ладу високовольтного запобіжника (рис. 1.7, б). Крім того, може вийти з ладу високовольтний трансформатор (рис. 1.7, в). У такому випадку в процесі роботи МП вона видає сильний гул, а також може з'явитись неприємний запах горілої їжі. Трансформатор може бути оплавленим, в такому разі достатньо провести лише візуальний огляд конструктивних складових МП для того, щоб виявити несправність.

У випадку, якщо в камері МП з'явилися іскри, причиною несправності може стати прогорання слюдової пластини (рис. 1.7, г). За таких умов подальше використання МП є жорстоко забороненим, оскільки значно зростає ризик виникнення пожежі та короткого замикання. Слюдяна пластина може прогоріти внаслідок надмірного її забруднення жиром та залишками харчових продуктів.

У випадку, якщо відсутнє обертання посуду в МП, найбільша ймовірність того, що вийшов з ладу двигун піддону тарілки (рис. 1.7, д).

1.3 Підходи до вирішення задачі автоматизованого випробовування мікрохвильових печей

Вищенаведені види проведення випробовувань МП більше відносяться до ручних із використанням спеціального обладнання. Якщо ж розглядати питання

автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильових печей, то в ньому повинно використовуватись відповідне роботизоване обладнання із власним спеціалізованим програмним забезпеченням перевірки якості та точності роботи мікрохвильової печі. Таке обладнання повинно виконувати наступні функції:

- вимірювати можливий виток мікрохвиль;
- перевіряти щільність дверцят у зачиненому положенні;
- перевіряти внутрішні компоненти за допомогою датчиків, мікроконтролерів та іншого обладнання;
- проводити перевірку значень вихідної потужності.

Основна мета роботи - це знайти підходи стосовно максимально можливого ступеня автоматизації процесу контролю та випробовування мікрохвильових печей.

Для досягнення цієї мети система повинна виконувати визначення типу мікрохвильової печі, яка підлягає випробовуванню. Крім того, система повинна самостійно виконувати підбір необхідних тестів для конкретно обраної моделі.

Одним із способів вирішення цієї задачі може стати RFID розпізнавання. Технологію RFID розпізнавання також називають технологією радіочастотної ідентифікації [20], полягає в автоматичному безконтактному розпізнаванні об'єктів та базується на використанні радіосигналів для зчитування інформації зі спеціально створених маленьких міток. Такі мітки отримали назву транспондерів та містять антену і мікрочіп [21].

За допомогою цієї технології в промисловості знайшли підхід до вирішення задачі швидкої ідентифікації товарів, тварин, людей чи транспортних засобів без необхідності встановлення візуального контакту. Результати технології зчитування такої інформації використовуються для контролю доступу, обліку товарів та відстеження об'єктів, тощо.

Принцип роботи полягає в наступному. Транспондер (рис. 1.8) або мітка кріпиться до об'єкта. Мітки можуть бути пасивними, які отримують енергію

радіосигналу від зчитувача, та активними, в яких наявне джерело живлення. Зчитувач, в свою чергу, після відправки радіосигналів отримує відповідь від міток [22].

Серед переваг використання такої технології відмічають [23]:

- можливість зчитування сигналів на різних відстанях, в залежності від типу транспондера;
- не потребує візуального контакту або прямого дотику;
- миттєве розпізнавання об'єктів незалежно від їх кількості;
- мінімізація ручної праці.



Рисунок 1.8 - Транспондер

Мітки (або транспондери) можуть використовувати різні типи пам'яті, а саме:

- запис даних лише один раз при виготовленні мітки (RO);
- містять блок записуваної пам'яті наряду із унікальним ідентифікатором (WORM);
- містять блок пам'яті для запису інформації або її подальшого зчитування та ідентифікатор (RW).

Зчитувачі (рис. 1.9) можуть бути автономними, або ж постійно підключеними до системи обліку. Бувають стаціонарні та мобільні зчитувачі. Стаціонарні кріпляться нерухомо на відповідних місцях. Порівнюючи із

мобільними, таким зчитувачам характерна більша зона покриття та більша потужність. Одночасно вони здатні обробляти більший потік інформації, ніж мобільні зчитувачі.

При використанні стаціонарних зчитувачів на підприємстві спостерігається тенденція до їх інтеграції в інформаційну систему, в результаті чого досягається можливість поетапної фіксації переміщення об'єктів із RFID-мітками в режимі реального часу. Також існує можливість виконувати ідентифікацію місця розташування об'єкту із міткою в просторі.



Рисунок 1.9 - Зчитувач RFID-міток

Мобільні зчитувачі мають меншу дальність дії, в результаті чого зв'язок з програмою обліку та контролю може періодично втрачатись. Вони мають внутрішню пам'ять, в якій містяться дані із міток, що були зчитані раніше.

Окрім зчитування моделі МП в автоматизованій системі контролю та випробовування мікрохвильових печей, необхідно вирішити задачу натискання кнопок на МП для запуску її роботи і подальшого тестування експлуатаційних характеристик. Тобто, постає задача натиску кнопок, які розміщуються в різних положеннях в залежності від моделі МП. Вирішення цієї задачі передбачається

за допомогою датчика, який буде виконувати вимірювання сили натиску на кнопку.

Наступна задача - це відкривання дверцят МП. На цьому етапі буде виконуватись перевірка функціонування захисту МП та зупинки її роботи при відкритті дверцят, що є обов'язковою умовою безпечного використання мікрохвильових печей у всіх зазначених стандартах.

В більшості тривалих випробуваннях МП передбачається використання миски з водою та зміна навантаження на МП. В процесі випробування вода в мисці буде нагріватись до температури кипіння. Стандартизовані тестування передбачають заміну води в мисці в процесі проведення тестувань. Тому необхідно передбачити модуль дозаправки води в ємність, який би виконував повну заміну нагрітої води на холодну.

Наступний етап перевірки МП - це проведення візуального огляду. Вирішення цієї задачі можна досягнути шляхом встановлення камери в системі, за допомогою чого можна провести не тільки візуальний огляд МП на наявність дефектів, але й перевірити роботу освітлення камери та наявність або відсутність обертання тарілки.

Основним випробування МП є вимірювання мікрохвиль та енергоспоживання. Витік мікрохвиль не допускається, тому необхідно в автоматизованій системі контролю та випробувань мікрохвильових печей передбачити можливість вимірювання мікрохвиль протягом тривалого часу.

Крім того, необхідно передбачити модуль для перевірки потужності магнетрона. Оскільки у відкритому положенні МП не повинна працювати, вимірювання необхідно проводити за закритих дверцятах. Тому було обрано підхід виконувати вимірювання температури води перед початком випробування та через встановлений час. Після проведення розрахунків на основі цих даних можна визначити потужність роботи магнетрона.

Багато передбачити елементи безпеки в процесі власне проведення випробувань МП. Наприклад, автоматизована система повинна автоматично

зупиняти свою роботу у випадку, якщо світло вийшло з ладу або ж якщо магнетрон не працює.

Для вирішення поставлених задач було виокремлено два основні підходи. Перший підхід - це використання робота-маніпулятора. У випадку використання робота-маніпулятора для проведення автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильових печей слід враховувати, що він потребує великої площі для установки, а також унеможлиблює виконання випробовувань в інших місцях, окрім місця установки робота-маніпулятора.

Другий підхід - це використання лінійних напрямних. Якщо кількість осей автоматизованої системи обмежена двома, то для фактичного натискання кнопки на МП потрібна третя вісь. Натискання кнопки можна виконати через використання циліндру, який буде приводитись у рух внаслідок дії стисненого повітря.

Використання лише двоосьового робота-маніпулятора зробить автоматизовану систему набагато дешевшою та більш компактною. Зовнішній вигляд моделі автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей на стадії розробки наведено на рисунку 1.10.

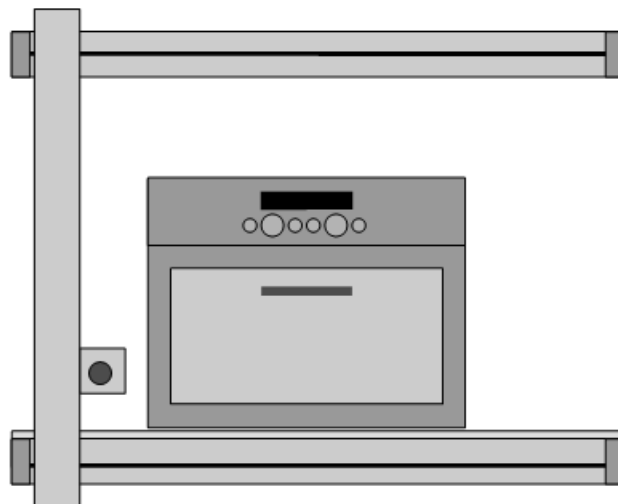


Рисунок 1.10 - Модель автоматизованої системи випробовування мікрохвильових печей

1.4 Висновки до першого розділу

В першому розділі було виконано огляд та аналіз існуючих конструкцій мікрохвильових печей та їх класифікацію. На основі такого огляду було встановлено, що в автоматизованій системі контролю та випробовування мікрохвильових печей обов'язково необхідно передбачити наявність модулю, який би отримував інформацію про модель мікрохвильової печі, яка буде випробовуватись в системі.

Крім того, було наведено види контролю та методи випробовування мікрохвильових печей. Проведений аналіз стандартів безпеки в Україні, Європі та США дозволив визначити основні етапи випробовувань та результати, яким повинна відповідати мікрохвильова піч. Також в розділі наведені підходи до вирішення задачі автоматизованого випробовування мікрохвильових печей.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЦЕСУ ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ

2.1 Моделювання процесу нагрівання їжі в мікрохвильовій печі

Для розроблення системи автоматизованого контролю та випробовування МП необхідно виконати математичне моделювання та симуляцію нагрівання продуктів в МП. Це моделювання дозволить виконати оптимізацію параметрів проведення випробовувань.

Розроблення математичної моделі нагрівання їжі дозволить виконати прогнозування вологості та температури в камері та в об'ємі їжі, що нагрівається. За результатами можна отримати симуляцію фізичної системи, яка адекватно відображає та враховує діелектричні, теплові та інші властивості матеріалу, що досліджується.

Математичне моделювання процесу нагрівання їжі в мікрохвильовій печі дозволяє глибше зрозуміти фізичні закономірності взаємодії електромагнітного поля з різними продуктами. Оскільки мікрохвилі нагрівають матеріал нерівномірно - залежно від його форми, густини, діелектричної проникності та розподілу вологи - моделі дають можливість передбачити температурні зони та потенційні "холодні" чи "гарячі" області. Це знання є критично важливим для правильного формування алгоритмів автоматизованого тестування, оскільки дозволяє визначити стандартні умови, типи навантаження та методи аналізу температурного поля, які найбільш точно характеризують роботу печі [24].

Окрім того, моделювання дає змогу оцінити ефективність передачі енергії від магнетрона до продукту без необхідності виконувати велику кількість фізичних експериментів [25]. На основі моделей можна підібрати оптимальний об'єм та форму тестового навантаження, час експозиції мікрохвиль та положення датчиків, що значно спрощує конструювання автоматизованого стенда для випробувань. Таким чином, моделювання скорочує витрати на дослідження та забезпечує високу точність калібрування вимірювальної системи.

Ще одним аспектом є можливість прогнозування аномальних режимів роботи, наприклад перегріву окремих ділянок, резонансних ефектів або надмірних локальних температур, які можуть призводити до помилкових результатів тестування. Алгоритми автоматизованої системи контролю можуть спиратись на ці моделі, щоб завчасно визначати відхилення та забезпечувати безпечне проведення випробувань. Це особливо важливо для тестування побутових приладів, які повинні відповідати вимогам безпеки, енергоефективності та рівномірності нагріву.

Загалом математичне моделювання стає фундаментом для побудови надійної, точної та відтворюваної системи автоматизованого контролю. Воно дозволяє стандартизувати процес випробувань, розробити більш ефективні алгоритми керування та забезпечити високу якість оцінки роботи мікрохвильових печей без залежності від людського фактора чи випадкових варіацій в умовах експериментів.

Під час математичного моделювання нагрівання їжі в мікрохвильовій печі неможливо точно врахувати абсолютно всі фізичні процеси та параметри, тому для створення адекватної і розрахунково придатної моделі необхідно робити низку припущень. Реальна система є надзвичайно складною: продукт має неоднорідну структуру, різну вологість, складну геометрію, а мікрохвильове поле всередині камери формується інтерактивно - залежно від відбивань, інтерференції, положення предмету та частоти збудження. Щоб побудувати математичну модель, яку можна проаналізувати й використати в алгоритмах автоматизованого контролю, ці фактори узагальнюють або спрощують. Саме припущення дозволяють знизити складність моделі до рівня, на якому її можна чисельно обчислити й застосувати в системі автоматизації.

Ще однією причиною необхідності припущень є обмеженість доступних вимірювальних даних. Наприклад, діелектричні властивості продуктів можуть змінюватися під час нагрівання, але через труднощі точного вимірювання ці зміни часто апроксимують сталими або табличними значеннями. Аналогічно,

внутрішня структура продукту - пористість, наявність води, жирів, повітряних порожнин - практично неможливо описати у всіх деталях, тому приймаються усереднені параметри. Такі спрощення дозволяють отримати модель, яка дає коректні тенденції й закономірності, навіть якщо не відтворює кожну дрібну деталь фізичного процесу.

Крім того, математичне моделювання має виконувати прикладну функцію у створенні автоматизованої системи контролю та випробувань. У цьому контексті важливо не лише фізично точне відтворення процесу, а й отримання практичного інструменту для оцінки рівномірності нагріву, стабільності роботи магнетрона чи ефективності передачі енергії. Припущення дозволяють зосередитися на ключових параметрах, які безпосередньо впливають на результати випробувань, і відкинути вторинні, які не мають істотного впливу або вносять надмірну складність у моделі. Таким чином, припущення допомагають досягнути балансу між точністю та обчислювальною ефективністю.

Загалом, введення припущень у математичну модель є необхідним етапом, який дозволяє перетворити реальний складний багатоелементний процес у керовану, обчислювану та корисну для автоматизації структуру [26]. Правильно підібрані припущення не спотворюють суті фізичних закономірностей, але роблять модель застосовною для аналізу, оптимізації і побудови алгоритмів контролю та випробування мікрохвильових печей.

Для виконання математичного моделювання були зроблені наступні припущення:

- початкова температура та концентрація води є рівномірною;
- діелектричні та теплові властивості є змінними;
- в процесі нагрівання відсутня зміна об'єму;
- тепло масообмін є одновимірним.

Для опису теплопередачі в об'ємі їжі, що нагрівається в МП, формулюється мікроскопічний баланс енергії. Цей баланс включає внутрішній термін генерації енергії, що подається мікрохвилями та визначається за формулою 2.1 [27]:

$$C_p \rho \frac{dT}{dt} = Q + \nabla(\nabla T k_T), \quad (2.1)$$

де k_T - теплопровідність їжі, Вт/м·К;

ρ - густина їжі, кг/м³;

C_p - питома теплоємність їжі, Дж/кг·К;

Q - об'ємне теплоутворення, яке виникає в результаті взаємодії їжі з мікрохвилями, Дж·К⁻¹.

Початкові граничні умови для математичного моделювання наступні 2.2 - 2.6:

$$t = 0, \quad (2.2)$$

$$0 \leq x \leq L, \quad (2.3)$$

$$T_{ini} = T, \quad (2.4)$$

$$x = 0, \quad (2.5)$$

$$L = x, \quad (2.6)$$

де $x = 0$ позначає поверхню їжі;

T_{ini} - початкова температура їжі, К;

L - товщина їжі, м.

Тоді в загальному граничні умови визначаються за формулою 2.7:

$$k_m L_{vap} (C_{ws} - C_e) + (T - T_a)h = -k_T \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

де k_m - коефіцієнт передачі маси;

C_{ws} - концентрація води на поверхні їжі, кг/м³;

C_e - рівноважна концентрація води в повітрі, кг/м³;

h - коефіцієнт теплопередачі;

L_{vap} - тепло випаровування води;

T_a - початкова температура повітря, К.

Вищенаведені формули передбачають спрощення проведення математичного моделювання, оскільки за ними враховується наявність випаровування лише на поверхні їжі. В реальності таке припущення не є дійсним, але одночасно врахувати всі реальні параметри у математичній моделі не представляється можливим.

Для розрахунку концентрації води формулюється мікроскопічний баланс за наступним рівнянням 2.8 [28]:

$$\frac{dC_w}{dt} = \nabla(\nabla C_w D_w), \quad (2.8)$$

де D_w - коефіцієнт ефективної дифузії в їжі.

Для рівняння 2.8 зберігаються граничні та початкові умови, наведені у 2.2, 2.3, 2.5 та 2.6, а також зберігається умова 2.9:

$$C_w = C_{w.ini}. \quad (2.9)$$

Тоді початкові та граничні умови будуть наступні 2.10:

$$k_m(C_{ws} - C_e) = -D_w \frac{dC}{dx}. \quad (2.10)$$

Мікроскопічний енергетичний баланс визначається на основі знаходження щільності потужності, що передається мікрохвилями, як функції положення всередині продукту. Для цього рівняння Максвелла записуються у диференціальній формі 2.11 – 2.14 [29]:

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt}, \quad (2.11)$$

$$\nabla \times H = \frac{dD}{dt} + J, \quad (2.12)$$

$$\nabla B = 0, \quad (2.13)$$

$$\nabla D = \rho, \quad (2.14)$$

де E - це електричне поле, В/м;

D - електричне зміщення;

J - поточна густина, кг/м³;

B - магнітне індукційне поле, Тл.

За допомогою рівнянь Максвелла 2.11-2.14 можна виконати обчислення електричного та магнітного полів, які утворюються вздовж їжі в камері МП. Для розрахунку необхідно врахувати гармонійні в часі електромагнітні поля, а саме 2.15, 2.16:

$$E = E e^{-i\omega t}, \quad (2.15)$$

$$H = H e^{-i\omega t}. \quad (2.16)$$

Після заміни B та D як функції від H та E , можна отримати наступні залежності 2.17, 2.18 [30]:

$$\nabla \times E = i\mu\omega H, \quad (2.17)$$

$$\nabla \times H = E(\sigma - i\varepsilon\omega) = -i\varepsilon\omega E, \quad (2.18)$$

де ε - це складна діелектрична проникність, яка складається із дійсної та уявної складової, Ф/м.

Після об'єднання рівнянь 2.17 та 2.18 можна отримати залежність 2.19 [31]:

$$k^2 E + \nabla^2 E + \nabla \left(E \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) = 0. \quad (2.19)$$

Після розв'язання рівняння 2.19 можна визначити розподіл електричного поля в об'ємі їжі, що нагрівається в МП. Оскільки зроблено припущення, що діелектрична проникність не змінюється в напрямку електричного поля, тоді ми отримуємо рівняння 2.20, 2.21

$$\nabla \left(E \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) = 0. \quad (2.20)$$

В результаті отримуємо:

$$k^2 E + \nabla^2 E = 0, \quad (2.21)$$

де k - це коефіцієнт, який залежить від діелектричних властивостей продуктів та визначається за формулами 2.22-2.24:

$$k = i\beta + a, \quad (2.22)$$

$$a = \frac{2f\pi}{c} \sqrt{\frac{(\sqrt{\tan^2 \delta + 1})\varepsilon}{2}}, \quad (2.23)$$

$$\beta = \frac{2f\pi}{c} \sqrt{\frac{(\sqrt{\tan^2 \delta + 1})\varepsilon - 1}{2}}, \quad (2.24)$$

де f - це частота випромінювання, Гц;

$\tan \delta$ - тангенс втрат.

Частота випромінювання та тангенс втрат розраховуються за наступними залежностями із врахуванням властивостей їжі 2.25 [31]:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (2.25)$$

Для визначення електричного поля необхідно виконати розрахунок формули 2.21 із наступними граничними умовами 2.26, 2.27:

$$(E_1 - E_2)nx = 0, \quad (2.26)$$

$$(H_1 - H_2)nx = 0, \quad (2.27)$$

де E_1 і E_2 - це електричні поля повітря та їжі відповідно, В/м.

Ці граничні умови означають, що тангенціальні складові магнітного та електричного поля є неперервними. Формулу 2.27 можна виразити у вигляді функції електричного поля за допомогою наступного співвідношення 2.28 [32]:

$$\frac{dE}{dx} = iH\omega\mu_0. \quad (2.28)$$

В загальному аналітичне рівняння 2.21 можна представити як комбінацію хвиль, що поширюються в протилежних напрямках та підпорядковуються наступній залежності 2.29 [33]:

$$E = e^{ikx}A_2 + e^{-ikx}B, \quad (2.29)$$

де A_2 і B_2 - це комплексні значення, які обчислюються за допомогою граничних умов, що наведені у 2.26-2.27, створюючи набір лінійних диференціальних рівнянь, що породжують блокову діагональну матрицю.

За умови, якщо мікрохвилі в площині МП опромінюють їжу з лівого напрямку, а також відома інтенсивність падаючого електромагнітного поля E_L , можна отримати систему рівнянь 2.30 [34]:

$$\begin{cases} B_1 + E_L - A_2 - B_1 = 0, \\ k_1 E_L - k_1 B_1 - k_2 A_2 + k_2 B_2 = 0, \\ A_2 e^{iLk_2} + B_2 e^{-iLk_2} - A_1 e^{iLk_1} = 0, \\ k_2 A_2 e^{iLk_2} - k_2 B_2 e^{-iLk_2} - k_1 A_1 e^{iLk_1} = 0 \end{cases}, \quad (2.30)$$

Після визначення комплексних коефіцієнтів A_2 і B_2 за формулою 2.30 можна виконати розв'язання формули 2.29 і в результаті отримати значення електричного поля в їжі під час її нагрівання в МП.

Слід відзначити, що такий розв'язок електричного поля використовується за умови, якщо їжа опромінюється лише з одного боку. Якщо їжа опромінюється мікрохвилями з обох боків, то розв'язання електричного поля є результатом суперпозиції розв'язку для нагріву з однієї сторони. Але в такому випадку необхідно враховувати, що дві протилежні сторони їжі опромінюються зовнішнім електричним полем із однаковою фазою та модулем.

Формули, закладені в математичну модель нагрівання їжі, можуть слугувати основою для визначення ключових параметрів, які повинен вимірювати та контролювати автоматизований стенд випробовувань. Наприклад, рівняння теплопровідності та моделі поглинання електромагнітної енергії дозволяють розрахувати очікувані розподіли температури в контрольному зразку й у часі, і в просторі. Це дає можливість визначити точки, де необхідно встановити датчики температури чи тепловізійні прилади, а також встановити критичні межі, відхилення від яких свідчать про несправність магнетрона, нерівномірність поля або проблеми з відбивачами. Таким чином, формули перетворюються на технічні вимоги, що забезпечують повноцінне вимірювання параметрів під час випробовувань [35].

Крім того, математична модель дозволяє прогнозувати поведінку печі при роботі з різними навантаженнями та типами продуктів - від води до стандартних тестових тіл. Це допомагає створити алгоритми автоматичного керування стендом, які регулюють подачу живлення, тривалість циклів, послідовність тестів та умови безпеки. Формули забезпечують можливість порівняння реальних виміряних значень із теоретично очікуваними, і на основі цього стенд може автоматично приймати рішення: чи піч працює коректно, чи потребує додаткової діагностики. У результаті математична модель стає фундаментом не лише для аналізу нагрівання, але й для повної автоматизації процесу тестування.

2.2 Математичне моделювання понижувального перетворювача мікрохвильової печі

Математичне моделювання понижувального трансформатора є важливим етапом при створенні автоматизованої системи тестування мікрохвильових печей, оскільки трансформатор є одним із ключових елементів, що забезпечує живлення високовольтної частини - магнетрона. Його робота безпосередньо впливає на інтенсивність генерування мікрохвиль, стабільність вихідної потужності та безпеку всієї системи. Моделювання дає змогу заздалегідь оцінити електромагнітні процеси всередині трансформатора: розподіл струмів, напруг, втрат потужності та нагрівання. Це дозволяє передбачити робочі режими, у яких трансформатор може працювати нестабільно або з підвищеним ризиком перегріву, що є критично важливим при автоматизованих випробуваннях.

Крім того, математична модель допомагає визначити, які саме параметри роботи трансформатора повинна вимірювати автоматизована система тестування для коректної оцінки його стану. Наприклад, модель дає можливість встановити допустимі межі коливання вторинної напруги, рівень струму навантаження, характеристику пускового струму та залежність температури від часу роботи. Завдяки цьому алгоритм автоматизованого стенда може виявляти навіть незначні відхилення, що свідчать про деградацію ізоляції, короткі замикання між витками або інші дефекти. Моделювання також дозволяє оптимально налаштувати системи захисту й аварійного відключення, які є обов'язковими під час тестування високовольтних компонентів. Таким чином, математичне моделювання трансформатора забезпечує не лише глибше розуміння його роботи, але й підвищує точність, безпечність і ефективність автоматизованого тестового обладнання.

В роботі будуть використовуватись імпульсні перетворювачі постійного струму в постійній. Передбачається, що ці перетворювачі будуть придбані у

готовому вигляді, тому в роботі буде відсутнє їх конструювання та розроблення. Такі перетворювачі також називають понижувальними трансформаторами, оскільки вони перетворюють певний рівень напруги в більш низький. Принцип роботи понижувального трансформатора наведено на рисунку 2.1.

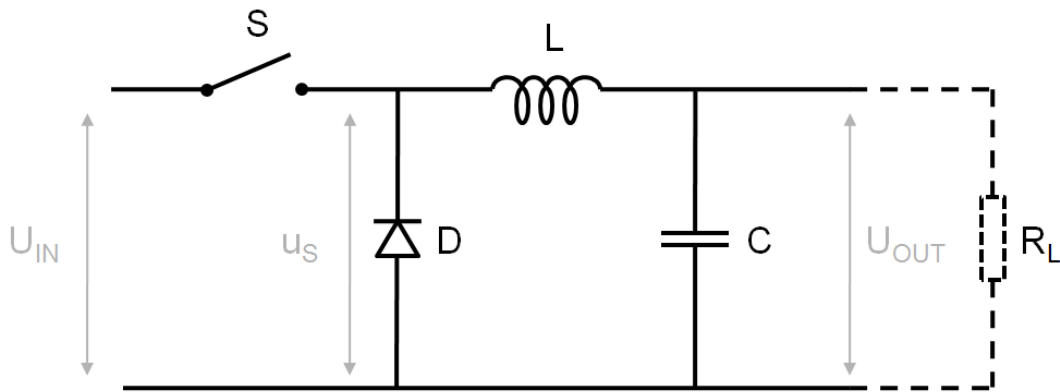


Рисунок 2.1 - Принципова схема понижувального трансформатора

Контроль часу виконується за допомогою перемикача S . Протягом цього часу виконується умова 2.31:

$$U_{in} = U_S, \quad (2.31)$$

де U_{in} - початкова напруга, В;

U_S - напруга на виході із трансформатора, В.

Перемикач трансформатора буде вимикатися та вмикатися із частотою, що становить 104 Гц. Якщо відбувається зміна робочого циклу, то вихідна напруга U_{out} змінюється відповідним чином.

Діод D вважається ідеальним і призначений для запобігання проходження через ланцюг негативної напруги, яка індукується індуктором. Якщо перемикач знаходиться у закритому положенні, то струм живлення подається напряму із джерела. При відкритому перемикачі, струм протікає через діод.

Основна залежність для ідеального конденсатора характеризується його зарядом q , константою C і напругою на конденсаторі u . Тоді умова 2.32 [36]:

$$q = Cu. \quad (2.32)$$

Струм i - це швидкість потоку заряду dq за певний проміжок часу dt , тобто можна вивести формулу 2.33:

$$i(t) = \frac{dq}{dt}. \quad (2.33)$$

При проходженні через конденсатор, струм розраховується за формулами 2.32 і 2.33, тобто 2.34 [37]:

$$i_C(t) = C \frac{du}{dt}. \quad (2.34)$$

Якщо струм у формулі 2.34 дорівнює нулю, то відповідно і похідна від цього струму буде мати нульове значення. Це означатиме, що напруга не змінюється. Якщо струм постійний, то похідна від напруги також постійна і це означає, що струм змінюється за лінійною залежністю, а в результаті цього відбувається заряджання конденсатора.

Магнітний потік F представляє собою постійну величину L , яка множиться на струм I . Тоді можна спростити до формули 2.35:

$$F = Li. \quad (2.35)$$

За законом індукції [38] напруга на індукторі рівна зміні магнітного потоку з плином часу. Тобто 2.36:

$$u_L(t) = \frac{dF}{dt}. \quad (2.36)$$

Використовуючи формули 2.34 та 2.35 можна отримати значення напруги на ідеальному індукторі за формулою 2.37:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt}. \quad (2.37)$$

У випадку, якщо напруга має нульове значення, струм буде постійним, оскільки похідна струму також має нульове значення. Якщо напруга постійна, то і струм змінюється за лінійною залежністю.

Конденсатор та індуктор (рис. 2.1) можна також розглядати як фільтр нижніх частот для згладжування прямокутної напруги, яка отримується в результаті увімкнення перемикача (рис. 2.2).

На основі схеми, зображеної на рисунку 2.2 можна отримати вираз для вихідної напруги U_{out} , а саме 2.38 [39]:

$$U_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T u_s dt = U_{in} \frac{\delta T}{T} = \delta U_{in}. \quad (2.38)$$

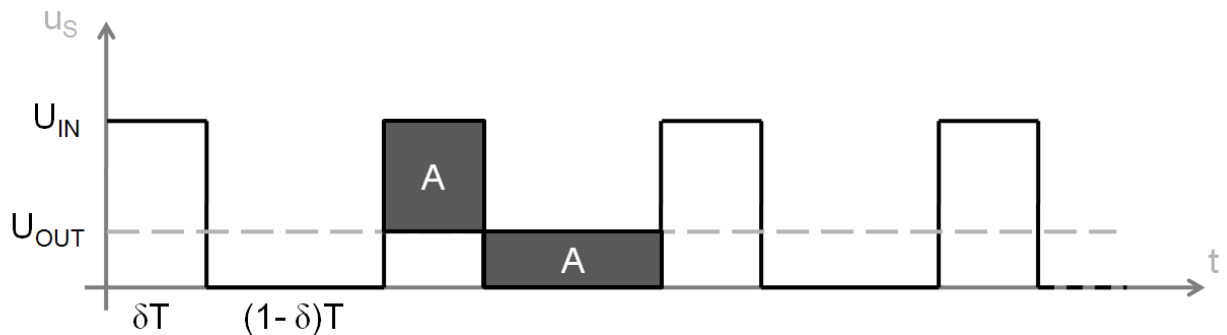


Рисунок 2.2 - Напруга на діоді

Якщо навантаження R_L має постійне значення, то постійним струм, який проходить через індуктор, буде таким самим як і струм, який проходить через R_L . Відповідно до 2.37 струм буде мати зигзагоподібну форму. Це пояснюється тим, що напруга має форму прямокутної хвилі (рис. 2.3).

