

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

(повна назва)

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

ГЮИК 464425.001 ПЗ

(позначення документа)

"Розробка пристрою для підвищення рівномірності нагрівання в мікрохвильовій печі "

(тема)

Виконав:

здобувач 2 курсу, групи РЕАЗм-22-1

Шульга О.В.

(прізвище, ініціали)

спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні апарати та засоби

(повна назва спеціалізації)

Керівник

доц.Зайченко О.Б.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПЕЕА

(підпис)

Хорошайло Ю.Є.

(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологійКафедра Проектування та експлуатації електронних апаратівРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)Освітня програма "Радіоелектронні апарати та засоби"
(повна назва)ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри ПЕЕА
Хорошайло Ю.Є. _____
(підпис)
«___» _____ 2023 р.**ЗАВДАННЯ**

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачу Шульзі Олександр Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)1. Тема роботи Розробка пристрою для підвищення рівномірності нагрівання в мікрохвильовій печізатверджена наказом по університету від 27 10 2023 р. № 1251 Ст _____2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 05 грудня 2023 р.3. Вихідні дані до роботи проблема нерівномірності нагрівання у мікрохвильовій печі_____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз літературних джерел

4.3 Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень

4.4 Розробка методики експериментальних досліджень

4.5 Охорога праці

4.6 Висновки;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____
Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання	07.09.23	виконано
2	Пошук літератури	15.09.23	виконано
3	Аналіз літературних джерел	01.10.23	виконано
4	Моделі та методи	14.10.23	виконано
5	Моделювання	01.11.23	виконано
6	Автоматизація проектування	15.11.23	виконано
7	Виконання розділу «Охорона праці»	05.12.23	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	08.12.23	виконано

Дата видачі завдання _____ 2023 р.

Студент _____ Шульга О.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доц.Зайченко О.Б.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи магістра: 57 с., 1 табл., 14 рис., 16 джерел.

МІКРОХВИЛЬОВА ПІЧ, РЕЗОНАТОР НВЧ, ОДНОРІДНІСТЬ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ, ПОТУЖНІСТЬ, ПРОХІДНА ПОТУЖНІСТЬ, СЕРЕДНЄ ГЕОМЕТРИЧНЕ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ

Актуальність роботи полягає в дослідженні засобів підвищення рівномірності нагрівання нагрівання мікрохвильової печі за допомогою вимірювання прохідної потужності.

Метою роботи є створення засобу та алгоритму обробки сигналів датчиків в ватметрі, який вбудовано в мікрохвильову піч.

В результаті отримані аналітичні вирази для прохідної потужності через середнє геометричне значення сигналів двох датчиків. Доведено, що середньгеометричне сигналів датчиків пропорційне прохідній потужності. Оцінена невизначеність вимірювань прохідної потужності.

Пояснювальна записка виконана згідно ДСТУ 3008-2015[1].

ABSTRACT

Explanatory note to the appraisal work of the master: 57 pp., 1 table., 14 Fig., 16 sources.

MICROWAVE OVEN, UHF RESONATOR, THERMAL FIELD UNIFORMITY, POWER, TRANSMITTING POWER, GEOMETRIC MEAN, MEASUREMENT UNCERTAINTY

Context. The problem of the work lies in the study of means of increasing the heating uniformity of the microwave oven by measuring the passing power.

Objective. The goal of the work is to create a tool and algorithm for processing sensor signals in a powermeter, which is built into a microwave oven.

As a result, analytical expressions for the passing power due to the geometric mean value of the signals of two sensors were obtained. It is proved that the geometric mean of sensor signals is proportional to the passing power. The uncertainty of the transmitted power measurements is estimated.

Explanatory note was made according to DSTU 3008-2015[1].

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	7
Вступ.....	8
1. Аналітичний огляд літературних джерел.....	10
1.1 1.1. Побудова мікрохвильової печі.....	10
1.2 Камери резонатори мікрохвильової печі та проблема нерівномірності нагрівання в них.....	11
1.3 Засоби вимірювання нерівномірності та поліпшення рівномірності розподілу поля в резонаторах мікрохвильової печі.....	17
1.4 Висновки до розділу 1.....	24
2. Моделі та методи Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень.....	26
2.1 Метод поліпшення рівномірності нагрівання	26
2.2 Алгоритм розрахунку прохідної потужності.....	30
2.3 Невизначеність розрахунку прохідної потужності.....	35
2.4 Моделювання та автоматизоване проектування	37
2.5 Висновки до розділу 2.....	44

3. Розробка методики експериментальних досліджень, вибір оснащення, необхідного для проведення експерименту, опис експериментальних установок.....	45
3.1 Висновки до розділу	
3.....	46
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	47
4.1 Аналіз умов праці.....	47
4.2 Виробнича санітарія в НДЛ.....	48
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	53
Висновки.....	55
Перелік використаних джерел.....	56
Додаток А.....	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НВЧ – надвисокі частоти;

БГ – багатошліпні ґрати;

ВКЗЕіТ – внутрішня крайова задача електродинаміки та теплопровідності;

ЕМ – електромагнітні

МКЕ – метод кінцевих елементів;

НДЛ – науково-дослідна лабораторія;

ПХ прямокутний хвилевід;

ПХТР – прямокутний хвилевод з Т-ребром;

РК – резонаторна камера;

САПР – система автоматизованого проектування;

СЗ – система збудження;

ВСТУП

Використання мікрохвильової енергії в мікрохвильових печах завдяки можливості концентрації високої енергії в малому обсязі дуже популярно і веде до економії часу на приготування їжі. Недоліком мікрохвильового нагріву є нерівномірний розподіл електромагнітних і теплових полів в резонаторі мікрохвильової печі, що впливає не тільки на якість приготування їжі, але також нерівномірність може призвести до того, що коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) значно перевищує нормальний для магнетрона, що змушує розробника використовувати додаткові пристрої для захисту магнетрона, наприклад, феритові вентиля, реле та ін. Причиною більшості відмов мікрохвильових печей є вихід з ладу магнетронного генератора, який також є найдорожчою частиною мікрохвильової печі. З метою попередження виходу з ладу мікрохвильових печей доцільно оснастити вимірювальними приладами кожну мікрохвильову піч. Це буде економічно виправдано, якщо вартість мікрохвильової печі з вимірювальним приладом зросте несуттєво в порівнянні без вимірювального приладу. Отже в даній роботі розглядаються способи покращення рівномірності нагрівання продукту у мікрохвильовій печі за рахунок використання вимірювального обладнання, яке визначає прохідну потужність в мікрохвильовій печі.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Побудова мікрохвильової печі

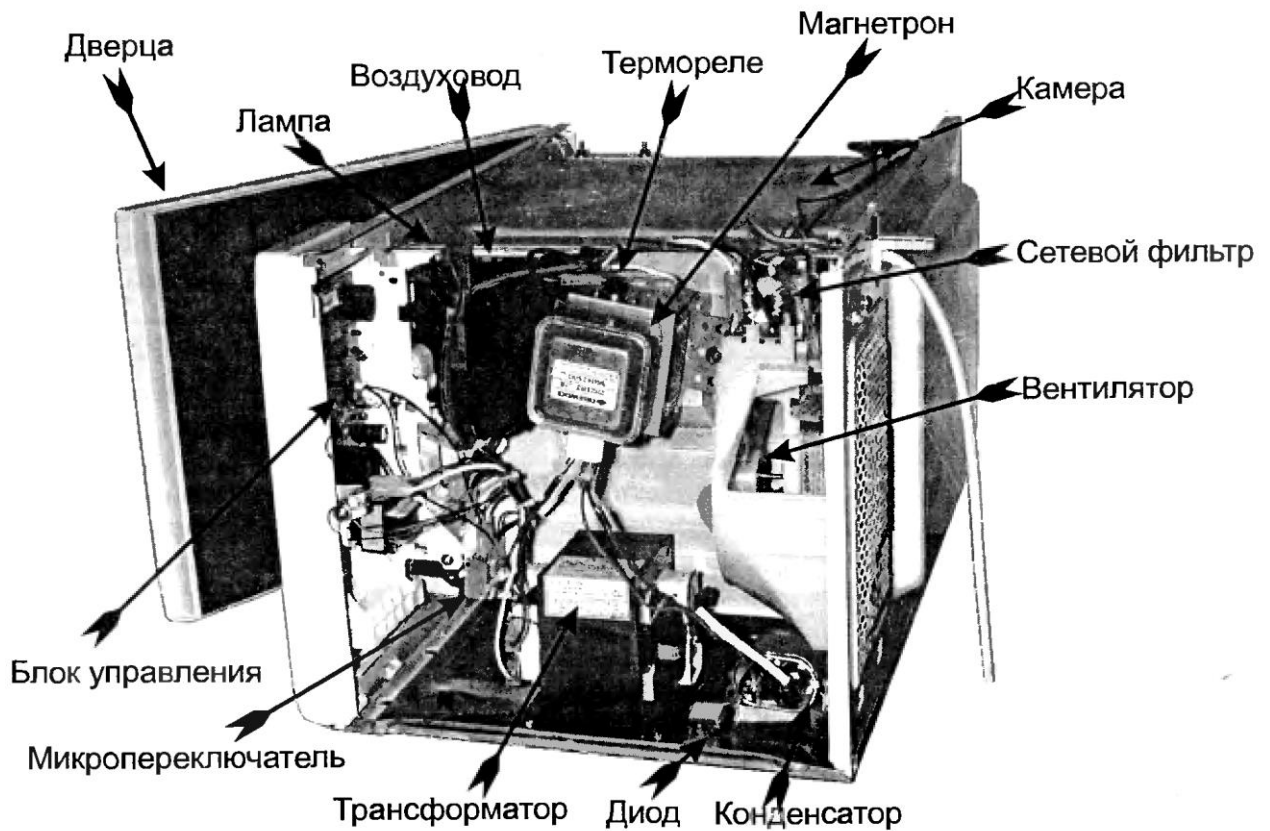


Рисунок 1.1 – Основні вузли мікрохвильової печі [3]

Приготування їжі відбувається в металевій камері, обладнаній дверцятами для захисту від випромінювання. Для забезпечення рівномірності нагрівання їжі слугує піддон, який обертається, який приводиться до руху мікродвигуном, який розташований під камерою. Іноді замість обертаючогося піддону з тією же метою використовується диссектор – металева деталь, яка за зовнішнім виглядом нагадує пропелер, який розташований у верхній частині камери і прикритий діелектричним вікном з радіопрозорого матеріала. Мікрохвильова енергія поступає до камери від магнетрона, яка правило скрізь відрізок прямокутного хвилеводу. Для охолодження магнетрона в процесі роботи

призначений вентилятор. Тепле повітря від магнетрона скрізь повітрявід спрямовується до камери, що забезпечує додаткове нагрівання їжі, і потім разом з утвореною парою виводиться скрізь спеціальні невидпромінюючі отвори. Високовольтний блок живлення магнетрона складається з трансформатора, конденсатора і діода. Щоб не допустити роботу мікрохвильової печі з нещільно зачиненими дверцятами, використовуються блокуювальні мікроперемикачі. В залежності від типу мікрохвильової печі їх нараховується від 2 до 5 штук. Освітлення в камері здійснюється лампою розжарювання, яка за звичай розташовується в повітряводі. Режим роботи печі завдається за допомогою блоку керування. Останній може бути виконаний або у вигляді електромеханічного таймера, або у вигляді електронного блоку, як правило, на основі мікроконтролера. Для попередження наводок від працюючої мікрохвильової печі в зовнішнє коло використовується сітьовий фільтр, на якому також розташовані один чи два запобіжника. Щоб попередити вихід печі із ладу від перегрівання, багато з них мають термореле, які звичайно розташовуються на магнетроні і на камері з зовнішнього боку [3].

1.2 Камери резонатори мікрохвильової печі та проблема нерівномірності нагрівання в них

Якщо в хвилеводі на шляху розповсюдження електромагнітної хвилі поставити металеву стінку, то хвиля відіб'ється від неї і рушить в протилежному напрямку. Дійшовши протилежної стінки, вона знов відіб'ється, і цей процес буде повторюватись до тих пір, поки через втрати енергій в стінках хвилеводу хвиля остаточно не згасне. Якщо при цьому фази багатократно відбитих від стінок хвиль будуть співпадати, то ці хвилі взаємно підсилюючи одна одну, можуть в сотні разів збільшити напруженість поля в розглянутій області.

