

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний Авіаційний Університет

## **ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА**

Методичні рекомендації до виконання контрольної роботи  
для студентів спеціальності 6.092400  
“Телекомунікаційні системи та мережі”  
Інституту заочного та дистанційного навчання

**Київ 2007**

УДК 537.8 (075.8)  
ББК В 313р  
Т383

Укладачі: В.О. Іванов, Є.І. Габрусенко  
Рецензент: А.Г. Тараненко

Затверджено методично-редакційною радою Національного авіаційного університету (протокол № 6 від 21 червня 2007 р).

Технічна електродинаміка: Методичні рекомендації до виконання контрольної роботи для студентів інституту заочного та дистанційного навчання / Укладачі: В.О. Іванов, Є.І. Габрусенко. – К.: НАУ, 2007. - 24 с.

Містять методичні рекомендації до виконання контрольної роботи, вихідні дані для розв'язування задач, список літератури.

Для студентів заочної форми навчання напряму 0924 «Телекомунікації» спеціальності 6.092400 «Телекомунікаційні системи та мережі». Може бути використано також студентами денної форми навчання напряму 0924 «Телекомунікації».

УДК 537.8 (075.8)  
ББК В 313р

© В.О.Іванов, Є.І.Габрусенко, 2007

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Технічна електродинаміка» для студентів спеціальності 6.092400 «Телекомунікаційні системи та мережі» викладається протягом одного семестру, та містить такі розділи:

- основи теорії електромагнітного поля;
- пристрої надвисоких частот;
- антенні пристрої;
- поширення радіохвиль.

Засвоїти основні знання та навички із зазначених питань у вказаний термін неможливо без відповідних методичних рекомендацій, які узгоджені з робочою навчальною програмою.

Матеріал даних методичних рекомендацій охоплює основні питання стосовно створення статичних полів, випромінювання радіохвиль, їхнього поширення в конкретному середовищі або спрямовуючій системі, а також приймання відповідними засобами.

Користування методичними рекомендаціями з дисципліни «Технічна електродинаміка», разом з іншими виданнями електродинамічного циклу, дасть можливість отримати первісні знання та практичні навички для вирішення питань, що можуть виникати у професійній діяльності фахівців радіотехнічного або телекомунікаційного профілю.

## ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Методичні рекомендації до виконання контрольної роботи з дисципліни „Технічна електродинаміка” складені відповідно до навчальної програми, затвердженої для спеціальності 6.092400 “Телекомунікаційні системи та мережі”. Основні питання програми зосереджені у табл.1.

Таблиця 1

№ пор.	Назва теми	Обсяг навчальних занять, год.	
		Лекції	Самост. роб.
1.	Застосування електромагнітних полів штучного походження як носіїв інформації в сучасних системах телекомунікації та управління технічними об'єктами. Основні характеристики електричних та магнітних полів – вектори напруженості поля і індукції. Сутність прямої та оберненої задач електродинаміки.	1	2
2	Теоретичні основи електромагнітних полів. Обґрунтування системи основних рівнянь електродинаміки – рівнянь Максвелла. Фізичний зміст рівнянь.	1	6
3	Форми математичного надання рівнянь Максвелла. Рівняння Максвелла в комплексних амплітудах.	-	2
4	Закон збереження енергії електромагнітного поля. Густина потоку енергії. Теорема Умова - Пойнтинга.	-	3
5	Граничні умови на поверхні розділу двох середовищ: діелектрик – діелектрик, діелектрик – провідник. Поверхневий ефект в провідниках.	1	4

