



## 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)  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.**ЗАВДАННЯ**

## НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Кузнецову Володимирі Геннадійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)1. Тема роботи Дослідження методів вимірювання параметрів НВЧ сигналів і трактівзатверджена наказом по університету від 20 10 2022 р. № 1370 Ст \_\_\_\_\_2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 грудня 2022 р.3. Вихідні дані до роботи Дослідити методи вимірювання параметрів НВЧ сигналів і трактів

---

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі4.1 Вступ;4.2 Огляд за літературними джерелами;4.3 Розробка основних теоретичних закономірностей;4.4 Розробка методики експериментальних досліджень4.5 Охорона праці4.6 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	07.09.22	виконано
2	Пошук літератури	15.09.22	виконано
3	Огляд за літературними джерелами	01.10.22	виконано
4	Дослідження методів вимірювання параметрів сигналів та трактів НВЧ	14.10.22	виконано
5	Розробка моделей та алгоритмів	01.11.22	виконано
6	Модельовання з використанням методу найменших квадратів	15.11.22	виконано
7	Дослідження частотних властивостей багатозондового мультиметра	20.11.22	виконано
8	Створення експериментальної установки	30.11.22	виконано
9	Виконання розділу «Охорона праці»	05.12.22	виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	08.12.22	виконано

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_ Кузнецов В.Г..  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. Черняков Е.І..  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи магістра: 58 с., 7 табл., 19 рис., 17 джерел.

НВЧ, СИГНАЛ, ТРАКТ, МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ, ПРОХІДНА ПОТУЖНІСТЬ, КОМПЛЕКСНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ НАВАНТАЖЕННЯ, МЕТОД НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ, ПОХИБКА

Об'єктом дослідження є процес вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ.

Метою роботи є підвищення точності багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ за рахунок оптимізації обробки інформації отриманої з датчиків.

Для досягнення мети поставлено наступну задачу дослідження: Створити метод обробки сигналів датчиків, що дозволяє розрахувати прохідну потужність, модуль і фазу коефіцієнта відбиття навантаження більш точно.

На основі розроблених моделей синтезована методика виконання вимірювань багатозондовим методом. Отримані результати можуть бути використані в приладобудуванні, енергетиці, в телекомунікаціях.

Двоетапна процедура обробки сигналів датчиків полягає в обчисленні з сигналів датчиків проміжних змінних, шуканих змінних із проміжних змінних; алгоритми обробки, крім обчислення параметрів, дозволяють компенсувати похибку неузгодженості; оптимізація має на увазі мінімізацію цільової функції, яка у випадку методу найменших квадратів являє собою квадрат різниць обмірюваних і обчислених значень.

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

## ABSTRACT

Explanatory note to the appraisal work of the master: 58 pp., 7 table., 19 Fig., 17 sources.

MICROWAVES, SIGNAL, TRACT, MEASUREMENT METHOD, PASSING POWER, COMPLEX REFLECTION COEFFICIENT OF THE LOAD, LEAST SQUARES METHOD, UNCERTAINTY

The object of research is process of microwave signal and tract parameter measurement.

The goal of the work is increasing of accuracy of multiprobe method of signal and tract parameter measurement due to optimization of processing of information from sensors.

To achieve the goal next task was arised: create method of signal processing which allow calculate passing power, modulus and phase of reflection coefficient more precisely.

On the basis of worked out models the methodic of making measurement by multiprobe method was synthesized. The achieved results can be used in device design, energetics, telecommunication.

The two stage procedure of sensor signal processing consists in calculation from sensor signal of intermediate variables, processing algorithms besides parameter calculation allows compensate mismatch uncertainty, optimization means of objective function minimization, which in least squares method case is square of difference of measured and calculated values.

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

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	8
1. Огляд за літературними джерелами стану питання дослідження, виявлення теоретичних передумов та можливих напрямків вирішення задач розробки.....	11
1.1 Методи вимірювання параметрів сигналів НВЧ.....	12
1.2 Методи вимірювання параметрів трактів НВЧ.....	15
2. Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень.....	19
2.1 Моделі багатозондового метода.....	19
2.2 Принцип вимірювання і похибка.....	21
2.3 Аналітичні моделі багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ і.....	25
2.4 Зменшення похибки неузгодження за допомогою алгоритмічної обробки.....	28
2.5 Використання оптимізації в алгоритмах.....	30
3. Розробка методики експериментальних досліджень, вибір оснащення, необхідного для проведення експерименту, опис експериментальних установок.....	32
3.1 Моделювання.....	32
3.2 Експериментальна установка.....	43
4. Охорона праці.....	49
4.1 Аналіз умов праці.....	49
4.2 Виробнича санітарія в НДЛ.....	50
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	55
Висновки.....	56
Перелік джерел.....	57
ГЮИК 464425.001 ВД.....	59

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НВЧ – надвисокі частоти,

ЕРС – електрорушійна сила,

ККВ – комплексний коефіцієнт відбиття,

БММ – багатозондовий мікрохвильовий мультиметр,

КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі навантаження,

ПЧ – проміжні частоти,

НЧ – низькі частоти,

МНК – метод найменших квадратів

## ВСТУП

Технічний стан НВЧ-апаратури для зв'язку, супутникового телебачення, радіолокації визначають шляхом вимірювань параметрів електромагнітних коливань та параметрів передавальних трактів, серед яких основними є потужність та комплексний коефіцієнт відбиття навантаження.

Особливістю вбудованого контролю є неможливість безпосередньої участі оператора в процесі вимірювань, а також експлуатація вимірювальних засобів в жорстких кліматичних і механічних умовах під впливом широкого діапазону температур, вібрацій, ударів і інших факторів. В цих умовах використання відомих методів побудови автоматизованих вимірювальних приладів ускладнено, оскільки вони не забезпечують при малих габаритах перетворювачів зберігання метрологічних характеристик протягом довгого часу в завданих межах, що призводить до зниження надійності та достовірності контролю.

З вбудованих засобів вимірювання і методів, на яких вони засновані, найбільш універсальним, і тому перспективним, є багатозондовий метод. Цей метод здатний забезпечити одночасне вимірювання як імпедансних характеристик тракту, так і енергетичних характеристик сигналу. На відміну від метода напрямленого відгалужувача він здатний працювати в трактах з великим розузгодженням, менш чутливий до позаполосних складових сигналу генератора.

Однак цей метод потребує підвищення точності. Підвищення точності за рахунок апаратних засобів, таких як розробка нових датчиків, досягла межі. Залишився шлях підвищення точності багатозондового метода за рахунок дослідження мало вивчених джерел похибок і їх усунення обробкою сигналів датчиків за оптимальними алгоритмами.

Застосування більш точних засобів вимірювання, принцип дії яких базується на багатозондовому методі, доцільно і актуально, оскільки забезпечить економію енергоносіїв під час експлуатації устаткування НВЧ, особливо при великих рівнях потужності за рахунок узгодження тракту, яке виконується за результатами вимірювань, а також в критичних ситуаціях сприятиме попередженню виходу з

ладу генераторного обладнання.

Метою атестаційної роботи є підвищення точності багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів за рахунок оптимізації обробки інформації отриманої з датчиків.

Для досягнення мети поставлені наступну задачу дослідження:

Створити метод обробки сигналів датчиків, який фільтрує шуми, що дозволяє розрахувати прохідну потужність, модуль і фазу коефіцієнта відбиття навантаження більш прецизійно.

Об'єкт дослідження. Процес вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ.

Предмет дослідження. Методи вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ.

Методи дослідження: теоретичні і експериментальні. Теоретичні базуються на теорії орієнтованих графів, яка застосовується для опису НВЧ-блоку з датчиками при описанні перевідбиття між датчиками для визначення коефіцієнта передавання сигналу з генератора на датчики; лінійній алгебрі при визначенні проміжних змінних як зворотної матриці до системи рівнянь, що описують багатозондову систему при побудові алгоритму обробки сигналів датчиків при непрямому вимірюванні потужності і коефіцієнта відбиття з сигналів датчиків, теорії оцінювання при фільтрації проміжних змінних, за цільову функцію при цьому використовується слід матриці дисперсій і коваріацій; теорій похибок при визначенні складових похибок. за рахунок розузгодження тракту та перевідбиття сигналів датчиків.

Експериментальними методами є теорія планування експериментів для визначення оптимальних умов.

Наукова новизна отриманих результатів:

Набула подальшого розвитку математична модель перетворення сигналів датчиків в значення потужності і комплексного коефіцієнту відбиття навантаження, яка відрізняється фільтрацією проміжних змінних, що дозволило підвищити точність;

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані результати можуть бути використані в приладобудуванні, енергетиці, в телекомунікаціях. На основі розроблених моделей синтезована методика виконання вимірювань багатозондовим методом та розроблений калібратор коефіцієнта відбиття навантаження для великих рівнів сигналу.

## **1.ОГЛЯД ЗА ЛІТЕРАТУРНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ СТАНУ ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИЯВЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ТА МОЖЛИВИХ НАПРЯМКІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ РОЗРОБКИ**

В першому розділі розглянуто сучасний стан методів вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ. Проаналізовано методи вимірювань параметрів НВЧ-сигналів, трактів і навантаження, а саме, пондеромоторний метод; метод, який базується на використанні ефекту Холу; методи напрямлених відгалужувачів і стінки, яка поглинає; метод дванадцятиполюсника; багатозондовий метод, визначені їх переваги і недоліки. Шляхом порівняння переваг і недоліків існуючих методів показано, що за напрямком дослідження в роботі доцільно обрати багатозондовий метод.

Для дослідження НВЧ-блоку використовується теорія НВЧ-кіл, згідно з якою, основна увага приділяється сигналам на входах-виходах, а сам пристрій розглядається як чорна «скриня». Для опису НВЧ-блоку використовують матрицю розсіювання та побудовані на її основі орієнтовані графи. При цьому залишилося недослідженим перевідбиття датчиків у рамках моделі у вигляді орієнтованих графів. Для багатозондового методу вимірювань, ще з часів використання одного датчика, основною проблемою є невідома фаза коефіцієнта відбиття навантаження, яка призводить до виникнення похибки розузгодження. Похибка розузгодження дає найсуттєвіший внесок до загальної похибки методу. Сигнали реальних датчиків на відміну від ідеалізованих моделей мають похибки. Тому виникає задача врахування не ідеальності датчиків. Критерієм оптимальності обробки слугує зменшення похибки результату.

З критичного аналізу стану проблеми вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ випливає, що залишились недостатньо дослідженими надлишкові системи рівнянь, фільтрація оцінок, перевідбиття між датчиками, похибки розузгодження, в даній атестаційній роботі вони підлягають додатковим дослідженням.

У цьому розділі розглянуті методи визначення вимірюваних величин. Охарактеризовані області, де необхідно робити даний вид радіотехнічних вимірів. Проведений порівняльний аналіз методів виміру параметрів сигналів і трактів.

Сигнал СВЧ характеризують потужністю  $P$ , а тракт, до яких ставляться хвилеводи, коаксіальні й мікрополоскові лінії, характеризується комплексним коефіцієнтом відбиття (ККО) навантаження  $\Gamma$ . Інші важливі параметри можна розрахувати на основі значення коефіцієнта відбиття. Це такі параметри як: елементи матриці розсіювання ( $S$  параметри), коефіцієнт стоячої хвилі навантаження (КСВН), повний опір навантаження  $Z$ , яке розраховується за допомогою кругової діаграми Вольперта-Смита.

### 1.1 Методи вимірювання параметрів сигналів НВЧ

Вимірюванню підлягає прохідна, падаюча і відбита потужність. Для вимірювання потужності використовуються ватметри. Принципова відмінність, яка покладена в основу класифікації ватметрів полягає в способі включення вимірювальних приладів у лінію передачі. Ватметри прохідної потужності включають між джерелом потужності й навантаженням і вимірюють потужність, що проходить у навантаження. Вони не повинні суттєво порушувати умови передачі й споживати незначну частину потужності, що проходить у навантаження, причому споживана потужність пропорційна потужності, що розсіюється в навантаженні. Ватметри, що поглинається потужність є еквівалентом кінцевого узгодженого навантаження й включаються на кінці лінії передачі.