Додавання однакових за частотою і амплітудою хвиль, які рухаються в протилежних напрямках, дасть стоячу хвилю. Тому в розглянутому об'ємі структура полів вздовж поздовжньої осі буде подібна структурі поля вздовж інших координат.

Явище при якому підсилюється амплітуда коливань – резонанс, а пристрій в якому відбувається це явище відповідно резонатор. Геометричне тіло, отримане в результаті маніпуляцій з хвилеводом не що інше як призма і відповідно такі резонатори називаються призматичними. Призматична форма не є обов'язковим атрибутом резонатора. Будь-який об'єм обмежений з усіх боків провідячою поверхнею може розглядатися як резонатор. Однак на практиці намагаються використовувати прості форми, оскільки їх параметри можуть бути розраховані аналітично [2].

Аналогом резонатора в радіотехніці служить коливальний контур. Як і в коливальному контурі основними параметрами резонатора є частота і добротність.

Сукупність типів хвиль, які існують в хвилеводі, трансформуються в стоячі хвилі резонатора, які утворюють сукупність типів коливань. За аналогією з прямокутним хвилеводом, види коливань призматичного резонатора позначаються шляхом додавання до типу хвилі ще одного індекса, який вказує кількість стоячих напівхвиль вздовж поздовжньої координати.

Кожен вид коливань в резонаторі характеризується власною резонансною частотою і добротністю. Аналогічно хвилеводу, самий низькочастотний вид називається основним, інші – вищими. На практиці зазвичай використовується основний вид. Камера мікрохвильової печі, яку можна розглядати як призматичний резонатор є винятком.

Власна частота робочої камери як призматичного резонатора визначається у вигляді

$$f_{mnl} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{L}\right)^2} \quad (1.1)$$

Для резонатора об'ємом $V = 81 \text{ л} = 81 \text{ дм}^3$ довжина сторони $a = 432,6 \text{ мм}$ і якщо робоча власна частота $f = f_{mnp} = 2450 \text{ МГц}$, то індекси типів коливань повинні задовольняти умові $m^2 + n^2 + p^2 = 50$, яка виконується для коливань типу H_{505} . Якщо такий вид коливань прийняти за робочий, то спостерігається виродження, при якому коливання E_{055} , H_{435} , H_{543} , E_{543} мають прийняту робочу частоту 2450 МГц [8].

Кількість власних коливань призматичного резонатора в смузі хвиль $0 \leq f \leq f_{\max}$ може бути оцінено за допомогою криволінійної апроксимації рівняння (1.1)

$$N = \frac{8\pi V}{3} \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi S}{2} \left(\frac{f}{c}\right)^2 + (a + b + L) \left(\frac{f}{c}\right), \quad (1.2)$$

яка дозволяє з достатньою точністю визначити число можливих резонансних частот робочої камери в смузі частот живлячого магнетрона

Велика кількість близько розташованих по частоті власних коливань робочої камери створює сприятливі умови для розробки ефективних НВЧ печей в широкому діапазоні завантажувальних характеристик.

ККД резонаторної камери

$$\eta = \frac{P_D}{P_0} = \frac{Q_0 - Q_D}{Q_0} \quad (1.3)$$

де Q_0 - добротність порожнього резонатора, Q_d - добротність резонатора завантаженого діелектриком. Добротність порожнього резонатора через можливість збудження коливань різних типів доцільно оцінити за співвідношенням

$$Q_0 \approx K_T \frac{2V}{S\delta} \quad (1.4)$$

де V – його об'єм, S – площа внутрішньої поверхні.

Реальний коефіцієнт технологічної якості камери, яка має декілька з'єднувальних швів, контакт двері і захисну сітку, слід оцінювати як $K_T = 0,4-0,5$ і добротність незаповненої камери $Q_0 \approx 10^4$. Для досягнення ККД камери $\eta = 90\%$ її навантажена добротність повинна складати $Q_d \approx 1,1 \cdot 10^3$. ККД камери НВЧ печі перевищує 65-70% при коефіцієнті завантаження $K_3 = V_B / V = 0,5\%$ [4].

Основна проблема, яка виникає в камері мікрохвильової печі, – це нерівномірність нагрівання продукту. Причина полягає в тому, що камера, по суті є резонатором, коливання в якому відбуваються у вигляді стоячих хвиль. Особливість стоячих хвиль є наявність просторових максимумів і мінімумів електричного поля. Для наочності на рис.1.2 показана зміна електричного поля за пів періода коливань на виді H_{220} .

З рисунка добре видно, що при роботі на одному виді коливань потужність в камері розподілена дуже нерівномірно, змінюючись від нуля до свого максимального значення, тому продукт в один і той же час може в одних місцях підгорати, а в інших залишатися зовсім холодним.

Камера мікрохвильової печі працює на вищих видах коливань, кількість яких може бути достатньо велика. Для рівномірного нагріву бажано мати як можна більше видів коливань поблизу робочої частоти. Досягнути цього при фіксованій частоті випромінювання можна декількома шляхами. Один з них – збільшення розмірів камери. В цьому випадку основний вид і всі наступні зсуваються в область низьких частот, а на робочій частоті опиняються більш щільно розташовані високочастотні види. Завантаження камери призводить приблизно до такого ж результату, що і збільшення її розмірів. Це пояснюється тим, що продукти приблизно на 80% складаються з води, яка має велику діелектричну проникність. А при заповненні резонатора діелектриком з $\epsilon > 1$ його резонансна частота зсувається в область більш низьких значень. При завантаженні камери знижується також і її добротність, що в свою чергу призводить до розширення смуги робочих частот і, як наслідок, до збільшення кількості робочих видів коливань.

Сама по собі наявність великої кількості видів коливань ще не забезпечує рівномірності нагріву. Сумарне електричне поле, утворене суперпозицією всіх видів коливань, може бути дуже складним, але в будь-якому випадку через чергування направленості воно буде містити максимуми і нульові точки. Приклад такого поля наведений на рис.1.2

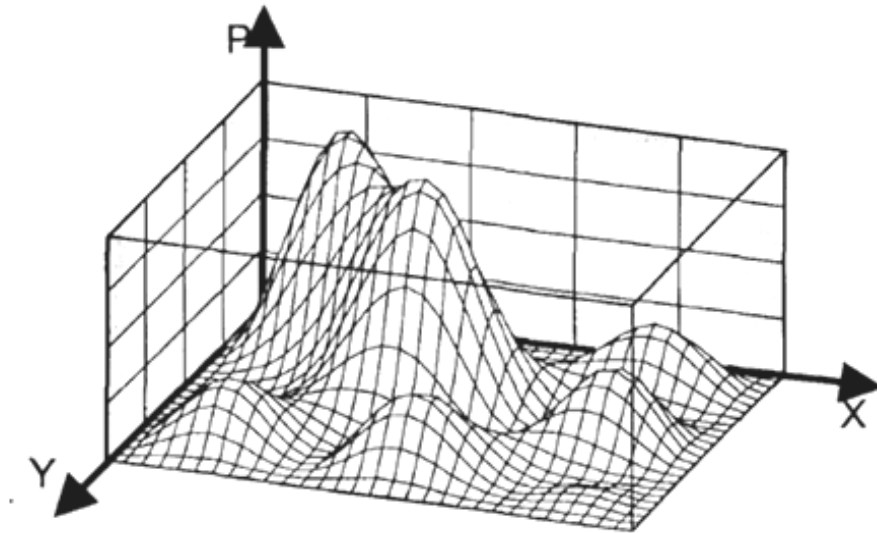


Рисунок 1.2 – Розподіл потужності пів періода коливань на виді H_{220} .

При наявності поглинаючого навантаження яким є продукт, розподіл полів в камері ускладнюється. Якщо наявні коливання вмикати по черзі, то додавання або віднімання виду коливань призводить до зміни структури поля. Те ж саме відбувається, коли змінюється співвідношення амплітуд різних видів. Ділянки з максимальною і мінімальною амплітудою зсуваються в просторі камери і можуть мінятися місцями. В результаті кожна ділянка продукту підлягає впливу полів різної конфігурації і інтенсивності. При великій кількості комбінацій нагрів в робочій камері може бути достатньо рівномірним. Виключення становлять ділянки поблизу ребер і кутів камери, де поле навіть теоретично не може бути велике. В якості прикладу на рис.1..3 показаний розподіл щільності потужності електромагнітного поля при послідовному збудженні декількох видів.

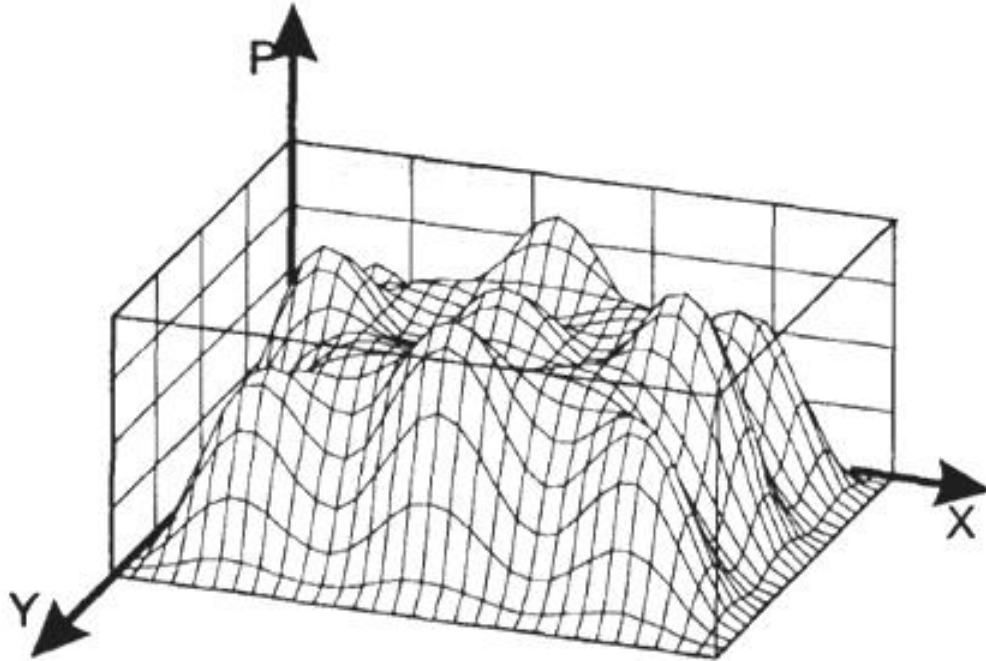


Рисунок 1.3– Розподіл середньої потужності в камері при почерговому збудженні видів H_{110} , H_{120} , H_{210} , H_{220} , H_{330} , H_{440} .

1.3. Засоби вимірювання нерівномірності та поліпшення рівномірності розподілу поля в резонаторах мікрохвильової печі

1.3.1 Відомі методи вимірювання неоднорідності електромагнітного поля в резонансній камері візуальне спостереження за розподілом електромагнітних полів за викликаним ним тепловим ефектом. Серед них методи, засновані на використанні термофотоматеріалів, термоактивних паперів, термоіндикаторів, рідких кристалів, люмінофорів та ін.[5] Ці методи дозволяють фіксувати картину розподілу теплового поля тільки на поверхні мікрохвильового поглиначча, який термоіндикатор фіксує. Поверхневий тепловий рельєф служить лише для судження про розподіл електромагнітного поля на поверхні зразка продукту. Він не характеризує ні розподіл тепла всередині зразка продукту, ні розподіл електромагнітного поля в камері мікрохвильової печі.

Стандартна процедура вимірювання однорідності електромагнітного поля в мікрохвильовій печі полягає в наступних етапах: 5 склянок по 100 грамів питної води в кожній розташовують на дні резонансної камери мікрохвильової печі таким чином, щоб одна склянка в центр і інші з чотирьох сторін. Після цього вмикають мікрохвильову піч, вода в склянках нагрівається протягом 2 хвилин і вимикають мікрохвильову піч. Потім температуру води в кожній склянці вимірюють термометром. Показники термометра зазвичай різні. Потім за формулою розраховується коефіцієнт рівномірності. Це непрямий метод вимірювання рівномірності розподілу електромагнітного поля в мікрохвильовій печі. Його недоліком є велика невизначеність у визначенні коефіцієнта однорідності, викликана різницею об'ємів води в кожній склянці, зміна температури води в кожній склянці, викликана зміною температури протягом часу з моменту включення мікрохвильової печі. до моменту, коли в кожному з п'яти склянок занурюють термометр.

