

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

: Доцент Бондаренко Т.Г.

ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Навчально-методичні вказівки з практичних занять
для студентів денної та заочної форм навчання

напряму підготовки

„Телекомунікації”

освітньо – кваліфікаційного рівня

БАКАЛАВР

Київ 2015

ТЕМА 1. ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

ЗАНЯТТЯ 1. МАТЕРІАЛЬНІ РІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

1. Мета заняття.

Закріплення теоретичних відомостей про рівняння електромагнітного поля, що покладені в основу системи рівнянь Максвелла.

Поглиблене вивчення поняття про струм зміщення.

Вивчення класифікації середовищ на провідники та діелектрики за критерієм співвідношення модулів струмів провідності та зміщення. Залежність такої класифікації від частоти електромагнітної хвилі.

2. Матеріальні рівняння.

Питання 1: Написати матеріальне рівняння для векторів електричного поля та пояснити суть величин, що входять у рівняння.

Відповідь. Матеріальне рівняння для векторів електричного поля має вигляд:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E},$$

де \vec{D} - вектор індукції електричного поля,
 \vec{E} - вектор напруженості електричного поля,
 ε - діелектрична проникність.

В електричному поля речовини можуть поляризуватися. Окремі диполі орієнтуються вздовж електричного поля, їх власне електричне поле підсумовується, речовина поляризується.

Зовнішнє поле характеризується вектором напруженості електричного поля \vec{E} .

В результаті в речовині буде з'являтися власне поле, пропорційне зовнішньому:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E},$$

де $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{\Phi}{m}$ - діелектрична проникність вакууму.

В вакуумі, де немає поляризації

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}.$$

В речовині зовнішнє поле та поле диполів підсумовуються

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E},$$

де $(1 + \chi_e) = \varepsilon_r$ - відносна діелектрична проникність.

Питання 2: Написати матеріальне рівняння для векторів магнітного поля та пояснити суть величин, що входять у рівняння.

Відповідь. Матеріальне рівняння для векторів магнітного поля має вигляд:

$$\vec{B} = \mu \vec{H},$$

де \vec{B} - вектор індукції магнітного поля,
 \vec{H} - вектор напруженості магнітного поля,
 μ - магнітна проникність.

В магнітному поля речовини можуть намагнічуватися. Окремі домени орієнтуються узгоджено, їх магнітне поле підсумовується, речовина намагнічується.

Можливий випадок, коли поле ослаблюється (діамагнетики), або підсилюється (парамагнетики). Якщо підсилення суттєве, маємо феромагнетики.

Зовнішнє поле характеризується вектором напруженості магнітного поля \vec{H} .

В вакуумі, де немає намагнічування,

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна проникність вакууму.

$$\text{У речовині поля підсумовуються } \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M},$$

де \vec{M} - вектор намагніченості, $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$.

$$\text{Таким чином, у середовищі } \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \chi_m \vec{H},$$

$$\text{Остаточно } \vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H},$$

де $(1 + \chi_m) = \mu_r$ - відносна магнітна проникність.

Питання 3: Написати закон Ома в диференціальній формі та пояснити суть величин, що входять у рівняння.

Відповідь. Закон Ома в диференціальній формі має вигляд:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

де σ - відносна провідність середовища. У міді $\sigma = 57 \cdot 10^6 \frac{\text{См}}{\text{м}}$.

Питання 4: Класифікація середовищ за макроскопічними параметрами.

Відповідь. За макроскопічними параметрами середовища класифікують:

а) ізотропні та анізотропні.

В ізотропних середовищах у всіх напрямках властивості однакові, не залежать від орієнтації векторів.

У всіх парах матеріальних рівнянь вектори паралельні.

В анізотропному середовищі хоч би в одній парі матеріальних рівнянь вектори не паралельні та значення одного з параметрів ϵ , σ або μ залежать від орієнтації векторів.

В анізотропних середовищах використовують тензори магнітної або діелектричної проникностей або провідності:

$$\vec{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{pmatrix}.$$

$$\vec{B} = \vec{\mu} \vec{H}$$

Приклади анізотропних середовищ: ферити, сегнетоелектрики.