№ пор.	Назва теми	Обсяг навчальних занять, год.	
		Лекції	Самост. роб.
6	Типи електромагнітних полів та їх ознаки: поперечні (поля типу Т), поздовжно-електричні (поля типу Е), поздовжно-магнітні (поля типу Н). Однорідні та неоднорідні поля. Види поляризації однорідних поперечних хвиль.	-	3
7	Хвильові рівняння та фізичний зміст їх розв'язань. Пряма та обернена хвиля. Коефіцієнти загасання та фази. Швидкість поширення, довжина хвилі, хвильовий опір.	-	3
8	Електромагнітні поля в фідерних лініях. Конструктивні особливості хвилеводів прямокутного та круглого перерізу. Коаксіальні та смужкові лінії передачі. Умови узгодження ліній з навантаженням.	1	6
9	Елементи фідерних трактів. Розніми та переходи. Обертові зчленування. Фазообертачі. Атенюатори. Трійники та мостові з'єднання. Напрявлені відгалужувачі.	-	3
10	Елементарні збуджувачі радіохвиль. Електричний вібратор – диполь Герца. Структура поля. Основні характеристики.	1	5
11.	Магнітний вібратор – електрична рамка. Структура поля. Основні характеристики. Щілинний вібратор. Елемент Гюйгенса.	-	2
12	Види вібраторних антен, їх характеристики, умови і особливості застосування.	-	3
13	Рупорні, дзеркальні, лінзові антени. Характеристики та особливості застосування.	1	6
14	Антенні решітки. Множник решітки. Особливості конструкцій. Особливості застосування.	-	3

№ пор.	Назва теми	Обсяг навчальних занять, год.	
		Лекції	Самост. роб.
15	Атмосфера Землі як середовище поширення радіохвиль. Будова атмосфери. Зони Френеля. Формула ідеального радіопередавання.	1	4
16	Вплив земної поверхні на умови поширення радіохвиль. Множник загасання і його особливості.	-	3
17	Особливості поширення радіохвиль в залежності від їх частотного діапазону.	1	4

Для розв'язання студентам пропонується чотири задачі, які відповідають умовному розподілу навчальної дисципліни на такі підрозділи:

- теорія електромагнітного поля,
- лінії передавання у діапазоні надвисоких частот,
- антенні пристрої,
- поширення радіохвиль.

До задач надаються методичні рекомендації з їх розв'язання, а також посилання на відомі літературні джерела.

Студенту необхідно розв'язати по одному варіанту з десятих наведених для кожної задачі.

Остання цифра номера залікової книжки визначає вихідні дані, що необхідні для розв'язування конкретної задачі, а передостання цифра вказує на варіант задачі. Якщо цифра парна, то розв'язується варіант **А**, якщо непарна - варіант **Б**. Розв'язок кожної задачі повинен супроводжуватись пояснювальними та графічними матеріалами згідно з завданням.

# КОНТРОЛЬНА РОБОТА

## Задача 1

Плоска однорідна електромагнітна хвиля поширюється у безмежному середовищі уздовж осі  $Z$ . Відомі: амплітуда напруженості електричного поля  $E$ , частота хвилі  $f$ , питома провідність середовища  $g$ , його абсолютна діелектрична проникність  $\epsilon$  та магнітна проникність  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м.

На основі даних табл.2 виконати таке:

1. Загальні рівняння Максвелла, надані у диференційній формі, перетворити і записати для однорідної плоскої горизонтально поляризованої (варіант А) або вертикально поляризованої (варіант Б); хвилі, враховуючи, що електричні заряди у середовищі відсутні.

2. Отримані співвідношення перетворити у відповідні хвильові рівняння.

3. Записати формальні рішення отриманих хвильових рівнянь відносно існуючих взаємопов'язаних складових векторів напруженості електричного і магнітного полів для режиму біжучих хвиль.

4. У цих рішеннях на основі даних табл.2:

- визначити коефіцієнт фази  $\beta$  і коефіцієнт загасання  $\alpha$  хвилі, що поширюється;

- знайти модуль  $W$  і фазу  $\phi$  комплексного хвильового опору  $\dot{W}$  середовища поширення електромагнітного поля.

5. Перерахувати знайдений фазовий зсув  $\phi$  між електричним і магнітним полями в їх відповідний просторовий зсув  $\Delta z$  уздовж напрямку поширення хвилі.

6. Визначити середнє значення вектора Умова-Пойнтінга.

7. Обчислити значення фазової швидкості  $V_\phi$  хвилі.

8. Знайти довжину хвилі  $\lambda$  в даному середовищі.

9. Використовуючи результати розрахунків, зобразити у вигляді епюр миттєві значення напруженостей електричного і магнітного полів у момент часу  $t = 0$  протягом двох - трьох довжин хвиль для

випадків горизонтальної поляризації (варіант А) і вертикальної поляризації (варіант Б);

10. Визначити відстань  $z_0$ , на якій амплітуда хвилі зменшується в 1000 разів.

