



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів

Рівень 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 Зубову Єгору Романовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження багатоелементного хвилеводного напрямленого відгалужувача

затверджена наказом по університету від 14 11 2022 р. № 1475 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Дослідити багатоелементний хвилеводний напрямлений відгалужувач

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ;

4.2 Огляд за літературними джерелами стану досліджень

4.3 Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень

4.4 Розробка методики експериментальних досліджень

4.5 Охорона праці

4.6 Висновок

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

### КНВДАРНИЙ 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 стану досліджень	01.10.22	виконано
4	Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень	14.10.22	виконано
5	Розрахунок конструкції напрямленого відгалужувача	01.11.22	виконано
6	Моделювання в MathCad	15.11.22	виконано
7	Моделювання в ANSYS HFSS	20.11.22	виконано
8	Розробка методики експериментальних досліджень	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 \_\_\_\_\_ Зубов Є.Р.  
 (підпис) (прізвище, ініціали)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи магістра: 56 с., 4 табл., 19 рис., 11 джерел.

НАПРЯМЛЕНИЙ ВІДГАЛУЖУВАЧ, СПРЯМОВАНІСТЬ, ПЕРЕХІДНЕ ЗГАСАННЯ, РОЗВ'ЯЗКА, ПРОЕКТУВАННЯ, БІНОМІАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ, МОДЕЛЮВАННЯ,

Дана робота присвячена обчисленню параметрів напрямлених відгалужувачів та верифікації на HFSS.

Актуальність роботи полягає в удосконаленні методу розрахунку багатоелементного напрямленого відгалужувача. Антено-фідерні пристрої, генераторна, приймальна, вимірювальна НВЧ апаратура містять в своєму складі напрямлені відгалужувачі.

Об'єктом дослідження є процес поширення електромагнітних хвиль через напрямлений відгалужувач у прямокутному хвилеводі.

Метою роботи є розрахунок конструкції багатоелементного напрямленого відгалужувача. В результаті отримані аналітичні вирази для діаметрів отворів відгалужувача і відстані між ними.

Проблема даного дослідження протиріччя між результатами розрахунків та моделюванням. Запропоновано спрощений метод розрахунку діаметрів отворів напрямленого відгалужувача, який полягає в обчисленні радіусу центрального отвору на основі потрібного перехідного згасання, який відрізняється використанням коефіцієнтів бінома Ньютона, таким чином, що радіус центрального отвору ділять на коефіцієнт. Коефіцієнт є кубічний корень коефіцієнтів бінома Ньютона, де коефіцієнту кожного отвора відповідає свій коефіцієнт бінома Ньютона.

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

## ABSTRACT

Explanatory note to the appraisal work of the master: 56 pp., 4 table., 19 Fig., 11 sources.

DIRECTIONAL COUPLER, DIRECTIVITY, COUPLING, ISOLATION, DESIGN, HOLE, BINOMIAL DISTRIBUTION, SIMULATION

This work is devoted to directional couplers parameter calculation and verification by simulation in HFSS.

The relevance of the work is in improvement of method of calculation multielement directional coupler. The antenna feeder tracts, generators, measurement devices have directional couplers as their parts.

The object of the research is the process of propagation of electromagnetic waves through directional coupler in the rectangular waveguide.

The aim of the work is calculation of design multielement directional coupler. The result is analytical expressions for holes diameter for directional coupler and distances between them.

The contradiction between the results of calculations and modeling is the problem of this research. A simplified method is proposed for calculating the radii of the holes of a directional coupler, which consists in central hole radii calculating, on the basis of the parameter of required coupling, which differs by using the Newton binomial coefficient, so the radius of the current hole is calculated as the radius of the central hole which is divided by coefficient. The coefficient is the cube root of the of the binomial polynomial numbers ratio, where polynomial numbers correspond to central and current hole. The cube root of number is a value which when multiplied by itself thrice or three times produces the original value.

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

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1.Огляд за літературними джерелами стану питання дослідження, виявлення теоретичних передумов та можливих напрямків вирішення задач розробки.....	10
1.1 Напрявлені відгалужувачі як частина антенно-фідерного тракту. ....	10
1.2 Хвилеводні направлені відгалужувачі .....	12
1.3 Багатоелементні направлені відгалужувачі.....	14
2. Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень .....	19
2.1 Аналітичні співвідношення.....	19
2.1.1Перший метод [4].....	19
2.1.1.1 Приклад розв'язання задачі при чебишевській характеристикі.....	22
2.1.1.2 Приклад розв'язання задачі при максимально пласкому біноміальному розподілі частотної характеристики.....	25
2.1.2 Другий метод[6].....	28
2.1.3 Альтернативний або гібридний метод.....	33
2.2 Моделювання.....	36
2.2.1Моделювання за допомогою MathCad.....	36
2.2.2 Автоматизоване проектування та моделювання Ansys HFSS.....	39
3. Розробка методики експериментальних досліджень, вибір оснащення, необхідного для проведення експерименту, опис експериментальних установок	45
3.1. Вимірювання КСХ за допомогою механічної вимірювальної лінії.....	45
3.2 Вимірювання перехідного згасання й розв'язки .....	46
4. Охорона праці .....	48
4.1 Аналіз умов праці.....	48
4.2 Виробнича санітарія в НДЛ .....	49
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	54

Висновки .....	55
Перелік джерел .....	56
ГЮИК 464425.001 ВД .....	57

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НВЧ – надвисокі частоти

НВ – напрямлений відгалужувач

## ВСТУП

Напрявлений відгалужувач пристрій, що призначений для відгалуження з основного надвисокочастотного тракту частини потужності однієї з двох біжучих хвиль, які розповсюджуються по лінії в протилежних напрямках падаючої чи відбитої. Його робота основана на збудженні у вторинному тракті двох хвиль зсунутих по фазі так, що амплітуди хвиль розповсюджуваних у бажаному напрямку додаються, а в небажаному – взаємно компенсуються. Напрявлені відгалужувачі використовуються дуже широко: для отримання розв'язки між генераторами при включенні в основну лінію передачі додаткового джерела високочастотних коливань, при включенні гетеродина в супергетеродинному приймачі, для отримання необхідних амплітудних співвідношень між сигналами в основній лінії і допоміжній лінії, у вимірювальній техніці.

Напрявлені відгалужувачі характеризуються наступними параметрами: перехідним згасанням, спрямованістю, розв'язкою, власним КСХ пліч і ін.

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

## 1.1 Напрямлений відгалужувач як частина антено-фідерного тракту

Типовий антено-фідерний тракт має у своєму складі магнетрон, антену, напрямлений відгалужувач, діафрагми, згини, скрутки, , дросельне з'єднання, вимірювальну лінію, тощо (рис.1.1).

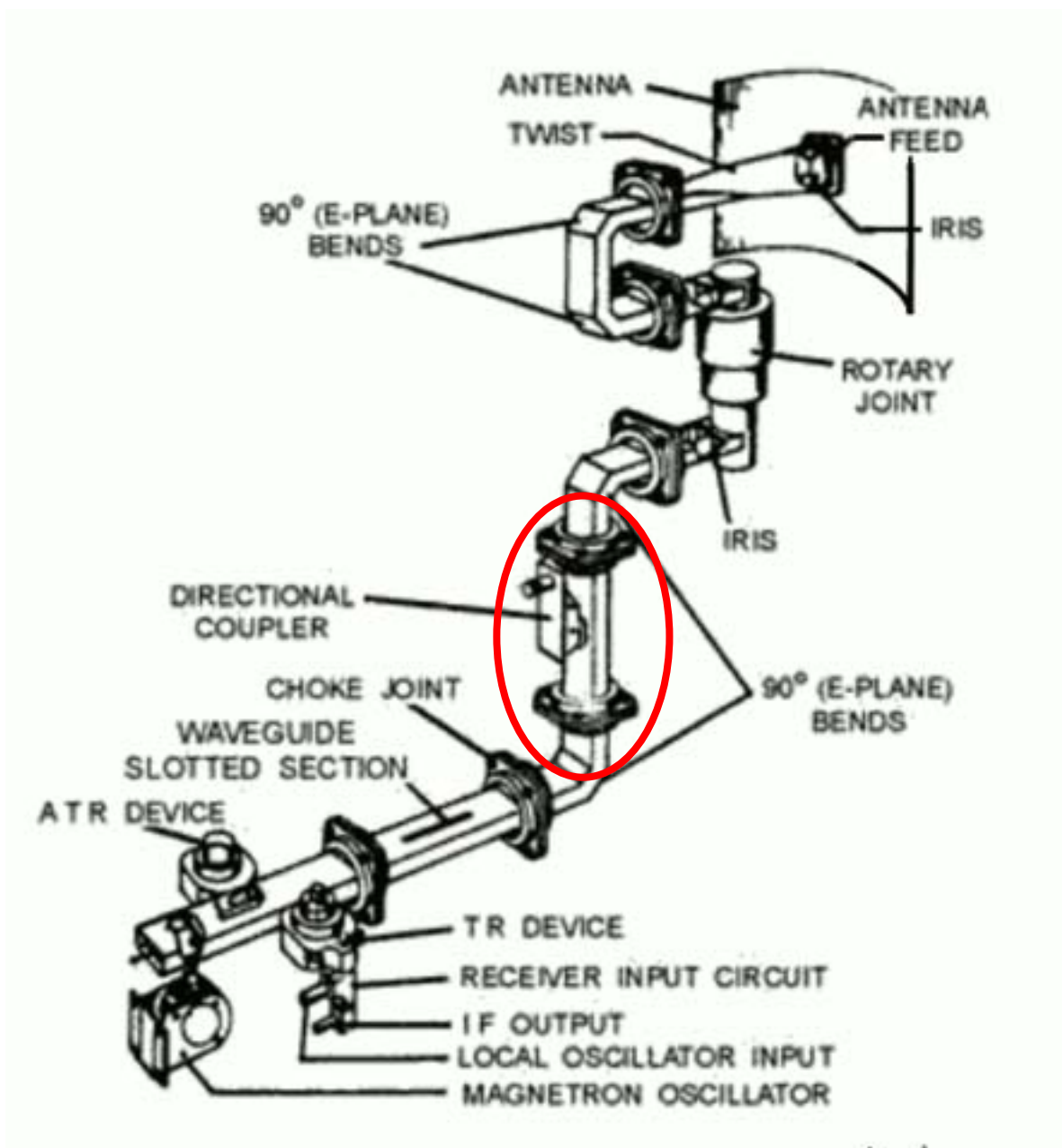


Рисунок 1.1 – Типовий антено-фідерний тракт directional coupler – напрямлений відгалужувач

Напрямлений відгалужувач є одним з найпоширеніших мікрохвильових пристроїв, який призначений для відгалуження частини потужності з основного тракту до вторинного (рис.1.2). Конструктивно хвилеводний напрямлений відгалужувач складається з двох хвилеводів з декількома отворами в загальній стінці первинного і вторинного криволінійних хвилеводів.