Для вбудованого контролю прийнятні тільки ватметри прохідної потужності.

Для вимірювання прохідної потужності НВЧ використовуються метод поглинаючої стінки, зондовий метод, пондеромоторний метод, метод, заснований на використанні ефекту Холу, метод вимірювання прохідної потужності зі

спрямованими відгалужквачами.

Пондеромоторний метод використовує ефект механічного впливу сил електромагнітного поля на стінки лінії передачі або на відбиваючі елементи, які розташовані усередині хвилеводу.

Переваги методу полягають у можливості абсолютного калібрування, високій точності у вузькій смузі частот, що дозволяє використовувати пондеромоторний метод в еталонних засобах вимірювання, у можливості вимірювати потужність від міліватів до сотень кіловатів у діапазоні частот до десятків гигагерц.

Недоліками приладів, заснованих на пондеромоторних перетворювачах, є складність і підвищені вимоги по точності їх виготовлення у зв'язку з необхідністю ретельного узгодження відрізка лінії передачі із чутливими елементами, що перебувають у ній, зниження електричної міцності хвилеводу через розташування всередині нього пондеромоторних елементів, складність калібрування, вузькосмуговість.

Метод, заснований на використанні електрорушійної сили (ЕРС) Холу в напівпровідниках, дозволяє вимірювати безперервну й імпульсну прохідну потужність у широкому частотному діапазоні (до 40 ГГц). Сутність методу Холу полягає у виникненні різниці потенціалів у пластині напівпровідника зі струмом, поміщеної в магнітне поле, перпендикулярно до напрямку струму.

Перетворювачі Холу відрізняються високою швидкодією. Завдяки цьому метод може бути використаний для вимірювання імпульсних сигналів.

Різниця потенціалів пропорційна вектору Пойнтинга, чим пояснюється нечутливість методу до фази комплексного коефіцієнта відбиття (ККВ), таким чином, забезпечується вимірювання потужності, що розсіюється в навантаженні незалежно від її неузгодженості. Отже, для вимірювання прохідної потужності досить одного датчика, який можна розміщати уздовж тракту довільно.

Матеріалом для датчика на ефекті Холу служить напівпровідник, у якому спостерігається ряд супутніх ефектів, серед яких найбільше проявляється

термоЕРС і детекторний ефект. До недоліків методу належить також низька чутливість, мала точність. У зв'язку з нагріванням напівпровідника в сильному полі й зниженням електричної міцності тракту, перспективи в майбутньому в нього малі.

Метод поглинаючої стінки заснований на вимірюванні потужності, що розсіюється в термочутливому елементі, який являє собою ділянку лінії передачі із втратами. Метод принципово може бути використаний від найнижчих частот до 37 ГГц і більш, дозволяє вимірювати НВЧ потужність малого, середнього й великого рівня.

До переваг методу слід віднести його простоту й високу надійність.

Недоліком методу є похибка вимірювань при роботі з імпульсною потужністю, похибка пов'язана з інерційністю нагрівання поглинаючої стінки.

Для вимірювання прохідної потужності можуть бути використані ватметри потужності, що поглинається, включені у вторинному каналі спрямованих відгалужувачів. Тип ватметра потужності, що поглинається, і характеристики спрямованого відгалужувача обирають виходячи з діапазону робочих частот і рівня вимірюваних потужностей.

До переваг методу слід віднести можливість застосування ваттметров потужності, що поглинається, малого рівня для вимірювання великих потужностей.

Недоліки: велика похибка вимірювання, яка суттєво залежить від ступеня узгодження навантаження, залежність похибки від спрямованості відгалужувача й, найголовніше, вплив гармонік. Із застосуванням останнім часом потужних генераторних приладів виникла необхідність урахувати той факт, що присутність гармонік у сигналі може призвести до неприпустимого погіршення точності. У сигналі генератора безліч гармонік. Атенюатори, що перебувають у плечах спрямованого відгалужувача, послабляють першу гармоніку. При цьому вищі типи хвиль ослаблення не мають. Тоді після атенюатора спостерігається викривлення спектра сигналу, тобто амплітуди вищих типів хвиль наближаються

по амплітуді до основного типу коливань. Отже, не можна одержати об'єктивну інформацію про прохідну потужність.

В основі роботи багатозондового мікрохвильового мультиметра (БММ) лежить аналіз розподілу стоячої хвилі у хвилеводі, яке ґрунтується на наявності декількох, частіше квадратичних по полю або лінійних по потужності крапкових датчиків, розташованих певним чином уздовж передавального тракту між генератором і навантаженням.

## 1.2 Методи вимірювання параметрів трактів НВЧ

Для вимірювання параметрів трактів НВЧ застосовуються такі методи як поляризаційний метод, метод спрямованого відгалужувача, метод дванадцятиполюсника, метод вимірювальної лінії.

Поляризаційний метод полягає в перетворенні складової напруженості магнітного поля в лінії передачі в еліптично поляризовану хвилю в круглому хвилеводі й вимірюванні параметрів еліпса поляризації, пов'язаних з параметрами вимірюваних кіл.

Основна перевага даного методу вимірювання пов'язана зі значним зменшенням необхідної довжини стандартної лінії в порівнянні з довжиною щільної вимірювальної лінії на частотах менш 1000 МГц.

Метод спрямованого відгалужувача складається в виділенні та вимірюванні амплітуд падаючої і відбитої хвиль з наступним рохрахунком їх відношень, що дозволяє отримати КСХН.

Цей метод виміру коефіцієнта відбиття використовується в рефлектометрах (від англ. reflection - відбиття) або панорамних вимірниках КСХН.

Основними джерелами похибок даного методу є неідентичність характеристик відгалужувачів, детекторних секцій і індикаторів, відмінність вольт-амперних характеристик діодів від квадратичних, втрати в каналах відгалужувача.

Головний недолік методу полягає в тому, що з комплексного коефіцієнта відбиття вимірюється тільки інформація про амплітуду без фази. Тому такі прилади називають ще скалярними аналізаторами. Для одержання інформації й про амплітуду й про фазу, тобто вектори, використовуються векторні аналізатори.

У векторних аналізаторах кіл НВЧ використовують гетеродинні методи, тобто перенос вимірювальних сигналів в область проміжних частот (ПЧ). Зі збереженням інформації про амплітуду й фази. Це досягається подвійним або потрійним перетворенням частоти сигналів у каналах падаючої й відбитої хвиль. Після перетворення вимірювання амплітуд проводять, а фазовий зсув НЧ-фазометром. Звичайно використовують метод перетворення фазового зсуву в часовий інтервал.

Вимірювальний тракт приладу в принципі не відрізняється від розглянутого для спрямованого відгалужувача. Він має два канали – опорний для сигналу падаючої хвилі й вимірювальний для сигналу відбитої хвилі. Однак замість детекторів на виходах спрямованих відгалужувачів падаючої й відбитої хвиль установлені змішувачі перетворювачів частоти.

При всіх перевагах векторні аналізатори мають один дуже істотний мінус – високу вартість. Але можна здешевити вимірювальний прилад, якщо розраховувати векторні значення ККВ зі скалярних сигналів, як це робиться в дванадцятиполюсному рефлектометрі. По функціях дванадцятиполюсний рефлектометр подібний до векторного аналізатора, але по принципу вимірювань є скалярним. Останньою властивістю він схожий на спрямований відгалужувач. У порівнянні зі спрямованим відгалужувачем суттєво ускладнюються способи обробки сигналів вимірювачів потужності. Однак запропоновані дванадцятиполюсні рефлектометри виявилися настільки вдалим розв'язок по співвідношенню вартість-точність, що стали надовго головним напрямком у закордонних мікрохвильових вимірюваннях.

Метод дванадцятиполюсника полягає у використанні дванадцятиполюсного пасивного розгалуження, вимірюванні потужності в чотирьох плечах і розрахунках шуканих параметрів (звичайно на ЕОМ).

Перевагою цього методу є висока точність, похибка становить десяті частки відсотка. Однак для відтворення такої точності в робочих, а не еталонних, засобах вимірювання не завжди є можливість. Зокрема, часові витрати на калібрування не прийнятні в робочих засобах вимірювання. З іншого боку, методи й моделі обробки сигналів корисні для вивчення й застосування.

До недоліків дванадцятиполюсників належить те, що вони забезпечують вимірювання лише на середніх рівнях потужності, потребують калібрування, і ця процедура за часом займає стільки ж, скільки й саме вимірювання. Крім того, відчувається дефіцит навантажень із параметрами, точно визначеними в широкому діапазоні частот.

Метод вимірювальної лінії заснований на вимірюванні розподілу напруженості поля в лінії передачі, розрахунках КСХН.

Найпростішим обладнанням, у якому використовується зондовий метод, є вимірювальна лінія. Пересуваючи прокалібрований зонд уздовж вимірювальної лінії, включеної між генератором і навантаженням, вимірюють максимальне й мінімальне діючі значення напруги (напруженості) поля в лінії, потім, користуючись відомими співвідношеннями, визначають КСХН.

Вимірювальна лінія незручна в експлуатації. Щілина вимірювальної лінії впливає на напруженість поля, а отже, і на вимірювані параметри. Крім того, механізм переміщення зонда недосконалий. На практиці одержали поширення нерухливі зонди.

Як показав аналіз літератури, багатозондовий метод використовується як для вимірювання параметрів сигналів, так і для вимірюванню параметрів трактів, так що цілком логічно об'єднати їх у багатofункціональному приладі для вимірювання параметрів сигналів і параметрів трактів, тому такому приладу на багатозондовом принципі присвячена дана робота.

## 2. РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА СПІВВІДНОШЕНЬ

В другому розділі запропоновано удосконалити модель НВЧ блоку з урахуванням перевідбиття від датчиків, також розглянуто питання вилучення інформації про невідомі параметри сигналів і трактів з надлишкової системи рівнянь із застосуванням фільтрації проміжних змінних.

### 2.1. Моделі багатозондового методу

Оскільки моделі й алгоритми багатозондового мультиметра взаємозалежні, є зміст розглядати їх спільно.

Для переходу від фізичних моделей до математичних використовують теорію НВЧ-кіл, зокрема, поняття й математичний запис стоячої хвилі, яка являє собою суму падаючої й відбитої хвилі

$$U = U_{над} + U_{отр} = e^{-i\gamma x} + \Gamma e^{j\gamma x}, \quad (2.1)$$

де  $\dot{\Gamma} = \Gamma e^{j\varphi}$  комплексний коефіцієнт відбиття навантаження;

$\Gamma$  – модуль коефіцієнта відбиття навантаження;

$\varphi$  – фаза коефіцієнта відбиття навантаження,

$x$  – координата,

$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda}$  – постійна розповсюдження,

$U_{над}$  – амплітуда падаючої хвилі,

$U_{отр}$  – амплітуда відбитої хвилі.

Аналіз цього виразу показує хвильовий характер поширення сигналу в тракті, про що свідчить експонента в виразі (2.1). Знаки падаючої й відбитої хвиль різні, тому що падаюча й відбита хвиля поширюються в протилежних напрямках.

Тепер, припускаючи, що датчик квадратичний, одержуємо сигнал на датчику

$$U_{\text{д}}^2 = P = (e^{-i\gamma x} (1 + \Gamma e^{j\gamma x}))^2 = kP_{\text{пад}} \left( 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \right), \quad (2.2)$$

де  $\frac{2\pi}{\lambda} x = \theta$  – фазова відстань між сусідніми датчиками, безрозмірна

величина, зворотно пропорційна довжині хвилі,

$P_{\text{пад}}$  – падаюча потужність.

Падаюча й відбита хвилі представлені векторами (рис.1.1). Кінець вектора суми падаючої й відбитої хвилі описує одиничне коло. Розгортка одиничного кола представляє собою стоячу хвилю.