Таблиця 2

Вихідні дані	$\epsilon$ , Ф/м	$g$ , См/м		$f$ , Гц	$E_m$ , В/м
		Варіант А	Варіант Б		
0	$100 \epsilon_0$	5,0	0,25	$10^8$	50
1	$90 \epsilon_0$	2,0	0,3	$10^8$	60
2	$80 \epsilon_0$	4,0	0,4	$10^9$	70
3	$70 \epsilon_0$	6,0	0,5	$10^9$	80
4	$60 \epsilon_0$	30,0	0,2	$10^{10}$	30
5	$50 \epsilon_0$	15,0	0,15	$10^{10}$	100
6	$40 \epsilon_0$	10,0	0,05	$10^9$	120
7	$30 \epsilon_0$	1,0	0,5	$10^9$	140
8	$20 \epsilon_0$	0,5	0,1	$10^8$	160
9	$10 \epsilon_0$	0,05	0,2	$10^8$	180

*Примітка:*  $\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність повітря.

### **Методичні рекомендації до розв'язування задачі**

При виконанні першого пункту диференційні рівняння Максвела доцільно подати у комплексних амплітудах. Спростити рівняння, застосуючи відомі ознаки плоскої хвилі (продольні складові векторів напруженості поля дорівнюють нулю), однорідної хвилі (похідні поперечних складових у поперечних напрямках



дорівнюють нулю), ознаки горизонтальної або вертикальної поляризації.

При виконанні другого та третього пунктів перетворити методом підставлення отриману систему рівнянь у відповідну пару хвильових рівнянь. Записуючи їх формальні рішення, надати тільки перші складові, які визначають пряму хвилю.

У подальшому необхідно розрахувати кількісні показники, що надходять у формальні рішення спрощених хвильових рівнянь. При цьому слід мати на увазі, що у напівпровідному середовищі:

- коефіцієнт загасання хвилі

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \mu}{2} \left[ \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right]},$$

де  $\operatorname{tg} \delta = g / \omega \varepsilon$  - тангенс кута діелектричних втрат у середовищі, а

$\omega = 2\pi f$  - кругова частота хвилі;

- коефіцієнт фази хвилі

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \mu}{2} \left[ \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1 \right]};$$

- модуль комплексного хвильового опору

$$W = \frac{\omega \mu}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}},$$

а його фаза

$$\varphi = \arctg \frac{\alpha}{\beta}.$$

Довжина хвилі у середовищі поширення  $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ , а фазова

швидкість  $V_\varphi = \frac{\omega}{\beta}$ .

Комплексна амплітуда вектора напруженості магнітного поля визначається відношенням комплексної амплітуди вектора напруженості електричного поля до комплексного хвильового опору.

Середнє значення вектора Умова-Пойнтінга дорівнює половині добутку комплексної амплітуди вектора напруженості електричного поля і комплексно-спряженої амплітуди вектора напруженості магнітного поля.

Просторовий зсув  $\Delta z$  між максимумами напруженості електричного і магнітного полів визначається відношенням фази  $\varphi$  хвильового опору до коефіцієнта фази  $\beta$ .

Література: [1, с. 11-19]; [6, с. 18-36, 70-72, 150-187].

## Задача 2

Прямокутний хвилевід з розмірами поперечного перерізу  $a \times b$  виконаний з ідеально провідного матеріалу. На основі даних табл.3 виконати таке:

1. Зобразити епюри розподілу проекцій векторів  $\vec{E}$  та  $\vec{H}$  хвилі заданого типу уздовж відповідних поперечних розмірів хвилеводу.

2. Побудувати в аксонометрії просторову сукупність силових ліній векторів напруженості електричного і магнітного полів.

3. Зобразити ескіз, що ілюструє розподіл струмів провідності в стінках хвилеводу і струмів зміщення в його порожнині.

4. Виписати компоненти поля хвилі заданого типу.

5. Визначити критичну  $\lambda_{кр}$  і вибрати робочу  $\lambda$  довжини хвиль у хвилеводі.

6. Розрахувати характеристичний опір  $R_z$  хвилеводу.