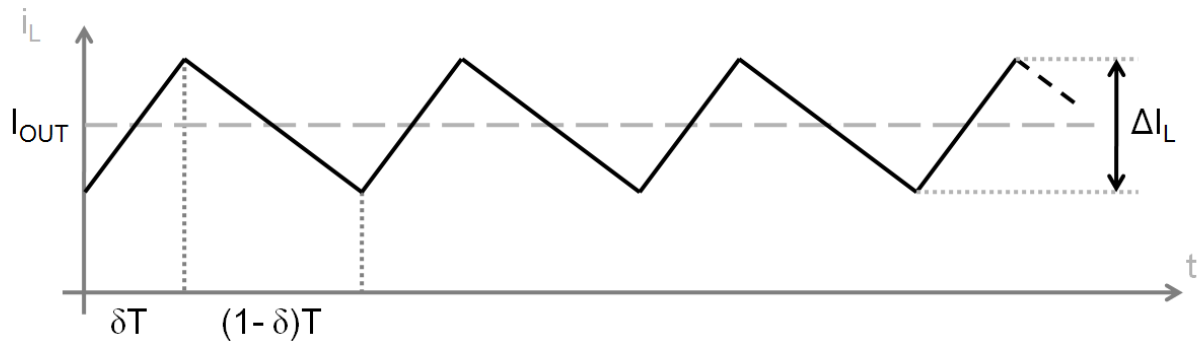


Рисунок 2.3 - Струм, який протікає через навантаження

Коли перемикач знаходиться в закритому положенні за період T , напругу можна визначити за формулою 2.39 [40]:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_{in} - U_{out}}{L}. \quad (2.39)$$

Коли за період, який становить $T(1 - \delta)$ перемикач знаходиться у відкритому положенні, формула 2.39 набуватиме вигляду 2.40

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-U_{out}}{L}. \quad (2.40)$$

Для нормальної роботи понижуючого трансформатора важливо, щоб струм, який протікає через індуктор, не досягав нульового значення. Тому величина ΔI_L не повинна перевищувати значення середнього струму, який протікає через індуктор, тобто I_{out} . Якщо врахувати запас міцності, значення ΔI_L буде визначатись за формулою 2.41:

$$\Delta I_L \leq 0,4 I_{out}. \quad (2.41)$$

Використовуючи рисунки 2.2 та 2.3 та на основі формули 2.41 можна знайти значення L , яке становитиме 2.42:

$$L = \frac{U_{out}T(1-\delta)}{|\Delta I_L|} \geq \frac{U_{out}T(1-\delta)}{0,4I_{out}}. \quad (2.42)$$

Якщо зробити припущення, що конденсатор має значно нижчий імпеданс ніж опір навантаження R_L . Якщо робочий цикл становить 50%, тобто значення можна прийняти на рівні 0,5, то напруга на діоді може бути наближена до ряду Фур'є 2.43[41]:

$$U_s(t) = U_{in} \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \sin 5\omega t - \dots \right). \quad (2.43)$$

Оскільки змінні L і C утворюють фільтр нижніх частот [42], актуальним для поставленої задачі є тільки перший член із ряду Фур'є, оскільки вищі кутові частоти відфільтровуються. Розраховуючи перший член многочлена у формулі 2.43, фільтр можна виразити у вигляді 2.44:

$$\frac{U_{out}}{u_S} = \frac{\frac{1}{jC\omega}}{\frac{1}{jC\omega} + jL\omega} = \frac{1}{1 - LC\omega^2} \approx \frac{1}{LC\omega^2}. \quad (2.44)$$

Тоді пульсація може бути виражена наступним чином 2.45:

$$U_{out_{AC}} = \frac{2U_{in}}{\pi} \cdot \frac{1}{LC\omega_s^2} = \frac{2U_{in}}{\pi} \cdot \frac{1}{LC(2\pi f_s)^2}, \quad (2.45)$$

де f_s - частота перемикача, Гц.

В реальних умовах пульсація буде більшою, ніж отримана за розрахунком у формулі 2.45. Це виникає по причині того, що конструктивні компоненти МП не є ідеальними, а для розрахунків було прийнято, що вони працюють за ідеальних умов.

В основному, найбільш важливими характеристиками є характеристики конденсатора. Наприклад, втрати на конденсаторі, тобто еквівалентний послідовний опір, залежать і від частоти, і від температури.

Через індуктор на опір навантаження R_L подається середній струм I_L , в той час як змінний струм проходить через конденсатор. Зміна струму може лежати в широкому діапазоні значень, тому зміна напруги на конденсаторі також може бути досить великою.

Пульсація може бути виражена як формула 2.46:

$$U_{out} = \frac{r_c \Delta I_L}{2}, \quad (2.46)$$

де r_c - це еквівалентний послідовний опір (ЕПО), Ом.

Тому, при виборі конденсатора для автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильових печей необхідно використовувати конденсатори із низьким значенням ЕПО.

2.3 Перевірка адекватності математичного моделювання

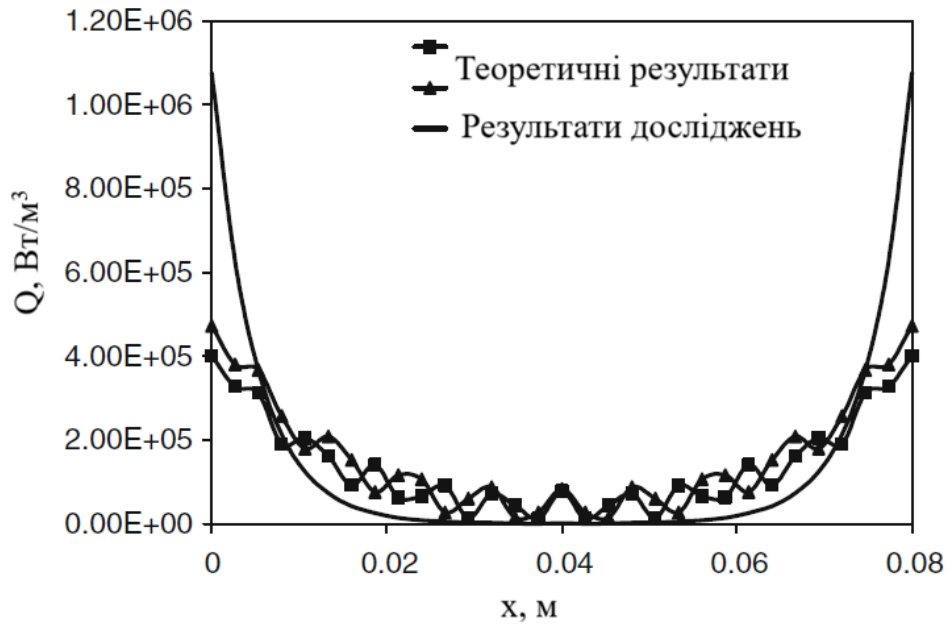
Для розробленої математичної моделі автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей необхідно провести перевірку адекватності [43]. Перевірка виконувалась шляхом порівняння результатів експериментальних досліджень щодо нагрівання їжі в МП в інших дослідженнях і застосування отриманих даних на розробленій математичній моделі.

Для перевірки адекватності формули нагрівання їжі в мікрохвильовій печі, за основу були взяті експериментальні дослідження, наведені у [44]. В дослідженні в якості їжі використовувалось м'ясо, агар-агар та хліб. Умови опромінення для всіх продуктів були однаковими і становили:

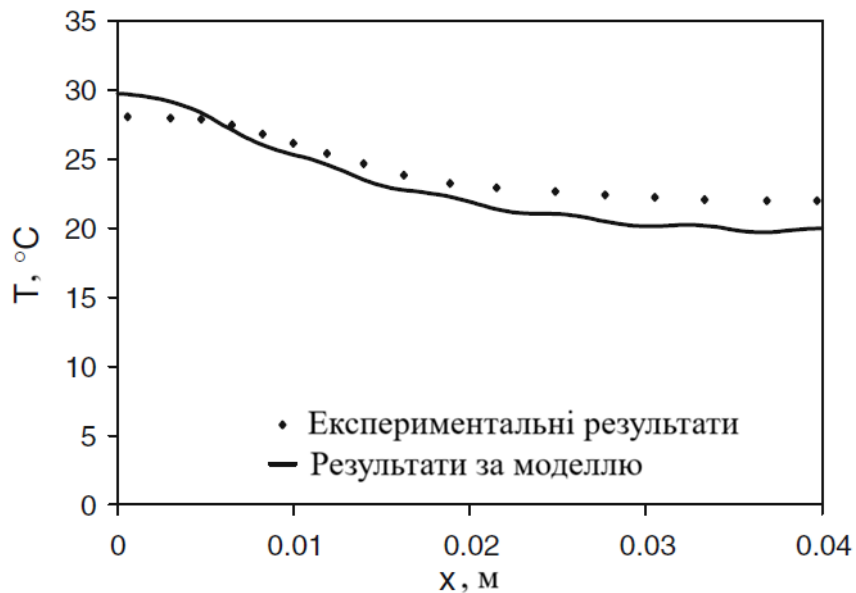
- інтенсивність опромінення $E = 3000$ Вт/м;
- початкова температура їжі $t = 18$ °С;

– товщина зразків становить 8 см.

Теплові та діелектричні властивості, які використовувались у математичному моделюванні для цих продуктів наведені у таблиці 2.1.

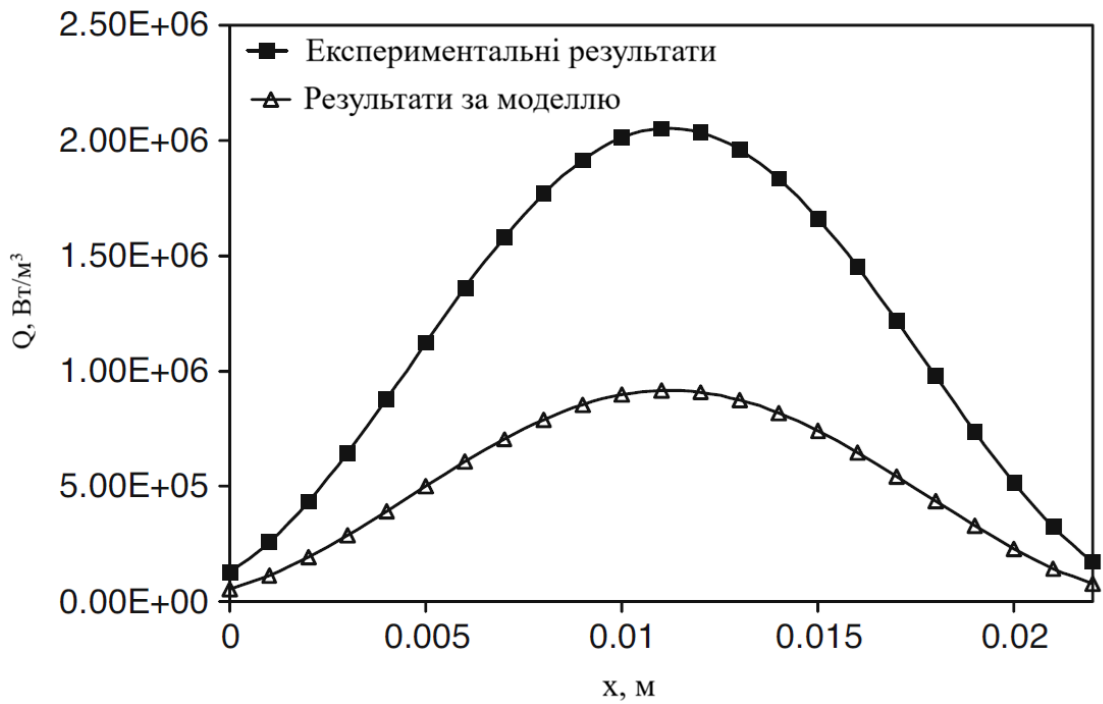


а)

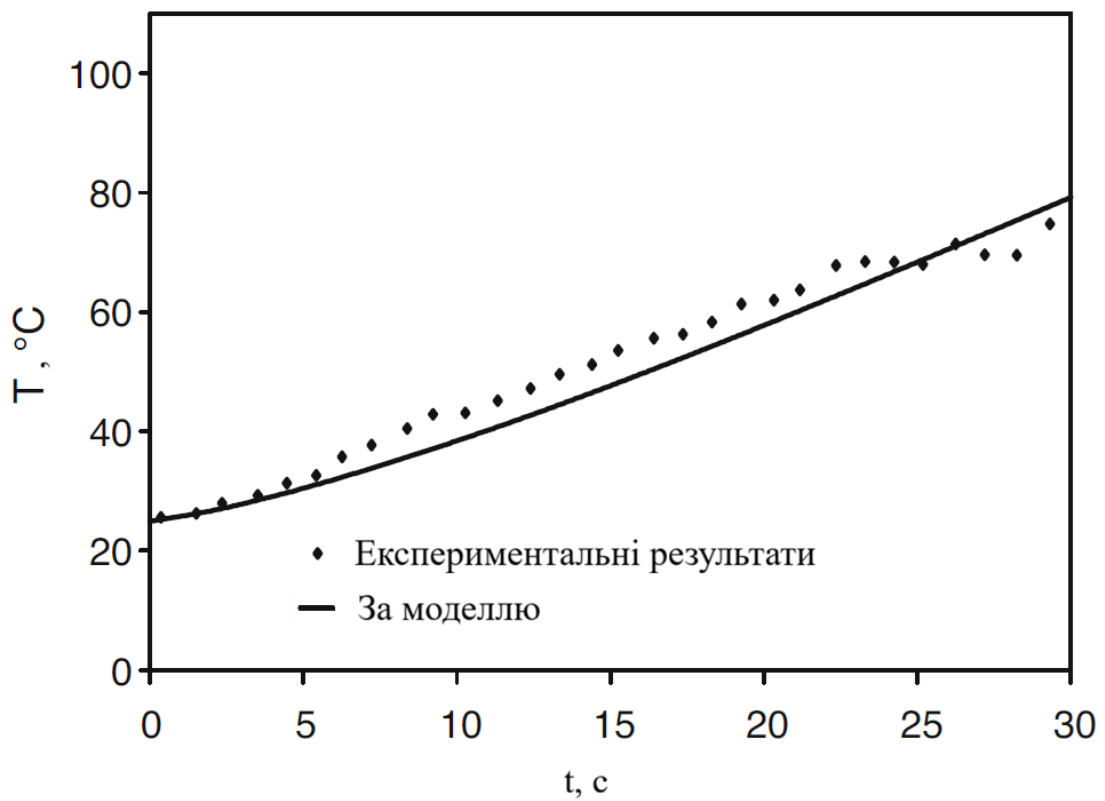


б)

Рисунок 2.4 - Порівняння результатів математичного моделювання та існуючих експериментальних досліджень для агар-агару: а - питома потужність; б - температура продукту харчування

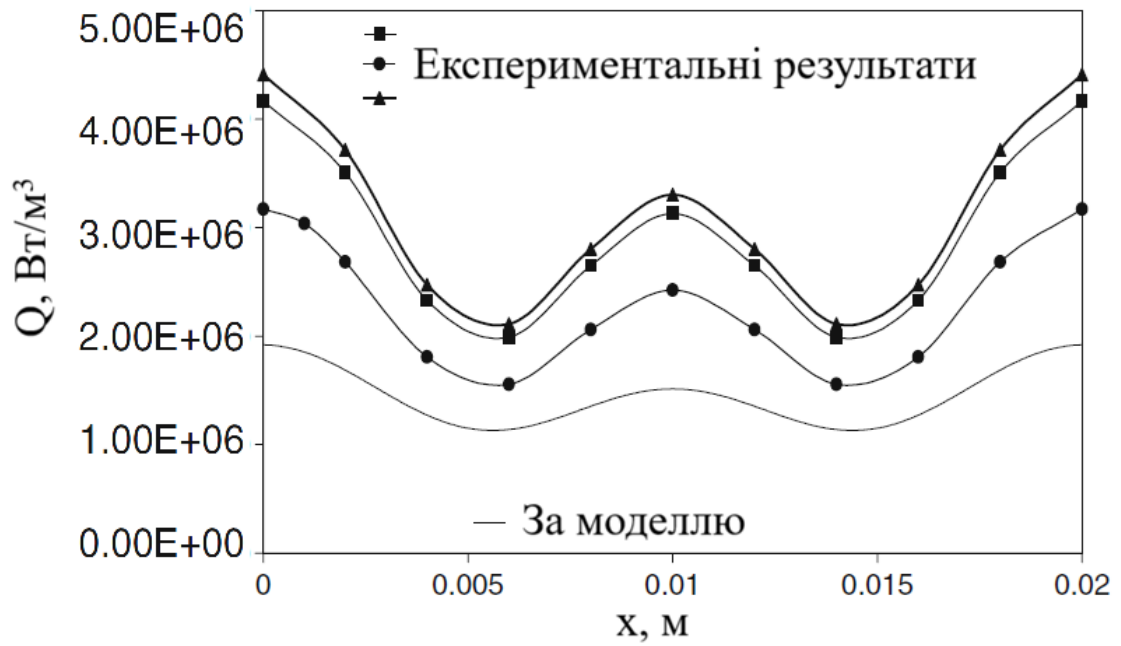


а)

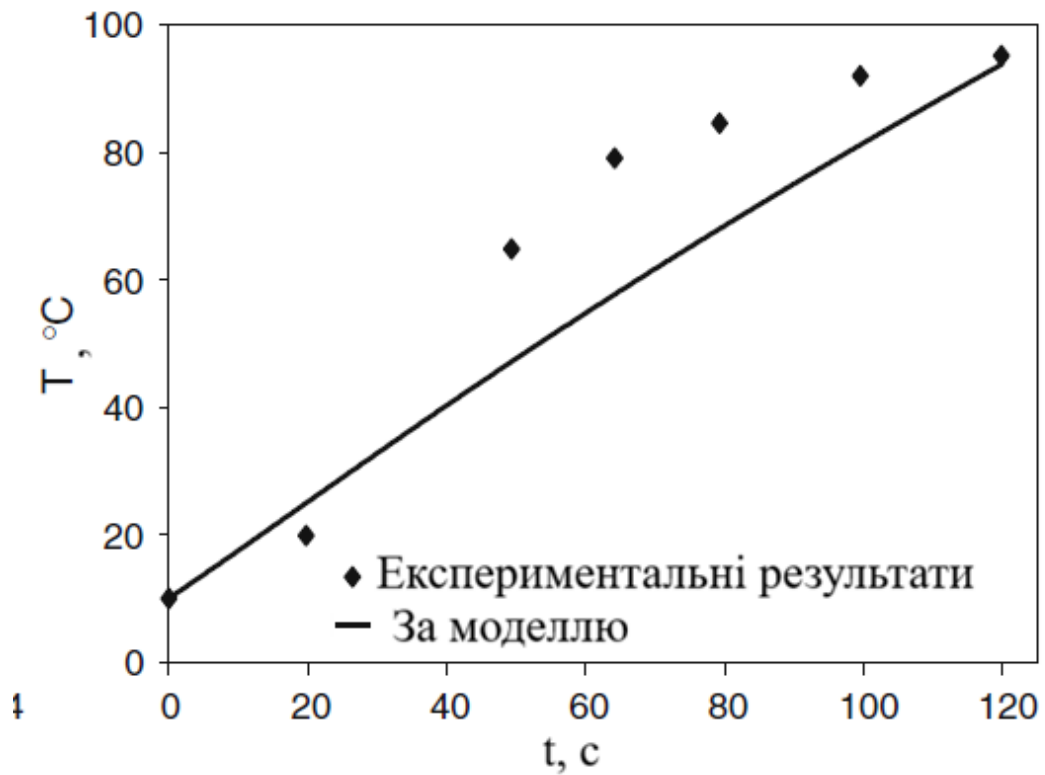


б)

Рисунок 2.5 - Порівняння результатів математичного моделювання та існуючих експериментальних досліджень для хліба: а - питома потужність; б - температура продукту харчування



а)



б)

Рисунок 2.6 - Порівняння результатів математичного моделювання та існуючих експериментальних досліджень для м'яса: а - питома потужність; б - температура продукту харчування

Таблиця 2.1 - Теплові та електромагнітні властивості продуктів [44]

Властивість	М'ясо	Агар-агар	Хліб
Теплопровідність, Вт/м·К	0,45	0,6	0,065
Густина, кг/м ³	1,053	1	152
Діелектрична проникність	50,69	73,6	5,4
Коефіцієнт дифузії, м ² /с	$2 \cdot 10^{-12}$	-	$2,5 \cdot 10^{-9}$
Коефіцієнт діелектричних втрат	16,7	11,5	0,75

Створена математична модель була використана для прогнозування густини в якості функції, залежної від положення їжі всередині камери. На рисунку 2.4 зображені результати, отримані за допомогою математичної моделі для агар-агару. Аналогічне порівняння результатів, отриманих за математичною моделлю та їх порівняння із результатами експериментальних досліджень, наведені на рисунках 2.5-2.6.

Хоча наявні невеликі відхилення даних за математичною моделлю від експериментальних досліджень, вони незначні і ними можна знехтувати.

2.4 Висновки до другого розділу

В другому розділі проведено математичне моделювання автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей. Оскільки основною задачею мікрохвильової печі є нагрівання їжі, то для побудови математичної моделі за основу було взято процес нагрівання їжі в камері мікрохвильової печі. Було виконано математичне моделювання нагрівання їжі на основі теорії електричних кіл, теоретичних основ електротехніки.

Отримана математична модель була перевірена із реальними експериментальними даними щодо питомої потужності та нагрівання трьох продуктів харчування у мікрохвильовій печі - м'яса, агар-агару та хліба. Хоча

наявні невеликі відхилення даних за математичною моделлю від експериментальних досліджень, вони незначні і ними можна знехтувати.

Також було виконано математичне моделювання понижувального трансформатора мікрохвильової печі, оскільки саме він відповідає за передачу необхідної напруги на магнетрон, а магнетрон виступає нагрівальним елементом мікрохвильової печі для розігріву харчових продуктів.

3 ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЦЕСУ ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ

3.1 Підбір основного обладнання

Проведення огляду технологічного процесу проведення контролю та випробовувань МП дозволило виконати постановку задач для автоматизованої системи тестування МП та встановити основні функції і дії, які повинна виконувати така система. В загальному, обладнання для системи автоматизованого контролю та випробовування МП наведено на рисунку 3.1.

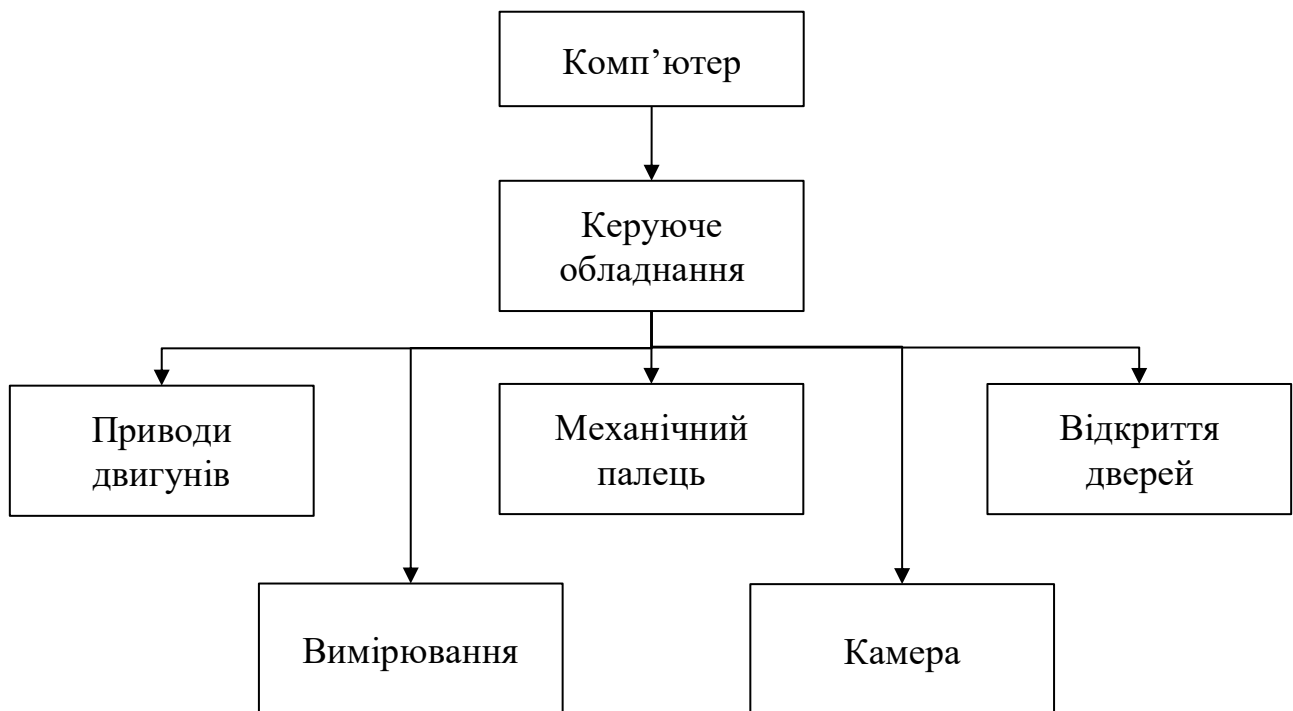


Рисунок 3.1 - Блоки системи автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильової печі

Керування обладнанням передбачається через персональний комп'ютер або ноутбук. Його задача полягатиме у контролі всіх функціональних можливостей автоматизованої системи контролю та випробовування (АСКВ) МП

за допомогою відповідних спеціально розроблених функцій, наприклад, переміщення механічного пальця до певної кнопки та її подальше натискання.

Між машиною та комп'ютером, який обробляє функції низького рівня, буде встановлено апаратний інтерфейс. Також комп'ютер буде використовуватись для збору даних та їх подальшого аналізу, дані в свою чергу будуть отримані із відповідних вимірювальних приладів.

Для підвищення ефективності роботи АСКВ рекомендується, щоб в системі також був наявний сервер для збору великого об'єму даних. Слід відзначити, що машина потребує визначення координат розташування кнопок керування МП, тому для такого керування необхідно розробити відповідне програмне забезпечення.

Таке ПЗ буде в подальшому завантажуватись в апаратне забезпечення. Це передбачено для забезпечення можливості від'єднання комп'ютера від системи при збереженні можливості подальшого використання АСКВ.

До керуючого обладнання АСКВ відносяться елементи, які показані на рисунку 3.2. Хоча воно і виступає основним обладнанням для проведення випробовування МП, воно буде підпорядковуватись роботі комп'ютера.

Периферійне обладнання, до якого відносяться кнопки, елементи вимірювання, тощо, виконує функцію зв'язку між фізичним блоком та керуючим обладнанням. Його призначення полягає у виконанні спеціалізованих функцій низького рівня. Фізичний блок, який включає в себе двигуни, камеру, тощо, призначені для приведення машини в рух.

Передача даних між комп'ютером та апаратним забезпеченням передбачається через USB.

Якщо комп'ютер вимкнений, але все ж таки існує необхідність виконати тестування, в системі необхідно передбачити локальне зберігання вимірних даних в апаратному забезпеченні. Тому воно повинно бути оснащено пам'яттю.

Розміри машини для проведення випробовувань залежить від розміру об'єкта, який підлягає випробовуванням. Робот для випробовування МП повинен

бути здатним виконувати переміщення по траєкторії, яка більша за саму МП. Тому вибір розміру траєкторії виконувався на основі припущення, що найбільша на ринку мікрохвильова піч в Україні має ширину 80 см - це модель Gaggenau GM450120 (рис. 3.3) [45].

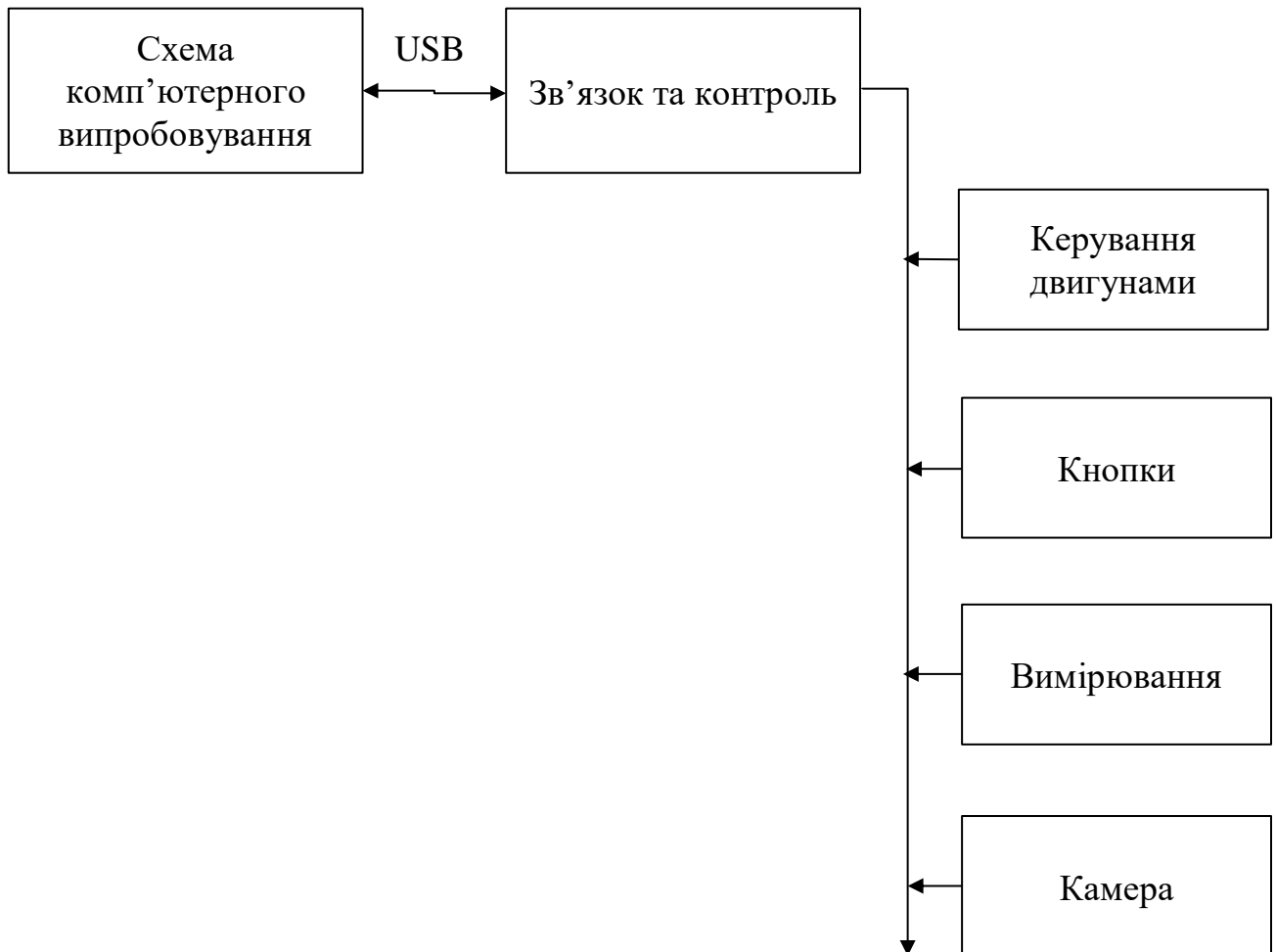


Рисунок 3.2 - Елементи керуючого обладнання АСКВ

Ця модель представляє собою комбінований побутовий електроприлад, а саме духову шафу із мікрохвильовим режимом. Ширина такої МП становить майже 80 см, тому робот повинен виконувати переміщення в площині 1 м по осі Х, щоб бути здатним виконувати випробовування МП таких великогабаритних розмірів. По осі Y достатньо буде 0,8 м, оскільки в більшості випадків висота МП становить 60 см.

