

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

В. О. Іванов, Є. І. Габрусенко

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Лабораторні роботи
для студентів спеціальностей: 8.090702 «Радіоелектронні пристрої,
системи та комплекси», 7.090703 «Апаратура радіозв'язку,
радіомовлення і телебачення», 7.091002 «Біотехнічні та медичні
апарати і системи».

(електронна версія)

Київ 2003

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Програмою курсу передбачено виконання лабораторних робіт за розділами, пов'язаним з вивченням статичних полів, змінного електромагнітного поля, збудженого диполем Герца, електромагнітних полів, що поширюються у радіохвилеводах та у вільному просторі. Кілька робіт присвячено вивченню елементів хвилеводних трактів.

Перед виконанням кожної роботи необхідно вивчити теоретичні положення, що надаються в описі роботи та лекційному курсі, а також підготувати проект звіту. Слід ознайомитися зі схемою дослідів і послідовністю виконання окремих етапів роботи.

При підготовці до захисту лабораторної роботи важливо ще раз проробити теоретичний матеріал та висновки, що впливають з результатів експерименту, відповісти на запитання для самоперевірки.

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИХ ПОЛІВ МЕТОДОМ МОДЕЛЮВАННЯ

Мета роботи: експериментальні дослідження основних закономірностей, яким підкоряється електростатичне поле в залежності від конфігурації заряджених тіл та їх взаємного розташування у просторі; розв'язування прямої та оберненої задач електростатики на основі даних досліджу.

Короткі теоретичні відомості

Електричне поле зарядів, незмінних у часі і нерухомих у просторі, зветься електростатичним. Основною характеристикою електростатичного поля є його напруженість \vec{E} . У декартовій системі координат :

$$\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z.$$

Рівняння силової лінії електростатичного поля має вигляд:

$$\frac{E_x}{\partial x} = \frac{E_y}{\partial y} = \frac{E_z}{\partial z}.$$

У загальному випадку електростатичні заряди, які є джерелом електричного поля, можуть бути розподілені в тілі будь-якої форми. У тому випадку, якщо заряди розподілені рівномірно по протяжному тілу з незмінним поперечним перерізом, силові лінії поля \vec{E} лежать у паралельних площинах, перпендикулярних до його поздовжньої осі. Силові лінії такого поля є двовимірними, а поле зветься плоскопаралельним або плоским.

Якщо силові лінії поля перетинають деяку поверхню, то вони утворюють потік через неї. Величина потоку залежить від взаємної орієнтації вектора \vec{E} та елемента поверхні $d\vec{S}$:

$$N = \int_S \vec{E} d\vec{S}.$$

Потік вектора \vec{E} через реальну або уявну замкнену поверхню S довільної форми визначається алгебраїчною сумою зарядів q_Σ , що містяться усередині цієї поверхні:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon} q_\Sigma, \quad (1.1)$$

де ε – абсолютна діелектрична проникність середовища.

Співвідношення (1.1), відоме як рівняння Гауса–Остроградського, що наведено в інтегральній формі.

У випадку двовимірного плоскопаралельного електростатичного поля замкнена поверхня $S = \ell \cdot h$ вироджується в контур ℓ і співвідношення (1.1) приводиться до вигляду:

$$\oint_L \bar{E} dL = \frac{1}{\varepsilon} \tau_\Sigma. \quad (1.2)$$

Вираз (1.2) характеризує потік вектора \bar{E} через бічну поверхню циліндра довільного профілю, який опирається в будь-якому його перетині, перпендикулярно до осі, на контур ℓ і віднесено до одиниці висоти h цього циліндру. Тому у виразі (1.2.) τ_Σ – лінійна густина заряду.

Вектор dL – елемент контура ℓ , що визначається співвідношенням $dL = dS/h$. Він перпендикулярний дотичній, проведеній відносно будь-якої точки, що належить контуру ℓ .

На підставі співвідношень (1.1) та (1.2) можна визначити значення напруженості поля \bar{E} у будь-якій точці простору, в тому числі і в тій точці поверхні або контуру ℓ , що нас цікавить. Зв'язок розподілених зарядів з напруженістю електричного поля \bar{E} встановлюється співвідношенням Гауса–Остроградського в диференціальній формі:

$$\varepsilon \operatorname{div} \bar{E} = \rho(x, y, z), \quad (1.3)$$

де $\rho(x, y, z)$ – об'ємна густина зарядів.

В декартовій системі координат:

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}.$$

У тому випадку, якщо вісь z повздовжня і $\frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$, поле є плоскопаралельним і співвідношення (1.3) приводиться до вигляду :

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon} \sigma, \quad (1.4)$$

де σ – поверхнева густина заряду.

Електростатичне поле здатне виконати роботу по переміщенню заряду з однієї точки простору в іншу. Тому його можна характеризувати потенціальною (скалярною) функцією, тобто різницею потенціалів:

$$U_a - U_b = - \int_a^b \bar{E} dr,$$

де dr – елемент траєкторії r , що з'єднує точки b і a .

Поверхня, що об'єднує точки рівних потенціалів, зветься екіпотенціальною поверхнею. Рівняння екіпотенціальної поверхні має вигляд:

$$U(x, y, z) = \text{const}.$$

У плоскопаралельному полі замість екіпотенціальних поверхонь можна користуватися поняттям екіпотенціальних ліній, що зображують профілі екіпотенціальних поверхонь. Силкові лінії вектора \bar{E} перпендикулярні екіпотенціальній поверхні в кожній точці. Швидкість зміни потенціалу на відстані від одної екіпотенціальної поверхні до іншої характеризується градієнтом потенціалу, що кількісно дорівнює вектору напруженості електростатичного поля, взятому зі зворотним знаком:

$$\operatorname{grad} U = \bar{i} \frac{\partial U}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial U}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial U}{\partial z} = -\bar{E}, \quad (1.5)$$

де

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -E_x; \quad \frac{\partial U}{\partial y} = -E_y; \quad \frac{\partial U}{\partial z} = -E_z.$$

Таким чином за відомою скалярною функцією U можна розв'язати як пряму (1.5), так і обернену (1.3) задачі електростатики.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка зображена на рис. 1.1. Вона складається з робочого столу 16, покритого оргсклом, до якого шинами 17 та 8 притискується лист електропровідного паперу 9. Шини прикріплюються фіксаторами 15. Змінні фігурні електроди 4 та 6 притискуються фіксаторами 5 до електропровідного паперу. Зйомний електрод 12, який контактує з електропровідним папером в будь-якій точці, укріплений в

діелектричній ручці 11. Зміщення зонду вздовж осей X та Y здійснюється за допомогою шарнірного механізму 1. Координати зонду відраховуються по метричним шкалам 7 і 14. Стрілки 10 і 13, що з'єднані із зондом 12, паралельні осям X та Y відповідно. Шину 17 з'єднано з негативною клемою джерела постійної напруги 2. Позитивну клему джерела напруги з'єднують з фігурними електродами 4 і 6 перемикачами П1 і П2 (за вказівкою викладача).

Позитивна напруга від спеціального джерела підводиться:

- до фігурного електроду 4, якщо перемикачі П1 і П2 знаходяться в положеннях "а" ;
- до фігурного електроду 6, якщо перемикач П1 знаходиться в положенні "а", а перемикач П2 – в положенні "б" ;
- до шини 8, якщо перемикач П1 знаходиться в положенні "б" при будь-якому положенні перемикача П2.

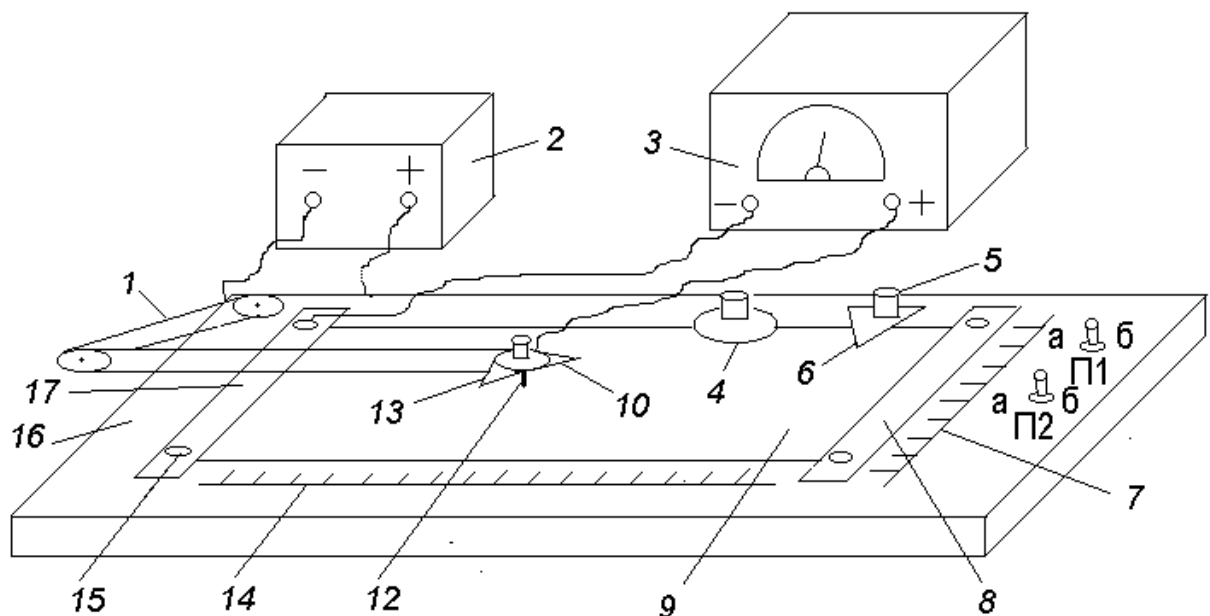


Рис. 1.1

Відлік потенціалу у будь-якій точці електропровідного паперу відносно шини 2 здійснюється за шкалою вимірювального приладу 3, на вхід якого подається позитивна напруга із рухомого знімного зонду 12.

Порядок виконання роботи і зміст звіту

1. Побудувати екіпотенціальні лінії електростатичного поля.

Щоб побудувати ці лінії необхідно виконати такі операції:

- ввімкнути джерело постійної напруги, встановивши на його виході рівень порядку 10 В;

– переміщуючи знімний зонд по робочому полю, утвореному електропровідним папером, знайти 5–7 точок з однаковими потенціалами і записати координати цих точок; здійснити аналогічні процедури для п'яти- шести значень потенціалів U , що різняться на $\Delta U = 1$ В;

– побудувати на міліметровці сукупність екіпотенціальних ліній, з'єднуючи плавною кривою точки рівних потенціалів.

2. Побудувати силові лінії напруженості поля і градієнта потенціалу.

Під час побудови силових ліній градієнта потенціалу необхідно пам'ятати, що вони в кожній точці простору перпендикулярні екіпотенціальній поверхні і направлені у бік зростання потенціалу. Для побудови силових ліній слід:

– на екіпотенціальній лінії меншого рівня відмітити 6 - 10 рівновіддалених одна від одної точок;

– з'єднати сусідні точки відрізками прямих – хордами;

– через середини хорд провести нормалі, що перетинають найближчу лінію більшого потенціалу;

– зліва і справа від точки перетину на цій лінії вибрати дві точки і з'єднати їх хордою;

– через середину цієї нової хорди в обидва боки від неї провести другу нормаль, яка перетинає як першу нормаль, так і лінію більш високого потенціалу;

– повторити процедуру побудови нормалей для всіх екіпотенціальних ліній більш високого рівня;

– апроксимувати отримані відрізки нормалей плавною кривою, побудувати силову лінію градієнту потенціалу, напрямлену в бік зростання потенціалу;

– аналогічні побудови здійснити для всіх хорд, якими апроксимована лінія самого низького потенціалу.

Точність побудови силових ліній тим вище, чим коротші хорди і ближче одна до одної розташовані лінії рівних потенціалів.

3. Визначити модуль напруженості електростатичного поля у будь-якої точці з координатами $[x, y]$.

При розв'язанні цієї задачі необхідно використати такий спосіб:

– на одній із ліній рівних потенціалів вибрати точку $M_1[x_1, y_1]$, що характеризується потенціалом U ;

– із точки M_1 в бік найближчої лінії рівних потенціалів $U + \Delta U$ провести прями, паралельні осям X і Y ;

– за метричними шкалами відповідних осей X та Y оцінити довжини відрізків цих прямих Δx_1 і Δy_1 , обмежених екіпотенціальними лініями U і $U + \Delta U$;

– знайти проекції вектора градієнта потенціалу, що виходить з точки M_1 , на осі X та y :

$$\text{grad}_x U(M_1) = \frac{\Delta U}{\Delta x_1}, \quad \text{grad}_y U(M_1) = \frac{\Delta U}{\Delta y_1};$$

– визначити модуль градієнта потенціалу в точці M_1 :

$$|\text{grad}U(M_1)| = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{\Delta x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{\Delta y_1}\right)^2};$$

– зобразити у обраному масштабі розрахований вектор (1.5):

$$\text{grad}U(M_1) = \bar{i}\text{grad}_x(M_1) + \bar{j}\text{grad}_y(M_1)$$

і відповідний до нього вектор:

$$\bar{E}(M_1) = -\text{grad}U(M_1);$$

– переміститися вздовж лінії градієнта потенціалу (силової лінії електричного поля), який належить точці M_1 , до найближчої еквіпотенціальної лінії із потенціалом, що зріс, в точку $M_2[x_2, y_2]$ і здійснити в ній розрахунок вектора $\bar{E}(M_2) = -\text{grad}U(M_2)$;

– аналогічні розрахунки виконати ще для двох пар точок M_1 і M_2 , розташованих на інших силових лініях градієнтів потенціалу;

– попарно зрівнюючи між собою розраховані вектори напруженості електростатичного поля \bar{E} , які виходять із точок, що належать одній і тій же лінії рівних потенціалів, переконатися в неоднорідності (однорідності) електростатичного поля, що досліджується.