7. Визначити середню потужність  $P_{сер}$  поля у хвилеводі, якщо амплітуда електричної складової поля в пучності дорівнює  $10^3$  В/м, і оцінити граничнодопустиму потужність, якщо  $E_{пробю} = 3 \cdot 10^6$  В/м.

8. Розрахувати значення фазової  $V_\phi$  і групової  $V_{гр}$  швидкостей хвилі у хвилеводі.

9. Визначити типи хвиль, які при обраній довжині хвилі  $\lambda$  можуть поширюватися у хвилеводі, а також при довжині хвилі, що у чотири рази менша за обрану.

Таблиця 3

Вихідні дані	Розміри поперечного перерізу		Тип хвилі	
	$a$ , м	$b$ , м	варіант А	варіант Б
0	0,02	0,01	$H_{10}$	$H_{01}$
1	0,02	0,02	$H_{20}$	$H_{02}$
2	0,04	0,01	$H_{11}$	$E_{11}$
3	0,04	0,02	$H_{10}$	$H_{01}$
4	0,06	0,03	$E_{11}$	$H_{11}$
5	0,06	0,02	$H_{11}$	$E_{11}$
6	0,08	0,04	$H_{10}$	$H_{01}$
7	0,08	0,02	$H_{20}$	$H_{02}$
8	0,1	0,05	$H_{11}$	$E_{11}$
9	0,1	0,02	$H_{10}$	$H_{01}$

### *Методичні рекомендації до розв'язування задачі*

Розв'язання задачі доцільно починати з графічного зображення структури поля заданого типу. Після цього необхідно виписати складові векторів напруженості електричного і магнітного полів, що зображуються, з урахуванням закону, за яким вони змінюються. Картину силових ліній напруженостей поля і картину густини струмів провідності та зміщення доцільно сумістити на одному рисунку.

При розрахунку характеристичних опорів хвиль типів  $H_{mn}$  у хвилеводі необхідно використовувати співвідношення такого вигляду:

$$R_z = \frac{W}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}},$$

а при розрахунку характеристичних опорів хвиль типів  $E_{mn}$

$$R_z = W \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2},$$

де  $W = 377 \text{ Ом}$  – хвильовий опір повітря.

Середні потужності хвиль типів  $H_{m0}$  і  $H_{0n}$  визначаються співвідношенням:

$$P_{сер} = \frac{E_m^2}{4W} ab \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2},$$

середня потужність хвилі типу  $H_{11}$  – співвідношенням:

$$P_{сер} = \frac{E_m^2}{8W} ab \left[ 1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right] \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2},$$

а середня потужність хвилі типу  $E_{11}$  – співвідношенням:

$$P_{сер} = \frac{E_m^2}{8W} ab \frac{\lambda_{кр}}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda}\right)^2 - 1}.$$

Література: [2, с. 5 - 26]; [4, с. 15 - 27]; [6, с. 270-283].

### Задача 3

Антенa – тонкий симетричний (варіант А) або несиметричний (варіант Б) циліндричний вібратор. Довжина плеча вібратора  $l$ , а діаметр  $2a$ . Вібратор, якщо він симетричний, знаходиться у безмежному повітряному середовищі. Якщо вібратор несиметричний, то він встановлюється вертикально на плоскій безмежній провідній поверхні. На основі даних, наведених у табл.4, виконати таке:

1. Визначити геометричні особливості силових ліній векторів напруженості електричного  $\vec{E}$  і магнітного  $\vec{H}$  полів, що збуджуються вібратором. Зобразити ескіз структури електромагнітного поля як просторову сукупність відповідних силових ліній. Виявити наявність існуючих проєкцій векторів у сферичній системі координат  $[r, \theta, \varphi]$ .

2. Навести вираз, який визначає нормовану характеристику спрямованості вібратора  $F(\theta, \varphi)$ . Здійснити розрахунки та надати результати у вигляді графіка, тобто діаграми спрямованості (ДС) вібратора. Нормовану ДС зобразити у полярній та прямокутній системах координат.

3. На основі виявленої ДС визначити ширину її пелюстки  $2\theta_{0,7}$  - на рівні 0,707 та  $2\theta_0$  - на нульовому рівні.

4. Розрахувати значення діючої довжини вібратора  $l_d$ .

5. Визначити опір випромінювання  $R_\Sigma$  та пояснити зміст його фізичній сутності.