В машині передбачається використання електричних двигунів. Існує два варіанти виконання двигуну для АСКВ - це кроковий двигун або сервопривід постійного струму.



Рисунок 3.3 - Модель Gaggenau GM450120

Перевагою сервоприводу постійного струму є його високе значення крутного моменту із порівняно невеликим фізичними розмірами. Але такий двигун не має можливості визначення свого положення, оскільки він приводить у рух коли на його клеми подається напруга. У випадку використання такого типу двигуна необхідно в АСКВ передбачити систему визначення положення.

Крім того, наступним недоліком двигуна постійного струму є його висока вартість у порівнянні із кроковим двигуном. Тобто, якщо в АСКВ використовувати кроковий двигун, то система буде дешевшою і не буде необхідності розробляти додатковий модуль визначення положення двигуна у тривимірному просторі [46].

У кроковому двигуні кожен крок відповідає певному цифровому коду і повний оберт відповідає великій кількості кроків. Тому кроковий двигун за замовченням знає своє положення у тривимірному просторі, в той час як

контролер ні. Такий підхід має назву відкритого контуру. Тобто, для крокового двигуна зберігаються всі переваги електричного двигуна постійного струму, але до того ж додаються такі переваги, як порівняно невисока вартість та фіксація положення у тривимірному просторі.

Для вирішення задачі подачі об'єктів було використано підхід із застосуванням лінійним напрямних. Такі лінійні напрямні можуть бути виконані у декількох варіантах - із ремінним приводом, та із шпинделем.

Привід із шпинделем (рис. 3.4) можна розглядати як гвинт і гайку. Гайка утримується таким чином, що вона не обертається при обертанні самого гвинта. Ремінний привід містить ремінь, який з'єднаний із зубчастими колесами на кожному кінці. При обертанні двигуна, повзунок виконує рух.

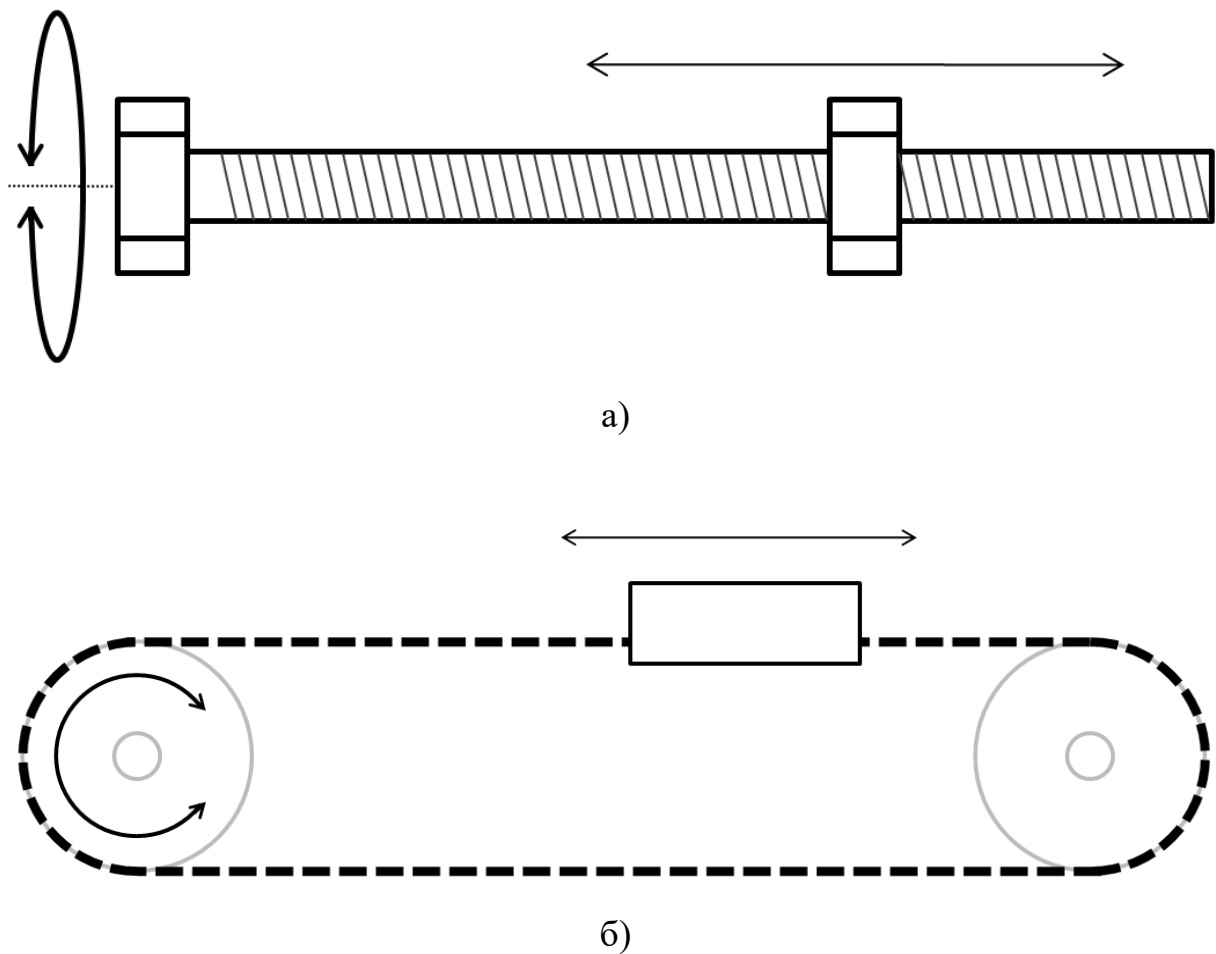


Рисунок 3.4 - Лінійні напрямні: а - привід зі шпинделем; б - ремінний привід

Для АСКВ більш раціональним варіантом буде використання саме ремінного приводу. Основною причиною такого вибору стали його невеликі розміри та вага.

3.2 Мікроконтролер

Мікроконтролер - це компактний однокристальний комп'ютер, що містить процесорну ядро, пам'ять (Flash/EEPROM/ОЗП) та периферійні інтерфейси (АЦП, ШІМ, таймери, UART/I²C/SPI, GPIO) у вигляді одного чіпа [47]. Він призначений для виконання вбудованих програм у реальному часі й ідеально підходить для керування апаратурою завдяки низькому енергоспоживанню, малій вартості та високій надійності. Мікроконтролери бувають різних класів - від простих 8-/16-бітних до потужних 32-бітних з апаратною підтримкою переривань та комунікацій — що дає змогу підібрати оптимальний варіант під конкретні вимоги стенда.

У автоматизованій системі контролю та випробовування мікрохвильових печей мікроконтролер є «мозком» на рівні апаратури: він читає покази датчиків (температури, струму, напруги, рівня випромінювання), виконує первинну обробку сигналів через фільтрацію/усереднення та приймає оперативні рішення, наприклад, коригує потужність живлення, запускає/зупиняє тестовий цикл або активує захисні реле. Завдяки вбудованим таймерам і перериванням мікроконтролер забезпечує точність часових циклів тестування і швидку реакцію на аварійні події (відключення при перевищенні температури чи витоку випромінювання) [48].

Крім реального часу та безпеки, мікроконтролер відповідає за інтерфеїси з іншими елементами системи: він передає зібрані дані на вищий рівень (PLC, PC, SCADA або хмару) по UART/USB/Ethernet/CAN, керує індикаторами та панеллю оператора, зберігає журнали тестів у внутрішній пам'яті або зовнішньому накопичувачі. У прошивці можна реалізувати додаткові механізми надійності -

watchdog, контроль цілісності прошивки, діагностику периферії, що робить стенд безпечнішим і більш відтворюваним [49]. Таким чином, мікроконтролер є ключовим елементом, який зв'язує сенсори, виконавчі механізми та програмні алгоритми в єдину ефективну автоматизовану систему випробувань.

Для АСКВ мікроконтролер повинен підтримувати ряд різних протоколів, міти достатню кількість входів/виходів та хорошу продуктивність. В якості мікроконтролеру для АСКВ було обрано STM32F103VBT6 (рис. 3.5), вартість якого становить 957 гривень, а його характеристики наведені у таблиці 3.1 [50].



Рисунок 3.5 - Мікроконтролер STM32F103VBT6

Мікроконтролер STM32F103VBT6 відноситься до лінійки мікроконтролерів STM32F1xx компанії STMicroelectronics та базується на ядрі Cortex-M3. Їм характерний великий обсяг вбудованої пам'яті і великий набір інтерфейсів. Він має більшу кількість таймерів, частоту процесора до 24МГц, пам'ять до 512 кБ, контролер зовнішньої пам'яті, годинник реального часу та вбудований датчик температури.

Для системи автоматизованого контролю та випробування мікрохвильових печей доцільніше розробити власну плату керування, оскільки такі системи мають специфічні вимоги, які рідко повністю покриваються

готовими універсальними рішеннями. Під час випробувань необхідно одночасно працювати з різними типами датчиків, високовольтними колами, системами безпеки та інтерфейсами промислового рівня. Власна плата дозволяє з самого початку закласти потрібну архітектуру, оптимально розвести аналогові й цифрові ланцюги та врахувати вимоги електромагнітної сумісності, що є критично важливим у середовищі з потужним НВЧ-випромінюванням [52].

Ще однією важливою перевагою є підвищена надійність і безпека. Готові плати зазвичай орієнтовані на широкий спектр застосувань і не завжди мають достатній рівень гальванічної розв'язки, захисту від перенапруг, імпульсних завад і аварійних режимів, характерних для тестування мікрохвильових печей. Розробляючи власну плату, можна інтегрувати необхідні захисні елементи, апаратні блокування, аварійні ланцюги відключення та дублюючі канали контролю, що суттєво підвищує безпеку персоналу й обладнання під час випробувань.

Таблиця 3.1 - Характеристики мікроконтролера STM32F103VBT6 [50]

Показник	Значення
Робоча температура, °C	від -40 до +85
Об'єм оперативної пам'яті, кБ	20
Напруга живлення, В	2 - 3,6
Кількість входів/виходів, штук	80
Об'єм пам'яті програм, кБ	128
Максимальна частота ядра, МГц	72
Периферія	DMA, Motor Control PWM, PDR, POR, PVD, PWM, Temp Sensor, WDT
Інтерфейси	CAN, I2C, IRDA, LIN, SPI, UART/USART, USB
Корпус	LQFP-100

Крім того, власна плата керування забезпечує кращу інтеграцію з алгоритмами автоматизації та програмним забезпеченням стенда. Архітектура плати може бути безпосередньо адаптована під конкретні алгоритми керування, обчислювальні потреби та протоколи обміну даними з ПК, PLC або SCADA-системою. Це спрощує реалізацію складних сценаріїв тестування, підвищує швидкість системи та полегшує подальшу модернізацію або масштабування стенда під нові моделі мікрохвильових печей [53].

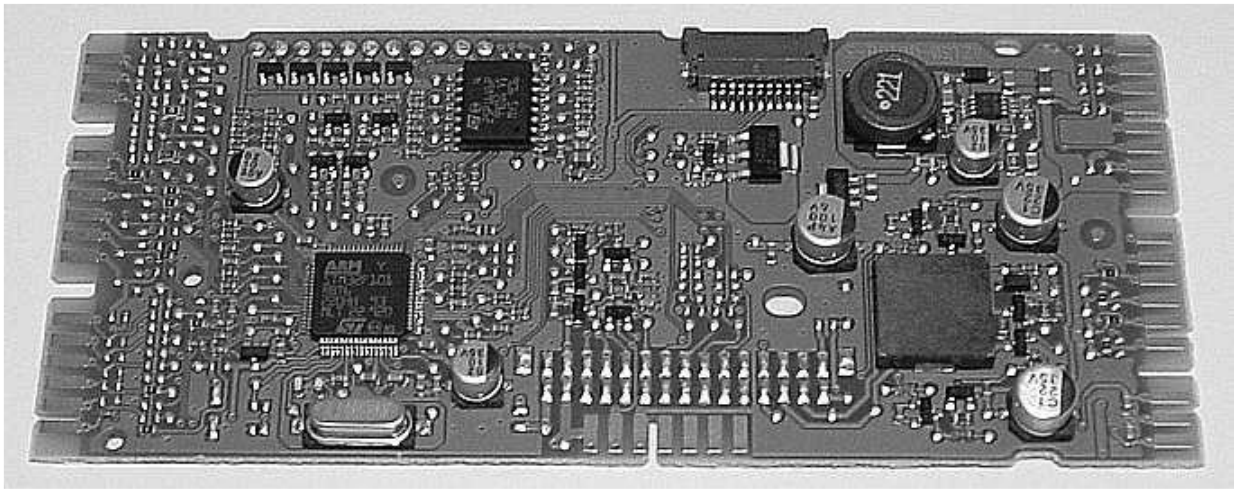


Рисунок 3.7 - Плата керування

Нарешті, розробка власної плати є економічно виправданою у довгостроковій перспективі. Хоча початкові витрати на проектування й налагодження можуть бути вищими, ніж купівля готового рішення, у серійному використанні або при розширенні стенда власна плата дозволяє знизити вартість одиниці обладнання та уникнути залежності від сторонніх виробників. Це особливо важливо для промислових або наукових систем випробовування, де стабільність постачання, відтворюваність характеристик і можливість повного контролю над апаратною частиною мають вирішальне значення.

Розділення системи на менші спеціалізовані плати керування дозволяє усунути ряд проблем. Наприклад, якщо існує необхідність виконати

вдосконалення або перепроєктування однієї плати керування, то відсутня необхідність виконувати перепроєктування інших плат керування.

Для спрощення роботи із платою керування було прийнято рішення вдосконалити вже існуючу друковану плату. Для цього було обрано плату, яка використовується у багатьох моделях МП та базується на ядрі Cortex-M3 (рис. 3.7).

Основним недоліком використання такої вже готової плати керування є те, що відсутня можливість підключити до окремих контактів всі периферійні пристрої АСКВ, в результаті чого не виконується умова щодо доступу до всіх протоколів зв'язку. Крім того, оскільки існуюче апаратне забезпечення побудоване як частина мікрохвильової печі, воно має деякі небажані функції.

Така плата керування розміщується в пластиковому кожусі, який захищає компоненти, але також має кілька невеликих кронштейнів для роз'ємів (рис. 3.8). При розробці нової плати керування або вдосконаленні вже існуючої необхідно виконати умову щодо дотримання розмірів. Ця плата керування буде кріпитись до дисплею.

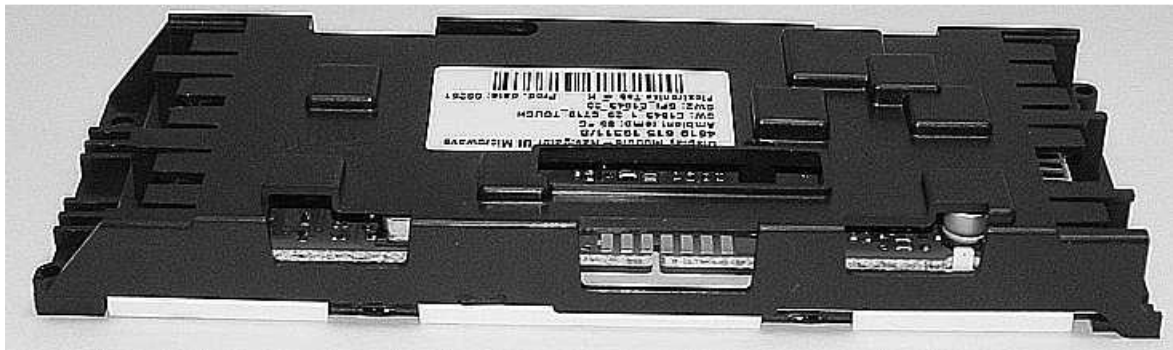


Рисунок 3.8 - Плата керування із кришкою

АСКВ буде складатись із п'яти підсистем, які зображені на рисунку 3.9. Кожна підсистема буде підключена за допомогою IDC кабелів (рис. 3.10). Використання саме таких кабелів підключення дозволить збільшити гнучкість системи та можливість подальшого її розширення шляхом нарощування модулів.

Розроблення плати керування передбачає ряд етапів, а саме:

- виконання САD моделі плати;
- друк шаблону;
- висвердлювання отворів;
- нанесення мідного покриття;
- нанесення фоторезистору;
- травлення;
- нанесення маски для пайки.

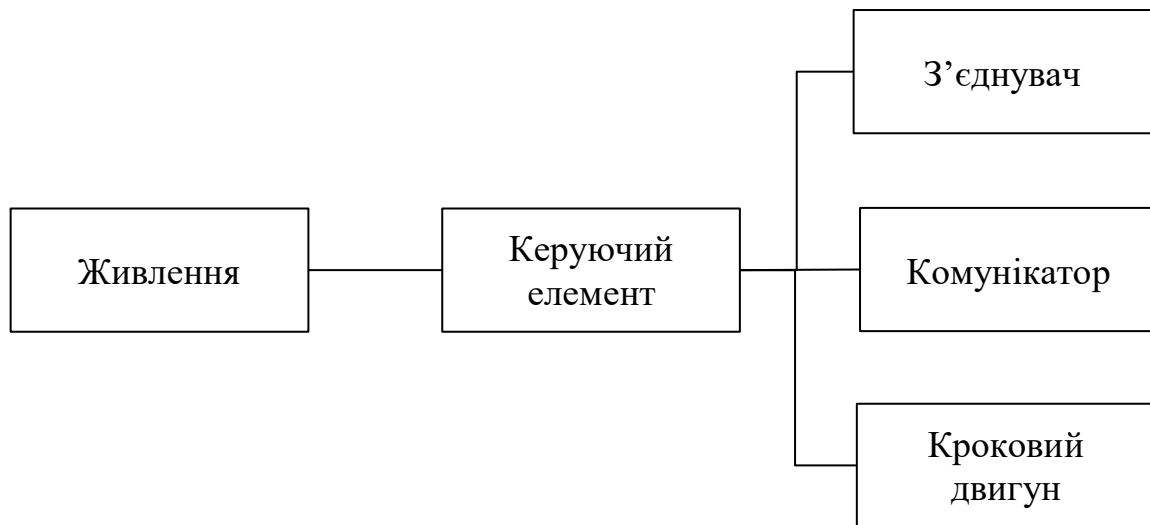


Рисунок 3.9 - Підсистеми АСКВ



Рисунок 3.10 - IDC кабель

Для друку плати передбачається використання спеціального фотоплотеру. Висвердлювання отворів виконується відповідно до розробленої CAD моделі. Якщо плата керування виконана із багатошарового матеріалу, то шари необхідно з'єднати між собою гальванічним способом, для цього передбачається нанесення мідного покриття на підкладку. Зайва мідь буде видалена в процесі травлення. Захист міді від окислення передбачений шляхом нанесення відповідної пайки.

3.3 Джерело живлення

Живлення АСКВ передбачається від напруги 24 В, але для подальших модулів та компонентів необхідно виконати пониження напруги до 3,3 В, 5 В та 12 В. Тому в АСКВ необхідно передбачити три понижуючі трансформатори. Крім того, оскільки мікроконтролер потребує резервної батареї для підтримки роботи годинника реального часу, на платі керування встановлено батарейний відсік для резервного живлення.



Рисунок 3.11 - Перетворювач напруги знижувальний DC/DC 24 В - 12 В

В якості перетворювача напруги з 24 В до 12 В було обрано модель, зображену на рисунку 3.11 [54]. Вартість перетворювача становить 344 гривні, а характеристики наведені у таблиці 3.2.

Корпус такого перетворювача виготовлений із металу, дроти для підключення розташовані на задній стороні. Також там розміщений світловий індикатор роботи. Перетворювач розрахований на видачу до 10 А.

На перетворювачі наявний індикатор роботи, по бокам корпусу розміщені отвори для охолодження, а всередині корпусу наявний радіатор для відведення тепла. Також в конструкції наявний захист від напруги, а з боків розташовуються отвори для кріплення. Схема перетворення напруги наведена на рисунку 3.12.

Таблиця 3.2 - Характеристики перетворювача напруги знижувальний DC/DC 24 В - 12 В [54]

Показник	Значення
Потужність, Вт	120
Напруга на виході, В	12
Розміри, мм	110 x 42 x 120
Напруга на вході, В	24
Статичний робочий струм, мА	до 50
Максимальна температура роботи, °С	80
Максимальна сила струму, А	10
Вага, г	280

Вхід до АСКВ складається із звичайного двоконтактного гвинтового роз'єму, до якого підключається джерело живлення 24 В. Також в конструкції передбачено послідовний діод 1n4001 (рис. 3.13) [55] для захисту від зворотної полярності. Характеристики діоду наведені в таблиці 3.3. Падіння напруги на

діоді на приблизно 0,7 В не викликає збій в живленні системи, оскільки 24 В підключено лише до перетворювачів напруги (рис. 3.14).

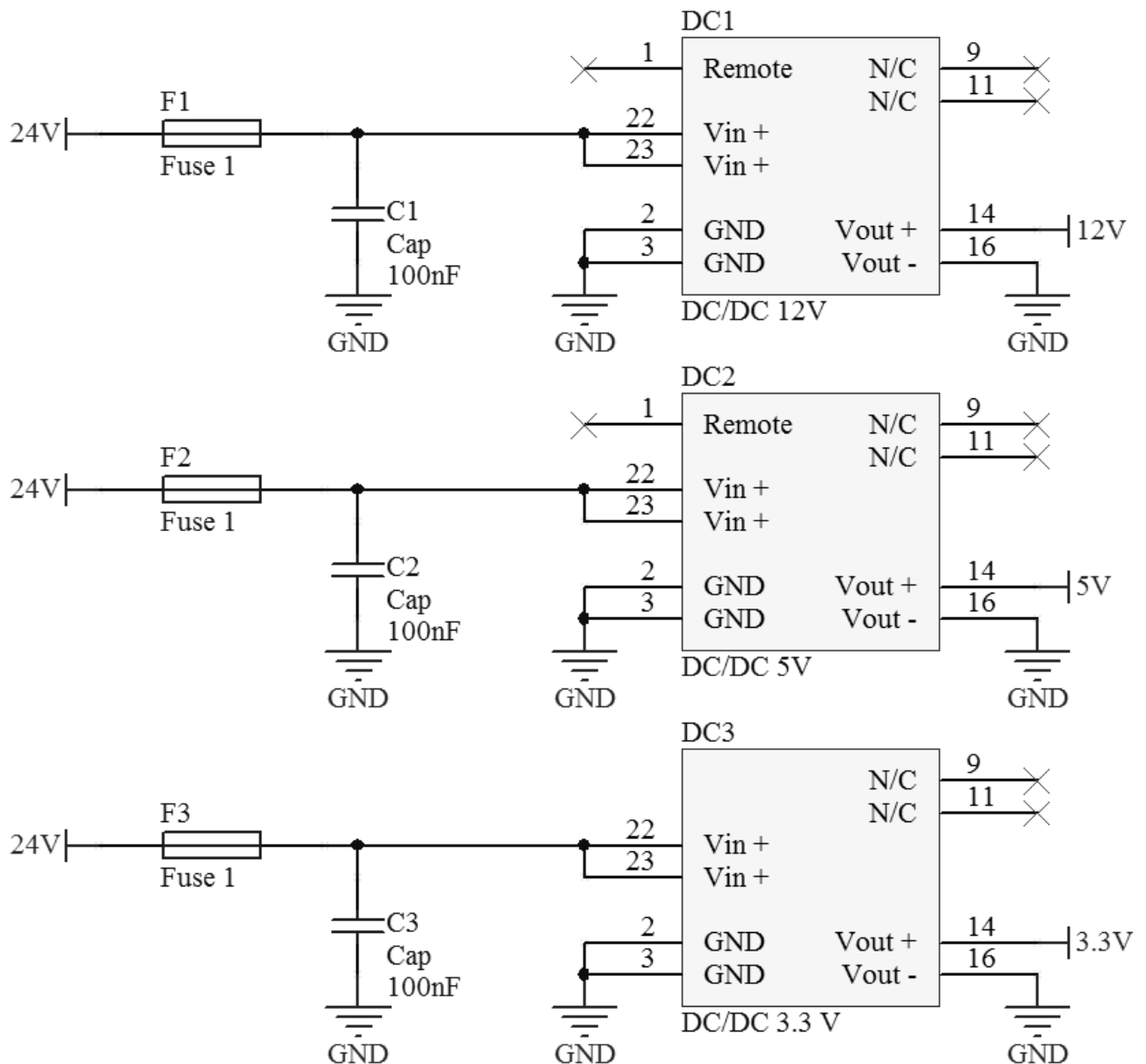


Рисунок 3.12 - Схема пониження напруги

Для забезпечення повної безпеки схеми, в системі передбачено підключення запобіжників до входу перетворювачів постійного струму (рис. 3.12). Якщо перетворювач постійного струму споживає більше енергії, ніж передбачено, запобіжник запобігає пошкодженню інших електронних компонентів внаслідок несправності понижуючого перетворювача. Понижуючі

перетворювачі, що мають широкий діапазон вхідної напруги (9-36 В), також мають вбудовані функції безпеки, але це не виключає необхідності додаткових заходів безпеки, таких як діоди та запобіжники.



Рисунок 3.13 - Діод 1n4001

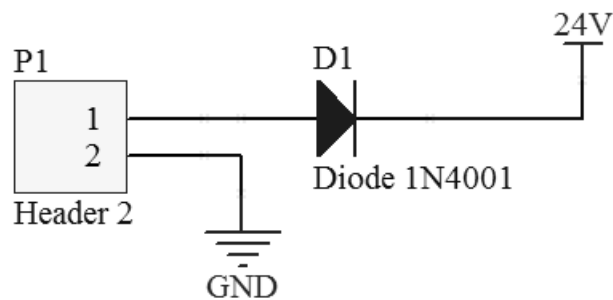


Рисунок 3.14 - Вхідний роз'єм

Таблиця 3.3 - Характеристики діоду 1n4001 [55]

Показник	Значення
Робоча температура, °С	від -65 до +175
Максимальний імпульсний струм, А	30
Максимальна зворотна напруга, В	50
Максимальний робочий струм, А	1
Максимальна напруга у прямому напрямку, В	1,1

Для підвищення стабільності напруги звичайні роз'єднувальні конденсатори розміщуються як на виході, так і на вході блоку живлення (рис. 3.15). Більший роз'єднувальний конденсатор на 220 мкФ (рис. 3.16) підключається до входу, щоб запобігти раптовим і швидким падінням напруги, які можуть вплинути на систему. В якості конденсатору обрано ECAP-LOW-ESR-220mkf-25V [56]. Характеристики наведені у таблиці 3.4.



Рисунок 3.16 - Роз'єднувальний конденсатор електролітичний

Таблиця 3.4 - Характеристики електролітичного конденсатору ECAP-LOW-ESR-220mkf-25V [56]

Показник	Значення
Діаметр, мм	8
Висота, мм	11,5
Номінальна робоча напруга, В	25
Максимальний допуск ємності, %	20
Ємність конденсатора, мкФ	220
Робоча температура, °С	від -55 до +105
Похибка, %	20

Наступний перетворювач напруги - це знижувальний модуль перетворювач 24 В - 5 В (рис. 3.17) [57]. Його розміри становлять 26,4 x 15 x 7,4 мм, вихідна напруга 5 В, вихідний струм 3 А, а вхідна напруга лежить в межах від 6 до 24 В.



Рисунок 3.17 - Перетворювач напруги знижувальний DC/DC 24 В - 5 В

В загальному принципова схема живлення АСКВ наведена на рисунку 3.19. Також в АСКВ передбачено використання перетворювача напруги із 24 до 3,3 В, який зображено на рисунку 3.18, а характеристики наведені у таблиці 3.5 [57]. Рекомендована схема підключення такого перетворювача наведена на рисунку 3.20.