4. Оцінити поверхневу густину електричних зарядів – джерел електростатичного поля.

Задачу можна розв'язати на основі співвідношення (1.4), вираховувавши значення $\text{div}\bar{E}$. Для цього необхідно здійснити такі обчислювальні процедури:

– використовуючи результати попередніх розрахунків компонент векторів $\bar{E}(M_1)$ та $\bar{E}(M_2)$, визначити приріст:

$$\Delta E_x = E_x(M_1) - E_x(M_2) = -\left(\frac{\Delta U}{\Delta x_1} - \frac{\Delta U}{\Delta x_2}\right),$$

$$\Delta E_y = E_y(M_1) - E_y(M_2) = -\left(\frac{\Delta U}{\Delta y_1} - \frac{\Delta U}{\Delta y_2}\right);$$

– визначити різниці відстаней ΔX та ΔY , на яких утворюється приріст ΔE_x та ΔE_y :

$$\Delta X = x_1 - x_2,$$

$$\Delta Y = y_1 - y_2.$$

– визначити поверхневу густину електричних зарядів σ , розташованих на площадці ΔS , обмеженої розмірами $X_1 - X_2$ та $Y_1 - Y_2$ з урахуванням абсолютної діелектричної проникності паперу:

$$\frac{\Delta E_x}{\Delta X} + \frac{\Delta E_y}{\Delta Y} = \frac{\sigma}{\varepsilon};$$

– аналогічні розрахунки значень σ/ε виконати для інших площадок ΔS , що містять в собі точки M_1 і M_2 , в яких визначались вектори $\vec{E}(M_1)$ та $\vec{E}(M_2)$.

Запитання для самоперевірки

1. Яким чином записуються рівняння силових ліній?
2. Як записується рівняння сім'ї екіпотенціальних поверхонь?
3. Який фізичний зміст потенціалу електростатичного поля, градієнта потенціала?
4. Чому дорівнює градієнт потенціалу електростатичного поля?
5. Як визначити напрями силових ліній напруженості електростатичного поля відносно екіпотенціальних ліній?
6. Запишіть рівняння Гаусса–Остроградського в диференціальній та інтегральній формах, поясніть фізичний зміст цих рівнянь.

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДИПОЛЯ ГЕРЦА

Мета роботи: дослідження просторового розподілу характеристик електромагнітного поля, яке збуджується електричним диполем Герца, і вплив відбиваючої поверхні на діаграму спрямованості диполу.

Короткі теоретичні відомості

Елементарний електричний збуджувач електромагнітного поля реалізується як короткий, порівняно з довжиною хвилі. Відрізок

провідника з електричним струмом – диполь Герца. Оскільки довжина провідника ℓ значно менша за довжину хвилі λ , то в усіх його точках амплітуди і фази електричного струму практично однакові. Ці обставини значно спрощують процедури математичного аналізу структури електромагнітного поля, яке збуджується електричним диполем Герца у вільному просторі. На рис. 2.1 в сферичній системі координат зображені компоненти електромагнітного поля у довільній точці дальньої зони випромінювача: меридіональна складова E_θ вектора напруженості електричного поля та азимутальна складова вектора напруженості магнітного

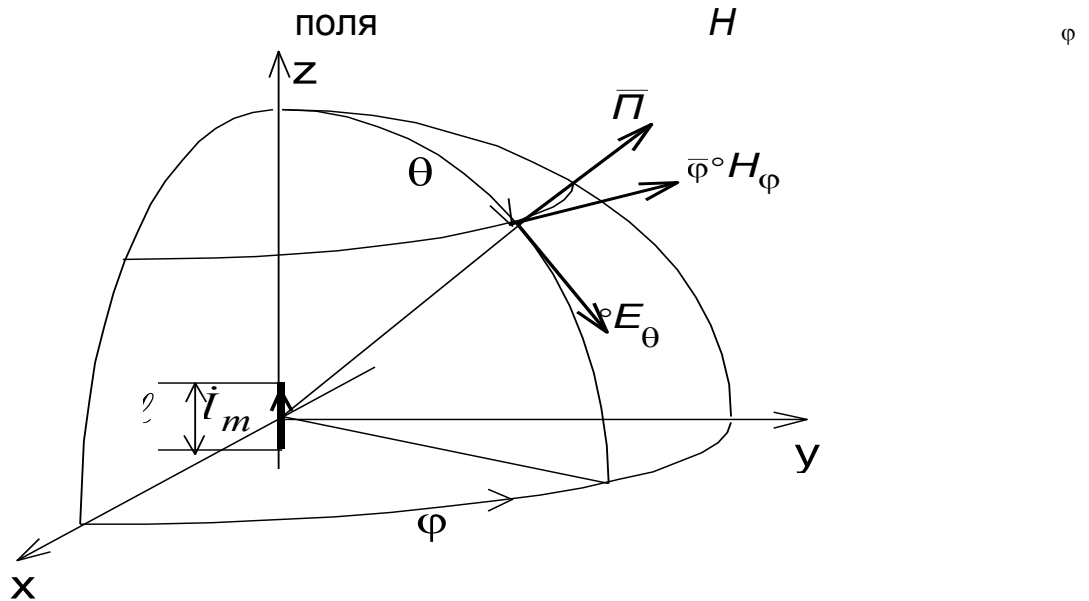


Рис. 2.1

Комплексні амплітуди складових векторів напруженостей електричного \bar{E} і магнітного \bar{H} полів, збуджених електричним диполем у дальній зоні, тобто на відстанях $r \gg \ell$, визначаються на підставі співвідношень:

$$\dot{E}_{m\theta} = i \frac{\dot{I}_m \ell \beta^2}{4\pi\omega\epsilon r} e^{-i\beta r} \sin\theta, \quad (2.1)$$

$$\dot{H}_{m\phi} = i \frac{\dot{I}_m \ell \beta}{4\pi r} e^{-i\beta r} \sin\theta,$$

де \dot{I}_m – комплексна амплітуда електричного струму диполя; β – коефіцієнт фази; ω – колова частота; ϵ – абсолютна діелектрична проникність навколишнього простору.

На рис. 2.1 також зображене взаємне розміщення векторів \bar{E} , \bar{H} і $\bar{P} = \bar{E} \times \bar{H}$ в дальній зоні для кутів θ і ϕ . На ньому літерою \bar{P} позна-

чено вектор Умова–Пойнтінга. Електричний диполь знаходиться в центрі координатної системи, його вісь співпадає з віссю Z . З рис. 2.1 видно, що вектор напруженості електричного поля \vec{E} перпендикулярний радіусу і розташований в меридіональній (вертикальній) площині, що проходить через вісь диполя. Вектор напруженості магнітного поля \vec{H} є перпендикулярним до вектора напруженості електричного поля і розташовується в азимутальній (горизонтальній) площині, яка перпендикулярна осі електричного диполя. Напрямок вектора Умова–Пойнтінга співпадає з напрямком радіуса-вектора \vec{r} .

Нормована функція, що визначає залежність поля (2.1) від кутових напрямків θ і φ :

$$F(\theta) = \frac{E_{m\theta}}{E_{max\theta}} = \sin\theta \quad (2.2)$$

зветься характеристикою спрямованості (ХС), а її графічне зображення – діаграмою спрямованості (ДС) диполя.

На рис. 2.2,а зображена нормована ДС диполя Герца в вертикальній площині, а на рис. 2.2,б – в горизонтальній площині.

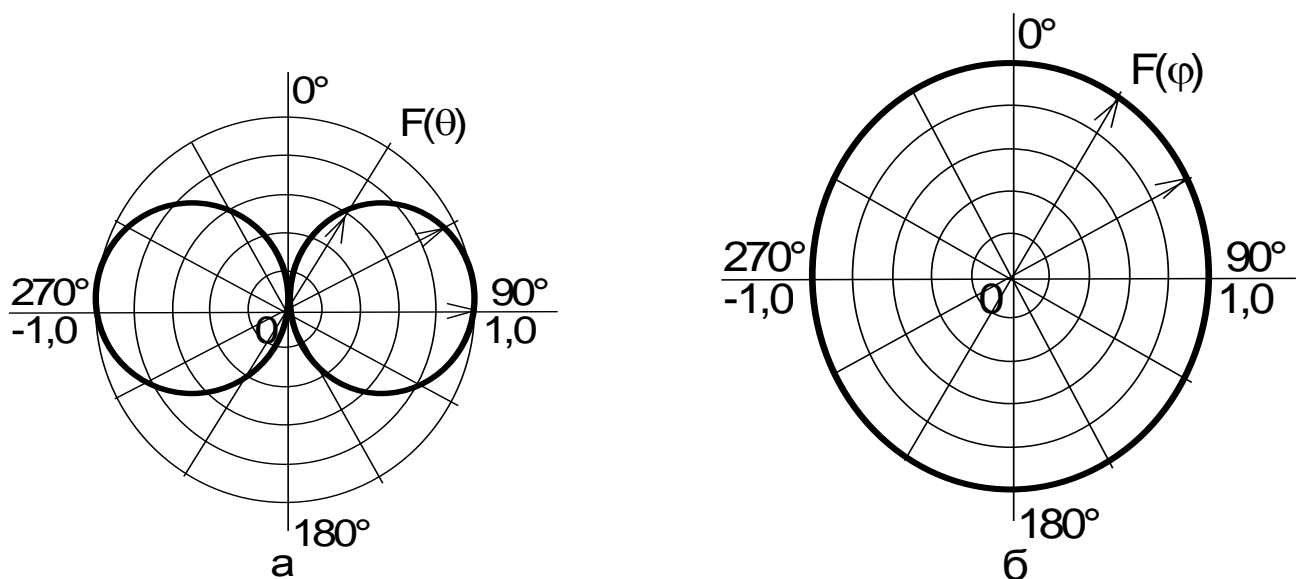


Рис. 2.2

Із співвідношення (2.2) і рис. 2.2 випливає, що значення напруженості поля диполя Герца залежить від кута θ , але не залежить від кута φ .

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з металевого диска з розташованим в його центрі коротким випромінювачем, довжину ℓ якого можна міняти, використовуючи змінні насадки. У площині, перпендикулярній диску, закріплена діелектрична планка з отворами, що має форму півкола радіуса $R=0,5$ м. Отвори в планці служать для фіксування положення приймальної антени (знімного зонду) в залежності від значень кута θ . Коаксіальний кабель з'єднує диполь з генератором.

Приймальна антена являє собою несиметричний електричний вібратор (зонд), який через діод і шунтуючий його дросель приєднано до вимірювального підсилювача. На площині диску перпендикулярно до нього можуть бути встановлені відбивачі, що мають вплив на форму ДС.

Порядок виконання роботи і зміст звіту

1. Експериментально по максимуму показників вимірювального підсилювача підібрати робочу частоту f генератора.

2. На підставі співвідношення (2.2), розрахувати і побудувати в полярній системі координат нормовані діаграми спрямованості в вертикальній $F(\theta)$ і горизонтальній $F(\varphi)$ площинах.

3. Забезпечити слідуючий режим роботи генератора: рід роботи – внутрішня амплітудна модуляція (АМ), глибина модуляції – 60%, рівень вихідного сигналу – достатній для впевненої індикації породженого електричного поля.

4. Орієнтуючи приймальну антену по дотичній до дуги кола, зняти залежність показників індикатора підсилювача $u_{\theta}(\theta)$ від кута θ (дані занести в таблицю).

5. Орієнтуючи приймальну антену в радіальних напрямках, зняти залежність показників індикатора підсилювача $u_r(\theta)$ від кута θ (дані занести в таблицю).

6. Для кожного кута θ розрахувати значення $u(\theta) = \sqrt{u_{\theta}^2 + u_r^2}$, яке з деяким коефіцієнтом пропорційності відповідає напруженості

$$E(\theta) = \sqrt{E_{\theta}^2 + E_r^2}.$$

7. З отриманих даних виділити максимальне значення $u_{max}(\theta)$ і розділити на нього всі розраховані значення $u_{\theta}(\theta)$ і $u_r(\theta)$, тобто здійснити нормування.

8. У полярній системі координат побудувати нормовані діаграми спрямованості для складових електричного поля

$$F_{\theta}(\theta) = \frac{u_{\theta}(\theta)}{u_{max}(\theta)} = \frac{E_{\theta}(\theta)}{E_{max}(\theta)},$$

$$F_r(\theta) = \frac{u_r(\theta)}{u_{max}(\theta)} = \frac{E_r(\theta)}{E_{max}(\theta)}$$

і для результуючої напруженості поля

$$F(\theta) = \frac{u(\theta)}{u_{max}(\theta)} = \frac{E(\theta)}{E_{max}(\theta)}.$$

Якщо умова $\lambda \ll r$ виконана, то, як правило, $E_r(\theta) \ll E_{\theta}(\theta)$ і

$$F(\theta) \approx F_{\theta}(\theta).$$

9. Встановивши на деякій відстані від випромінювача плоский відбивач, зняти і побудувати описаним раніше способом ДС елементарного випромінювача з урахуванням впливу відбивача.

10. Порівняти і пояснити отримані результати.

Запитання для самоперевірки

1. Які випромінювачі відносяться до елементарних?
2. Якими складовими визначаються вектори \vec{E} та \vec{H} у ближній та дальній зонах електричного диполя Герца?
3. Чим пояснюється розходження теоретичної та реальної ДС диполя Герца у конкретному експерименті?
4. Чи впливають плоскі відбивачі на ДС елементарного випромінювача?
5. Які фазові співвідношення існують між складовими векторів \vec{E} і \vec{H} у ближній та дальній зонах?
6. Яким чином ці фазові співвідношення впливають на середні значення вектора Умова–Пойнтінга у ближній та дальній зонах, тобто на процес поширення енергії електромагнітного поля?