6. Визначити або навести значення коефіцієнта спрямованої дії вібратора  $D$ .

7. Визначити діючу (ефективну) площу вібратора  $S_d$ .

8. Розрахувати значення хвильового опору вібратора  $W_A$ .

9. Визначити активну  $R_A$  та реактивну  $X_A$  складові вхідного опору антени  $\dot{Z}_A$ .

10. Розрахувати значення коефіцієнта корисної дії вібратора  $\eta$ .

11. Визначити коефіцієнт підсилення вібратора  $G$ .

12. Визначити відносну ширину смуги пропускання вібраторної антени  $\frac{\Delta f}{f}$ .

Таблиця 4

Вихідні дані	Довжина плеча вібратора $l$ , м	Радіус плеча вібратора $a$ , м	Довжина хвилі $\lambda$ , м
0	0,05	$10^{-4}l$	10,0
1	0,025	$2 \cdot 10^{-4}l$	5,0
2	0,3	$5 \cdot 10^{-4}l$	6,0
3	0,03	$5 \cdot 10^{-4}l$	0,6
4	1,0	$2 \cdot 10^{-4}l$	4,0
5	0,1	$3 \cdot 10^{-4}l$	0,4
6	0,5	$2 \cdot 10^{-4}l$	1,0
7	0,05	$4 \cdot 10^{-4}l$	0,1
8	5,4	$10^{-3}l$	8,0
9	0,54	$5 \cdot 10^{-4}l$	0,8

### **Методичні рекомендації до розв'язування задачі**

При виконанні пункту 1 на першому етапі виявляється структура електромагнітного поля, тобто просторова сукупність силових ліній векторів напруженості електричного  $\vec{E}$  і магнітного  $\vec{H}$  полів, які збуджуються вібратором. При цьому доцільне:

- зобразити вібратор у прямокутній правогвинтовій системі координат  $[X, Z, Y]$ , суміщаючи його поздовжню вісь з віссю  $Z$ ;
- відмітити стрілкою напрям миттєвого значення електричного струму у вібраторі;
- керуючись фізичним змістом рівнянь Максвелла, зобразити силові лінії векторів напруженості магнітного поля  $\vec{H}$  і пов'язаного з ним електричного поля  $\vec{E}$ , які збуджуються струмом вібратора у зовнішньому просторі.

На другому етапі у будь-якій точці спостереження  $M$  будується допоміжна сферична система координат. Для цього:

- обрати у просторі будь-яку точку нагляду  $M [x, y, z]$ ;
- від вісі  $Z$  через точку  $M$  провести дугу кола радіусу  $r$ ;

- через начало координат і точку нагляду  $M$  провести пряму, яка є подовженням радіусу  $r$ ;

- позначити символом  $\theta$  кут між віссю  $Z$  і цією прямою;

- спроекувати цю пряму на координатну поверхню  $XOY$ ;

- позначити символом  $\varphi$  кут між віссю  $X$  і цією проекцією.

Тепер точка спостереження визначена у сферичній системі координат як  $M [r, \theta, \varphi]$ , у якій  $\theta$  - меридіанний (вертикальний),  $\varphi$  – азимутальний (горизонтальний) координатні кути.

У подальшому слід виконати таке:

- через точку спостереження провести дотичну до дуги кута  $\theta$ , тобто перпендикуляр до радіальної вісі  $r$ ;

- через цю ж точку провести пряму, паралельну дотичній до дуги кута  $\varphi$ .

Таким чином отримана локальна сферична система координат з початком у точці спостереження  $M [r, \theta, \varphi]$  і взаємно перпендикулярними радіальною, меридіанною і азимутальною осями. У цій системі відповідні проекції  $E_r, E_\theta, E_\varphi$  та  $H_r, H_\theta, H_\varphi$  векторів напруженості електричного і магнітного полів у загальному випадку пов'язані звичайними співвідношеннями:

$$\bar{E} = \bar{1}_r E_r + \bar{1}_\theta E_\theta + \bar{1}_\varphi E_\varphi ;$$

$$\bar{H} = \bar{1}_r H_r + \bar{1}_\theta H_\theta + \bar{1}_\varphi H_\varphi ,$$

де  $\bar{1}_r, \bar{1}_\theta, \bar{1}_\varphi$  - орти локальної системи координат.