У сучасних НВЧ-камерах резонаторного типу, як правило, використовується спосіб збудження за допомогою однієї прямокутної щілини (розташованої збоку камери), при цьому, однак, без механічного переміщення матеріалу, що нагрівається, або застосування дисекторів забезпечити однорідну щільність теплових джерел в обсязі матеріалу неможливо. Для вирішення цього завдання використовують багатощілинну систему збудження для забезпечення необхідного розподілу електричного поля в області розташування оброблюваного матеріалу. Розташування оброблюваного матеріалу в ближній зоні збудження дозволяє за допомогою зміни властивостей збуджуючої системи керувати розподілом питомої щільності теплових джерел в обсязі діелектричного матеріалу, що обробляється, і підвищувати рівень рівномірності нагріву. Це положення апробується при моделюванні трищільної системи збудження електромагнітного поля у резонаторній камері з розмірами

300x270x250 мм, що відповідає габаритам робочої камери НВЧ печі LG MS-192U. У камері є діелектричний зразок у формі суцільного шару висотою 20 мм [9]

В даний час для термообробки рідких діелектричних середовищ за допомогою електромагнітної (ЕМ) енергії поряд з добре відомими конструкціями камер прямокутної та циліндричної (www.MicroThermics.com) конфігурації успішно застосовуються НВЧ нагрівальні пристрої на хвилеводах складної форми. Одним із таких пристроїв є камера лабораторного аналізу для дослідження процесів НВЧ стерилізації фізіологічних розчинів на прямокутному хвилеводі Т-ребром (ПХТР). При цьому можливі дві модифікації цієї системи з однією та двома фторопластовими трубками, заповненими рідиною та розміщеними в ємнісному зазорі хвилеводу, де напруженість поперечного електричного поля (E_t) максимальна. Методом кінцевих елементів (МКЕ) були встановлені залежності нормованих критичних довжин хвиль двох нижчих типів, що поширюються в неоднорідному ПВТР, від геометричних розмірів системи, та значень діелектричної проникності заповнення технологічного каналу в інтервалі $2 \leq \epsilon' \leq 81$, а також структури цих полів типів для $\epsilon' = 4, 9, 25, 81$. Крім того, були проведені вимірювання характеристик узгодження даної системи поблизу робочої частоти генератора $f_0 = 2375$ МГц, які продемонстрували прийнятний рівень відбитої потужності ($K_{CB} \leq 1.5$) для випадку, коли трубка діаметром 5 мм заповнена водою, а розміри камери відповідають нормованим значенням: $b/a = 0,5$; $l/a = 0,05$; $t/a = 0,6$; $d/b = 0,3$ [10].

У сучасних мікрохвильових нагрівальних установках збудження здійснюється однощільним способом із застосуванням обертання піддону з матеріалом, що обробляється. Однак даний підхід не дозволяє забезпечити необхідну рівномірність нагріву, оскільки обертальна обробка діелектричного матеріалу при даному способі збудження електромагнітного поля не дозволяє

забезпечити однорідність радіальну теплового поля в обсязі оброблюваного матеріалу. При цьому радіальна складова неоднорідності теплового поля не усувається механічним шляхом. В даному випадку зазначена задача може бути вирішена принципово іншим способом, а саме модернізацією та вдосконаленням системи збудження резонаторних структур, тобто створенням розподілених систем збудження (багатощілинне збудження) з електронним управлінням подачі НВЧ-потужності до робочої камери. Це принципово важливо для НВЧ-нагрівальних установок резонаторного типу, оскільки дозволяє створити новий перспективний клас мікрохвильових нагрівальних установок, що забезпечують заданий електротехнологічний процес термообробки різних діелектричних матеріалів. Проведене вивчення власних електродинамічних властивостей і структури електромагнітного, і навіть теплового полів у робочих камерах НВЧ-нагрівальних установок резонаторного типу за різної конфігурації розподілених джерел електромагнітного поля. Враховуючи довільність габаритів та електрофізичних властивостей оброблюваного матеріалу, дослідження електродинамічних властивостей резонаторних структур, розподілу питомої щільності теплових джерел в обсязі оброблюваного матеріалу та відповідно теплового поля доцільно проводити на основі чисельних методів: методу кінцевих елементів із застосуванням принципу Галеркіна та зважених нев'язок (програми «Meloss WGTА») та методу кінцевих різниць з використанням швидкого перетворення Фур'є. Однак даний підхід не виключає аналітичного рішення внутрішньої крайової задачі електродинаміки і теплопровідності для стандартних ситуацій (прямокутний зразок у прямокутному резонаторі; циліндричний зразок в циліндричному резонаторі), що дозволяє протестувати ефективність запропонованої системи збудження резонаторної камери з частковим діелектричним, поглинаючим шаром. Необхідно відзначити, що застосування чисельних методів вирішення

внутрішньої крайової задачі електродинаміки та теплопровідності (ВКЗЕіТ) дозволяє визначити геометрію робочої камери в області розташування оброблюваного матеріалу, що забезпечує необхідний розподіл питомої щільності теплових джерел в обсязі оброблюваного матеріалу, а, отже, заданий електротехнологічний процес термообробки. Зміна геометрії робочої камери в області розташування оброблюваного матеріалу – дуже ефективний спосіб забезпечення необхідного технологічного процесу термообробки довільних діелектричних матеріалів електромагнітному полі НВЧ. Зауважимо, що найбільший ефект при цьому досягається, якщо зразок знаходиться в ближній зоні збудження (пряме збудження резонаторних структур камер з боку нижньої стінки, на якій розташовується матеріал, що обробляється), коли зміна властивостей збуджуючої електромагнітне поле системи найбільше впливає на розподіл питомої щільності теплових джерел в обсяг оброблюваного матеріалу. Автоматичне керування системою збудження резонаторної камери також дуже ефективно і дозволяє підвищити рівень рівномірності нагріву довільних діелектричних матеріалів. Зауважимо, що дослідження процесу термообробки різних діелектричних матеріалів у НВЧ-нагрівальних установках резонаторного типу та ефективності розподілених систем збудження доцільно проводити як на основі вирішення спільної внутрішньої крайової задачі електродинаміки та теплопровідності, так і експериментально, що становить найбільший інтерес. Це пов'язано з тим, що дослідження електродинамічних та теплових властивостей робочих камер резонаторного типу – в аналітичному плані надзвичайно трудомістке завдання, оскільки конструкція НВЧ-нагрівальних установок резонаторного типу є взаємопов'язаною електродинамічною системою (хвилевод – резонатор), до якої включений генератор НВЧ-потужності з його резонансні властивості (генератор магнетронного типу). Враховуючи взаємозв'язок даних структур через багатошліпну решітку

збудження, дана ВКЗЕІТ стає надзвичайно складною, навіть за чисельного її вирішення за допомогою програм «Meloss» та «WGTA». Експериментальний метод в даному випадку зручний тим, що визначає інтегральний ефект процесу нагрівання оброблюваного матеріалу в НВЧ-нагрівальних установках резонаторного типу. При цьому необхідно відмітити, що чисельне моделювання даних нагрівальних структур дозволяє оцінити ефективність систем збудження в досягненні необхідного режиму електротехнології термообробки різних діелектричних матеріалів, що поглинають НВЧ потужність. Наведено результати чисельного рішення внутрішньої крайової задачі електродинаміки для резонаторних структур прямокутної форми з частковим діелектричним заповненням. Під час збудження робочої камери за допомогою прямокутних щілин, розташованих на широкій стінці хвилеводу перпендикулярно основній хвилі прямокутного хвилеводу. Результати аналізу наведено для різного розміщення щілин за шириною резонаторної камери. При цьому розрахунок проводиться при незмінності положення магнетронного збудження робочої камери, а також за сталості поздовжньої системи збудження. Таке положення дозволяє визначити вплив переміщення збуджувальних щілин у напрямі поширення домінантної хвилі прямокутного хвилеводу на структуру електричного поля і відповідно на розподіл питомої об'ємної щільності теплових джерел обсягом оброблюваного матеріалу. Однак дані результати чисельного розрахунку демонструють можливість вирішення внутрішньої крайової задачі електродинаміки при сторонніх джерелах електромагнітного поля, але не дозволяють оптимізувати систему збудження, що забезпечує заданий електротехнологічний процес[11].

НВЧ-нагрівальні установки резонаторного типу є складною взаємопов'язаною електродинамічною системою, що включає: прямокутний хвилевід (ПХ), за допомогою якого здійснюється підведення електромагнітної

енергії в резонаторну камеру; безпосередньо магнетронний генератор НВЧ-потужності; багатощілинні випромінюючі ґрати (БГ); прямокутну резонаторну камеру (РК), частково заповнену матеріалом, що обробляється довільної форми. Якщо в якості безпосередньо випромінюючої системи використовується багатощілинна розподілена решітка, то система збудження (СЗ) є системою з багатьма ступенями свободи. Отже, електродинамічні та теплові процеси в РК залежать від багатьох параметрів СЗ, що значно ускладнює процес оптимізації режиму термообробки діелектричних матеріалів у НВЧ-нагрівальних установках резонаторного типу. Ситуація ускладнюється тим, що дані установки є універсальними і призначені для термообробки діелектричних матеріалів довільної форми, електрофізичні та теплові властивості яких можуть змінюватися в процесі термообробки. У цій роботі запропоновано методику експериментальної оптимізації СЗ стосовно заданого технологічного процесу термообробки діелектричного матеріалу, фізичні властивості якого незмінні в процесі нагрівання. Це дозволяє найбільш просто та повно розкрити суть процесу оптимізації СЗ. В експериментальній установці як РК використовується резонатор прямокутної форми розміром 210x310x300 мм. Оброблюваним матеріалом є вода, розлита в 16 пластикових стаканчиків, рівномірно розташованих на нижній стінці резонатора. Підведення НВЧ-потужності від генератора до випромінюючої системи здійснюється за допомогою прямокутного хвилеводу перетином 45×90 мм. Як випромінювальна система (ІВ) використовується трищільна система збудження з щілинами прямокутної форми, розташованими на відстані $\lambda_{\text{хв}}/2$ один від одного ($\lambda_{\text{хв}}$ – довжина хвилі в прямокутному хвилеводі в доміантному діапазоні). Розглянемо систему параметрів, що визначають заданий електродинамічний процес термообробки діелектричних матеріалів у НВЧ-нагрівальних установках резонаторного типу. По-перше, це система параметрів, що дозволяє визначити

ефективність передачі НВЧ-потужності від магнетрона в робочу камеру за допомогою прямокутного хвилеводу, що працює в домінантному режимі, при якому хвилевод поширюється основна хвиля – H_{10} . Одним із основних параметрів, що визначають рівень потужності, яка надходить у резонаторну робочу камеру НВЧ, є відстань від лівого короткозамикаючого поршня до центру виведення НВЧ-потужності магнетрону – L_l . Необхідно відзначити, що в побутових мікрохвильових установках використовується ємнісний спосіб збудження, коли виведення магнетрону вводиться безпосередньо в центрі широкої стінки хвилеводу паралельно вектор напруженості електричного поля хвилі H_{10} . Слід зауважити, що параметр L_l визначається за допомогою вимірювальної лінії, навантаженої на узгоджене навантаження, крім того, цей параметр може бути визначений і за допомогою панорамних вимірювань із тим самим навантаженням. Цей процес вимірювань відноситься до «холодних» вимірювань власних електродинамічних параметрів НВЧ-пристроїв, який проводиться на малих рівнях потужності ($P = 5$ мВт). При зазначеному розподіленому способі збудження для полегшення оптимізації подачі НВЧ-потужності параметр L_l , визначений по максимуму рівня поглиненої потужності в узгодженому навантаженні, у подальших дослідженнях є незмінною величиною ($L_l = 23$ мм). Оптимізація ж розподіленої системи збудження визначається положенням короткозамикаючого поршня з протилежним розташуванням магнетрону боку – L_{pr} [12].

У роботі [13] розглядається процес збудження електромагнітного поля в хвилеводних і резонаторних камерах і нагрівання діелектричних матеріалів, що поглинають НВЧ потужність. Найбільші труднощі становить рішення неоднорідної внутрішньої крайової задачі електродинаміки та теплопровідності (ВКЗЕіТ) для електродинамічних систем з термодинамічним заповненням, оскільки електрофізичні та теплові параметри оброблюваного матеріалу

змінюються в процесі нагрівання, при цьому їх температурна залежність визначається експериментально, що не дозволяє вирішити ВКЗЕіТ аналітичними методами. Спрощуючим моментом вирішення цього завдання є адіабатичне наближення, яке констатує факт значної інерційності теплового процесу порівняно з часовою зміною електромагнітного поля. Фізично це означає, що електромагнітне поле практично безінерційно приходить в рівновагу при зміні фізичних властивостей матеріалу в процесі нагрівання. Це дозволяє вважати електрофізичні та теплові параметри термодинамічного матеріалу незмінними на періоді коливання поля.