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОБЛИЗУ ПРОВІДНОЇ ПОВЕРХНІ

Мета роботи: дослідження особливостей структури електромагнітного поля, що утворюється над провідною поверхнею при похилому падінні на неї плоскої електромагнітної хвилі; вивчення типів хвиль, що можуть існувати у природі; виявлення закономірностей, якими супроводжується поширення електромагнітного поля вздовж провідної поверхні.

Короткі теоретичні відомості

Для похилопадаючої плоскої електромагнітної хвилі доцільно надати поняття фазової та групової швидкості. Фазова швидкість – це швидкість руху фронту хвилі, який характеризується певним фазовим станом, вздовж провідної поверхні. Через те, що напрям руху результуючого поля не співпадає з напрямом руху падаючої хвилі, фазова швидкість V_{ϕ} відрізняється від швидкості C руху хвилі у вільному просторі. Якщо хвиля падає під кутом φ відносно нормалі до провідної поверхні, то швидкість переміщення фази вздовж провідної поверхні залежить від кута падіння і визначається співвідношенням

$$V_{\phi} = \frac{C}{\sin\varphi}. \quad (3.1)$$

При $\varphi > 0$ фазова швидкість хвилі завжди перевищує швидкість світла C . Це можливе тому, що фаза не має маси та енергії, а є лише математичною характеристикою миттєвого стану хвилі, яка поширюється вздовж провідної поверхні.

Групова швидкість – це швидкість переносу енергії поля вздовж провідної поверхні. Енергія поля пов'язана з масою і швидкістю світла C формулою Ейнштейна. Тому групова швидкість електромагнітного поля вздовж провідної поверхні менша або дорівнює швидкості світла і визначається співвідношенням

$$V_{\text{г}} = C \sin\varphi. \quad (3.2)$$

Довжина хвилі, біжучої вздовж провідної поверхні, також залежить від кута φ :

$$\lambda_{\sigma} = \frac{\lambda}{\sin\varphi}, \quad (3.3)$$

де λ – довжина хвилі у вільному просторі, тобто довжина хвилі збуджувача електромагнітного поля.

У результаті інтерференції падаючої і відбитої хвиль вздовж нормалі до провідної площини утворюється режим стоячих електромагнітних хвиль. Для горизонтально поляризованої електромагнітної хвилі напруженість електричного поля у будь-якій точці осі X , співпадаючої з нормаллю, дорівнює:

$$E = 2E_m \sin\left(\frac{2\pi \cos\varphi}{\lambda} x\right) \sin\omega t, \quad (3.4)$$

де E_m – амплітуда напруженості електричного поля падаючої хвилі.

Із співвідношення (3.4) виходить, що m – й вузол поля стіючої хвилі

знаходиться на відстані $x_m = \frac{m\lambda}{2 \cos\varphi}$, де $m = 0, 1, 2, \dots$. Довжина стіючої

хвилі експериментально та теоретично може бути знайдена відповідно з співвідношень:

$$\lambda_{\text{ст}} = 2(x_{m+1} - x_m) = \frac{\lambda}{\cos\varphi}. \quad (3.5)$$

У такий спосіб, по нормалі до площини устанавлюється режим стіючих хвиль, в той час як вздовж провідної поверхні утворюється біжуча хвиля електромагнітного поля. У залежності від кута падіння хвилі φ відбувається перерозподіл енергії між стіючою хвилею, що існує у напрямі нормалі до провідної поверхні, і біжучою хвилею, що рухається вздовж провідної поверхні.

Опис лабораторної устанавки

Лабораторна устанавка складається з генератора високої частоти, що живить півхвильовий вібратор – випромінювальну антену. Для одержання однонаправленого випромінювання передбачено відбивач, виконаний у вигляді зрізаного параболічного циліндра. Електромагнітна хвиля падає на провідну плоску поверхню – вертикальний металевий лист. Лінійні розміри листа значно перевищують довжину хвилі λ , щоб виключити вплив крайового ефекту. Металевий лист закріплюють на станині в підшипнику таким чином, щоб обертаючи його навколо вертикальної осі, можна було б змінити кут φ падіння хвилі на провідну поверхню у межах від 0 до 90°. Величину кута φ визначають по градусній шкалі, нанесеної на станину. Як індикатор поля

використовують вимірювальний підсилювач, з'єднаний з вимірювальним електричним зондом, виконаним у вигляді симетричного вібратора з детектором. Вимірювальний зонд можна переміщувати вздовж нормалі до відбиваючої поверхні за допомогою черв'ячної передачі.

Порядок виконання роботи і зміст звіту

1. Ознайомившись з обладнанням лабораторної установки, ввімкнути генератор і встановити робочу довжину хвилі $\lambda \approx 2l$, де l – загальна довжина вібраторів випромінювальної антени. Оптимальна довжина хвилі підбирається додатковим підстроюванням генератора за максимальними показниками індикатора.

2. Преміщуючи приймальний зонд, переконатися в наявності стоячих хвиль, які створюються вздовж нормалі до провідної поверхні.

3. За формулами (3.3) і (3.5) зробити розрахунок довжини стоячої хвилі $\lambda_{\text{СТ}}$ та довжини біжучої хвилі $\lambda_{\text{Б}}$. Побудувати залежність $\lambda_{\text{СТ}} = f_1(\varphi)$ і $\lambda_{\text{Б}} = f_2(\varphi)$ для відмінних значень кута в інтервалі $0^\circ - 90^\circ$ через кожні 10° .

4. Для тих же значень кута φ експериментально встановити значення довжини стоячої хвилі $\lambda_{\text{СТ}} = 2(x_{m+1} - x_m)$, де x_{m+1} і x_m – координати двох найближчих вузлів електричного поля по нормалі до поверхні. Побудувати залежність $\lambda_{\text{СТ}} = f_3(\varphi)$ (графіки за даними цього та попереднього пунктів рекомендується будувати на одному рисунку).

5. Скориставшись виразами (3.1) і (3.2), обчислити значення фазової та групової швидкостей та побудувати залежність $V_{\varphi} = f_4(\varphi)$ і $V_{\text{Гр}} = f_5(\varphi)$ для значень кута φ в межах $0^\circ - 90^\circ$.

6. Пояснити результати експерименту.

Запитання до самоперевірки

1. Які типи хвиль Вам відомі?
2. До яких типів хвиль відносяться падаюче та результуюче поле? Яким чином можна в експерименті змінити тип результуючого поля над провідною поверхнею?
3. Які граничні умови існують на поверхні розподілу діелектрика з ідеальним провідником?
4. Що характеризують фазова та групова швидкості поля над провідною поверхнею?

5. Поясніть фізичний зміст нерівностей: $V_{\text{ф}} > c$, $V_{\text{гр}} < c$.

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛЯ В РАДІОХВИЛЕВОДІ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ

Мета роботи: ознайомлення з особливостями типів хвиль, що можуть існувати у хвилеводах, умовами їх збудження і поширення; одержання навичок якісного дослідження структури поля на прикладі хвиль типів H_{mn} та E_{mn} ; дослідження загороджуючих фільтрів типів хвиль.

Короткі теоретичні відомості

У результаті послідовного відбиття електромагнітної хвилі від стінок хвилевода в останньому утворюється поле, структура якого аналогічна структурі поля над провідною поверхнею. При цьому в поперечному перерезі хвилевода устанавлюється стояча хвиля поля. На поверхні провідних стінок хвилевода виконуються граничні умови $E_{\tau} = 0$, $E_n \neq 0$, $H_n = 0$, $H_{\tau} \neq 0$, які свідчать про те, що силові лінії електричного поля перпендикулярні стінкам хвилевода, а силові лінії магнітного поля їм паралельні. Хвилі, що поширюються у хвилеводах, різняться наявністю або відсутністю електричних або магнітних складових поля, орієнтованих вздовж продольної осі Z . У такому випадку, якщо $H_z \neq 0$, а $E_z = 0$, хвиля зветься повздовжньо-магнітною (поперечно-електричною) і позначаються

символом $H(TE)$. Якщо $E_z \neq 0$, $H_z = 0$, то хвиля зветься повздовжньо-електричною (поперечно-магнітною) і позначається символом $E(TM)$. У залежності від кількості цілих елементарних структур (стоячих півхвиль поля), що розміщуються вздовж поперечних розмірів хвилеводу a (орієнтованого вздовж осі X) та b (орієнтованого вздовж осі Y) і характеризують розподіл інтенсивності поля, визначається порядок хвилі, що збуджується. З урахуванням цього порядку типи хвиль позначаються сукупністю символів: H_{mn} або E_{mn} , де m і n – кількість стоячих півхвиль, що розміщуються вздовж розмірів a і b відповідно.

Доцільною є така методика побудови структури електромагнітного поля у хвилеводі:

– зображаємо епюри стоячих півхвиль, що вкладаються вздовж сторін хвилеводу a та b , відповідно до потрібних m і n ;

– зображаємо силові лінії поля, що лежать в поперечній площині (для хвилі H_{mn} це силові лінії вектора \vec{E} , а для хвилі E_{mn} це силові лінії вектора \vec{H});

– зображаємо силові лінії поля, яке характеризується наявністю як поперечних, так і повздовжніх складових.

При зображенні структури поля слід пам'ятати, що:

– вектори \vec{E} і \vec{H} взаємоперпендикулярні у кожній точці простору;

– вектор \vec{H} завжди замкнутий сам на себе;

– вектор \vec{E} до ідеального провідника (до стінки хвилевода) завжди підходить по нормалі, а вектор \vec{H} – по дотичній.

Під впливом магнітного поля в стінках хвилеводу породжуються струми провідності, а під впливом електричного поля в порожнині хвилеводу створюються струми зміщення. Вектори густини струмів

провідності $\vec{j}_{\text{пр}}$ визначаються магнітним полем, яке прилягає до стінок хвилеводу так, що $\vec{j}_{\text{пр}} \perp \vec{H}$ і $|\vec{j}_{\text{пр}}| = H_{\tau}$. Вектори густини струмів

зміщення $\vec{j}_{\text{зм}} = \varepsilon \partial \vec{E} / \partial t$ за формою співпадають з конфігурацією

векторів \vec{E} , але зсунуті відносно них на чверть довжини хвилі у напрямку розповсюдження енергії. Умови існування у хвилеводі поля заданого типу визначаються двома факторами: робочою довжиною хвилі і методом збудження. Електромагнітна хвиля поширюється у хвилеводі шляхом послідовних відбиттів від протилежних стінок. Кути φ падіння і відбиття

при цьому залежать від довжини хвилі генератора λ та поперечних розмірів хвилеводу. Існує така довжина хвилі генератора, при якій кути падіння та відбиття φ дорівнюють нулю. При цьому процес передачі енергії по хвилеводу припиняється. Це відбувається тому, що при $\varphi = 0$ хвиля відбивається від протилежних точок на стінках хвилеводу. Довжина хвилі генератора, при якій припиняється передавання енергії у хвилеводі, зветься критичною довжиною хвилі:

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}.$$

Робоча довжина хвилі λ повинна бути менша за критичну (умова збудження поля у хвилеводі).

Можливі три способи збудження хвиль у хвилеводі: електричний – за допомогою електричного зонду; магнітний – за допомогою магнітного зонду (рамка з електричним струмом); електромагнітний – за допомогою випромінюючої щілини. У порожнині хвилеводу збуджуючий елемент слід розташовувати у такому місці та орієнтувати таким чином, щоб збуджувана ним хвиля відповідала структурі поля заданого типу і порядку.

Від критичної довжини хвилі залежать значення:
– фазової швидкості:

$$V_{\text{ф}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}};$$

– групової швидкості:

$$V_{\text{гр}} = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2};$$

довжини хвилі у хвилеводі:

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}};$$

– характеристичного опору і середньої потужності.

Для усунення у хвилеводі паразитних типів хвиль, які можуть існувати при робочій довжині хвилі λ , поряд зі збудженим типом хвилі використовують загороджувальні електричні фільтри. Фільтр складається з набору провідних стержнів, конфігурація яких повторює структуру електричного поля паразитної хвилі. Оскільки на стержнях фільтру виконуються граничні умови ($E_{\tau} = 0$), то фільтр працює як відбивач хвилі відповідного типу.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з:

– відрізка прямокутного хвилеводу з повздовжньою щілиною на широкій стінці. У торцевій частині хвилеводу є два отвори, які використовуються для вводу збуджуючих зондів у вертикальній та горизонтальній площинах.

– генератора надвисоких частот (НВЧ), забезпеченого коаксильним кабелем, що переходить у збуджуючий електричний зонд;

– вимірювального електричного зонду у вигляді металевого стрижня, який виходить з корпусу, де розміщені детектор і частотний фільтр;

– вимірювального підсилювача, який є індикатором напруженості електричного поля;

– решітчастих загороджувальних фільтрів типів хвиль.

Порядок виконання роботи та зміст звіту

1. У залежності від типу збуджуємої хвилі ввести у хвилевід збуджуючий зонд вздовж вертикальної осі (хвиля типу H_{mn}) або вздовж продольної осі (хвиля типу E_{mn}).

2. Користуючись виразом (4.1), визначити значення $\lambda_{кр}$ для хвиль типів H_{10} , H_{20} та E_{11} , E_{21} .

3. Обрати робочу довжину хвилі λ , необхідну для збудження поля H_{10} , враховуючи нерівності $\lambda_{кр}(H_{20}) < \lambda < \lambda_{кр}(H_{10})$.

4. Обрати робочу довжину хвилі, необхідну для збудження поля E_{11} , враховуючи нерівності $\lambda_{кр}(E_{21}) < \lambda < \lambda_{кр}(E_{11})$.

5. Увімкнути генератор та встановити частоту f , яка визначається обраним значенням довжини хвилі λ , що відповідає умовам збудження того чи іншого типу хвиль у хвилеводі ($f = c / \lambda$, де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

6. Помістити вимірювальний зонд у щілину в стінці хвилеводу на невелику глибину і поволі перемістити його вздовж неї, зобразити спостережувальний розподіл складової E_y вздовж осі Z та пояснити причину її нерівномірності.