На третьому етапі необхідно визначити фактичну наявність проекцій векторів напруженості електричного  $\bar{E}$  і магнітного  $\bar{H}$  полів, які збуджуються вібратором. Для цього:

- на будь-якій силовій лінії вектора  $\bar{E}$ , що проходить через точку спостереження  $M [r, \theta, \varphi]$ , виділити невеликий фрагмент і визначити у ньому наявність (відсутність) складових, що містяться у відповідному вищенаведеному співвідношенні;

- на будь-якій силовій лінії вектора  $\bar{H}$ , що проходить через точку спостереження  $M [r, \theta, \varphi]$ , виділити невеликий фрагмент і визначити у ньому наявність (відсутність) складових, що містяться у відповідному вищенаведеному співвідношенні.

Зробити висновок про характерні особливості структури електромагнітного поля, збудженого вібратором.

При виконанні пункту 2 використовують співвідношення:

$$F(\theta) = \frac{\cos(\beta l \cos \theta) - \cos \beta l}{(1 - \cos \beta l) \sin \theta},$$

в якому  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;

$$F(\varphi) = 1.$$

Розраховують відповідні значення і надають їх у вигляді відповідних графіків, тобто нормованих ДС вібратора.

При виконанні пункту 3 на основі ДС, вже зображеної у прямокутній системі координат, визначають на рівні 0,707 значення ширини пелюстки  $2\theta_{0,7}$  у градусах і її ширину  $2\theta_0$  на нульовому рівні. Доцільно порівняти визначену ширину  $2\theta_{0,7}$  зі значенням, що впливає з ДС, зображеної у сферичній системі координат – вони повинні співпадати.

Значення діючої довжини вібратора можна визначити за формулою:

$$l_d = \frac{2\lambda}{\pi} \sin^2 \left( \pi \frac{l}{\lambda} \right).$$

Опір випромінювання, якщо  $l \leq 0,1 \lambda$ , можна визначити за спрощеною формулою:

$$R_\Sigma \approx 80\pi^2 \left( \frac{l_d}{\lambda} \right)^2.$$

При більших значеннях  $l$  опір випромінювання  $R_\Sigma$  вібратора визначають за загальною формулою або відповідним графіком, наданим, наприклад, у праці [5]. З них впливає, що:

- якщо  $l = 0,25 \lambda$ , то значення  $R_\Sigma$  дорівнює 73,1 Ом;
- якщо  $l = 0,5 \lambda$ , то значення  $R_\Sigma$  дорівнює 200 Ом;



- якщо  $l = 0,625 \lambda$ , то значення  $R_{\Sigma}$  дорівнює 110 Ом.

Значення коефіцієнта спрямованої дії вібратора можна визначити за формулою:

$$D = \frac{120 \pi^2}{R_{\Sigma}} \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2,$$

або

$$D = \frac{480}{R_{\Sigma}} \sin^4 \left( \pi \frac{l}{\lambda} \right).$$

Тепер можна оцінити діючу площу вібратора:

$$S_{\text{д}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D.$$

Хвильовий опір вібратора:

$$W_{\text{А}} = 120 \left( \ln \frac{l}{2a} - 1 \right).$$

Вхідний опір вібратора є комплексною величиною:

$$\dot{Z}_{\text{А}} = R_{\text{А}} + i X_{\text{А}},$$

де

$$R_{\text{А}} = \frac{R_{\Sigma}}{\left( \frac{R_{\Sigma}}{W_{\text{А}}} \right)^2 + \sin^2 \beta l}, \quad X_{\text{А}} = -\frac{W_{\text{А}}}{2} \frac{\sin 2\beta l}{\left( \frac{R_{\Sigma}}{W_{\text{А}}} \right)^2 + \sin^2 \beta l}$$

Коефіцієнт корисної дії антени  $\eta = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\text{А}}}$ , а її коефіцієнт підсилення  $G = \eta D$ . При цьому  $GR_{\text{А}} = DR_{\Sigma}$ .

