

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**С. І. Пільтяй**

# **ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ**

**Рекомендації до виконання  
розрахункової роботи**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітніми програмами «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»,  
«Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»,  
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»,  
«Технології радіоелектронної боротьби»  
спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО  
2024

УДК 621.372  
ПЗ2

Автор *Пільтяй Степан Іванович*, канд. техн. наук, доц.

Рецензенти *Нелін Є. А.*, д-р техн. наук, проф.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
*Омеляненко М. Ю.*, ст. викл.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Літвінцев С.М.*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 2 від 08.11.2024 р.)  
за поданням вченої ради радіотехнічного факультету  
(протокол № 09/2024 від 30.09.2024 р.)*

**Пільтяй С. І.**  
ПЗ2 Електродинаміка та поширення радіохвиль. Рекомендації до виконання розрахункової роботи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмами «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки», «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи», «Технології радіоелектронної боротьби» спец. 172 Електронні комунікації та радіотехніка / С. І. Пільтяй ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електрон. текст. дані (1 файл). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. — 157 с.

Посібник містить умови та приклади розв'язання задач, які входять до розрахунково-графічної роботи із навчальної дисципліни «Електродинаміка та поширення радіохвиль». Використовуючи навчальний посібник, студенти можуть самостійно навчитися розв'язувати задачі розрахунково-графічної роботи і виконати її за своїм варіантом. У посібнику наведено розв'язки типових задач, які виникають при дослідженні поширення, відбиття та заломлення плоских електромагнітних хвиль у середовищах, хвиль у різних лініях передачі та коливальних у об'ємних резонаторах.

Навчальний посібник буде корисним студентам радіотехнічних, радіофізичних та телекомунікаційних спеціальностей при виконанні розрахунково-графічних робіт, а також для здобуття досвіду розв'язання задач із електродинаміки та поширення радіохвиль, для підготовки до контрольних робіт та екзаменів.

УДК 621.372

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© С. І. Пільтяй, 2024  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДІВ ЗАДАЧ.....	6
Задача 1. Параметри плоскої електромагнітної хвилі .....	6
Задача 2. Загасання компонент поля та густини потоку потужності плоскої електромагнітної хвилі .....	8
Задача 3. Електромагнітне поле на поверхні провідника .....	9
Задача 4. Відбиття і заломлення плоских електромагнітних хвиль.....	11
Задача 5. Характеристики прямокутних хвилеводів .....	13
Задача 6. Характеристики круглих хвилеводів .....	17
Задача 7. Характеристики коаксіальних ліній передачі.....	21
Задача 8. Характеристики мікросмушкових ліній передачі.....	24
Задача 9. Прямокутний об'ємний резонатор.....	29
Задача 10. Круглий циліндричний об'ємний резонатор .....	31
ВАРІАНТИ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ.....	33
Варіант 1 .....	33
Варіант 2.....	37
Варіант 3.....	41
Варіант 4.....	45
Варіант 5.....	49
Варіант 6.....	53
Варіант 7.....	57
Варіант 8.....	61
Варіант 9.....	65
Варіант 10.....	69
Варіант 11.....	73
Варіант 12.....	77

Варіант 13 .....	81
Варіант 14 .....	85
Варіант 15 .....	89
Варіант 16 .....	93
Варіант 17 .....	97
Варіант 18 .....	101
Варіант 19 .....	105
Варіант 20 .....	109
Варіант 21 .....	113
Варіант 22 .....	117
Варіант 23 .....	121
Варіант 24 .....	125
Варіант 25 .....	129
Варіант 26 .....	133
Варіант 27 .....	137
Варіант 28 .....	141
Варіант 29 .....	145
Варіант 30 .....	149
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....	153
ДОДАТКИ .....	154
Додаток 1. Питомі провідності металів .....	154
Додаток 2. Відносні діелектричні проникності речовин .....	155
Додаток 3. Стандартні прямокутні хвилеводи .....	156
Додаток 4. Корені функцій Бесселя порядку $n$ та їх похідних .....	156
Додаток 5. Стандартні коаксіальні кабелі .....	157

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Електродинаміка та поширення радіохвиль» є фундаментальною і належить до дисциплін базової підготовки (цикл дисциплін загальної підготовки) за освітніми програмами «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки», «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи», «Технології радіоелектронної боротьби» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка.

Отримані знання та навички після вивчення дисципліни «Електродинаміка та поширення радіохвиль» студенти використовують надалі в курсах «Пристрої надвисоких частот», «Антени», «Електромагнітна сумісність радіоелектронних систем», «Основи теорії радіолокаційних систем», «Антенні системи», «Радіосистемна інженерія», «Супутникові інформаційні системи», а також при виконанні курсових та дипломних робіт.

Метою навчальної дисципліни «Електродинаміка та поширення радіохвиль» є вивчення основних властивостей електромагнітного поля, набуття студентами конкретних знань і вмінь, формування таких здатностей: визначати основні характеристики електромагнітних хвиль; формувати електромагнітні хвилі з різними видами поляризації; вимірювати поляризаційні діаграми і визначати за ними поляризацію; розв'язувати крайові задачі електродинаміки; розраховувати і вимірювати параметри ліній передачі і резонаторів; вимірювати розподіли полів у лініях передачі та резонаторах.

Для контролю здобутих студентами практичних знань і набуття навичок самостійно розв'язувати типові задачі електродинаміки передбачено виконання розрахунково-графічної роботи, яка складається із задач за основними розділами освітнього компоненту. Навчальний посібник містить приклади та розв'язки задач розрахунково-графічної роботи та варіанти задач для самостійного виконання роботи студентами.

## РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДІВ ЗАДАЧ

### Задача 1. Параметри плоскої електромагнітної хвилі

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,01$ . Частота хвилі  $f = 1$  ГГц.

Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $x$  декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

#### Розв'язок

Коефіцієнт фази  $\beta$  і коефіцієнт згасання  $\alpha$  для плоскої електромагнітної хвилі в середовищі з втратами можна визначити за такими формулами [1, 2]:

$$\beta = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta} + 1}{2}}; \quad \alpha = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta} - 1}{2}},$$

де  $c$  — швидкість світла у вакуумі.

Підставивши дані з умови задачі, отримуємо:

$$\beta = \frac{2\pi \cdot 10^9 \sqrt{2,5}}{3 \cdot 10^8} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + (0,01)^2} + 1}{2}} \text{ [м}^{-1}\text{]} = 33,1 \text{ [м}^{-1}\text{]};$$

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot 10^9 \sqrt{2,5}}{3 \cdot 10^8} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + (0,01)^2} - 1}{2}} \text{ [м}^{-1}\text{]} = 0,166 \text{ [м}^{-1}\text{]}.$$

Фазову швидкість плоскої електромагнітної хвилі в середовищі з втратами розрахуємо за такою формулою [1]:

$$v_\phi = \frac{\sqrt{2}c}{\sqrt{\varepsilon\mu} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta} + 1}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot 10^8}{\sqrt{2,5} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + (0,01)^2} + 1}} \text{ [м/с]} = 1,897 \cdot 10^8 \text{ [м/с]}.$$

Довжину плоскої електромагнітної хвилі в середовищі з втратами

визначимо за відомою формулою [1]:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon\mu}\sqrt{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}+1}} = \frac{\sqrt{2}c}{f\sqrt{\varepsilon\mu}\sqrt{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}+1}},$$

де  $\lambda_0$  — довжина хвилі у вакуумі.

Підставивши дані з умови задачі, отримуємо:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^9 \sqrt{2,5} \sqrt{\sqrt{1+(0,01)^2}+1}} [\text{М}] = 0,19 [\text{М}] = 190 [\text{ММ}].$$

Хвильовий опір середовища з втратами знаходимо за такою формулою [1]:

$$\dot{Z}_c = 120\pi \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} (1 + \operatorname{tg}^2\delta)^{-\frac{1}{4}} e^{i\frac{\delta}{2}} [\text{ОМ}] = \frac{120\pi}{\sqrt{2,5}} (1 + (0,01)^2)^{-\frac{1}{4}} e^{i\frac{\operatorname{arctg}(0,01)}{2}} [\text{ОМ}] = 238,4 e^{i0,29^\circ} [\text{ОМ}].$$

Запишемо хвильовий опір середовища в алгебраїчній формі:

$$\dot{Z}_c = 238,4 \cdot \cos(0,29^\circ) + i \cdot 238,4 \cdot \sin(0,29^\circ) [\text{ОМ}] = 238,4 + i \cdot 1,19 [\text{ОМ}].$$

Структуру компонент електромагнітного поля заданої загасаючої хвилі показано на рис. 1.

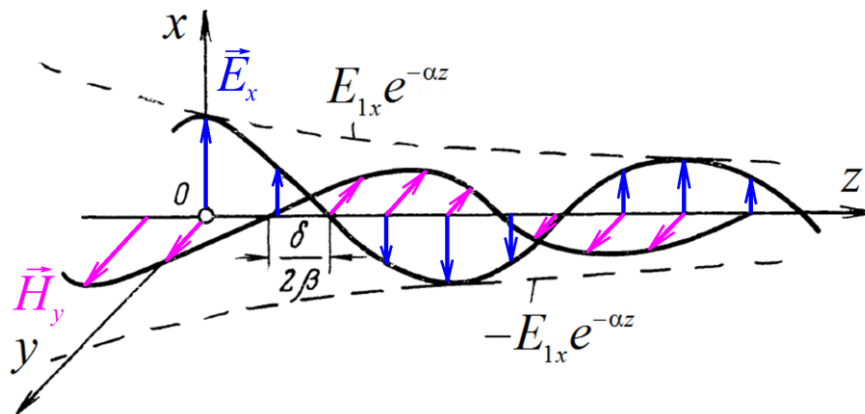


Рисунок 1 — Структура компонент поля поперечної електромагнітної хвилі

**Відповідь:**  $\beta = 33,1 [\text{М}^{-1}]$ ;  $\alpha = 0,166 [\text{М}^{-1}]$ ;  $v_\phi = 1,897 \cdot 10^8 [\text{М/с}]$ ;  $\lambda = 190 [\text{ММ}]$ ;  
 $\dot{Z}_c = 238,4 + i \cdot 1,19 [\text{ОМ}]$ .

## Задача 2. Загасання компонент поля та густини потоку потужності плоскої електромагнітної хвилі

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 10 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,001$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 1 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площині  $z = 20$  м.

### Розв'язок

Знайдемо коефіцієнт згасання  $\alpha$  плоскої електромагнітної хвилі в заданому середовищі з втратами за відомим виразом [1, 2]:

$$\alpha = \frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta} - 1}{2}},$$

де  $c$  — швидкість світла у вакуумі.

Підставивши частоту та параметри середовища з умови задачі, отримуємо:

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot 10 \cdot 10^9 \sqrt{2,05}}{3 \cdot 10^8} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{1 + (0,001)^2} - 1}{2}} \text{ [м}^{-1}\text{]} = 0,15 \text{ [м}^{-1}\text{]}.$$

Амплітуда електричного поля плоскої однорідної електромагнітної хвилі згасає вздовж напрямку поширення за експоненціальним законом [1, 2]:

$$E_m(z) = A e^{-\alpha z}.$$

Звідки випливає, що  $E_m(0) = A$ . Оскільки за умовою задачі  $E_m(0) = 1$  мВ/м, то  $E_m(z) = 1 \cdot e^{-\alpha z}$  [мВ/м]. Таким чином, на площині  $z = 20$  м:

$$E_m(20 \text{ м}) = 1 \cdot e^{-0,15 \cdot 20} \text{ [мВ/м]} = 50 \text{ [мкВ/м]}.$$

Середня густину потоку потужності електромагнітної хвилі дорівнює середньому значенню вектора Пойнтинга. У середовищі із втратами ця величина згасає за таким законом [1, 2]:

$$\langle \Pi(z) \rangle = \langle \Pi(0) \rangle \cdot e^{-2\alpha z} = \frac{|\dot{E}_m(0)|^2}{2} \cdot \operatorname{Re} \left( \frac{1}{\dot{Z}_c} \right) \cdot e^{-2\alpha z}.$$

Визначимо дійсну частину хвильової провідності середовища:

$$\operatorname{Re} \left( \frac{1}{\dot{Z}_c} \right) = \operatorname{Re} \left( \frac{\sqrt{\varepsilon}(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{\frac{1}{4}}}{120\pi\sqrt{\mu}} e^{-i\frac{\delta}{2}} \right) [\text{СМ}] = \frac{\sqrt{\varepsilon}(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{\frac{1}{4}}}{120\pi\sqrt{\mu}} \cos \left( \frac{\operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \delta)}{2} \right) [\text{СМ}].$$

Підставивши параметри середовища з умови задачі, отримуємо:

$$\operatorname{Re} \left( \frac{1}{\dot{Z}_c} \right) = \frac{\sqrt{2,05}(1 + (0,001)^2)^{\frac{1}{4}}}{120\pi} \cos \left( \frac{\operatorname{arctg}(0,001)}{2} \right) [\text{СМ}] = 3,8 [\text{мСМ}].$$

Знаходимо середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі:

$$\langle \Pi(20 \text{ м}) \rangle = \frac{1}{2} \cdot 3,8 \cdot e^{-2 \cdot 0,15 \cdot 20} \left[ \frac{\text{нВт}}{\text{м}^2} \right] = 4,7 \left[ \frac{\text{пВт}}{\text{м}^2} \right].$$

**Відповідь:**  $E_m(20 \text{ м}) = 50 [\text{мкВ/м}]$ ;  $\langle \Pi(20 \text{ м}) \rangle = 4,7 \left[ \frac{\text{пВт}}{\text{м}^2} \right]$ .