б) однорідні та неоднорідні середовища.

В неоднорідних середовищах значення проникностей ϵ , σ або μ залежать від координати.

в) лінійні та нелінійні.

В нелінійних середовищах значення ϵ , σ або μ залежать від величини векторів. Приклад нелінійних середовищ – ферити з петлею гістерезиса.

3. Задача.

Визначити, чи є провідниками або діелектриками деякі середовища на різних частотах:

№ п/п	Середовище	ϵ_r	σ , См/м
1	Сухий ґрунт	5	10^{-4}
2	Вологий ґрунт	20	10^{-3}
3	Морська вода	80	3
4	Прісна вода	80	10^{-2}
5	Скло	7,5	$2 \cdot 10^{-10}$

Частота $f = 10^3, 10^5, 10^7, 10^9$ Гц.

Розв'язання.

Значення параметра $\frac{j_{пров}}{j_{сметц}} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$ визначає відношення середовища до діелектриків або провідників.

Якщо $\frac{j_{пров}}{j_{сметц}} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$, то середовище є провідником.

Якщо $\frac{j_{пров}}{j_{сметц}} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$, то середовище є діелектриком.

№ п/п	Середовище	Частота, Гц			
		10^3	10^5	10^7	10^9
1	Сухий ґрунт	$3,6 \cdot 10^2$ пров	3,6 пров	$3,6 \cdot 10^{-2}$ діел	$3,6 \cdot 10^{-4}$ діел
2	Вологий ґрунт	$0,9 \cdot 10^3$ пров	$0,9 \cdot 10^1$ пров	$0,9 \cdot 10^{-1}$ діел	$0,9 \cdot 10^{-3}$ діел
3	Морська вода	$0,68 \cdot 10^6$ пров	$0,68 \cdot 10^4$ пров	$0,68 \cdot 10^2$ пров	$0,68 \cdot 10^0$ п/пр
4	Прісна вода	$2,25 \cdot 10^3$ пров	$2,25 \cdot 10^1$ пров	$2,25 \cdot 10^{-1}$ п/пр	$2,25 \cdot 10^{-3}$ діел
5	Скло	$4,8 \cdot 10^{-4}$ діел	$4,8 \cdot 10^{-6}$ діел	$4,8 \cdot 10^{-8}$ діел	$4,8 \cdot 10^{-10}$ діел

Висновок: одне й теж саме середовище на різних частотах може бути провідником або діелектриком.

4. Висновок. В теорії електромагнітного поля звичайно всі середовища вважаються ідеалізованими.

Реальні всі середовища нелінійні, але ми їх вважаємо лінійними.

В техніці широко застосовуються такі анізотропні середовища, як сегнетоелектрики та ферити. З їх допомогою побудовані різні пристрої НВЧ: фазообертачі на ефекті Фарадея, різні типи циркуляторів, фільтри НВЧ.

Реальні середовища, в залежності від частоти, можуть бути як діелектриками, так і провідниками.

5. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.

ТЕМА 2. РІВНЯННЯ МАКСВЕЛА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

ЗАНЯТТЯ 2. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

6. Мета заняття.

Закріплення теоретичних відомостей про рівняння електромагнітного поля, що покладені в основу системи рівнянь Максвела. Закріплення теоретичних знань з питань теореми Умова-Пойтинга.

Набуття практичних навичок із застосування граничних умов для визначення векторів електромагнітного поля.

Проведення модульного контролю № 1.

7. Граничні умови до рівнянь Максвела

Задача 1. Граничні умови.

Дано: Значення вектора електричної індукції на плоскій поверхні розділу двох середовищ дорівнює $D_1 = 8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$ Н.

Вектор \vec{D} створює з нормаллю до поверхні кут 45° .

Обидва середовища однорідні та ізотропні.

Відносні діелектричні проникності середовищ $\epsilon_1 = 1$, $\epsilon_2 = 3$.

На поверхні розділу рівномірно розподілений поверхневий електричний заряд $\rho_{\text{нов}} = 1 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$.