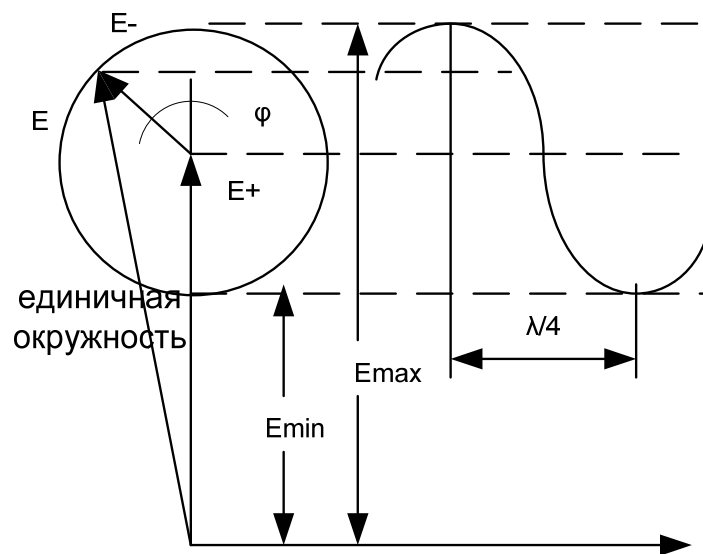


Рисунок 2.1 – Зв'язок між стоячою хвилею й одиничною окружністю

Багатозондовий метод полягає у відновленні стоячої хвилі по дискретним відлікам датчиків (рис.2.1).

У такому випадку сигнали датчиків являють собою значення амплітуд стоячої хвилі в конкретних точках уздовж напрямку переносу енергії в тракті. Вимірювання належить до непрямих, тобто шукані значення прохідної потужності визначаються за виразами

$$P_{пр} = P_{над} (1 - \Gamma^2), \quad (2.3)$$

та коефіцієнт відбиття навантаження

$$\Gamma = \sqrt{\frac{P_{отр}}{P_{над}}}, \quad (2.4)$$

находять розрахунком з сигналів датчиків.

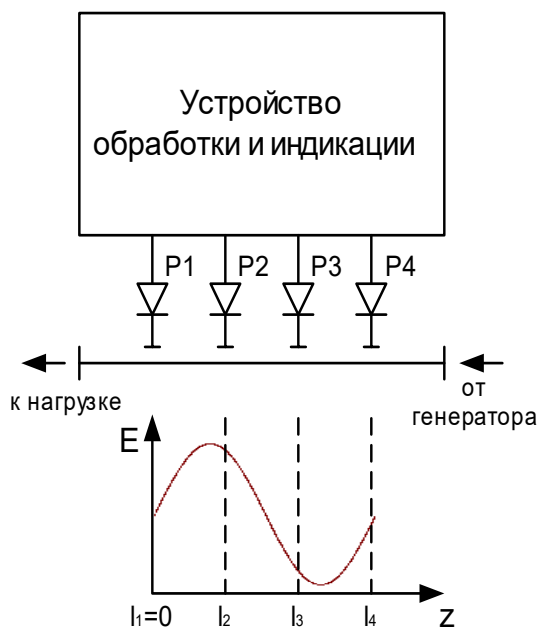


Рисунок 2.2 – Принцип дії багатозондового методу вимірювання



Рисунок 2.3 – Конструкція багатозондового НВЧ -перетворювача з датчиками

Хвилевід (рис.2.3) є порожньою металевою трубою прямокутного перетину, по якій від генератора в навантаження передається енергія. При цьому енергія поширюється перевідбиваючись від стінок хвилеводу, а в самі стінки поле заходить лише на глибину скін-шару, який зворотнопропорційний кореню квадратному із частоти й при таких частотах становить мікрометри.

Перетин хвилеводу визначає діапазон переданих частот. Не дивлячись на конкретний діапазон, для будь-якого перетину виконується умова, що робочими частотами є середня частота  $\pm 10\%$ , що становить діапазон хвилеводу. Також хвилевід характеризується дисперсією, тобто залежністю властивостей від частоти, це призводить до того, що частота й довжина хвилі у вільному просторі й хвилеводі відрізняються (у хвилеводі довжина хвилі більше, чим у вільному просторі).

У перших дослідженнях чотири датчики були розташовані на відстані  $\lambda/8$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі у хвилеводі. Сигнали датчиків попарно віднімають (рис.2.4). Одна з різниць сигналів пропорційна косинусу фази ККО, а друга – синусу. Різниці сигналів подають на вертикальні й горизонтальні пластини осцилографа. Екран осцилографа сполучений з діаграмою Вольперта- Сміта, яка призначена для перерахування ККО в повний опір. На екрані осцилографа спостерігається світлова точка. Дана точка відповідає шуканому значенню ККО. Основний недолік даного методу полягає в тому, що в діапазоні частот похибка даного методу збільшуються в порівнянні з фіксованою частотою.

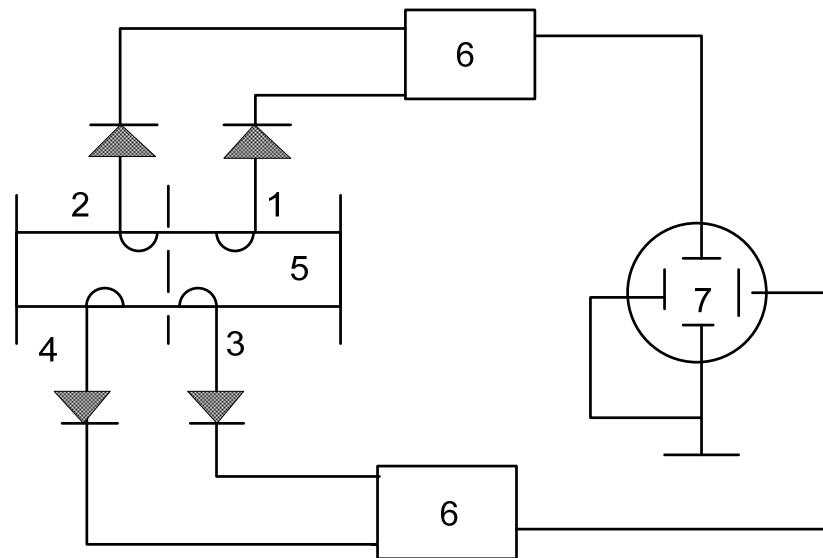


Рисунок 2.4 – Осцилографічний метод

1 – 4 – первинні перетворювачі, 5 – прямокутний хвилевід, 6 – диференціальний підсилювач для обчислення різниць, 7 – осцилограф для індикації.

## 2.2 Принцип вимірювання й похибка неузгодженості

Для багатозондового методу вимірювань, ще із часів використання одного датчика, основною проблемою є невідома фаза коефіцієнта відбиття навантаження, яка призводить до виникнення похибки неузгодженості. Похибка неузгодженості робить істотний внесок у загальну похибку методу.

Погодженим називається тракт, хвильовий опір якого дорівнює опору навантаження. При нерівності опорів спостерігається відбиття хвилі від навантаження. Мірою ступеня неузгодженості навантаження є коефіцієнт відбиття. Опори характеризуються амплітудою й фазою, тому що вони комплексні величини.

Якщо тракт погоджений, то навіть один датчик дає відомості про потужність у цьому тракті (рис.2.5). Якщо заздалегідь опір навантаження невідомий (рис.2.6 – 2.7), то вимірювання супроводжується великою похибкою.

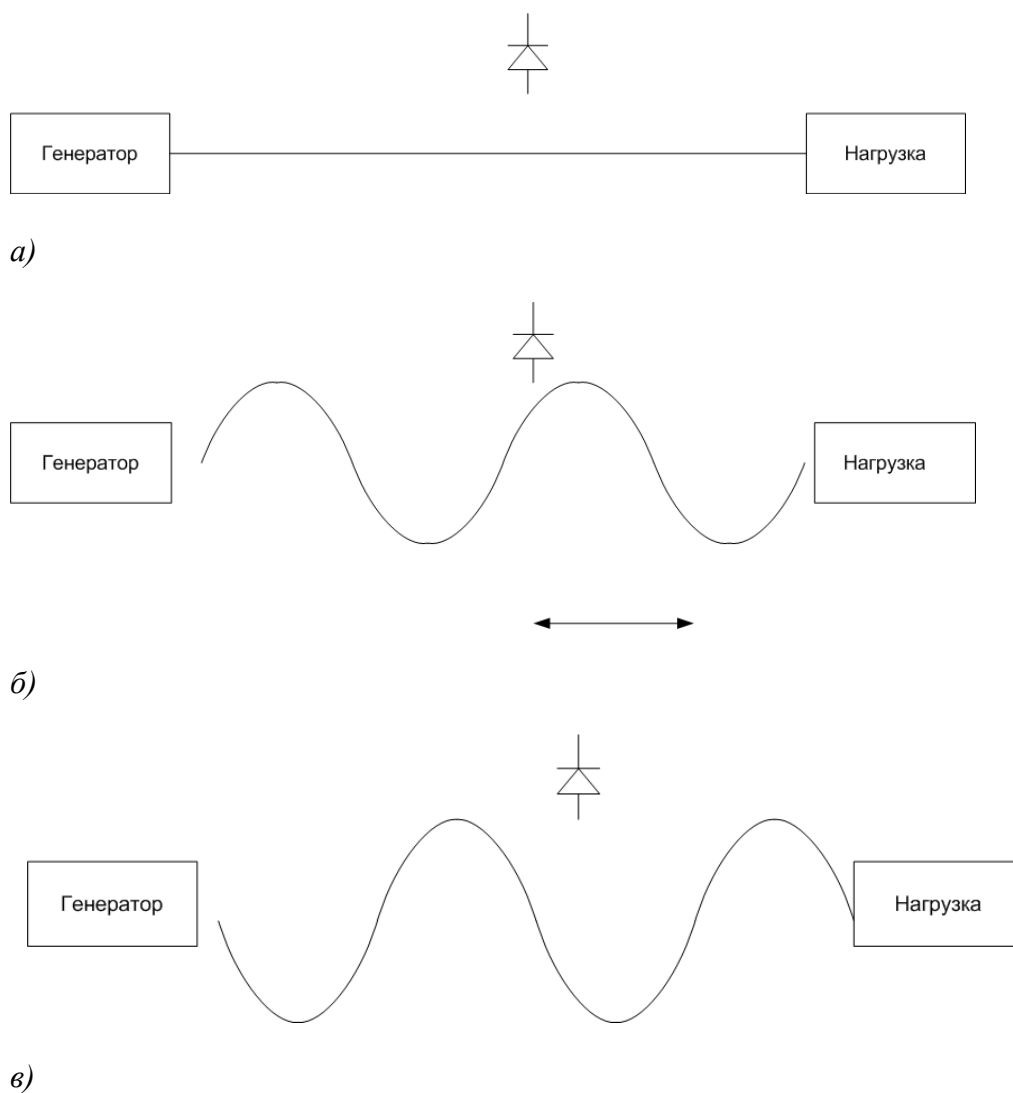


Рисунок 2.5 – Вплив ступеня неузгодженості навантаження на значення потужності при вимірюванні одним датчиком

а – для вимірювання в узгодженому тракті досить одного зонда;

б – вимірювання при першому значенні фази завантаження;

в – вимірювання при другому значенні фази завантаження.

При зміні фази навантаження значення сигналу із зонда можуть значно змінюватися. Таким чином, саме невідома фаза навантаження приводить до похибки, яку називають похибкою неузгодженості.