### Задача 3. Електромагнітне поле на поверхні провідника

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 100 МГц падає під кутом  $\varphi = 9^\circ$  із повітря на площину із алюмінію. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 1 мА/м.

#### Розв'язок

На рис. 2. показано компоненти електромагнітного поля падаючої та відбитої хвиль для заданого в умові випадку падіння на поверхню провідника.

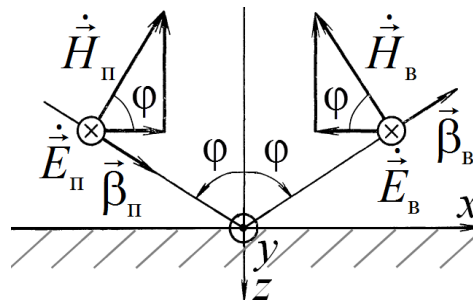


Рисунок 2 — Вектори поля при похилому падінні на поверхню провідника

Оскільки магнітне поле лежить у площині падіння, то електричне поле буде перпендикулярним до неї і хвиля матиме перпендикулярну поляризацію.

Амплітуду електричного поля на поверхні заданого провідника знайдемо, використавши формулу Френеля для перпендикулярної поляризації [1]:

$$\dot{E}_{\text{пр}} = \dot{T}_{\perp} \dot{E}_{\text{пад}} = \frac{2\dot{Z}_{\text{пр}} \cos\varphi}{\dot{Z}_{\text{пр}} \cos\varphi + \dot{Z}_0 \cos\theta} \dot{E}_{\text{пад}},$$

де  $\dot{Z}_{\text{пр}}$ ,  $\dot{Z}_0$  — хвильові опори провідника та повітря,  $\theta$  — кут заломлення хвилі при переході до провідника.

Оскільки для провідників модуль хвильового опору  $|\dot{Z}_{\text{пр}}| \ll |\dot{Z}_0|$ , то за другим законом Снелла:  $\theta \rightarrow 0$ . Отже, при падінні на площину із провідника:

$$\dot{E}_{\text{пр}} = \frac{2\dot{Z}_{\text{пр}}}{\dot{Z}_0} \dot{E}_{\text{пад}} \cos\varphi = 2\dot{Z}_{\text{пр}} \dot{H}_{\text{пад}} \cos\varphi.$$

Визначимо хвильовий опір провідника за формулою [2]:

$$\dot{Z}_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}} (1 + i),$$

де  $f$  — частота,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнітна стала,  $\sigma$  — питома провідність.

Підставивши задану в умові частоту та питому провідність алюмінію (див. додаток 1), отримуємо:

$$\dot{Z}_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{3,8 \cdot 10^7}} (1 + i) [\text{Ом}] = 0,0032 \cdot (1 + i) [\text{Ом}].$$

Знаходимо комплексну амплітуду електричного поля і її модуль:

$$\dot{E}_{\text{пр}} = 2 \cdot 0,0032 \cdot (1 + i) \cdot 10^{-3} \cdot \cos(9^\circ) [\text{В/м}] = 6,37 \cdot (1 + i) [\text{мкВ/м}];$$

$$|\dot{E}_{\text{пр}}| = 6,37 \cdot \sqrt{1^2 + 1^2} [\text{мкВ/м}] = 6,37 \cdot \sqrt{2} [\text{мкВ/м}] = 9 [\text{мкВ/м}].$$

**Відповідь:**  $|\dot{E}_{\text{пр}}| = 9 [\text{мкВ/м}]$ .

### Задача 4. Відбиття і заломлення плоских електромагнітних хвиль

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із полістиролу в тефлон. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 53^\circ$ .

#### Розв'язок

За другим законом Снелла для немагнітних середовищ:  $\frac{\sin \varphi}{\sin \theta} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$ ;

$\sin \theta = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sin \varphi$ ;  $\theta = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sin \varphi\right)$ . Підставимо кут падіння та відносні

діелектричні проникності для заданих в умові речовин (див. додаток 2):

$$\theta = \arcsin\left(\sqrt{\frac{2,55}{2,05}} \sin 53^\circ\right) = 63^\circ.$$

Падаюча електромагнітна хвиля з коловою поляризацією містить складові поля з лінійними паралельною та перпендикулярною поляризаціями. Орієнтація векторів компонент поля при падінні хвилі із цими лінійними поляризаціями показана на рис. 3.

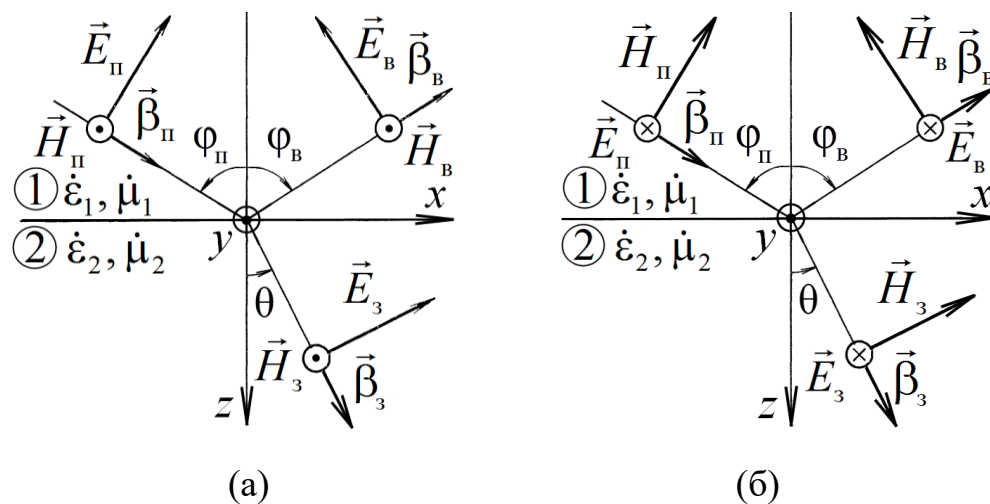


Рисунок 3 — Вектори поля при похилому падінні на межу двох діелектриків хвилі із паралельною (а) та перпендикулярною (б) поляризацією

Знаходимо коефіцієнти відбиття та проходження для складових хвилі із паралельною та перпендикулярною (відносно площини падіння) поляризаціями

за допомогою формул Френеля [1]:

$$\Gamma_{\parallel} = -\frac{\operatorname{tg}(\varphi - \theta)}{\operatorname{tg}(\varphi + \theta)} = \frac{\operatorname{tg}(10^\circ)}{\operatorname{tg}(116^\circ)} = -0,086;$$

$$\Gamma_{\perp} = -\frac{\sin(\varphi - \theta)}{\sin(\varphi + \theta)} = \frac{\sin(10^\circ)}{\sin(116^\circ)} = 0,192;$$

$$T_{\parallel} = \frac{2 \sin \theta \cos \varphi}{\sin(\varphi + \theta) \cos(\varphi - \theta)} = \frac{2 \sin 63^\circ \cos 53^\circ}{\sin(116^\circ) \cos(10^\circ)} = 1,211;$$

$$T_{\perp} = \frac{2 \sin \theta \cos \varphi}{\sin(\varphi + \theta)} = \frac{2 \sin 63^\circ \cos 53^\circ}{\sin(116^\circ)} = 1,192.$$

Комплексна амплітуда електричного поля відбитої хвилі  $\dot{\vec{E}}_B = \Gamma_{\parallel} \cdot \dot{\vec{E}}_{n\parallel} + i\Gamma_{\perp} \cdot \dot{\vec{E}}_{n\perp} = -0,086 \cdot \dot{E} \cdot \vec{e}_{\parallel} + i \cdot 0,192 \cdot \dot{E} \cdot \vec{e}_{\perp}$ . Таким чином, відбита електромагнітна хвиля має еліптичну поляризацію. Визначимо коефіцієнтом еліптичності поляризаційного еліпса за такою формулою [1]

$$r_B = 20 \lg \left| \frac{\dot{\vec{E}}_{B\perp}}{\dot{\vec{E}}_{B\parallel}} \right| = 20 \lg \left| \frac{\Gamma_{\perp}}{\Gamma_{\parallel}} \right| = 7 \text{ дБ.}$$

Комплексна амплітуда електричного поля заломленої хвилі  $\dot{\vec{E}}_3 = T_{\parallel} \cdot \dot{\vec{E}}_{n\parallel} + iT_{\perp} \cdot \dot{\vec{E}}_{n\perp} = 1,211 \cdot \dot{E} \cdot \vec{e}_{\parallel} + i \cdot 1,192 \cdot \dot{E} \cdot \vec{e}_{\perp}$ . Таким чином, заломлена електромагнітна хвиля має еліптичну поляризацію. Визначимо коефіцієнт еліптичності поляризаційного еліпса за такою формулою [1]

$$r_3 = 20 \lg \left| \frac{\dot{\vec{E}}_{3\parallel}}{\dot{\vec{E}}_{3\perp}} \right| = 20 \lg \left| \frac{T_{\parallel}}{T_{\perp}} \right| = 0,13 \text{ дБ.}$$

**Відповідь:** відбита та заломлена електромагнітні хвилі мають еліптичну поляризацію із коефіцієнтами еліптичності  $r_B = 7 \text{ дБ}$ ,  $r_3 = 0,13 \text{ дБ}$ .

## Задача 5. Характеристики прямокутних хвильоводів

На рис. 4 показано прямокутний хвильовід із однорідним заповненням із відносними проникностями  $\epsilon$ ,  $\mu$ . Ширина та висота внутрішньої області дорівнюють  $a$  і  $b$  відповідно.

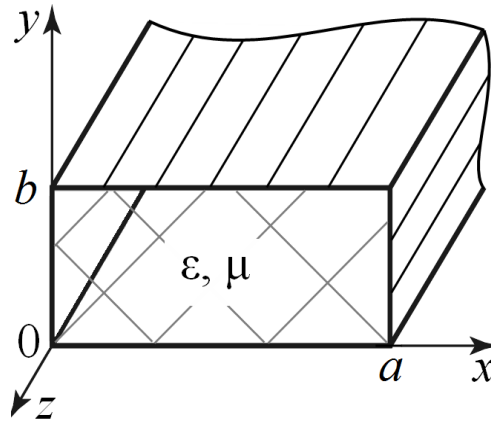


Рисунок 4 — Прямокутний хвильовід із однорідним заповненням

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвильовід WR-90, який виготовлено з латуні. Визначити такі параметри хвильоводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвильоводі на частоті 17 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвильоводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 11 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 11 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 8 ГГц;
- 7) коефіцієнт загасання основної хвилі на частоті 8 ГГц.

Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі.

### Розв'язок

Згідно з додатком 3 визначаємо внутрішні поперечні розміри заданого стандартного прямокутного хвильоводу WR-90:  $a = 22,86$  мм;  $b = 10,16$  мм. Основною хвилею прямокутного хвильоводу є хвиля  $H_{10}$  [1, 3]. Тепер розрахуємо необхідні характеристики хвильоводу.