Визначити: значення векторів напруги електричного поля E_1 та E_2 , індукції електричного поля D_2 .

Розв'язання.

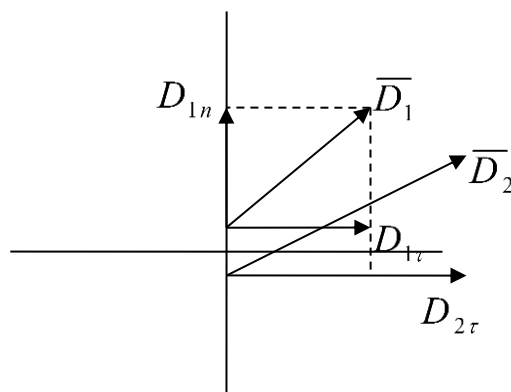


Рис. 1. Вектори індукції на границі розділу двох середовищ.

а) Розрахунок складових в першому середовищі:

Граничні умови для вектора D :

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_{\text{нов}} = 1 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

$$D_{1n} = D_1 \cos 45^\circ = 5,58 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

$$D_{1t} = D_1 \sin 45^\circ = 5,68 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

б) Розрахунок складових вектора індукції в другому середовищі:

$$D_{2n} = D_1 - \rho_{\text{ноб}} = (5,68 - 1) \cdot 10^{-9} = 4,68 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

в) Розрахунок дотичної складової $D_{2\tau}$ через вектор E :

$$D_{2\tau} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_{2\tau}.$$

Граничні умови для вектора E :

$$E_{2\tau} = E_{1\tau}.$$

Необхідно знайти $E_{2\tau} = E_{1\tau} = \frac{D_{1\tau}}{\varepsilon_0 \varepsilon_1}$.

$$D_{2\tau} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_{2\tau} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{D_{1\tau}}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} D_{1\tau} = 3 \cdot 5,68 \cdot 10^{-9} = 17 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

$$D_2 = \sqrt{D_{2\tau}^2 + D_{2n}^2} = \sqrt{4,68^2 + 17^2} \cdot 10^{-9} = 17,35 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

г) Вектор $E_2 = \frac{D_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} = \frac{17,35 \cdot 10^{-9}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3} = 6,5 \cdot 10^2 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$

8. Вектор Умова-Пойтинга. Теорема Пойтинга.

Задача 2..

Дано. Розрахувати миттєву потужність, що проходить через прямокутну площадку площею $0,1 \text{ м}^2$ що лежить в площині xOy , якщо вектора в цей момент часу:

$$\vec{E} = (5\vec{x}_0 + 2\vec{z}_0) \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

$$\vec{H} = (3\vec{y}_0 - 2\vec{z}_0) \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Розв'язання.

1. Щільність миттєвої потужності дорівнює значенню вектора Пойтинга $\vec{\Pi} = [\vec{E}, \vec{H}]$.

$$2. \vec{\Pi} = \begin{vmatrix} \vec{x}_0 & \vec{y}_0 & \vec{z}_0 \\ E_x & E_y & E_z \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{x}_0 & \vec{y}_0 & \vec{z}_0 \\ 5 & 0 & 2 \\ 0 & 3 & -2 \end{vmatrix} = -6\vec{x}_0 + 10\vec{y}_0 + 15\vec{z}_0.$$

3. Потужність $P = \vec{\Pi} \cdot \vec{S} = \vec{\Pi} \cdot \vec{n}_0 \cdot S$.

де $\vec{n}_0 = 1 \cdot \vec{z}_0$.

$$P = 15\vec{z}_0 \cdot 0,1\vec{z}_0 = 1,5 \text{ Вт}.$$

Висновок: вектор Пойтинга представляє собою щільність потоку потужності електромагнітного поля, що проходить в даному місці простору. Напрямок вектора Пойтинга показує напрям розповсюдження енергії електромагнітного поля.

9. Проведення модульного контролю № 1.

10. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.

ТЕМА 3. ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ В ОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Заняття 3. Монохроматичне електромагнітне поле

11. Мета заняття.