Висновки до розділу 1

Камера мікрохвильової печі з точки зору електродинаміки є резонатором. Резонатор характеризується резонансною частотою та добротністю. Перевагою мікрохвильових резонаторів є висока добротність, а недоліком нерівномірність розподілу поля в них. Теплове поле в камері повторює електромагнітне, нерівномірність теплового поля призводить до різного нагріву тіл в камері печі.

Для покращення рівномірності нагрівання застосовуються піддони, які обертаються, а також диссектори, але цього недостатньо. Використовуються методи для кількісного визначення нерівномірності термопапір, який зміною кольору показує де яка температура, та інший метод з розташуванням в камері печі стаканів з водою і визначенню термометром температури в кожному стакані, яка має різні значення для різних місць розташування стаканів. З наступним розрахунком коефіцієнта нерівномірності.

Також використовується багатоцілінне збудження та зміна форми камери від звичайної призматичної до більш складних.

Як математичний апарат використовується числені методи електродинаміки, наприклад, метод кінцевих елементів (МКЕ). В ряді випадків

розрахунки доповнюються моделюванням, найбільш відомі такі програми як Meloss WGTA.

2 МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА СПІВВІДНОШЕНЬ

2.1 Метод поліпшення рівномірності нагрівання

Поліпшення якості мікрохвильової печі можна досягти, якщо використовувати вимірювач потужності. Отримання інформації про прохідну потужність із сигналів датчика в вимірювачі потужності може бути виконано шляхом визначення прохідної потужності як середнього геометричного сигналів датчика. Головна перевага такого підходу – простота автоматизації. Обмеження алгоритму обчислення пропускної потужності як середнього геометричного значення сигналів двох датчиків полягають у математично строгих виразах. Його можна отримати, лише якщо взяти сигнали двох датчиків на максимумі та мінімумі стоячої хвилі. Коли датчики не були розміщені в максимумі і мінімумі стоячої хвилі, з'являється похибка. Тому потрібно вносити поправку, і оцінити невиключений залишок похибки.

Метою подальшого дослідження є створення методу вимірювання нерівномірного розподілу електромагнітного поля в мікрохвильовій печі, замість непрямого складного вимірювання температури пропонується пряме вимірювання пропускної потужності мікрохвильового генератора. Це дозволяє зменшити невизначеність вимірювання та спростити метод вимірювання та пристрій, що його реалізує.

2.1 Спосіб вимірювання нерівномірності за допомогою ватметра прохідної потужності

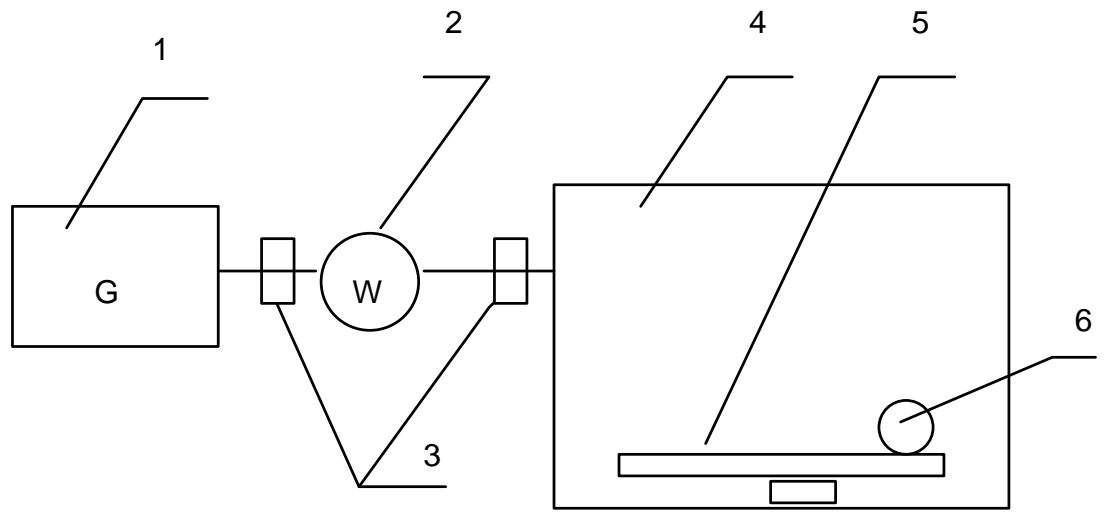


Рисунок 2.1– Мікрохвильова піч з ватметром прохідної потужності

Для поліпшення рівномірності нагрівання мікрохвильової печі вона доповнена ватметром (рис. 2.1), установка складається з НВЧ-генератора 1, ватметра прохідної потужності 2, резонаторної камери мікрохвильової печі 4, обертового столика з обертачем 5, пробного тіла 6. У резонансній камері мікрохвильової печі 4 на обертовому столику 5 встановлено досліджуване тіло 6. Генератор НВЧ 1, випромінюючи падаючу потужність $P_{пад}$ електромагнітного поля, через хвилевід 3, на якому встановлені датчики потужності 2, підключається до камери мікрохвильової печі 4 [6]. Прохідна потужність, яку поглинає досліджуване тіло, дорівнює

$$P_{прох} = P_{пад} (1 - \Gamma^2), \quad (2.1)$$

де Γ – модуль коефіцієнта відбиття пробного тіла від. Γ залежить від розміщення пробного тіла в камері мікрохвильової печі. При зсуві пробного тіла b від центру до периферії обертового спроби отримують нове значення прохідної потужності. Пробне тіло зсувають до отримання повної картини розподілу нерівномірності електромагнітного поля в камері мікрохвильової печі 4. У такий спосіб можна здійснити розташування проби в трьох точках, розташованих під кутом 120 градусів від осі обертання.

На рис. 2.2 наведено зображення вдосконаленого пристрою для підвищення рівномірності нагрівання в мікрохвильовій печі. Пристрій для підвищення рівномірності нагрівання в мікрохвильовій печі складається з мікрохвильового генератора 1, ватметра прохідної потужності 2, резонаторної камери мікрохвильової печі 3, а. блоку 4 позиціонування проби в трьох точках під кутом 120 градусів від осі обертання, блок зберігання попереднього виміряного сигналу 5. Порівнюються попередні та поточні значення сигналу, результат порівняння визначає напрямок обертання проби 7.

Ватметр 2 виконує вимірювання значень потужності в двох положеннях проби, розташованих під кутом 120 градусів. Є три різні співвідношення між поточним і попереднім виміряними сигналами: значення однакове, або перше значення більше ніж друге, або друге значення більше ніж перше. Перший випадок відповідає рівномірному нагріванню.

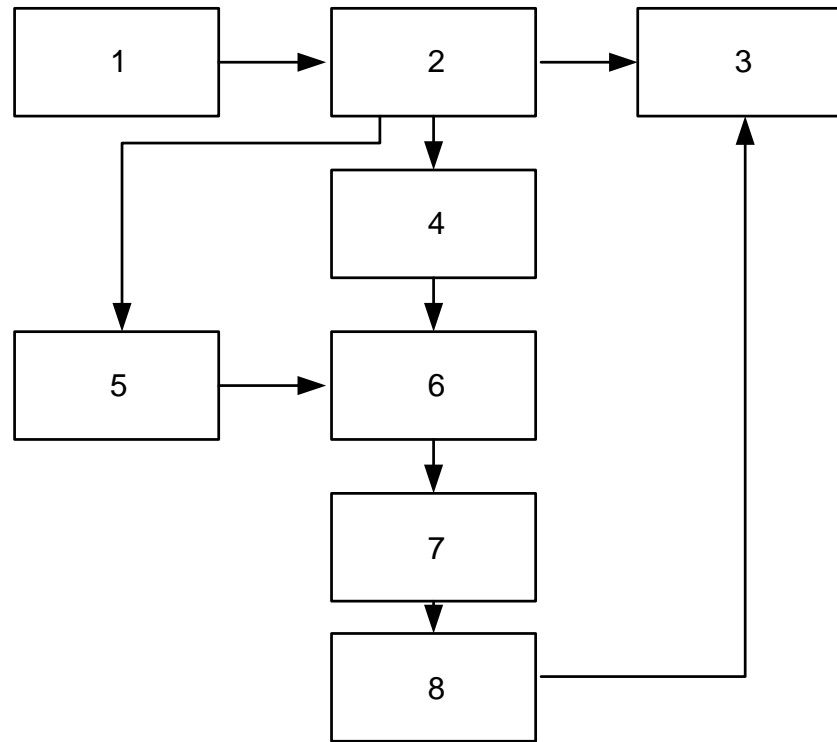


Рисунок 2.2 – Пристрій для підвищення рівномірності нагріву мікрохвильової печі

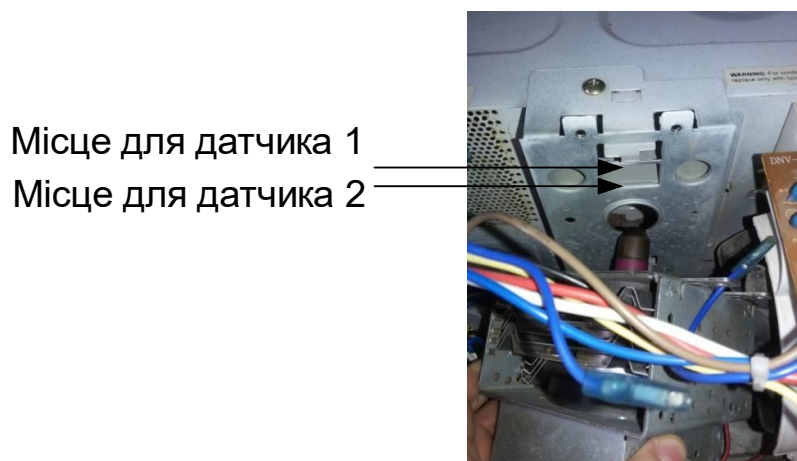


Рисунок 2.3 – Місця розташування датчиків у мікрохвильовій печі

2.2 Алгоритм розрахунку прохідної потужності

Принцип роботи вимірювача потужності в мікрохвильовій печі заснований на багатозондовому методі. Багатозондовий метод передбачає отримання інформації про параметри сигналів і тракту із сигналів датчиків, що є непрямим вимірюванням. У мікрохвильовому тракту між генератором і навантаженням існує стояча хвиля. Амплітуда стоячої хвилі залежить від розузгодження тракту.

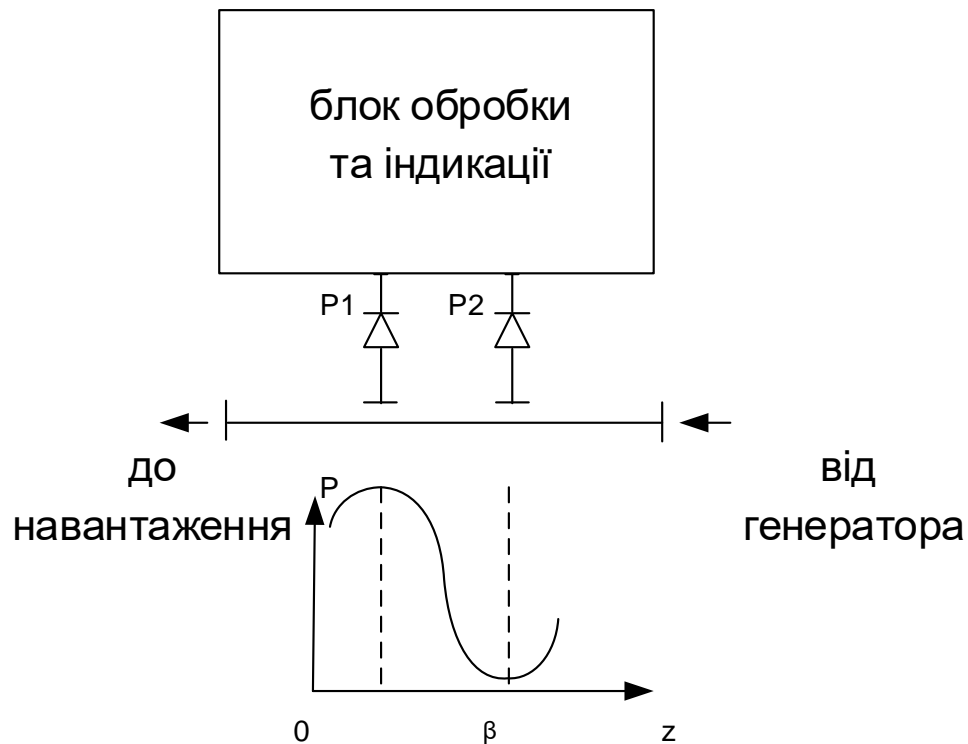


Рисунок 2.4 – Принцип багатозондового методу вимірювань

Багатозондовий метод використовує сигнал певної кількості датчиків у мікрохвильовому тракту для обчислення падаючої та відбитої потужності, модуля та фази коефіцієнта відбиття навантаження [7].