7. За допомогою вимірювального електричного зонду, сполученого з індикатором, з'ясувати структуру електромагнітного поля у напрямку трьох взаємоперпендикулярних осей координат, що зв'язані з ребрами хвилеводу. Для цього необхідно:

– розташувати зонд біля відкритого кінця хвилеводу по центру поперечного перерізу вздовж продольної осі Z ; впевнитись, що збуджено

поле заданого типу (для повздовжньо-магнітної хвилі H_{10} повздовжня складова електричного поля $E_z = 0$, тому і показники індикатора повинні відповідати нулю); для повздовжньо-електричної хвилі E_{11} повздовжня складова електричного поля $E_z \neq 0$, отже показники індикатора повинні відрізнятися від нуля;

– орієнтуючи зонд паралельно вертикальній осі і переміщуючи його вздовж горизонтальної осі, впевнитися, що кількість стоячих напівхвиль (варіацій поля) вздовж широкої стінки хвилеводу відповідає необхідному значенню m . Зобразити спостережувані епюри;

– орієнтуючи зонд паралельно горизонтальної осі і переміщуючи його вздовж вертикальної осі, перевірити кількість напівхвиль (варіацій поля) n вздовж вузької стінки хвилеводу. Зарисувати спостережувані епюри;

8. Зобразити у вигляді ескізу досліджувану структуру поля та порівняти з даними теорії .

9. Збільшуючи довжину хвилі генератора λ (зменшуючи частоту f) впевнитися, що при $\lambda \geq \lambda_{кр}$ хвиля в хвилеводі не збуджується.

10. Випробувати фільтруючі властивості решітчастих фільтрів. Для цього встановити у хвилеводі фільтр, що досліджується, та виконати дії відповідні до пунктів 6 та 7.

11. Зобразити ескіз конфігурації силових ліній векторів густин струмів провідності у стінках та струмів зміщення в порожнині хвилеводу для хвиль типів H_{10} та E_{11} .

Запитання для самоперевірки

1. Які типи хвиль та при яких умовах можуть поширюватися у хвилеводі прямокутного перерізу?

2. Які існують методи збудження хвилеводів і як їх реалізувати?

3. З яких умов обирається робоча частота генератора при збудженні хвилі означеного типу?

4. Чому вектор густини струму зміщення $\vec{J}_{зМ}$ виявляється зсунутим на відстань $\lambda_{хв}/4$ відносно вектора напруженості електричного поля \vec{E} у напрямку переносу енергії по хвилеводу?

5. Які фактори впливають на конфігурацію та просторове положення силових ліній векторів густин струмів зміщення $\vec{J}_{зМ}$ та провідності \vec{J} ?

6. В якому випадку щілина, що утворена у стінці хвилеводу, буде випромінюючою?

7. На якому принципі заснована робота електричних фільтрів типів хвиль?

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛЯ У ХВИЛЕВОДІ КРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ

Мета роботи: вивчення основних властивостей типів хвиль, що поширюються у хвилеводах круглого перерізу радіуса R та умов їх збудження; ознайомлення з конструктивними особливостями елементів зв'язку радіохвилеводів із зовнішніми колами; засвоєння методики збудження полів заданого типу у круглому хвилеводі на прикладі хвиль H_{11}^0 та E_{01}^0 ; освоєння методики експериментального дослідження полів у хвилеводах; дослідження загороджувальних решітчастих фільтрів типів хвиль.

Короткі теоретичні відомості

У хвилеводах круглого перерізу, як і в прямокутних хвилеводах, можна збуджувати хвилі типів H_{mn}^0 і E_{mn}^0 . Індекс m дорівнює кількості стоячих напівхвиль (варіацій поля), які укладаються на півколі поперечного перерізу хвилевода, а індекс n – кількості максимальних значень напруженості поля вздовж радіуса поперечного перерізу хвилеводу.

На стінці хвилеводу, незалежно від її форми, завжди виконуються граничні умови. Тому для будь-якої хвилі, що збуджується в прямокутному хвилеводі, можна знайти аналог у хвилеводі круглого перерізу. Цей аналог можна створити шляхом "механічної деформації" прямокутного хвилеводу з збудженою в ньому хвилею, у хвилевід круглого перерізу.

Аналогом хвилі H_{10} в прямокутному хвилеводі є хвиля H_{11}^0 , що збуджується в круглому хвилеводі. Хвиля E_{11} у прямокутному хвилеводі відповідає хвилі E_{01}^0 у круглому хвилеводі. Критична довжина хвилі у

круглому хвилеводі визначається порядком хвилі та радіусом поперечного перерізу хвилеводу з урахуванням коефіцієнта пропорційності, який є мінімальним значенням кореня відповідного рівняння Бесселя.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка для дослідження структури поля хвиль, що поширюються у круглому хвилеводі, складається з тих же елементів, що й у попередній роботі. Для під'єднання збуджуючих зондів у хвилеводі з торцевого кінця передбачені відповідні отвори. У стінці хвилеводу паралельно повздовжньої осі прорізана вузька щілина, яка використовується при дослідженні розподілу напруженості поля за повздовжньою віссю хвилеводу. Решітчасті фільтри виконані з мідних провідників, форма яких повторює форму поперечних складових вектора напруженості електричного поля, що збуджується у хвилеводі.

Порядок виконання роботи і зміст звіту

1. Залежно від типу хвилі, що збуджується, ввести у хвилевід круглого перерізу електричний збуджуючий зонд, орієнтуючи його перпендикулярно осі (хвиля типу H_{11}^0) або вздовж осі (хвиля типу E_{01}^0).

2. Розрахувати критичні довжини хвиль :

$$\lambda_{\text{кр}} (H_{11}^0) = 3,41R,$$

$$\lambda_{\text{кр}} (E_{01}^0) = 2,61R,$$

$$\lambda_{\text{кр}} (E_{11}^0) = 1,64R.$$

та вибрати робочу довжину хвилі генератора λ , необхідну для збудження поля заданого типу, враховуючи нерівності:

$$\lambda_{\text{кр}} (E_{01}^0) < \lambda < \lambda_{\text{кр}} (H_{11}^0) \text{ – для хвилі типу } H_{11}^0,$$

$$\lambda_{\text{кр}} (E_{11}^0) < \lambda < \lambda_{\text{кр}} (E_{01}^0) \text{ – для хвилі типу } E_{01}^0.$$

3. Увімкнути генератор та встановити необхідне значення частоти, що відповідає робочій довжині хвилі λ .

4. За допомогою вимірювального зонду, з'єданого з індикатором, з'ясувати структуру хвилі у хвилеводі в азимутальному (індекс m) та радіальному (індекс n) напрямках. З цією метою необхідно виконати:

– розташувавши зонд біля відкритого кінця хвилеводу по центру перерізу та орієнтуючи його паралельно повздовжньої осі, впевнитися у

тому, що збуджується хвиля заданого типу (для хвилі типу H_{mn}^0 показники індикаторі поля повинні дорівнювати нулю, а для хвилі типу E_{mn}^0 – повинні відрізнитись від нуля);

– орієнтуючи зонд паралельно площині поперечного перерізу хвилевода та фіксуючи кінець зонду у центрі перерізу, обертати зонд по колу, що утворює переріз хвилеводу. Упевнитися в тому, що кількість варіацій поля вздовж кола відповідає очікуваному значенню індекса m . Результати досліджень відобразити у вигляді епюри;

– орієнтуючи зонд паралельно площині поперечного перерізу, переміщувати його вздовж радіуса R . Упевнитися у тому, що кількість максимальних значень поля відповідає очікуваному значенню індекса n . Результати досліджень відобразити у вигляді епюри;

5. Увести зонд в щілину, прорізану в стінці хвилевода, переміщувати його за повздовжньою віссю, досліджуючи закон розподілу напруженості електричного поля у повздовжньому напрямку. Закономірність, що спостерігається, відобразити у вигляді епюри.

6. Зробити ескіз структури поля, яка спостерігається, і порівняти її з даними теорії. Визначити напрям поширення хвилі у хвилеводі, що відповідає відображеній структурі поля.

7. Зробити ескізи структури струмів провідності в стінках хвилеводу і струмів зміщення у його порожнині.

8. Збільшити довжину хвилі генератора і упевнитися у тому, що при $\lambda > \lambda_{кр}$ поле заданого типу в хвилеводі не збуджується.

9. Дослідити фільтруючі особливості решітчастих фільтрів, установивши їх у хвилеводі і зробивши такі ж самі операції, як і при дослідженні структури поля по пункту 4.

Запитання для самоперевірки

1. Яка довжина хвилі у хвилеводі зветься критичною?
2. Які типи хвиль і при яких умовах можуть розповсюджуватися по хвилеводу круглого перерізу?
3. Який зміст індексів m і n стосовно круглого хвилеводу?
4. Доведіть, що хвилі H_{11}^0 та E_{01}^0 у круглому хвилеводі є аналогами хвиль H_{10} і E_{11} у прямокутному хвилеводі відповідно.

Лабораторна робота 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОХВИЛЕВОДУ

Мета роботи: на прикладі хвилі H_{10} ознайомитися з дисперсійними властивостями радіохвилеводу.

Короткі теоретичні відомості

Для передачі інформації використовуються модульовані сигнали, тобто сигнали, що складаються з ряду гармонік з визначеними фазовими співвідношеннями. Оскільки фазова та групова швидкості залежать від довжини хвилі (від частоти), то на виході хвилеводу вихідні фазові співвідношення гармонік порушуються. Відрізняється і час поширення по хвилеводу енергії тієї або іншої гармоніки сигналу. Тому форма огинаючої вихідного сигналу відрізняється від форми огинаючої вхідного сигналу. Явище залежності фазової і групової швидкостей від довжини (частоти) хвилі джерела збудження поля зветься дисперсією, а середовище, в якому це явище спостерігається, є дисперсійним середовищем. Ознакою дисперсійності середовища є також нелінійна залежність довжини хвилі в ньому від довжини хвилі джерела поля λ . У хвилеводі це залежність довжини хвилі $\lambda_{\text{хв}}$ збудженого поля в ньому від довжини хвилі генератора λ .

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з генератора діапазона НВЧ, вимірювальної лінії типу ИВЛУ–140 та низькочастотного вимірювального підсилювача. Генератор призначається для збудження в вимірювальній лінії хвилі типу H_{10} . Низькочастотний підсилювач виконує функцію індикаторного пристрою. Сигнал на вхід підсилювача подається з детектора вимірювальної лінії.

Порядок виконання роботи та зміст звіту

1. Ознайомившись з приладами та пристроями установки, увімкнути живлення приладів.

2. Дослідити залежність довжини хвилі в хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$ від довжини хвилі генератора λ . Для цього необхідно:

– налаштувати генератор на обрану частоту і визначити відповідну довжину хвилі;

– створити режим стоячих хвиль у хвилеводі вимірювальної лінії, закривши спеціальною заглушкою його вихідний фланець;

– увімкнути генератор в роботу в режимі "маніпуляція";

– підстроїти резонансні контури детектора та зонда вимірювальної лінії по максимальним показникам індикатора вимірювального підсилювача (цю операцію необхідно повторювати при кожній зміні частот);

– переміщуючи зонд вздовж щілини вимірювальної лінії, визначити по метричній шкалі відстань між двома сусідніми вузлами напруженості електричного поля стоячої хвилі, орієнтуючись при цьому на мінімальні показники індикаторного пристрою. Обчислити довжину хвилі $\lambda_{\text{ХВ}}$ у хвилеводі як подвійну відстань між найближчими вузлами.

3. Аналогічним чином вимірити довжину хвилі у хвилеводі ще для 8 -10 довжин хвиль генератора λ , розносячи їх рівномірно по робочому діапазону. Отримані дані занести в таблицю.

4. На основі даних таблиці побудувати графік залежності довжини хвилі у хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$ від довжини хвилі генератора λ .

5. Для тих же значень довжини хвилі генератора λ побудувати теоретичну криву відповідної залежності довжини хвилі у хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$ від λ , використовуючи відоме дисперсійне співвідношення:

$$\lambda_{\text{ХВ}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}},$$

де $a=23$ мм – розмір широкої стінки хвилеводу вимірювальної лінії. Порівняти отримані результати.

6. Обчислити значення характеристичного опору хвилеводу, використовуючи вираз

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

де $W=377$ Ом. Побудувати графік залежності $R_z = f(\lambda)$.

7. Побудувати залежність від довжини хвилі генератора:

– фазової швидкості хвилі

$$V_{\text{ф}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}};$$

– групової швидкості хвилі

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

– коефіцієнта фази хвилі

$$\beta(H_{10}) = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4a^2}}.$$

8. Пояснити отримані результати.

Запитання для самоперевірки

1. Яке явище зветься дисперсією та як проявляються дисперсійні властивості хвилеводу?
2. У чому причина дисперсійних властивостей хвилеводу?
3. Яким чином можна виміряти довжину хвилі у хвилеводі?
4. За якою ознакою встановлюється дисперсійний характер хвилеводу як середовища поширення електромагнітного поля ?

Лабораторна робота 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДНИХ З'ЄДНАНЬ ТА ПЕРЕХОДІВ

Мета роботи: експериментальна оцінка ступеня порушення однорідності хвилеводного тракту при введенні в нього з'єднань та переходів.

Короткі теоретичні відомості

Неякісні зчленування хвилеводних трактів, уведення у хвилеводні тракти штучних неоднорідностей є причиною можливого порушення узгодженого режиму роботи лінії передачі. Це пояснюється тим, що від місця зосередженості неоднорідності та від місця зчленування хвилеводів частина енергії, яка напрямлена від джерела в

навантаження, відбивається. Як наслідок, в лінії передачі встановлюється режим, несприятливий як для джерела, так і для лінії – режим стоячих хвиль. Прикметою наявності стоячих хвиль в лінії передачі або в просторі є чергування мінімальних та максимальних значень амплітуди поля в точках, відстань між якими дорівнює чверті довжини хвилі.