Таблиця 3.5 - Характеристики Перетворювач напруги знижувальний DC/DC 24 В - 3,3 В [57]

Показник	Значення
Опір ізоляції, МОм	1000
Відповідність стандарту	UL94-V0
Потужність, Вт	1
Вихідна напруга, В	3,3 ± 10%
Напруга вхідна, В	24 ± 10%
Робоча температура, °С	від -45 до +85
Напруга ізоляції, В	1000
Частота перетворення, кГц	100



Рисунок 3.18 - Перетворювач напруги знижувальний DC/DC 24 В - 3,3 В

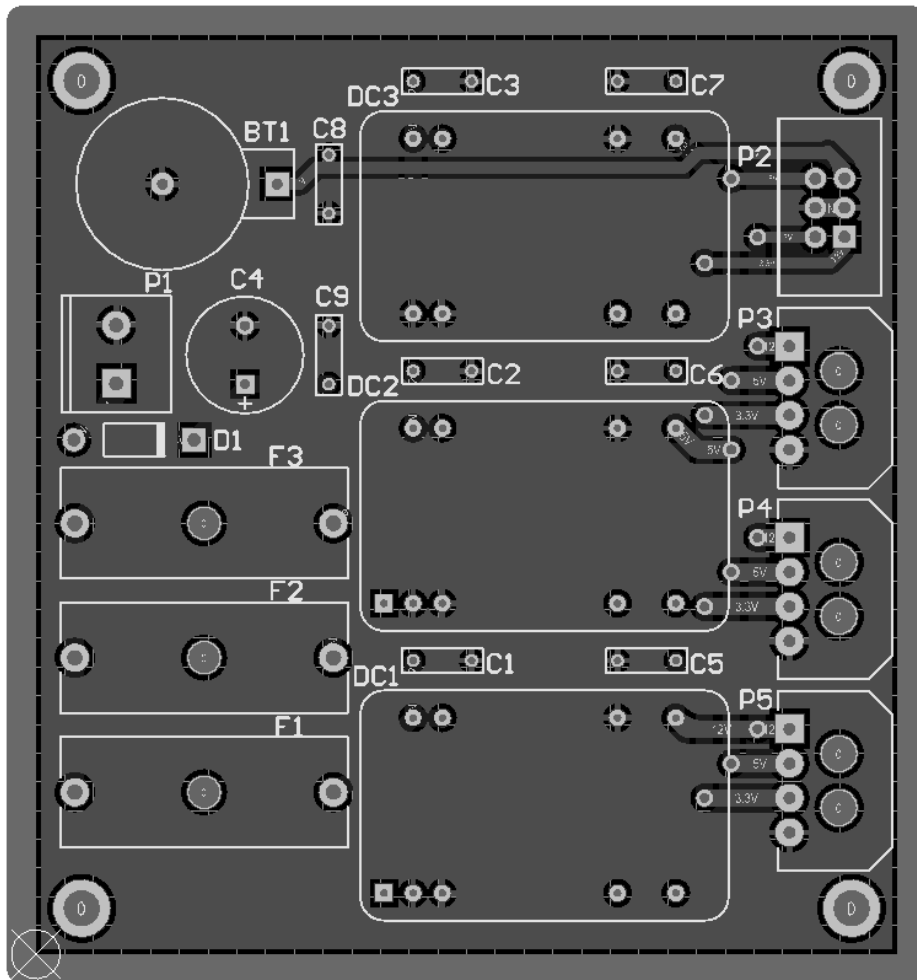


Рисунок 3.19 - Умовна схема живлення АСКВ

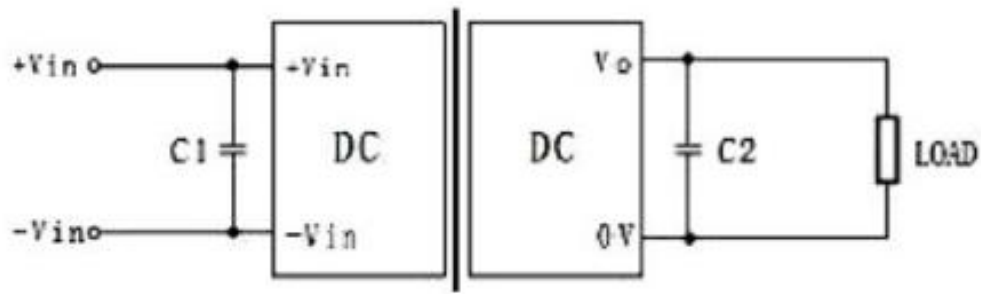


Рисунок 3.20 - Рекомендована схема підключення перетворювача напруги

3.4 Підключення мікроконтролера

Ядром системи виступає мікроконтролер та блок живлення. Вони виконують загальну функцію, в той час як інші елементи системи призначені для виконання конкретних функцій.

Оскільки STM32 підтримує перерозподіл виводів, можна використовувати всі послідовні протоколи. На рисунку 3.21 показано розподіл виводів. В якості обмежувачів струму виступають послідовні резистори, які підключені до більшості виводів. Фактично мікроконтролер виконує керування логічними рівнями TTL на вході. Але резистори додані в систему виступають у якості додаткового елемента безпеки з метою уникнення пошкодження мікроконтролера і неможливості пропуску до нього напруги, яка більше 3,3 В.

Також до мікроконтролера підключені два кварцові генератори (рис. 3.22). Перший кварцовий генератор на 8 МГц моделі SMD 3225 [59] (рис. 3.23) призначений для вбудованого PPL, призначення якого полягає у підвищенні тактової частоти системи до 72 МГц. Другий кварцовий генератор використовується як генератор реального часу, а його коливання відбуваються з частотою 32,768 кГц. Цю частоту можна розділити за допомогою двійкового лічильника на рівні на одну секунду.

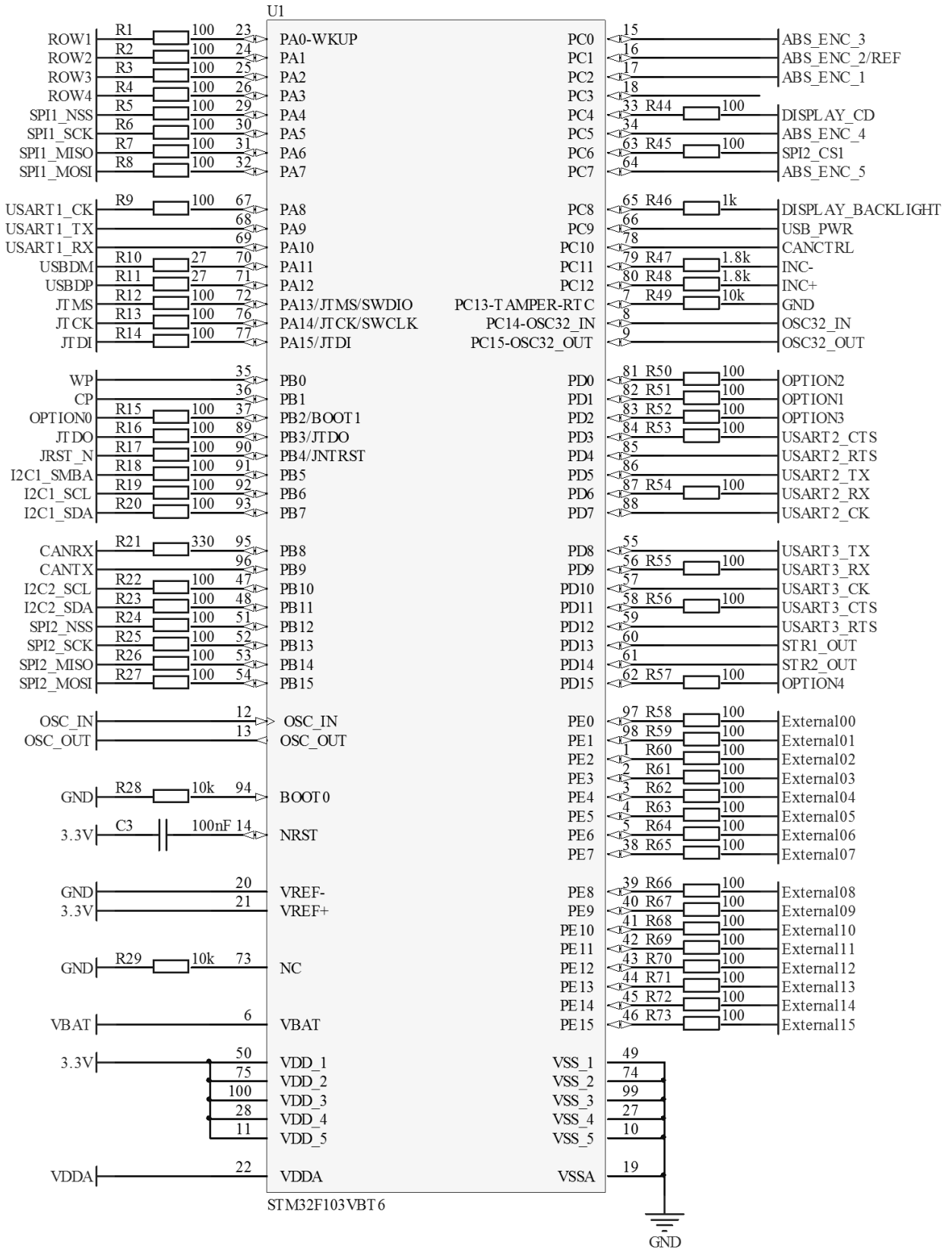


Рисунок 3.21 - Підключення виходів мікроконтролера STM32F103VBT6

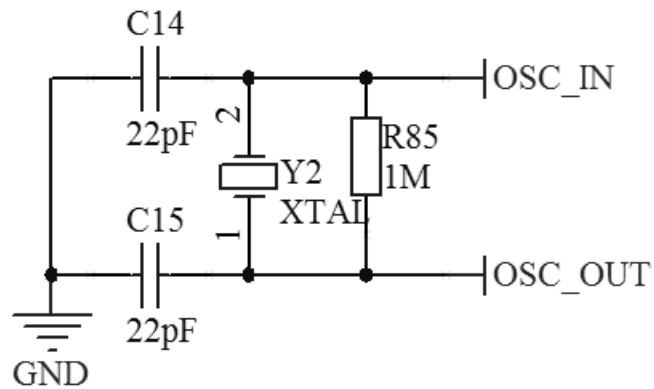
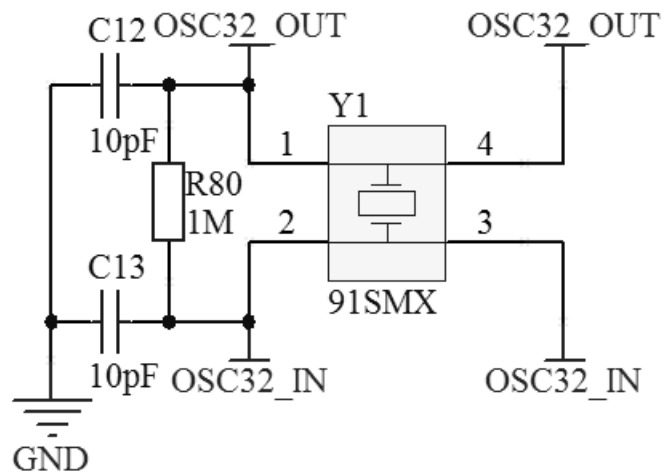


Рисунок 3.22 - Схеми підключення кварцових генераторів



Рисунок 3.23 - Кварцовий генератор

Живлення мікроконтролера передбачається або від напруги 3,3 В після її проходження через перетворювач напруги, або від джерела резервного живлення. Ці схеми живлення показані на рисунку 3.24. Для забезпечення стабільної

вихідної напруги на АЦП в АСКВ передбачено фільтр (рис. 3.25) з імпедансом 50 Ом при частоті 100 МГц [60].

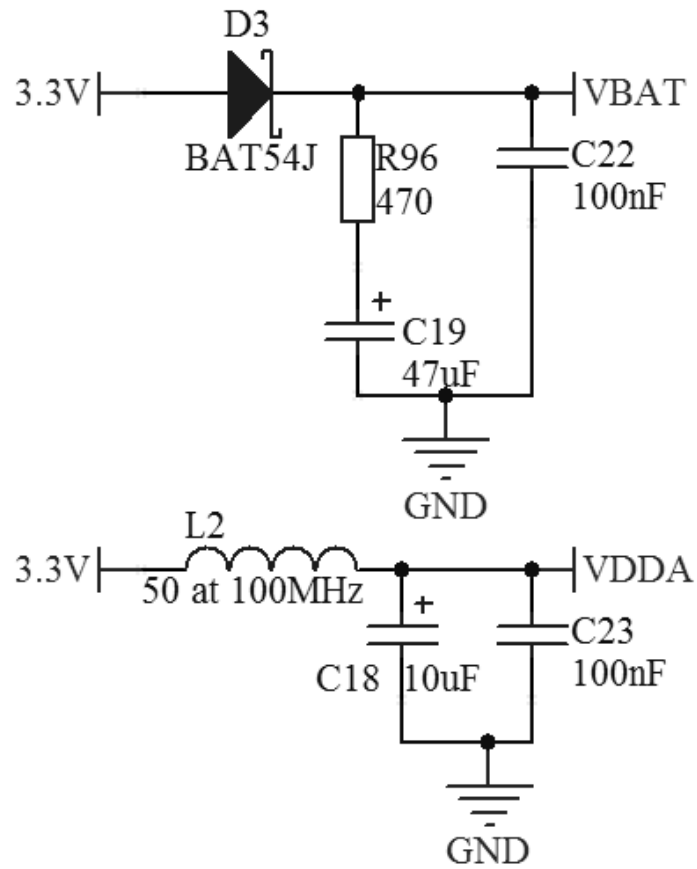


Рисунок 3.24 - Схема живлення мікроконтролера



Рисунок 3.25 - Фільтр живлення

Оскільки рівні напруги послідовного порту RS232 набагато вищі за 3,3 В, необхідно використовувати перетворювач (рис. 3.26). Для протоколу RS232 є чотири лінії: прийом, передача, готовність до передачі, запит на передачу. Перетворювач живиться від 5 В.

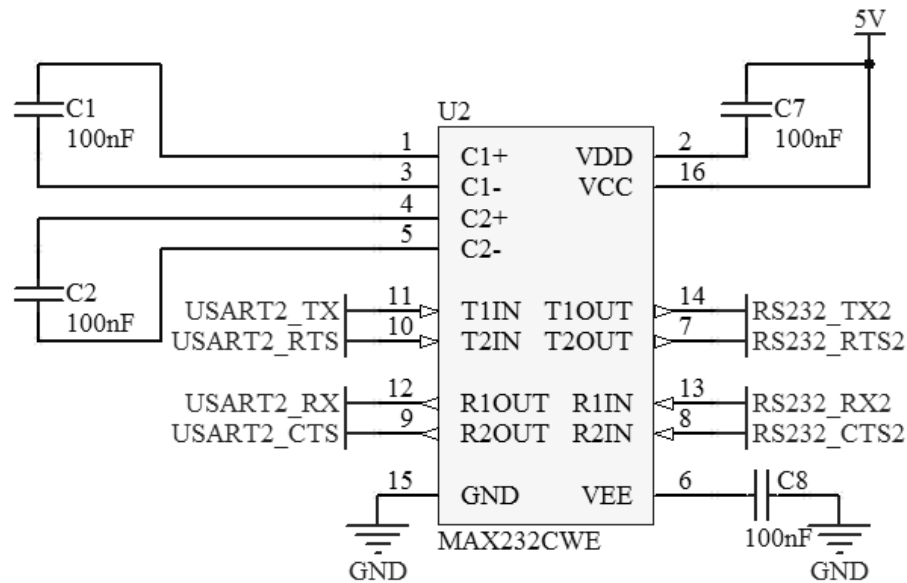


Рисунок 3.26 - Схема трансивера рівня RS232

CAN-шина вимагає 120 термінацій на кожному кінці послідовної лінії. Підсхема, зображена на рисунку 3.27, показує два роз'єми. Двоконтактний роз'єм використовується для підключення термінаційного резистора за допомогою перемички. Триконтактний роз'єм дає можливість вибрати, чи повинен режим очікування CAN-трансивера керуватися програмним забезпеченням чи ні.

Також в АСКВ використовується синьо-білий екран, який зв'язується із мікроконтролером через SPI. Для забезпечення можливості програмного регулювання інтенсивності підсвічування екрану, необхідно виконати підключення транзистора до землі (рис. 3.28). За допомогою сигналу PWM інтенсивність світла можна досить просто змінювати в програмному забезпеченні.

Основне призначення пам'яті SPI EEPROM - зберігання шрифтів для дисплея. Можна використовувати два різних типи корпусів, SO8 і SO16 (рис. 3.29).

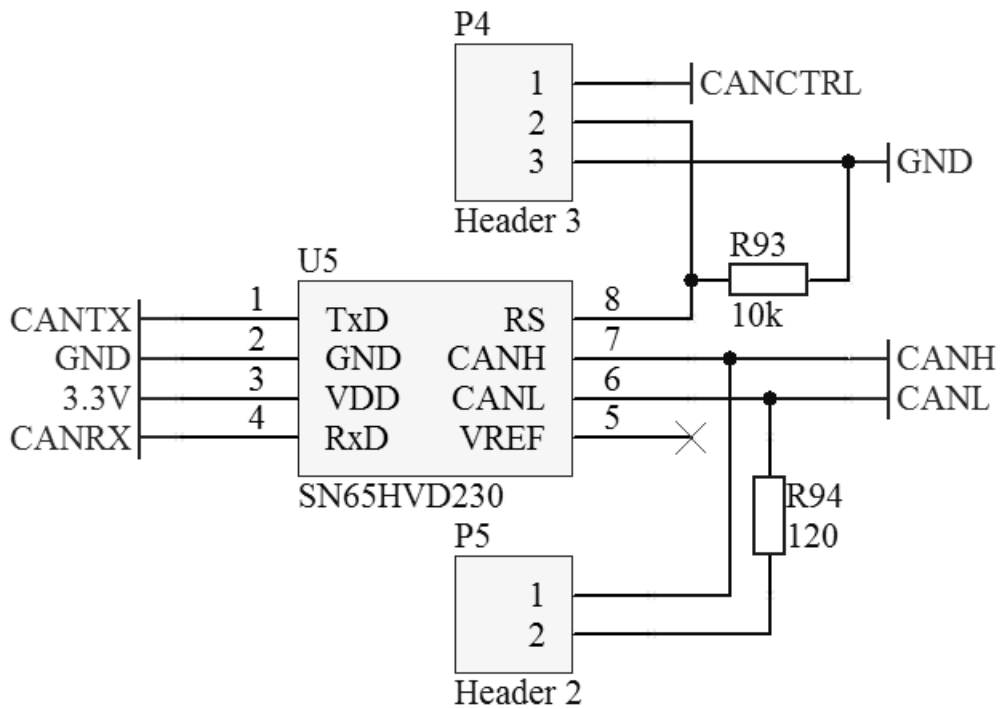


Рисунок 3.27 - Схема трансивера рівня CAN

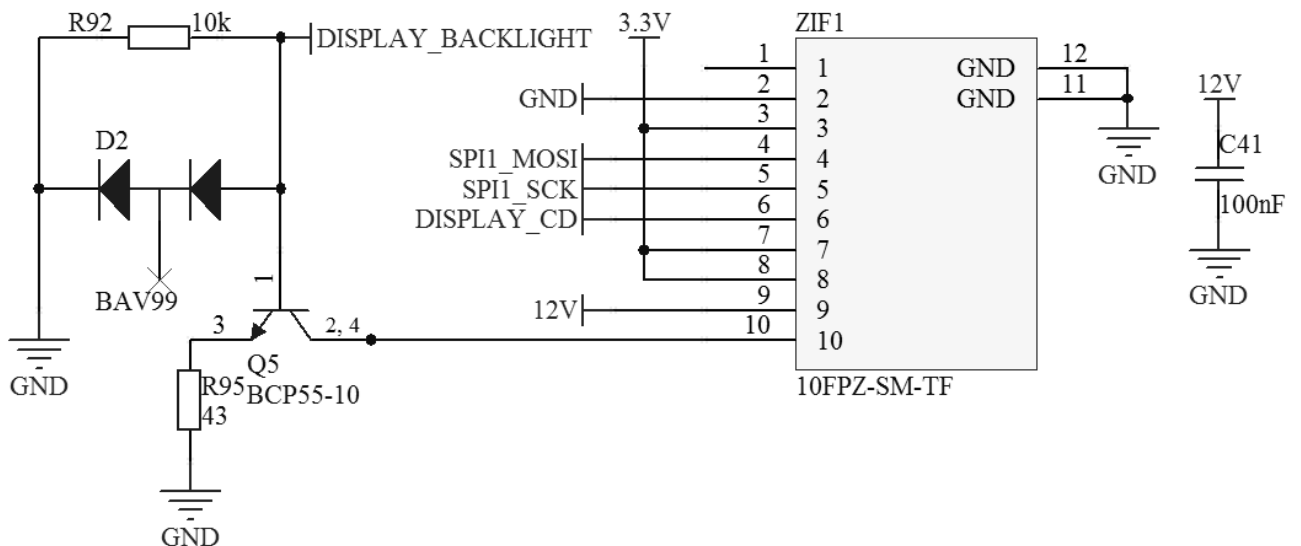


Рисунок 3.28 - Підключення та підсвічування екрану

Шина I2C вимагає підтягуючого резистора (рис. 3.30). До кожної лінії підключено два роз'єднувальних резистори для зменшення шуму. Для

підключення простих кнопок напряму керуючого елементу АСКВ використовується кілька резисторів (рис. 3.31).

З метою забезпечення стабільної роботи плати керування по всьому її периметру було розміщено роз'єднувальні конденсатори для 3,3 В (рис. 3.32) та лінії передачі даних через USB.

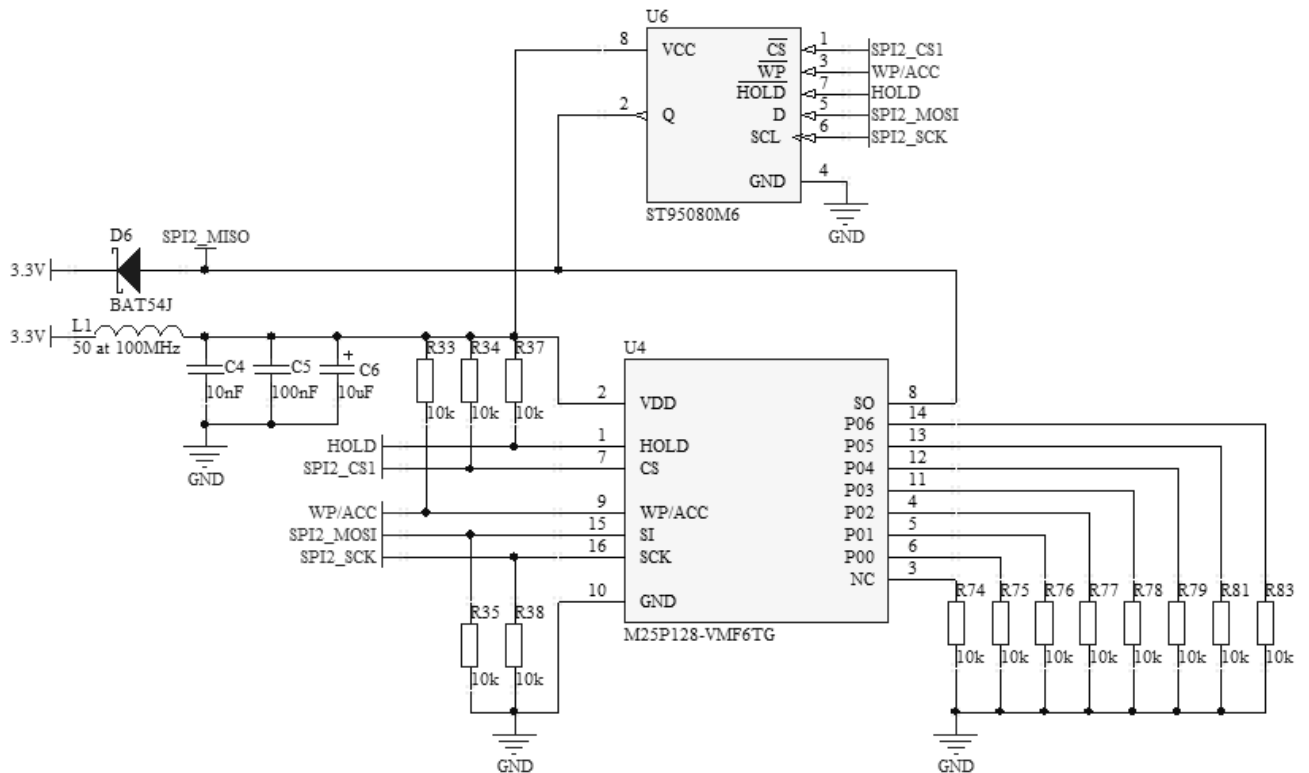


Рисунок 3.29 - Схема підключення SPI EEPROM

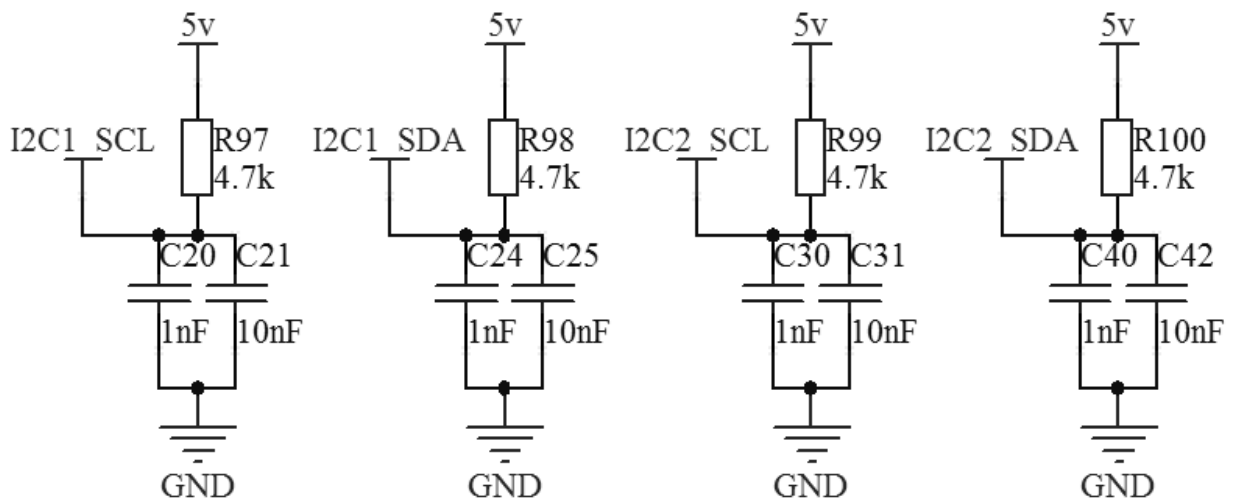


Рисунок 3.30 - Підсхема I²C

Для програмування EEPROM і STM32 використовується роз'єм для JTAG і SPI-програмактора (рис. 3.33). Три роз'єми IDC розміщуються на краю плати керування, а один - посередині плати (рис. 3.34).

Слід відзначити, що важливим фактором з питання підключення елементів до мікроконтролера є те, щоб було можливо розмістити їх із врахуванням фізичних розмірів, які наведені на рисунку 3.35 та 3.36.