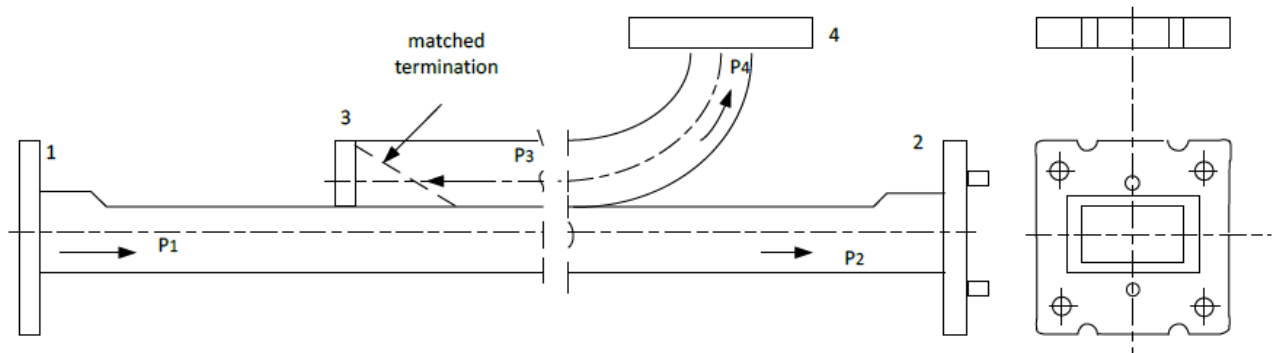


Рисунок 1.2 – Напрямлений відгалужувач

Кількість отворів визначається діапазоном частот. Напрямлени відгалужувачі характеризуються такими параметрами, як коефіцієнт зв'язку та спрямованість. Багатоелементні напрямлени відгалужувачі для частотного діапазону можна класифікувати на напрямлени відгалужувачі з чебишевською і плоскою біноміальною характеристикою. Останні є предметом даного дослідження.

Метою даного дослідження є перегляд і спрощення методики розрахунку радіусів отворів направленоного відгалужувача.

На рис.1.3 показаний зовнішній вигляд хвилеводного направленоного відгалужувача



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд хвильоводного напрямленого відгалужувача

### 1.2 Хвильоводні напрямлені відгалужувачі

Хвильоводні напрямлені відгалужувачі являють собою два хвильоводи (частіше прямокутних), що мають загальну стінку з отворами зв'язку в ній. Вони є широко розповсюдженим видом хвильоводних балансових восьмиполіусників звичайно із двома площинами симетрії. Схема такого НВ й нумерація входів наведені на рис. 1.4. Виходячи з розташування входів, його звичайно називають прямонаправленим.

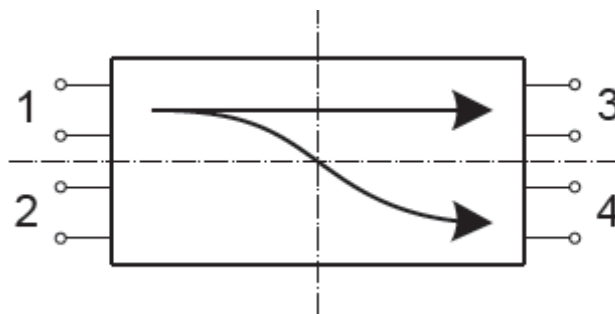


Рисунок 1.4 – Схема прямонаправленого НВ з двома площинами симетрії

При узгодженні входів восьмиполюсника (коли коефіцієнти відбиття  $\alpha = 0$ ) плечі 1-2 і 3-4 будуть попарно розв'язані ( $\beta = 0$ ), матриця розсіювання ідеального НВ здобуває вид

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \gamma & \delta \\ 0 & 0 & \delta & \gamma \\ \gamma & \delta & 0 & 0 \\ \delta & \gamma & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

Як відомо, властивість реактивності визначає унітарність матриці розсіювання, тобто виконання співвідношення

$$[S][S^*]^T = [E]$$

де  $E[ ]$  – одинична матриця. Наслідком цього є зв'язок між коефіцієнтами  $\gamma$  и  $\delta$ .

$$\begin{aligned} |\gamma|^2 + |\delta|^2 &= 1, \\ \arg \gamma + \arg \delta &= \pm \pi/2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

Таким чином, при заданому положенні площин відліку матриця  $S$  ідеального НВ визначається єдиним параметром, наприклад  $\delta$ , який може бути прийнятий дійсним

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \pm j\sqrt{1-\delta^2} & \delta \\ 0 & 0 & \delta & \pm\sqrt{1-\delta^2} \\ \pm\sqrt{1-\delta^2} & \delta & 0 & 0 \\ \delta & \pm\sqrt{1-\delta^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

З цього виразу випливає, що основна й відгалужена хвилі на виходах НВ зсунуті по фазі на  $90^\circ$ . Це є наслідком наявності двох площин симетрії.

Основними параметрами НВ є перехідне згасання  $C$  (відношення потужності хвилі, що надходить на вхід НВ, до потужності відгалуженої хвилі) і спрямованість  $D$  (відношення потужності хвилі, відгалуженої в заданому напрямку, до потужності хвилі, відгалуженої у протилежному напрямку). Звичайно ці величини вимірюються в децибелах, тому що абсолютні їхні значення звичайно дуже малі (для  $C$ ) або великі (для  $D$ ). Через коефіцієнти матриці розсіювання ці параметри в децибелах виражаються в такий спосіб

$$C[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_{\text{над}}}{P_{\text{отв}}} = 10 \lg \frac{1}{|S_{41}|^2} = 10 \lg \frac{1}{\delta^2} = -20 \lg \delta$$

$$D[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_{\text{отв.прям}}}{P_{\text{отв.звор.}}} = 10 \lg \frac{|S_{41}|^2}{|S_{21}|^2} = 20 \lg \left| \frac{S_{41}}{S_{21}} \right|, \quad (1.4)$$

Для ідеального НВ  $\beta = 0$ , а коефіцієнт спрямованості  $D = \infty$ .

### 1.3 Багатoeлементний напрямлений відгалужувач

Багатоелементний хвилеводний напрямлений відгалужувач зі зв'язком по вузькій стінці. Найпростішим варіантом такого відгалужувача є двохелементний НВ (рис.1.5).

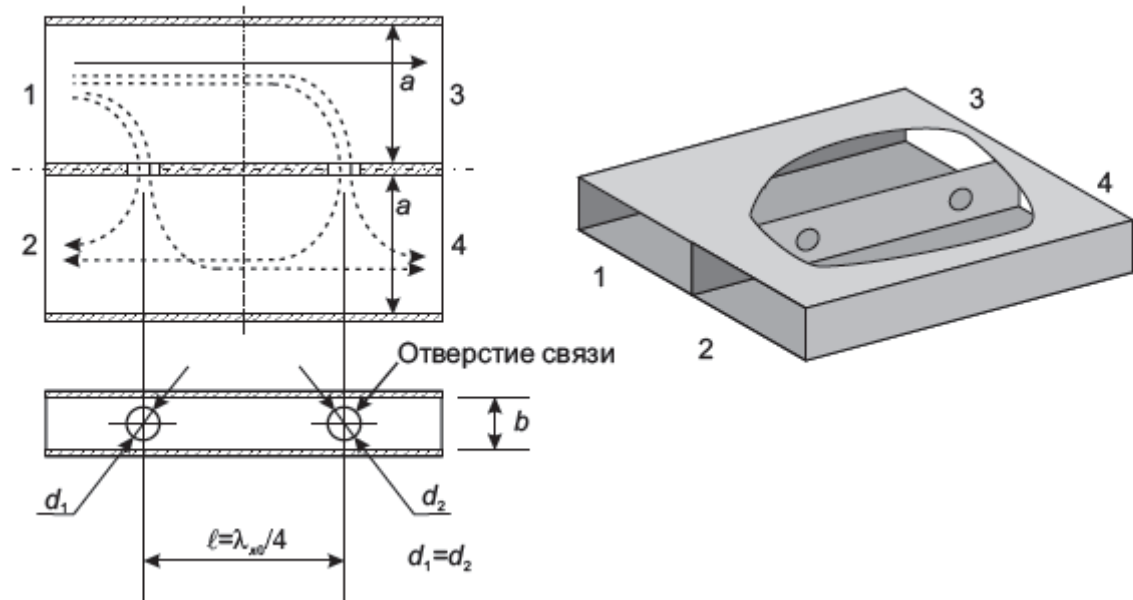


Рисунок 1.5 – Двохелементний напрямлений відгалужувач

При підключенні генератора до входу 1 падаюча хвиля розповсюджується хвилеводом 1–3. Якщо отвори зв'язку невеликий і мають однаковий діаметр ( $d_1 = d_2$ ), то через кожне з них у хвилеводі 2–4 збуджуються дві рівні по амплітуді хвилі, які розповсюджуються в протилежних напрямках. При відстані між отворами 1, рівному чверті довжини хвилі в лінії передачі на центральній частоті  $\lambda_{хв} / 4$ , хвилі від двох отворів на виході 4 складаються синфазно, тому що вони проходять рівні шляхи від входу 1, а в плечі 2 – протифазно, тому що їхні шляхи відрізняються на  $\lambda_{хв} / 2$ . Таким чином, на частоті, що відповідає  $\lambda_{хв}$ , на вході 2 хвилі повністю компенсуються, і НВ є ідеальним (спрямованість дорівнює нескінченності). Однак при зміні частоти різниця шляхів хвиль буде відрізнятися від  $\lambda_{хв} / 2$ , і повної компенсації хвиль не відбудеться. Можна визначити, як при цьому буде змінюватися спрямованість:

$$D = 20 \lg \frac{2}{\left| 1 + e^{-j \frac{4\pi l}{\lambda_{xв}}} \right|} = 20 \lg \frac{1}{\left| \cos \frac{2\pi l}{\lambda_{xв}} \right|} = 20 \lg \frac{1}{\left| \cos \frac{\pi \lambda_0}{2 \lambda_{xв}} \right|}, \quad (1.5)$$

Співвідношення (1.5) показує, що спрямованість швидко зменшується при відхиленні частоти від розрахункової. Смуга робочих частот виходить невеликою. Один зі способів її розширення – це використання більшого числа отворів зв'язку. Прикладом використання такого способу є трьохелементний напрямлений відгалужувач (рис. 1.6).