Закріплення теоретичних відомостей про рівняння електромагнітного поля, що покладені в основу системи рівнянь Максвелла.

Набуття практичних навичок із розрахунку дисперсії електромагнітних хвиль о однорідних середовищах.

Набуття практичних навичок із визначення виду поляризації електромагнітних хвиль.

12. Дисперсія електромагнітних хвиль в провідних середовищах.

Задача 1. Дисперсія електромагнітних хвиль.

Дано: Середовище: вологий ґрунт,
відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 20$,
провідність $\sigma = 10^{-3}$ См/м,
частоти 10^4 , 10^6 , 10^8 , 10^{10} Гц.

Розрахувати: коефіцієнт загасання електромагнітних хвиль,
фазову сталу,
фазову швидкість електромагнітних хвиль,
глибину проникнення електромагнітних хвиль в середовище.

Розв'язання:

$$\text{коефіцієнт загасання } \alpha = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2}},$$

$$\text{фазова стала } \beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2}}.$$

У провідниках $\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \gg 1$, можливо використовувати наближені формули

$$\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} = \sqrt{\pi f \sigma \mu}.$$

У діелектриках $\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \ll 1$ розрахунок проводиться за наближеними формулами

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}},$$

$$\beta \approx \omega \sqrt{\epsilon \mu} \left(1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right) \approx \omega \sqrt{\epsilon \mu}.$$

$$\text{Фазова швидкість } V_\phi = \frac{\omega}{\beta},$$

$$\text{глибина проникнення в середовище } \Delta = \frac{1}{\alpha}.$$

Розрахунок доцільно проводити по варіантах.

Варіант	1	2	3	4
Частота, Гц	10^4	10^6	10^8	10^{10}
Довжина хвилі λ	30 км	300 м	3 м	3 см
$\omega\sqrt{\epsilon\mu}$	$9,366*10^{-4}$	$9,366*10^{-2}$	9,366	$9,366*10^2$
$\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$	90»	0,9≈1	0,009«1	0,00009«1
Розрахункова формула для α	$\sqrt{\pi f \sigma \mu}$	$\alpha = \omega\sqrt{\epsilon\mu} \sqrt{-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2}}$	$\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$
A, 1/м	$6,28*10^{-3}$	$3,892*10^{-2}$	$4,215*10^{-2}$	$4,215*10^{-2}$
Розрахункова формула для β	$\sqrt{\pi f \sigma \mu}$	$\beta = \omega\sqrt{\epsilon\mu} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2}}$	$\omega\sqrt{\epsilon\mu}$	$\omega\sqrt{\epsilon\mu}$
Фазова швидкість V_ϕ , м/с	10^7	$6,196*10^7$	$6,708*10^7$	$6,708*10^7$
Глибина проникнення в середовище Δ , м	159,2	25,69	23,72	23,72

Висновок: в реальних середовищах фазова швидкість електромагнітної хвилі залежить від частоти. Це явище називається дисперсією. Середовища, у яких спостерігається таке явище, називаються диспергуючими.

Завдання на самостійну роботу: побудувати графік залежності швидкості електромагнітної хвилі від частоти.

13. Поляризація електромагнітних хвиль.

Задача 2.

Дано. Комплексна амплітуда вектора E має значення:

$$\bar{E} = (Ae^{i\varphi_x} \bar{x}_0 + Be^{i\varphi_y} \bar{y}_0) \frac{B}{m}$$

Розрахувати миттєві значення вектора E в моменти часу $t = 0, T/4, T/2, T$, за умови $\varphi_x = 0, A = B$, при різних значеннях фази $\varphi_y = 0, \pi/4, \pi/2, \pi$.

Побудувати фігуру, яку описує кінець вектора за період коливань.