- 1) Критична довжина основної хвилі  $\lambda_{кр} = 2a = 45,72$  мм.
- 2) Смуга частот однохвильового режиму роботи прямокутного хвилеводу — це смуга між критичними частотами хвилі основного типу  $H_{10}$  та хвилі першого вищого типу  $H_{20}$ . Таким чином:

$$f_H = \frac{c}{\lambda_{кр}^{H_{10}}} = \frac{c}{2a} = 6,56 \text{ ГГц}; \quad f_B = \frac{c}{\lambda_{кр}^{H_{20}}} = \frac{c}{a} = 13,1 \text{ ГГц}.$$

- 3) Запишемо умову можливості поширення електромагнітної хвилі певного типу у хвилеводі [1]:  $f_{кр} < f$ .

Для заданого в умові задачі прямокутного хвилеводу WR-90 отримуємо:

$$f_{кр}^{H_{nm} \text{ (або } E_{nm})} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} = 150 \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{22,86}\right)^2 + \left(\frac{n}{10,16}\right)^2} \text{ [ГГц]}.$$

Таким чином, у даному випадку для різних комбінацій індексів хвиль прямокутного хвилеводу потрібно перевірити таку умову:

$$150 \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{22,86}\right)^2 + \left(\frac{n}{10,16}\right)^2} \text{ ГГц} < 17 \text{ ГГц}.$$

Хвилі типу E із індексами 0 не існують у хвилеводі прямокутного поперечного перерізу, оскільки для них буде нульове значення усіх компонент електромагнітного поля. Складемо таблицю значень критичних частот.

Таблиця 1. Критичні частоти власних хвиль прямокутного хвилеводу WR-90

Хвиля	$H_{10}$	$H_{20}$	$H_{01}$	$H_{11}$	$E_{11}$	$H_{30}$	$H_{21}$	$E_{21}$	$H_{40}$
$f_{кр}$ , ГГц	6,56	13,12	14,76	16,16	16,16	19,69	19,75	19,75	26,25

Із таблиці 1 бачимо, що нижчими за 17 ГГц є критичні частоти 5 власних хвиль хвилеводу WR-90:  $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ,  $H_{01}$ ,  $H_{11}$ ,  $E_{11}$ .

- 4) Довжину хвилі  $H_{10}$  у хвилеводі WR-90 знаходимо за формулою [1]:

$$\lambda_{хв}^{H_{10}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}^{H_{10}}}\right)^2}} = \frac{c}{f \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2}}.$$

Підставивши частоту  $f = 11$  ГГц і розмір стінки  $a = 22,86$  мм, отримуємо:

$$\lambda_{\text{ХВ}}^{\text{H}_{10}} = \frac{300}{11 \sqrt{1 - \left( \frac{300}{2 \cdot 22,86 \cdot 11} \right)^2}} [\text{мм}] = 34 [\text{мм}].$$

5) Фазову, групову швидкості та характеристичний опір для основної хвилі прямокутного хвилеводу WR-90 знайдемо за відомими формулами [1, 3]:

$$v_{\phi}^{\text{H}_{10}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left( \frac{c}{2af} \right)^2}}; \quad v_{\text{ГР}}^{\text{H}_{10}} = c \sqrt{1 - \left( \frac{c}{2af} \right)^2}; \quad Z_{\text{H}_{10}} = \frac{120\pi [\text{Ом}]}{\sqrt{1 - \left( \frac{c}{2af} \right)^2}}.$$

Підставивши частоту  $f = 11$  ГГц і розмір стінки  $a = 22,86$  мм, отримуємо:

$$v_{\phi}^{\text{H}_{10}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{1 - \left( \frac{300}{2 \cdot 22,86 \cdot 11} \right)^2}} [\text{м/с}] = 3,74 \cdot 10^8 [\text{м/с}];$$

$$v_{\text{ГР}}^{\text{H}_{10}} = 3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{300}{2 \cdot 22,86 \cdot 11} \right)^2} [\text{м/с}] = 2,41 \cdot 10^8 [\text{м/с}];$$

$$Z_{\text{H}_{10}} = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left( \frac{300}{2 \cdot 22,86 \cdot 11} \right)^2}} [\text{Ом}] = 470 [\text{Ом}].$$

6) Потужність, яку передає основна хвиля  $\text{H}_{10}$  у прямокутному хвилеводі, розрахуємо як інтеграл по поверхні поперечного перерізу від середнього значення вектора Пойнтинга:

$$\langle P \rangle = \int_{S_1} \langle \vec{\Pi} \rangle dS = \frac{1}{2} \int_{S_1} \text{Re}(\dot{\vec{E}} \times \vec{H}^*) dS = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left( E_m \sin \frac{\pi x}{a} \right) \cdot \left( \frac{E_m \sin \frac{\pi x}{a}}{Z_{\text{H}_{10}}} \right) dx dy =$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a E_m^2 \left( \sin \frac{\pi x}{a} \right)^2 \cdot \frac{\sqrt{1 - \left( \frac{c}{2af} \right)^2}}{120\pi \text{ Ом}} dx dy = \frac{E_m^2}{4} \cdot ab \cdot \frac{\sqrt{1 - \left( \frac{c}{2af} \right)^2}}{120\pi \text{ Ом}}.$$

Підставивши значення частоти  $f = 8$  ГГц, розмірів  $a = 22,86$  мм,  $b = 10,16$  мм і модуля електричного поля, при якому настає пробиття повітря ( $E_m = 3$  кВ/мм), отримуємо:

$$\langle P \rangle = \frac{(3 \text{ кВ/мм})^2}{4} \cdot (22,86 \cdot 10,16) [\text{мм}^2] \cdot \frac{\sqrt{1 - \left( \frac{300}{2 \cdot 22,86 \cdot 8} \right)^2}}{120\pi \text{ Ом}} = 793 \text{ кВт.}$$

7) Для заповненого повітрям хвильоводу втрати будуть виникати лише у його металевих стінках. У цьому випадку коефіцієнт загасання основної хвилі прямокутного хвильоводу розраховують за такою формулою [4]:

$$\alpha_{\text{пр}}^{H_{10}} = \frac{R_s (bc^2 + 2a^3 f^2)}{240\pi f^2 a^3 b \sqrt{1 - \left( \frac{c}{2af} \right)^2}} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right],$$

де  $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$  — поверхневий опір металу стінок хвильоводу. За додатком 1 для латуні знаходимо:  $\sigma = 2,6 \cdot 10^7$  См/м.

Знаходимо поверхневий опір латуні на заданій частоті  $f = 8$  ГГц:

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi \cdot 8 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2,6 \cdot 10^7}} [\text{Ом}] = 0,035 [\text{Ом}].$$

Визначаємо коефіцієнт загасання основної хвилі прямокутного хвильоводу:

$$\alpha_{\text{пр}}^{H_{10}} = \frac{0,035 \cdot (10,16 \cdot 300^2 + 2(22,86)^3 8^2)}{240\pi \cdot 8^2 (22,86)^3 10,16 \sqrt{1 - \left( \frac{300}{2 \cdot 22,86 \cdot 8} \right)^2}} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right] = 0,025 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right].$$

На практиці коефіцієнт загасання зазвичай виражають у дБ/м:

$$\alpha_{\text{пр}}^{H_{10}} \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot \alpha_{\text{пр}}^{H_{10}} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot 0,025 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 0,22 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right].$$

На рис. 5 зображено силові лінії електричного і магнітного полів хвилі  $H_{10}$ .

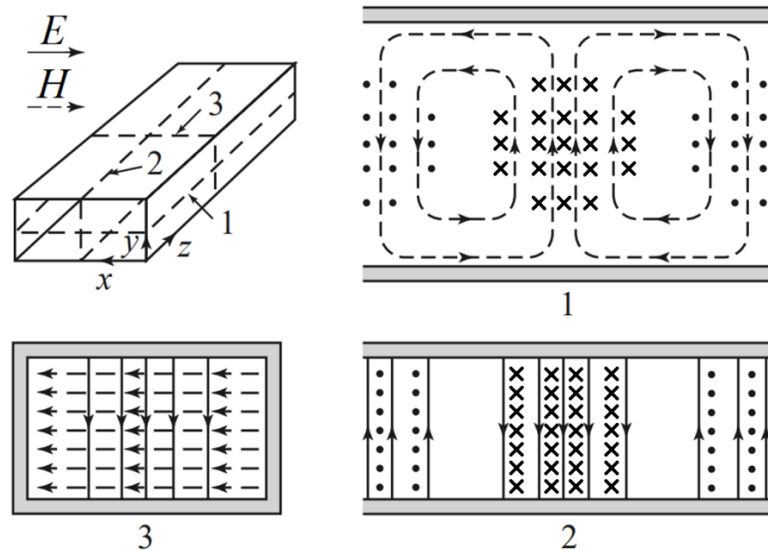


Рисунок 5 — Силкові лінії полів  $\vec{E}$  (суцільні) і  $\vec{H}$  (штрихові) хвилі  $H_{10}$

### Задача 6. Характеристики круглих хвилеводів

На рис. 6 показано круглий хвилевід із однорідним внутрішнім середовищем із відносними проникностями  $\epsilon$ ,  $\mu$ .

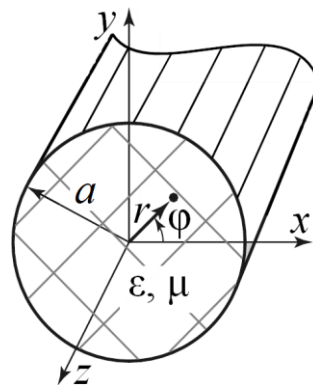


Рисунок 6 — Круглий хвилевід із однорідним заповненням

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 10 мм, який виготовлено з латуні. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 22 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 22 ГГц;

- б) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 7) коефіцієнт загасання основної хвилі на частоті 20 ГГц.

### Розв'язок

Основною хвилею круглого хвилеводу є хвиля  $H_{11}$  [1, 3]. Розрахуємо необхідні характеристики хвилеводу.

1) Критична довжина основної хвилі  $\lambda_{кр} = \frac{\pi D}{\mu_{11}} = 1,706D = 17,1 \text{ мм}$ .

2) Смуга частот однохвильового режиму роботи круглого хвилеводу — це смуга між критичними частотами хвилі основного типу  $H_{11}$  та хвилі першого вищого типу  $E_{01}$ . Таким чином:

$$f_{н} = \frac{c}{\lambda_{кр}^{H_{11}}} = \frac{c}{1,706D} = 17,58 \text{ ГГц}; \quad f_{в} = \frac{c}{\lambda_{кр}^{E_{01}}} = \frac{c}{1,306D} = 22,97 \text{ ГГц}.$$

3) Запишемо умову можливості поширення електромагнітної хвилі певного типу у хвилеводі [1]:  $f_{кр} < f$ .

Для заданого в умові задачі круглого хвилеводу діаметром 10 мм:

$$f_{кр}^{H_{nm}} = \frac{\mu_{nm}c}{\pi D} = \frac{30 \cdot \mu_{nm}}{\pi} \text{ [ГГц]}; \quad f_{кр}^{E_{nm}} = \frac{\nu_{nm}c}{\pi D} = \frac{30 \cdot \nu_{nm}}{\pi} \text{ [ГГц]},$$

де  $\nu_{nm}$ ,  $\mu_{nm}$  —  $m$ -ті корені функцій Бесселя порядку  $n$  та їх похідних, відповідно.

Таким чином, у даному випадку для різних комбінацій індексів хвиль круглого хвилеводу потрібно перевірити такі умови:

$$\frac{30 \cdot \mu_{nm}}{\pi} \text{ ГГц} < 30 \text{ ГГц}; \quad \frac{30 \cdot \nu_{nm}}{\pi} \text{ ГГц} < 30 \text{ ГГц}.$$

У додатку 4 наведено корені функцій Бесселя і їх похідних. Складемо таблицю значень критичних частот заданого круглого хвилеводу.