У цьому НВ середній отвір має більший діаметр, чим крайні, так що коефіцієнт проходження через нього у два рази більше. Так на вході 4 усі хвилі додаються у фазі, а на вході 2 – зі зсувом фаз, обумовленим різницею шляхів і довжиною хвилі. Хвилі, які пройшли крізь крайні отвори, мають зсув фази  $\pi$  відносно хвилі, яка пройшла через середній отвір, що має потужність, рівну сумарній їхній потужності, і складається з нею на вході 2 у протифазі. Спрямованість трьохелементного НВ легко підрахувати аналогічно попередньому випадку

$$D = 20 \lg \frac{2}{\left| 1 + 2e^{-j \frac{4\pi l}{\lambda_{xв}}} + e^{-j \frac{8\pi l}{\lambda_{xв}}} \right|} = 20 \lg \frac{1}{\left| \cos^2 \left( \frac{\pi \lambda_0}{2 \lambda_{xв}} \right) \right|}, \quad (1.6)$$

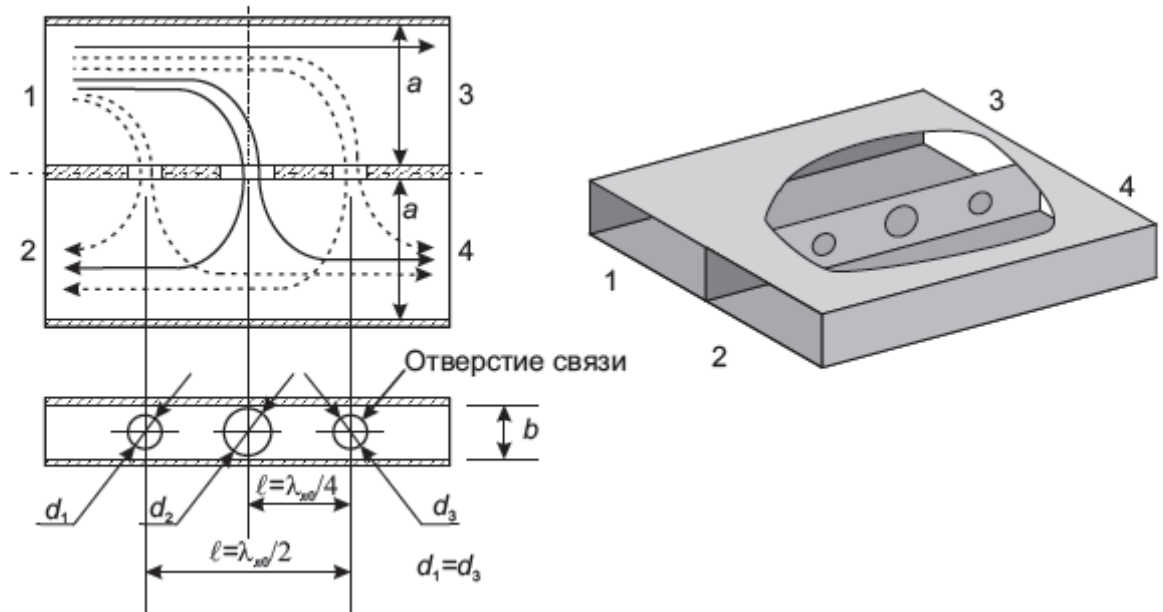


Рисунок 1.6 – Трьохелементний напрямлений відгалужувач

З аналізу (1.5) і (1.6) можна укласти, що спрямованість не менш 20 дБ для двохелементного НВ досягається в смузі ~12 %, а для трьохелементного ~40 %. Перехідне ослаблення для одного отвору діаметра  $d$ , малого в порівнянні з довжиною хвилі, розраховується за формулою

$$C_1 = 20 \lg \frac{12a^3 b}{\pi d^3 \lambda}, \quad (1.7)$$

де  $a$  і  $b$  - розміри хвилеводу. Для двохелементного НВ перехідне згасання по потужності буде у два рази менше

$$C_{41} = C_1 - 10 \lg 2 = C_1 - 3, [\text{дБ}], \quad (1.8)$$

а для трьохелементного НВ – у чотири рази менше, чим через кожне із крайніх отворів:

$$C_{41} = C_1 - 10 \lg 4 = C_1 - 6, [\text{дБ}], \quad (1.9)$$

Тоді з (1.7)–(1.9) випливає, що в трьохелементному НВ для забезпечення дворазової різниці між коефіцієнтами проходження по потужності через середні й крайні отвори їх діаметри повинні бути зв'язані наступним співвідношенням

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt[3]{2}$$

По викладених принципах можуть бути побудовані НВ з більшою кількістю отворів, що мають постійні параметри в широкій смузі частот.

## 2. РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА СПІВВІДНОШЕНЬ

Для роботи на фіксованій частоті достатньо двох отворів з відстанню між ними, що дорівнює чверті довжини хвилі в хвилеводі. Якщо прилад працює в діапазоні частот, то для забезпечення працездатності приладу використовуються багатоелементні напрямлені відгалужувачі. Оскільки існує певна аналогія між багатозондовими вимірювальними пристроями та багатоелементними напрямленими відгалужувачами, модель частотної характеристики НВ базується на заміні дійсної частотної характеристики спрямованості відгалужувача на поліноми, як такі використовуються біном Ньютона або поліном Чебишева.

Проектування напрямлених відгалужувачів складається з теоретичного розрахунку кількості отворів, діаметрів отворів, відстані між сусідніми отворами.

Вихідними даними є коефіцієнт зв'язку, переріз хвилеводу, діапазон частот, який визначається перерізом хвилеводу. Методи такого розрахунку відомі.

### 2.1 Аналітичні співвідношення

#### 2.1.1 Перша методика [4]

Для розширення смуги частот, в котрій зберігаються завдані значення спрямованості і перехідного ослаблення, використовують багатоелементні напрямлені відгалужувачі. Значного збільшення широкосмуговості напрямлених відгалужувачів можна досягти, використовуючи такий вибір елементів зв'язку, при якому амплітуда збуджуваної у вторинному тракту хвилі змінюється від отвору до отвору по законам біноміального або чебишевського розкладу.

Відгалужувач з чебишевською характеристикою напрямленості є ланцюгом восьмиполюсників зі слабким зв'язком як на кожному елементі, так і в усій

системі вцілому. При цих умовах можливе застосування наближених співвідношень синтезу по спрямованості. Якщо покласти

$$|S_{12}| = \left| h T_{k-1} \left( \frac{\cos \theta}{S} \right) \right|, \quad (2.1)$$

де  $S_{12}$  -елемент матриці розсіювання системи,

$h, S$  -амплітудний і масштабний коефіцієнти,

$T_k$  - поліном Чебишева 1-го роду  $k$ -го порядку,

$\theta = \frac{2\pi l}{\lambda_X}$ ,  $l$  - відстань між елементами зв'язку, то коефіцієнт перекриття

діапазону по напрямленості складає

$$\frac{\lambda_{X2}}{\lambda_{X1}} = \frac{\pi - \arccos S}{\arccos S}, \quad (2.2)$$

$$S = \frac{1}{\operatorname{ch} \left\{ \frac{1}{k-1} \operatorname{arch} \sqrt{D} \right\}}; \quad (2.3)$$

де  $D = \frac{|S_{14}|^2}{h^2}$  – допуск на напрямленість (найменше значення коефіцієнта напрямленості в смузі).

Довжина сполучних ліній між восьмиполосниками кола складає

$$l = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{X1} \lambda_{X2}}{\lambda_{X1} + \lambda_{X2}}, \quad (2.4)$$

тобто чверть довжини хвилі, що відповідає середній частоті діапазона.

Якщо усі ланки симетричні і не спрямовані, то для  $\alpha$ -ої ланки маємо

$$S_{12}^{\alpha} = S_{14}^{\alpha} = C_{\alpha}, \quad (2.5)$$

де  $C_{\alpha}$  дійсна чи чисто мнима величина, причому загасання елемента зв'язку дорівнює  $10\lg \frac{1}{C_{\alpha}^2}$ .

Значення  $C_{\alpha}$  визначають за [4] табл. 11.12, де дані також величини коефіцієнта перекриття діапазона  $\frac{\lambda_{X2}}{\lambda_{X1}}$  і допуск на напрямленість  $D$ .

Для обчислення потрібного перехідного згасання  $10\lg \frac{1}{C_{\alpha}^2}$   $\alpha$ -ої ланки необхідно число, знайдене з графі  $\frac{C_{\alpha}}{h}$  (дБ) потрібно відняти від завданої величини допуску на зворотнє згасання  $10\lg \frac{1}{h^2}$ , тобто

$$10\lg \frac{1}{C_{\alpha}^2} = 10\lg \frac{1}{h^2} - 10\lg \frac{C_{\alpha}^2}{h^2}. \quad (2.6)$$

У відгалужувачі з максимально-пласкою характеристикою напрямленості зворотній коефіцієнт пропускання має наступну частотну характеристику

$$|S_{12}| = \left| h \left( \frac{\cos \theta}{S} \right)^{k-1} \right|, \quad (2.7)$$

звідки

$$S = \left( \frac{1}{\sqrt{D}} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (2.8)$$

А коефіцієнт перекриття діапазону розраховується з (3-2)

Параметри кіл визначаються зі співвідношення

$$\frac{C_\alpha}{|S_{14}|} = \frac{1}{2^{k-1}} \binom{k-1}{\alpha-1}, \quad (2.9)$$

де  $\binom{k-1}{\alpha-1}$  -біноміальний коефіцієнт.

В табл.[4] 11-11 надані значення  $\frac{C_\alpha}{|S_{14}|}$  для різної кількості елементів.

Шукане згасання  $\alpha$ -го елемента равно

$$10\lg \frac{1}{C_\alpha^2} = 10\lg \frac{1}{|S_{14}|^2} - 10\lg \frac{C_\alpha^2}{|S_{14}|^2}. \quad (2.10)$$

На відміну від попереднього випадку коефіцієнт пропускання не залежить від масштабного множника  $S$ , він визначається лише кількістю ланцюгів  $k$  і заданим рівнем прямої передачі в системі.

#### 2.1.1.1. Приклади розв'язання задачі при чебишевському розподілі

Напрявлений відгалужувач являє собою два однакові прямокутні хвилеводи, які зв'язаних кількома круглими спрямованими отворами у спільній вузькій стінці. Необхідне пряме загасання

$$10\lg \frac{1}{|S_{14}|^2} = 50 \text{ дБ};$$

мінімальне зворотнє згасання  $10\lg \frac{1}{h^2} = 90 \text{ дБ}$ , діапазон  $\lambda_1 = 8 \text{ см}$ ,  $\lambda_2 = 12 \text{ см}$

хвилевід перерізом 72x34 мм. Характеристика напрямленості – чебишевська.