φ_y	0	$\pi/4$	$\pi/2$	π
$\bar{E}(M, t)$	$\bar{E} = 1 \cos(\omega t) \bar{x}_0 + 1 \cos(\omega t) \bar{y}_0$	$\bar{E} = 1 \cos(\omega t) \bar{x}_0 + 1 \cos(\omega t + \frac{\pi}{4}) \bar{y}_0$	$\bar{E} = 1 \cos(\omega t) \bar{x}_0 + 1 \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \bar{y}_0$	$\bar{E} = 1 \cos(\omega t) \bar{x}_0 + 1 \cos(\omega t + \pi) \bar{y}_0$
$t = 0$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 + 1\bar{y}_0$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 + 0,7\bar{y}_0$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 + 0\bar{y}_0$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 - 1\bar{y}_0$
$t = T/4$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 + 0\bar{y}_0$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 - 0,7\bar{y}_0$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 - 1\bar{y}_0$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 + 0\bar{y}_0$
$t = T/2$	$\bar{E} = -1\bar{x}_0 - 1\bar{y}_0$	$\bar{E} = -1\bar{x}_0 - 0,7\bar{y}_0$	$\bar{E} = -1\bar{x}_0 + 0\bar{y}_0$	$\bar{E} = -1\bar{x}_0 + 1\bar{y}_0$
$t = 3T/4$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 + 0\bar{y}_0$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 + 0,7\bar{y}_0$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 + 1\bar{y}_0$	$\bar{E} = 0\bar{x}_0 + 0\bar{y}_0$
$t = T$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 + 1\bar{y}_0$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 + 0,7\bar{y}_0$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 + 0\bar{y}_0$	$\bar{E} = 1\bar{x}_0 - 1\bar{y}_0$



Рис. 1. Фігура, що описує кінець вектора E за час одного періоду коливань.

Висновок: При збільшенні часу кінець вектора E описує в просторі фігуру: лінію, коло або еліпс.

Якщо фігура:

а) коло, то поляризація називається круговою,

б) лінія, то поляризація називається лінійною,

в) еліпс, то поляризація називається лінійною.

Ознака кругової поляризації: рівність амплітуд складових E_x та E_y , різниця фаз $\pi/2$.

Ознака лінійної поляризації: відсутність однієї із складових або різниця фаз 0 або π .

В усіх інших випадках буде спостерігатися еліптична поляризація.

14. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.

Заняття 4. Електромагнітні хвилі в атмосфері

15. Мета заняття.

Закріплення теоретичних відомостей про рівняння електромагнітного поля, що покладені в основу системи рівнянь Максвелла.

Набуття практичних навичок із розрахунку дисперсії електромагнітних хвиль о однорідних середовищах.

Набуття практичних навичок із визначення виду поляризації електромагнітних хвиль.

16. Розрахунок дальності прямої видимості

Задача 1. Знайти відстань прямої видимості за таких умов:

Висота прийомної антени $h = 1, 4, 10, 16, 25$ м.

Висота передавальної антени $H = 1, 4, 10, 16, 25$ м.

Розв'язання:

Відстань прямої видимості – це відстань по поверхні Землі, між двома точками, коли ці точки знаходяться на лінії горизонту:

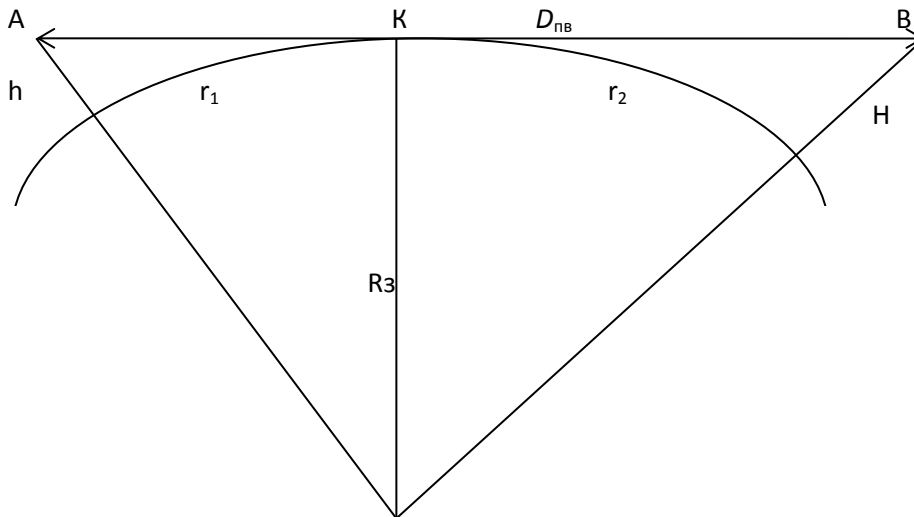


Рис.1. Відстань прямої видимості

$$D_{пв} = r_1 + r_2 \approx AK + KB,$$

$$r_1 = \sqrt{(R_з + h)^2 - R_з^2} = \sqrt{2R_зh + h^2} \approx \sqrt{2R_зh},$$

$$r_2 = \sqrt{(R_з + H)^2 - R_з^2} = \sqrt{2R_зH + H^2} \approx \sqrt{2R_зH},$$

$$\text{остаточно } D_{пв} = \sqrt{2R_з}(\sqrt{h} + \sqrt{H}).$$

Радіус Землі 6370 км, але потрібно враховувати нормальну рефракцію електромагнітних хвиль над Землею. Це виконується введенням еквівалентного радіуса Землі, що дорівнює 8500 км.

Таким чином, відстань прямої видимості з урахуванням нормальної рефракції розраховується за формулою:

$$D_{пв}[\text{км}] = 4,12(\sqrt{h[\text{м}]} + \sqrt{H[\text{м}]})$$

Висота	Висота передавальної антени, м
--------	--------------------------------

прийомної антени, м	1	4	10	16	25
1	8,24	12,36	17,15	20,60	24,72
4	12,36	16,48	21,27	24,72	28,84
10	17,15	21,27	26,06	29,51	33,63
16	20,60	24,72	29,51	32,96	37,08
25	24,72	28,84	33,63	37,08	41,20

17. Розрахунок загасання електромагнітних хвиль різних діапазонів в атмосфері

Задача 2.

Чи можливо встановлення зв'язку між наземними пунктами на частоті 5 МГц, якщо відстань між пунктами 50 км, висота обох антен однакова 4 м?

Розв'язання:

1. Довжина хвилі, що відповідає частоті 50 МГц, дорівнює $\frac{300}{50} = 6 \text{ м}$. Це метровий діапазон

хвиль. Хвилі з такою частотою практично не відбиваються від іоносфери, на них не впливають дощ, кисень атмосфери на водяний пар.

На такій довжині хвилі зв'язок можливий тільки в умовах прямої видимості, але за будь-якої погоди.

Відстань прямої видимості

$$D_{\text{пр}}[\text{км}] = 4,12(\sqrt{h[\text{м}]} + \sqrt{H[\text{м}]}) = 4,12(2+2) = 16,48 \text{ км.}$$

Відповідь: зв'язок встановити неможливо.

Задача 3.

Чи впливає загасання в газах тропосфери та в дощу на встановлення зв'язку між наземними пунктами на довжині хвилі 10 см?

Розв'язання:

На довжині хвилі 10 см дощ та гази атмосфери не впливають на розповсюдження хвиль, але зв'язок можливий тільки в межах прямої видимості.

Задача 4.

Чи можливо встановлення зв'язку між наземним пунктом та супутником на довжині хвилі 500 м?

Розв'язання:

Довжина хвилі 500 м відноситься до середніх хвиль. Відомо, що середні хвилі відбиваються від іоносфери вночі або загасають в іоносфері вдень, тому хвилі цього діапазону в космос через атмосферу не проходять.

Тому зв'язок зі супутником у цьому діапазоні неможливий.

18. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973

ТЕМА 5. ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ В НАПРЯМНИХ СИСТЕМАХ

Заняття 5. Властивості поля в направляючих системах

19. Мета заняття.

Закріплення теоретичних відомостей про поширення електромагнітних хвиль у направляючих системах.

Набуття практичних навичок із побудови структури електромагнітного поля в прямокутному хвилеводі.

Набуття практичних навичок із розрахунку діаграми типів хвиль у прямокутному хвилеводі.