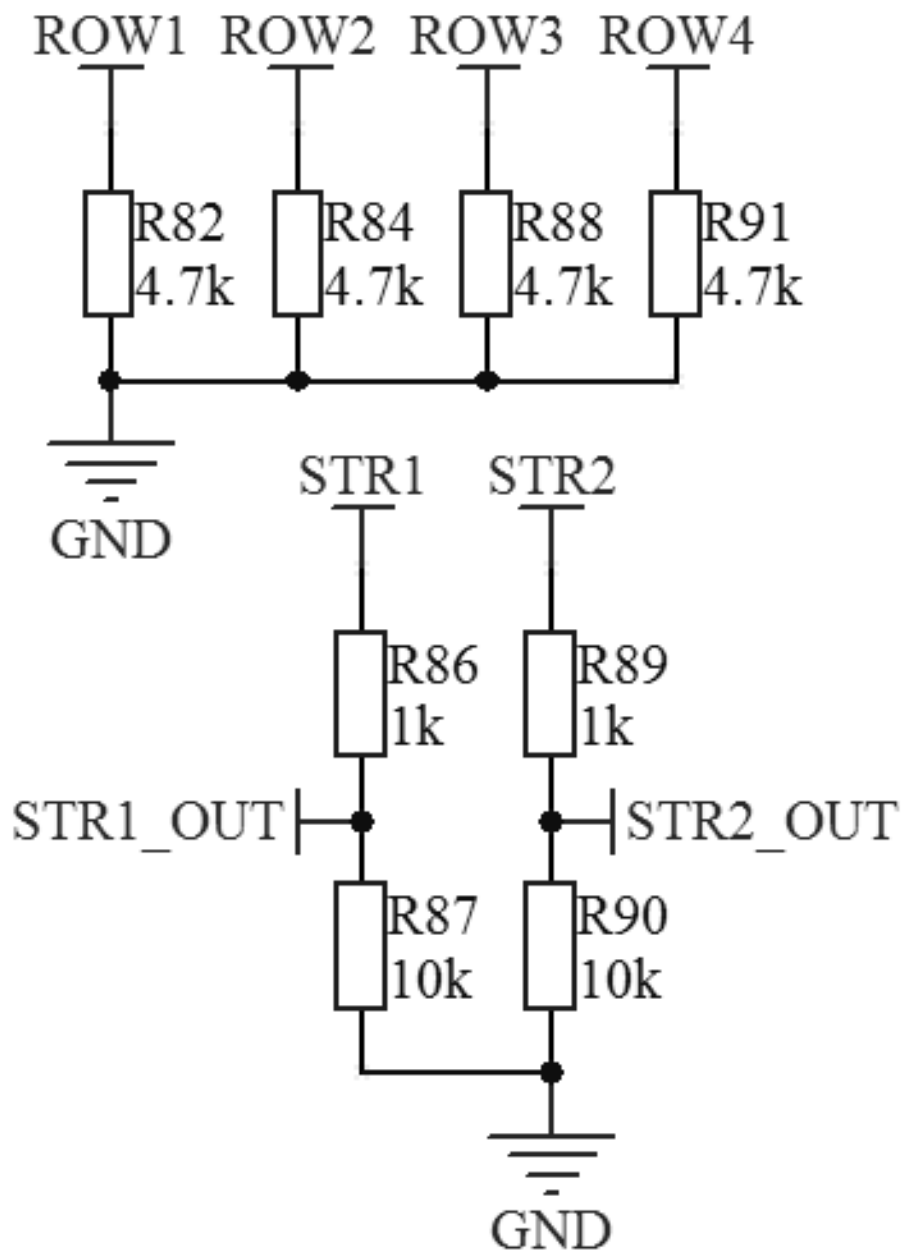


Рисунок 3.31 - Резистори для кнопок

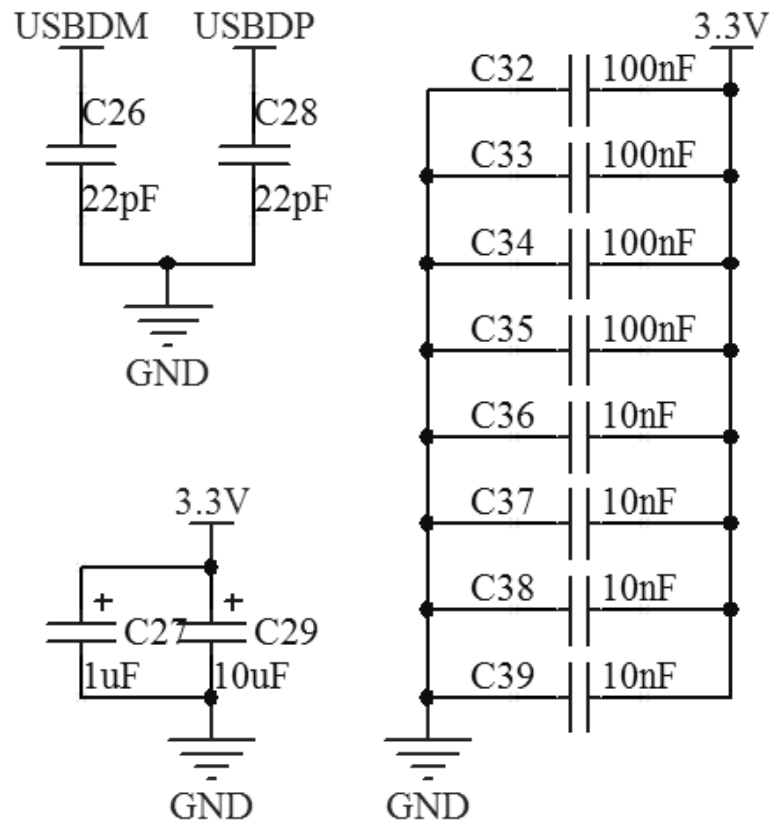


Рисунок 3.32 - Підключення роз'єднувальних конденсаторів

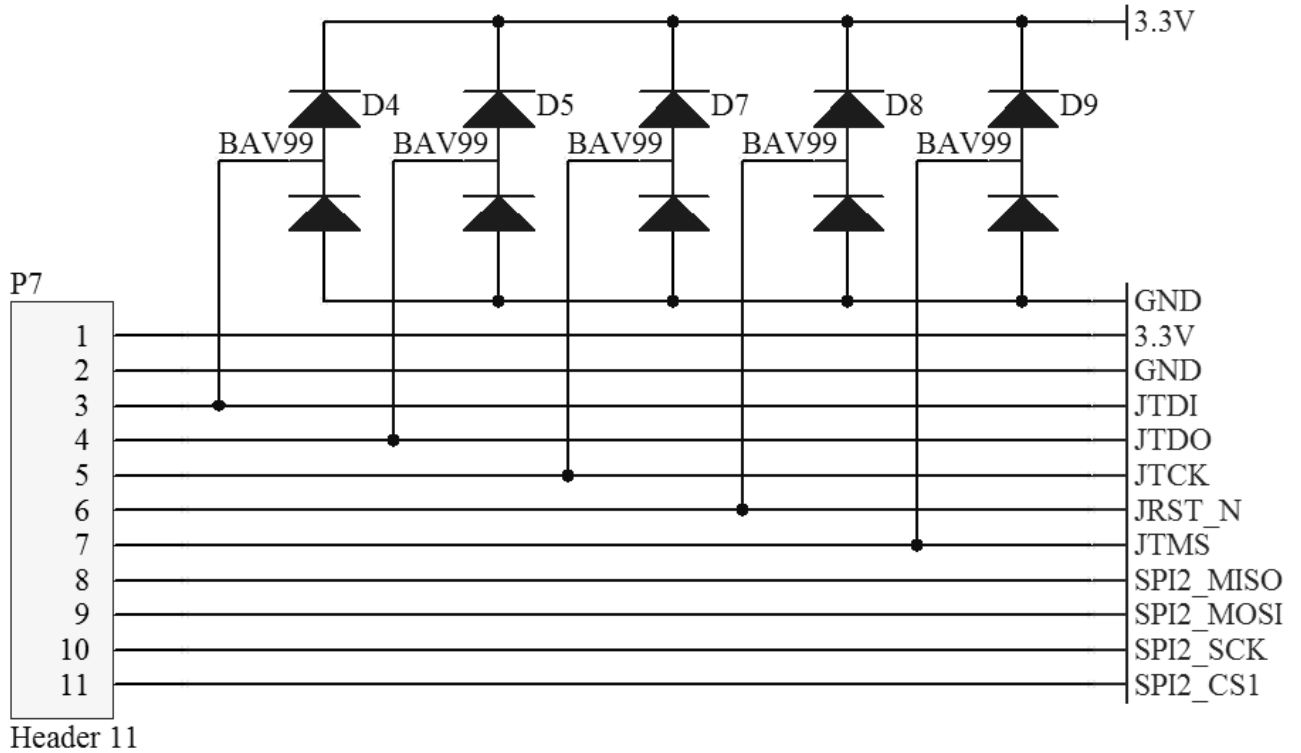


Рисунок 3.33 - Розташування контактів роз'єму JTAG

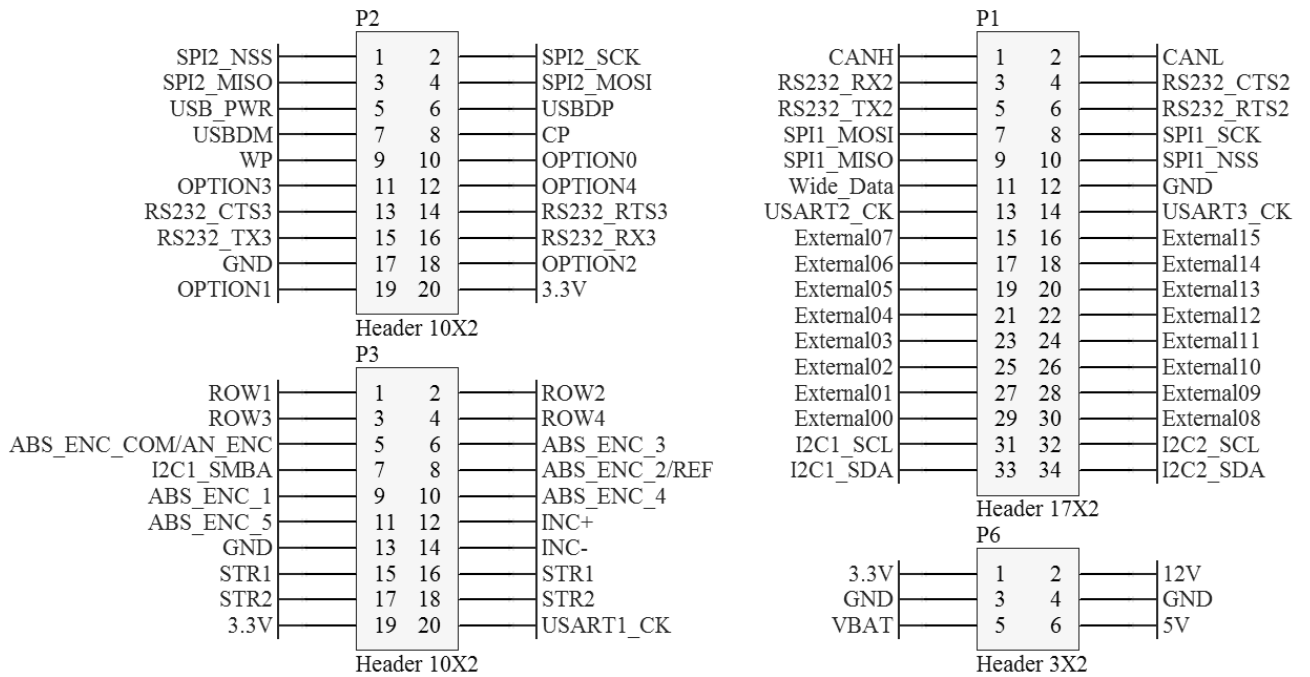


Рисунок 3.34 - Розташування контактів роз'єму IDC

Похибка при компонуванні елементів відповідно до моделі, показаній на рисунку 3.35, становить всього 0,2 мм.

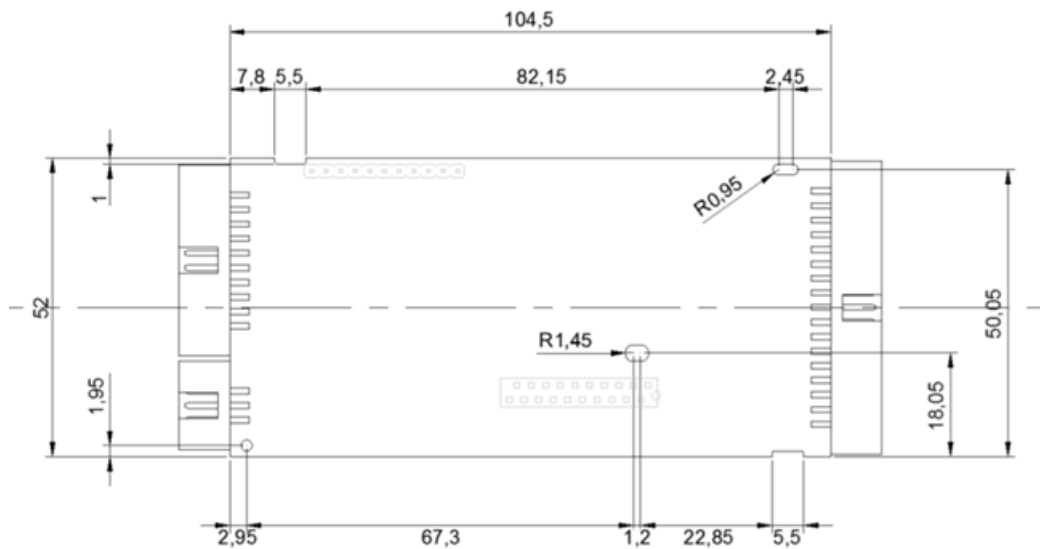


Рисунок 3.35 - Схема плати керування - розміри плати

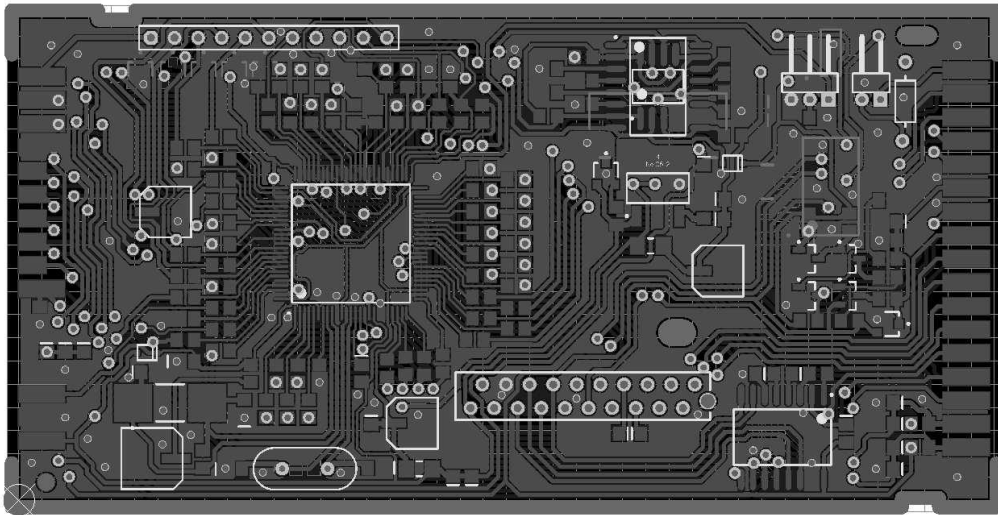


Рисунок 3.36 - Схема плати керування - CAD модель

3.5 Підключення крокового двигуна та інших елементів системи

Однією із найпростіших підсистем в АСКВ є плата керування, яка відповідає за передачу сигналів натискання на кнопку на МП при проведенні випробовування. Вся схема підключення показана на рисунку 3.36. IDC-кабель на 20 контактів поділений на п'ять роз'ємів. Роз'єми, в свою чергу, можуть бути безпосередньо підключені до різних типів кнопок на МП або механічних ручок керування.

Ця плата керування та її розміри визначаються розмірами роз'ємів (рис. 3.37). Кріплення передбачається гвинтами М3. Плата керування призначена для розміщення на передній панелі. Вона складається із SD-карти пам'яті, USB-роз'єму, роз'єму DSub-9 для RS232 і роз'єму для підключення світлодіодів стану. За допомогою цієї підсистеми відбувається передача сигналів до керуючого елемента АСКВ.

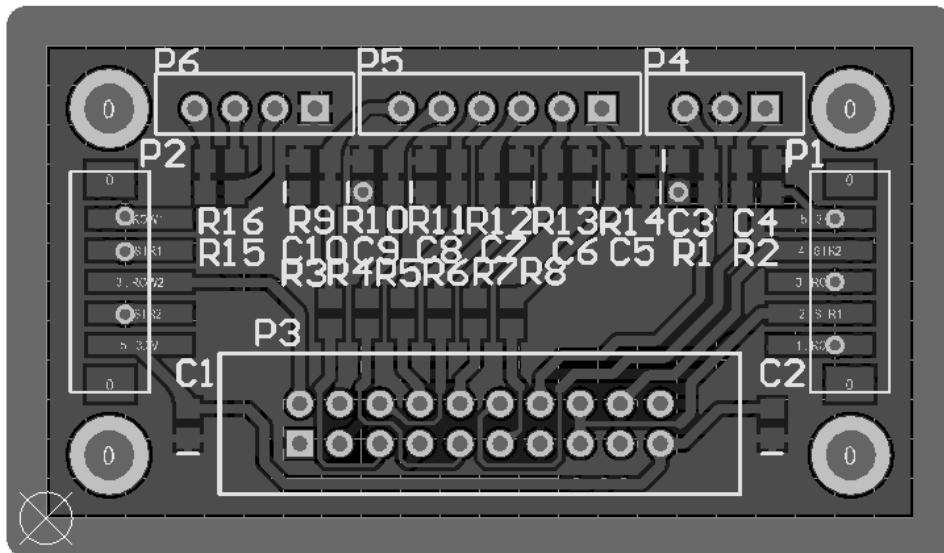


Рисунок 3.37 - Компонування плати для з'єднання

Роз'єм підключений до плати і передає сигнали до інших роз'ємів на основній платі керування (рис. 3.38). Передбачається використання SD карти пам'яті. Тримач карти має захист від запису та функцію виявлення карти. Ці дві функції можуть бути активовані за допомогою переминок (рис. 3.39).

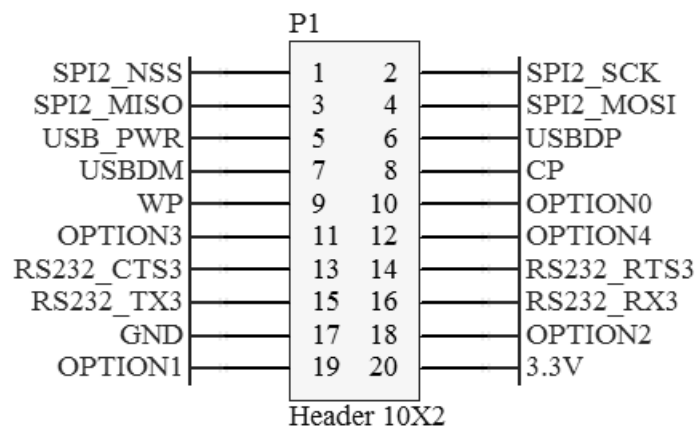


Рисунок 3.38 - Розташування виводів роз'єму передачі сигналів

Роз'єм USB має невеликий підсхему для виявлення підключення USB. Ця функція не є основною і може не використовуватись. Для таких випадків передбачена перемикачка (рис. 3.40). Також є роз'єм для світлодіода, який

світиться, якщо підключено USB. Роз'єм DSub-9 використовується для зв'язку RS232 (рис. 3.41).

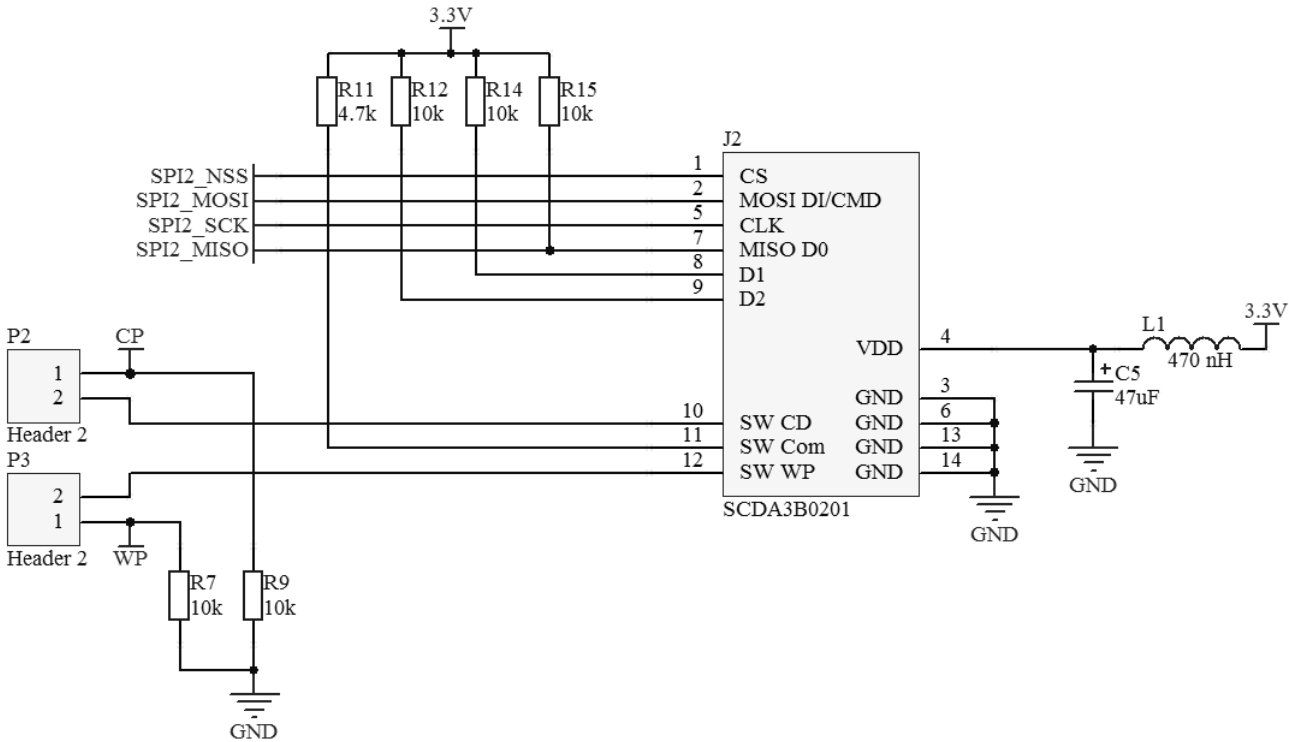


Рисунок 3.39 - Схема SD карти пам'яті

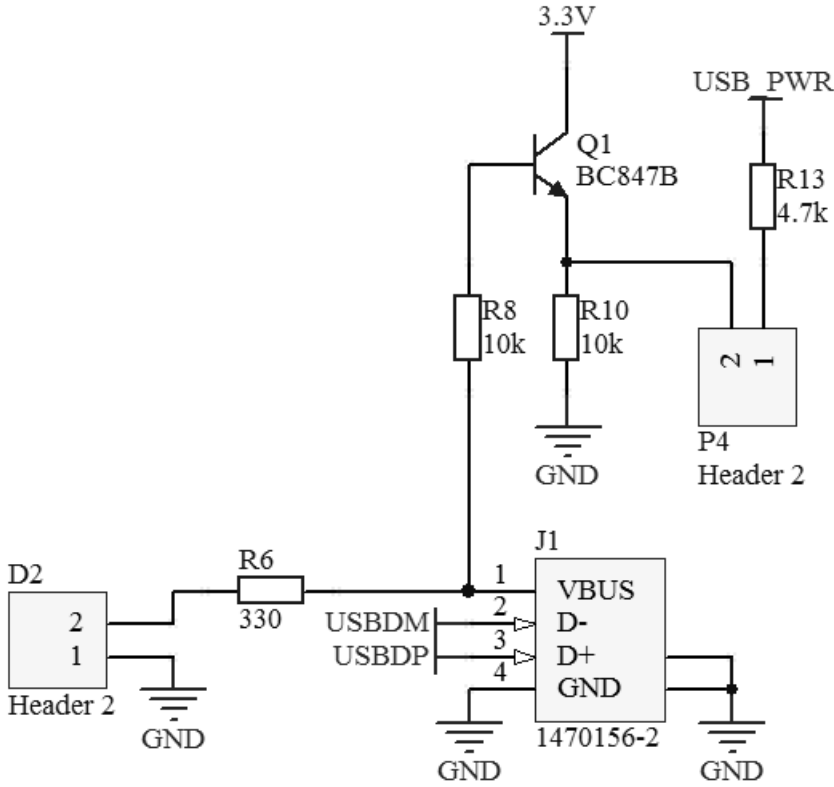


Рисунок 3.40 - Схема підключення USB

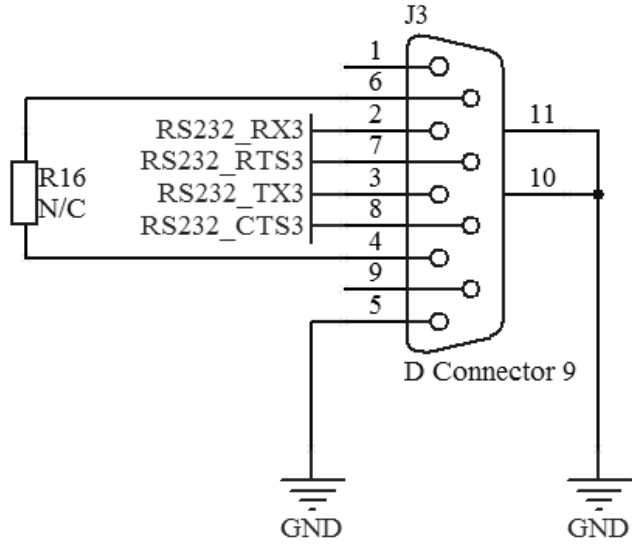


Рисунок 3.41 - Схема підключення роз'єму DSub-9

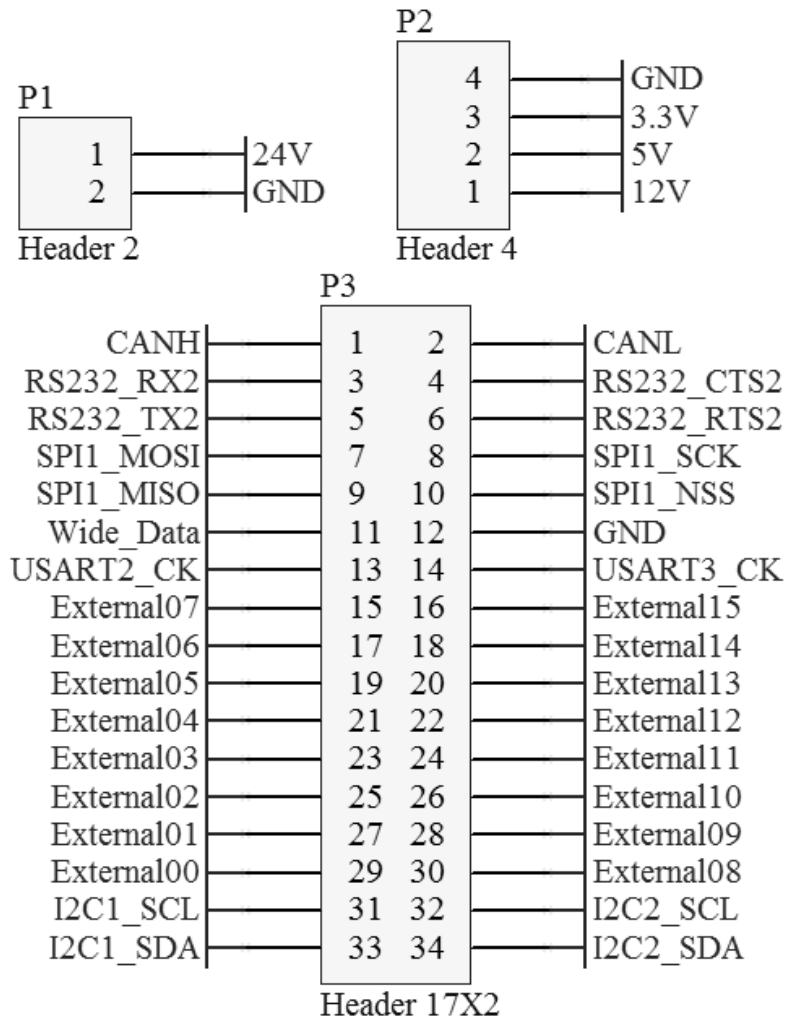


Рисунок 3.42 - Роз'єми для підключення крокового двигуна

Для забезпечення зв'язку із кроковим двигуном необхідно використовувати відповідний інтерфейс. Вхідна напруга портів вводу-виводу крокового двигуна становить 5-24 В, тому за керування кроковим двигуном відповідає плата керування для з'єднання. Тобто, в разі несправності крокового двигуна, плата керування буде захищена, оскільки передача даних відбувається через USB. Призначення роз'ємів крокового двигуна показано на рисунку 3.42.

Оскільки вихідний струм мікроконтролера досить обмежений, він не може керувати оптопарою без буферної схеми. Щоб зменшити вихідний струм виводу, він буде керувати базою звичайного біполярного транзистора (рис. 3.43).

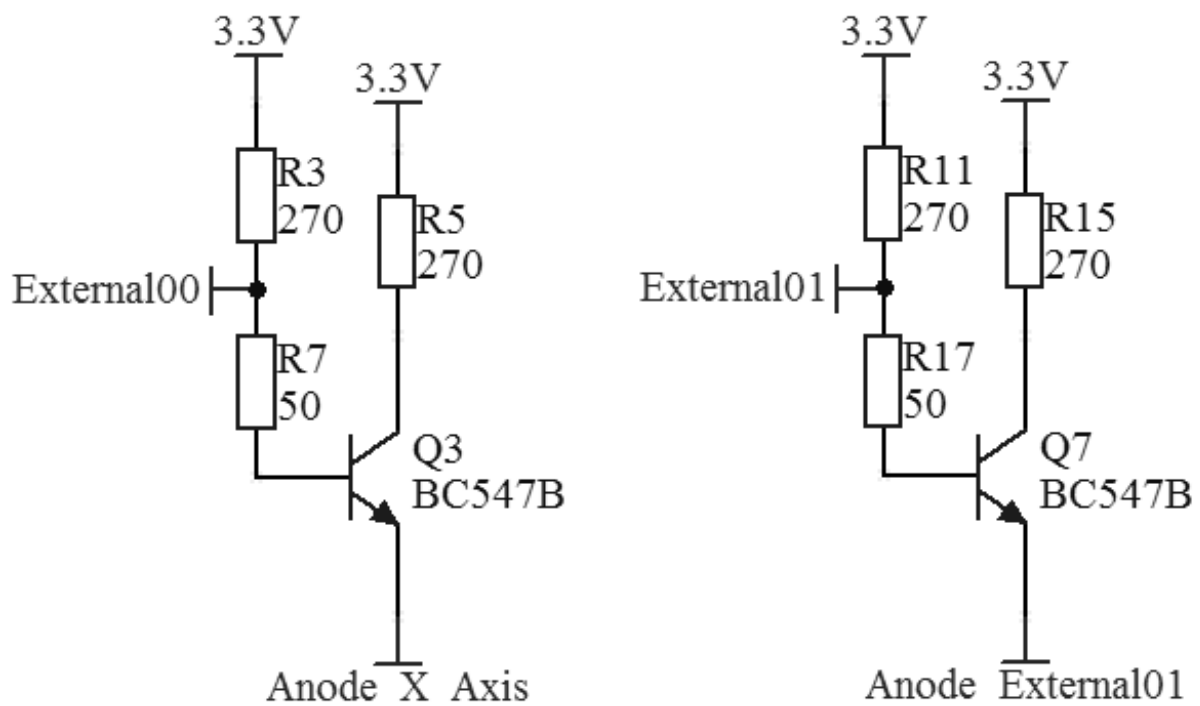


Рисунок 3.43 - Буферна схема для оптопар

Кроковий двигун по осі Y має гальмо, яке необхідно відпустити, коли машина рухається. Гальмо потужністю 10 Вт відпускається, якщо до нього підключено 24 В. Найпростіший спосіб управління гальмом - реле (рис. 3.44). Реле управляється мікроконтролером через буферну схему та оптопару.