Розв'язання:

У відповідності до заданих умов ефективна напрямленість повинна бути  $90 - 50 = 40$  дБ. Якщо вважати, що КБВ навантаження в плечі 2 складає 0,98, то для отримання ефективної напрямленості власну напрямленість відгалужувача відповідно до графіка на [4] рис.11.11 слід мати  $D_{влас} = 70$  дБ, тобто  $D_{влас} = 10^7$ .

$$\lambda_{X1} = \frac{8}{\sqrt{1 - \left(\frac{8}{14,4}\right)^2}} = 9,5 \text{ см};$$

$$\lambda_{X2} = \frac{12}{\sqrt{1 - \left(\frac{12}{14,4}\right)^2}} = 22 \text{ см};$$

звідки масштабний коефіцієнт

$$S = \cos \frac{\pi}{1 + \frac{\lambda_{X2}}{\lambda_{X1}}} = \cos \frac{\pi}{1 + 2,3} \approx 0,6.$$

кількість ланок

$$k = \frac{\text{arch} \sqrt{D}}{\text{arch} \frac{1}{S}} + 1 = \frac{\ln(D + \sqrt{D^2 - 1})}{\ln\left(\frac{1}{S} + \sqrt{\left(\frac{1}{S}\right)^2 - 1}\right)} + 1 = \frac{\text{arch} \sqrt{10^7}}{\text{arch} \frac{1}{0,6}} + 1 \approx 9.$$

по таблиці [4] 11.11 для  $k = 9$  и  $S = 0,6$  знаходимо

$$10 \lg \frac{C_1^2}{h^2} = 29,47 \text{ дБ}; \quad 10 \lg \frac{C_4^2}{h^2} = 56,48 \text{ дБ};$$

$$10\lg \frac{C_2^2}{h^2} = 43,70 \text{ дБ}; \quad 10\lg \frac{C_5^2}{h^2} = 57,93 \text{ дБ};$$

$$10\lg \frac{C_3^2}{h^2} = 51,96 \text{ дБ},$$

і уточнене значення необхідної власної напрямленості  $D_c$  складає  $D = 70,27 \text{ дБ}$ .

Оскільки

$$D_c (\text{дБ}) = 10\lg \frac{|S_{14}|^2}{h^2} = 10\lg \frac{1}{h^2} - 10\lg \frac{1}{|S_{14}|^2},$$

то

$$10\lg \frac{1}{h^2} = 10\lg \frac{1}{|S_{14}|^2} + D_c,$$

тобто

$$10\lg \frac{1}{h^2} = 50 + 70,27 = 120,27 \text{ дБ}.$$

Шукане загасання ланок згідно (2-10) дорівнюють

$$10\lg \frac{1}{C_{1^2}} = 120,27 - 29,47 = 90,80 \text{ дБ}; \quad 10\lg \frac{1}{C_{4^2}} = 63,28 \text{ дБ};$$

і аналогічно

$$10\lg \frac{1}{C_{2^2}} = 77,10 \text{ дБ}; \quad 10\lg \frac{1}{C_{5^2}} = 62,83 \text{ дБ};$$

$$10\lg \frac{1}{C_{3^2}} = 68,8 \text{ дБ};$$

Причому  $C_1 = C_9$ ;  $C_2 = C_8$ ;  $C_3 = C_7$ ;  $C_4 = C_6$ .

для розрахунку загасання отвору використовується формула

$$20\lg \frac{12}{\pi} \cdot \frac{b}{\lambda_X} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^3,$$

Звідки

$$d_1 = 2,12 \text{ мм}; d_3 = 5,03 \text{ мм}; d_5 = 6,32 \text{ мм};$$

$$d_2 = 3,67 \text{ мм}; d_4 = 5,98 \text{ мм}$$

Ескіз відповідної вузької стінки хвилеводу наведений на рис.2.5

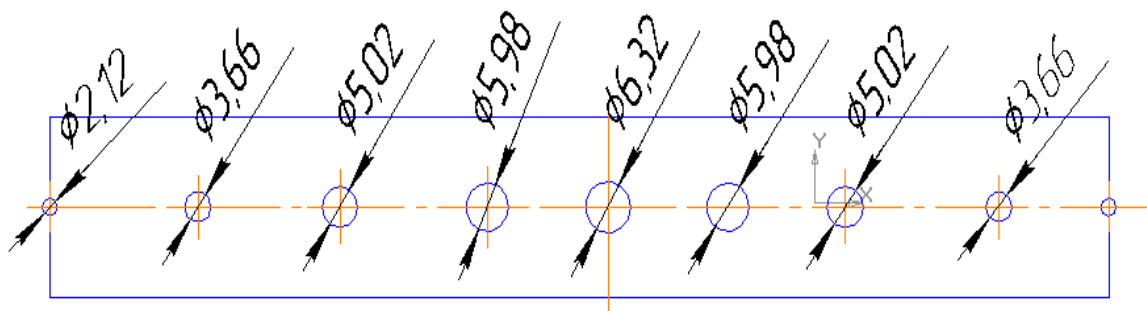


Рисунок 2.5– Ескіз вузької стінки хвилеводу

2.1.1.2 Приклад розв'язання задачі при максимально плоскому біноміальному розподілі частотної характеристики

Умови розрахунку ті ж, що і в попередньому прикладі. Характеристика напрямленості максимально плоска

Розв'язання:

Як і раніше

$$D_{\text{власн}} = 70 \text{ дБ}; D_{\text{власн}} = 10^7;$$

$$\lambda_{X1} = 9,5 \text{ см}, \lambda_{X2} = 22 \text{ см}, \frac{\lambda_{X2}}{\lambda_{X1}} = 2,3, S \approx 0,6.$$

Необхідна кількість ланок )

$$k = \frac{\lg \sqrt{D}}{\lg \frac{1}{S}} + 1 = \frac{\lg \sqrt{10^7}}{\lg \frac{1}{0,6}} + 1 \approx 17.$$

Перехідне згасання отворів

$$10 \lg \frac{1}{C_a^2} = 10 \lg \frac{1}{|S_{14}|^2} + 10 \lg \frac{|S_{14}|^2}{C_a^2},$$

Звідки

$$10 \lg \frac{1}{C_a^2} = 50 + 96,33 = 146,33 \text{ дБ},$$

і аналогічно

Таблиця 2.1

$10 \lg \frac{1}{C_a}$	$\frac{1}{C_2}$	$\frac{1}{C_3}$	$\frac{1}{C_4}$	$\frac{1}{C_5}$	$\frac{1}{C_6}$	$\frac{1}{C_7}$	$\frac{1}{C_8}$	$\frac{1}{C_9}$
дБ	122,25	104,75	91,36	81,13	73,32	67,92	64,92	63,99

Діаметри отворів відповідно співвідношенню

$$\frac{1}{C_\alpha} = \frac{12b}{\pi\lambda_X} \left( \frac{a}{d_\alpha} \right)^3,$$

Дорівнюють

Таблиця 2.2

$d_i$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$
мм	0,257	0,646	1,267	2,113	3,122	4,233	5,196	5,83	6,04

Порівнюючи розрахований напрямлений відгалужувач з відповідним відгалужувачем з чебишевською характеристикою напрямленості, відзначаємо, що довжина останнього в 2 рази менше, а діаметри отворів більш зручні технологічно.

Порядок виконання розрахунків такий

- розрахувати ефективну напрямленість  $D$  ;
- розрахувати довжини хвиль в хвилеводі на межах діапазона  $\lambda_{X1}, \lambda_{X2}$  ;
- розрахувати коефіцієнт перекриття  $S$  ;
- визначити кількість ланок  $k$  ;
- користуючись таблицею [2] 11.11 визначити  $\frac{C_\alpha}{h}$  ;
- для обчислення потрібного перехідного загасання  $10\lg \frac{1}{C_\alpha^2} \alpha$ -ої ланки

необхідно число, знайдене з графі  $\frac{C_\alpha}{h}$  (дБ) таблиці відняти від завданої величини

допуску на зворотнє загасання  $10\lg \frac{1}{h^2}$  ;

– обчислити діаметр отвору, користуючись формулою, яка зв’язує діаметр і згасання отвору.

### 2.1.2 Друга методика [6]

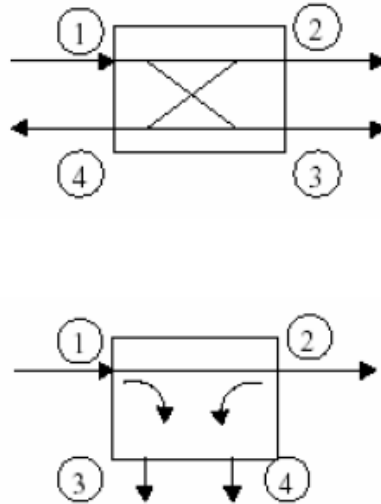


Рисунок 2.6 – Нумерація плечів напрямленого відгалужувача, яка використовується в другій методиці

Перехідне згасання

$$C(\text{дБ}) = 10 \log \frac{P_1}{P_3}$$

Напрявленість

$$D(\text{дБ}) = 10 \log \frac{P_3}{P_4}$$

Ізоляція

$$I(\text{дБ}) = 10 \log \frac{P_1}{P_4} = C + D$$

Розглянемо приклад використання другої методики. Потрібно сконструювати напрямлений відгалужувач із 7 отворами у хвилеводі С-діапазону з біноміальною характеристикою, щоб забезпечити зв’язок 15 дБ і з  $D_{\min} = 30$  дБ.

Припустимо, що робоча центральна частота становить 6,45 ГГц, а відстань між отворами  $d = \lambda g/4$  (або  $\lambda g + \lambda g/4$ ). Також припустимо зв'язок із широкими стінками з  $s = a/2$ .