Алгоритми відіграють особливу роль у багатозондовому методі. Алгоритми багатозондових пристроїв можна розділити на аналітичні та графічні. Графічні моделі в основному базуються на представленні імпедансу комплексним числом i , отже, на побудові імпедансу на комплексній площині, наприклад, діаграма Сміта. Завдяки зв'язку між імпедансом і коефіцієнтом відбиття було використано графічне представлення в дванадцятиполюсному аналізаторі кіл. Відповідно до цього сигнали датчиків в цій моделі представлені колами. Центри кіл відповідають розташуванню датчиків між генератором і терміналом, радіуси кіл пропорційні показанням сигналу датчика. Комплексний коефіцієнт відбиття закінчення знаходиться як точка перетину кіл, що відповідає розв'язку системи рівнянь, де кожне рівняння відповідає датчику. Сигнали датчиків в аналітичних методах є

$$\begin{cases} P_1 = P_{пад} (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\phi)) \\ P_2 = P_{пад} (1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\phi + \theta)) \end{cases} \quad (2.2)$$

де Γ – модуль коефіцієнта відбиття, ϕ – фаза коефіцієнта відбиття, β – фазова відстань між сусідніми датчиками, $P_{пад}$ – падаюча потужність. $\beta = 4\pi l/\lambda_{хв}$, де $\lambda_{хв}$ – довжина хвилі у хвилеводі, l – геометрична відстань між сусідніми датчиками.

Пропонуємо графічну інтерпретацію задачі зі статті, відмінну від традиційної в дванадцятиполюсному рефлектометрі. Ця інтерпретація заснована на піфагорівському середньому значенні та прямокутному трикутнику. Відповідно до нього по горизонтальній осі один за одним відкладають сигнали датчиків (рис.2.4). Сума сигналів датчиків приймається за діаметр кола. Радіус кола дорівнює половині суми сигналів датчика

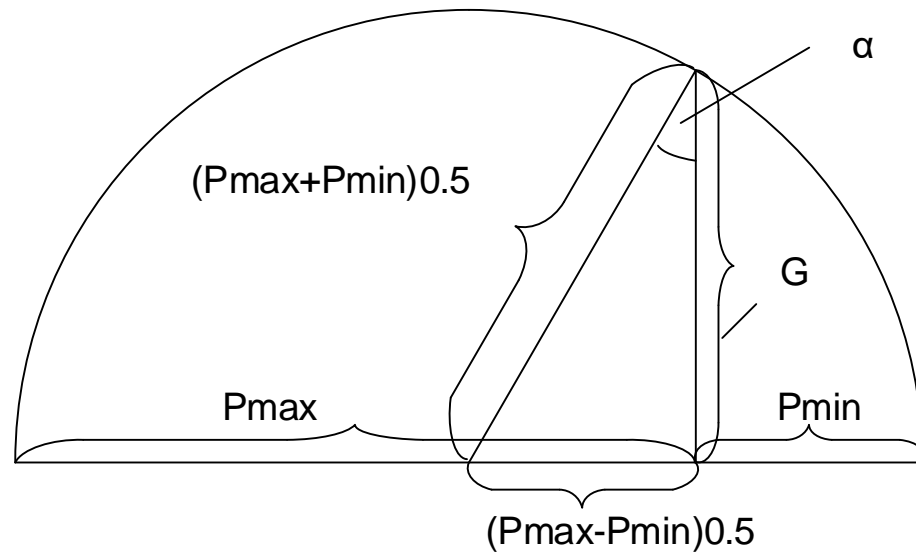


Рисунок 2.5 – Алгоритм обробки сигналу датчика як пояснення середнього геометричного

Припустимо, що є два сигнали датчика, представлені максимумом і мінімумом стоячої хвилі в тракці між генератором і навантаженням. Якщо сигнал максимальний, то косинус дорівнює 1, а якщо сигнал мінімальний, косинус дорівнює - 1. Підставимо його у вирази (2.2)

$$\begin{cases} P_1 = P_{nad}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\phi)) \\ P_2 = P_{nad}(1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos(\phi)) \end{cases} \quad (2.3)$$

Розглянемо прямокутний трикутник з гіпотенузою, що дорівнює $(P_{\max} + P_{\min})/2$, а протилежна дорівнює $(P_{\max} - P_{\min})/2$.

$$\begin{cases} P_{\max} + P_{\min} = 2P_{nad}(1 + \Gamma^2) \\ P_{\max} - P_{\min} = 4P_{nad}\Gamma \end{cases} \quad (2.4)$$

Відповідне визначенню синуса є співвідношення, протилежне гіпотенузі $(P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min})$.

$$\sin(\alpha) = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} = \frac{2\Gamma}{1 + \Gamma^2}, \quad (2.5)$$

У наступному виразі буде виведене середнє геометричне двох сигналів датчиків, що дорівнює потужності, що проходить

$$\begin{aligned} G &= 0.5(P_{\max} + P_{\min}) \cos(\alpha) = 0.5(P_{\max} + P_{\min}) \sqrt{1 - \sin^2(\alpha)} = \\ &= P_{nad} (1 + \Gamma^2) \sqrt{1 - \left(\frac{2}{1 + \Gamma^2}\right)^2} = P_{nad} (1 + \Gamma^2) \frac{1 - \Gamma^2}{1 + \Gamma^2} = P_{prox} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Як відомо, сума квадратів синуса і косинуса дорівнює 1. Трикутник, прилеглий до G на рис.2.4, є добутком гіпотенузи і косинуса кута.

Визначення середнього геометричного є квадратним коренем із добутку сигналів датчика, який показано на рис.2.4 як висота, відведена від точки з'єднання секцій, які є сигналами датчика

$$\begin{aligned}
 P_{nad} &= \sqrt{P_{\max} P_{\min}} = P_{nad} \sqrt{(1+\Gamma^2 + 2\Gamma)(1+\Gamma^2 - 2\Gamma)} = \\
 &= P_{nad} \sqrt{(1+\Gamma^2)^2 - (2\Gamma)^2} = P_{nad} (1-\Gamma^2)
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Для більш загального випадку

$$P_{prox} = \sqrt{P_1 P_2} = \sqrt{(1+\Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi))(1+\Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \theta))}
 \tag{2.8}$$

Коефіцієнт відбиття для довільного сигналу датчика

$$\Gamma = \frac{P_1 + P_2 - 2\sqrt{P_1 P_2}}{P_1 - P_2}
 \tag{2.9}$$

Значення фазового коефіцієнта відбиття φ можна розрахувати з виразу (2.2) після підстановки в нього Γ з виразу (2.9). Отже, коефіцієнт відбиття фази φ з (2.2) дорівнює

$$\varphi = \arccos \left(\frac{P_1 - P_{nad} (1 + \Gamma^2)}{2\Gamma P_{nad}} \right)
 \tag{2.10}$$

Мінімальні значення є ідеальним випадком. В іншому випадку слід враховувати невизначеність.

2.3 Невизначеність розрахунку прохідної потужності

Було обрано відстань двох датчиків один від одного по хвилеводу, що дорівнює чверті довжини хвилі, коефіцієнт відбиття навантаження $\Gamma = 0,1$ для моделювання. $\Gamma = 0,1$ відповідає незначно невідповідному тракту. На рис. 2.5 показані сигнали датчиків і залежність пропускної потужності від фази коефіцієнта відбиття навантаження. Коли сигнал першого датчика мінімальний, а сигнал другого датчика максимальний, значення середнього геометричного сигналу є найближчим до його теоретичного значення прохідної потужності, що підтверджує можливість використання середнього геометричного для розрахунок прохідної потужності. Реальні обчислення, на відміну від ідеальних алгоритмів, супроводжуються похибками. Залежність похибки від фази коефіцієнта відбиття називається похибкою неузгодженості. Його значення обчислюють за виразом

$$\delta = \left(\frac{P_{прох}}{P_{над}(1-\Gamma^2)} - 1 \right) \cdot 100, \quad (2.11)$$

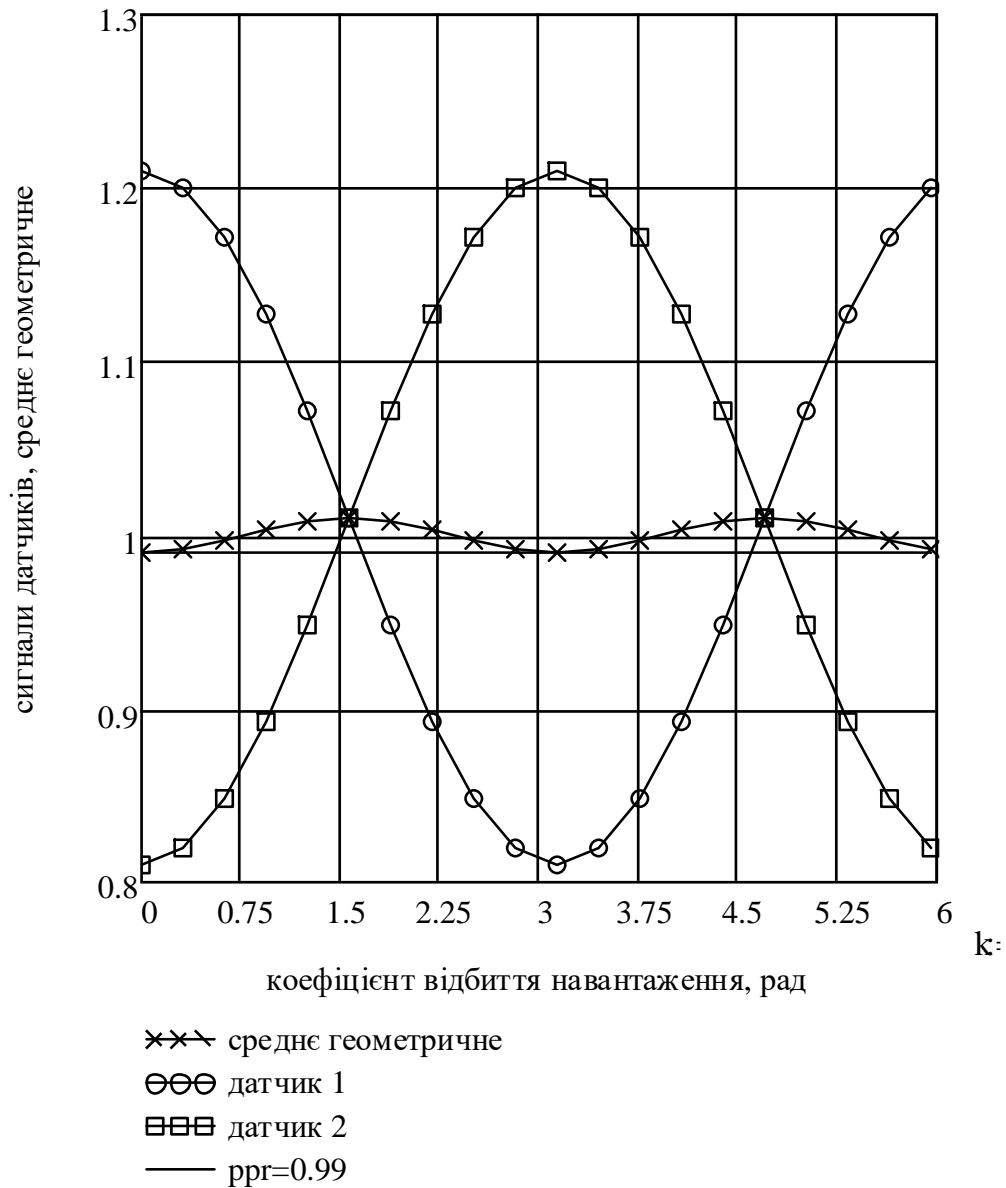


Рисунок 2.6 – Сигнали датчиків і залежність пропускнуої потужності від фази коефіцієнта відбиття

Коефіцієнт корекції помилки невідповідності вводиться в сигнали датчика. Виражається поправочний коефіцієнт

$$c = \frac{1}{1 + \delta}, \quad (2.12)$$

Щоб правильно застосувати поправочний коефіцієнт пропускної потужності, модуль коефіцієнта відбиття Γ можна знайти з виразів, наведених у (2.8) та (2.9). Незважаючи на поправочний коефіцієнт, невиключена систематична похибка θ визначається виразом

$$\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta}{\partial \Gamma}\right)^2 (\Delta \Gamma)^2 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial \varphi}\right)^2 (\Delta \varphi)^2}, \quad (2.13)$$

Стандартна невизначеність типу В u_B для значення залежить від апріорної інформації про мінливість значення. Якщо значення є невиключеною систематичною похибкою з межами, то її невизначеність обчислюється за формулою

$$u_B = \theta / \sqrt{2}, \quad (2.14)$$

де 2 – коефіцієнт, що відповідає U-подібному закону розподілу в межах невиключеної систематичної похибки.