Похибку неузгодженості описують формулою

$$\delta_{рас} = \frac{P_{изм} - P_{пад}(1 - \Gamma^2)}{P_{пад}(1 - \Gamma^2)}, \quad (2.5)$$

де  $P_{изм}$  – виміряна потужність,  $P_{пад}(1 - \Gamma^2)$  – прохідна потужність за визначенням

$$\text{або } \delta_{рас} = \frac{P_{изм}}{P_{пр}} - 1.$$

### 2.3 Аналітичні моделі багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ

Аналітичні моделі являють собою систему трьох і більш рівнянь (по кількості датчиків, установлених у тракті) сигнали, що описують, датчиків. У цьому випадку за початок відліку прийнятий другий датчик

$$\begin{cases} P_1 = P_{пад}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi - \theta)) \\ P_2 = P_{пад}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi) \\ P_3 = P_{пад}(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos(\varphi + \theta)). \end{cases}, \quad (2.6)$$

Введемо проміжні змінні

$$b_0 = P_{пад}(1 + \Gamma^2), \quad b_1 = 2\Gamma P_{пад} \cos \varphi, \quad b_2 = 2\Gamma P_{пад} \sin \varphi. \quad (2.7)$$

З врахуванням проміжних змінних (2.6) вираз (2.7) може бути записаний в матричній формі

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b0 \\ b1 \\ b2 \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Значення  $\begin{bmatrix} b0 \\ b1 \\ b2 \end{bmatrix}$  можна визначити через обчислення зворотної матриці

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix}^{-1}, \text{ то єсть } \begin{bmatrix} b0 \\ b1 \\ b2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \theta & \sin \theta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

Переваги такого підходу – добре відомий апарат лінійної алгебри, який дає інструменти для аналізу таких систем, наприклад, у вигляді числа обумовленості для аналізу стійкості і т.д.

Недоліки, по-перше, припущення про ідеальність сигналів датчиків, а в реальних датчиків присутні похибки, по-друге, перехід від нелінійних рівнянь до лінійних несе в собі похибку.

Лінеаризація проводиться двома способами, використовуючи комплексну природу стоячої хвилі або тригонометричні тотожностями. Другий підхід більш розповсюджений.

Модель у вигляді системи рівнянь вирішують для одержання шуканих параметрів потужності й комплексного коефіцієнта відбиття.

2.4 Зменшення похибки неузгодженості за допомогою алгоритмічної обробки

Для усунення похибки неузгодженості використовують збільшення кількості датчиків і обробку сигналів датчиків по певних алгоритмах.

Спочатку обробка сигналів полягала в простому додаванні сигналів датчиків. Потім було встановлено, що алгоритмічна обробка дозволяє зменшити похибку неузгодженості значно більше, ніж просте додавання.

Сигнал датчиків є функцією падаючої потужності й коефіцієнта відбиття навантаження.

Поставлене завдання виразити падаючу потужність і комплексний коефіцієнт відбиття навантаження через сигнали датчиків. Метод підстановки дозволяє розв'язати систему лінійних рівнянь і одержати такі вирази для прохідної потужності

$$P_{np}^2 = 4P_1P_3 - (P_2 - P_4)^2,$$

$$P_{np}^2 = 4P_2(P_1 + P_3 - P_2) - (P_1 - P_3)^2 / 2,$$

$$P_{np}^2 = (P_1 + P_5)P_3 - (P_2 - P_4)^2.$$

В основі даних співвідношень лежить такий принцип перетворення проміжних змінних в шукані

$$\begin{aligned} P_{np} &= \sqrt{(P - \Delta P \cos \varphi)(P + \Delta P \cos \varphi) - (\Delta P \sin \varphi)^2} = \sqrt{P^2 - (\Delta P \cos \varphi)^2 - (\Delta P \sin \varphi)^2} = \\ &= \sqrt{P_{nao}^2 (1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 P_{nao}^2 \cos^2 \varphi - 4\Gamma^2 P_{nao}^2 \sin^2 \varphi} = P_{nao} \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} = \\ &= \sqrt{P_{nao}^2 (1 + 2\Gamma^2 + \Gamma^4) - 4\Gamma^4} = \sqrt{P_{nao}^2 (1 - 2\Gamma^2 + \Gamma^4)} = \sqrt{P_{nao}^2 (1 - \Gamma^2)^2} = P_{nao} (1 - \Gamma^2) = P_{прох}. \end{aligned}$$

Недоліком такого алгоритму є його чутливість до змін частоти. Більш сучасний розв'язок можливий через уведення проміжних змінних

У цей час практично стандартом є двоетапна процедура, коли із сигналів датчиків спочатку обчислюються проміжні змінні, а потім із проміжних змінних обчислюються шукані потужність і комплексний коефіцієнт відбиття (ККВ) навантаження, користуючись їх визначенням. Наприклад, обчислення прохідної потужності, яке компенсує похибку неузгодженості, і виражене через проміжні змінні, засноване на таких співвідношеннях

$$P_{np} = \sqrt{(b_0 - b_1)(b_0 + b_1) - (b_2)^2} = \sqrt{b_0^2 - b_1^2 - b_2^2}, \quad (2.9)$$

де  $\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$  – проміжні змінні з виразів (2.7) – (2.8).

За допомогою алгоритмічної обробки можна не тільки обчислити шукані параметри, але й зменшити похибку неузгодженості. Однак, алгоритмічна обробка є причиною того, що похибка результату збільшуються в порівнянні з похибкою одного датчика або обробкою у вигляді додавання за рахунок науопичення приватних похибок.

## 2.5 Використання оптимізації в алгоритмах

У ряді випадків модель багатозондового мікрохвильового мультиметра у вигляді системи рівнянь є надлишковою, тобто рівнянь більше, ніж шуканих змінних. Сигнали реальних датчиків на відміну від ідеалізованих моделей мають похибки. Тому виникає завдання обліку неідеальності датчиків. Критерієм оптимальності обробки служить зменшення похибки результату.

Оптимізація алгоритмів багатозондового мікрохвильового мультиметра здійснюється за критерієм мінімуму похибки.

Цільова функція, яку потрібно мінімізувати може бути записана виразом

$$V = \sum_{i=1}^4 (V_{ip} - V_{id})^2, \quad (2.10)$$

$$V = \sum_{i=1}^4 (\Gamma^2 + 2\Gamma(\cos(\varphi + \theta)) - V_i)^2 \rightarrow \min, \quad (2.11)$$

де  $V_{ip}$  – розрахункові значення;

$V_{id}$  – дійсні значення.

Для мінімізації останнього виразу знаходять похідну. Звідси шуканий коефіцієнт відбиття одержують розв'язком кубічного рівняння. Тоді при відсутності похибки від лінеаризації виникає похибка від розв'язку кубічного рівняння чисельними методами.

В методі найменших квадратів (МНК) мінімізують матрицю дисперсій і коваріацій

$$J = (z - Hx)^T (z - Hx), \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial J}{\partial x} = 0, \quad (2.13)$$

Після підстановки вираження (2.13) у вираз (2.12) виходить розв'язок надлишкової системи лінійних рівнянь

$$x = (A^T A)^{-1} A^T z, \quad (2.14)$$

де  $A$  – матриця системи рівнянь багатозондової системи.

У методі найменших квадратів використовується матриця дисперсій і коваріацій, на головній діагоналі якої розташовані дисперсії, а поза головної діагоналі – коваріації. Також запропоновано для оптимізації використовувати D-оптимальне планування, яке полягає в пошуку умов, зокрема, через вибір розміщення датчиків, коли визначник матриці дисперсій і коваріацій буде мінімальним. На рис.2.9 показано як змінюється функція ефективності в смузі

частот. Функція ефективності побудована на основі визначника матриці дисперсій і коваріацій. По осі абсцис відкладена величина зворотна фазовій відстані й прямопропорційна довжині хвилі в тракті, що більш зручно при розрахунках робочого діапазону по одному з рівнів похибки

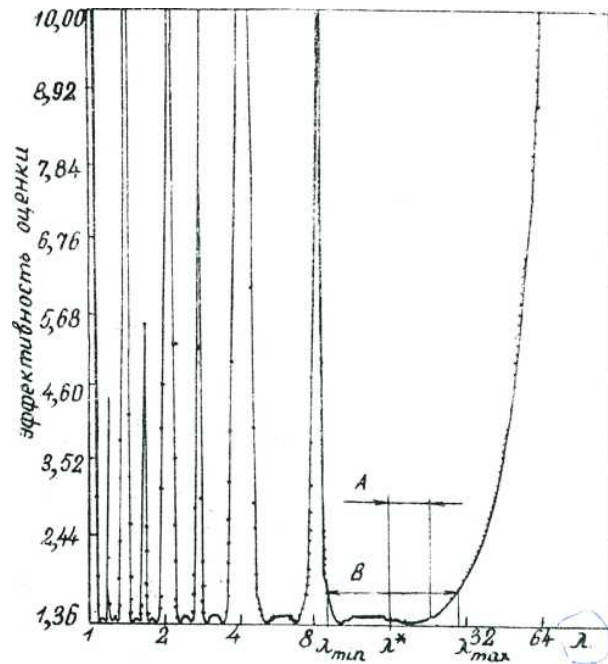


Рисунок 2.6 – Графік функції ефективності для чотирьохзондової вимірювальної лінії [100].

Також відомо А-оптимальне планування, яке оптимальним визначає матрицю дисперсій і коваріацій у якої найменший слід, тобто сума елементів на головній діагоналі.

Якщо матриця дисперсій і коваріацій мала б діагональний вид, то аналіз спростився б. Позадіагональні елементи матриці дисперсій і коваріацій, тобто коваріації в загальному випадку не дорівнюють нулю.

Умовою застосування методу найменших квадратів є багатомірний нормальний розподіл вихідних даних, яке на практиці не завжди гарантоване. У випадку невиконання умови нормальності зазнає сумніву оптимальність отриманих результатів.

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

Методи дослідження – це аналітичні методи, імітаційне моделювання та експеримент.

Для дослідження використовується не тільки аналітичні методи, але й імітаційне моделювання. Імітаційне моделювання в мікрохвильовій області корисно з точки зору забезпечення відтворюваності умов експериментів, дозволяє виділити з цілого ряду факторів, що впливають найбільш суттєві і має меншу в порівнянні з натурним експериментом вартість.

#### 3.1. Моделювання

При моделюванні зовнішніх впливів, під якими, насамперед, маються на увазі помилки виміру напруг на датчиках та інше, вважалось, що вони додаються адитивно до корисних складових сигналу. При цьому випадкові помилки вимірів сигналів моделювалися за допомогою генераторів псевдовипадкових чисел з гауссовим законом розподілу і заданою дисперсією  $\sigma^2$ , обраною так, щоб забезпечити необхідне відношення сигнал/шум  $b_i / \sigma$  на виходах датчиків [11].

При видачі результатів статистичного імітаційного моделювання для їх подальшого аналізу використовуються залежності елементів дисперсійної матриці помилок оцінюваних параметрів від різних вхідних величин. Матриці системи рівнянь будуються за фазовим відстаням між датчиками.

При проектуванні вимірювача, що реалізує вибрані алгоритми вимірювання та обробки отриманої інформації, має бути проведено порівняння цих алгоритмів з іншими альтернативними рішеннями. В якості критерію порівняння зазвичай обирається точність знаходження оцінюваних параметрів, яка досягається за допомогою цих алгоритмів.

Остаточне уявлення про можливості розроблюваної вимірювальної системи та її характеристики дають лише натурні випробування, тому найнадійніший спосіб порівняння різних стратегій – це експериментальне дослідження різних вимірювачів після виготовлення їх макетних зразків. Такий підхід пов'язаний з цілою низкою проблем. По-перше, при натурних випробуваннях неможливо створити необхідні умови спостереження, тому що вони залежать від об'єктивних зовнішніх факторів, що не піддаються впливу. По-друге, ускладнене проведення достатньої кількості випробувань при одних і тих же умовах, що не дозволяє отримати необхідної статистики спостережень і стверджувати повну об'єктивність експериментальних досліджень. По-третє, реальне втілення НВЧ-вимірювальної системи, використовуваної при проведенні експериментальних досліджень, як правило, є досить дорогою і трудомісткою справою, тому при порівнянні проектних або конструкторських рішень витрати коштів і часу зростають пропорційно числу порівнюваних варіантів.