З

$$g(w) = F_N \prod_{n=1}^N (w - w_n)$$

ми маємо

$$g(w) = F_6 (w - w_n)^6$$

де

$$w_n = e^{-j2\beta d} = 1$$

$$g(w) = F_6 (w+1)^6 = F_6 (w^6 + 6w^5 + 15w^4 + 20w^3 + 15w^2 + 6w + 1)$$

Отже

$$g(1) = |F_6|(1+1)^6 = 64|F_6| = 10^{-15/20} = 0,1778,$$

$$|F_6| = 0,00278 = |F_0|$$

Шляхом біноміального розкладення ми маємо

$$(w+1)^6 = \sum_{n=0}^6 C_n^{(6)} w^n$$

де  $C_n^{(6)} = \frac{N!}{(N-n)!n!} = \frac{6!}{(6-n)!n!}$  набір біноміальних коефіцієнтів

Таким чином

$$|F_5| = |F_1| = 6|F_6| = 0,01667$$

$$|F_4| = |F_2| = 15|F_6| = 0,04168$$

$$|F_3| = 20|F_6| = 0,05557$$

Тепер ми можемо обчислити радіуси отворів у відгалужувачі

$$F_n = K_f r_n^3$$

де

$$K_f = \frac{-j2k_0 A}{3\eta_0 R_{10}} \left[ 1 - 2 \left( 1 - \left( \frac{f_c}{f} \right)^2 \right) \right]$$

та

$$K_f = \frac{-j2k_0 A}{3\eta_0 R_{10}} \left[ 2 \left( \frac{f_c}{f} \right)^2 - 1 \right]$$

Маємо –  $f_c = 4,30$  ГГц для С-діапазону,  $f = 6,45$  ГГц,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0 = 135,1$  м<sup>-1</sup>,  $\eta_0 = 376,7$  Ом,  $R_{10} = ab/Z_{10}$ ,

$$Z_{10} = \eta_0 / \sqrt{1 - \left( \frac{f_c}{f} \right)^2} = 505,4 \text{ Ом}, R_{10} = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{Ом}$$

$$|K_f| = \frac{2 \cdot 135,1}{3 \cdot 376,7 \cdot 1,08 \cdot 10^{-6}} \left| 2 \left( \frac{4,30}{6,45} \right)^2 - 1 \right| = 24598$$

Радіуси отворів дорівнюють

$$r_0 = \left( \frac{0,00278}{|K_f|} \right)^{1/3} = 0,00483 \text{ м} = r_6 \leftarrow 0,483 \text{ см}$$

$$r_1 = \left( \frac{0,01667}{|K_f|} \right)^{1/3} = 0,00878 \text{ м} = r_5 \leftarrow 0,878 \text{ см}$$

$$r_2 = \left( \frac{0,04168}{|K_f|} \right)^{1/3} = 0,011921 \text{ м} = r_4 \leftarrow 1,192 \text{ см}$$

$$r_3 = \left( \frac{0,05557}{|K_f|} \right)^{1/3} = 0,0131 \text{ м} = r_3 \leftarrow 1,31 \text{ см}$$

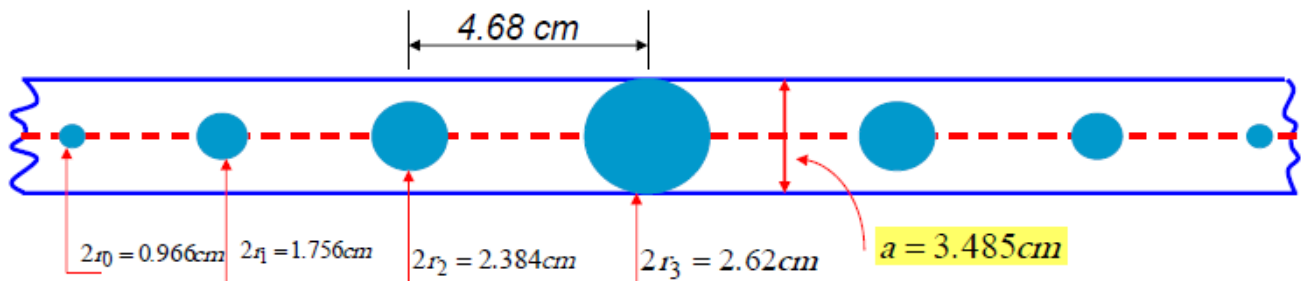


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд загальної широкої стінки направляючої С-діапазону з отворами для з'єднання

Довжина хвилі в хвилеводі

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{4,3}{6,45}\right)^2}} = 0,624 \text{ м}$$

$$d = \frac{\lambda_g}{4} = 1,56 \text{ см}$$

Номінальна відстань між отворами становить

Однак центральний отвір має діаметр 2,62 см, тому він може перекриватися з сусідніми отворами. Ми можемо збільшити відстань до отворів

$$d = \frac{3\lambda_g}{4} = 4,68 \text{ см}$$

без впливу на електричні характеристики.

Загальна довжина загальної широкої ділянки стіни зі з'єднувальними отворами становить  $\sim 30$  см, що є досить великою ділянкою WG.

Тепер ми побудуємо графік залежності зв'язку та спрямованості від частоти

$$g(w) = F_6 (w+1)^6 = F_6 (e^{j\phi} + 1)^6 = F_6 \left\{ e^{j\frac{\phi}{2}} \left( e^{j\frac{\phi}{2}} + e^{-j\frac{\phi}{2}} \right) \right\}^6 = F_6 \left[ 2e^{j\frac{\phi}{2}} \cos \frac{\phi}{2} \right]^6$$

$$|g(w)| = 2^6 |F_6| \left| \cos \frac{\phi}{2} \right|^6 = 0,1778 \left| \cos \frac{\phi}{2} \right|^6$$

Тоді маємо

$$D(\text{dB}) = -20 \log \frac{|g(w)|}{|g(1)|} = -120 \log \left| \cos \frac{2\pi d}{\lambda_g} \right|$$

де  $d=4.68$  см

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / 2a)^2}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}}$$

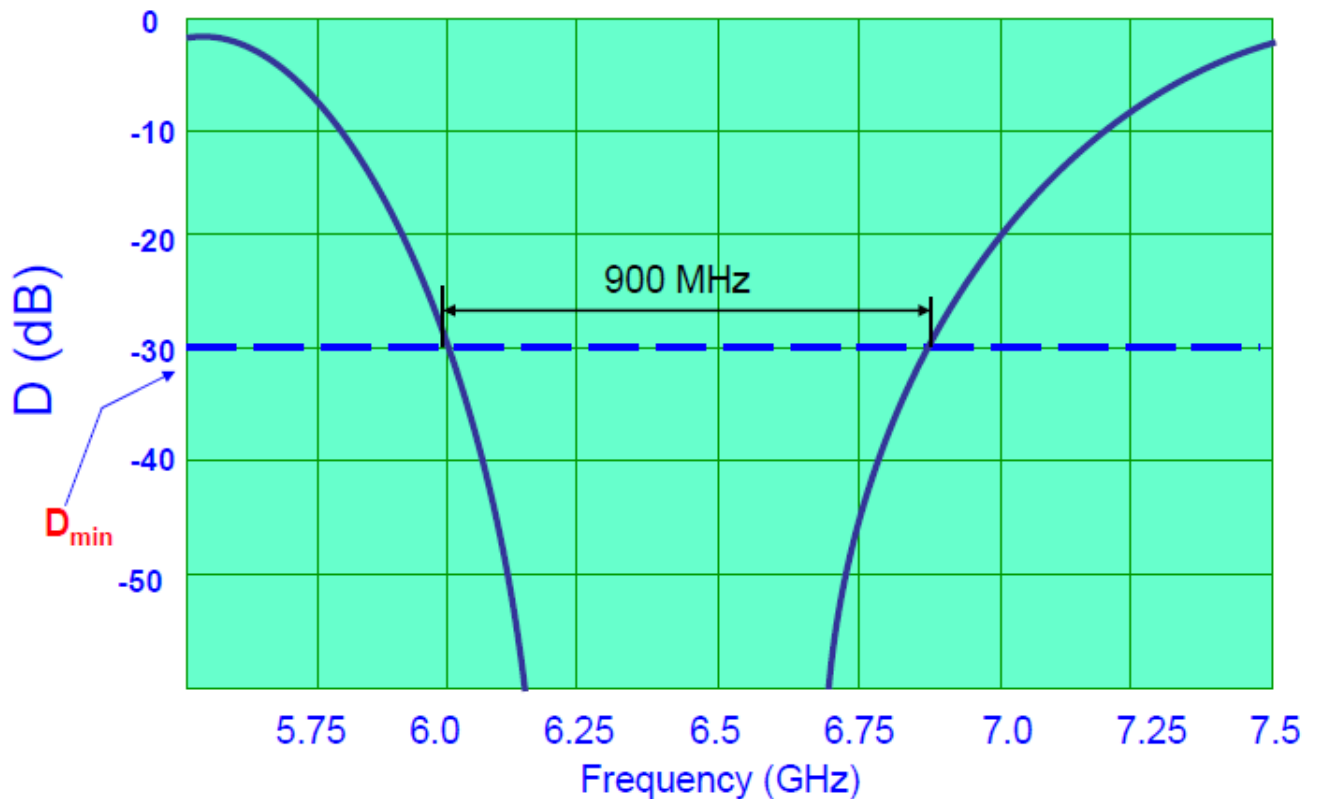


Рисунок 2.8 –

Зверніть увагу що спрямованість краще ніж  $D_{\min} = -30$  дБ в смузі 900 МГц групується навколо центра 6.45 ГГц.

### 2.3 Альтернативній або гібридний метод

Порівняння двох підходів виявляє переваги та недоліки кожного. Перевагою другого методу [6] є використання спрощеного порівняно з [4] розрахунку, а недоліком – необґрунтованість вибору кількості отворів залежно від бажаного діапазону частот.

Спрощений метод розрахунку радіусів отворів спрямованого відгалужувача з біноміальною частотною характеристикою спрямованості, яка обчислюється на основі бажаного зв'язку середнього отвору, відрізняється тим, що радіус поточного отвору обчислюється як радіус центрального отвору, поділений на коефіцієнт. Цей коефіцієнт є кубічним коренем із співвідношень коефіцієнтів у трикутнику Паскаля для додатків, які відповідають згаданим вище середнім і поточним отворам. Трикутник Паскаля є набором коефіцієнтів для різних випадків ступеня бінома Ньютона.

Наприклад, для хвилеводу перерізом 23мм x10 мм два отвори мають радіуси 4,4 мм, три отвори — 3,6; 4,4; 3,6 мм [6]. Розрахунок за запропонованою методикою показав збіг із загальновідомим.

Розглянемо чотири отвори, нехай середній отвір все ще має радіус 4,4 мм. Коефіцієнти бінома Ньютона третього ступеня 1; 3; 3; 1, складіть пропорцію

$$\frac{r_{центр}^3}{x^3 - 1} = 3$$

тому периферійні отвори мають радіуси

$$r_{периф} = x = r_{центр} / \sqrt[3]{3} = 3,07$$

Подібно до бінома четвертого ступеня коефіцієнти 1, 4, 6, 4, 1, тоді радіуси отворів 2,44; 3,85; 4,4; 3,85; 2,44.

Давайте порівняємо результати з результатами з джерела [4, с. 607].

На рис.2.9 показано поведінку різниці розрахунків запропонованого методу та загальновідомого. З рисунка випливає, що різниця змінює знак і за модулем не перевищує 0,054.