2.4 Моделювання та автоматизоване проектування

Система Comsol Multiphysics являє собою новий етап у розвитку функціональних САПР останнього покоління. Це потужна програма для моделювання та вирішення різноманітних наукових та інженерних завдань, що дозволяє моделювати не тільки електромагнітні процеси в досліджуваних та розроблюваних об'єктах, але також здійснювати моделювання пов'язаних з ними процесів іншої фізичної природи, наприклад, теплових процесів, деформації, вплив електронних пучків тощо. Програма була розроблена на початку 2000 років у Швеції, Королівському технічному Університеті (автори Літман та Суїді). Потім вона вдосконалювалася великим колективом програмістів і дослідників фірми Softline (президент Карл Бітнер). Програма Comsol спочатку формувалася як додаток до MathLab, а потім додала всі функції розрахунку рівнянь у приватних похідних у свій код. У програмі Comsol Multiphysics можна звичайні, традиційні НВЧ об'єкти, наприклад фільтр, включити в мультифізичну модель, наприклад в умовах безповітряного простору, що дозволяє аналізувати фізичні явища, що вперше з'явилися. Доступ до цих потужним можливостям не вимагає поглибленого знання математики чи чисельного аналізу. COMSOL Multiphysics дозволяє додавати довільні рівняння, характеризуючі властивості матеріалів, вводити граничні умови та окремі члени рівнянь, що описують джерела та тепловіддачу, та навіть системи рівнянь у приватних похідних. На основі введених рівнянь можуть створюватися нові фізичні об'єкти. Середовище розробки програм дозволяє доповнювати програми інтерфейсами на основі власних моделей. Такий інтерфейс може бути спрощеною версією моделі, або містити частину полів введення та виводу, які потрібно зробити доступними для користувача. За допомогою вбудованих фізичних інтерфейсів (Physics Interfaces) та розширеної підтримки властивостей матеріалів, можна створити моделі, задаючи відповідні

фізичні величини, такі як різноманітні характеристики матеріалів: щільність, пружність, навантаження, граничні умови, джерела тепла та теплові потоки. Можна використовувати змінні, вирази або задані константи для опису областей твердих і рідких тіл, їх параметрів на межах, ребрах та точках незалежно від сітки розбиття. Після цього Comsol компілює систему рівнянь, що становлять модель. За допомогою фізичних інтерфейсів можна виконувати різні види досліджень, у тому числі: розрахунок перехідного процесу, що встановився і залежить від часу; лінійні та нелінійні дослідження; дослідження власних частот, типів хвиль та частотних характеристик. Програма виконує аналіз, починаючи з розбиття простору на сітку, виконуючи контроль помилок з використанням різних чисельних програм. Розрахунки COMSOL можуть ділитися на потоки, обчислення загального завдання, виконуватися паралельно, навіщо можна використовувати багатопроцесорні системи [14].

Розглянемо процес нагрівання в НВЧ печі. Джерело розподіленого теплового процесу розраховується у стаціонарному режимі, електромагнітний аналіз у частотній області і наступний ним розрахунок часового процесу дозволяє показати перерозподіл тепла у біологічному середовищі.

НВЧ-піч являє собою металевий ящик, з хвилеводом, підключеним до генератора НВЧ 500 Вт, на частоті 2,45 ГГц, що працює на хвилі TE₁₀. У нижній частині печі є циліндрична скляна пластина, яку зверху кладеться сферична картоплина (рис. 2.7). Частину картоплі зрізаємо для механічної стійкості, що також полегшує створення сітки при розрахунку методом кінцевих елементів, коли вона перебуває у контакті з пластиною. Для зменшення завдання вдвічі використовується симетрія. Стінка симетрії ставиться вертикально через піч, хвилевід, картоплину та плиту.

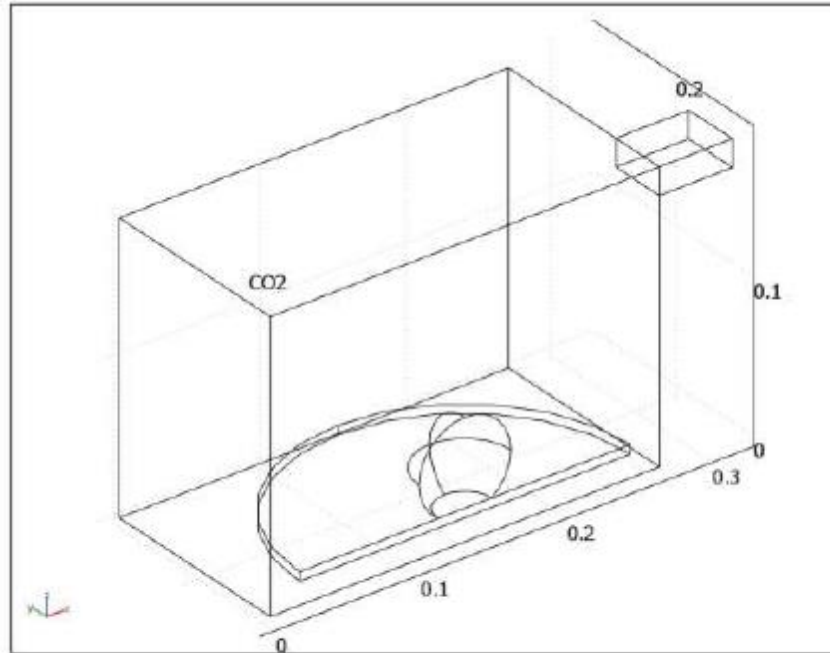


Рисунок 2.7 – Переріз НВЧ печі за площиною симетрії

Модель використовує мідь для стін НВЧ печі та хвилеводу. Хоча втрати металів будуть невеликі, на цих стінках встановлюється імпедансна гранична умова, для обліку втрат. Стінка симетрії має дзеркальну симетрію для електричного поля і ставиться у перерізі, в якому виконується умова $\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$. Прямокутний порт порушується поперечною електричною (ТЕ) хвилею, яка поширюється як хвиля, яка не має електричної складової поля у напрямку поширення. Порушення на частоті 2,45 ГГц, тип хвилі TE_{10} є єдиною модою, що поширюється, через прямокутний хвилевід. Частоти відсікання для різних типів хвиль знаходяться аналітично з співвідношення

$$(v_c)_{mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (2.15)$$

де m і n позначені номери типів хвиль, а c позначає швидкість світла. Для типу хвилі TE₁₀, $m = 1$ та $n = 0$. З розмірами прямокутного перерізу ($a = 7,8$ см і $b = 1,8$ см), а мода TE₁₀ є єдиною, що поширюється модою для частот між 1.92 ГГц та 3.84 ГГц. Постійне поширення β , на частоті дається виразом

$$\beta = \frac{2\pi}{c} \sqrt{v^2 - v_c^2}, \quad (2.16)$$

Після завдання збудження на прямокутний порт вирішується рівняння Гельмгольца для вектора електричного поля E всередині хвилеводу та НВЧ пічки

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) E = 0, \quad (2.17)$$

де μ_r – відносна магнітна проникність, j – мнима одиниця, ω – кутова частота, ϵ_r – відносна діелектрична проникність, ϵ_0 – діелектрична проникність вільного простору. Модель використовує матеріальні параметри для повітря: $\sigma = 0$ та $\mu_r = \epsilon_r = 1$. Картопля має діелектричну проникність $\epsilon_r = 65 - j 20$ де уявна частина враховує діелектричні втрати. Скляна пластина має $\epsilon_r = 2.55$, $\sigma = 0$, $\mu_r = 1$.

На рис. 2.8 показуються розподілені теплові втрати НВЧ- джерела та потоку тепла, що проникає через центр картоплі. Досить складний осцилюючий характер, який має сильний пік у центр, показує, що картопля виступає як резонансна порожнина для НВЧ-поля. Потужність, що поглинається картоплею, розраховується і становить близько 60% вхідний НВЧ потужності. Більшість залишилася енергії відбивається назад через порт. Рисунок 2.9 показує температуру у центрі картоплі як функції часу протягом перших 5 секунд.

Завдяки низькій теплопровідності картоплі, тепло розподіляється досить повільно, і температурний профіль після 5 секунд має сильний пік у центрі (див. рис. 2.10). При нагріванні картоплі температура в центрі досягає $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вода починає кипіти; висушується в центрі та передає тепло у вигляді пари на зовнішні шари. Цей процес впливає електромагнітні властивості картоплі. Проста модель НВЧ-поглинання та теплопровідності, що використовується тут, не дозволяє врахувати ці нелінійні ефекти. Тим не менш, модель може служити відправною точкою для глибшого аналізу.