Випробування, проведені на математичних моделях, цих недоліків позбавлені. Вони дозволяють визначати найрізноманітніші характеристики за будь-яких заданих значеннях параметрів, умови експерименту повністю відтворювані, кількість випробувань може бути досить великою. Метою математичного моделювання, є зменшення числа повторних експериментальних досліджень макетних зразків. Таким чином, випробування на моделі є відповідальним і обов'язковим етапом дослідження синтезованих алгоритмів і вимірювальних систем в цілому.

Математична модель являє собою формалізований опис системи (або проведених операцій) за допомогою деякої абстрактної мови, наприклад, у вигляді сукупності математичних співвідношень або схеми алгоритму. Математичні моделі доцільно використовувати при розробці нових програм вимірювачів, для оцінки ефективності альтернативних стратегій автоматичного вимірювання параметрів НВЧ-пристроїв.

При розробці комп'ютерної моделі досить істотним буде вибір програмного забезпечення, за допомогою якого виконується моделювання. Програмне забезпечення повинно ефективно вирішувати завдання. Наприклад, для створення малюнка на комп'ютері треба вибрати той чи інший графічний редактор. Який саме залежить від необхідного формату файлу і прийомів, які ви хочете використовувати при малюванні. Програмне середовище повинна бути адекватним поставленій задачі, тільки в цьому випадку завдання може бути успішно вирішене. Вибір програмного забезпечення і складання алгоритму – це взаємопов'язані дії. Можливо, що для вирішення поставленого завдання доведеться звернутися до складання програми.

Коли модель складена, можна приступати до найцікавішого етапу – комп'ютерним експериментів. В ході цих експериментів перевіряється робота моделі, а також виконуються необхідні розрахунки і перетворення, заради яких і створювалася модель.

Перевірка моделі здійснюється звичайно за допомогою її тестування. При тестуванні перевіряється розроблений алгоритм функціонування моделей. Як тест задають вихідні дані для яких заздалегідь відома відповідь. Якщо відповідь, отримана при тестуванні збігається з відомим, а тест складений правильно, то вважається, що модель працює коректно. В іншому випадку потрібно шукати і усувати причини розбіжностей. Всі ці дії називаються налаштуванням моделей. Після виконання тестування і налаштування можна безпосередньо приступати до моделювання. Технологія моделювання може складатися в розрахунку моделі при різних наборах вихідних даних, різних параметрах.

Завершується комп'ютерне моделювання аналізом результатів. Матеріалом для аналізу є результат комп'ютерних експериментів. Тому експерименти повинні бути проведені таким чином, щоб отримати достовірний результат.

Процес створення моделі можна надати як шлях від постановки задачі, тобто від інформаційної моделі, до реалізації її на комп'ютері відбувається за допомогою програм.

Відзначимо, що при розробці комп'ютерної моделі дуже важливим є вибір програмного забезпечення, за допомогою якого буде реалізована модель. Можливі два основні варіанти вибору - по-перше, прикладне ПЗ, і, по-друге, середовище програмування.

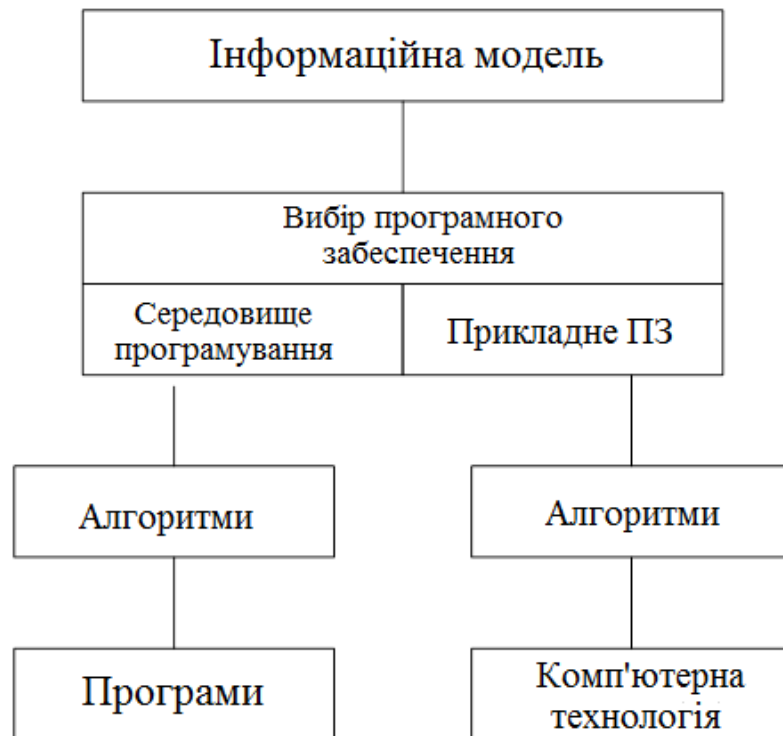


Рисунок 3.1 – Етапи створення комп'ютерної моделі

Прикладні програми (текстові, графічні, музичні редактори, електронні таблиці, математичні пакети тощо) мають високий рівень сервісних можливостей. Завдяки цьому робота на комп'ютері виконується в режимі користувача, знання мов програмування при цьому не потрібно. Інша справа, коли планується реалізація моделі в середовищі програмування. У цьому випадку буде необхідно знання конкретної мови, і розуміння принципів побудови комп'ютерних моделей.

Якщо в якості ПЗ було обрано середовище програмування, то побудова комп'ютерної моделі завершиться створенням програми. Якщо для побудови моделі обране існуюче прикладне ПЗ, то рішення задачі призводить до створення

якоїсь комп'ютерної технології. Під комп'ютерною технологією розуміється послідовність операцій з обробки вхідних даних, яке призводить до бажаного результату.

Як видно зі схеми (рис.3.1), створення програми або комп'ютерної технології обов'язково передуює складання алгоритму.

Mathcad – це потужна і в той же час просте універсальне середовище для вирішення завдань в різних галузях науки і техніки, фінансів і економіки, фізики та астрономії, будівництва та архітектури, математики і статистики, організації виробництва та управління. Воно має широкий набір інструментальних, інформаційних та графічних засобів. Сьогодні Mathcad – одна з найпопулярніших математичних систем. Вона користується великим попитом у студентів, інженерів, економістів, менеджерів, науковців та всіх тих, чия діяльність так чи інакше пов'язана з кількісними методами розрахунку.

З метою розширення діапазону частот будують математичну модель багатозондового мікрохвильового мультиметра і проводять її аналіз. Модель являє собою систему лінійних рівнянь. Для вирішення системи рівнянь використовують апарат лінійної алгебри – вводять проміжні змінні, що описують постійну і змінну складові кривої стоячої хвилі в тракці. Кількість датчиків і спосіб їх розміщення визначається з математичної моделі, використовуючи як критерій оптимальності мінімум похибки оцінки потужності і комплексного коефіцієнта відбиття (ККВ).

Якщо кількість датчиків більше, ніж число змінних, то підвищити точність можна за рахунок усереднення і компенсації випадкових похибок. У такому випадку використовується в якості алгоритму обробки сигналів датчиків метод найменших квадратів (МНК). А для аналізу похибок можна використовувати прикладної лінійний регресійний аналіз. У D-оптимальному (D – determinant, визначник) плануванні експерименту, яке вибрано для аналізу, мінімізується обсяг еліпсоїда розсіювання, тобто похибку. Аналітичному запису еліпсоїда розсіювання відповідає матриця дисперсій і коваріацій, яка надана виразом (3.2),

для обчислення якої, на підставі матриці системи рівнянь, визначеної виразом (3.1)

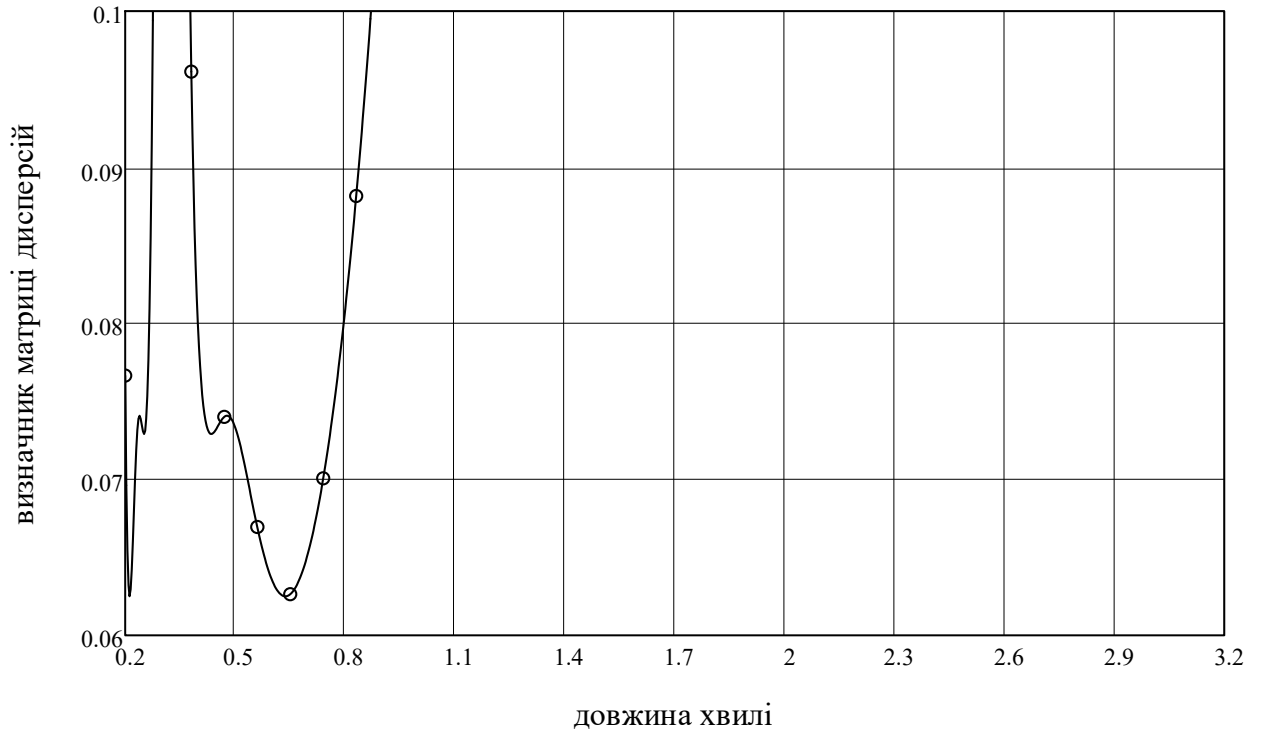
$$a(\theta) := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 1 & \cos(2 \cdot \theta) & \sin(2 \cdot \theta) \\ 1 & \cos(3 \cdot \theta) & \sin(3 \cdot \theta) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$D(\theta) := \left( a(\theta)^T \cdot a(\theta) \right)^{-1} \quad (3.2)$$