Можна і зручніше відкоригувати інші діаметри від мінімального діаметра за допомогою властивостей пропорції. Наприклад, у таблиці 1 у другому рядку в крайній правій клітинці є значення радіуса, що дорівнює 0,257 мм. Множимо його на коефіцієнт, який знаходиться в комірці на перетині третього стовпця третього рядка 2,49 і отримуємо 0,6399, тобто число, яке відповідає числу з джерела [4], с.607

Таблиця 2.3

номер	Біноміал коєф	Кубічний корінь з біном коєф	Радіус отвору мм з обчислень	Радіус отвору, мм з [3], стор.607	Невизна- ченість
1	1	1	0,257	0,257	0
2	16	2,519842	0,647599	0,646	0,001599
3	120	4,932424	1,267633	1,267	0,000633
4	560	8,242571	2,118341	2,113	0,005341
5	1820	12,20929	3,137788	3,122	0,015788
6	4367	16,3466	4,201077	4,233	-0,031921
7	8008	20,00666	5,141713	5,196	-0,05429
8	11440	22,53471	5,790843	5,83	-0,03916
9	12870	23,43471	6,02272	6,04	-0,01728

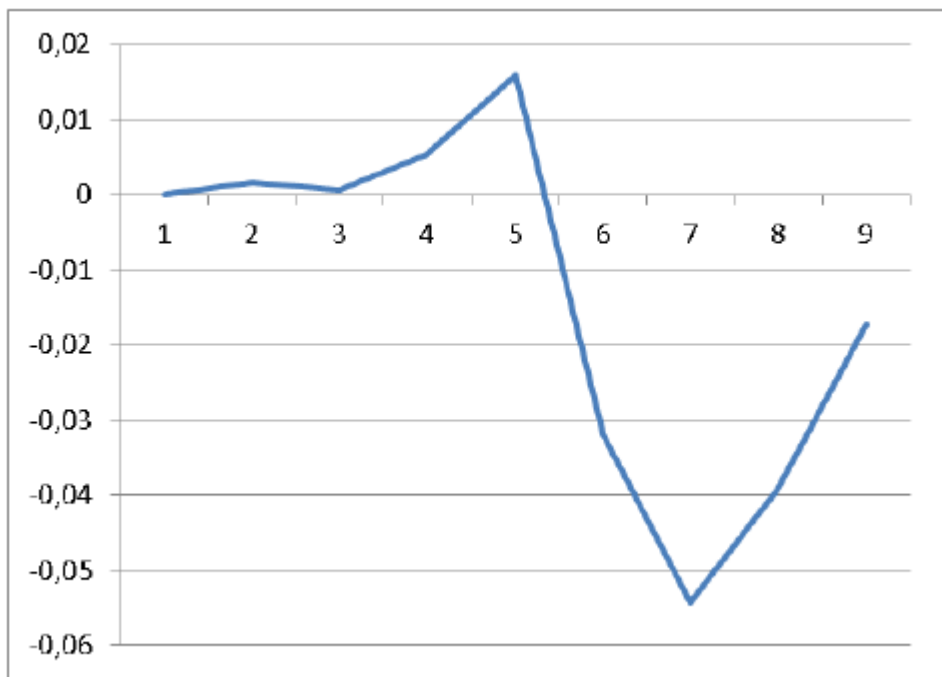


Рисунок.2.9 – Невизначеність визначення радіусів отвору

Походження радіуса найменшого отвору пов'язане з коефіцієнтом зв'язку, який є вихідним даним при проектуванні геометрії спрямованого зв'язувача. Сума всіх біноміальних коефіцієнтів у другому стовпці таблиці 1 дає 65536 (1+16+120+560+1820+4368+8008+11440+12870)

$$65536 \cdot |F_{17}| = 10^{-C/20}$$

де  $C$  – коефіцієнт зв'язку [5]. Порівняння підтвердило ефективність методу.

## 2.2 Моделювання

### 2.2.1 Моделювання MathCad

Дано

$$f1 := 2.2 \cdot 10^9 \quad f2 := 3.3 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8$$

$$a := 0.09 \quad b := 0.045 \quad \text{прямое затухание} \quad 65 \text{ дБ}$$

$$\text{направленность} \quad 70 \text{ дБ} \quad D := 10^7$$

Решение

$$\lambda1 := \frac{c}{f1} \quad \lambda1 = 0.136$$

$$\lambda2 := \frac{c}{f2} \quad \lambda2 = 0.091$$

$$\lambda_{w1} := \frac{\lambda1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda1}{2 \cdot a}\right)^2}} \quad \lambda_{w1} = 0.209$$

$$\lambda_{w2} := \frac{\lambda2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda2}{2 \cdot a}\right)^2}} \quad \lambda_{w2} = 0.105$$

масштабный коэффициент

$$S := \cos\left(\frac{\pi}{1 + \frac{\lambda_{w1}}{\lambda_{w2}}}\right) \quad S = 0.495$$

количество звеньев

$$k := \frac{\log(\sqrt{D})}{\log\left(\frac{1}{S}\right)} \quad k = 11.458$$

Собственная направленность

$$65 + 90 = 155$$

По таблице находим данные для расчета переходных отверст

66.22    45.39    31.41    21.87    15.84    12.93

переходное затухание

$$C1 := 10^{\frac{155-66.22}{20}} \quad C1 = 2.748 \times 10^4 \quad C4 := 10^{\frac{155-21.87}{20}} \quad C4 = 4.534 \times 10^6$$

$$C2 := 10^{\frac{155-45.39}{20}} \quad C2 = 3.023 \times 10^5 \quad C5 := 10^{\frac{155-15.84}{20}} \quad C5 = 9.078 \times 10^6$$

$$C3 := 10^{\frac{155-31.41}{20}} \quad C3 = 1.512 \times 10^6 \quad C6 := 10^{\frac{155-12.93}{20}} \quad C = 1 \text{ s A}$$

Диаметр отверстия

$$d1 := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot b \cdot a^3}{\pi \cdot \lambda 1 \cdot C1}} \quad d1 = 3.222 \times 10^{-3} \quad d4 := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot b \cdot a^3}{\pi \cdot \lambda 1 \cdot C4}} \quad d4 = 5.874 \times 10^{-4}$$

$$d2 := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot b \cdot a^3}{\pi \cdot \lambda 1 \cdot C2}} \quad d2 = 1.449 \times 10^{-3} \quad d5 := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot b \cdot a^3}{\pi \cdot \lambda 1 \cdot C5}} \quad d5 = 4.66 \times 10^{-4}$$

$$d3 := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot b \cdot a^3}{\pi \cdot \lambda 1 \cdot C3}} \quad d3 = 8.471 \times 10^{-4} \quad d6 := \sqrt[3]{\frac{12 \cdot b \cdot a^3}{\pi \cdot \lambda 1 \cdot C6}} \quad d6 = 4.168 \times 10^{-4}$$

## 2.2.2 Автоматизоване проектування та моделювання Ansys HFSS

Створивши новий проект і завантаживши в нього модель, приступимо до креслення конструкції напрямленого двохелементного відгалужувача.

Напрямленим відгалужувач (НВ) складається з відрізків двох хвилеводів, з'єднаних між собою двома отворами в області вузької стінки.

Перед тим як приступити до креслення моделі НВ, переорієнтуємо осі координат. Для цього необхідно, утримуючи клавішу Alt, натиснути ліву клавішу миші у вікні конструкції та, переміщуючи курсор, виставити осі X, Y, Z так що моделі хвилеводів будемо викреслювати у площині XZ. За замовчуванням при завантаженні вікна конструкції стоїть площина XY. Для її зміни виконайте команду Modeler → Grid Plane → XZ або виберіть відповідну площину на панелі інструментів зі списку.

Тепер викреслимо моделі хвилеводів, для чого:

- задайте команду Draw → Box або натисніть кнопку на панелі інструментів, після чого у вікні конструкції з'явиться ромбик;


- переміщуючи курсор за допомогою миші, помістіть ромбик на початок координат і клацніть лівою кнопкою, зафіксувавши початкове положення паралелепіпеда, що викреслюється. Переміщуючи курсор мишею, створіть прямокутник у площині XZ. Клацніть лівою кнопкою миші завершити креслення прямокутника;

- перемістивши курсор вгору, створіть паралелепіпед, витягнутий уздовж осі Y. Для завершення його креслення клацніть лівою кнопкою миші;

- після цього у вікні моделі з'явиться новий вузол, якому за умовчанням буде надане ім'я Box1. Двічі клацнувши лівою клавішею миші на рядку CreateBox, у вікні властивостей встановіть необхідні розміри і положення викресленого паралелепіпеда:

- після цього натисніть сполучення клавіш Ctrl+D, щоб отримана модель повністю відображалася у вікні конструкції;

– потім викресліть другий паралелепіпед з початковою позицією (Position) – (0,25, –5, 0) mm та розмірами (XSize, YSize, ZSize) – (23, 10, 100) mm.

Задайте команду Draw → Cylinder або натисніть кнопку  на панелі інструментів;

– виберіть центр кола, зафіксуйте його клацнувши лівою кнопкою миші. Потім пересуньте курсор мишею і створіть коло у площині YZ;

– перемістивши курсор вліво, створіть циліндр, витягнутий уздовж осі X. Потім введіть вказані нижче розміри циліндра у вікні його властивостей, клацнувши двічі мишкою на CreateCylinder у вікні моделі.

Зададим у тому ж вікні змінні проекту. Ними буде радіус основи циліндра (Radius) та координата «Z» центру основи (координати «X» «Y» не змінюватимуться). Для цього замість числового значення радіуса підставимо змінну "r1";

– після внесення змінної та натискання клавіші Enter з'явиться вікно «Add Variable» (Додавання змінної), де вкажіть її тип (в даному випадку Length), розмірність (mm) та значення – значення радіуса, обране раніше. Після цього натисніть ОК;


– так само додайте змінну «z1» – координату центру основи першого циліндра;

– після цього необхідно викреслити другий циліндр з координатою центру основи (–5, 0, 41) mm, радіусом (Radius) 4,4 mm та висотою (Height) 10 mm;

– задайте змінні «r2» та «z2».

Всі змінні проекту можна переглядати та змінювати в меню HFSS → Design Properties або, клацнувши лівою клавішею миші у дереві проектів на HFSSDesign, у вікні змінних можна буде побачити всі призначені змінні.

Після створення цих об'єктів (2 паралелепіпеди і 2 циліндри) необхідно їх об'єднати в одну модель. Для цього, утримуючи клавішу Ctrl, послідовно натискайте лівою клавішею миші на вузли Box1, Box2, Cylinder1, Cylinder2 у вікні моделей, виділивши таким чином усі викреслені моделі, і об'єднайте їх,

використовуючи команду Modeler → Boolean → Unite або натиснувши кнопку  на панелі інструментів.


Після всіх виконаних операцій у вікні конструкції вийде модель двохелементного направлено відгалужувача, у якої необхідно задати початкові умови для розрахунку.


Для цього визначимо порти і робочу частоту, на якій буде проводитися розрахунок моделі. Спочатку задаємо режим виділення поверхні. Для цього, клацнувши на моделі правою клавішею миші, вибираємо в меню Select Faces (або, натиснувши клавішу F), після чого з'явиться можливість виділяти окремі сторони моделі. Далі, обертаючи модель, як було зазначено вище (утримуючи клавішу Alt, переміщати курсор миші), по черзі визначимо 4 порти наступним чином:

- підвести курсор миші до ділянки, яка відповідає першому порту;
- клацнувши правою клавішею миші на виділеній ділянці, вибрати в меню Assign Excitation → WavePort;
- з'явиться майстер налаштування хвильового порту. На першій сторінці майстра (Wave Port: General) задається ім'я порту за замовчуванням 1;
- на другий сторінці майстра (Wave Port: Modes) визначається, скільки власних хвиль (Number of Modes) буде враховуватися під час розрахунку поля у площині порту. За замовчуванням це число приймається рівним одиниці. Залишимо це значення;
- на останній сторінці майстра (Wave Port: Post Processing) скористаємося установками заданими за умовчанням;
- аналогічно, використовуючи майстер налаштування, визначте три порти, що залишилися.