Таблиця 2. Критичні частоти власних хвиль круглого хвилеводу

Хвиля	$H_{11}$	$E_{01}$	$H_{21}$	$H_{01}$	$E_{11}$	$H_{31}$
$f_{кр}$ , ГГц	17,58	22,97	29,16	36,59	36,59	40,12

Із таблиці 2 бачимо, що нижчими за 30 ГГц є критичні частоти 3 власних хвиль круглого хвилеводу:  $H_{11}$ ,  $E_{01}$ ,  $H_{21}$ .

4) Довжину хвилі  $H_{11}$  у круглому хвилеводі знаходимо за формулою [1]:

$$\lambda_{\text{хв}}^{H_{11}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}^{H_{11}}}\right)^2}} = \frac{c}{f \sqrt{1 - \left(\frac{c}{1,706 D f}\right)^2}}.$$

Підставивши частоту  $f = 22$  ГГц і діаметр  $D = 10$  мм, отримуємо:

$$\lambda_{\text{хв}}^{H_{11}} = \frac{300}{22 \sqrt{1 - \left(\frac{300}{1,706 \cdot 10 \cdot 22}\right)^2}} [\text{мм}] = 22,7 [\text{мм}].$$

5) Фазову, групову швидкості та характеристичний опір для основної хвилі круглого хвилеводу знайдемо за відомими формулами [1, 3]:

$$v_{\phi}^{H_{11}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{1,706 D f}\right)^2}}; \quad v_{\text{гр}}^{H_{11}} = c \sqrt{1 - \left(\frac{c}{1,706 D f}\right)^2}; \quad Z_{H_{11}} = \frac{120\pi [\text{Ом}]}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{1,706 D f}\right)^2}}.$$

Підставивши частоту  $f = 22$  ГГц і діаметр  $D = 10$  мм, отримуємо:

$$v_{\phi}^{H_{11}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{1,706 D f}\right)^2}} [\text{м/с}] = 5 \cdot 10^8 [\text{м/с}];$$

$$v_{\text{гр}}^{H_{11}} = 3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c}{1,706 D f}\right)^2} [\text{м/с}] = 1,8 \cdot 10^8 [\text{м/с}];$$

$$Z_{H_{11}} = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{1,706 D f}\right)^2}} [\text{Ом}] = 627 [\text{Ом}].$$

6) Потужність, яку передає основна хвиля  $H_{11}$  у круглому хвилеводі, розрахуємо як інтеграл по поверхні поперечного перерізу від середнього

значення вектора Пойнтинга [4]:

$$\begin{aligned} \langle P \rangle &= \int_{S_{\perp}} \langle \vec{\Pi} \rangle dS = \frac{1}{2} \int_{S_{\perp}} \operatorname{Re}(\dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^*) dS = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} \left( \dot{E}_r H_{\varphi}^* - \dot{E}_{\varphi} H_r^* \right) r d\varphi dr = \\ &= E_m^2 \cdot \frac{(\mu_{11}^2 - 1) J_1^2(\mu_{11})}{\mu_{11}^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left( \frac{c}{1,706 D f} \right)^2}}{120\pi \text{ Ом}}. \end{aligned}$$

Підставивши значення частоти  $f = 20$  ГГц, діаметра  $D = 10$  мм, кореня  $\mu_{11} = 1,841$  (за додатком 4) і модуля електричного поля, при якому настає пробиття повітря ( $E_m = 3$  кВ/мм), отримуємо:

$$\langle P \rangle = (3 \text{ кВ/мм})^2 \cdot 0,239 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} [\text{мм}^2] \cdot \frac{\sqrt{1 - \left( \frac{300}{1,706 \cdot 10 \cdot 20} \right)^2}}{120\pi \text{ Ом}} = 213 \text{ кВт}.$$

7) Для заповненого повітрям хвилеводу втрати будуть виникати лише у його металевих стінках. У цьому випадку коефіцієнт загасання основної хвилі круглого хвилеводу розраховують за такою формулою [4]:

$$\alpha_{\text{пр}}^{H_{11}} = \frac{R_s \left[ \left( \frac{c \mu_{11}}{\pi D f} \right)^2 + \frac{1}{\mu_{11}^2 - 1} \right]}{60\pi D \sqrt{1 - \left( \frac{c}{1,706 D f} \right)^2}},$$

де  $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$  — поверхневий опір металу стінок хвилеводу. За додатком 1 для латуні знаходимо:  $\sigma = 2,6 \cdot 10^7$  См/м.

Знаходимо поверхневий опір латуні на заданій частоті  $f = 20$  ГГц:

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2,6 \cdot 10^7}} [\text{Ом}] = 0,055 [\text{Ом}].$$

Визначаємо коефіцієнт загасання основної хвилі прямокутного хвилеводу:

$$\alpha_{\text{пр}}^{\text{Нп}} = \frac{0,055 \left[ \left( \frac{300 \cdot 1,841}{200\pi} \right)^2 + \frac{1}{(1,841)^2 - 1} \right] \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right]}{600\pi \sqrt{1 - \left( \frac{300}{1,706 \cdot 10 \cdot 20} \right)^2}} = 0,073 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right].$$

На практиці коефіцієнт загасання зазвичай виражають у дБ/м:

$$\alpha_{\text{пр}}^{\text{Нп}} \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot \alpha_{\text{пр}}^{\text{Нп}} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot 0,073 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 0,634 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right].$$

### Задача 7. Характеристики коаксіальних ліній передачі

На рис. 7 показано коаксіальну лінію передачі та позначення її розмірів у поперечному перерізі.

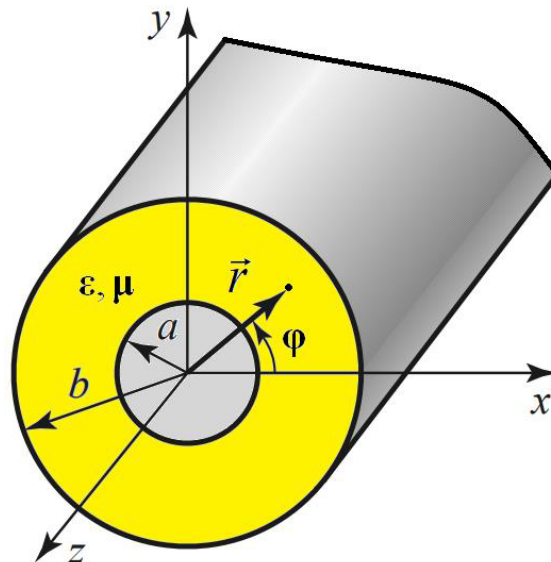


Рисунок 7 — Коаксіальна лінія передачі з позначенням розмірів

Задано стандартний коаксіальний кабель RG-8A/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 10 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти та порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 10 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 10 ГГц;
- 6) коефіцієнт загасання Т-хвилі на частоті 10 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ .

### Розв'язок

1) За додатком 5 визначаємо, що діелектриком кабелю RG-8A/U є поліетилен, а діаметри внутрішнього провідника та діелектрика:  $d = 2,17$  мм;  $D = 7,24$  мм. За додатком 2 для поліетилену знаходимо, що  $\epsilon = 2,25$ .

Смуга частот однохвильового режиму роботи коаксіального кабелю — це смуга між нульовою частотою (починаючи з якої поширюється хвиля основного типу TEM) та критичною частотою хвилі першого вищого типу  $H_{11}$  [5, 6]. Таким чином:

$$f_{\text{кр}}^T = 0; \quad f_{\text{кр}}^{H_{11}} = \frac{2c}{\sqrt{\epsilon} \cdot \pi \cdot (d + D)} = \frac{2 \cdot 300[\text{мм} \cdot \text{ГГц}]}{\sqrt{2,25} \cdot \pi \cdot (2,17 + 7,24)[\text{мм}]} = 13,53 \text{ ГГц}.$$

Отже, смуга частот однохвильового режиму роботи становить 0–13,53 ГГц.

2) На рис. 8 показано схему ввімкнення еквівалентної коаксіальному кабелю довгої лінії до джерела напруги і навантаження та її модель із погонними параметрами.

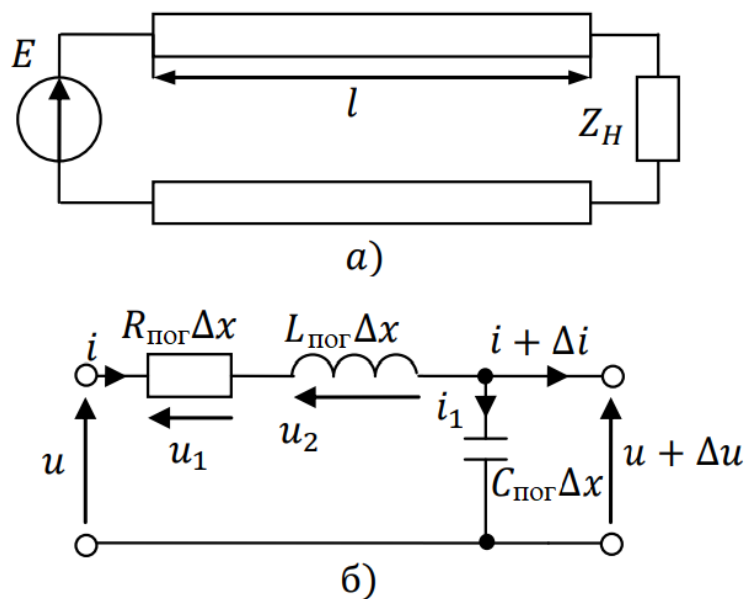


Рисунок 8 — Схема з довгою лінією (а) і її модель з погонними параметрами (б)

Погонні ємність, індуктивність та опір заданого коаксіального кабелю RG-8A/U знайдемо за відомими формулами [1, 4]:

$$C_{\text{пог}} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi \cdot 2,25 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{\Phi}{\text{М}} \right]}{\ln(7,24/2,17)} = 103,8 \left[ \frac{\text{пФ}}{\text{М}} \right];$$

$$L_{\text{пог}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \ln \frac{7,24}{2,17} \left[ \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right] = 241 \left[ \frac{\text{нГн}}{\text{м}} \right];$$

$$R_{\text{пог}} = \frac{R_s}{\pi} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right),$$

де  $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$  — поверхневий опір провідників кабелю. За додатком 1 для міді знаходимо:  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м.

Розраховуємо поверхневий опір міді на заданій частоті  $f = 10$  ГГц:

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{5,8 \cdot 10^7}} [\text{Ом}] = 0,026 [\text{Ом}].$$

Тоді погонний опір кабелю на частоті 10 ГГц:

$$R_{\text{пог}} = \frac{R_s}{\pi} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) = \frac{0,026}{\pi} \left( \frac{1}{2,17} + \frac{1}{7,24} \right) \left[ \frac{\text{Ом}}{\text{мм}} \right] = 5 \left[ \frac{\text{Ом}}{\text{м}} \right].$$

3) Характеристичний опір коаксіального кабелю знайдемо за формулою [1, 4]:

$$Z_{\text{хв}} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left( \frac{D}{d} \right) [\text{Ом}] = \frac{60}{\sqrt{2,25}} \ln \left( \frac{7,24}{2,17} \right) [\text{Ом}] = 48,2 [\text{Ом}].$$

Значення хвильового опору менше за номінальні 50 Ом на 3,6 %.

4) Довжину основної хвилі в коаксіальному кабелі на частоті 10 ГГц визначимо за відомою формулою для плоских електромагнітних хвиль [1]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon}} = \frac{300}{10 \cdot \sqrt{2,25}} [\text{мм}] = 20 [\text{мм}].$$

5) Фазова та групова швидкості для Т-хвилі в коаксіальному кабелі без втрат співпадають [1]:

$$v_{\phi} = v_{\text{гр}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = 2 \cdot 10^8 [\text{м/с}].$$

6) У коаксіальному кабелі втрати будуть виникати як у діелектрику, так і у провідниках. У цьому випадку коефіцієнт загасання складається із двох

частин і може бути розрахований за такою формулою [1, 4]:

$$\alpha_k = \alpha_d + \alpha_{пр} = \frac{\beta \cdot \operatorname{tg} \delta}{2} + \frac{R_s}{2Z_c \ln(D/d)} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right),$$

де  $\beta$  — хвильове число,  $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$  — поверхневий опір провідників,  $Z_c$  — хвильовий опір діелектрика. Опір  $R_s$  було визначено в пункті 2.