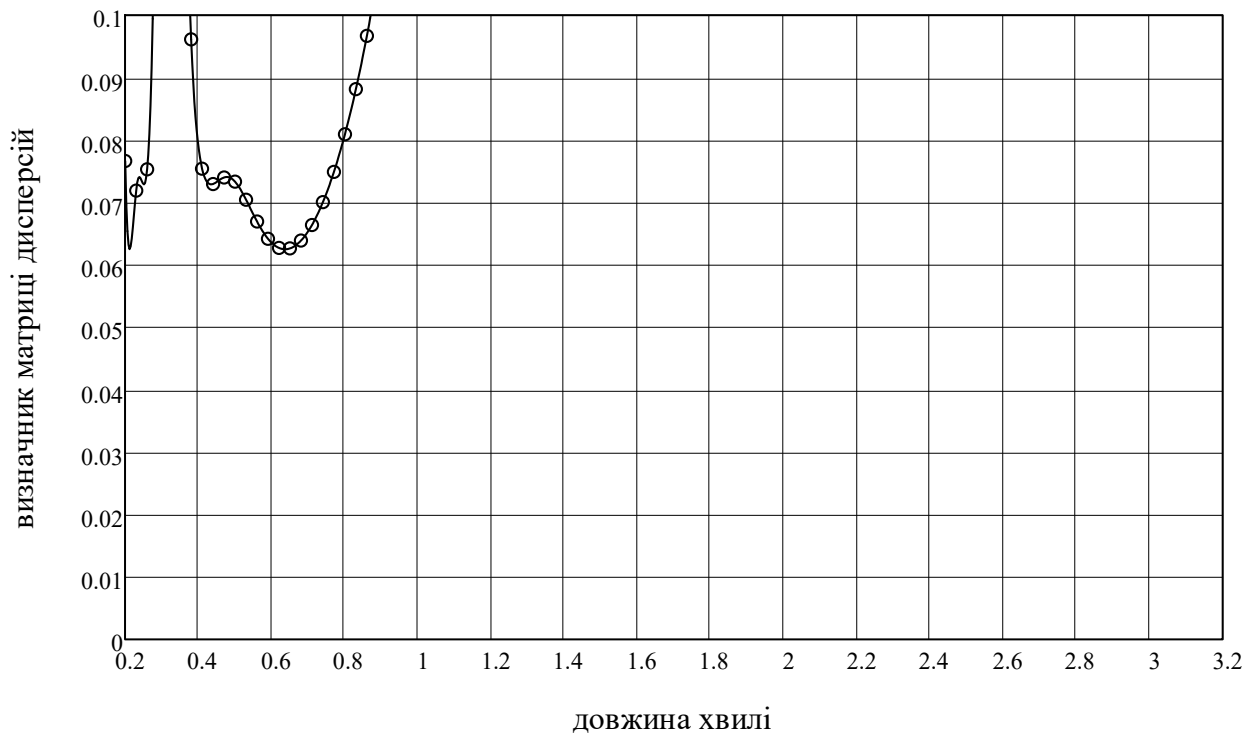
у припущенні багатовимірного нормального розподілу похибок сигналів датчиків і керуючись принципом максимальної правдоподібності, будується інформаційна матриця Фішера, яка потім інвертується. При цьому зміна частоти закладена в матриці системи рівнянь через фазову відстань між сусідніми датчиками. Таким чином, варіюючи фазовий відстань або зворотну йому величину пропорційну довжині хвилі, знаходять залежність похибки від діапазону частот.

Таке збільшення кількості датчиків з іншого боку може порушити регулярність тракту і привести до пробою. Таким чином, при проектуванні потрібно знайти компроміс між двома тенденціями. Збільшення числа датчиків з одного зменшує випадкову похибку, але іншого боку збільшує систематичну, викликану, наприклад, перевідбиваннями між датчиками.

Аналіз рис.3.2 показує, що на деяких частотах похибка істотно зростає, в такому разі робочий діапазон можна визначити як ділянку на горизонтальній осі де відсутні великі значення визначника матриці дисперсій і коваріацій, яке відкладене по вертикальній осі.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Залежність похибки (визначника матриці дисперсій коваріацій) від зворотної фазової відстані, яка пропорційна довжині хвилі для чотирьох датчиків

На рис. 3.2 а) та рис.3.2 б) показані різні ділянки по вертикальній осі. На рисунку б) ось починається з 0, таке позначення буде корисним при співставленні визначників матриці дисперсій та коваріацій для кількості датчиків чотири, шість і вісім в подальшому.

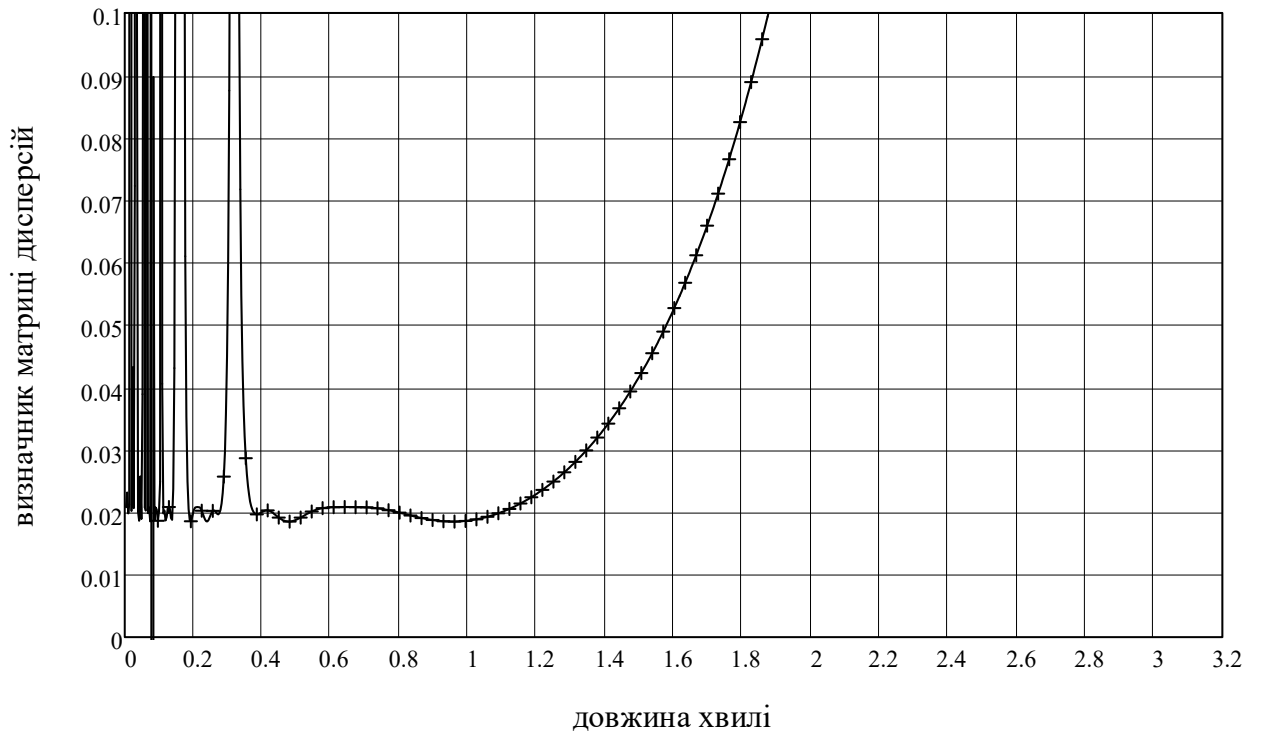


Рисунок 3.3 – Залежність похибки від зворотної фазової відстані, яка пропорційна довжині хвилі для шести датчиків

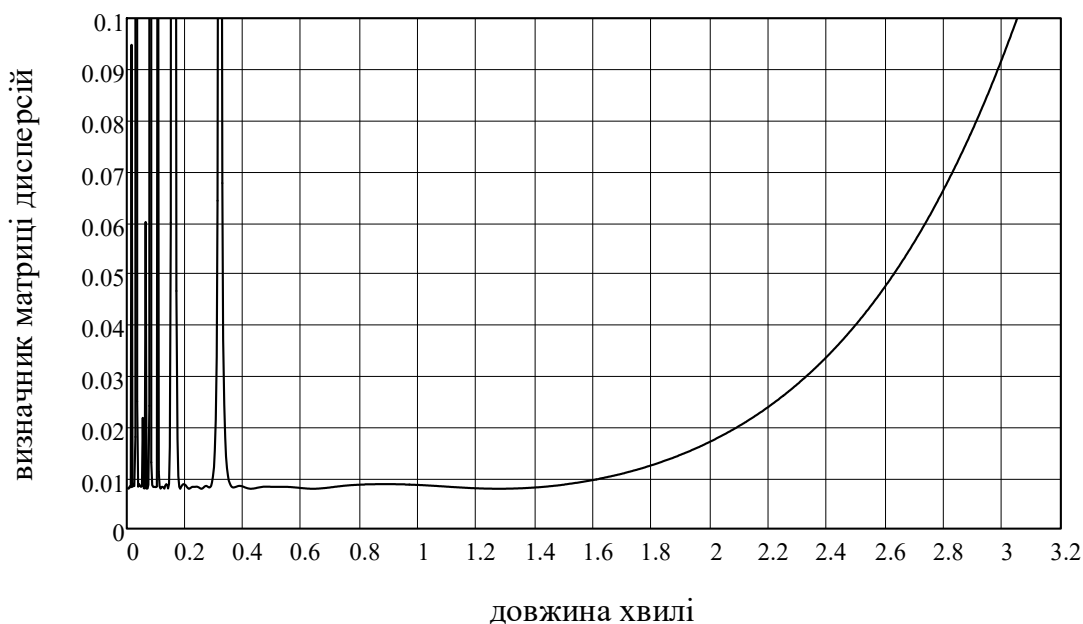


Рисунок 3.4 – Залежність похибки від зворотної фазової відстані, яка пропорційна довжині хвилі для вісьми датчиків

Аналіз результатів з рис.3.3. та 3.4 показав, що робочий діапазон для восьми датчиків більше порівняно з робочим діапазоном для шісти датчиків. Значення похибки в робочому діапазоні для восьми датчиків теж менше ніж для шісти і становить 0,01, а для шісти 0,02. Чим менше похибка, тим краще.

Для порівняння наведемо загальновідомі графіки.

Порівняння показує якісне співпадіння результатів отриманих нами з загальновідомими.

Для наочності наведемо на одному графіку для шісти і для восьми датчиків.