Режим роботи в лінії передачі можна оцінити за значенням коефіцієнта стоячих хвиль – КСХ, або за значенням коефіцієнта біжучої хвилі – КБХ:

$$\text{КБХ} = \frac{E_{min}}{E_{max}},$$

де E_{min} і E_{max} – значення мінімальної і максимальної амплітуди поля в лінії передачі. Коефіцієнти стоячої та біжучої хвиль обернено пропорційні:

$$\text{КСХ} = \frac{1}{\text{КБХ}}.$$

При передачі енергії намагаються забезпечити КСХ (КБХ) близький до одиниці.

1. Фланцеві з'єднання.

З'єднання окремих хвилеводних секцій можна здійснити, наприклад, якщо застосувати плоскі контактні фланці. Поверхні фланців шліфують і притирають один до одного. При контактному фланцевому з'єднанні необхідно забезпечити співосність секцій.

2. Дросельно-фланцеві з'єднання.

При дросельно-фланцевому з'єднанні вимоги до співосності та якості механічного з'єднання фланців менш жорсткі. Конструкція дросельно-фланцевого з'єднання у розрізі показана на рис. 7.1.

Принцип роботи дросельного з'єднання заснований на властивостях півхвильового та чвертьхвильового відрізків довгої лінії в режимі холостого ходу та короткого замкнення і полягає у наступному. При хорошому контакті в місцях з'єднання фланців 1 дросельна канавка 2 представляє собою Г-подібний напівхвильовий відрізок довгої лінії, закорочений на кінці.

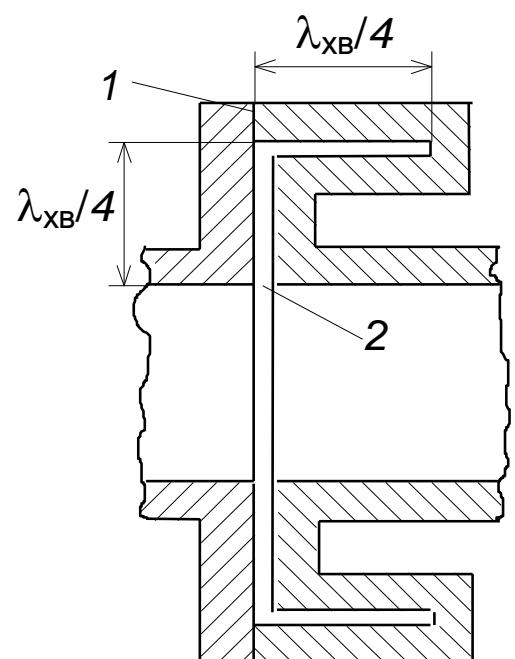


Рис. 7.1

відомо, що при цьому вхідний опір лінії виявляється рівним нулю. Цим забезпечується електрична безперервність секцій, що з'єднуються. При наявності зазору в місці з'єднання фланців 1 вертикальна частина дросельної канавки працює як чвертьхвильова довга лінія, що розімкнена на кінці. Її вхідний опір теж дорівнює нулю. Отже, незалежно від якості з'єднання секцій в точці 1, на вході дросельної канавки завжди існує режим короткого замкнення, що забезпечує протікання струмів вздовж хвилеводу та високі якісні показники дросельного з'єднання.

3. Згини хвилеводів.

Повороти хвилеводних трактів у різних площинах здійснюються за допомогою кутових та радіусних згинів, а також скручених хвилеводів. Останні призначені для зміни площини поляризації хвилі. Для зменшення відбиття хвилі довжина ℓ ділянки неоднорідного хвилеводу повинна бути не меншою за подвоєну довжину хвилі у хвилеводі. Звичайно $\ell = (3...5)\lambda$.

4. Зчленування, що обертаються.

У деяких видах радіопристроїв, наприклад, у радіолокаційних системах, виникає необхідність у підводі високочастотної енергії до антен, що обертаються. У цих випадках у радіохвилевід запроваджується вузол, що забезпечує можливість обертання однієї частини хвилеводу відносно іншої без впливу на характеристики радіохвилеводного тракту в цілому. Такий вузол називають зчленуванням, що обертається. Ескіз розрізу конструкції зчленування, що обертається, показано на рис. 7.2. Тут прийняті такі позначки: 1 – прямокутні хвилеводи; 2 – круглі хвилеводи; 3 – дросельно-фланцеве з'єднання.

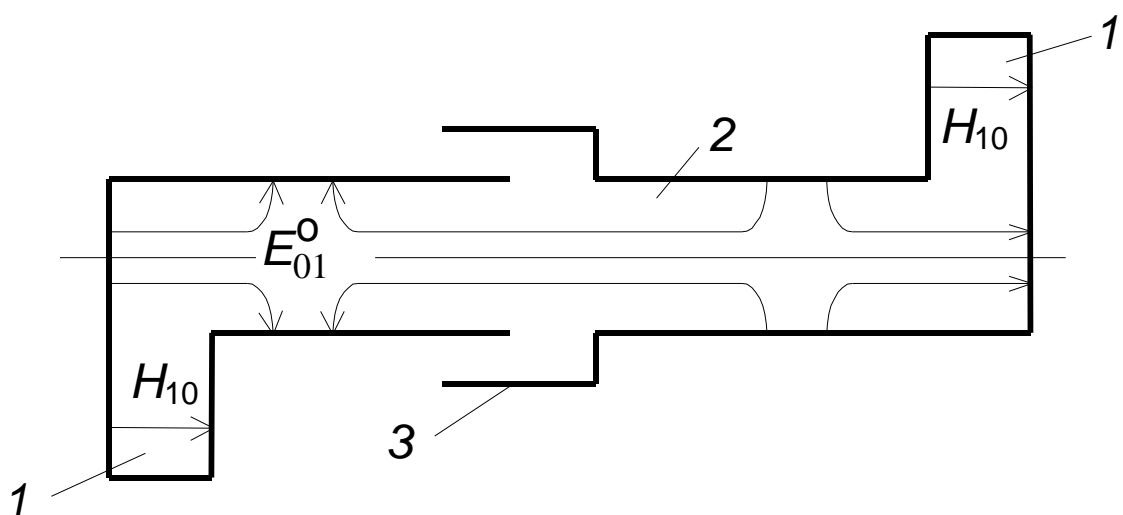


Рис. 7.2

У круглих хвилеводах 2 використовують електромагнітні поля з коловою симетрією, наприклад, поле типу E_{01}^o . У прямокутних хвилеводах 1, котрі утворюють вхідне та вихідне плечі з'єднання, використовується хвиля основного типу - H_{10} . Дросельно-фланцеве з'єднання 3 усуває залежність якості з'єднання круглих хвилеводів від значення зазору при їх обертанні.

Опис лабораторної установки

До комплексу лабораторної установки для дослідження хвилеводних зчленувань та переходів входять: генератор трисантиметрового діапазону; підсилювач, що використовується як індикатор; хвилеводна вимірювальна лінія; відрізок прямокутного хвилеводу з контактними фланцями; відрізок прямокутного хвилеводу з дросельним фланцем; набір інших досліджуваних елементів (хвилеводні згини, обертач площини поляризації, дросельний та гофрований гнучкі хвилеводи); зчленування, що обертаються; узгоджене навантаження (рупор або поглинаюче навантаження), яке призначене для усунення хвилі, відбитої від відкритого фланця хвилеводного елементу; станина для кріплення елементів, штатив.

Порядок виконання роботи та зміст звіту

1. Ознайомитися з конструкцією елементів, що досліджуються у роботі, та зобразити їх ескізи.
2. Зібрати схему, яка зображена на рис. 7.3.

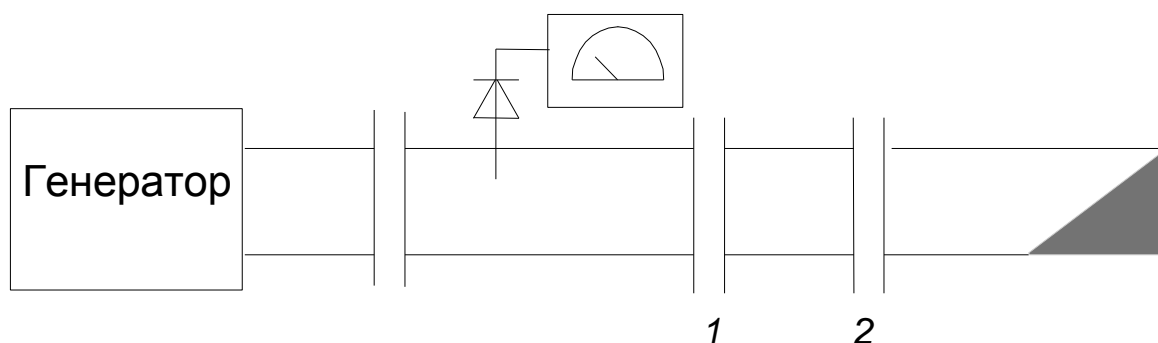


Рис. 7.3

3. Увімкнути генератор та підсилювач, налаштувати їх та вимірювальну лінію згідно з інструкцією з експлуатації.

4. Переміщуючи зонд вимірювальної лінії, визначити максимальне та мінімальне значення напруженості електричного поля E_{max} та E_{min} . Обчислити значення коефіцієнту біжучої хвилі $KBX = U_{min} / U_{max}$, де U – значення показника індикатора.

5. Увести зазор між контактними фланцями у перерзі 1, відповідний значенням $\ell = 0,5; 0,1; 1,5$. Обчислити для цих значень повітряного зазору відповідні КБХ.

6. Побудувати залежність $KBX = f_1(\ell)$.

7. Замінити у схемі досліджуваній контактний фланець дросельним. При цьому в точці 2 (рис. 7.3) з'єднання повинно лишитись такого ж типу, як і в попередньому випадку.

8. Зробити операції, відповідні пункту 5.

9. Побудувати залежність $KBX = f_2(\ell)$ (залежності $KBX = f_1(\ell)$ і $KBX = f_2(\ell)$ рекомендовано зображати на одному рисунку).

10. Порівняти та дати оцінку отриманим результатам.

11. Виміряти та дати оцінку КБХ решти досліджуваних елементів, по черзі з'єднуючи їх з вимірювальною лінією дросельними фланцями та навантажуючи узгодженням навантаженням.

– порівняти КБХ для різноманітних кутових та радіусних згинів, пояснити результати;

– встановити залежність КБХ від кута повороту зчленувань, що обертаються, знімаючи показники через кожні $35^\circ - 40^\circ$;

– оцінити вплив на КБХ викривлень продольної осі гнучкого хвилеводу.

12. Порівняти КБХ гофрованого та дросельного гнучких хвилеводів.

Запитання для самоперевірки

1. Які види з'єднань хвилеводів Вам відомі?
2. Який принцип роботи дросельного з'єднання?
3. Які переваги та недоліки має дросельне з'єднання у порівнянні з контактним з'єднанням?
4. Як оцінити якість елементів хвилеводних трактів?

Лабораторна робота 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДНИХ ТРІЙНИКІВ

Мета роботи: вивчення конструкції та експериментальна перевірка властивостей основних видів хвильоводних розгалужень: E - та H -трійників.

Короткі теоретичні відомості

До найпростіших розгалужень хвильоводних трактів відносяться трійники, утворені основним хвильоводом та розгалуженням по широкій або вузькій стінці. Розгалуження на широкій стінці стає паралельним площині вектора \vec{E} хвилі основного типу, тобто хвилі H_{10} . Тому таке розгалуження зветься E -трійником (рис. 8.1).

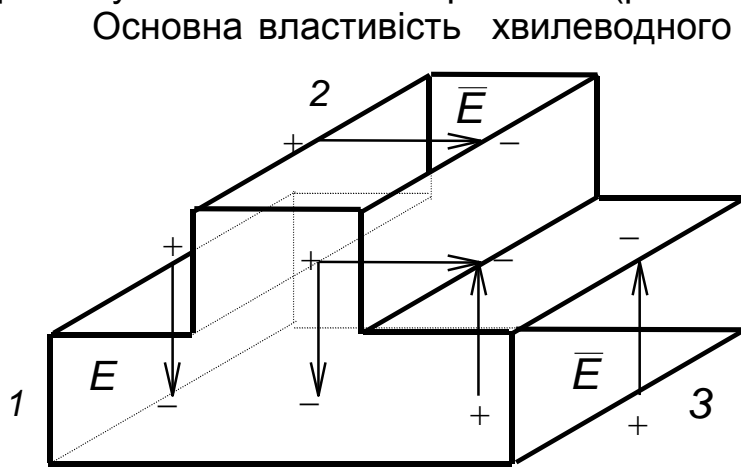


Рис. 8.1

Основна властивість хвильоводного E -трійника полягає в тому, що при збудженні його через E -плече (плече 2) та рівності навантажень в його бокових плечах потужність (енергія) хвилі розподіляється між цими плечами порівну, а електричні складові в цих плечах на рівній відстані від площини симетрії знаходяться у протифазі.

Якщо розглянути напрямки повздовжних струмів провідності у широких стінках хвильоводів, можна перекопати у тому, що еквівалентною схемою E -трійника є послідовне з'єднання довгих ліній.

Розгалуження хвильоводу, що виконане на його вузькій стінці, лежить в площині вектора \vec{H} хвилі основного типу. Тому таке розгалуження зветься H -трійником (рис. 8.2). H -трійник характеризується такими властивостями: при збудженні трійника через H -плече (плече 2) та рівності навантажень в його бокових плечах потужність хвилі розподіляється між цими плечами порівну, а складові вектора напруженості електричного поля на однакових відстанях від вертикальної площини симетрії трійника знаходяться у фазі.