Знаходимо коефіцієнт загасання Т-хвилі кабелю на частоті 10 ГГц:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta}{c} + \frac{\sqrt{\varepsilon} \cdot R_s}{240\pi [\text{Ом}] \cdot \ln(D/d)} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) = \\ &= \frac{\pi \cdot 10 \cdot \sqrt{2,25} \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{300} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right] + \frac{\sqrt{2,25} \cdot 0,026}{240\pi \cdot \ln(7,24/2,17)} \left( \frac{1}{2,17} + \frac{1}{7,24} \right) \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right] = \\ &= 0,047 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] + 0,026 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 0,073 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right]. \end{aligned}$$

На практиці коефіцієнт загасання зазвичай виражають у дБ/м:

$$\alpha_k \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot \alpha_k \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot 0,073 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 0,634 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right].$$

### Задача 8. Характеристики мікросмужкових ліній передачі

На рис. 9 показано мікросмужкову лінію передачі та позначення її поперечних розмірів.

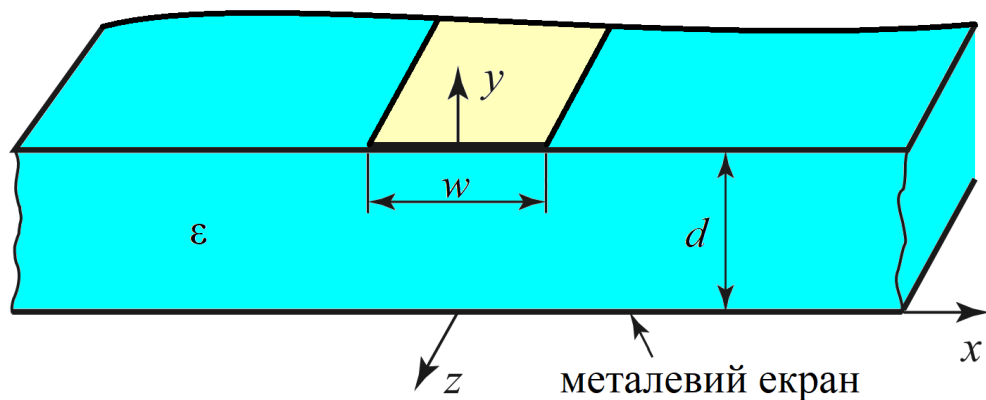


Рисунок 9 — Несиметрична смужкова (мікросмужкова) лінія передачі

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі зі склотекстоліту FR-4

товщиною 1 мм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії:

- 1) ширини металевих смужок  $w$ , при яких характеристичний опір дорівнює 50, 75, 100 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії передачі з характеристичним опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 10 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 10 ГГц;
- 5) коефіцієнт загасання основної хвилі в мікросмужковій лінії з характеристичним опором 50 Ом на частоті 10 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 0,04$ .

Порівняйте отриманий у пункті 5 коефіцієнт загасання з коефіцієнтом загасання на частоті 10 ГГц мікросмужкової лінії, яка має характеристичний опір 50 Ом і виготовлена на підкладці з діелектричного матеріалу Rogers Duroid 5880 товщиною 787 мкм із  $\text{tg } \delta = 9 \cdot 10^{-4}$  та мідною металізацією.

### Розв'язок

1) За додатком 2 знаходимо відносну діелектричну проникність склотекстоліту FR-4  $\varepsilon = 4,5$ . Ширина металевої смужки мікросмужкової лінії визначається за емпіричними формулами [1]:

$$w = \frac{8d \exp \left[ \frac{Z_x}{60[\text{Ом}]} \sqrt{\frac{\varepsilon+1}{2}} + \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon} \right) \right]}{\exp \left[ \frac{Z_x}{30[\text{Ом}]} \sqrt{\frac{\varepsilon+1}{2}} + \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \left( 0,46 + \frac{0,22}{\varepsilon} \right) \right] - 2}, \frac{w}{d} \leq 2;$$

$$w = \frac{2d}{\pi} \left\{ \frac{377\pi[\text{Ом}]}{2Z_x \sqrt{\varepsilon}} - 1 - \ln \left( \frac{377\pi[\text{Ом}]}{Z_x \sqrt{\varepsilon}} - 1 \right) + \frac{\varepsilon-1}{2\varepsilon} \left[ \ln \left( \frac{377\pi[\text{Ом}]}{2Z_x \sqrt{\varepsilon}} - 1 \right) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon} \right] \right\}, \frac{w}{d} > 2.$$

Припустимо, що при  $Z_x = 50$  Ом відношення  $\frac{w}{d} \leq 2$ . За першою формулою:

$$w_{50 \text{ Ом}} = \frac{8 \exp \left[ \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4,5+1}{2}} + \frac{4,5-1}{4,5+1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{4,5} \right) \right]}{\exp \left[ \frac{50}{30} \sqrt{\frac{4,5+1}{2}} + \frac{4,5-1}{4,5+1} \left( 0,46 + \frac{0,22}{4,5} \right) \right] - 2} [\text{мм}] = 1,88 [\text{мм}].$$

Як бачимо,  $\frac{w_{50\text{Ом}}}{d} = 1,88$  і умова  $\frac{w}{d} \leq 2$  виконується. Отже, при  $Z_x = 50$  Ом

було коректно використано першу формулу для розрахунку ширини стрічки.

Оскільки більшим значенням характеристичного опору відповідають тонші смужки, то для характеристичних опорів 75 і 100 Ом умова  $\frac{w}{d} \leq 2$  теж

буде виконуватися. Таким чином, за першою формулою отримуємо:

$$w_{75\text{Ом}} = \frac{8 \exp \left[ \frac{75}{60} \sqrt{\frac{4,5+1}{2}} + \frac{4,5-1}{4,5+1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{4,5} \right) \right]}{\exp \left[ \frac{75}{30} \sqrt{\frac{4,5+1}{2}} + \frac{4,5-1}{4,5+1} \left( 0,46 + \frac{0,22}{4,5} \right) \right] - 2} [\text{мм}] = 0,88 [\text{мм}];$$

$$w_{100\text{Ом}} = \frac{8 \exp \left[ \frac{100}{60} \sqrt{\frac{4,5+1}{2}} + \frac{4,5-1}{4,5+1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{4,5} \right) \right]}{\exp \left[ \frac{100}{30} \sqrt{\frac{4,5+1}{2}} + \frac{4,5-1}{4,5+1} \left( 0,46 + \frac{0,22}{4,5} \right) \right] - 2} [\text{мм}] = 0,43 [\text{мм}].$$

2) Ефективну діелектричну проникність мікросмужкової лінії передачі знайдемо за формулою [1, 4]:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\frac{12d}{w}}} = \frac{4,5+1}{2} + \frac{4,5-1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\frac{12}{1,88}}} = 3,39.$$

3) Довжину основної хвилі в мікросмужковій лінії на частоті 10 ГГц визначимо за відомою формулою для плоских електромагнітних хвиль [1]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} = \frac{c}{f \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} = \frac{300}{10 \cdot \sqrt{3,39}} [\text{мм}] = 16,3 [\text{мм}].$$

4) Фазова та групова швидкості основної хвилі в мікросмужковій лінії без втрат співпадають [1]:

$$v_{\phi} = v_{\text{гр}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} = 1,63 \cdot 10^8 [\text{м/с}].$$

5) У мікросмужковій лінії втрати будуть виникати як у діелектрику

підкладки, так і у провідниках. Отже, коефіцієнт загасання складається із двох частин і може бути розрахований за такою формулою [1, 4]:

$$\alpha_{\text{мсл}} = \alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{пр}} = \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon} (\varepsilon_{\text{эф}} - 1) \text{tg} \delta}{c \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}} (\varepsilon - 1)} + \frac{R_s}{Z_x w},$$

де  $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$  — поверхневий опір провідників. Опір  $R_s$  було визначено в пункті 2 задачі 7.

Знаходимо коефіцієнт загасання основної хвилі мікросмушкової лінії на частоті 10 ГГц при  $\text{tg} \delta = 0,04$ :

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{мсл}} &= \frac{\pi \cdot 10 \sqrt{4,5(3,39 - 1)} \cdot 0,04}{300 \sqrt{3,39(4,5 - 1)}} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right] + \frac{0,026}{50 \cdot 1,88} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right] = \\ &= 3,3 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] + 0,28 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 3,58 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right]. \end{aligned}$$

На практиці коефіцієнт загасання зазвичай виражають у дБ/м:

$$\alpha_{\text{мсл}} \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot \alpha_{\text{мсл}} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot 3,58 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 31,1 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right].$$

Розрахуємо коефіцієнт загасання мікросмушкової лінії на підкладці з матеріалу Rogers Duroid 5880. За додатком 2 знаходимо відносну діелектричну проникність матеріалу  $\varepsilon = 2,2$ .

Припустимо, що при  $Z_x = 50$  Ом відношення  $\frac{w}{d} \leq 2$ . За першою формулою для ширини смужки:

$$w = \frac{8 \cdot 0,787 \cdot \exp \left[ \frac{50}{60} \sqrt{\frac{2,2+1}{2}} + \frac{2,2-1}{2,2+1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{2,2} \right) \right]}{\exp \left[ \frac{50}{30} \sqrt{\frac{2,2+1}{2}} + \frac{2,2-1}{2,2+1} \left( 0,46 + \frac{0,22}{2,2} \right) \right] - 2} [\text{мм}] = 2,46 [\text{мм}].$$

Як бачимо,  $\frac{w}{d} = \frac{2,46}{0,787} = 3,1$  і умова  $\frac{w}{d} \leq 2$  не виконується. Отже, для лінії на підкладці з матеріалу Rogers Duroid 5880 із характеристичним опором  $Z_x =$

50 Ом потрібно використати другу формулу ширини смужки:

$$w = \frac{2 \cdot 0,787}{\pi} \left\{ \frac{377\pi}{2 \cdot 50 \sqrt{2,2}} - 1 - \ln \left( \frac{377\pi}{50 \sqrt{2,2}} - 1 \right) + \frac{2,2 - 1}{2 \cdot 2,2} \left[ \ln \left( \frac{377\pi}{2 \cdot 50 \sqrt{2,2}} - 1 \right) + 0,39 - \frac{0,61}{2,2} \right] \right\} [\text{мм}] = 2,39 [\text{мм}].$$

Оскільки  $\frac{w}{d} = 3,04$ , то виконується умова  $\frac{w}{d} > 2$  і для лінії на підкладці з матеріалу Rogers Duroid 5880 із характеристичним опором  $Z_x = 50$  Ом коректно використовувати другу формулу для розрахунку ширини стрічки.

Визначимо ефективну діелектричну проникність мікросмужкової лінії передачі на підкладці з матеріалу Rogers Duroid 5880 за формулою [1, 4]:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{w}}} = \frac{2,2 + 1}{2} + \frac{2,2 - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12}{3,04}}} = 1,87.$$

Визначаємо коефіцієнт загасання основної хвилі цієї мікросмужкової лінії на частоті 10 ГГц при  $\text{tg } \delta = 9 \cdot 10^{-4}$ :

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{мсл}} &= \frac{\pi \cdot 10 \sqrt{2,2} (1,87 - 1) \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{300 \sqrt{1,87} (2,2 - 1)} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right] + \frac{0,026}{50 \cdot 2,39} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{мм}} \right] = \\ &= 0,074 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] + 0,218 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 0,292 \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right]. \end{aligned}$$

Виразимо коефіцієнт загасання у дБ/м:

$$\alpha_{\text{мсл}} \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot \alpha_{\text{мсл}} \left[ \frac{\text{Нп}}{\text{м}} \right] = 8,69 \cdot 0,292 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right] = 2,54 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right].$$

Таким чином, на частоті 10 ГГц коефіцієнт загасання мікросмужкової лінії передачі з характеристичним опором 50 Ом на підкладці з матеріалу Rogers Duroid 5880 товщиною 787 мкм менший за коефіцієнт загасання мікросмужкової лінії з характеристичним опором 50 Ом на підкладці з матеріалу FR-4 товщиною 1 мм на  $28,6 \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{м}} \right]$ .

## Задача 9. Прямокутний об'ємний резонатор

На рис. 10 показано прямокутний об'ємний резонатор і позначення його внутрішніх розмірів.