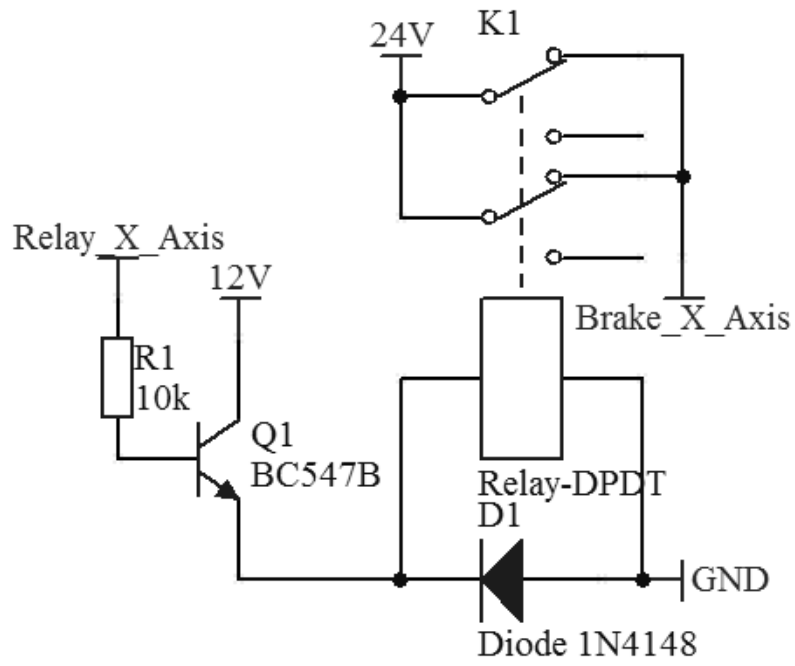


Рисунок 3.44 - Використання гальм та реле

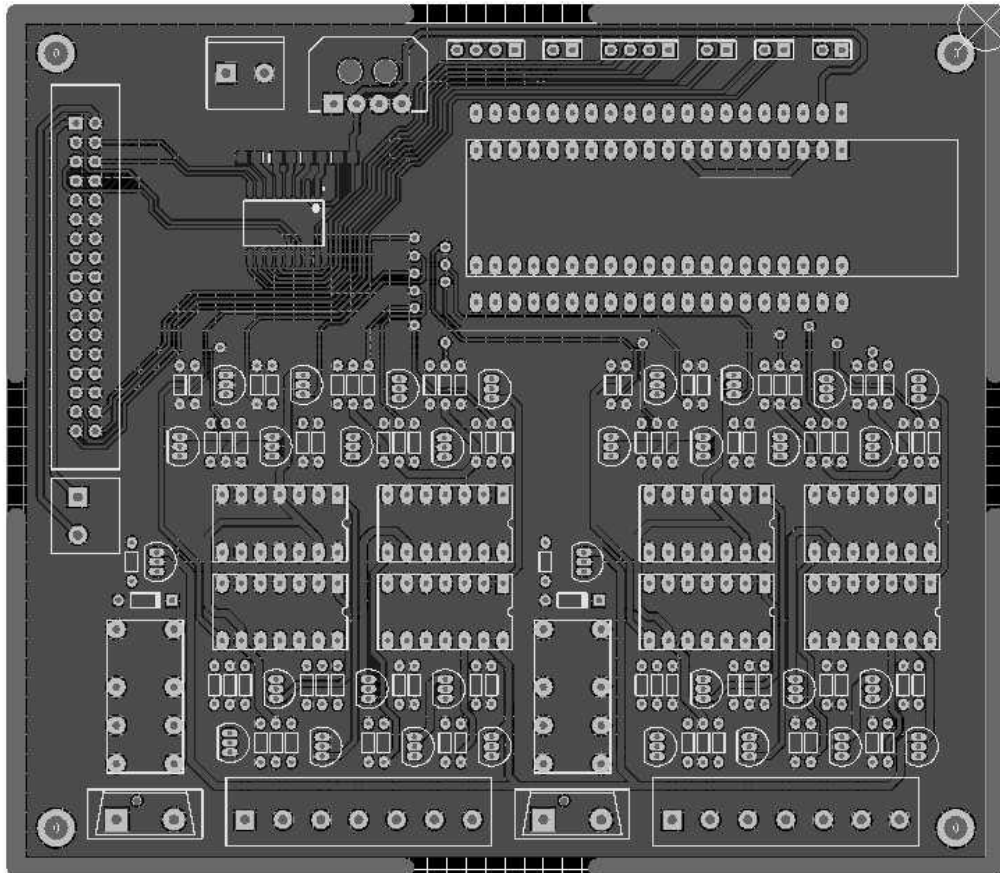
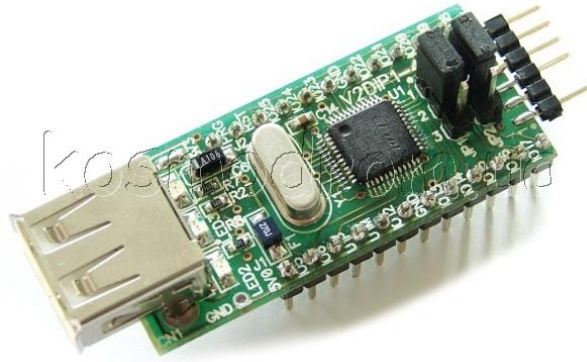
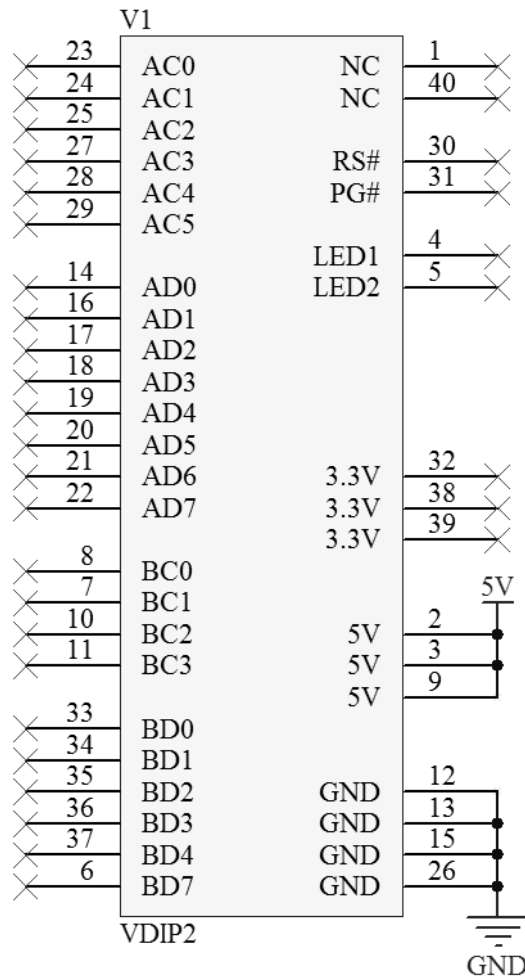


Рисунок 3.46 - Плата керування кроковим двигуном



а)



б)

Рисунок 3.45 - V2DIP1-48: а - зовнішній вигляд; б – виходи

Для зв'язку з контролером крокового двигуна використовується USB. Замість того, щоб використовувати мікроконтролер і реалізувати весь стек USB-хоста, купується готова налагоджувальна плата, яка називається V2DIP1-48

(рис. 3.45) і призначена для встановлення в 48-контактний роз'єм DIP [61]. Цей модуль базується на мікросхемі VNC2L-48, яка має 48 виходів і за його допомогою можна використовувати інтерфейси FIFO, UART, SPI. Розміщення вищезазначених компонентів на платі керування наведено на рисунку 3.46.

3.6 Висновки до третього розділу

В третьому розділі було виконано підбір обладнання для автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей. До основного обладнання відносяться камера, для відслідковування процесу випробовування в режимі реального часу, комп'ютер, який виступає основним елементом керування всією системою, напрямні на ремінній передачі.

В якості мікроконтролера було обрано STM32F103VBT6, а також розроблено схеми живлення від джерела, які потребують використання трьох понижувачів напруги, а саме 24/12 В, 24/5 В та 24/3,3 В. Для живлення системи та підключення інших компонентів, таких як плати керування додатковими підсистемами, було розроблено електричні схеми підключення.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИМ ПРОЦЕСОМ КОНТРОЛЮ ТА ВИПРОБОВУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ

4.1 Протоколи передачі даних в системі автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильових печей

Для керування АСКВ було розроблено відповідне програмне забезпечення, яке базується на стані роботи машини для проведення випробовувань та її можливих станах. До цих станів відноситься в першу чергу ініціалізація, який активується при запуску мікроконтролера [62]. На рисунку 4.1 цей стан позначений як вхідний.

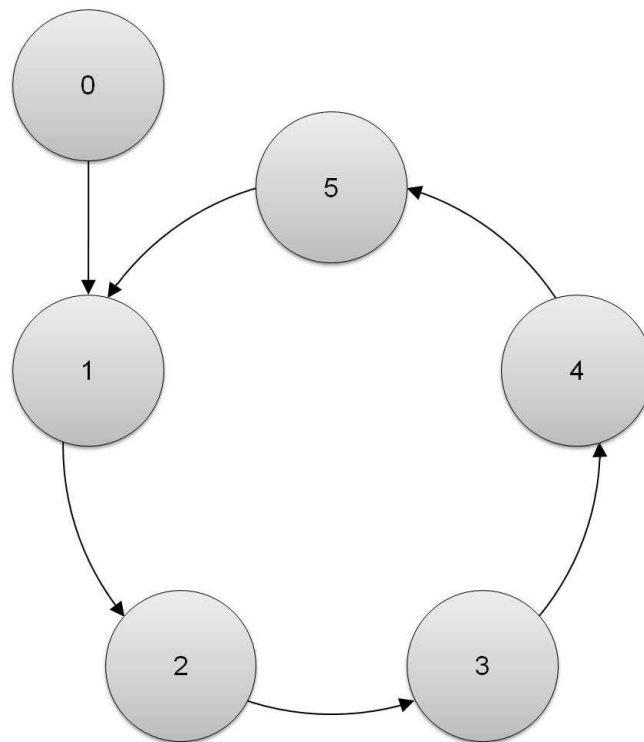


Рисунок 4.1 - Етапи роботи програмного забезпечення

Після ініціалізації ПЗ переходить до виклику різних функцій [63]. Під час переходу між станами запускається таймер на 5 мс і, при досягненні цього часу,

відбувається перехід до наступного стану. Тобто, час циклу становить в загальному 25 мс (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Перехід між станами системи

Стан	Тип	Опис
0	Ініціалізація	Запуск модулів системи
1	Стан 1	Виконання завдань в проміжок часу від 0 до 5 мс
2	Стан 2	Виконання завдань в проміжок часу від 5 до 10 мс
3	Стан 3	Виконання завдань в проміжок часу від 10 до 15 мс
4	Стан 4	Виконання завдань в проміжок часу від 15 до 20 мс
5	Стан 5	Виконання завдань в проміжок часу від 20 до 25 мс

Для передачі даних з керуючого елемента АСКВ до контролера крокового двигуна передбачено використання USB хоста. За допомогою попередньо визначених команд контролер переходить у різні режими, такі як запуск двигуна або повернення параметрів. На звичайному комп'ютері це зробити досить просто, оскільки комп'ютер емулює контролер крокового двигуна як віртуальний СОМ-порт.

Апаратне забезпечення драйвера крокового двигуна підтримує USB-хост, але цей хост потрібно перепрограмувати, щоб він працював. Іншим рішенням є визначення послідовного протоколу, і за допомогою входних та вихідних контактів керуючого елемента АСКВ може зв'язуватися з драйвером крокового двигуна [64]. Драйвер крокового двигуна підтримує JVM (Java Virtual Machine), що дозволяє користувачеві визначати функціональність за допомогою мови програмування Java [65]. Реалізація основного коду виконується в керуючому елементі АСКВ, а підлеглий код розроблений в Java для керування роботою кроковим двигуном.

Драйвер крокового двигуна має обмеження щодо універсальних входів/виходів. Всього є шість цифрових входів, один аналоговий вхід і три виходи. Це може бути проблемою, якщо потрібно використовувати протокол

паралельної комунікації. В принципі, для цього протоколу паралельної комунікації буде доступно два входи, оскільки інші входи будуть зайняті іншими сигналами. Наприклад, кінцевими вимикачами, сигналом запуску та сигналом аварійної зупинки. Єдиним розумним рішенням цієї проблеми буде використання двопровідного послідовного протоколу комунікації.

Для базової функціональності послідовний протокол складатиметься з двох проводів, тактового генератора та даних. За допомогою цього можлива передача даних в одному напрямку, через обмеження в крокових драйверах, оскільки напрямок вводу/виводу є статичним для вводу або виводу.

Якщо протокол повинен мати характеристики мультимаїстра, напрямок портів вводу-виводу потрібно змінити, щоб мати якесь уявлення про тактовий сигнал. Обидва пристрої будуть слухати тактовий сигнал, іншими словами, порти потрібно буде налаштувати як вхідні. Обидва пристрої зможуть ініціювати зв'язок, встановивши напрямок вводу-виводу на вихід і перехопивши тактовий сигнал, і це стане своєрідним послідовним протоколом мультимаїстра [66].

Але в цьому випадку, оскільки напрямок вводу-виводу є фіксованим, протокол потрібно змінити відповідно. Знову ж таки, метою не є протокол з декількома майстрами, тому майстер повинен збирати потрібні дані з додаткової лінії даних у зворотному напрямку, від веденого до ведучого. Майстер все ще обробляє тактовий сигнал, але замість відправлення він отримує дані.

За допомогою цього трипровідного послідовного протоколу дані можуть передаватися в обох напрямках [67]. Але головний пристрій не знатиме, чи отримав підлеглий пристрій правильні дані і чи перебуває він у бажаному стані. Наприклад, якщо головний пристрій надсилає стартовий сигнал, він не знає, чи відповів підлеглий пристрій і чи чекає на отримання подальших даних. У деяких протоколах, переважно у двопровідних послідовних протоколах, передбачається, що дані отримано.

Але в цьому протоколі це не передбачається з тієї простої причини, що немає вимог, щоб протокол використовував тільки три дроти. Оскільки є три

цифрових виходи, головний пристрій може зчитувати вісім різних станів. Використовуючи це як стан машини, головний пристрій може визначити, чи знаходиться підлеглий пристрій у правильному стані. І вжити заходів, якщо це не так. Це означає, що протокол підтримуватиме обробку помилок.

Якщо один з цих восьми станів (табл. 4.2) вказує, що ведений пристрій обробив один біт даних у послідовному потоці даних і готовий до прийому наступного біта, це можна використовувати для визначення частоти тактового сигналу. Це означатиме, що після кожного отриманого біта відбуватиметься своєрідне узгодження, а швидкість передачі даних визначатиметься швидкістю відповіді пристрою. Таким чином, швидкість передачі даних завжди буде максимальною для кожного моменту, оскільки затримка до відповіді пристрою може відрізнятись залежно від навантаження на пристрій.

Таблиця 4.2 - Визначення станів роботи системи

Вихід	Пін 1	Пін 2	Пін 3
Ідеальний стан	0	0	0
Виконання завдінь	1	0	0
Передача даних	0	1	0
Готовність до отримання даних	1	1	0
Перегрів системи	0	0	1
Вимикач помилки	1	0	1
Вимикач помилки в початковому стані	0	1	1
Помилка	1	1	1

Щоб ще більше спростити алгоритм, зв'язок буде здійснюватися тільки від головного пристрою до одного підлеглого. Таким чином, не буде необхідності в будь-якому типі адресації підлеглого. Конфігурація входів/виходів крокового двигуна наведена в таблиці 4.3.

Візуалізація протоколу наведена на рисунку 4.2. У режимі передачі даних головний пристрій повинен повідомити підлеглий пристрій про те, що він збирається надіслати дані. Це здійснюється за допомогою тактового сигналу. У режимі очікування тактовий сигнал має низький рівень, а після переходу тактового сигналу у високий рівень починається передача даних.

Таблиця 4.3 - Опис вхідних контактів

Вхідний контакт	Ідентифікація сигналу
1	Послідовний тактовий сигнал
2	Послідовні дані
3	Скидання системи / Аварійна зупинка
4	Запуск
5	Кінцевий вимикач
6	Кінцевий вимикач у початковому стані

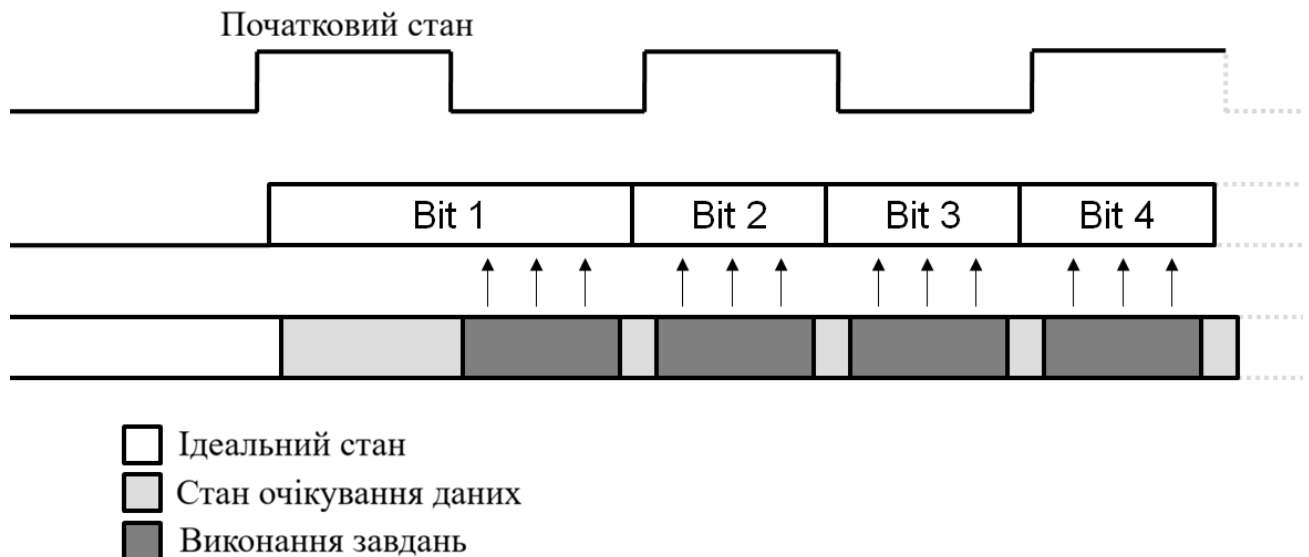


Рисунок 4.2 - Візуалізація протоколу передачі даних

Ведений пристрій кілька разів зчитує біт даних, щоб визначити, чи є цей біт 0 або 1. Це робиться в режимі виконання завдань, і коли ведений пристрій

готовий до прийому наступного біта даних, він переходить у стан готовності до прийому даних.

У режимі прийому майстер повинен попросити ведений пристрій надіслати дані. Тому майстер почне з надсилання веденому пристрою команди, яка спонукає його надіслати запитовані дані. Синхронізація прийому даних виконується майстром, як це показано на рисунку 4.3.

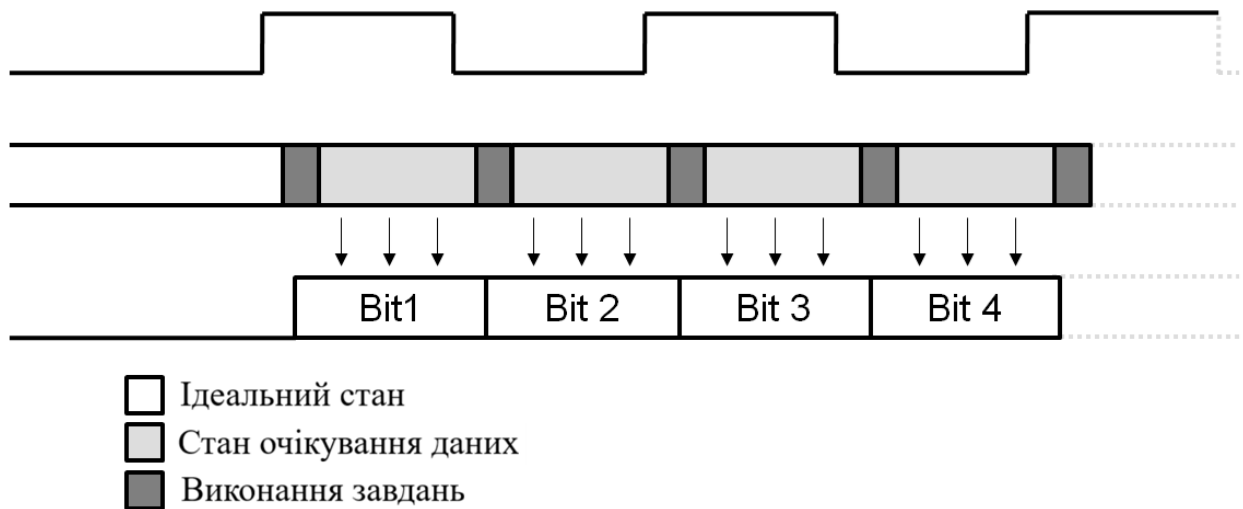


Рисунок 4.3 - Отримання даних

Для реалізації цього послідовного зв'язку дані повинні надсилатися за певним шаблоном. Перший набір даних - це інструкція, яка повідомляє веденому пристрою, що робити далі. Якщо машині буде дано команду переміститися в інше положення, потік даних розпочнеться з інструкції, яка повідомляє веденому пристрою, що наступні дані будуть швидкістю переміщення та положенням (рис. 4.4).

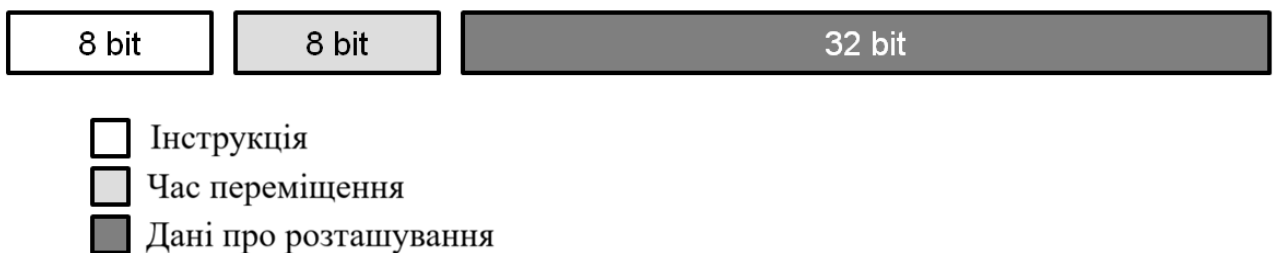


Рисунок 4.4 - Послідовний потік даних

Швидкість переміщення розраховується таким чином, щоб обидві осі одночасно досягли пункту призначення, незалежно від останнього положення. Для цього визначається, яка вісь має найбільшу відстань до нового положення, потім швидкість цієї осі встановлюється на 100 % від максимальної швидкості, а потім розраховується відсоток відстані іншої осі. Наприклад, якщо відстань становить половину відстані іншої осі, швидкість встановлюється на 50 %.

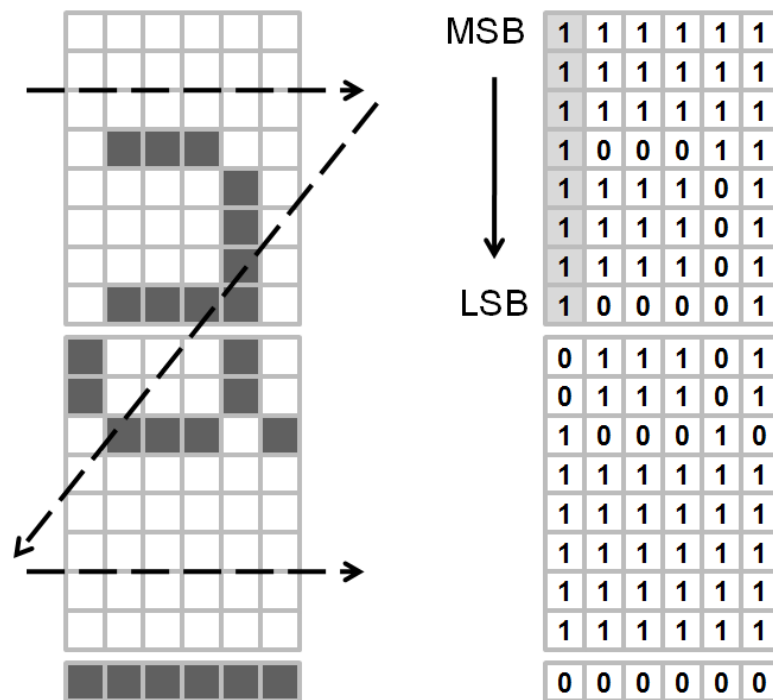


Рисунок 4.5 - Декодування зображення

Під час прототипування шрифти зберігаються в мікроконтролері, а не програмуються у зовнішній пам'яті. Шрифти для відображення тексту на екрані потрібно генерувати, а не кодувати вручну, оскільки це займе багато часу. Простим рішенням є зберігання шрифтів у монохромному растровому зображенні, імпорт зображення в MATLAB [68], декодування зображення за певним шаблоном і генерація вихідного коду, готового до компіляції. Токени записуються в Notepad відповідно до таблиці ASCII, тому кожен токен відповідає своєму ASCII-значенню.

Потім текст зберігається як зображення, відкривається в MS-Paint і змінюється його розмір. Висота зображення становить 17 пікселів, де нижній ряд пікселів визначає ширину кожного токена.

В подальшому виконується декодування зображення (рис. 4.5). Кожен стовпець має висоту 8 пікселів. Стовпець буде відповідати значенню байта, де чорний піксель дорівнює 0, а білий піксель дорівнює 1. Нижній піксель є найменш значущим бітом. Скрипт для MATLAB наведено в додатку А. На рисунку 4.7 зображено результати успішної генерації шрифтів за допомогою MATLAB.



Рисунок 4.6 - Генерація шрифтів на екрані

Був реалізований протокол послідовної передачі даних як для керуючої програми, так і для керування роботою кроковим двигуном. При перевірці протоколу передачі даних в роботі пристроях не виникло проблем. Хоча реалізація була успішною, осцилограф для перевірки виявив, що послідовний протокол мав недолік, а саме занадто низьку швидкість передачі даних (рис. 4.7).

Сигнал 1 на осцилографі є тактовим, а інші три сигнали вказують на стан драйвера крокового двигуна. Оскільки біти даних синхронізуються як на передньому, так і на задньому фронті, виміряна швидкість передачі даних

становить приблизно 50 Гц. Пакет даних має розмір 48 бітів, що означає, що для передачі всіх даних потрібно приблизно одна секунда.

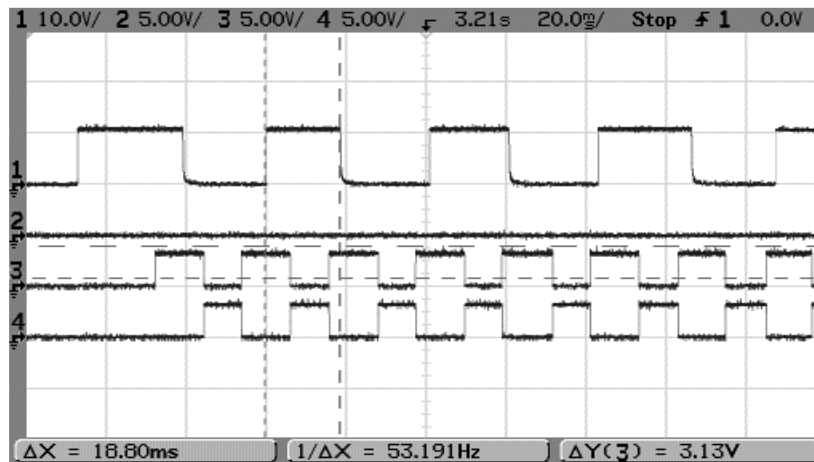


Рисунок 4.7 - Результати перевірки на осцилографі

Специфікація не була повністю розроблена, оскільки ідея послідовної комунікації довелося відмовитися через занадто низьку швидкість передачі даних. Завдяки оптимізації коду швидкість передачі даних досягла 50 Гц, але цього було недостатньо для подальшої розробки протоколу. Неможливо визначити, якою буде адаптивна швидкість передачі даних, оскільки технічні характеристики драйвера крокового двигуна досить обмежені.

Натомість, щоб мати можливість керувати драйверами крокового двигуна за допомогою керуючої програми, сигнали довелося направляти через комп'ютер. Коли драйвер крокового двигуна підключений до комп'ютера через USB, комп'ютер розпізнає драйвер крокового двигуна як віртуальний COM-порт, що дає можливість спілкуватися з драйвером, наприклад, за допомогою гіпертерміналу. Керуючий елементи надсилає дані через RS232 до комп'ютера, а потім програма перенаправляє інформацію до двох віртуальних COM-портів, що відповідають двом драйверам крокового двигуна.

4.2 Розроблення прототипів складових автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей

Для функціонування автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей було розроблено та вдосконалено вже існуючі плати керування живленням (рис. 4.8). Ця плата керування живленням покрита спеціальним шаром захисного розчину, призначеного для захисту міді від окислення. Конструкція плати керування живленням досить проста, що робить травлення досить простим процесом.

На рисунку 4.8 зображена плата керування живленням без перетворювачів напруги. На наступному етапі було перевірено плату за допомогою універсального мультиметру та припаяні перетворювачі напруги (рис. 4.9). Після цього була проведена перевірка на напругу, результати якої були успішними.

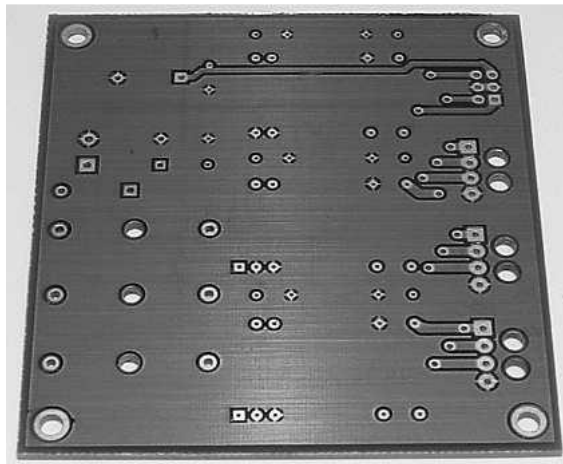


Рисунок 4.8 - Плата керування живленням

Аналогічним чином була виготовлена плата керування основним керуючим елементом АСКВ, яка показана на рисунку 4.10. Вона також була перевірена мультиметром і додані відповідні компоненти (рис. 4.11). Також в АСКВ використовуються три окремі периферійні системи (рис. 4.12).