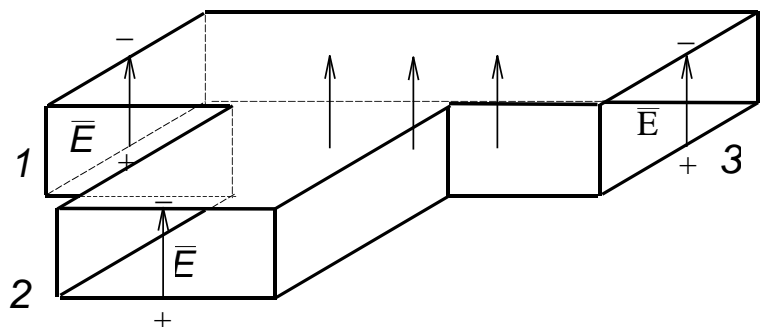


Рис. 8.2

Еквівалентною схемою хвилеводного H -трийника є паралельне з'єднання довгих ліній.

Опис лабораторної установки

Експериментальна установка містить: генератор, вимірювальний підсилювач, детекторну секцію, узгодженне навантаження, реактивне навантаження, E - та H -трийники T - і Y -образної форми.

Порядок виконання роботи та зміст звіту

1. Вивчити конструкцію та зобразити ескізи трийників, що досліджуються.

2. Перевірити електричну симетрію плечей T - та Y -образних трийників. Для цього потрібно:

– зібрати схему, показану на рис. 8.3, взявши будь-який з існуючих трийників, наприклад, Y -образний H -трийник;

– увімкнути живлення генератора та підсилювача-індикатора, налаштувати їх згідно інструкції з експлуатації;

– підстроїти поршень детекторної секції по максимальному показнику індикатора та зафіксувати відповідні значення;

– перемістити детекторну секцію з плеча 2 (рис. 8.3) в плече 3, та зафіксувати показники індикатора;

– підключити трийник до генератора через плече 2 і, не змінюючи настройки детекторної секції, виконати аналогічні виміри;

– зробити те ж саме при збудженні трийника з боку плеча 3;

– аналогічним чином дослідити електричну симетрію інших трийників;

– порівняти отримані результати та зробити висновки.

3. Дослідити взаємний фазовий зсув вектора напруженості електричного поля хвилі H_{10} у відповідних бічних плечах T -образних E - та H -трийників. Для цього необхідно:

– зібрати схему (рис. 8.4), взявши для дослідження, наприклад, T -образний трийник типу H ;

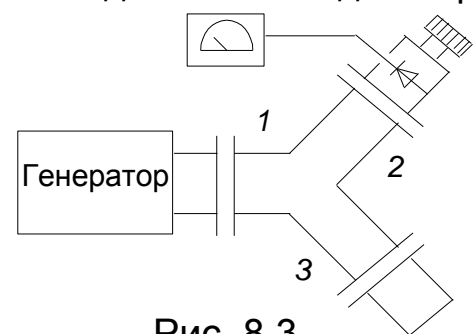


Рис. 8.3

– змінюючи положення поршня реактивного навантаження, яке імітує когерентний генератор, визначити довжину хвилі у хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$ як подвоєну різницю координат двох найближчих вузлів напруженості електричного поля. Координати вузлів стоячих хвиль відраховуються за лімбом реактивного навантаження. Зареєструвати положення вузлів у бічному плечі;



Рис. 8.4

– встановити поршень змінного реактивного навантаження в положення, при якому покази індикатора стануть нульовими;

– замінити в схемі *H*-трийник трийником типу *E*. Упевнитися в тому, що при відміченому раніше положенні поршня реактивного навантаження показники індикатора відповідають максимальному значенню напруженості електричного поля;

– змінюючи положення поршня реактивного навантаження, зафіксувати по шкалі лімба відстань до найближчого вузлового значення напруженості

електричного поля;

– враховуючи, що через відбиття від поршня реактивного навантаження хвиля проходить одну й ту ж відстань двічі, порівняти відстань ΔZ , на яку перемістили поршень, з довжиною хвилі $\lambda_{\text{ХВ}}$ в хвилеводі.

4. Оцінити фазовий зсув, що відповідає відстані $2Z_0$ за формулою:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{ХВ}}} 2Z_0$$

і зробити необхідні висновки.

5. Дослідження фазових зсувів в плечах *Y*-образних хвилеводних розгалужень здійснити за аналогічною методикою.

Запитання для самоперевірки

1. Який трийник зветься трийником типу *H* і який – типу *E*?

2. Які еквівалентні схеми H - та E -трійника?
3. Якими особливостями характеризуються трійники, що виконані у різних площинах, коли їх використовують як подільники потужності?
4. Якими особливостями характеризуються трійники, що виконані у різних площинах, коли їх використовують як суматори потужності?
5. Які технічні задачі можна вирішити, якщо використати властивості E - та H -трійників?

Лабораторна робота 9

ДОСЛІДЖЕННЯ МОСТОВИХ З'ЄДНАНЬ

Мета роботи: вивчення конструкції та перевірка основних властивостей подвійного T -образного моста та кільцевого моста.

Короткі теоретичні відомості

До мостів відносяться деякі типи зворотних чотирিপлевових хвилеводних пристроїв. Ознакою будь-якого мостового пристрою є відсутність електромагнітного зв'язку між двома його плечами. Такий пристрій утворюється, наприклад, при об'єднанні в єдину конструкцію E - та H -трійників. Його називають подвійним T -образним мостом (рис. 9.1).

Властивості моста визначаються властивостями E - та H -трійників. При збудженні моста, наприклад, через E -плече (плече 2, рис. 9.1) та рівності навантажень в його бокових плечах потужність хвилі розподіляється порівно між боковими плечами (1, 3), але в H -плече (плече 4) енергія хвилі не поширюється тому, що на його вході створюються два протифазних вектори напруженості електричного поля (див. властивості H -трійників).

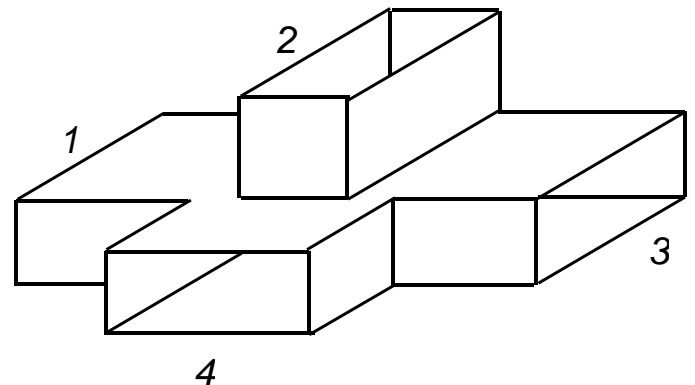


Рис. 9.1

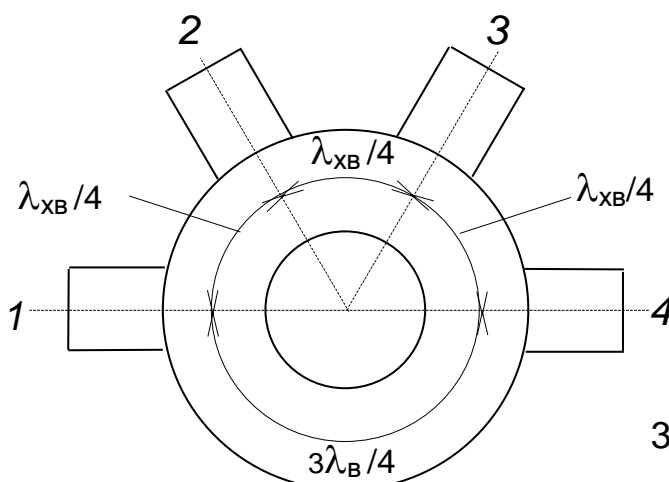


Рис. 9.2

При збудженні моста через плече 4 розв'язаним буде плече 2 (див. властивості E -трійників).

При поєднанні в одній конструкції чотирьох трійників одного типу та згинанні основного хвилеводу в кільце утворюється хвилеводне розгалуження, що

зветься кільцевим мостом (рис. 9.2).

Довжина кільця всього тракту вздовж середньої лінії дорівнює $\frac{3}{2}\lambda_{\text{ХВ}}$. Відстані між сусідніми плечами складають $\frac{1}{4}\lambda_{\text{ХВ}}$, а відстань між

плечами 1 і 4 дорівнює $\frac{3}{4}\lambda_{\text{ХВ}}$. Припустимо, що кільцевий міст виконано з

E -трийників, а хвиля поступає в плече 2. Тоді з плеча 2 хвилі розходяться в різних напрямках у протифазі відносно точки розгалуження (властивість E -трийника). До плеча 4 ці хвилі підходять з різних напрямків у фазі, тому в плечі 4 хвилі не буде. До плеч 1 та 3 ці ж хвилі з різних напрямків підходять у протифазі, тому в цих плечах збуджується електромагнітне поле.

Властивості моста такого типу не зміняться, якщо в його основу покласти H -трийники.

Опис лабораторної установки

До комплексу лабораторної установки для дослідження хвилеводних мостів входять: генератор НВЧ, подвійний E -образний міст, кільцевий міст, детекторна секція, два узгодженні навантаження, реактивне навантаження, вимірювальний підсилювач, заглушка.

Порядок виконання роботи та зміст звіту

1. Ознайомитися з конструкцією подвійного T -образного моста та зарисувати його.

2. Перевірити електричну симетрію бічних плечей моста та розв'язку між E - та H - плечами. Для цього:

- підключити міст до виходу генератора через H -плече;
- увімкнути і налаштувати генератор згідно інструкції з експлуатації;
- підімкнути до одного з бічних плечей мосту узгоджене навантаження, а до іншого – детекторну секцію, налаштувати останню по максимальним показникам α_1 індикатора, зафіксувати ці показники;

- поміняти місцями детекторну секцію та узгоджене навантаження. Зафіксувати показники індикатора α_2 та порівняти їх з попередніми. Зробити висновки про симетрію бічних плечей моста;

- для перевірки розв'язки між E - та H - плечами детекторну секцію необхідно підімкнути до E -плеча та від'єднати узгоджене навантаження з бічного плеча;

– фіксуючи показники індикатора, впевнитись, що *E*- та *H*-плечі розв'язані;

– закорочуючи одне з плечей спеціальною заглушкою, впевнитися, що розв'язок між плечами порушується;

3. Підімкнути до бічних плечей узгоджені навантаження. Зафіксувати показники індикатора α_3 , підімкнутого до *E*-плеча.

4. Підімкнути *T*-образний міст до генератора через *E*-плече і проробити операції аналогічні попереднім при перевірці електричної симетрії бічних плечей моста і наявності розв'язки між *E*- та *H*-плечами.

5. Підімкнути міст до генератора через одне з бокових плечей і виконати ті ж операції.

6. Підімкнути до одного з бокових плечей моста генератор, а до іншого бічного плеча – змінне реактивне навантаження, що імітує когеретний генератор, підімкнути до *E*-плеча узгоджене навантаження, а до плеча *H* – налаштовану детекторну секцію.

7. Дослідити властивості *T*-моста. Для цього необхідно:

– переміщуючи поршень реактивного навантаження, зафіксувати його в положенні, що відповідає мінімальному значенню напруженості електричного поля, записати показники α_4 індикатора.

– поміняти місцями узгоджене навантаження та детекторну секцію.

Записати показники α_5 індикатора. Порівняти показники α_5 та α_4 як

$$\delta = 20 \lg \frac{\alpha_5}{\alpha_4}, \text{ дБ};$$

– переміщуючи поршень реактивного навантаження у положення, що відповідає найближчому мінімальному значенню, визначити зсув ΔZ вузла напруженості поля;

– порівняти величину $2\Delta Z$ з довжиною хвилі у хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$.

Змінюючи положення поршня реактивного навантаження, визначити довжину хвилі у хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$. Зробити відповідні висновки.

8. Ознайомитися з конструкцією кільцевого моста і дослідити його властивості. Для цього потрібно:

– підімкнути міст до виходу генератора через одне з плечей;

– використовуючи детекторну секцію, з'ясувати як розподіляється енергія між вільними плечами кільцевого моста. Пояснити отримані результати;

– закоротити плече, в якому виявлено енергію;

– з'ясувати, як тепер розподіляється енергія між рештою плечей;

– зробити висновки за результатами досліджень.

Запитання для самоперевірки

1. Який принцип роботи Т-образного моста?
2. За якими умовами порушується розв'язка між Е- та Н- плечами?
3. Якими властивостями характеризується кільцевий міст?

Лабораторна робота 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОН ФРЕНЕЛЯ

Мета роботи: дослідження механізму формування електромагнітного поля в точці прийому і виявлення області простору, яка є істотною при поширенні радіохвиль.

Короткі теоретичні відомості

Електромагнітні поля на частотах від 3 кГц до 3000 ГГц, які використовуються для перенесення інформації, називаються радіохвилями. Поширення радіохвилі у вільному просторі здійснюється як переміщення її фронту, тобто поверхні однакових фаз, що оточують джерело хвилі. На відстанях $r \gg \lambda$ фронт хвилі має сферичну форму, але його фрагмент у деякому тілесному куту можна вважати за плоский. Припустимо, що в момент часу t фронт хвилі міститься на відстані r' від ізотропної збуджуючої антени і на відстані r'' від приймальної так, що $r' + r'' = r$, де r – відстань між фазовими центрами антен. Фазовим центром антени називається точка, відносно якої фронт збудженої хвилі є сферичним. Відповідно до принципу Гюйгенса–Френеля кожна точка простору, якої досягла хвиля, що поширюється, тобто її фронт, стає вторинним джерелом елементарних сферичних хвиль, які внаслідок інтерференції, створюють нову поверхню рівних фаз, тобто новий фронт хвилі. Такою є модель поширення радіохвиль. З цієї моделі видно, що в точку приймання одночасно надходять радіохвилі не тільки від вторинного джерела, що розміщується на прямій r (пряма хвиля), але і від вторинних джерел, якими є усі інші точки фронту хвилі. Відстані від цих точок до точки прийому перевищують відстань r'' . Тому в точку прийому надходять хвилі з різними фазовими зсувами відносно прямої хвилі.