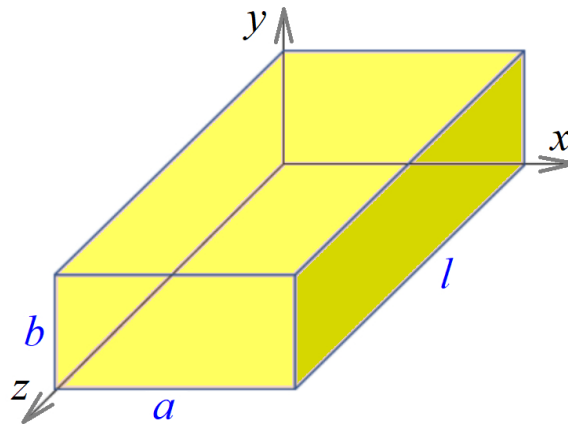


Рисунок 10 — Прямокутний об'ємний резонатор із позначенням розмірів.

Задано такий резонатор, який виготовлено із відрізка стандартного прямокутного хвилеводу WR-90 довжиною  $l = 30$  мм. Стінки резонатора виготовлено з латуні, а внутрішній об'єм заповнено повітрям.

Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

### Розв'язок

Згідно з додатком 3 визначаємо внутрішні поперечні розміри заданого стандартного прямокутного хвилеводу WR-90:  $a = 22,86$  мм;  $b = 10,16$  мм.

1) Оскільки  $b < a < l$  (де  $l = 30$  мм — довжина резонатора), то основним є коливання  $H_{101}$ .

2) Резонансну частоту основного коливання знаходимо за формулою [1]:

$$f_p^{H_{101}} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{l^2}} = \frac{300}{2} \sqrt{\frac{1}{(22,86)^2} + \frac{1}{(30)^2}} \text{ [ГГц]} = 8,25 \text{ [ГГц]}.$$

3) За додатком 1 знаходимо питому провідність латуні  $\sigma = 2,6 \cdot 10^7$  См/м. Глибину проникнення поля в стінки визначаємо за відомою формулою [1, 4]:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi f_p \mu_0 \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 8,25 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,6 \cdot 10^7}} \text{ [м]} = 1,09 \text{ [мкм]}.$$

4) Власна добротність для основного коливання  $H_{101}$  може бути розрахована за формулою [1, 4]:

$$Q_0^{H_{101}} = \frac{1}{d} \cdot \frac{abl(a^2 + l^2)}{al(a^2 + l^2) + 2b(a^3 + l^3)} =$$

$$= \frac{10^3}{1,09} \cdot \frac{22,86 \cdot 10,16 \cdot 30 \cdot ((22,86)^2 + (30)^2)}{22,86 \cdot 30 \cdot ((22,86)^2 + (30)^2) + 2 \cdot 10,16 \cdot ((22,86)^3 + (30)^3)} = 5162.$$

5) На рис. 11 показано частотну характеристику модуля коефіцієнта передачі об'ємного резонатора від елемента збудження до детектора.

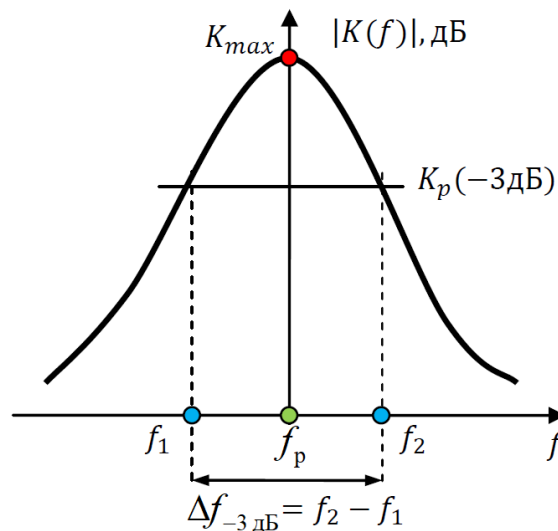


Рисунок 11 — Частотна характеристика модуля коефіцієнта передачі.

Абсолютну смугу пропускання резонатора знаходимо за формулою:

$$\Delta f_{-3 \text{ дБ}} = \frac{f_p^{H_{101}}}{Q_0^{H_{101}}} = \frac{8250 \text{ [МГц]}}{5162} = 1,6 \text{ [МГц]}.$$

## Задача 10. Круглий циліндричний об'ємний резонатор

На рис. 12 показано круглий циліндричний резонатор із його позначеними внутрішніми розмірами:  $d$  — діаметр,  $l$  — висота.

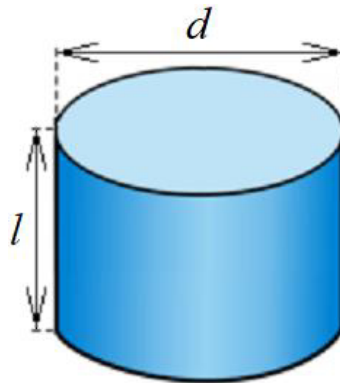


Рисунок 12 — Круглий циліндричний резонатор із позначенням розмірів.

Задано такий об'ємний резонатор діаметром  $d = 20$  мм і висотою 10 мм. Стінки резонатора виготовлено зі сталі, а внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

### Розв'язок

Знайдемо радіус резонатора:  $a = d / 2 = 10$  мм.

1) Оскільки висота резонатора  $l = 10$  мм  $< 20,3$  мм  $= 2,03 a$ , то основним є коливання  $E_{010}$ .

2) Резонансну частоту основного коливання знаходимо за формулою [1]:

$$f_p^{E_{010}} = \frac{v_{01} \cdot c}{2\pi a} = \frac{2,405 \cdot 300 \text{ [мм} \cdot \text{ГГц]}}{2\pi \cdot 10 \text{ [мм]}} = 11,5 \text{ [ГГц]}.$$

3) За додатком 1 знаходимо питому провідність сталі  $\sigma = 1,4 \cdot 10^6$  См/м. Глибину проникнення поля в стінки визначаємо за формулою [1]:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi f_p \mu_0 \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 11,5 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,4 \cdot 10^6}} [\text{м}] = 3,97 [\text{мкм}].$$

4) Власна добротність для основного коливання  $E_{010}$  може бути розрахована за формулою [1, 4]:

$$Q_0^{E_{010}} = \frac{1}{d} \cdot \frac{al}{a+l} = \frac{10^3}{3,97} \cdot \frac{10 \cdot 10}{10+10} = 1260.$$

5) Частотну характеристику модуля коефіцієнта передачі об'ємного резонатора було показано на рис. 11. Абсолютну смугу пропускання резонатора знаходимо за формулою:

$$\Delta f_{-3 \text{ дБ}} = \frac{f_p^{E_{010}}}{Q_0^{E_{010}}} = \frac{11500 [\text{МГц}]}{1260} = 9,1 [\text{МГц}].$$

Відносна смуга пропускання:  $\delta f_{-3 \text{ дБ}} = \frac{\Delta f_{-3 \text{ дБ}}}{f_p^{E_{010}}} \cdot 100\% = 0,08\%.$

## ВАРІАНТИ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

### Варіант 1

#### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,007$ . Частота хвилі  $f = 11$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $y$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

#### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 4 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,56$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,002$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 7 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

#### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 700 МГц падає під кутом  $\varphi = 75^\circ$  із повітря на площину із латуні. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 5 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

#### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 37^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-284, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 7 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 20 мм, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 17 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 9 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-6A/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 12 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers Duroid 5870 товщиною 127 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 11 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0012$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-284 довжиною 70 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 7 мм і висотою 3 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено тefлоном із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 2

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0001$ . Частота хвилі  $f = 100$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $u$  декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 2 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 4,5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 20 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 3 ГГц падає під кутом  $\varphi = 23^\circ$  із повітря на площину зі сталі. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 35 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із плексигласу в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 22^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-229, який виготовлено з латуні. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 10 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4,2 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4,2 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 8 мм, який виготовлено зі сталі. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 24 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 24 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 22 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-55B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 20 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers Duroid 5880 товщиною 254 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 2 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 9 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-229 довжиною 65 мм. Стінки резонатора виготовлено з хрому, а внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 32 мм і висотою 30 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 3

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,003$ . Частота хвилі  $f = 600$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою  $3,8$  ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,001$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює  $3$  мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м,  $100$  м,  $1000$  м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою  $11$  ГГц падає під кутом  $\varphi = 17^\circ$  із повітря на площину зі сталі. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду  $30$  мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із повітря в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 45^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-187, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 9 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 5,8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 5,8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 4 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 12 мм, який виготовлено з хрому. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 22 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 18 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 18 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-59B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 18 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 18 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers AD250 товщиною 508 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 17 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0013$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-187 довжиною 50 мм. Стінки резонатора виготовлено з алюмінію, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 50 мм і висотою 34 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 4

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 3,2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,002$ . Частота хвилі  $f = 900$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 11 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 4 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 4 ГГц падає під кутом  $\varphi = 24^\circ$  із повітря на площину з латуні. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 44 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 14^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-159, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 10 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 7 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 7 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 5 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 16 мм, який виготовлено із заліза. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 17 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-141A/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 20 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers AD255 товщиною 1016 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 17 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 0,0013$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-159 довжиною 40 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 40 мм і висотою 24 мм. Стінки резонатора виготовлено із алюмінію, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 5

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,001$ . Частота хвилі  $f = 2$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 30 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 5 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 500 МГц падає під кутом  $\varphi = 5^\circ$  із повітря на площину зі срібла. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 50 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із повітря в лід. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 55^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-137, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 6 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 50 мм, який виготовлено із міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 8 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 4 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-174/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц;

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers AD300D товщиною 762 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0021$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-137 довжиною 35 мм. Стінки резонатора виготовлено із латуні, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 50 мм і висотою 25 мм. Стінки резонатора виготовлено із хрому, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 6

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,002$ . Частота хвилі  $f = 4,2$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 6 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0002$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 16 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 600 МГц падає під кутом  $\varphi = 36^\circ$  із повітря на площину з титану. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 6 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 30^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-112, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 14 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8,5 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8,5 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 26 мм, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-178B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 50 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 50 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 50 ГГц;

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 50 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers AD350A товщиною 762 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 20 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0033$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-112 довжиною 30 мм. Стінки резонатора виготовлено зі сталі, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 60 мм і висотою 60 мм. Стінки резонатора виготовлено із міді, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 7

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,003$ . Частота хвилі  $f = 8$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 5,8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 7 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 700 МГц падає під кутом  $\varphi = 27^\circ$  із повітря на площину з алюмінію. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 30 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із поліетилену в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 20^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-75, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 18 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 10 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 70 мм, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 4,2 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 3,8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 3,8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3,4 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-179B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 6) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 7) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 47 ГГц;
- 8) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 9) довжину основної хвилі на частоті 47 ГГц;
- 10) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 47 ГГц;

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 60 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 6 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers AD450 товщиною 762 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 8 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 8 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0035$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-75 довжиною 19 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 37 мм і висотою 40 мм. Стінки резонатора виготовлено зі сталі, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 8

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0008$ . Частота хвилі  $f = 10$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 8 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 800 МГц падає під кутом  $\varphi = 18^\circ$  із повітря на площину з алюмінію. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 10 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із полістиролу в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 30^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-62, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 25 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 17 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 17 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 18 мм, який виготовлено з хрому. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 17 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 10 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-180B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц;

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 5 до 45 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 6 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3003 товщиною 250 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 11 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0010$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-62 довжиною 15 мм. Стінки резонатора виготовлено зі срібла, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 28 мм і висотою 30 мм. Стінки резонатора виготовлено зі сталі, а внутрішній об'єм заповнено плексигласом із  $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 9

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 3,2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0019$ . Частота хвилі  $f = 900$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 9 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 9 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 9 ГГц падає під кутом  $\varphi = 29^\circ$  із повітря на площину з алюмінію. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 3 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в лід. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 19^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-51, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 20 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 9 мм, який виготовлено зі срібла. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 22 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 22 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-187/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 50 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 50 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 50 ГГц;

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 70 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 7 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3035 товщиною 510 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 5) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 6) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 7) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 8) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0015$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-51 довжиною 10 мм. Стінки резонатора виготовлено зі срібла, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 90 мм і висотою 50 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено тефлоном із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 10