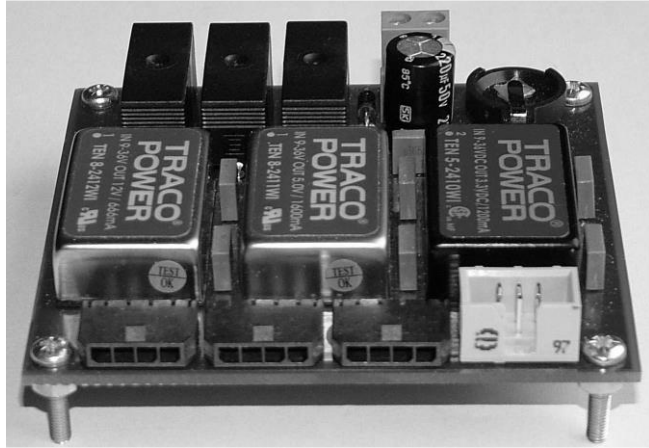


Рисунок 4.9 - Плата керування живленням із перетворювачами напруги

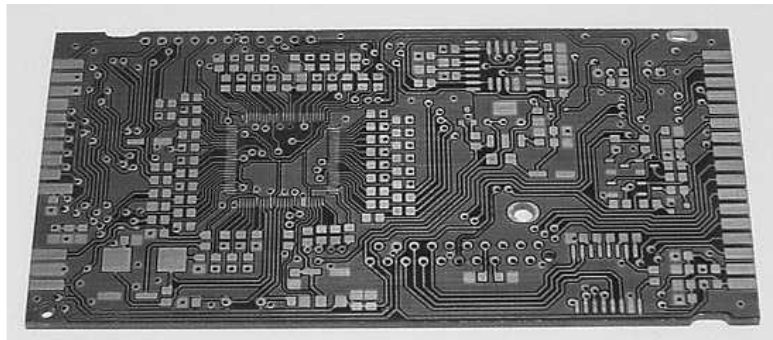


Рисунок 4.10 - Основна плата керування АСКВ

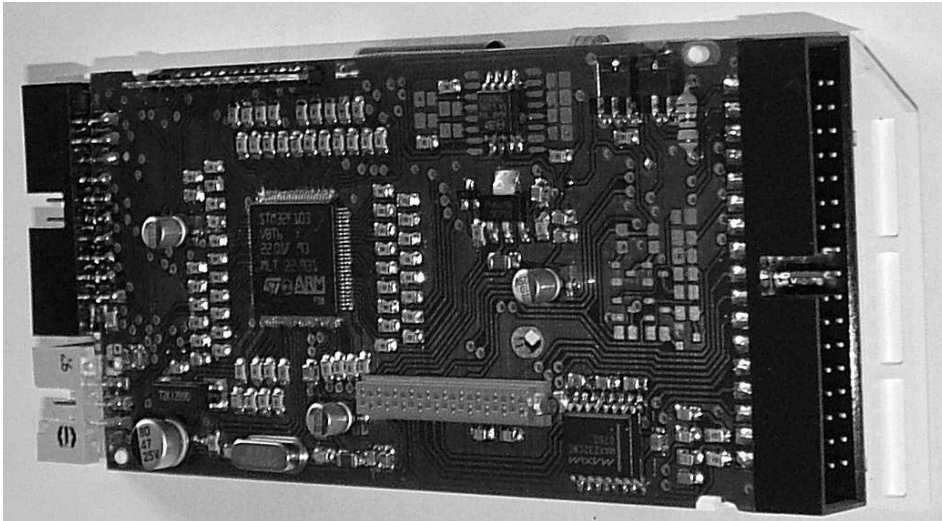
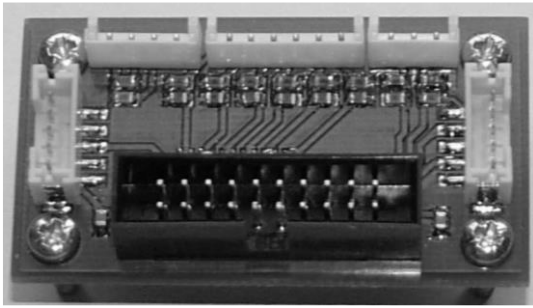
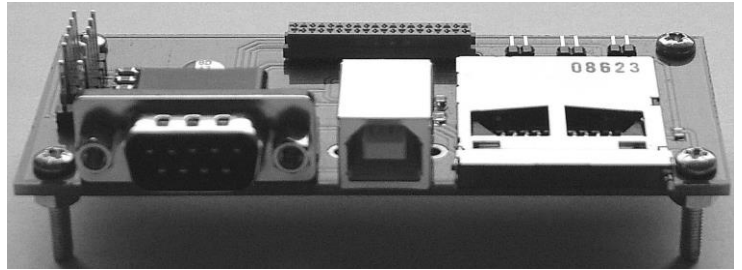


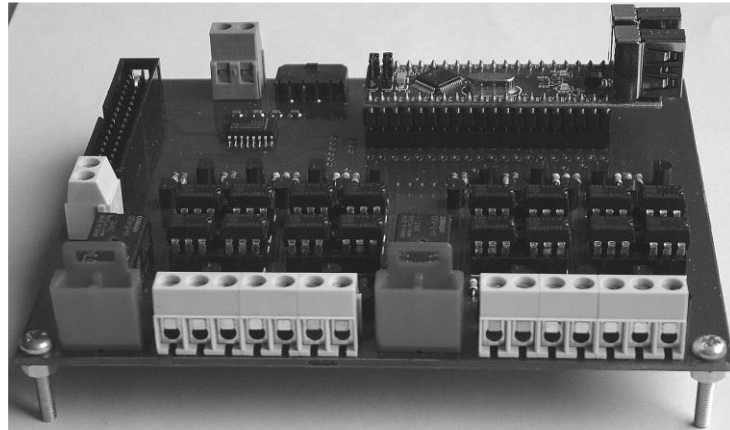
Рисунок 4.11 - Основна плата керування зі всіма компонентами



а)



б)



в)

Рисунок 4.12 - Периферійні елементи АСКВ: а - з'єднувач; б - елемент для передачі сигналів; в - плата керування кроковим двигуном

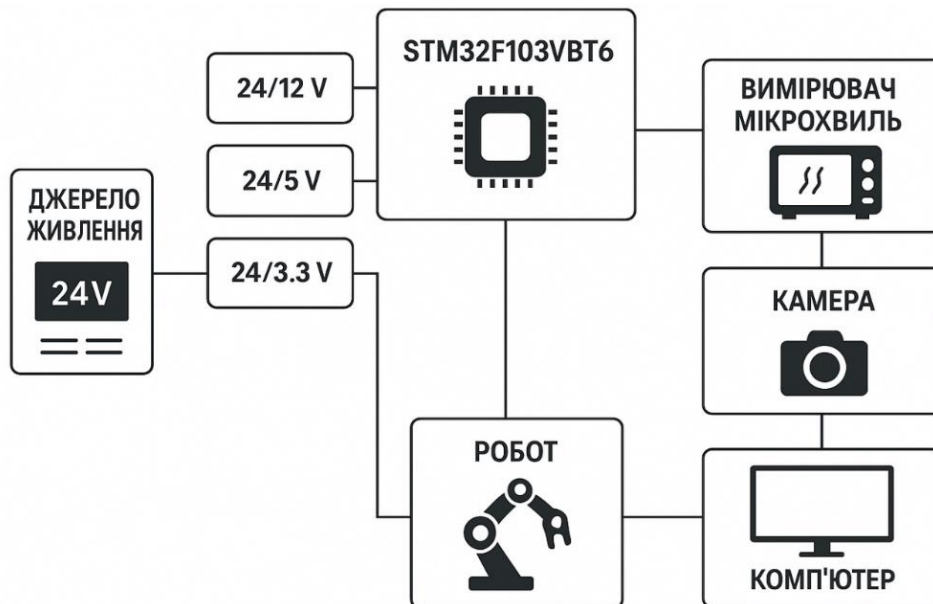


Рисунок 4.13 - Функціональна схема АСКВ

4.3 Розроблення експериментального стану автоматизованого процесу контролю та випробовування мікрохвильових печей

Для проведення контролю та випробовування мікрохвильових печей був розроблений експериментальний стенд (рис. 4.14) із лінійними напрямними. Стенд має дві полиці, МП розміщується на верхній із них. Нижня використовується для розміщення обладнання.

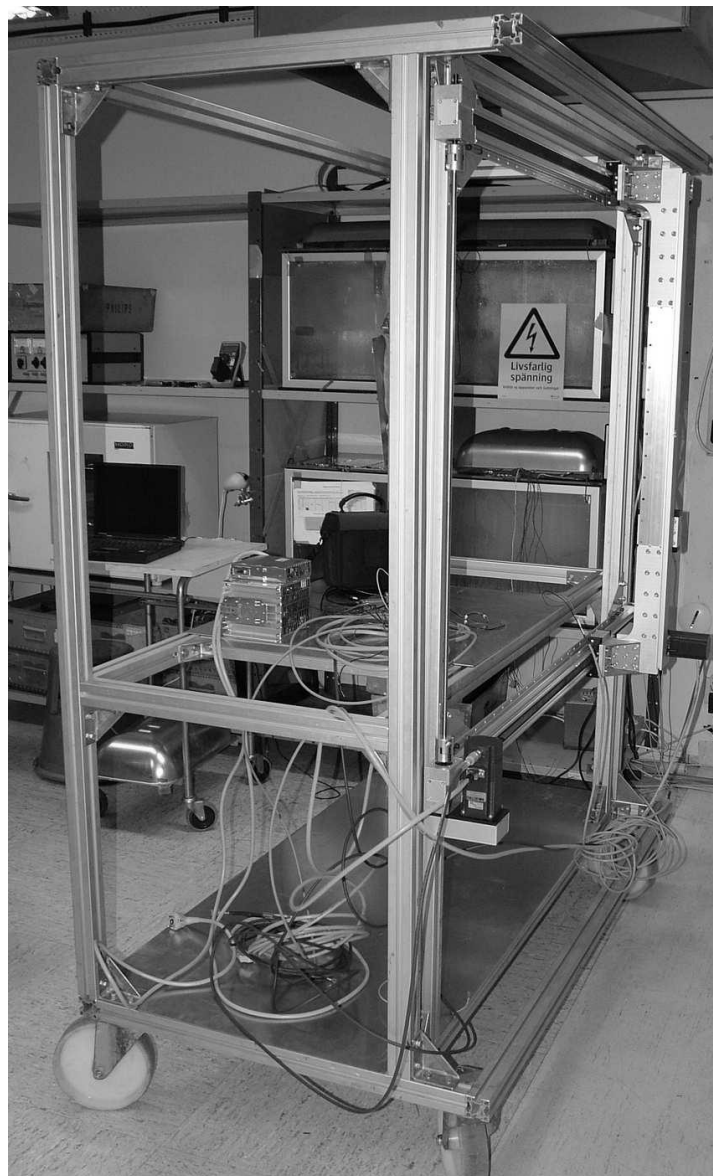


Рисунок 4.14 - Експериментальний стенд для автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильових печей

Таблиця 4.4 - Підключення кабелів АСКВ

Колір кабелю	Опис
Жовтий	Сигнал від кінцевого вимикача, найвіддаленішого від двигуна
Білий	Сигнал від кінцевого вимикача, найближчого до двигуна
Чорний	Земля
Червоний	Джерело живлення 24 В

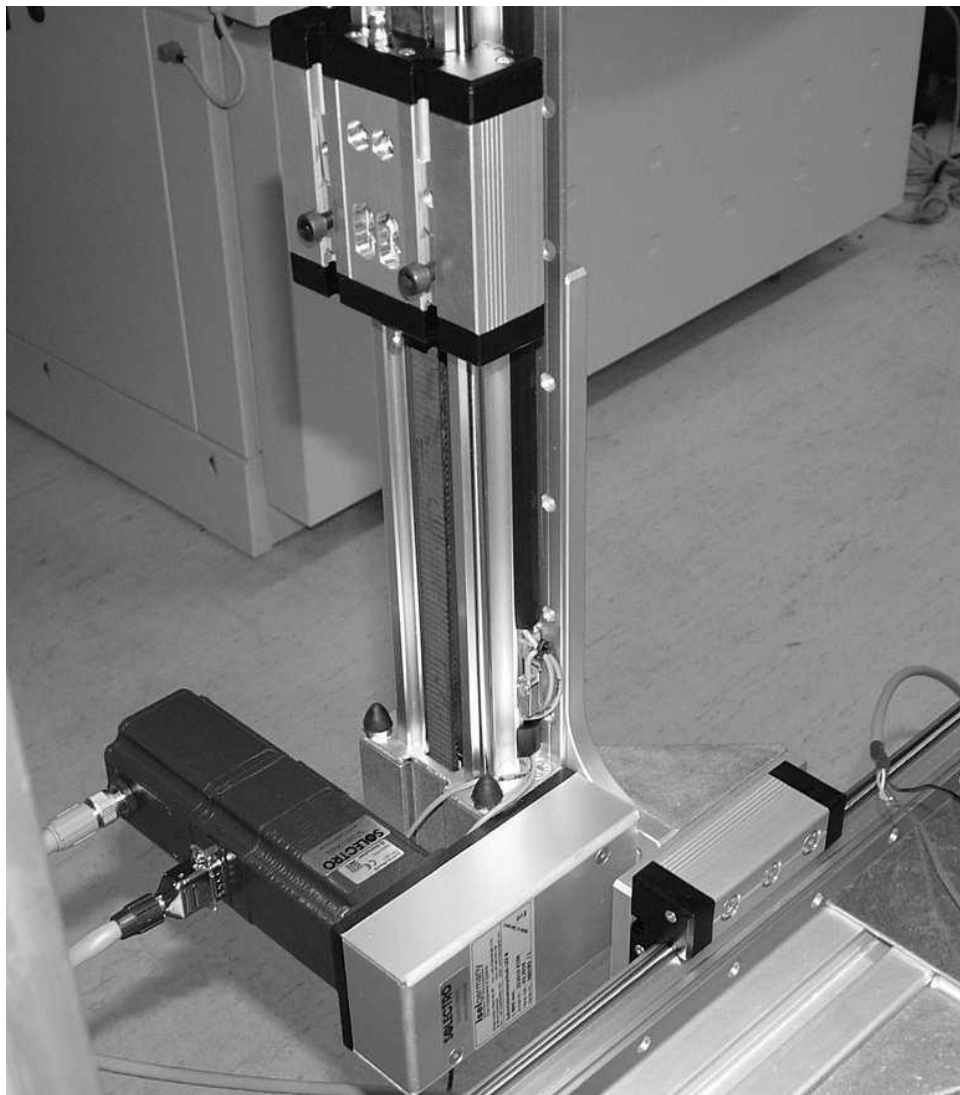
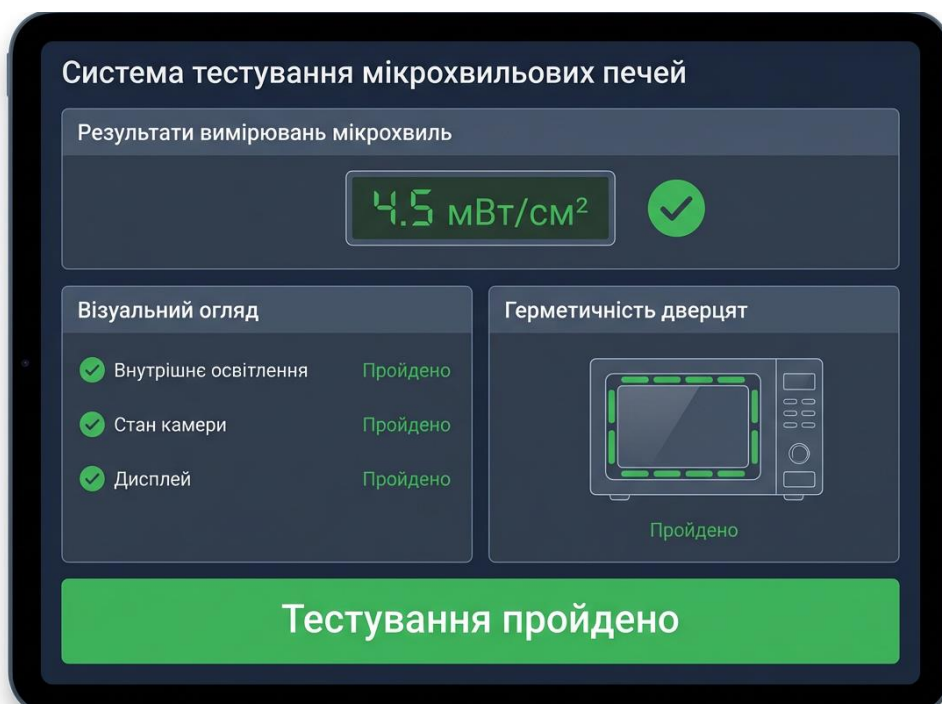


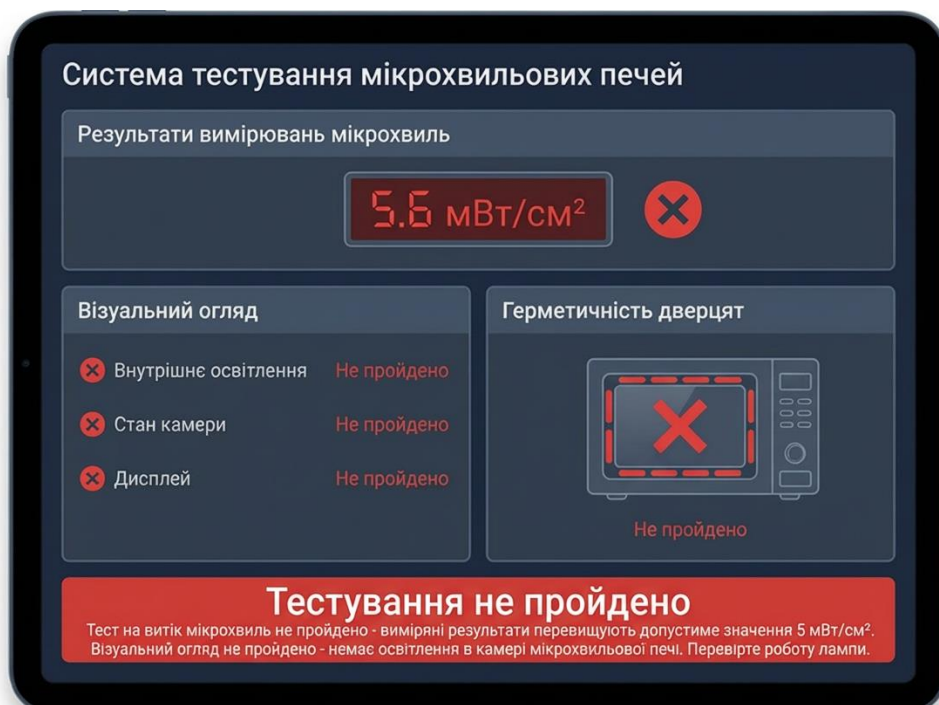
Рисунок 4.15 - Лінійна напрямна

Оскільки кінцевий вимикач використовується як опорна точка кінцевого положення, він також визначає початок координат. Сигнальний кабель від кінцевого вимикача, який визначає початок координат, повинен бути

підключений до входу 6 на драйвері крокового двигуна. Підключення кабелів наведено у таблиці 4.4.



а)



б)

Рисунок 4.16 - Результати проведення випробовувань мікрохвильової печі: а - успішне тестування; б - тестування не пройдено

Було проведено тестування стенду за допомогою розробленої програми. Блок, призначений для натискання кнопок на МП, кріпиться до лінійної напрямної по осі Y (рис. 4.15).

Для роботи із експериментальним стендом було розроблено програму (рис. 4.16), яка відображає результати вимірювань мікрохвиль та результати перевірки щільності замикання дверей МП та результати проходження візуального огляду.

Також в програмі існує можливість перегляду результатів останнього випробовування МП на головному екрані (рис. 4.17).

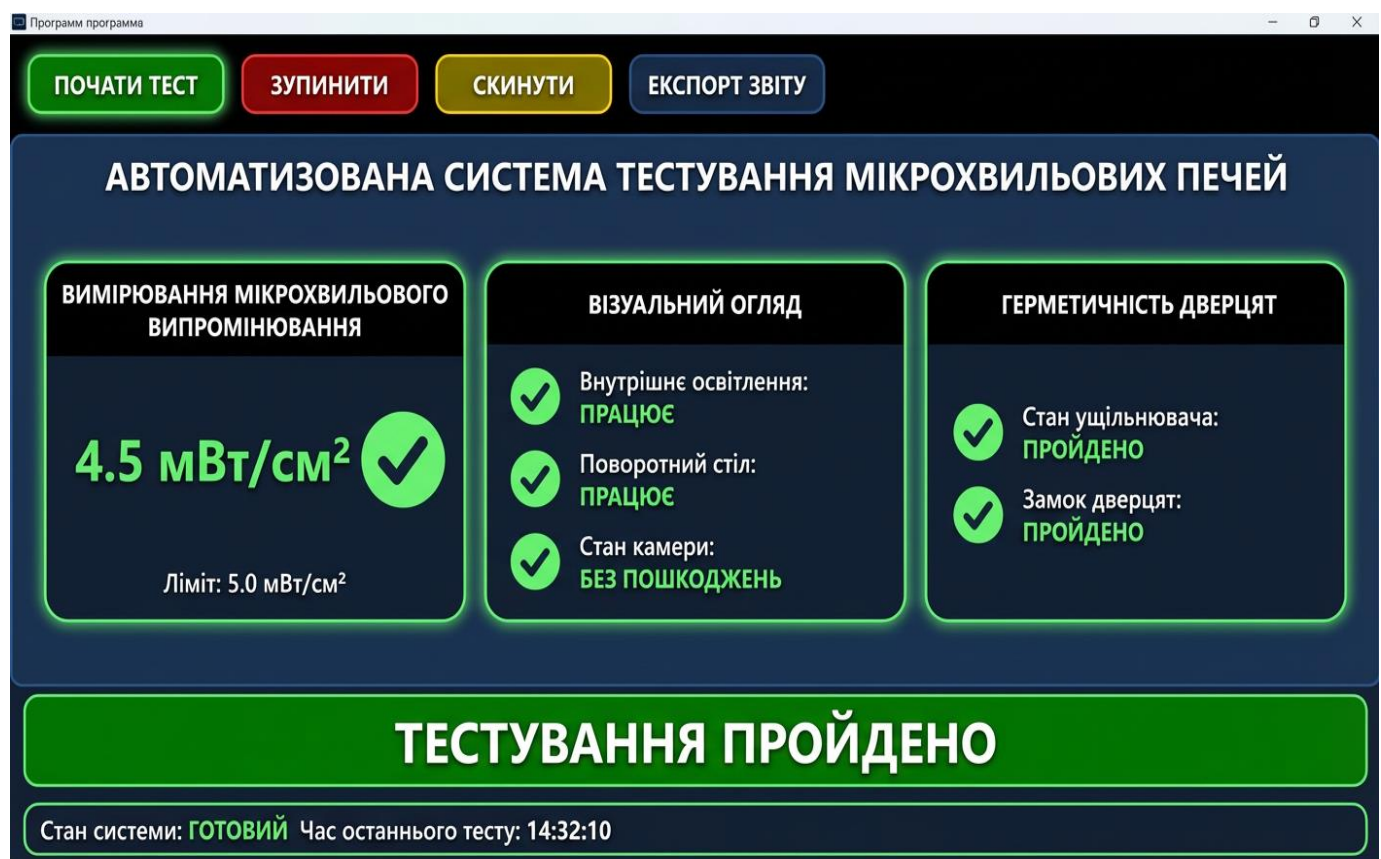


Рисунок 4.17 - Перегляд результатів останніх випробовувань

4.4 Висновки до четвертого розділу

В четвертому розділі виконано дослідження методу керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей.

Було описано та перевірено передачу даних по протоколам в рамках функціонування розробленої автоматизованої системи.

Також було виготовлено плати керування для основного керуючого елемента автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей та розроблено відповідні прототипи. Наостанок, було виготовлено експериментальний стенд для проведення досліджень мікрохвильових печей. Крім того, в розділі наведено програму для проведення контролю та випробовування мікрохвильових печей за допомогою розробленої системи.

ВИСНОВКИ

В першому розділі було виконано огляд та аналіз існуючих конструкцій мікрохвильових печей та їх класифікацію. На основі такого огляду було встановлено, що в автоматизованій системі контролю та випробовування мікрохвильових печей обов'язково необхідно передбачити наявність модулю, який би отримував інформацію про модель мікрохвильової печі, яка буде випробовуватись в системі.

Крім того, було наведено види контролю та методи випробовування мікрохвильових печей. Проведений аналіз стандартів безпеки в Україні, Європі та США дозволив визначити основні етапи випробовувань та результати, яким повинна відповідати мікрохвильова піч. Також в розділі наведені підходи до вирішення задачі автоматизованого випробовування мікрохвильових печей.

В другому розділі проведено математичне моделювання автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей. Оскільки основною задачею мікрохвильової печі є нагрівання їжі, то для побудови математичної моделі за основу було взято процес нагрівання їжі в камері мікрохвильової печі. Було виконано математичне моделювання нагрівання їжі на основі теорії електричних кіл, теоретичних основ електротехніки.

Отримана математична модель була перевірена із реальними експериментальними даними щодо питомої потужності та нагрівання трьох продуктів харчування у мікрохвильовій печі - м'яса, агар-агару та хліба. Хоча наявні невеликі відхилення даних за математичною моделлю від експериментальних досліджень, вони незначні і ними можна знехтувати.

Також було виконано математичне моделювання понижувального трансформатора мікрохвильової печі, оскільки саме він відповідає за передачу необхідної напруги на магнетрон, а магнетрон виступає нагрівальним елементом мікрохвильової печі для розігріву харчових продуктів.

В третьому розділі було виконано підбір обладнання для автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей. До основного обладнання відносяться камера, для відслідковування процесу випробовування в режимі реального часу, комп'ютер, який виступає основним елементом керування всією системою, напрямні на ремінній передачі.

В якості мікроконтролера було обрано STM32F103VBT6, а також розроблено схеми живлення від джерела, які потребують використання трьох понижувачів напруги, а саме 24/12 В, 24/5 В та 24/3,3 В. Для живлення системи та підключення інших компонентів, таких як плати керування додатковими підсистемами, було розроблено електричні схеми підключення.

В четвертому розділі виконано дослідження методу керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей. Було описано та перевірено передачу даних по протоколам в рамках функціонування розробленої автоматизованої системи.

Також було виготовлено плати керування для основного керуючого елемента автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей та розроблено відповідні прототипи. Наостанок, було виготовлено експериментальний стенд для проведення досліджень мікрохвильових печей. Крім того, в розділі наведено програму для проведення контролю та випробовування мікрохвильових печей за допомогою розробленої системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Мікрохвильовки: які бувають та що їх відрізняє. URL: https://elmag.com.ua/uk/article/mikrovolnovki-kakie-byvayut-i-cho-ih-razlichaet?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (дата звернення: 03.09.2025)
2. Електропобутова техніка: підручник для студентів ВНЗ / Петько І.В. та ін. - Хмельницький: ХНУ, 2017. 213 с.
3. Серета О.Г. Безконтактні елементи автоматики в електропобутовій техніці : навч. посібник для студентів вищих технічних навчальних закладів. Харків : НТУ «ХП», 2007. 250 с.
4. Практична електротехніка для робітничих професій : підручник для учнів проф.- навч. закладів / В. М. Бондар та ін. - Київ : Веселка, 2000. 197 с.
5. Краці мікрохвильові печі 2025 року. URL: <https://vencon.ua/ua/articles/rejting-luchshih-mikrovolnovyh-pechej> (дата звернення: 06.09.2025)
6. Мікрохвильові печі. URL: <https://journal.rozetka.com.ua/p163-mikrokhvilovi-peci.html> (дата звернення: 08.09.2025)
7. Що слід враховувати, обираючи мікрохвильову піч? URL: <https://euro-technika.com.ua/statti/shcho-slid-vrahuvati-obiraiuchi-mikrohvilovu-pich> (дата звернення: 09.09.2025)
8. Бондаренко М.Й., Кулік Т.І. Устаткування для сервісного обслуговування електропобутової техніки: навчальний посібник. Київ: КНУТД, 2019. 260 с.
9. Лозинський А., Копчак Б.Л., Бушер В.В. Системи керування електропобутовими приладами. Львів: Львівська політехніка, 2010. 302 с.
10. Product Compliance Resources pwovided by ProductIP. URL: <https://www.productipedia.com/kb/productipedia/compliance-resources/low-voltage-directive-and-en-60335> (дата звернення: 12.09.2025)

11. ДСТУ EN 60335-2-25:2015 Прилади побутові та аналогічні електричні. Безпека. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64689 (дата звернення: 12.09.2025)
12. Microwave Testing. URL: <https://cbaelectra.com.au/microwave-testing/> (дата звернення: 14.09.2025)
13. 21 CFR 1030.10. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-J/part-1030/section-1030.10> (дата звернення: 14.09.2025)
14. Microwave Ovens. URL: <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/resources-you-radiation-emitting-products/microwave-ovens> (дата звернення: 14.09.2025)
15. Procedures for Laboratory Testing of Microwave Ovens. URL: <https://www.fda.gov/media/74725/download> (дата звернення: 15.09.2025)
16. Детектор мікрохвильового випромінювання Walcom HT-M2. URL: <https://autobaza.kiev.ua/ua/p2717412323-detektor-mikrovolnovogo-izlucheniya.html> (дата звернення: 17.09.2025)
17. Як перевірити магнетрон мікрохвильової печі. URL: <https://detels.com.ua/ua/kak-proverit-magnetron> (дата звернення: 18.09.2025)
18. Мультиметр універсальний UNI-T UT890D+. URL: https://rozetka.com.ua/ua/uni-t-mie0428/p527857294/?gad_source=1&gad_campaignid=21211395783&gbraid=0AAADIXhI48t9lrpbFvMCnTB7O2QckH&gclid=CjwKCAiA0eTJBhBaEiwA-PahZUtfOZWQhZDDYT1b0moEinGe68mYzpQeEw5LI20abPKLhg_U2QuhoChsQQAvD_BwE (дата звернення: 18.09.2025)
19. Несправності мікрохвильових печей. Топ-6 найчастіших помилок. URL: <https://remont-servis.kiev.ua/ua/nespravnosti-mikrohvylovok> (дата звернення: 20.09.2025)
20. Компанійцева К.О. Використання технології радіочастотної ідентифікації в процесі організації обліку виробничих запасів на промислових підприємствах. 2013. 3 с.

21. RFID-технологія - що це, як працює, де використовується. URL: <https://www.imena.ua/blog/rfid-technology/> (дата звернення: 24.09.2025)
22. RFID-технологія. URL: <https://cnrmk.com.ua/?p=1162> (дата звернення: 24.09.2025)
23. Єнченко О.Ю. Застосування RFID-технології при формуванні ефективної логістичної системи на підприємстві. *Конкурентоспроможність та інновації: проблеми науки та практики*. с. 308-310
24. Балтовський О.О., Форос Г.В., Сіфоров О.І. Основи математичного моделювання: навчальний посібник. Одеський державний університет внутрішніх ДІВ, Одеса, 2023. 125 с.
25. Математичне моделювання систем і процесів / Павленко П.М. та ін. К.: НАУ, 2017. 392 с.
26. Бахрушин В.Є Математичне моделювання: навчальний посібник. Запоріжжя: ГУ «ЗІДМУ», 2004. 140 с.
27. Ayappa K.G. Modelling transport processes during microwave heating: a review. *Reviews in Chemical Engineering*, 1997, 13(2), p. 1-67.
28. Campañone L. A., Zaritzky N. E. Mathematical analysis of microwave heating process. *Journal of Food Engineering*, 2005, 69, p. 359-368
29. Рубан А.І., Гогоці Ю.Г., Гусак О.К. Теорія поля: підручник. Суми: Сумський державний університет, 2023. 279 с.
30. Карпов Ю.О., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: підручник. Вінниця, ВНТУ, 2008. 407 с.
31. Карпов Ю.О., Магас Т.Є., Мадьяров В.Г. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1: конспект лекцій. Вінниця, ВНТУ, 2018. 154 с.
32. Мадьяров В.Г. Теоретичні основи електротехніки. Вінниця, ВНТУ, 2022. 162 с
33. Бурик М.П., Спінул Л.Ю., Лободзинський В.Ю. Теоретичні основи електротехніки. Лабораторний практикум: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 73 с.