Вторинні фазні джерела, що знаходяться на рівних відстанях від точки прийому, розташовані як точки концентричних кіл, які можна виділити на деякій уявній площині, що перпендикулярна прямій r . Очевидно, що на цій уявній площині можна виділити концентричні кола з більшими радіусами такі, що еквівалентні вторинні джерела, які на них містяться, збуджують у точці приймання хвилі, які опиняються у протифазі з хвилями суміжних кіл і тому їх послаблюють. На площині можна також знайти сукупність концентричних кіл, вздовж яких

розподілені джерела, що збуджують хвилі, які знаходяться у фазі з електромагнітними хвилями першого кола і підсилюють їх. Очевидно, що на уявній площині можна виділити концентричні кільця, у межах яких розподілені вторинні джерела хвиль, між якими фазовий зсув у точці прийому не перевищує 180° . Суміжні ділянки фронту хвилі, що належать цим кільцям, зветься зонами Френеля. Радіус R_n відповідної зони Френеля розраховують за формулою:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda r' r''}{r}},$$

де $n = 1, 2, \dots$

На відміну від інших перша зона Френеля є не кільце, а диск радіусу R_1 . З формули випливає, що максимум радіуса n -ї зони Френеля характерний для фронту, який знаходиться усередині траси, тобто при $r' = r'' = 0,5r$

$$R_{nmax} = 0,5\sqrt{n\lambda r}.$$

При інших співвідношеннях між r' і r'' значення R_n зменшуються. Тому просторові огинаючі зон Френеля n -го порядку є еліпсоїдами обертання з фокусами, що знаходяться в точках розміщення передавальної та приймальної антен (їх фазових центрів). Площини усіх зон Френеля, які розташовані на одній поверхні, однакові:

$$S = \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2) = \frac{\pi\lambda r' r''}{r},$$

але вплив кожної зони на формування результуючого поля є різним. Непарні зони сприяють збільшенню результуючого поля, а парні – його зменшенню. Звичайно визначають наявність перших 6 - 8 зон Френеля. Еліпсоїди обертання, що відповідають цим зонам, обмежують області простору, які є суттєвими при поширенні радіохвиль. Найбільший внесок у формування поля радіохвилі в точці прийому припадає на першу зону Френеля. Перекривання перших зон Френеля будь-якою перешкодою порушує процес формування поля в точці прийому радіохвилі. Мінімальна відстань у вертикальній площині від прямої, що з'єднує фазові центри антен, до вищої точки перешкоди називається просвітом. Величина просвіту є від'ємною, коли перешкода перекриває трасу поширення прямої хвилі (закрита траса), і додатною, якщо перешкода цей напрям не перекриває (відкрита траса).

Опис лабораторної установки

Схематичні зображення лабораторних установок наведені на рис. 10.1 та рис. 10.3. В їх склад входять:

– рупорні антени 2 і 4, які встановлені на нерухомому та рухомому штативах 1 і 3 відповідно;

– металевий суцільний екран 5 на підносі, який можна піднімати або опускати, прикладаючи до нього силу \vec{F} (рис. 10.1);

– з'ємні металеві екрани 5 (рис. 10.3) з отворами, радіуси яких дорівнюють радіусам трьох перших зон Френеля.

Антенна 2 через фідерну лінію підмикається до генератора НВЧ, що збуджує електромагнітне поле на довжині хвилі $\lambda = 3,2$ см. Приймальна антена 4 приєднана до індикатора напруженості поля.

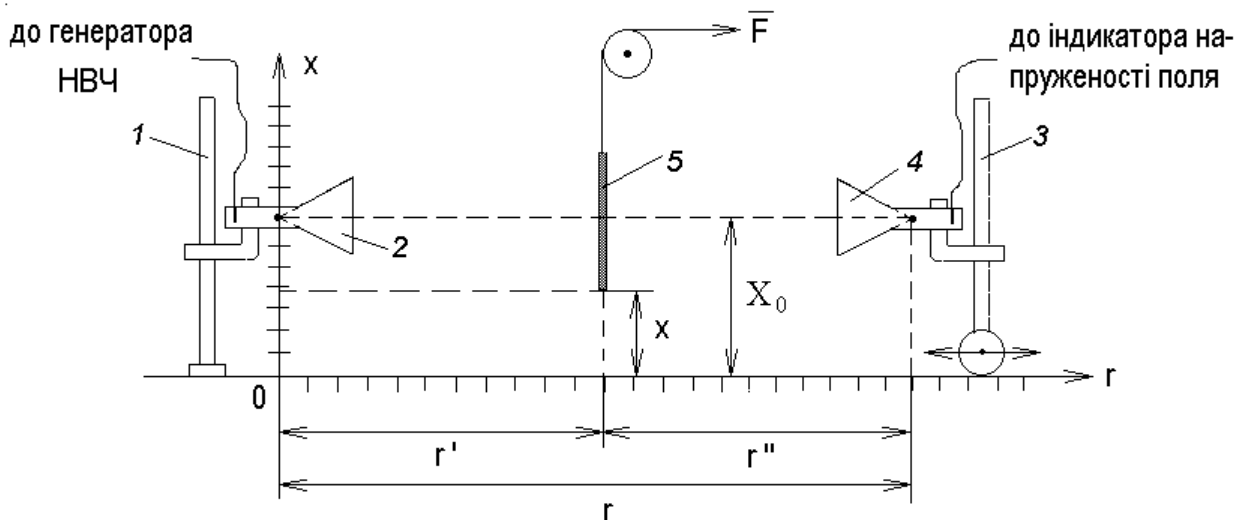
Порядок виконання роботи та зміст звіту

1. Упевнитися в існуванні у просторі зон Френеля та оцінити їхні геометричні розміри.

Для цього потрібно:

– в установці, що зібрана за схемою, зображеною на рис. 10.1, перемістити приймальну антену 4 в положення, при якому виконується рівність $r' = r'' = 0,5r$ (числове значення r зафіксувати);

– встановити рівними і за шкалою X зафіксувати значення відстані X_0 до фазових центрів антен 2 та 4;



– опустити суцільний екран 5 в нижнє положення;

- увімкнути генератор НВЧ;
- повільно піднімати екран і стежити за показами індикатора напруженості електричного поля, які повинні спочатку монотонно зростати, а потім переходити в загасаючі коливання, що свідчить про існування зон Френеля та їх послідовне відкриття;

- при повністю піднятому екрані записати показ I_0 індикатора, якій відповідає напруженості електричного поля E_0 ;

- вернути екран δ у початкове положення;
- знову повільно піднімати екран δ і, записавши покази I індикатора, що відповідають напруженостям поля E , встановити їх залежність від положення нижнього краю екрана на осі X , звернувши увагу на мінімальні та максимальні значення коливань та їх розташування X_1, X_2, X_3, \dots (рис. 10.2) вздовж осі X ;

- поділити усі зафіксовані покази I індикатора на значення I_0 і побудувати графік залежності:

$I/I_0 = E/E_0 = f(x)$, подібний зображеному на рис.10.2;

- побудувати графік залежності E/E_0 від значень просвітів $d = x - X_0$;

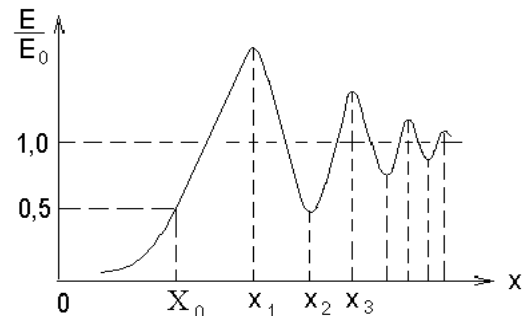


Рис. 10.2

- визначити радіуси $R_{nmax} = x_n - X_0$ виявлених зон Френеля, де $n = 1, 2, 3, \dots$, а також оцінити їхню площу S ;

- за відомими формулами розрахувати ті ж самі характеристики зон Френеля і порівняти їх з результатами експерименту;

- зробити висновки.

2. Дослідити вплив зон Френеля на механізм формування напруженості електричного поля, що створюється в точці прийому радіохвилі.

Для цього необхідно:

- виміряти діаметр D отвору в зйомному екрані, що виділяє першу зону Френеля, і за формулою

$$r = D^2 / \lambda$$

розрахувати відповідну відстань між фазовими центрами антен;

– зняти суцільний екран, забезпечити між фазовими центрами антен відстань r і зафіксувати показ I_0 індикатора, що відповідає напруженості поля E_0 ;

– усередині між антенами 2 та 4 ($r' = r'' = 0,5r$), як показано на рис. 10.3, установити екран 5, який виділяє першу зону Френеля, і записати показ I індикатора, що відповідає напруженості поля E ;

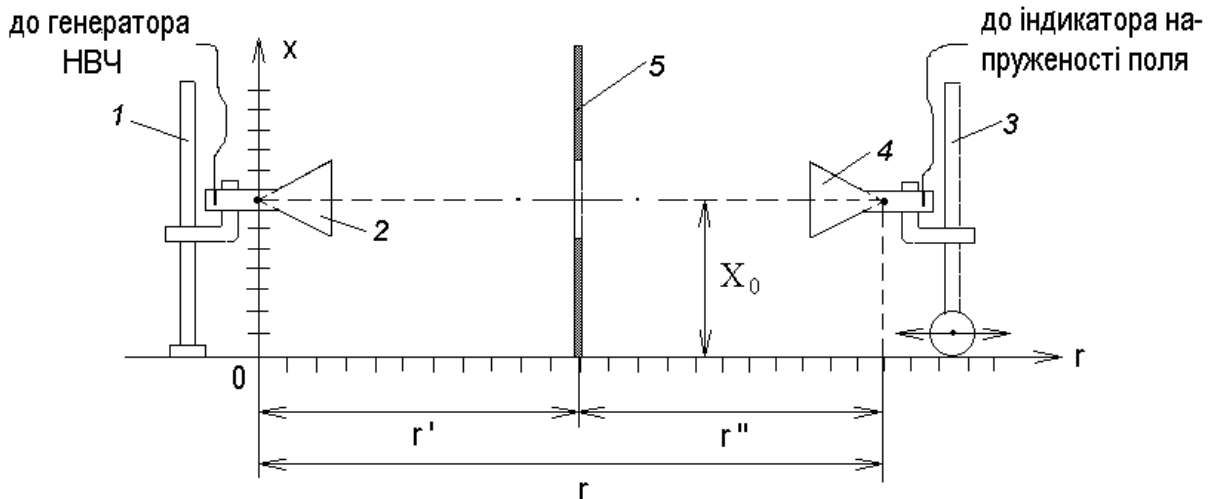


Рис. 10.3

– повторити попередню операцію для інших екранів, що послідовно виділяють дві, три зони Френеля;

– побудувати гістограму залежності відносної напруженості електричного поля E/E_0 від кількості $n = 1, 2, 3, \dots$ виділених зон Френеля

$$n = (R_n / R_1)^2$$

за зразком, що наведений на рис. 10.4;

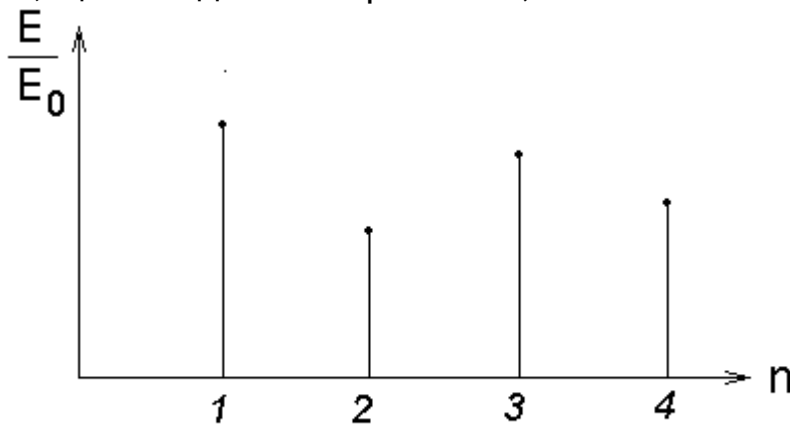


Рис. 10.4

– зробити висновки.

Запитання для самоперевірки

1. У чому сутність принципу Гюйгенса–Френеля і яким є механізм формування та поширення фронту хвилі?
2. Які ділянки фронту хвилі зветься зонами Френеля, чим відрізняються непарні зони від парних і як вони впливають на формування поля в точці прийому радіохвилі?
3. Як значення радіусів зон Френеля і їхня площа залежать від положення фронту хвилі відносно передавальної та приймальної антен?
4. Яку форму і розміри мають ділянки простору, що суттєво впливають на поширення радіохвиль?
5. Від яких зовнішніх обставин залежить напруженість електричного поля радіохвилі, що досліджується у роботі?

Лабораторна робота 11

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ РАДІОХВИЛЬ

Мета роботи: дослідити вплив відбитої хвилі на просторовий розподіл значень напруженості електричного поля в точці спостереження.