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Частота хвилі  $f = 10$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 10 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 500 МГц падає під кутом  $\varphi = 10^\circ$  із повітря на площину зі срібла. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 5 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із плексигласу в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 40^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-42, який виготовлено зі срібла. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 33 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 21 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 21 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 10 мм, який виготовлено зі сталі. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 32 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 20 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-100A із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 50 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3006 товщиною 250 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 18 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 2 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,002$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-42 довжиною 10 мм. Стінки резонатора виготовлено із золота, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 10 мм і висотою 8 мм. Стінки резонатора виготовлено з платини, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 11

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Частота хвилі  $f = 110$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 11 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 8 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 800 МГц падає під кутом  $\varphi = 11^\circ$  із повітря на площину з хрому. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 2 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із плексигласу в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 24^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-34, який виготовлено з платини. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 45 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 21 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 23 мм, який виготовлено із заліза. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8,5 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8,5 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 8 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-195 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 50 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3010 товщиною 640 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 5 до 40 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 0,0022$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-34 довжиною 8 мм. Стінки резонатора виготовлено із платини, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 22 мм і висотою 23 мм. Стінки резонатора виготовлено з алюмінію, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 12

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 3,2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0006$ . Частота хвилі  $f = 300$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 21 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0005$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 12 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 2 ГГц падає під кутом  $\varphi = 45^\circ$  із повітря на площину з хрому. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 10 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із льоду в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 32^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-28, який виготовлено зі срібла. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 60 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 37 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 37 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 27 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 120 мм, який виготовлено із алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 4 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 1,8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 1,8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 1,7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-240 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 35 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 35 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 35 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 2 до 50 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO4003C товщиною 203 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 40 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 40 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 2 до 60 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 0,0027$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-28 довжиною 8 мм. Стінки резонатора виготовлено із золота, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 32 мм і висотою 30 мм. Стінки резонатора виготовлено із цинку, а внутрішній об'єм заповнено тefлоном із  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 13

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Частота хвилі  $f = 1,1$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 80 МГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 4 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 17 ГГц падає під кутом  $\varphi = 15^\circ$  із повітря на площину з титану. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 50 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із поліетилену в тефлон. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 60^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-22, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 80 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 40 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 40 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 35 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 30 мм, який виготовлено із титану. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-400 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 13 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 13 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 13 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO4350B товщиною 100 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 20 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 40 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0037$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-22 довжиною 6 мм. Стінки резонатора виготовлено із платини, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 40 мм і висотою 50 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 14

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,002$ . Частота хвилі  $f = 2$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 1 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 22 ГГц падає під кутом  $\varphi = 27^\circ$  із повітря на площину зі сталі. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 4 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 35^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-19, який виготовлено з хрому. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 100 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 50 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 50 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 40 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 14 мм, який виготовлено із заліза. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 18 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 13 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 13 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 13 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-600 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 8,5 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 8,5 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 8,5 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії із кремнію товщиною 400 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 11 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,015$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-19 довжиною 5 мм. Стінки резонатора виготовлено із золота, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 14 мм і висотою 20 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 15

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0015$ . Частота хвилі  $f = 1800$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 2,5 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0005$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 7 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 17 ГГц падає під кутом  $\varphi = 15^\circ$  із повітря на площину із хрому. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 1 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із повітря в лід. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 50^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-15, який виготовлено зі сталі. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 100 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 60 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 60 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 55 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 50 мм, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 4 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3,6 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-6A/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 11 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 11 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers Duroid 5870 товщиною 254 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0012$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-284 довжиною 80 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 8 мм і висотою 9 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено тefлоном із  $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 16

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0001$ . Частота хвилі  $f = 600$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $u$  декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 2 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,006$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 16 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 4 ГГц падає під кутом  $\varphi = 20^\circ$  із повітря на площину зі сталі. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 5 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із плексигласу в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 20^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-229, який виготовлено з латуні. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 10 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4,2 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4,2 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 8 мм, який виготовлено зі сталі. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 24 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 24 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 22 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-55B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 22 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 22 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 22 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers Duroid 5880 товщиною 508 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії передачі:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 9 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-229 довжиною 70 мм. Стінки резонатора виготовлено з хрому, а внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 30 мм і висотою 34 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 17

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,003$ . Частота хвилі  $f = 700$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $u$  декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 3,9 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,001$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 3 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 11 ГГц падає під кутом  $\varphi = 17^\circ$  із повітря на площину зі сталі. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 30 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із повітря в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 45^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-187, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 9 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 5,8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 5,8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 4 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 12 мм, який виготовлено з хрому. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 22 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 18 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 18 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-59B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 18 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 18 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers AD250 товщиною 762 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії передачі:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 17 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0013$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-187 довжиною 70 мм. Стінки резонатора виготовлено з алюмінію, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 50 мм і висотою 34 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 18

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 3,2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,002$ . Частота хвилі  $f = 800$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 11 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 4 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 4 ГГц падає під кутом  $\varphi = 24^\circ$  із повітря на площину з латуні. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 44 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 14^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-159, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 7) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 10 ГГц;
- 3) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 7 ГГц;
- 4) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 7 ГГц;
- 5) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 5 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 16 мм, який виготовлено із заліза. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 17 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-141A/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 20 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers AD255 товщиною 1524 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії передачі:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 17 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0013$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-159 довжиною 40 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 6) основний тип електромагнітного коливання;
- 7) власну резонансну частоту основного коливання;
- 8) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 9) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 10) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 40 мм і висотою 24 мм. Стінки резонатора виготовлено із алюмінію, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 6) основний тип електромагнітного коливання;
- 7) власну резонансну частоту основного коливання;
- 8) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 9) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 10) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 19

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,001$ . Частота хвилі  $f = 2$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 30 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 5 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 500 МГц падає під кутом  $\varphi = 5^\circ$  із повітря на площину зі срібла. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 50 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із повітря в лід. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 55^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-137, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 6 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 50 мм, який виготовлено із міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 8 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 4 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-174/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers AD300D товщиною 1524 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0021$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-137 довжиною 35 мм. Стінки резонатора виготовлено із латуні, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 50 мм і висотою 25 мм. Стінки резонатора виготовлено із хрому, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 20

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,002$ . Частота хвилі  $f = 4,2$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $u$  декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 6 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0002$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 16 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 600 МГц падає під кутом  $\varphi = 36^\circ$  із повітря на площину з титану. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 6 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 35^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-112, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 14 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8,5 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8,5 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 26 мм, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-178B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 50 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 50 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 50 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 50 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 9 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers AD350A товщиною 1524 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 20 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0033$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-112 довжиною 30 мм. Стінки резонатора виготовлено зі сталі, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 60 мм і висотою 60 мм. Стінки резонатора виготовлено із міді, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 21

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,003$ . Частота хвилі  $f = 8$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 5,8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 7 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 700 МГц падає під кутом  $\varphi = 27^\circ$  із повітря на площину з алюмінію. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 30 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із поліетилену в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 25^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-75, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 18 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 10 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 70 мм, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 4,2 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 3,8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 3,8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3,4 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-179B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 47 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 47 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 47 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 60 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 6 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers AD450 товщиною 762 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 8 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 8 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0035$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-75 довжиною 19 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 6) основний тип електромагнітного коливання;
- 7) власну резонансну частоту основного коливання;
- 8) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 9) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 10) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 37 мм і висотою 40 мм. Стінки резонатора виготовлено зі сталі, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 6) основний тип електромагнітного коливання;
- 7) власну резонансну частоту основного коливання;
- 8) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 9) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 10) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 22

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0008$ . Частота хвилі  $f = 10$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 8 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 800 МГц падає під кутом  $\varphi = 18^\circ$  із повітря на площину з алюмінію. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 10 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із полістиролу в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 48^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-62, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 25 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 17 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 17 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 18 мм, який виготовлено з хрому. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 17 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 12 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 12 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 10 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-180B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 5 до 45 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3003 товщиною 130 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 11 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0010$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-62 довжиною 15 мм. Стінки резонатора виготовлено зі срібла, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 28 мм і висотою 30 мм. Стінки резонатора виготовлено зі сталі, а внутрішній об'єм заповнено плексигласом із  $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 23

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 3,2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0019$ . Частота хвилі  $f = 900$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 9 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 9 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 9 ГГц падає під кутом  $\varphi = 29^\circ$  із повітря на площину з алюмінію. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 3 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в лід. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 19^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-51, який виготовлено з алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 20 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 17 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 9 мм, який виготовлено зі срібла. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 22 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 22 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-187/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 50 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 50 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 50 ГГц;

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 70 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 8 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3035 товщиною 510 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0015$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-51 довжиною 10 мм. Стінки резонатора виготовлено зі срібла, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 90 мм і висотою 50 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено тefлоном із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 24

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Частота хвилі  $f = 10$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $u$  декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 10 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 500 МГц падає під кутом  $\varphi = 10^\circ$  із повітря на площину зі срібла. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 5 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із плексигласу в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 70^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-42, який виготовлено зі срібла. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 33 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 21 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 21 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 10 мм, який виготовлено зі сталі. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 32 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 20 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 20 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-100A із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 10 до 50 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3006 товщиною 640 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 18 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 18 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 2 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,002$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-42 довжиною 10 мм. Стінки резонатора виготовлено із золота, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 10 мм і висотою 8 мм. Стінки резонатора виготовлено з платини, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 25

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Частота хвилі  $f = 110$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 11 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 8 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 800 МГц падає під кутом  $\varphi = 11^\circ$  із повітря на площину з хрому. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 2 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із плексигласу в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 24^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-34, який виготовлено з платини. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 45 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 21 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 23 мм, який виготовлено із заліза. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8,5 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8,5 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 8 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-195 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 50 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO3010 товщиною 1280 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 30 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 30 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 5 до 40 ГГц, якщо  $\text{tg } \delta = 0,0022$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-34 довжиною 8 мм. Стінки резонатора виготовлено із платини, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 22 мм і висотою 23 мм. Стінки резонатора виготовлено з алюмінію, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 26

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 3,2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0006$ . Частота хвилі  $f = 600$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 21 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,05$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0005$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 12 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 2 ГГц падає під кутом  $\varphi = 45^\circ$  із повітря на площину з хрому. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 10 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із льоду в повітря. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 32^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-28, який виготовлено зі срібла. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 60 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 37 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 37 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 27 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 120 мм, який виготовлено із алюмінію. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 4 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 1,8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 1,8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 1,7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-240 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 35 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 35 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 35 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 2 до 50 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 6 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO4003C товщиною 406 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 40 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 40 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 2 до 60 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0027$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-28 довжиною 8 мм. Стінки резонатора виготовлено із золота, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 32 мм і висотою 30 мм. Стінки резонатора виготовлено із цинку, а внутрішній об'єм заповнено тefлоном із  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 27

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0003$ . Частота хвилі  $f = 1,7$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 80 МГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 4 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 17 ГГц падає під кутом  $\varphi = 15^\circ$  із повітря на площину з титану. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 50 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із поліетилену в тефлон. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 60^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-22, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 80 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 40 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 40 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 35 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 30 мм, який виготовлено із титану. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 12 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 8 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 8 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 7 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-400 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 13 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 13 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 13 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії з матеріалу Rogers RO4350B товщиною 170 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 20 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 20 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 40 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0037$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-22 довжиною 6 мм. Стінки резонатора виготовлено із платини, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 40 мм і висотою 50 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а внутрішній об'єм заповнено полістиролом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 28

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,002$ . Частота хвилі  $f = 8$  ГГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 8 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0004$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 1 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 22 ГГц падає під кутом  $\varphi = 27^\circ$  із повітря на площину зі сталі. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 4 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із тефлону в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 35^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-19, який виготовлено з хрому. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 100 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 50 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 50 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 40 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 14 мм, який виготовлено із заліза. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 18 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 13 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 13 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 13 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель LMR-600 із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) відносну діелектричну проникність спіненого поліетилену кабелю;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 8,5 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі на частоті 8,5 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 8,5 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії із кремнію товщиною 500 мкм із мідною металізацією. Визначити параметри лінії:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 11 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 20 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,01$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-19 довжиною 5 мм. Стінки резонатора виготовлено із золота, а його внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 14 мм і висотою 20 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 29

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0015$ . Частота хвилі  $f = 900$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 2,5 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\varepsilon = 2,55$ ,  $\mu = 1$ ,  $\operatorname{tg}\delta = 0,0005$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 7 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 17 ГГц падає під кутом  $\varphi = 15^\circ$  із повітря на площину із хрому. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 1 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із повітря в лід. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 50^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-15, який виготовлено зі сталі. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 100 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 60 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 60 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 55 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 50 мм, який виготовлено з міді. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 4 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3,6 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-6A/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 11 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 11 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 11 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers Duroid 5870 товщиною 1575 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії передачі:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 0,0012$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-284 довжиною 80 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 8 мм і висотою 9 мм. Стінки резонатора виготовлено з міді, а внутрішній об'єм заповнено тefлоном із  $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## Варіант 30

### Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 2,25$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0001$ . Частота хвилі  $f = 300$  МГц. Визначити коефіцієнт фази, коефіцієнт згасання, фазову швидкість, довжину хвилі, хвильовий опір середовища. Зобразити структуру компонент електромагнітного поля у фіксований момент часу, якщо електричне поле  $\vec{E}$  спрямоване вздовж осі  $z$  у декартової системи координат, а хвиля поширюється в напрямку осі  $z$ .