Відносна ширина смуги пропускання вібратора залежить від його товщини згідно із співвідношенням:

$$\frac{\Delta f}{f} = 200 \left[ 1 - 0,64 \arctg \left( 3,8 \lg \frac{0,75 \lambda}{a} \right) \right].$$

Вищенаведені співвідношення стосуються симетричного вібратора (варіант А). Якщо вібратор несиметричний і встановлений на провідній поверхні (варіант Б), то необхідно врахувати таке:

- його ДС (пункт 2) є відповідною половиною ДС симетричного вібратора, а другу її половину можна трактувати як дзеркальне відображення першої половини;

- діюча висота вібратора  $l_d$ , опір випромінювання  $R_\Sigma$ , хвильовий опір  $W_A$ , активна і реактивна складові вхідного опору  $\dot{Z}_A$  після розрахунків зменшуються у два рази;

- коефіцієнт спрямованої дії  $D$ , коефіцієнт підсилення  $G$ , та діюча площа вібратора  $S_d$  подвоюються.

Література: [3, с. 6 - 20]; [5, с. 39 – 54, 67 – 76].

#### Задача 4

Передавальна і приймальна антени, які призначені для роботи з вертикально-поляризованими хвилями, розташовані понад гладкою земною поверхнею. Їх висоти  $h_1 = k_1\lambda$  та  $h_2 = k_2\lambda$ . Відомі: потужність випромінювання  $P_1$  передавальної антени, максимальні значення коефіцієнтів підсилення  $D_1 = D_2 = D$  обох антен, довжина хвилі  $\lambda$ , протяжність радіолінії  $r$ , відносна діелектрична

проникність  $\varepsilon_{\text{дзі}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  і питома провідність  $g$  ділянки земної поверхні вздовж траси поширення радіохвилі.

Радіус земної кулі  $a_0 = 6,37 \cdot 10^6$  м.

На основі даних табл. 5 та 6 виконати таке:

- визначити максимальні значення радіусів перших шести зон Френеля, суттєвих для поширення радіохвиль;

- розрахувати амплітуду  $E_{m0}$  вектора напруженості електричного поля на відстані  $r$  від передавальної антени;

- визначити потужність  $P_0$ , яка виділяється в приймальній антені під дією цього поля, без урахування впливу земної поверхні на поширення радіохвиль;

- розрахувати значення модуля  $|\dot{V}| = V$  комплексного коефіцієнта послаблення за напруженістю електричного поля;

- визначити амплітуду напруженості електричного поля  $E_{m2}$  в точці прийому з урахуванням впливу особливостей земної поверхні на умови поширення радіохвиль;

- визначити потужність  $P_2$ , яка виділяється в приймальній антені під дією цього поля, з урахуванням впливу земної поверхні на умови поширення радіохвиль.

Вихідні дані для варіанта А (високопідняті антени) наведені в табл. 5, а для варіанта Б (низькорозташовані антени) – в табл. 6.

Для варіанта А протяжність радіотраси задається співвідношенням:  $r = nr_0$ , де  $r_0$  – відстань прямої видимості.

Таблиця 5

Вихідні дані	$P_1$ , Вт	$D$	$n$	$\lambda$ , м	$k_1$	$k_2$
0	20	200	0,3	0,2	100	75
1	25	160	0,35	0,19	110	80
2	30	130	0,4	0,18	70	120
3	35	120	0,45	0,17	120	80
4	40	100	0,5	0,16	110	100
5	45	90	0,55	0,15	100	160
6	50	80	0,6	0,14	150	110
7	55	70	0,65	0,13	130	170
8	60	65	0,7	0,12	120	180
9	65	60	0,75	0,1	150	200

Таблиця 6

Вихідні дані	$P_l$ , кВт	D	$r$ , км	$\lambda$ , м	$\epsilon$	$g$ , См/м
0	20	1,5	45	300	30	$10^{-2}$
1	25	2,0	50	400	20	$10^{-1}$
2	30	2,5	55	500	10	$10^{-3}$
3	35	3,0	60	800	5	$10^{-1}$
4	40	1,5	65	1000	3	$10^{-3}$
5	45	2,0	70	1200	30	$10^{-2}$
6	50	2,5	75	1400	20	$10^{-3}$
7	40	3,0	80	1600	15	$10^{-4}$
8	30	1,5	85	2000	5	$10^{-1}$
9	20	2,0	90	2200	3	$10^{-3}$

### Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Перші три пункти задачі є загальними для обох варіантів.