Короткі теоретичні відомості

Розподіл напруженості електричного поля радіохвилі в освітленій зоні простору залежить не тільки від конструктивних особливостей передавальних антен, що впливають на їхні характеристики (діаграми) спрямованості $F = (\theta, \varphi)$, а також від властивостей підстилаючої поверхні, над якою поширюється хвиля. Якщо ця поверхня за своїми електромагнітними характеристиками наближується до провідника, то під впливом існуючого електромагнітного поля в ній збуджуються струми провідності, які, в свою чергу, збуджують у просторі ще одне електромагнітне поле, яке є вторинним полем і зветься відбитою радіохвилею. Дію індукованих струмів можна замінити дією еквівалентного ізотропного джерела відбитої хвилі, який відносно площини відбиття є дзеркальним відображенням первинного джерела електромагнітного поля. Точка розташування цього дзеркального джерела відбитої хвилі та точка спостереження є фокусами еліпсоїдів обертання, що характеризують об'єм вільного простору, в якому поширюється відбита хвиля. Еліптичні області поверхні відбиття, які перетинають ці еліпсоїди обертання, є еліптичними зонами Френеля, що

беруть участь у формуванні відбитої радіохвилі. Величини малої L_M та великої L_B осей еліпса першої зони Френеля на відбиваючій поверхні можна розрахувати за формулами:

$$L_M = 2\sqrt{\lambda \frac{r'r''}{r}}, \quad (11.1)$$

$$L_B = \frac{L_M r}{\sqrt{L_M^2 + r^2 \operatorname{ctg}^2 \psi}}, \quad (11.2)$$

де r' та r'' – відстані у горизонтальному напрямку від кінців траси (фазових центрів антен) протяжністю $r = r' + r''$ до точки геометричного відбиття хвилі; ψ – кут падіння хвилі на відбиваючу поверхню; $\operatorname{ctg} \psi = (h_1 + h_2) / r$; h_1 і h_2 – висоти підвісу передавальної та приймальної антен.

Таким чином, в точку спостереження одночасно можуть надійти пряма та відбита когерентні хвилі. Тому значення напруженості електричного поля E в ній будуть суттєво відрізнятися від тієї напруженості E_0 , що визначалась би тільки прямою хвилею. При цьому результуюче поле буде мати інтерференційний характер. Це означає, що в точках простору, де хвилі з'являються у фазі, утворюються максимуми напруженості поля, а в тих точках, де вони будуть у протифазі – мінімуми напруженості.

У загальному випадку напруженість електричного поля визначається співвідношенням:

$$E = E_0 V,$$

де V – модуль інтерференційного множника ослаблення електричного поля. Значення цього модуля для високорозташованих антен (висоти підвісу антен $h > \lambda$) можна розрахувати за формулою:

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos(\beta \Delta r - \Phi)},$$

де R і Φ – модуль та аргумент комплексного коефіцієнта відбиття підстилаючої поверхні; $\beta = 2\pi/\lambda$ – коефіцієнт фази радіохвилі; Δr – різниця між відстанями, які пройшли пряма та відбита хвилі до точки спостереження.

Ця різниця залежить від висоти підвісу збуджуючої антени h_1 , висоти точки спостереження h_2 та кута падіння хвилі ψ на відбиваючу поверхню:

$$\Delta r = 2h_1 \cos \psi,$$

де

$$\psi = \arctg \frac{r}{h_1 + h_2}.$$

Загальні формули, що використовують для розрахунків R і Φ , відносно складні. Вони є різними для полів, у яких вектори напруженості електричного поля \vec{E} паралельні площині падіння (паралельно поляризована хвиля) або перпендікулярні до неї (нормально поляризована хвиля). Нагадуємо, що площина падіння хвилі — це така площина, яка проходить через вектор Умова–Пойнтінга падаючої хвилі та нормаль до поверхні розподілу двох середовищ. Якщо ця поверхня є гарним провідником, то $R = 1$, а $\Phi = 0$ — для нормально поляризованої хвилі та $\Phi = 180^\circ$ — для паралельно поляризованої хвилі. У цьому випадку співвідношення для модуля інтерференційного множника ослаблення спрощується і має вигляд:

$$V = \sqrt{2 \left[1 \pm \cos \left(\frac{2\pi \Delta r}{\lambda} \right) \right]}.$$

Верхній знак перед другим доданком відповідає нормально поляризованої хвилі, а нижній — паралельно поляризованої хвилі. Очевидно, що просторовий розподіл максимумів та мінімумів V залежить від Δr , зокрема від r та ψ . З формули легко виявити точки простору, в яких модуль інтерференційного множника ослаблення радіохвилі буде дорівнювати нулю або двом, і побудувати графіки залежностей V від відношення $\Delta r / \lambda$, відстані r або від сферичних координат.

Ізотропні антени практично реалізувати не можливо. Тому електрорушійна сила (е.р.с.), що індукується у приймальній антені під впливом електричного поля, пропорційна добутку значень нормованих характеристик спрямованості передавальної $F_1(\theta_1, \varphi_1)$ та приймальної $F_2(\theta_2, \varphi_2)$ антен вздовж прямої, що з'єднує їх фазові центри. Кути θ_1, θ_2 відлічують від додатних нормалей до відбиваючої поверхні, що проходить через фазові центри антен. Якщо ця пряма співпадає з повздовжніми осями обох антен, то $\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ$, а $\varphi_1 + \varphi_2 = 0$.

У лабораторній установці використовуються пірамідні рупорні антени, в яких горизонтальний розмір розкриву дорівнює a_p , а вертикальний – b_p . Ширину головної пелюстки нормованої $F(\theta, \varphi)$ на рівні 0,707 максимуму напруженості електричного поля можна оцінити в градусах по приблизними формулами:

– у вертикальній площині (E - площина)

$$2\Delta\theta = 51^\circ \lambda / b_p, \quad (11.3)$$

– у горизонтальній площині (H - площина)

$$2\Delta\varphi = 68^\circ \lambda / a_p.$$

Опис лабораторної установки

Схематичне зображення лабораторної установки наведено на рис. 11.1. В її склад входять:

– пірамідні рупорні антени 1 і 2, які встановлені на нерухомому та рухомому штативах 3 і 4 відповідно;

– діелектрична відбиваюча поверхня (гетинакс), на яку можна покласти металевий лист 5.

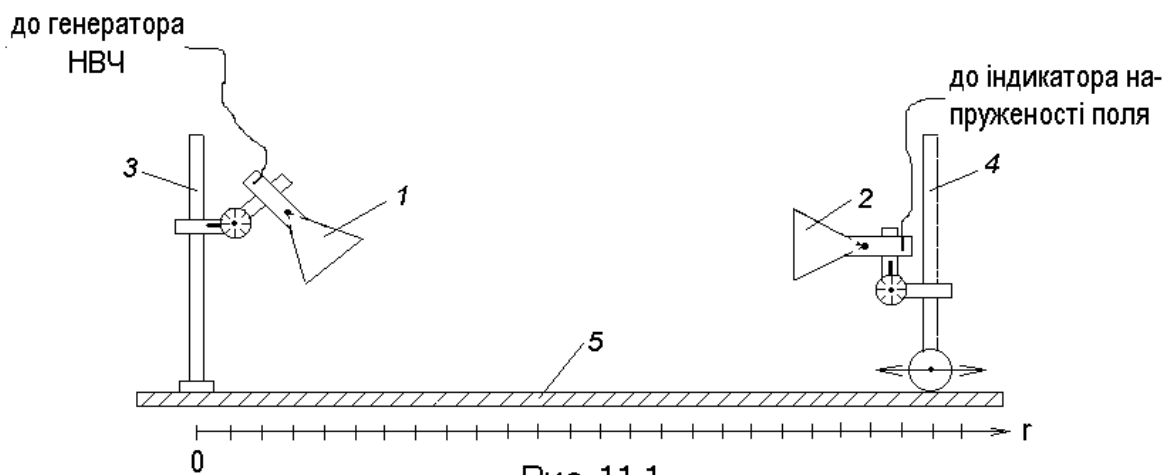


Рис. 11.1

Антенна 1 через фідерну лінію приєднується до генератора НВЧ, що збуджує електромагнітне поле при довжині хвилі $\lambda = 3,2$ см. Приймальна антена 2 приєднана до індикатора напруженості електричного поля.

Порядок виконання роботи та зміст звіту

1. Визначення ширини головної пелюстки діаграми спрямованості (ДС) рупорних антен.

Для цього потрібно:

- виміряти розміри рупору a_p і b_p ;
- відсунути штатив 4 від штативу 3 так, щоб між фазовими центрами антен 1 і 2 існувала віддаль $r > 20\lambda$;
- перемістити антену 1 вздовж штативу 3 в крайню нижню точку, а антену 2 – вздовж штатива 4 в крайню верхню точку, сполучити їх повздовжні осі, визначити кутове положення θ_0 повздовжньої осі приймальної антени 2;
- увімкнути генератор НВЧ і визначити відповідний показ I_0 індикатора поля;
- повернути антену 2 у вихідне положення, при якому $\theta_2=0$ і визначити показ I індикатора;
- збільшувати кути θ_2 і відповідні покази I індикатора поля занести в спеціальну таблицю (табл. 1), уточнити кутові положення максимумів та мінімумів напруженості поля;
- поділити всі покази індикатора, що містяться у табл.1, на максимальне значення I_0 , тобто отримати результати, які характеризують $F_2(\theta_2)$ – нормовану ДС антени 2 за полем в вертикальній площині;
- за даними табл.1 зобразити нормовану ДС $F_2(\theta_2)$ в полярній системі координат;
- на ДС в напрямі кута θ_0 на рівні $F_2(\theta_0) = 0,707$ позначити дві симетричні точки, з'єднати їх прямими лініями з початком координат і транспортиром виміряти кут $2\Delta\theta$ між ними, тобто ширину головної пелюстки ДС рупорної антени у вертикальній площині;
- порівняти отриману ширину пелюстки в градусах зі значенням, що розраховане за формулою (11.3).

2. Дослідити інтерференцію радіохвиль понад діелектричною поверхнею.

Перед тим необхідно:

- установити висоти підвісу обох антен $h_1=h_2=(3-4)\lambda$;
- забезпечити між фазовими центрами антен відстань $r=100$ см – довжина траси.

2.1. Умови: $r = \text{const.}$, $\theta_1 = 90^\circ - \psi = \text{const.}$, $\theta_2 = \text{var.}$

Здійснити наступне:

- за формулою $\psi = \text{arctg}(r / 2h_1)$ розрахувати кут падіння хвилі на діелектричну поверхню і відповідно орієнтувати повздовжню вісь антени 1;
- навколо точки геометричного відбиття хвилі $r' = 0,5r$ з формул (11. 1) і (11. 2) визначити розміри підстилаючої поверхні, яка є суттєвою при формуванні відбитої хвилі, та означити її контур крейдою;
- установити антену 2 в положення $\theta_2 = 0$ і в окрему таблицю (табл. 2) занести відповідний показ індикатора поля I ;
- збільшувати кути θ_2 і відповідні покази I індикатора поля теж заносити в табл. 2, уточнити кутові положення максимумів та мінімумів напруженості поля;
- поділити всі покази індикатора, що містяться у табл. 2, на максимальне значення I_{max} , тобто отримати результати, які характеризують модуль нормованого інтерференційного множника ослаблення V поля в конкретних умовах;
- по даним табл. 2 зобразити V як функцію θ_2 у вигляді графіка в полярній системі координат;
- порівняти графічні зображення $V(\theta_2)$ та $F_2(\theta_2)$ і зробити висновки.

2.2. Умови: $r = \text{const.}$, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = \text{var.}$

Повторити всі операції по пункту 2.1., але дані, які необхідно внести в окрему таблицю (табл. 3), поділити на I_{max} , що виявиться в табл. 2.

Порівняти отримані результати.

2.3. Умови: $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ - \psi = \text{const.}$, $r = \text{var.}$

Змінювати відстані r між антенами 1 та 2. Відповідні покази I індикатора поля внести в окрему таблицю (табл. 4). У таблиці виявити максимальне значення I та поділити на нього всі інші значення. У декартовій системі координат побудувати графік залежності отриманих значень V від r .

3. Дослідити інтерференцію радіохвиль понад провідною поверхнею.

Для цього потрібно:

- на відбиваючу діелектричну поверхню покласти металевий лист 5;
- повторити всі операції пункту 2;

4. Порівняти результати досліджень з пунктів 2 та 3.
5. Зробити загальні висновки з роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Яка ділянка земної поверхні є суттєвою при відбитті радіохвиль та від яких факторів залежать її геометричні розміри?
2. У чому полягає причина виникнення відбитих радіохвиль?
3. При яких умовах виникає ефект інтерференції радіохвиль?
4. Від яких умов залежать і в яких межах змінюються модуль та фаза множника ослаблення радіохвиль?
5. Чим відрізняються такі схожі поняття як характеристика спрямованості і діаграма спрямованості антени?

Зміст

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.....	3
Лабораторна робота 1 “ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРО-СТАТИЧНИХ ПОЛІВ МЕТОДОМ МОДЕЛЮВАННЯ”.....	4
Лабораторна робота 2 “ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДИПОЛЯ ГЕРЦА”.....	10
Лабораторна робота 3 “ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОБЛИЗУ ПРОВІДНОЇ ПОВЕРХНІ”.....	15
Лабораторна робота 4 “ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛЯ В РАДІОХВИЛЕВОДІ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ”.....	18
Лабораторна робота 5 “ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛЯ У ХВИЛЕВОДІ КРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ”.....	23
Лабораторна робота 6 “ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОХВИЛЕВОДУ”.....	26
Лабораторна робота 7 “ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДНИХ З’ЄДНАНЬ ТА ПЕРЕХОДІВ”.....	28
Лабораторна робота 8 “ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДНИХ ТРІЙНИКІВ”.....	32
Лабораторна робота 9 “ДОСЛІДЖЕННЯ МОСТОВИХ З’ЄДНАНЬ”.....	36
Лабораторна робота 10 “ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОН ФРЕНЕЛЯ”.....	39
Лабораторна робота 11 “ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ РАДІОХВИЛЬ”.....	44

Навчально-методичне видання

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Лабораторні роботи

для студентів спеціальностей: 8.090702 "Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси", 7.090703 "Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення", 7.091002 "Біотехнічні та медичні апарати і системи".

Укладачі: ІВАНОВ Володимир Олександрович,
Габрусенко Євген Ігорович

Редактор О.К. Чаплигіна
Технічний редактор А.І. Лавринович

Підписано до друку 2001. Формат 60X84/16. Папір друкарський.
Офсетний друк. Умов. фарбовідб. Умов. друк. арк. Обл.-вид.арк.
Тираж прим. Замовлення № . Ціна . Видавн. №

Видавництво НАУ.
032058. Київ–58, проспект Космонавта Комарова,1.