### Задача 2

Плоска однорідна електромагнітна хвиля з частотою 3 ГГц поширюється вздовж осі  $z$  в однорідному ізотропному середовищі з відносними параметрами  $\epsilon = 4$ ,  $\mu = 1$ ,  $\text{tg}\delta = 0,006$ . Амплітуда електричного поля в площині  $z = 0$  дорівнює 16 мВ/м. Визначити амплітуду електричного поля та середню густину потоку потужності електромагнітної хвилі на площинах  $z = 10$  м, 100 м, 1000 м.

### Задача 3

Плоска електромагнітна хвиля з частотою 4 ГГц падає під кутом  $\varphi = 20^\circ$  із повітря на площину зі сталі. Знайти амплітуду напруженості електричного поля на поверхні металу, якщо вектор магнітного поля падаючої хвилі лежить у площині падіння і має амплітуду 5 мА/м. Зобразити структуру результуючого електромагнітного поля над поверхнею провідника.

### Задача 4

Плоска електромагнітна хвиля з коловою поляризацією падає із плексигласу в поліетилен. Визначити поляризацію відбитої та заломленої електромагнітних хвиль для кута падіння  $\varphi = 20^\circ$ .

### Задача 5

Задано заповнений повітрям стандартний прямокутний хвилевід WR-229, який виготовлено з латуні. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 10 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 4,2 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 4,2 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 3 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах робочого діапазону. Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі прямокутного хвилеводу.

### Задача 6

Задано заповнений повітрям круглий хвилевід діаметром 8 мм, який виготовлено зі сталі. Визначити такі параметри хвилеводу:

- 1) критичну довжину основної хвилі  $\lambda_{кр}$ ;
- 2) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 3) типи хвиль, які можуть поширюватися у хвилеводі на частоті 30 ГГц;
- 4) довжину основної хвилі у хвилеводі  $\lambda_{хв}$  на частоті 24 ГГц;
- 5) фазову, групову швидкості і характеристичний опір для основної хвилі на частоті 24 ГГц;
- 6) потужність пробиття при поширенні основної хвилі на частоті 22 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах смуги частот однохвильового режиму роботи. Зобразити силові лінії електричного і магнітного полів основної хвилі круглого хвилеводу.

### Задача 7

Задано стандартний кабель RG-55B/U із мідними провідниками. Визначити такі параметри кабелю:

- 1) смугу частот однохвильового режиму роботи;
- 2) погонні ємність, індуктивність та опір на частоті 22 ГГц;
- 3) характеристичний опір (знайти і порівняти з номінальним значенням);
- 4) довжину основної хвилі на частоті 22 ГГц;
- 5) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 22 ГГц.

Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 30 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі коаксіального кабелю.

### Задача 8

Задано підкладку мікросмужкової лінії передачі з матеріалу Rogers Duroid 5880 товщиною 787 мкм із мідною металізацією. Визначити такі параметри лінії передачі:

- 1) ширину смужки  $w$ , при якій характеристичний опір дорівнює 50 Ом;
- 2) ефективну діелектричну проникність лінії із хвильовим опором 50 Ом;
- 3) довжину основної хвилі на частоті 12 ГГц для лінії із опором 50 Ом;
- 4) фазову та групову швидкості для основної хвилі на частоті 12 ГГц.

Побудувати графік ширини смужки  $w$  від характеристичного опору  $Z_x$  в межах від 10 до 200 Ом. Побудувати графік коефіцієнта загасання основної хвилі (в дБ/м) від частоти в межах від 1 до 25 ГГц, якщо  $\operatorname{tg} \delta = 9 \cdot 10^{-4}$ . Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основної хвилі мікросмужкової лінії передачі.

### Задача 9

Задано прямокутний об'ємний резонатор із відрізка стандартного хвилеводу WR-229 довжиною 70 мм. Стінки резонатора виготовлено з хрому, а внутрішній об'єм заповнено повітрям. Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

### Задача 10

Задано круглий циліндричний об'ємний резонатор діаметром 30 мм і висотою 34 мм. Стінки резонатора виготовлено із заліза, а внутрішній об'єм заповнено поліетиленом із  $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$ . Визначити параметри резонатора:

- 1) основний тип електромагнітного коливання;
- 2) власну резонансну частоту основного коливання;
- 3) глибину проникнення поля в стінки при резонансі;
- 4) власну добротність резонатора для основного коливання;
- 5) абсолютну та відносну смугу пропускання за рівнем  $-3$  дБ.

Зобразити силові лінії електричного та магнітного полів основного коливання резонатора.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Конспект лекцій: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки», «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / С. І. Пільтяй; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 171 с.
2. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1. Основи теорії електромагнітного поля: Підручник для студентів ВНЗ / За заг. ред. В. М. Шокало та В. І. Правди. — Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2009. — 286 с.
3. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль: Підручник для студентів ВНЗ / За заг. ред. В. М. Шокало та В. І. Правди. — Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2010. — 435 с.
4. D. M. Pozar. Microwave Engineering. — New Jersey: Wiley Press, 2012. — 732 p.
5. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Збірник задач: навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. І. Пільтяй; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 88 с.
6. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Практикум: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. І. Пільтяй; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 54 с.
7. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Лабораторний практикум: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки», «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / О. М. Купрій, С. І. Пільтяй, В. І. Найденко; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 93 с.
8. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Методичні вказівки та завдання розрахунково-графічної роботи: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / О. М. Купрій, В. І. Найденко; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 25 с.
9. Прикладна електродинаміка інформаційних систем / А. С. Андрушак, З. Ю. Готра, О. С. Кушнір. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. — 304 с.
10. Захарія Й. А. Методи прикладної електродинаміки. — Львів: «Бескид Біт», 2003. — 352 с.
11. Технічна електродинаміка. Конспект лекцій / Укл. В.В. Пілінський, П.В. Попович. — К.: Національний Технічний Університет України “КПІ”, 2006. — 224 с.

**ДОДАТКИ****Додаток 1. Питомі провідності металів**

Метал	Питома провідність $\sigma$ , См/м
Срібло	$6,3 \cdot 10^7$
Мідь	$5,8 \cdot 10^7$
Золото	$4,1 \cdot 10^7$
Хром	$3,8 \cdot 10^7$
Алюміній	$3,8 \cdot 10^7$
Латунь	$2,6 \cdot 10^7$
Вольфрам	$1,8 \cdot 10^7$
Цинк	$1,7 \cdot 10^7$
Кобальт	$1,6 \cdot 10^7$
Нікель	$1,4 \cdot 10^7$
Залізо	$1,0 \cdot 10^7$
Платина	$9,5 \cdot 10^6$
Олово	$9,2 \cdot 10^6$
Свинець	$4,6 \cdot 10^6$
Титан	$2,4 \cdot 10^6$
Сталь	$1,4 \cdot 10^6$

**Додаток 2. Відносні діелектричні проникності речовин**

Речовина/матеріал	Відносна діелектрична проникність $\epsilon$
Тефлон	2,05
Парафін	2,24
Поліетилен	2,25
Полістирол	2,55
Плексиглас	2,6
Лід	3,2
Пластик PLA	3,5
Rogers Duroid 5870	2,33
Rogers Duroid 5880	2,2
Rogers AD250	2,5
Rogers AD255	2,6
Rogers AD300D	2,94
Rogers AD350A	3,5
Rogers AD450	4,5
Rogers RO3003	3,0
Rogers RO3035	3,5
Rogers RO3006	6,5
Rogers RO3010	11,2
Rogers RO4003C	3,55
Rogers RO4350B	3,66
Плавлений кварц	3,78
Склотекстоліт FR-4	4,5
Скло	4–5
Кремній (силікон)	11,8
Арсенід галію	13,0

**Додаток 3. Стандартні прямокутні хвилеводи**

Назва хвилеводу	Робочий діапазон частот, ГГц	Внутрішні розміри, мм
WR-284	2,60 – 3,95	72,14 × 34,04
WR-229	3,22 – 4,90	58,17 × 29,08
WR-187	3,94 – 5,99	47,55 × 22,15
WR-159	4,64 – 7,05	40,39 × 20,19
WR-137	5,38 – 8,18	34,85 × 15,80
WR-112	6,58 – 10,0	28,45 × 12,62
WR-90	8,20 – 12,5	22,86 × 10,16
WR-75	9,84 – 15,0	19,05 × 9,53
WR-62	11,9 – 18,0	15,80 × 7,90
WR-51	14,5 – 22,0	12,95 × 6,48
WR-42	17,6 – 26,7	10,67 × 4,32
WR-34	21,7 – 33,0	8,64 × 4,32
WR-28	26,4 – 40,1	7,11 × 3,56
WR-22	33,0 – 50,1	5,69 × 2,85
WR-19	39,3 – 59,7	4,78 × 2,39
WR-15	49,9 – 75,8	3,76 × 1,88
WR-12	60,5 – 92,0	3,10 × 1,55

**Додаток 4. Корені функцій Бесселя порядку  $n$  та їх похідних**

$n$	$v_{n1}$	$v_{n2}$	$v_{n3}$	$\mu_{n1}$	$\mu_{n2}$	$\mu_{n3}$
0	2,405	5,520	8,654	3,832	7,016	10,173
1	3,832	7,016	10,173	1,841	5,331	8,536
2	5,136	8,417	11,620	3,054	6,706	9,970
3	6,380	9,761	13,015	4,201	8,015	11,346

**Додаток 5. Стандартні коаксіальні кабелі**

Назва	Характеристичний опір, Ом	Матеріал діелектрика	Діаметр внутрішнього провідника, мм	Діаметр діелектрика, мм
RG-6A/U	75	поліетилен	0,72	4,7
RG-8A/U	50	поліетилен	2,17	7,24
RG-9B/U	50	поліетилен	2,17	7,11
RG-55B/U	50	поліетилен	0,81	2,95
RG-58B/U	50	поліетилен	0,81	2,95
RG-59B/U	75	поліетилен	0,58	3,7
RG-141A/U	50	тефлон	0,99	2,95
RG-142A/U	50	тефлон	0,99	2,95
RG-174/U	50	поліетилен	0,48	1,52
RG-178B/U	50	тефлон	0,31	0,86
RG-179B/U	75	тефлон	0,31	1,6
RG-180B/U	95	тефлон	0,31	2,6
RG-187/U	75	тефлон	0,31	1,52
RG-188/U	50	тефлон	0,51	1,52
RG-195/U	95	тефлон	0,31	2,6
RG-213/U	50	поліетилен	2,26	7,24
RG-214/U	50	поліетилен	2,26	7,24
RG-223/U	50	поліетилен	0,89	2,95
RG-316/U	50	тефлон	0,51	1,52
RG-401/U	50	тефлон	1,64	5,46
RG-402/U	50	тефлон	0,91	3,0
RG-405/U	50	тефлон	0,51	1,68
LMR-100A	50	поліетилен	0,46	1,52
LMR-195	50	спінений поліетилен	0,94	2,79
LMR-240	50	спінений поліетилен	1,42	3,81
LMR-400	50	спінений поліетилен	2,74	7,24
LMR-600	50	спінений поліетилен	4,47	11,56