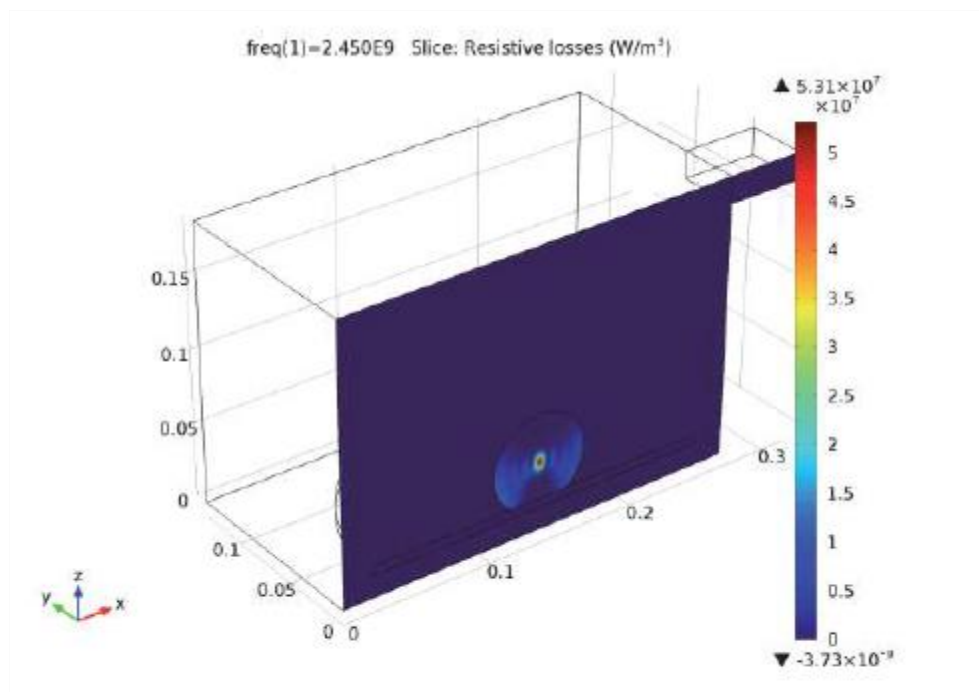


Рисунок 2.8 – Розподіл втрат в структурі НВЧ печі та картоплі

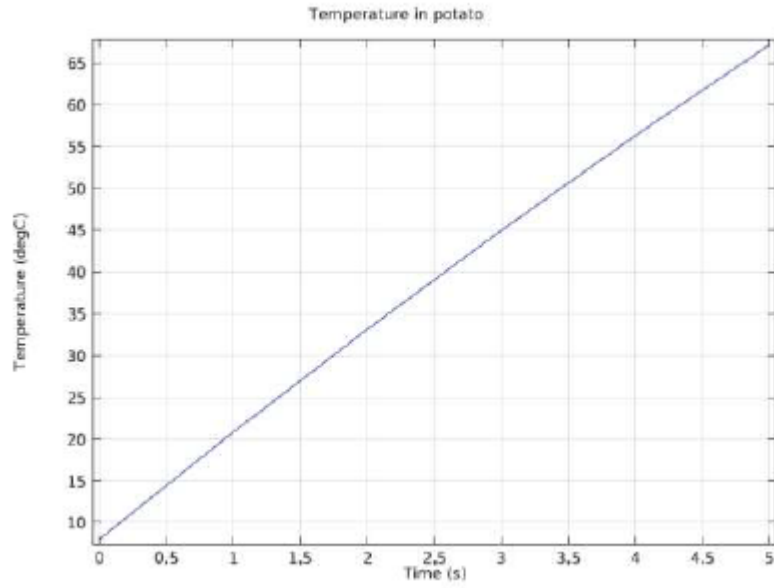


Рисунок 2.9 – Залежність температури в картоплі від часу при нагріванні

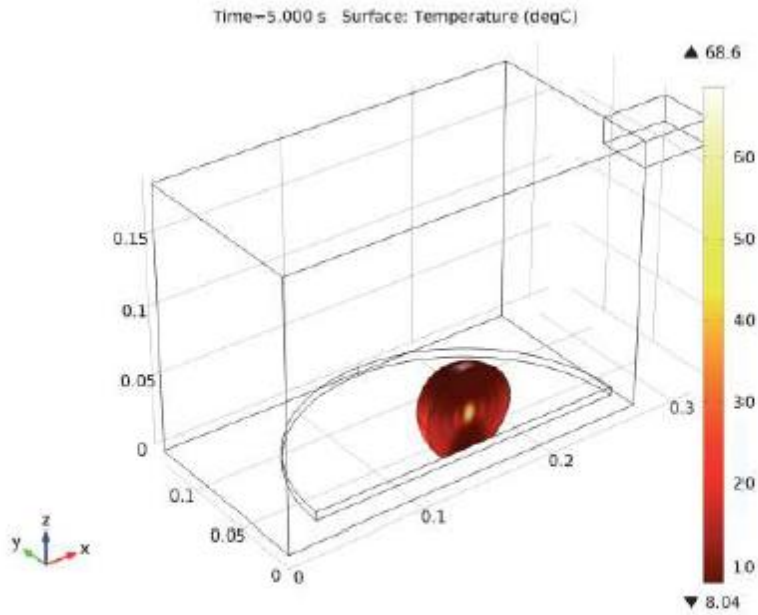


Рисунок 2.9 – Встановлена температура в картоплині

2.5 Висновки до розділу 2

Запропоновано поліпшення споживчих якостей мікрохвильової печі. Ефект досягається додаванням в нього ватметра. Це буде економічно доцільно, якщо вартість мікрохвильової печі з вимірювальним приладом зросте несуттєво в порівнянні з вартістю без вимірювального приладу. Був обраний найпростіший алгоритм обробки, такий як середнє геометричне двох сигналів датчиків, щоб отримати мінімальну вартість його реалізації. Досліджено обмеження алгоритму розрахунку пропускнуї потужності як середнього геометричного сигналу двох датчиків. Математично точне рішення можна отримати, лише якщо взяти два сигнали датчика при максимумі та мінімумі стоячої хвилі. Стояча хвиля рухається, коли змінюється закінчення, але датчики фіксовані. Таким чином датчик сигналізує не завжди в максимумі і мінімумі стоячої хвилі. Це пояснює, чому з'являється помилка. Запропоновано вираз для поправочного коефіцієнта сигналів датчика. Нарешті було оцінено невиключені залишки помилки. Виконане також моделювання процесу нагрівання в COMSOL Multiphysics.

3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ВИБІР ОСНАЩЕННЯ, НЕОБХІДНОГО ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Існують стандарти, які дозволяють оцінити рівномірність нагрівання в числовій формі. При цьому слід пам'ятати, що будь-який стандарт визначає її лише приблизно, тим більше, що сама рівномірність нагріву величина не постійна, а залежить від виду і кількості завантаженого продукту.

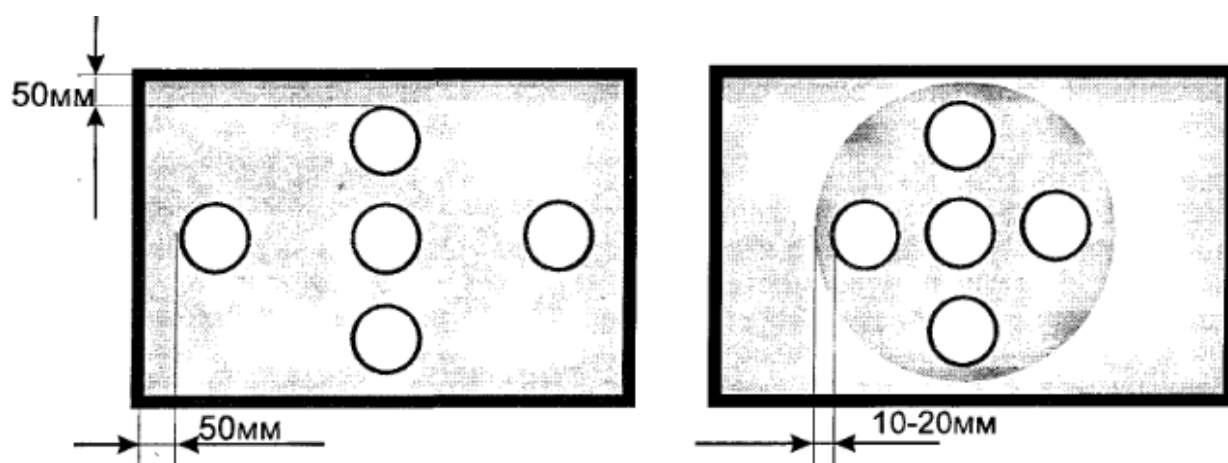


Рисунок 3.1 – Розташування стаканів в камері мікрохвильової печі при рівномірності нагрівання.

У відповідності з НВН-100 ГОСТ 19308-80, для визначення рівномірності нагрівання на дно камери мікрохвильової печі встановлюють 5 стаканів, які містять 100 ± 3 мл водопровідної води. Стакани розташовуються так, як показано на рис.3.1.

Температура води, котра не повинна перевищувати 20°C , вимірюється ртутним термометром з ціною поділу $0,1^{\circ}\text{C}$. Після цього на 2 хвилини виконуються вмикання НВЧ нагріву. Далі впродовж не більш 15 секунд вода в стаканах перемішується і вимірюється її кінцева температура. Результати надати у вигляді таблиці.

Розрахунок коефіцієнту рівномірності нагрівання

Коефіцієнт рівномірності визначається за формулами:

$$k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta t_C - \Delta t_i|}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (3.1)$$

$$\Delta t_C = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n} \quad (3.2)$$

$$\Delta t_i = t_{iH} - t_{iK} \quad (3.3)$$

де t_{iH} і t_{iK} – температура води в i -му стакані після нагрівання і до нього.

Галузевий стандарт ОСТ 11 0367-83 стверджує, що коефіцієнт рівномірності повинен бути не менш 0,7. Добре спроектовані і виготовлені пічі мають коефіцієнт рівномірності більше 0,9.

3.1 Висновки до розділу 3

В даному розділі показано як експериментальним шляхом можна визначити нерівномірність нагрівання в камері мікрохвильової печі за допомогою стандартної методики.

4.ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці

Розробка і виконання дипломної роботи проводиться в приміщенні науково-дослідної лабораторії (НДЛ), яка розташована на 1 поверсі 4 поверхового будинку, несучі стіни і перегородки якого цегляні, а перекриття - залізобетонні конструкції. Розміри приміщення комп'ютерного залу складають 7x5x4 м, що становить площа 35 м², обсяг 140 м³. У приміщенні 2 вікна площею 10 м². Кількість працюючих - 3 програміста. На кожному робочому місці знаходиться сучасний комп'ютер (монітор і системний блок). Споживана потужність електрообладнання 3 кВт.

Приміщення відповідає вимогам: - на одне робоче місце припадає 11,6 м², обсяг - 46,6 м³ при нормі 6 м² і 20 м³ відповідно по НПАОП 0.00-1.28-10.

Електроживлення здійснюється за допомогою трифазної чотирьох мережі з глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220 В частотою 50 Гц.

Лінія електромережі для живлення ПЕОМ виконана як окрема трипровідна мережа, шляхом прокладання фазного, нульового робочого та нульового захисного провідників. Необхідно проводити контроль ізоляції. Контроль проводити між нулем і фазою і між фазами. Опір ізоляції має бути не менше 500 кОм. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні.

Проводиться вступний інструктаж для нових працівників, первинний інструктаж на робочому місці (безпечні прийоми праці, конкретна виробнича обстановка), повторний інструктаж один раз в півріччя, позаплановий інструктаж при введенні в дію нових стандартів, правил; при зміні технологічного процесу, нещасних випадках, цільовий інструктаж [15, 16].

Проведення всіх інструктажів реєструється у відповідних журналах інструктажу з обов'язковим підписом інструктували та особи, яка інструктує. Журнали інструктажів повинні бути пронумеровані, прошнуровані та скріплені печаткою. При виконанні робіт, не пов'язаних з основною діяльністю, необхідно проводити цільовий інструктаж.

4.2 Виробнича санітарія в НДЛ

Приміщення має природне і штучне освітлення. Зорова робота проектувальника є роботою високої точності (найменший розмір об'єкта розрізнення 0,3-0,5 мм). Тоді розряд зорової роботи - III "В". За вимогами ДБН В.2.5-28-2006 величина коефіцієнта природного освітлення (КПО) повинна бути $\geq 1,2\%$, $E_{\min} = 200$ лк. Вікна мають регулювальні пристрої для відкриття, жалюзі.

Робота відноситься до категорії легкої 1а і, згідно з ДСН 3.3.6-042-99 «санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», оптимальні параметри мікроклімату повинні відповідати таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оптимальні параметри мікроклімату

Пора року	Температура повітря, град. С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	22–24	40–60	$\leq 0,1$
Тепла	23–25	40–60	$\leq 0,1$

Допустимі рівні звукового тиску і рівні шуму на робочому місці повинні відповідати ДСН 3.3.6-037-99 «санітарні норми шуму, інфразвуку та ультразвуку». Еквівалентний рівень звуку не перевищує 50 дБ.

Робочі місця розташовані щодо світлових прорізів так, щоб природне світло падало зліва. Організація кожного робочого місця забезпечує відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам НПАОП 0.00-1.28-10. Висота робочої поверхні столу для ПЕОМ - 750 мм, ширина столу - 1000 мм, глибина столу - 800 мм. Робочий стіл має простір для ніг висотою не менше 600 мм і шириною не менше 500 мм. Сидіння підйомно-поворотний, регульоване по висоті, куту нахилу, відстані спинки до переднього краю сидіння, висотою підлокітників. Правильний вибір параметрів столу і сидіння, дозволяє знизити статичні перевантаження м'язів. План розміщення робочих місць вказано на рисунку 4.1.