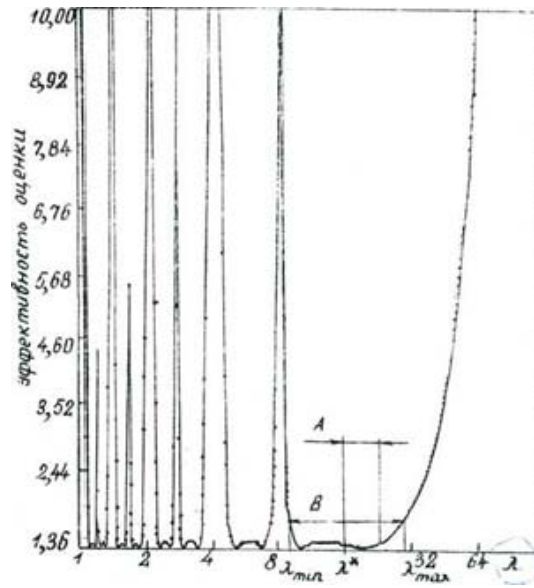


Рисунок 3.5 – Поведінка визначника матриці дисперсій і коваріацій в смузі частот

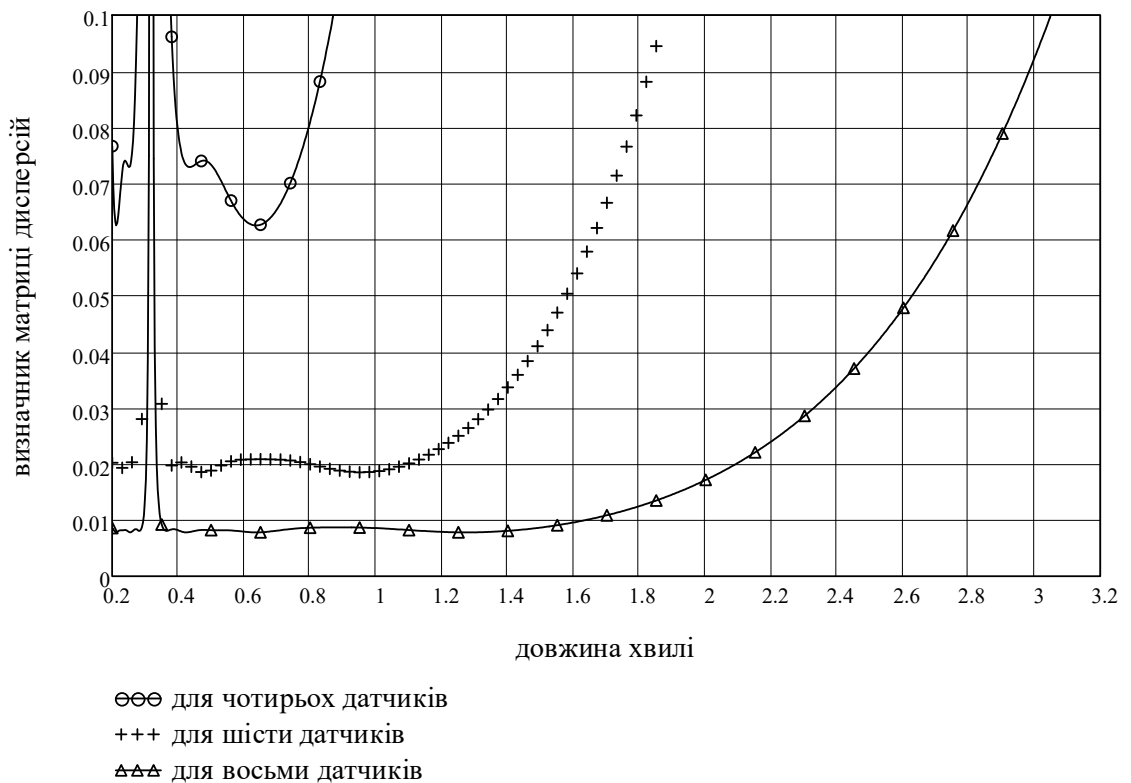


Рисунок 3.6 – Залежність визначника матриці дисперсій і коваріацій від довжини хвилі

Проведене моделювання для кількості датчиків: чотири, шість і вісім (рис.3.6) показало зменшення похибки із зростанням числа датчиків. Так для

чотирьох датчиків робочий діапазон становить менше октави. Для шести датчиків перевищує октаву. А для восьми датчиків відношення максимальної довжини хвилі до мінімальної більше п'яти, то є дві октави.

Лише парна кількість датчиків під час моделювання пояснюється тим, що при непарній кількості датчиків не компенсуються перевідбиття між сусідніми датчиками, через це зростає похибка. Тому що похибка перевідбиттів і компенсація випадкової похибки усередненням МНК показань з великої кількості датчиків знаходяться дещо в протифазі, тобто одна зростає, коли друга зменшується і потрібно знайти баланс між цими похибками. Недоцільність збільшувати кількість датчиків до 10 і більше штук пояснюється конструктивними обмеженнями для типу датчиків, які використовуються і мають розміри співставимі з розмірами хвилевода, де вони монтуються.

Чому саме визначник матриці дисперсій та коваріацій є мірою ефективності проведених вимірювань. Тому що визначник відповідає еліпсоїду розсіювання похибок навколо істинного значення, чим менше об'єм еліпсоїда розсіювання, тим щільніше значення отримані в результаті вимірювання прилягають до істинного, тим менше розкид або дисперсія, саме про це йдеться в D-оптимальному плануванні експериментів.

### Фрагмент моделювання в MathCad

### Програма 1

$$a(x) := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos\left(\frac{1}{x}\right) & \sin\left(\frac{1}{x}\right) \\ 1 & \cos\left(2 \cdot \frac{1}{x}\right) & \sin\left(2 \cdot \frac{1}{x}\right) \\ 1 & \cos\left(3 \cdot \frac{1}{x}\right) & \sin\left(3 \cdot \frac{1}{x}\right) \end{pmatrix}$$

$$D4(x) := \left( a(x)^T \cdot a(x) \right)^{-1}$$

$$a6(x) := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos\left(\frac{1}{x}\right) & \sin\left(\frac{1}{x}\right) \\ 1 & \cos\left(2 \cdot \frac{1}{x}\right) & \sin\left(2 \cdot \frac{1}{x}\right) \\ 1 & \cos\left(3 \cdot \frac{1}{x}\right) & \sin\left(3 \cdot \frac{1}{x}\right) \\ 1 & \cos\left(4 \cdot \frac{1}{x}\right) & \sin\left(4 \cdot \frac{1}{x}\right) \\ 1 & \cos\left(5 \cdot \frac{1}{x}\right) & \sin\left(5 \cdot \frac{1}{x}\right) \end{pmatrix}$$

$$D6(x) := \left( a6(x)^T \cdot a6(x) \right)^{-1}$$

$$a8(\theta) := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos\left(\frac{1}{\theta}\right) & \sin\left(\frac{1}{\theta}\right) \\ 1 & \cos\left(2 \cdot \frac{1}{\theta}\right) & \sin\left(2 \cdot \frac{1}{\theta}\right) \\ 1 & \cos\left(3 \cdot \frac{1}{\theta}\right) & \sin\left(3 \cdot \frac{1}{\theta}\right) \\ 1 & \cos\left(4 \cdot \frac{1}{\theta}\right) & \sin\left(4 \cdot \frac{1}{\theta}\right) \\ 1 & \cos\left(5 \cdot \frac{1}{\theta}\right) & \sin\left(5 \cdot \frac{1}{\theta}\right) \\ 1 & \cos\left(6 \cdot \frac{1}{\theta}\right) & \sin\left(6 \cdot \frac{1}{\theta}\right) \\ 1 & \cos\left(7 \cdot \frac{1}{\theta}\right) & \sin\left(7 \cdot \frac{1}{\theta}\right) \end{pmatrix}$$

$$D8(\theta) := \left( a8(\theta)^T \cdot a8(\theta) \right)^{-1}$$

### 3.2 Експериментальна установка

На рис.3.7 показана реалізація блоку обробки й індикації, який підключається до НВЧ-блоку.



Рисунок 3.7 – Реалізація багатозондового мікрохвильового мультиметра

На рис.3.8 показане устаткування, яке використовувалося для проведення експериментів. Це панорамний вимірник КСХН, вимірювальна лінія.



Рисунок 3.9 – Устаткування для експериментів

За допомогою вимірювальної лінії можна визначити значення сигналів у точках стоячої хвилі.

При проведенні експериментів використовувалися елементи теорії планування експериментів. Як впливає из теоретичної частини, факторами, які міняються, є фазові відстані й кількість датчиків.

Нарешті, доцільно привести використання засобу вимірювання на основі пропонованого методу в одному із прикладних застосувань технологічної установки нагрівання й сушіння.

Розвиток елементної бази НВЧ-електроніки робить економічно вигідним впровадження енергозберігаючої термічної обробки в широкому колі технологічних процесів. Це ставить перед НВЧ-технікою нові технічні й теоретичні завдання. До них, зокрема, належить створення полів із заданим розподілом в об'єктах складної форми. При цьому з одного боку необхідно враховувати зміну в процесі обробки характеристик об'єкта, а з іншого боку забезпечувати роботу НВЧ-генераторів при неузгодженому, нестабільному навантаженні.

Однієї із проблем, що виникають при створенні технологічних НВЧ-установок високої потужності, є обмеження рівня відбитої хвилі, яка може вивести з ладу генератор. При технологічному впливі НВЧ-поля об'єкт може міняти свої параметри в широкому діапазоні значень, відповідно, міняється навантаження генератора. Швидкість таких змін, як правило, порівняно невисока. Але, якщо технологічний процес припускає утворення плазмової області або виникає неконтрольована електрична дуга при забрудненні елементів НВЧ-тракту, зокрема, вихідної апертури, тоді динаміка змін параметрів навантаження може бути високою. Це змушує розробників установок обладнувати генератори НВЧ потужності джерелами живлення, обладнаними системами захисту, які по складності можуть суттєво перевершувати сам генератор (рис.3.8).



Рисунок 3.10 – Генераторный блок установки

Інші розв'язання, наприклад, просте поглинання відбитої потужності, знижує економічні показники. Крім того, Y-циркулятори й потужні погоджені навантаження, які в цьому випадку стають необхідними елементами тракту, суттєво збільшують розміри й вагу установок.

Методи й конструкції систем захисту генераторів визначаються існуючою елементною базою, як НВЧ, так і низькочастотних діапазонів. Більшість потужних генераторних ламп НВЧ-діапазону можуть витримувати коротке замикання протягом одиниць-десятків мілісекунд. Інтервали часу, які необхідні сучасним системам живлення для відключення напруги генераторів, становлять одиниці-десятки мікросекунд. На мілісекундних інтервалах такі джерела живлення дозволяють знизити згенеровану потужність до рівня, при якому відбита потужність не приводить до руйнування генератора. Однак такі системи захисту переривають технологічний процес, що в більшості випадків неприпустимо. Розв'язок даної проблеми припускає використання автоматичних тюнерів НВЧ-тракту, що компенсують зміну комплексного опору навантаження в широкому діапазоні. Однак, сучасна елементна база не дозволяє створити

електрично керовані НВЧ-тюнери, розраховані на високу потужність, що й мають плавну зміну параметрів. Тому тюнери створюються на основі механічно керованих елементів (рис.3.9).

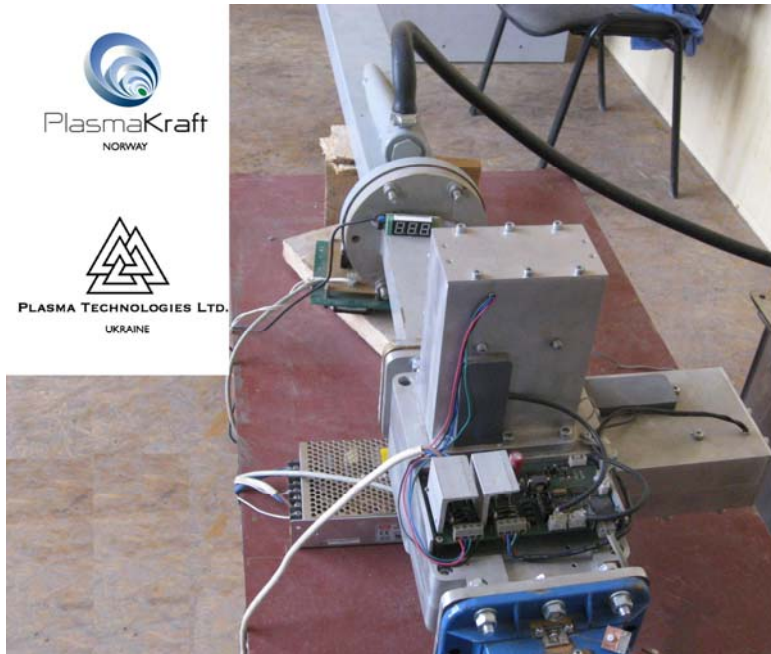


Рисунок 3.19 – Автоматичний тюнер НВЧ тракту

Комбінації автоматичних тюнерів і інтелектуальних систем живлення, дозволяють забезпечити захист генераторної лампи на мікросекундних інтервалах, а при змінах навантаження в інтервалах  $\sim 1 \dots 10$  мсек знизити згенеровану потужність для наступного узгодження тракту відповідно до стану, що змінився, навантаження.

Для створення таких комбінованих систем потрібні НВЧ-вимірювачі падаючої й відбитої потужності, фази коефіцієнта відбиттів, а в ряді випадків потрібно вимірювати частоту основного коливання, модовий і спектральний склад поля. Вимірювачі повинні працювати у великому динамічному діапазоні потужностей, при складному модовому і гармонійному складі поля у фідері. Крім того, від вимірювача потрібна простота елементів, що містяться в тракті, мінімум власних відбиттів, малі розміри. Вимірювачі на основі спрямованих відгалужувачів дозволяють оцінити рівні падаючої й відбитої потужностей, але не дозволяють визначити фазу коливань. Необхідним умовам відповідають багатозондові НВЧ-

мультиметри, що містяться в основний тракт. Але класична схема такого вимірювача, вимагає доповнень, які підвищують інформативність вимірювань. Тому в якості елемента зв'язку обрані петлі, тому що вони мають спрямованість і додаткові зонди із системами фільтрів для одержання інформації про гармонійний і модовий складі коливань.