На цьому визначення портів закінчено. Усі призначені порти будуть відображені у вигляді вузлів дерева проекту.

Далі, щоб визначити, як HFSS буде здійснювати розрахунок структури поля аналізованого пристрою, необхідно встановити параметри рішення задачі. Для одного проекту можна встановити декілька різних установок.

За допомогою команди HFSS → Analysis Setup → Add Frequency Sweep... (або кнопки  на панелі інструментів) встановлюємо смугу частот розрахунку напрямленого відгалужувача, від 8 до 12 ГГц, тип зміни частоти (Sweep Type) – Fast, крок зміни частоти – 0,01 ГГц.

Перевірте створений проект, виконавши команду HFSS → Validation Check... або клацнувши кнопку  на панелі інструментів HFSS. У процесі виконання цієї операції перевіряється відсутність помилок при створенні графічного зображення 3D-моделі, коректність завдання граничних умов та визначення портів, правильність установок параметрів для вирішення задачі.

Після закінчення перевірки з'являється вікно Validation Check з результатами перевірки проекту. Якщо у проекті припущено помилку, то клацніть кнопку Close і виправте виявлені помилки. Проведіть повторну перевірку проекту. Якщо результати завершення перевірки проекту успішні, то клацнувши кнопку Close, закрийте вікно з результатами перевірки проекту. Проект, що успішно пройшов перевірку, готовий до виконання завдання аналізу.

Щоб розпочати вирішення завдання аналізу, виконайте команду HFSS → Analyze All або натисніть кнопку на панелі інструментів HFSS.

Відкрийте вузол Plane у дереві моделі та виберіть вузол Global:XZ, після чого у вікні конструкції з'явиться зображення чорного квадрата, розташованого у площині XZ. Потім виконайте команду HFSS → Fields → Plot Fields → E → Mag\_E. У вікні, натисніть кнопку Done, використовуючи установки за замовчуванням. Після чого програма здійснить розрахунок графічного зображення поля в ПЗ.

Після аналізу клацнувши у дереві проекту на вузол FieldOverlays → E\_Field → Mag\_E, прийміть стандартні налаштування, натисніть Done та перегляньте розподіл поля у хвилеводі. Також можна візуально розглянути проходження хвиль у русі, клацнувши правою кнопкою миші Mag\_E і натиснувши Animate→OK.

Моделювання в HFSS результатів розрахунку багатоелементного напрямленого відгалужувача виявило невідповідність результатам розрахунків, що було проблемою в цьому дослідженні.

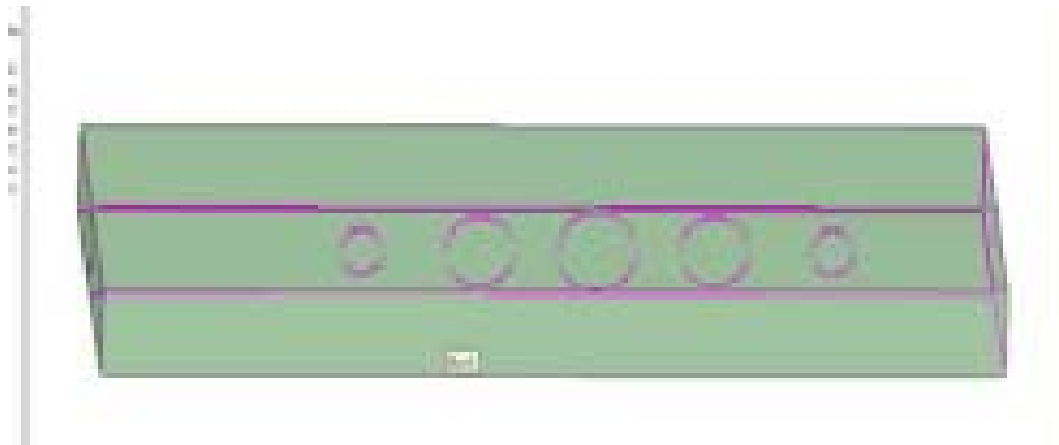


Рисунок 2.10 – Модель напрямленого відгалужувача в ANSYS HFSS з радіусами отворів 2,44; 3,85; 4,4; 3,85; 2,44 мм, а відстань між сусідніми отворами 13 мм. Перетин хвилеводу 23x10 мм

Моделювання в програмі ANSYS HFSS дозволяє перевірити розрахунки [6].

Під час моделювання створюється тривимірний дизайн спрямованого відгалужувача, збуджуються поля в хвилеводних портах і отримується результат у вигляді розподілу кольорів полів у вигляді малюнка.

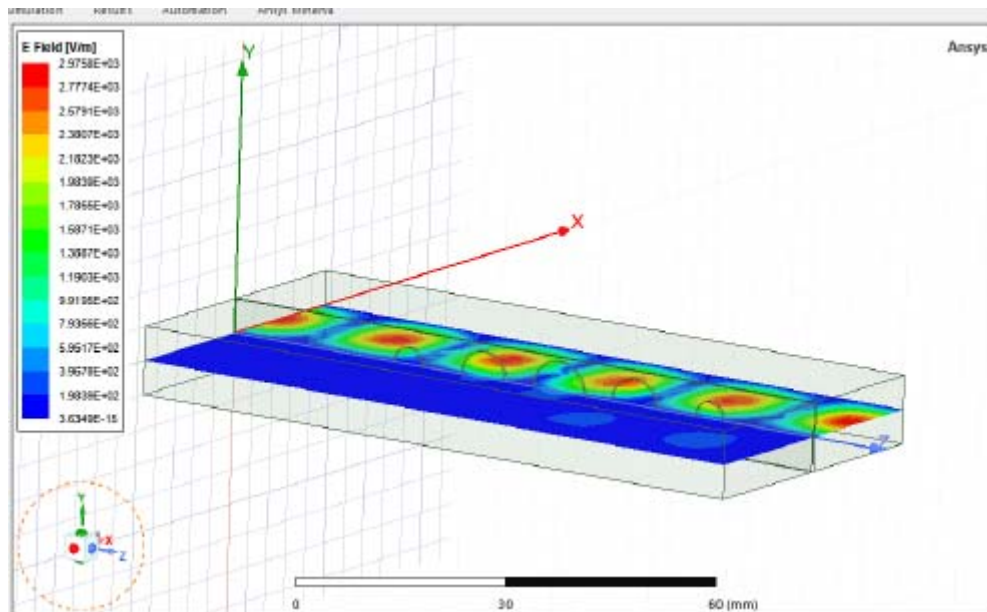


Рисунок 2.11 – Результати моделювання ANSYS HFSS напрямленого відгалужувача з п'ятьма сполучними отворами

На рис.2.11 показано напрямлений відгалужувач з п'ятьма отворами в загальній вузькій стінці первинного і вторинного хвилеводного тракту. Первинний тракт розташований в глибині картини, вторинний тракт дивиться на глядача. Різні кольори відповідають різним інтенсивностям поля. Червоний колір відповідає більшій інтенсивності, а кольори веселки зменшуються в інтенсивності до темно-синього, що відповідає нульовій інтенсивності.

Радіуси сполучних отворів розраховували за запропонованою нами методикою. Анімація є особливо очевидним способом представлення результатів. Критеріями точності моделювання анімації є те, чи розгалужується потужність до вторинного шляху, чи хвиля на вторинному шляху рухається в правильному напрямку. Перевірка працездатності пристрою показала в програмі ANSYS HFSS, що частина живлення відгалужується у вторинний тракт, про що свідчать світло-блакитні овали підвищеної інтенсивності в порівнянні з темно-синім кольором відсутності сигналу. У вторинному тракті сигнал поширюється в одному напрямку, а не в протилежному напрямку по вторинному тракту, як це має бути в спрямованому відгалужувачі.

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

#### 3.1 Вимірювання КСХ за допомогою механічної вимірювальної лінії

Ступінь узгодження якого-небудь плеча обладнання оцінюється величиною коефіцієнта відбиття  $G_1 = S_{11}$  або коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ), визначеного в такий спосіб

$$КСХ = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad (3.1)$$

де  $U_{\max}$  і  $U_{\min}$  – відповідно напруги в пучності й вузлі розподілу поля в лінії.

Для вимірювання КСХ і-вхід приєднується до фланця вимірювальної лінії через перехід або без нього, а інші входи навантажуються на погоджені навантаження (рис.3.1). Вимірювальний підсилювач підключається до детектора вимірювальної лінії. На каліброваному атенуаторі встановлюють таке ослаблення, покази індикатору вимірювального підсилювача при якому становлять от 300 до 700 одиниць. При переміщенні каретки із зондом уздовж хвилеводу на відрізу довжиною більш  $\lambda_{xв}/2$  визначаються мінімальні й максимальні показання приладу  $\alpha_{\min}$  і  $\alpha_{\max}$ . Оскільки при малих сигналах детектор має квадратичну характеристику, КСВ визначається в такий спосіб

$$КСХ = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}}, \quad (3.2)$$

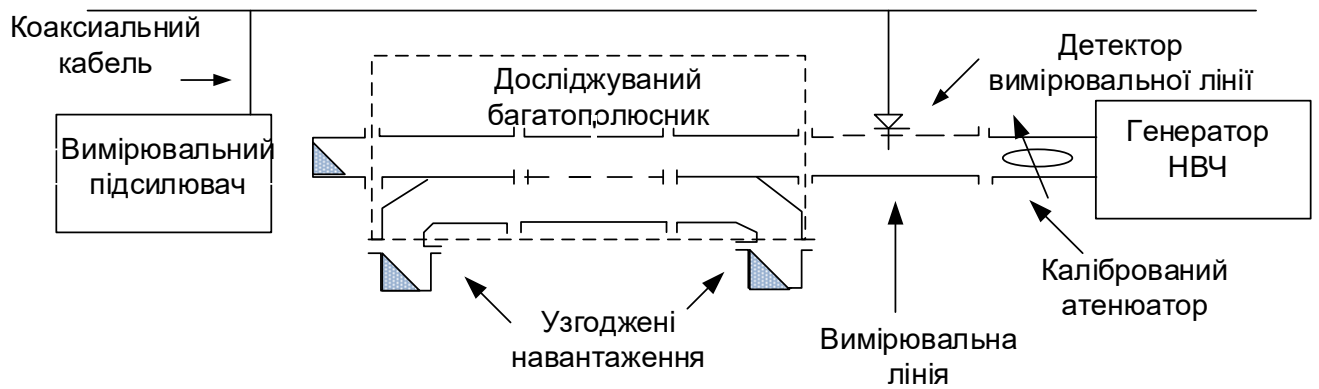


Рисунок 3.1 – Схема для вимірювання КСХН

### 3.2 Вимірювання перехідного згасання й розв'язки

Вимірювання коефіцієнтів передачі  $S_{ik}$  (перехідних згасань або розв'язок) між двома входами проводиться методом каліброваного атенюатора. У даних вимірюваннях використовується атенюатор поляризаційного типу. Його згасання не залежить від частоти й визначається кутом обертання поглинаючої пластинки в круглому хвилеводі, який через плавні переходи підключається до прямокутних хвилеводів.