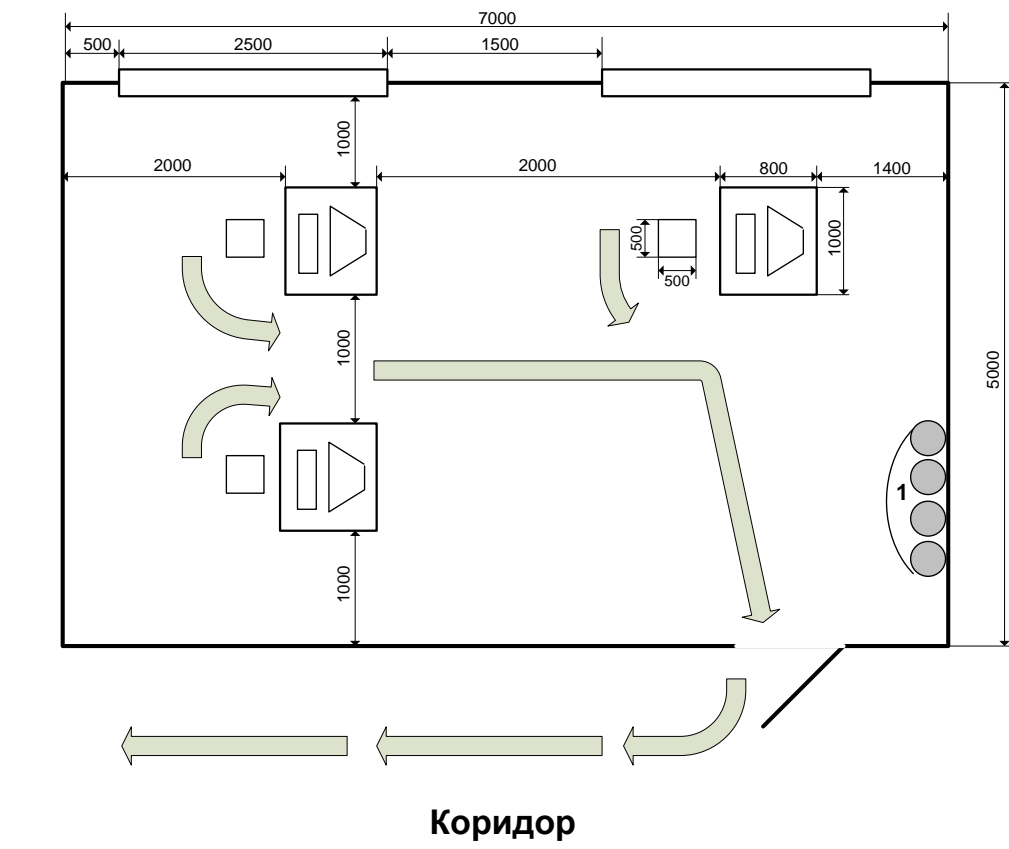


Рисунок 4.1 – План розміщення робочих місць з планом евакуації при пожежі

Для зменшення дії психофізіологічних ОВПФ слід встановити перерви по 20 хв через 2 години після початку робіт, через 1,5 год і 2,5 год по 20 хв після обідньої перерви. Загальна тривалість перерв (без урахування обідньої) за 8-годинний робочий день становить 60хв. Під час технологічних перерв рекомендується виконувати спеціальні вправи для зняття зорового стомлення, розумового перенапруження і статичних перевантажень.

У приміщенні НДЛ параметри мікроклімату не відповідають нормам. Для забезпечення встановлених норм мікроклімату слід застосовувати кондиціонування. Виконаємо розрахунок кондиціонування.

Джерелами надлишкового тепла в приміщенні є люди, устаткування, штучне освітлення, сонячна радіація, тепло, яке передається через стіни.

Визначаємо кількість тепла, що виділяється працюючими:

$$Q_p = 0,5 \cdot n \cdot q, \quad (4.1)$$

де n – кількість працюючих в приміщенні, $n = 3$;

q – кількість тепла, що виділяється робочим за 1 годину, $q = 120$ ккал/ч (для категорії робіт I а);

$$Q_p = 0.5 \cdot 3 \cdot 120 = 180 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо кількість тепла, що виділяється обладнанням:

$$Q_{\text{обор.}} = 860 \cdot N \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2, \quad (4.2)$$

де φ_1 – коефіцієнт використання настановної потужності устаткування;

$$\varphi_1 = 0,85 \text{ (} 0,85 \div 0,9 \text{)};$$

φ_2 – коефіцієнт одночасності роботи устаткування в зміні, $\varphi_2 = 1$ (0,5 ÷ 1);

N – потужність обладнання (кВт), $N = 3$ кВт;

$$Q_{\text{обор.}} = 860 \cdot 3 \cdot 0,85 \cdot 1 = 2193 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо кількість тепла від джерела освітлення

$$Q_{\text{осв.}} = K \cdot E \cdot S, \quad (4.3)$$

де K – питома тепловиділення на 1 люкс освітленості, $K = 0,05$ ккал/лк·м²·ч

E – найменша освітленість приміщення, 300 лк;

S – площа приміщення, $S = 7 \cdot 5 = 35$ м².

$$Q_{\text{осв.}} = 0,05 \cdot 300 \cdot 35 = 525 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо кількість тепла, що надходить через вікна:

$$Q_{\text{солн.}} = s \cdot q \cdot k \cdot \kappa, \quad (4.4)$$

де s – площа скління, $s = 10$ м²;

q - величина сонячної радіації, що передається через 1 м^2 скління, що залежить від орієнтування вікон, $q = 130 \text{ ккал} / \text{м}^2 \cdot \text{год}$ (вікна спрямовані на північний схід);

k - коефіцієнт, що залежить від місця розташування, $k = 1,15$;

k_c - коефіцієнт затінення, $k_c = 0,8$.

$$Q_{\text{солн.}} = 10 \cdot 130 \cdot 1,15 \cdot 0,8 = 1196 \text{ ккал/ч}$$

Кількість тепла, що надходить в приміщення через стіни $Q_{\text{ст.}}$, Прийmemo рівним нулю, тому що стіни цегляні.

Визначимо сумарну кількість тепла

$$Q_{\Sigma} = Q_p + Q_r + Q_{\text{обор.}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{солн.}} + Q_{\text{ст}} \quad (4.5)$$

Таким чином можемо визначити

$$Q_{\Sigma} = 180 + 2193 + 525 + 1196 + 0 = 4094 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо необхідний повітрообмін приміщення:

$$L = \frac{Q}{C(t_n - t_{\text{пр.}})}, \quad (4.6)$$

де $C = C_{\text{уд.}} \cdot V_{\text{об}}$ - об'ємна теплоємність сухого повітря;

t_n - температура повітря, що видаляється, $t_n = 31 \text{ }^\circ\text{C}$;

$t_{\text{пр.}}$ - припливна температура, $t_{\text{пр.}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$;

Суд. – питома теплоємність повітря, Суд. = 0.237 ккал / кг ° С;

Роб – об'ємна вага припливного повітря, Роб = 1,205 кг / м³;

$$C = 0,237 \cdot 1,205 = 0,286 \text{ ккал/м}^3\text{°С}$$

$$L = \frac{4094}{0,891} \text{ м}^3/\text{ч}$$

Визначаємо необхідну продуктивність кондиціонера на охолодження

$$Q_{\text{хол.}} = L \cdot C (t_{\text{нар.}} - t_{\text{пр.}}), \quad (4.7)$$

де $t_{\text{нар.}}$ – зовнішня температура повітря, $t_{\text{нар.}} = 32^\circ\text{С}$.

$$Q_{\text{хол.}} = 1101,12 \cdot 0,286(32 - 21) = 4093,96 \text{ ккал/ч}$$

Система кондиціонування вибирається виходячи з таких умов:

$$\begin{cases} L_k \geq L \\ Q_k \geq Q_{\text{хол.}} \end{cases}, \quad (4.8)$$

де L_k , Q_k – продуктивність кондиціонера за обсягом і холоду відповідно.

З урахуванням отриманих результатів вибираємо кондиціонер Daewoo DMV-1812LN, який зможе забезпечити для спекотної пори необхідні повітрообмін і охолодження зовнішнього повітря для підтримки оптимальних параметрів мікроклімату. Характеристики: Обмін повітря – 1200 м³/год; продуктивність на охолодження - 5,8 кВт, рівень шуму - 32дБ.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Для забезпечення безпеки людей при роботі з комп'ютером в приміщенні слід дотримуватися загальні вимоги пожежної безпеки згідно з ГОСТ 12.1.004-91. Причиною пожежі в приміщенні, можуть бути: коротке замикання електропроводки; несправність ПЕОМ та іншого електрообладнання.

Відповідно до вимог ГОСТ 12.1.004-91 приміщення комп'ютерного відділу оснащено:

– димовими пожежними сповіщувачами в кількості 1 датчик (контролює площу до 86 м² по ДБН В.2.5-56-2010);

– вуглекислотними переносними вогнегасниками в кількості 2 штуки (з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 2 на приміщення), об'ємом 2 л, ВВК-1,4;

– кошма.

При проектуванні і будівництві виробничих і допоміжних будівель промислових підприємств передбачають евакуаційні виходи, призначені для безпечної евакуації знаходяться в будівлі в разі виникнення пожежі або аварії. Ефективність евакуації досягається створенням шляхів евакуації. На евакуаційних шляхах організовано природне і штучне аварійне освітлення.

Висновки до розділу 4

У даному розділі розглянуті умови праці, виробнича санітарія та безпека в надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі з метою підвищення рівномірності нагрівання запропоновано обладнати мікрохвильову піч ватметром прохідної потужності, який складається з двох датчиків та блоку обчислень. Алгоритм обчислень спрощений і базується на факті, що прохідна потужність є середнім геометричним сигналів датчиків. Вперше використана графічна модель надання середньгеометричного значення для обчислення прохідної потужності, яка частково збігається з відомою моделлю розгортки стоячої хвилі з одиничного кола але відрізняється використанням прямокутного трикутника і тригонометрії при доведенні, що середньгеометричне сигналів датчиків є прохідною потужністю.

За визначенням середньгеометричне є квадратним коренем із добутку двох сигналів. Таким чином реалізація такого алгоритма можлива на операційних підсилювачах, не потребує коштовного обладнання і майже не впливає на вартість мікрохвильової печі вцілому.

Проведене імітаційне фізичне моделювання нерівномірності нагрівання.

Проведено експеримент з визначення коефіцієнта нерівномірності за стандартною методикою.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008 – 2015. Державний стандарт України. Документація, звіти у сфері науки. Структура і правила оформлення – Чинний від 1 липня 2017 р.
2. Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорацкий Л.Г. и др . Конструирование экранов и СВЧ устройств./ Ученик для вузов. – М.: Радио и связь, – 1990.– 336 с.
3. Сапунов Ремонт микроволновых печей, Солон Пресс, 2003. – 272 с.
4. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика. – М: Наука, 2003. – 264 с.
5. Пат. 31918А, Україна, МПК G01R 21/08 (2006.01). Метод вимірювання нерівномірності розподілу поля в мікрохвильовій печі та прилад для її реалізації. Водотовка В. І., Гура К. , Мхейн М. Ф., Репа Ф. М., опубл. 15.12.2000.
6. Пат. 126877, Україна, МПК G01R 21/00, G01R 21/08 (2018.01). Пристрій для підвищення рівномірності нагрівання мікрохвильової печі Мирошник М. А., Зайченко О. Б., опубл.10.07.2018.
7. Mekhannikov A. I. Microwave multimeter and its operating algorithms /A. I. Mekhannikov, V. A. Perepelkin // Measurement techniques, 1994. – Vol.37, 3. – pp. 330-337.
8. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Конструювання пристроїв НВЧ», 2011. – 42 с
9. Косолап В. Ю. Электрическое поле в СВЧ-камере резонаторного типа при трехщелевом боковом способе возбуждения / В. Ю. Косолап, В. А. Коломейцев, Д. И. Карпов. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2008. – №4(1). – С. 95–98.
10. Коломейцев, В. А. Электродинамические и тепловые свойства СВЧ-установок резонаторного типа с многощелевым возбуждением / В. А. Коломейцев, В. С

- Ремнёв, А. Э Семёнов. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2008. – №2(1) . – 126-131.
11. Комаров В. В. Электродинамические характеристики камеры СВЧ нагрева жидких сред на прямоугольном волноводе с Т-ребром. / В. В. Комаров, В. А. Коломейцев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – №1(10). – Вып.1 – С. 78-82.
12. Дорогайцева О. В. Оптимизация многоцелевой системы возбуждения электромагнитного поля в СВЧ-нагревательных установках резонаторного типа / О. В. Дорогайцева, В.А. Коломейцев, А. Э. Семенов. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – №3(1). – С. 106-112.
13. Коломейцев В. А. Математическая модель процесс возбуждения электромагнитного поля в резонаторных структурах с частичным термопараметрическим заполнением / В. А. Коломейцев, В. Ю. Косолап, И. И. Салимов. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – №1(23). – Вып.3. – С. 104-109.
14. Курушин А. А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL." М.: One-Book, 2016. – 377 с.
15. Дзюндзюк Б.В. Охрана труда. Сборник задач / Дзюндзюк Б.В., Иванов В.Г. – Х.: НВП центр ХНУРЕ, 2006. – 242 с.
16. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР [текст] / – Харків: ХНУРС, 2011 – 24 с.