Разом з мікроконтролерною системою обробки первинних сигналів зондів, керування тюнером і режимом роботи генератора така установка забезпечує безперервність технологічної обробки при високому ступені захищеності й максимальному ККД.

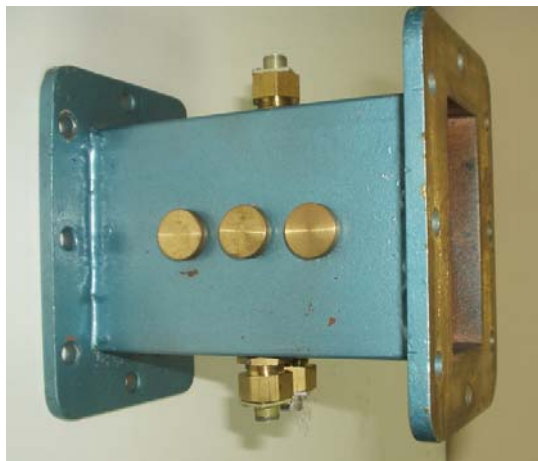


Рисунок 3.12 – Розташування датчиків і заглушок в режимі калібрування

Наведені розроблені методики виконання вимірювань падаючої, відбитої й прохідної потужності, модулю й фази комплексного коефіцієнта відбиття навантаження, коефіцієнта стоячої хвилі, повного опору, довжини хвилі.

Експериментальні дослідження проводяться на малому рівні потужності. Для великого урвня потужності можуть бути в наслідку використані ті ж алгоритми. Результати досліджень зведені в таблицю, яка являє собою залежність амплітуди СВЧ поля від положення крапки на епюрі стоячої хвилі уздовж хвилеводу. Умови експерименту: генератор від панорамного вимірника КСВН, частота генерації 8 ГГц, перетин хвилеводу 23x10 мм, вимірювальна лінія P1-4.



Рисунок 3.13 – Вимірювальна лінія Р1-4

## 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 7х5х4 м, що становить площа 35 м<sup>2</sup>, обсяг 140 м<sup>3</sup>. У приміщенні 2 вікна площею 10 м<sup>2</sup>. 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 м<sup>2</sup>, обсяг - 46,6 м<sup>3</sup> при нормі 6 м<sup>2</sup> і 20 м<sup>3</sup> відповідно по НПАОП 0.00-1.28-10.

Електроживлення здійснюється за допомогою трифазної чотирих 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.

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 регульовальні 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 5.1.

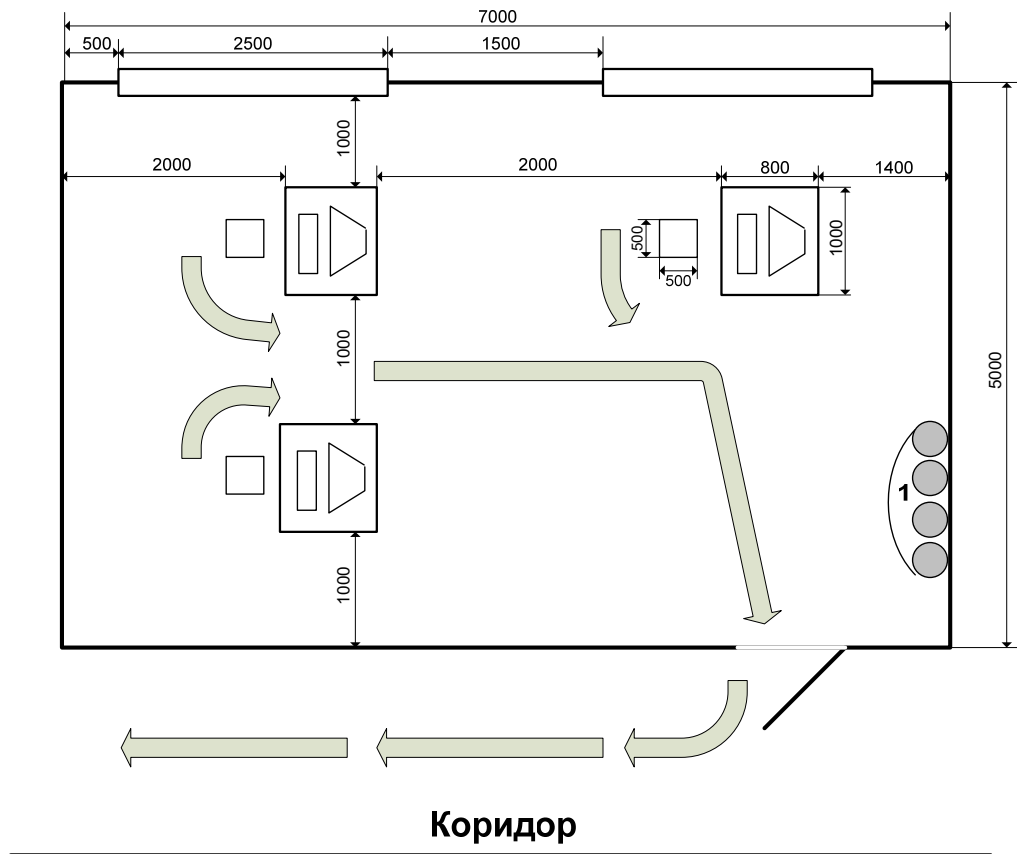


Рисунок 4.1 – План розміщення робочих місць з планом евакуації при пожежі

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 рабiт 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  $\varphi_1$  – коефіцієнт використання настановної потужності устаткування;

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

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

$N$  – 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  $K$  – питоме тепловиділення на 1 люкс освітленості,  $K = 0,05$  ккал/лк·м<sup>2</sup>·ч  
 $E$  – найменша освітленість приміщення, 300 лк;  
 $S$  – площа приміщення,  $S = 7 \cdot 5 = 35$  м<sup>2</sup>.

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

Визначаємо кількість тепла, що надходить через вікна:

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

де  $s$  – площа скління,  $s = 10$  м<sup>2</sup>;

$q$  – величина сонячної радіації, що передається через 1 м<sup>2</sup> скління, що залежить від орієнтування вікон,  $q = 130$  ккал / м<sup>2</sup> \* 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:

$$L = \frac{Q_{\Sigma}}{C(t_{\text{н}} - t_{\text{пр.}})}, \quad (4.6)$$

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

$t_{\text{н}}$  – температура повітря, що видаляється,  $t_{\text{н}} = 31^{\circ} \text{C}$ ;

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

$C_{\text{уд.}}$  – питома теплоємність повітря,  $C_{\text{уд.}} = 0.237 \text{ ккал / кг }^{\circ} \text{C}$ ;

$P_{\text{об}}$  – об'ємна вага припливного повітря,  $P_{\text{об}} = 1,205 \text{ кг / м}^3$ ;

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

$$L = \frac{4094}{0,286(31 - 21)} = 1101,12 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

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,  $t_{\text{нар.}} = 32^{\circ} \text{C}$ .

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

Система кондиціонування вибирається виходячи з таких умов:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_k \geq L \end{array} \right.$$

$$Q_k \geq Q_{\text{хол.}} , \quad (4.8)$$

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

З урахуванням отриманих результатів вибираємо кондиціонер Daewoo DMB-1812LN, який зможе забезпечити для спекотної пори необхідні повітрообмін і охолодження зовнішнього повітря для підтримки оптимальних параметрів мікроклімату. Характеристики: Обмін повітря – 1200 м<sup>3</sup>/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 м<sup>2</sup> 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

Багатозондовий метод вимірювання параметрів НВЧ-сигналів і трактів, незважаючи на те, що відомий досить давно, має ресурси для підвищення точності за рахунок оптимальної обробки сигналів датчиків.

З аналізу літератури зроблені такі висновки: проміжні змінні й лінеаризація дозволяють створювати надійні моделі і алгоритми обробки сигналів датчиків в багатозондовому мікрохвильовому мультиметрі; двоетапна процедура обробки сигналів датчиків полягає в обчисленні з сигналів датчиків проміжних змінних, шуканих змінних із проміжних змінних; алгоритми обробки, крім обчислення параметрів, дозволяють компенсувати похибку неузгодженості; оптимізація має на увазі мінімізацію цільової функції, яка у випадку методу найменших квадратів являє собою квадрат різниць обмірюваних і обчислених значень.

Із критичного аналізу стану проблеми виміру параметрів сигналів і трактів НВЧ випливає, що залишилися недостатньо дослідженими надлишкові системи рівнянь.

У атестаційній роботі вирішене наукове завдання підвищення точності багатозондового методу вимірювання параметрів сигналів і трактів НВЧ. Найбільш важливими науковими і практичними результатами отриманими в роботі є:

Метод обробки сигналів датчиків, що дозволяє розрахувати прохідну потужність, модуль та фазу коефіцієнта відбиття навантаження точніше на 50%.

Проведене моделювання для кількості датчиків рівного чотири, шість і вісім показало зменшення похибки із зростанням числа датчиків. Так для чотирьох датчиків робочий діапазон становить менше октави. Для шести датчиків перевищує октаву. А для восьми датчиків відношення максимальної довжини хвилі до мінімальної більше п'яти, тобто дві октави.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008 – 2015. Державний стандарт України. Документація, звіти у сфері науки. Структура і правила оформлення – Чинний від 1 липня 2017 р
2. Измерение мощности на СВЧ/ Билько М.А., Томашевский А.К., Баймуратов Е.А., М.: Сов.радио, 1976;
3. Кудряшов Ю. Ю., Моржаков А. А., Ширшин С. И. Оптимизация параметров многозондовой измерительной линии // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1988;
4. Статистические методы в инженерных исследованиях (Лабораторный практикум). Под ред. Г.К. Круга. – М: "Издательство МЭИ", 1983.
5. Латников С.Ю. Измерение комплексных отношений СВЧ-сигналов методом калибруемого многополюсника // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. — 1984. — Вып. 1(361)- — С. 55—58.
6. Никулин С. М., Салов А. Н. Применение двенадцатиполусных рефлектометров в технике СВЧ-измерений // Радиотехника. — 1987.
7. Яцкевич В.А. Измерение параметров СВЧ-узлов с помощью многополюсных рефлектометров // Измерительная техника. — 1987. — № 3. — С. 43—46.
8. Матеріали міжнародного форуму (тези) «Електроніка і молодіж 21-го віка»: Харків, 2015.
9. Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ. – М. Радиотехника, 2008. – 184 с.
10. Engen G.F. The six-port reflectometer: an alternative network analyzer. IEEE Trans Microwave Theory Techn., vol. MTT-25, pp.1075-1079, Dec.1977
11. Gelb, A. Applied Optimal Estimation. – MIT Press, 2001. – 374 p.
12. Klychnyk I.I., Miroshnik M.A., Tsekhmistro R.I., Warsza Z.L., Zaichenko O.B. Modelling of influences of sensor reflections on the accuracy of a microwave reflectometer // Pomiaru, automatyka, kontrola, vol.60,nr4/2014. – P.223 – 227.
13. Козлов Ю.В. Усовершенствование методов и средств измерений параметров

сигнала и нагрузки линии передачи СВЧ – Рукопись Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 – стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. - Севастопольский национальный университет ядерной энергии та промышленности, Севастополь, 2010.

14. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11. - М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 832 с.

15. Иванов, Е.Н. Автоматическая пожарная защита :/ Е. Н. Иванов. – М.: Издательство «Стройиздат», 1980. – 198 с.

16. Дзюндзюк Б.В. Охрана труда. Сборник задач / Дзюндзюк Б.В., Иванов В.Г. – Х.: НВП центр ХНУРЕ, 2006. – 242 с.

17. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР [текст] / – Харків: ХНУРЕ, 2011 – 24 с.