34. Кірчук Р.В., Дадурєв І.М. Математичне моделювання машин: навчальний посібник. Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2014. 134 с.
35. Campañone L. A., Paola C.A., Mascheroni R.H. Modeling and Simulation of Microwave Heating of Foods Under Different Process Schedules. *Food Bioprocess Technol.*, 2010. p. 338-350
36. Обертюх Р.Р., Слабкий А.В. Математичне моделювання механічних систем: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2025. 119 с.
37. Теорія електричних і магнітних кіл: підручник / Панченко С.В. та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с.
38. Фізика для бакалаврів. Електрика і магнетизм. URL: <https://physics.zfftt.kpi.ua/mod/book/view.php?id=297&chapterid=47> (дата звернення: 13.10.2025)
39. Математичне моделювання динамічних систем і процесів: Інструктивно-методичні матеріали для самостійної роботи здобувачів закладів вищої освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 122 Комп'ютерні науки / Коломієць Т. та ін. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2024. 60 с.
40. Чуйко Г.П., Дворник О.В., Яремчук О.М. Математичне моделювання систем і процесів: навчальний посібник. Миколаїв : Вид-во ЧДУ імені Петра Могили, 2015. 244 с.
41. Синявська О.О., Слюсарчук П.В. Ряди Фур'є: навчальний посібник для студентів спеціальностей математика, прикладна математика, статистика. Ужгород: УжНУ, 2015. 70 с.
42. Моделювання електромеханічних систем: підручник / Чорний О.П. та ін. Кременчук, 2001. 410 с.
43. Данильян О.Г., Дзьобань О.П. Методологія наукових досліджень: підручник. Харків: Право, 2019. 368 с.

44. Datta A.K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: problem formulations. 2007. *Journal of Food Engineering*, 80, p. 80-95

45. Духова шафа з мікрохвильовим режимом Gaggenau GM450120. URL: <https://my-gaggenau.com.ua/duhova-shafa-z-mikrohvylovym-rezhymom-gaggenau-gm450120> (дата звернення: 25.10.2025)

46. Розводюк М.П., Казак М.О. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Спеціальні електричні машини» для студентів напряму підготовки «Електромеханіка» на тему «Дослідження крокового двигуна». Вінниця: ВНТУ, 2022. 37 с.

47. Новацький А.О. Мікропроцесорні та мікроконтролерні системи: Частина 2. Проектування мікропроцесорних систем: Лабораторний практикум: навч. посіб. для студ. освітньої програми «Інтегровані інформаційні системи» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 268 с.

48. Мікропроцесорна техніка: навчальний посібник / Цирульник С.М. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2017. 124 с.

49. Засорнов О.С., Засорнова І.О. Програмування мікроконтролерних та робототехнічних систем. Навчальний посібник. Кондор, 2023. 280 с.

50. Мікроконтролер STM32F103VBT6. URL: <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=STM32F103VBT6> (дата звернення: 03.22.2025)

51. STMF32F103x6 datasheet. URL: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Stm32f103vbt6%20datasheet&g_ad_source=1&gad_campaignid=160596484&gbraid=0AAAAADcdDU8a-gINXPTfJa43HEa2RWULj&gclid=Cj0KCQiAuvTJBhCwARIsAL6Demi92c0DZBvWC1dtGVLM11v1FUhkfiRy5oqD_MugdOncY3zH3M6XEg0aAi0oEALw_wcB (дата звернення: 03.22.2025)

52. Бобух А.О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Харків: ХНАМГ, 2006. 185 с.

53. Мірошник М.А. Системи автоматизації проектування пристроїв і систем автоматики. Основи систем автоматизації проектування: конспект лекцій. Харків, 2014. 102 с.

54. Перетворювач напруги знижувальний DC/DC 24V-12V 10A. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/344118400/p344118400/> (дата звернення: 12.11.2025)

55. Діод 1n4001. URL: https://m-teh.com.ua/diod-1n4001-u-strichtsi/?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=standart&utm_term=&gad_source=1&gad_campaignid=22302793644&gbraid=0AAAAApRjofcUt2MnCcZVBpFub98ODtWMV&gclid=Cj0KCQiAuvTJBhCwARIsAL6DemiIcjdRG0mqphO4tWnBCepcIPiBOIBE0Ew9oIbN_nlYdaqyS9K6jXMaAgbhEALw_wcB (дата звернення: 12.11.2025)

56. ECAP-LOW-ESR-220mkf-25V. URL: https://kosmodrom.ua/ru/kondensator-elektroliticheskij/ecap-low-esr-220mkf-25v-wl.html?gad_source=1&gad_campaignid=21279505378&gbraid=0AAAAA9phgKTSgHWq9LF1P4EVgRlk7air&gclid=Cj0KCQiAuvTJBhCwARIsAL6DemiUHx4axM0dYhhZ0U_gh4M39ewmrn66OZnBVPy6q21uNzomx4d5EJ4aAqyLEALw_wcB (дата звернення: 14.11.2025)

57. Знижувальний модуль перетворювач USB DC-DC 24-5В. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/349461819/p349461819/> (дата звернення: 14.11.2025)

58. DC-DC 24V to 3,3V, B2403S-1W. URL: <https://voron.ua/uk/catalog/040894--ds-24v-to-33v-b2403s-1w-rlt> (дата звернення: 14.11.2025)

59. Кварцовий генератор SMD 3225. URL: https://vroda.co.ua/product/kvarcoviiy-generator-8-mgc-smd-3225-4-pin_15040983536 (дата звернення: 16.11.2025)

60. Фільтр живлення 0-50 В 4А мережевий фільтр. URL: https://rozetka.com.ua/ua/464216374/p464216374/?gad_source=1&gad_campaignid=

21041321226&gbraid=0AAAAACclhWMhKwWMvyOLDdl6T2eG0DOab&gclid=Cj0KCQiAuvTJBhCwARIsAL6DemivO79KcsuF5gflRpgxpdFmu5x5SxPDCifKuRjTS9vWnoZSS5R5ftMaAicjEALw_wcB (дата звернення: 16.11.2025)

61. Налагоджувальна плата V2DIP1-48. URL: <http://www.kosmodrom.com.ua/el.php?name=V2DIP1-48> (дата звернення: 19.11.2025)

62. Реут Д.Т. Програмування мікроконтролерів STM32 у STM32CUBEIDE. Практикум: навчальний посібник. Рівне, 2023. 122 с.

63. Квашнін В.О., Бабаш А.В., Квашнін В.В. Програмування та застосування мікроконтролерів STM32DISCOVERY: монографія. Краматорськ: ЦТPI «Друкарський дім», 2017. 144 с.

64. Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах : навч. посіб. / О. В. Зубков, І. В. Свид, О. В. Воргуль, В. В. Семенець. - Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. - 144 с.

65. Копитко М.Ф., Іванків К.С. Основи програмування мовою Java. Львів, Видавничий центр ЛНУ Івана Франка, 2002. 83 с.

66. Зубенко В.В., Омельчук Л.Л. Програмування. Поглиблений курс. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. 624 с.

67. Дегтярьова Л.М., Гроза П.М., Сомов С.В. Технології розробки програмного забезпечення. Полтава: ПолтНТУ, 2017. 212 с.

68. Лазарєв Ю.Ф. Довідник з MATLAB. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 132 с.

69. Путівник мовою програмування Python. URL: <https://pythonguide.rozh2sch.org.ua/> (дата звернення: 13.11.2025)

70. Яковенко А.В. Основи програмування. Python. Частина 1: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 195 с.

ДОДАТОК А

СКРИПТ ДЛЯ MATLAB

```

%-----
% ACT Commander
% Author: Marmiy
% Matlab script, generating two source files.
%-----
% Import picture to decode
image_matrix = imread('ParseThisFont.bmp');
% Get its size
bitmap_size = size(image_matrix);
% Decode
% Font height is constant, while the width is variable
token_height = 13;
% Construct the first file, .h
% Open file, overwrite if the file exists. 'wt' stands for write text.
fileID = fopen('InternalMediumFont_prm.h','wt');
time = clock;
% Write following to the file
fprintf(fileID,'//-----
-----\n/\n');
fprintf(fileID,'//\tFile: InternalMediumFont_prm.h\n/\n');
fprintf(fileID,'//\tDescription: ACT Commander Fonts\n/\n');
fprintf(fileID,'//\tThis code is generated using MATLAB and MSPaint.\n');
fprintf(fileID,'//\tA monochrome bitmap is imported and converted to\n');
fprintf(fileID,'//\ta matrix in MATLAB. The columns are then decoded\n');
fprintf(fileID,'//\tto hexnumbers and then written to a file.\n/\n');

```



```

binary_multiplier(1)*image_matrix(1,column_count)+ ...
binary_multiplier(2)*image_matrix(2,column_count)+ ...
binary_multiplier(3)*image_matrix(3,column_count)+ ...
binary_multiplier(4)*image_matrix(4,column_count)+ ...
binary_multiplier(5)*image_matrix(5,column_count)+ ...
binary_multiplier(6)*image_matrix(6,column_count)+ ...
binary_multiplier(7)*image_matrix(7,column_count)+ ...
binary_multiplier(8)*image_matrix(8,column_count);
bitmap_matrix(2,column_count) = ...
binary_multiplier(1)*image_matrix(9,column_count)+ ...
binary_multiplier(2)*image_matrix(10,column_count)+ ...
binary_multiplier(3)*image_matrix(11,column_count)+ ...
binary_multiplier(4)*image_matrix(12,column_count)+ ...
binary_multiplier(5)*image_matrix(13,column_count)+ ...
binary_multiplier(6)*image_matrix(14,column_count)+ ...
binary_multiplier(7)*image_matrix(15,column_count)+ ...
binary_multiplier(8)*image_matrix(16,column_count);
bitmap_matrix(3,column_count) = image_matrix(17,column_count);
% If the whole column is in the same color, ignore that column.
if(bitmap_matrix(3,column_count) == 0)
% Check if the last column was part of the token, otherwise it is a new token
if(column_part_of_token ~= true)
% Hitting a new token, increase the token counter
if(previous_token_space ~= true)
ascii_count = ascii_count + 1;
else
previous_token_space = false;
end
% The first column that is part of the token

```

```

token_start = column_count;
column_part_of_token = true;
end
else
if(column_part_of_token == true)
% Found the end of the token
token_width = (column_count-1) - token_start;
% write the token to file.
% The first part.
fprintf(fileID,'const unsigned char ACT_Medium_Font_%03d[] =
{0x%02X,0x%02X',ascii_count,token_width+1,token_height);
% Upper and lower part of the token.
for(i = 1: 2)
% Increment the column
for(j = token_start: token_start + token_width)
% Write the information
fprintf(fileID,' ,0x%02X',bitmap_matrix(i,j));
end
end
% Write the last part.
fprintf(fileID,'}; // Ascii character "%s"\n',char(ascii_count));
column_part_of_token = false;
end
end
else
% Write the "space" token
% The first part
fprintf(fileID,'const unsigned char ACT_Medium_Font_%03d[] =
{0x%02X,0x%02X',ascii_count,space_token_width,token_height);

```

```

for(k = 1:2)
for(l = 1: space_token_width)
if(k == 1)
fprintf(fileID, ',0xFF');
else
fprintf(fileID, ',0xFC');
end
end
end
end

%The last part
fprintf(fileID, '); // Ascii character "%s"\n', char(ascii_count));
ascii_count = ascii_count + 1;
previous_token_space = true;
end
end

fprintf(fileID, '\n#endif\n');
fclose(fileID);

% Now, construct the source file
% Open file, overwrite if the file exists. 'wt' stands for write text.
fileID = fopen('InternalMediumFont.c', 'wt');
% Write following to the file
fprintf(fileID, '//-----\n');
fprintf(fileID, '//\t\tFile: InternalMediumFont.c\n/\n');
fprintf(fileID, '//\t\tDescription: ACT Commander Fonts\n/\n');
fprintf(fileID, '//\t\tThis code is generated using MATLAB and MSPaint.\n');
fprintf(fileID, '//\t\tAuthor(s): Anders Appelgren\n');
fprintf(fileID, '//\t\tCreation                               Date:%4d-%02d-%02d,
%02d:%02d\n/\n', time(1), time(2), time(3), time(4), time(5));

```

```

fprintf(fileID,'//-----
-----\n\n');
fprintf(fileID,'#include "InternalMediumFont_prm.h"\n\n');
fprintf(fileID,'unsigned char FlashSrcInternalFontReaderACT(unsigned int
source_index)\n{\n');
fprintf(fileID,'\tunsigned char data;\n\n');
fprintf(fileID,'\tswitch (global_char)\t\n{\n');
for(i = ascii_offset: ascii_count)
fprintf(fileID,'\t\tcase 0x%02X: // "%s"\n',i,char(i));
fprintf(fileID,'\t\t\tdata = ACT_Medium_Font_%03d[source_index];\n',i);
fprintf(fileID,'\t\t\tbreak;\n');
end
fprintf(fileID,'\t\tdefault: //not supported char\n\t\t\tdata =
0;\n\t\t\tbreak;\n\t\t}\n\n\treturn data;\n}\n');
fclose(fileID);

```

ДОДАТОК Б

**КОД ПРОГРАМИ ДЛЯ ВІДОБРАЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕСТУВАНЬ
МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ**

```
import sys
from PyQt5.QtWidgets import (
    QApplication, QWidget, QLabel, QVBoxLayout, QHBoxLayout,
    QGroupBox, QFrame
)
from PyQt5.QtGui import QFont, QColor
from PyQt5.QtCore import Qt

class MicrowaveTestApp(QWidget):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.setWindowTitle("Автоматизована система контролю та випробовування
мікрохвильових печей")
        self.setMinimumSize(900, 600)
        self.init_ui()

    def init_ui(self):
        main_layout = QVBoxLayout()

        # Заголовок
        title = QLabel("Система контролю та випробовування мікрохвильових
печей")
        title.setFont(QFont("Arial", 16, QFont.Bold))
```

```
title.setAlignment(Qt.AlignCenter)
main_layout.addWidget(title)

# Інформація про з'єднання
connection = QLabel("Стан з'єднання з контролером STM32:
ПІДКЛЮЧЕНО")
connection.setFont(QFont("Arial", 10))
connection.setAlignment(Qt.AlignCenter)
main_layout.addWidget(connection)

# Центральна зона
center_layout = QHBoxLayout()

# Блок витоку мікрохвиль
leakage_group = QGroupBox("Результати вимірювання витоку мікрохвиль")
leakage_layout = QVBoxLayout()

leakage_value = QLabel("Виміряне значення: 5,6 мВт/см2")
leakage_value.setFont(QFont("Arial", 12))

leakage_status = QLabel("Статус: НЕ ПРОЙДЕНО")
leakage_status.setFont(QFont("Arial", 12, QFont.Bold))
leakage_status.setStyleSheet("color: red;")

leakage_layout.addWidget(leakage_value)
leakage_layout.addWidget(leakage_status)
leakage_group.setLayout(leakage_layout)

# Блок візуального огляду
```

```
visual_group = QGroupBox("Візуальний огляд")
visual_layout = QVBoxLayout()

visual_status = QLabel("Результат: НЕ ПРОЙДЕНО")
visual_status.setFont(QFont("Arial", 12, QFont.Bold))
visual_status.setStyleSheet("color: red;")

visual_reason = QLabel("Причина: відсутнє освітлення в камері")
visual_reason.setFont(QFont("Arial", 11))

visual_layout.addWidget(visual_status)
visual_layout.addWidget(visual_reason)
visual_group.setLayout(visual_layout)

# Блок дверцят
door_group = QGroupBox("Щільність замикання дверцят")
door_layout = QVBoxLayout()

door_status = QLabel("Результат: ПРОЙДЕНО")
door_status.setFont(QFont("Arial", 12, QFont.Bold))
door_status.setStyleSheet("color: green;")

door_layout.addWidget(door_status)
door_group.setLayout(door_layout)

center_layout.addWidget(leakage_group)
center_layout.addWidget(visual_group)
center_layout.addWidget(door_group)
```

```
main_layout.addLayout(center_layout)

# Нижнє повідомлення
message_box = QFrame()
message_box setFrameShape(QFrame.Box)
message_box.setStyleSheet("background-color: #f8d7da;")

message_layout = QVBoxLayout()
message_label = QLabel(
    "Перевірку витоку мікрохвиль не пройдено — виміряні результати
перевищують допустиме значення 5 мВт/см².\n"
    "Візуальний огляд не пройдено — в камері мікрохвильової печі відсутнє
освітлення. "
    "Перевірте роботу лампи."
)
message_label.setFont(QFont("Arial", 11))
message_label.setStyleSheet("color: #721c24;")
message_label.setAlignment(Qt.AlignCenter)

message_layout.addWidget(message_label)
message_box.setLayout(message_layout)

main_layout.addWidget(message_box)

self.setLayout(main_layout)

if __name__ == "__main__":
    app = QApplication(sys.argv)
```

```
window = MicrowaveTestApp()  
window.show()  
sys.exit(app.exec_())
```

ДОДАТОК В

**БАЗА ДАНИХ МОДЕЛЕЙ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ
ТЕХНОЛОГІЇ RFID**

```
RFID_DATABASE = {  
  "A1B2C3D4": {  
    "model": "Samsung ME83KRW",  
    "power": "800 Вт",  
    "volume": "23 л",  
    "max_leakage": 5.0  
  },  
  "11223344": {  
    "model": "LG MH6535GIS",  
    "power": "1000 Вт",  
    "volume": "25 л",  
    "max_leakage": 5.0  
  },  
  "DEADBEEF": {  
    "model": "Bosch BFL634GS1",  
    "power": "900 Вт",  
    "volume": "21 л",  
    "max_leakage": 5.0  
  }  
}
```

Додаток Г Програмний код зчитування моделі мікрохвильової печі за допомогою RFID технології

```
import serial
import time

SERIAL_PORT = "COM3"    # або /dev/ttyUSB0 для Linux
BAUDRATE = 9600

def connect_rfid():
    try:
        ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, BAUDRATE, timeout=1)
        print("RFID-зчитувач підключено")
        return ser
    except serial.SerialException:
        print("Помилка підключення до RFID-зчитувача")
        return None

def read_rfid_uid(ser):
    if ser.in_waiting:
        uid = ser.readline().decode("utf-8").strip()
        return uid
    return None

def identify_microwave(uid):
    if uid in RFID_DATABASE:
        data = RFID_DATABASE[uid]
        print("Модель ідентифіковано:")
```

```
print(f"Модель: {data['model']}")
print(f"Потужність: {data['power']}")
print(f"Об'єм: {data['volume']}")
return data
else:
    print("Невідома RFID-мітка")
    return None

def main():
    rfid = connect_rfid()
    if not rfid:
        return

    print("Очікування RFID-мітки...")

    while True:
        uid = read_rfid_uid(rfid)
        if uid:
            print(f"Зчитано UID: {uid}")
            microwave = identify_microwave(uid)

            if microwave:
                print("Запуск автоматизованого сценарію випробувань...\n")
            else:
                print("Випробування неможливе — модель не визначена\n")

        time.sleep(0.2)
```

Додаток Д Програмний код керування механічним пальцем для
відкривання дверцят та натискання на клавіші

```
// Вісь X
#define X_STEP_Pin GPIO_PIN_0
#define X_DIR_Pin  GPIO_PIN_1

// Вісь Y
#define Y_STEP_Pin GPIO_PIN_2
#define Y_DIR_Pin  GPIO_PIN_3

#define MOTOR_GPIO GPIOA

void Step(GPIO_TypeDef* GPIOx, uint16_t STEP_Pin)
{
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOx, STEP_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(1);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOx, STEP_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_Delay(1);
}

void MoveAxis(GPIO_TypeDef* GPIOx,
              uint16_t STEP_Pin,
              uint16_t DIR_Pin,
              uint8_t direction,
              uint16_t steps)
{
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOx, DIR_Pin,
                      direction ? GPIO_PIN_SET : GPIO_PIN_RESET);
```

```
for (uint16_t i = 0; i < steps; i++)
{
    Step(GPIOx, STEP_Pin);
}

void PressButton(uint16_t x_pos, uint16_t y_pos)
{
    // Переміщення до кнопки
    MoveAxis(MOTOR_GPIO, X_STEP_Pin, X_DIR_Pin, 1, x_pos);
    MoveAxis(MOTOR_GPIO, Y_STEP_Pin, Y_DIR_Pin, 1, y_pos);

    // Натискання
    MoveAxis(MOTOR_GPIO, Y_STEP_Pin, Y_DIR_Pin, 0, 50);

    HAL_Delay(500);

    // Повернення
    MoveAxis(MOTOR_GPIO, Y_STEP_Pin, Y_DIR_Pin, 1, 50);
}

void OpenDoor(void)
{
    // Перехід до ручки дверцят
    MoveAxis(MOTOR_GPIO, X_STEP_Pin, X_DIR_Pin, 1, 800);
    MoveAxis(MOTOR_GPIO, Y_STEP_Pin, Y_DIR_Pin, 1, 200);

    // Тягнемо дверцята
```

```
MoveAxis(MOTOR_GPIO, X_STEP_Pin, X_DIR_Pin, 0, 150);

HAL_Delay(500);
}

int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();

    // Натискання кнопки "Старт"
    PressButton(300, 150);

    HAL_Delay(1000);

    // Відкривання дверцят
    OpenDoor();

    while (1)
    {
    }
}
```

ДОДАТОК Е

ТЕЗИ В НАУКОВОМУ ЗБІРНИКУ «ТЕХНІЧНА ТВОРЧІСТЬ»

УДК 681.5

Мехатроніка і робототехніка

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ВИПРОБОВУВАННЯ
МІКРОХВИЛЬОВИХ ПЕЧЕЙМармій А.Ю.,
Форкун І.В.,
Соколан Ю.С.*Хмельницький національний університет*

Мікрохвильові печі призначені для швидкого приготування та розігрівання їжі за допомогою електромагнітних хвиль високої частоти. Вони суттєво скорочують час приготування страв, що робить їх незамінними в побуті та на виробництві [1].

Перед випуском на ринок мікрохвильові печі проходять суворі випробування на безпеку та надійність. Одним із ключових тестів є перевірка рівня електромагнітного випромінювання, щоб воно не перевищувало допустимих норм [2]. Також проводяться електричні та механічні випробування, перевіряється якість дверного замка, цілісність металевої камери та системи блокування. Виробники тестують продуктивність печі, рівномірність нагрівання їжі та точність налаштування потужності. Крім того, здійснюється перевірка на стійкість до тривалого навантаження, перегрівання та короткого замикання.

З метою забезпечення можливості автоматизованого проведення такого випробування мікрохвильових печей була розроблена автоматизована система контролю та випробування (АСКВ), функціональна схема якої наведена на рис. 1.

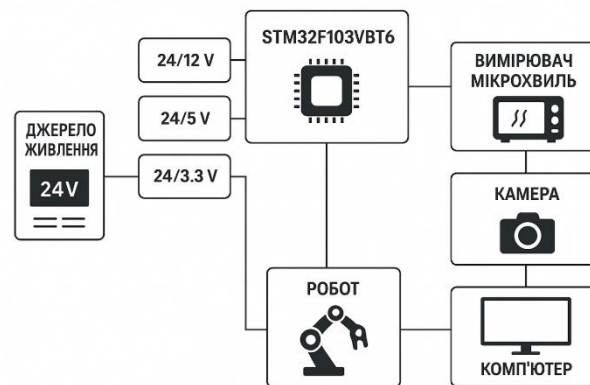


Рис. 1. Функціональна схема автоматизованої системи контролю та випробування мікрохвильових печей

Оскільки робот-маніпулятор в АСКВ призначений для натискання на кнопки на мікрохвильовій печі (МП), то для його коректної роботи необхідно передбачити модуль для зчитування координат панелі керування МП, оскільки в кожній моделі кнопки розташовуються в різних місцях. Для цього передбачено використання RFID технології, в якій на МП будуть ставитись мітки, а в АСКВ буде наявний зчитувач [3].

Камера в АСКВ призначена для проведення візуального огляду МП на наявність видимих пошкоджень та на справність роботи освітлення всередині камери для розігріву їжі.

Вимірювач мікрохвиль призначений для вимірювання витoku мікрохвиль, яке не повинно перевищувати значення у 5 мВт/см^2 на відстані 50 см від МП.

В якості керуючого елементу для АСКВ обрано мікроконтролер STM32F103VBT6, а модуль живлення передбачає використання трьох перетворювачів напруги - з 24 на 12 В, з 24 на 5,5 В та з 24 на 3,3 В. Також була розроблена схема керування кнопками, яка наведена на рис. 2.

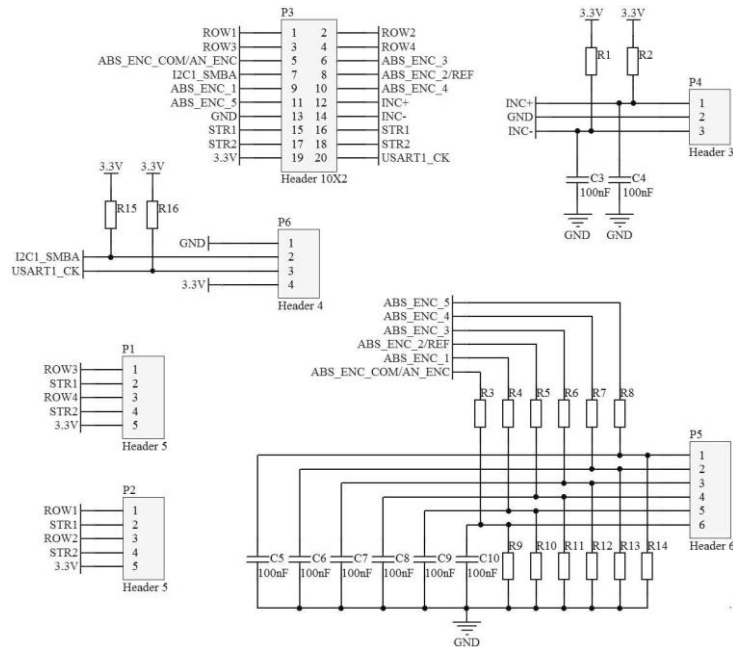


Рис. 2. Схема керування натисканням на кнопки мікрохвильової печі

З метою спрощення проведення автоматизованого контролю та випробовування мікрохвильових печей було розроблено відповідне програмне забезпечення, яке відображає інформацію стосовно виміряних мікрохвиль та проведення візуального огляду камерою в АСКВ. Інтерфейс програми наведено на рис. 3.

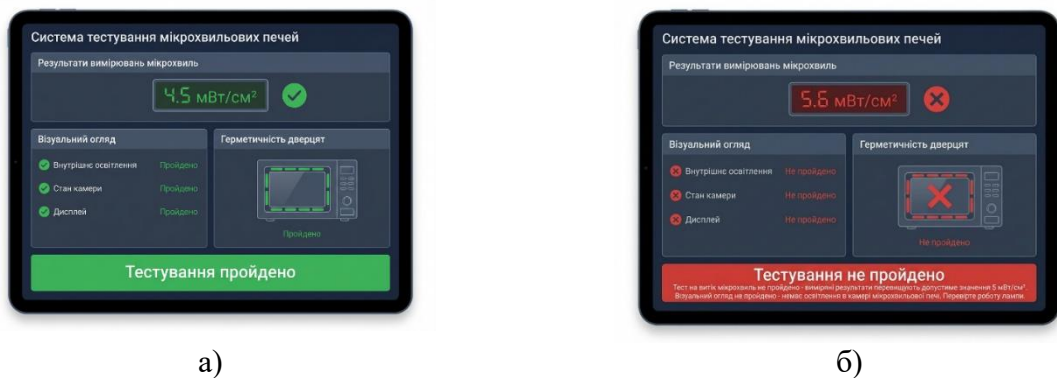


Рис. 3. Програма для автоматизованих випробовувань мікрохвильової печі:
а - успішне тестування; б - тестування не пройдено

Використання такої автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей дозволить спростити процес тестування МП на їх відповідність встановленим стандартам та нормам.

Перелік посилань

1. Електропобутова техніка: підручник для студентів ВНЗ / Петько І.В. та ін. - Хмельницький: ХНУ, 2017. 213 с.

2. ДСТУ EN 60335-2-25:2015 Прилади побутові та аналогічні електричні. Безпека. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64689
3. RFID-технологія - що це, як працює, де використовується. URL: <https://www.imena.ua/blog/rfid-technology/>

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Мармій Андрій Юрійович

Тема: Метод керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень ____ Кількість сторінок записки 108

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: виконано математичне моделювання процесу нагрівання їжі в мікрохвильових печах, виконано підбір обладнання для автоматизованого процесу контролю та випробовування мікрохвильових печей, проведено дослідження розробленого методу та розроблено програмне забезпечення для проведення випробовувань мікрохвильових печей

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі було виконано огляд та аналіз існуючих конструкцій мікрохвильових печей та їх класифікацію. В другому розділі проведено математичне моделювання автоматизованого процесу випробовування мікрохвильових печей. В третьому розділі було виконано підбір обладнання для автоматизованої системи контролю та випробовування мікрохвильових печей. В четвертому розділі виконано дослідження методу керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: було б доцільно представити CAD модель експериментального стенду для автоматизованого процесу контролю та випробовування мікрохвильових печей

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (70/100)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

Пундик Сергій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри МАЕЕС Хмельницького національного університету

" 15 " 12 2025 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР
канд. техн.наук, доценту Корецька Л.О.

Мармій Андрій Юрійович

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-24-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

05.12.2025

дата



підпис

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Андрій МАРМІЙ

Співавтор:

Назва: Мармій (на антиплагіат)

Експерт: Ірина ФОРКУН

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1:0.9%

Коефіцієнт подібності 2:0.3%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 23

Інтервали: 0

Білі знаки: 2

Дата створення звіту: 2025-12-15 16:12:29.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

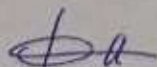
Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-12-15

Доцент Микола Федула

Дата



експерт

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод керування автоматизованим процесом контролю та випробовування мікрохвильових печей

Автор: Мармій Андрій Юрійович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Науковий керівник: Форкун Ірина Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноновживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0,91% і адресується до 20 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Людмила КОРЕЦЬКА

Валерій МАРТИНЮК

Ірина ФОРКУН