Спочатку детекторна голівка з підсилювачем приєднує безпосередньо до вихідного фланця вимірювальної лінії для калібрування (рис.3.2). Згасання атенюатора встановлюється таким, щоб значення показань цифрового індикатору підсилювача було рівне 100-200 одиниць. Слід запам'ятати це значення. Початкове загасання атенюатора  $\alpha_0$  повинне становити 40-50 дБ. Шкала атенюатора спіральна. Значення згасання визначається по перехрестю вертикальної лінії й світлої смужки на шкалі.

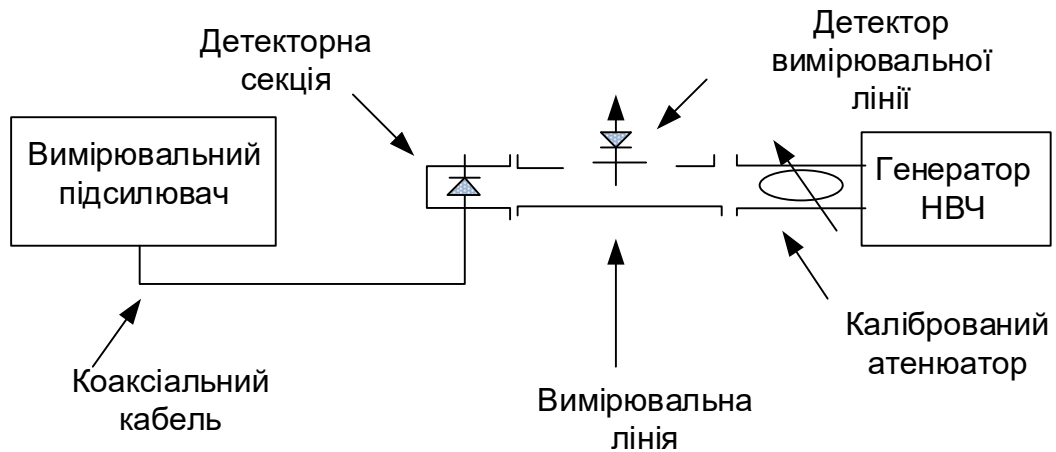


Рисунок 3.2 – Схема з'єднань під час калібрування

Потім до вихідного фланця приєднує  $k$ -й вхід досліджуваного приладу (рис.3.3), а детекторна секція – до  $i$ -го входу. За допомогою атенюатора необхідно добитися початкових показань на дисплеї цифрового індикатору. Записується нове значення згасання  $a_{ik}$  у децибелах. Тоді перехідне згасання в децибелах записується в такий спосіб

$$C_{ik} = -S_{ik} = (\alpha_0 - \alpha_k), \quad (3.3)$$

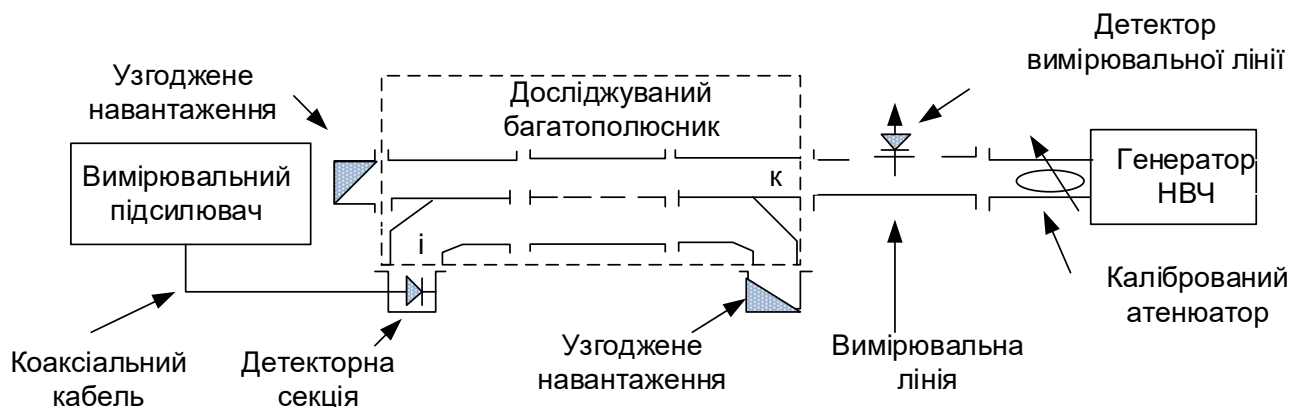


Рисунок 3.3 – Схема для вимірювання коефіцієнта згасання

## 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 4.1.

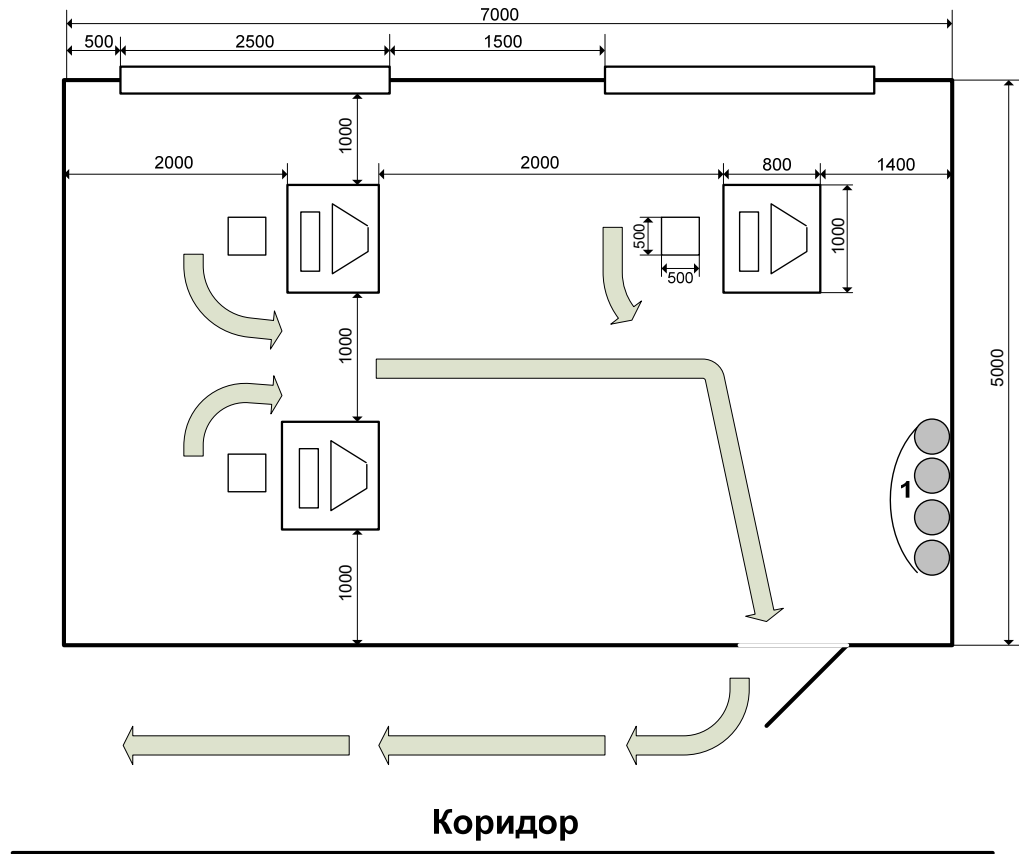


Рисунок 4.1 – План розміщення робочих місць з планом евакуації при пожежі

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 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  $K$  – питома тепловиділення на 1 люкс освітленості,  $K = 0,05$  ккал/лк·м<sup>2</sup>·ч

$E$  – найменша освітленість приміщення, 300 лк;

$S$  – площа приміщення,  $S = 7 \cdot 5 = 35 \text{ м}^2$ .

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

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,  $s = 10 \text{ м}^2$ ;

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

$k$  - коефіцієнт, що зНВжить 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

Визначаємо необхідну продуктивність кондиціонера на охолодження

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

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

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

Система кондиціонування вибирається виходячи з таких умов:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_k \geq L \\ Q_k \geq Q_{хол.} \end{array} \right., \quad (4.8)$$

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, НВ 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

Параметри напрямлених відгалужувачів було розраховано та перевірено шляхом моделювання в HFSS. Протиріччя між результатами попередніх розрахунків і моделюванням є проблемою даного дослідження. Запропоновано спрощений метод розрахунку радіусів отворів спрямованого зв'язку, який полягає в обчисленні радіусів центральних отворів на основі параметра необхідного зв'язку, який відрізняється за допомогою біноміального коефіцієнта Ньютона, тому радіус струму отвір розраховується як радіус центрального отвору, поділений на коефіцієнт. Коефіцієнт є кубічним коренем із відношення чисел біноміального полінома, де числа полінома відповідають центральному та поточному отвору. Кубічний корінь із числа – це значення, яке при множенні на себе втричі або втричі дає початкове значення.

## 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. Расчет и измерение характеристик устройств СВЧ и антенн : учеб. посо-бие / Ю. Е. Мительман, Р. Р. Абдуллин, С. Г. Сычугов, С. Н. Шабунин ; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. Ю. Е. Мительмана. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 140 с.
4. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по едементам волноводной техники, Сов.радио, 1963. – 388 с.
5. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Конструювання пристроїв НВЧ», 2011. – 32 с.
6. Microwave Physics and Techniques Lecture 10 Power Deviders and Couplers [Електронний ресурс]. – 2003. – Режим доступу до ресурсу: <http://uspas.fnal.gov/Lecture10.pdf>
7. Zaichenko, O., Zaichenko, N., Khoroshailo I. Waveguide Directional Coupler Design Method // IEEE 3<sup>rd</sup> KhPI Week. 2022, October, pp.335-338.
8. Мительман Ю.Е. Автоматизированное проектирование микроволновых устройств в HFSS. Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – 60 с.
9. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Конструювання пристроїв НВЧ», 2011. – 42 с.
10. Дзюндзюк Б.В. Охрана труда. Сборник задач [Текст] / Дзюндзюк Б.В., Иванов В.Г. – Х.: НВП центр ХНУРЕ, 2006. – 242 с.
11. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР [текст] / – Харків: ХНУРЕ, 2011 – 24 с.