Максимальний радіус  $N$ -ї зони Френеля визначається за формулою:

$$r_N = 0,5\sqrt{N\lambda r}.$$

Варіант А відноситься до випадку високопіднятих антен, якщо  $h > \lambda$ . Для розрахунку напруженості поля в цьому випадку можна використовувати формулу Введенського:

$$E_{m2} = E_{m0}V,$$

де

$$E_{m0} = \frac{\sqrt{60P_1 D}}{r},$$

а коефіцієнт послаблення

$$V = 4\pi \frac{h_1 h_2}{r\lambda}.$$

Якщо виявиться, що  $r > 0,2 r_0$ , де відстань прямої видимості

$$r_0 = \sqrt{2a_0}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

то в інтерференційних формулах і в формулі Введенського висоти антен  $h_1$  і  $h_2$  слід замінити приведеними висотами:

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_1,$$

де

$$\Delta h_1 = \frac{r^2}{2a_0} \left( \frac{h_1}{h_1 + h_2} \right)^2,$$

і

$$h'_2 = h_2 - \Delta h_2,$$

де

$$\Delta h_2 = \frac{r^2}{2a_0} \left( \frac{h_2}{h_1 + h_2} \right)^2.$$

Варіант Б відноситься до випадку низькорозташованих антен, якщо  $h < \lambda$ . При цьому розрахунку множника послаблення  $V$  передуює процедура визначення допоміжного чинника  $\rho$ , який називається чисельною відстанню.

Для розрахунку напруженості поля використовують формулу Шулейкіна – Ван-дер-Поля:

$$E_{m2} = \sqrt{2} E_{m0} V,$$

де коефіцієнт послаблення визначається співвідношенням

$$V = \frac{2 + 0,3\rho}{2 + \rho + 0,6\rho^2},$$

а чисельна відстань

$$\rho = \frac{\pi r}{\lambda \sqrt{\varepsilon^2 + (60\lambda g)^2}}.$$

Література: [3, с. 46 - 50]; [4, с. 24 - 30].

Усі задачі характеризуються послідовністю, внутрішньою єдністю та практичною спрямованістю. Їх розв'язування дає можливість придбати студентам навички в електродинамічних розрахунках. Такі розрахунки виконуються, наприклад, при прогнозуванні зон покриття зв'язку, або при аналізі електромагнітного оточення в умовах щільного розташування радіоелектронних засобів різноманітного призначення.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ІВАНОВ В.О., ГАБРУСЕНКО Є.І. Змінні електромагнітні поля та хвилі: Тексти лекцій. – К.: НАУ, 2000. – 40 с.
2. ІВАНОВ В.О., ГАБРУСЕНКО Є.І. Лінії передачі та резонансні системи в діапазоні НВЧ: Тексти лекцій. – К.: КМУЦА, 1999. – 48 с.
3. ІВАНОВ В.О., ГАБРУСЕНКО Є.І. Технічна електродинаміка. Антени та поширення радіохвиль: Конспект лекцій. – К.: НАУ, 2006. – 72 с.
4. ІВАНОВ В.О., ГАБРУСЕНКО Є.І. Поширення радіохвиль: Тексти лекцій. – К.: НАУ, 2002. – 64 с.
5. ІЛЬНИЦЬКИЙ Л.Я., САВЧЕНКО О.Я., СІБРУК Л.В. Антени та пристрої надвисоких частот. – К.: Укртелеком, 2003. – 494 с.
6. ПИМЕНОВ Ю.В., ВОЛЬМАН В.И., МУРАВЦОВ А.Д. Техническая электродинамика. - М.: Радио и связь, 2000.- 536 с.

Навчально-методичне видання

## **ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА**

Методичні рекомендації до виконання контрольної роботи  
для студентів спеціальності 6.092400  
“Телекомунікаційні системи та мережі”  
Інституту заочного та дистанційного навчання

Укладачі: ІВАНОВ Володимир Олександрович,  
ГАБРУСЕНКО Євген Ігорович

В авторській редакції

Підписано до друку . Формат 60x84/16. Папір офсетний  
Офсетний друк. Ум. фарбовідб. . Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк.1,5  
Тираж прим. Замовлення № Вид. №

Видавництво НАУ  
03058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК №977 від 05.07.2002 р.