20. Побудова структури векторів електромагнітного поля у хвилеводі прямокутного перерізу.

Задача 1.

Побудувати структуру поля хвилі типу H_{10} .

Розв'язання:

Відомо, що у хвилі типу H_{10} , що розповсюджується вздовж осі Oz , вектори поля описуються виразами:

$$\dot{E}_{mx} = C_1 n \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) (Ae^{-i\beta z} + Be^{i\beta z})$$

$$\dot{E}_{my} = C_1 m \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) (Ae^{-i\beta z} + Be^{i\beta z})$$

$$\dot{H}_{mx} = C_2 m \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) (Ae^{-i\beta z} - Be^{i\beta z})$$

$$\dot{H}_{my} = C_2 n \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) (Ae^{-i\beta z} - Be^{i\beta z})$$

Для хвилі типу H_{10} індекси $m = 1$, $n = 0$.

Вектор E має менше складових, тому побудову структури поля у поперечному перерізі потрібно починати з нього:

$$\dot{E}_{my} = C \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right),$$

вздовж координати x вектор змінюється за законом синуса:

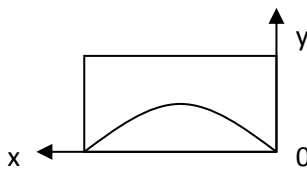
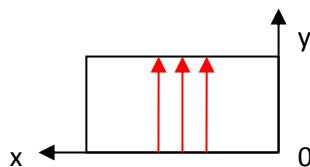


Рис. 1. Закон зміни E_y вздовж координати x .

У стінок хвилеводу $E_y = 0$, в середині значення E_y максимальне.

Вздовж координати y вектор не змінюється, а залишається постійним:



Структура вектора E_y .

Рис. 2.

Через половину довжини хвилі напрям вектора E_y змінюється на протилежний:

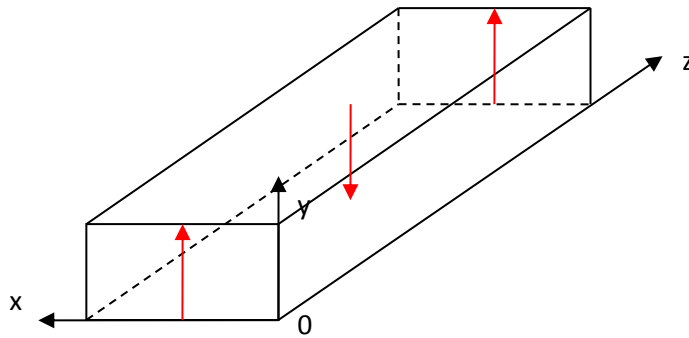


Рис. 3. Структура вектора E_y вздовж координати z .

Після побудови структури вектора E виконується побудова вектора H . Силкові лінії вектора H будуть перпендикулярні вектору E та мають замкнену форму:

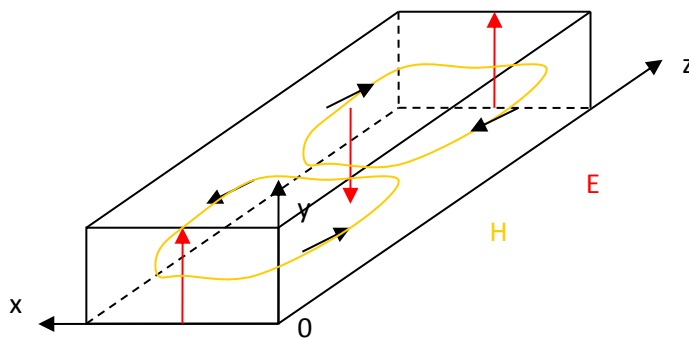


Рис. 4. Структура векторів E та H хвилі типу H_{10} .

21. Розрахунок діаграми типів хвиль у прямокутному хвилеводі.

Задача 2. Побудувати діаграму типів хвиль у хвилеводі.

Розмір стінок хвилеводу $a = 23$ мм, $b = 10$ мм. У хвилеводі пінополістирол з $\epsilon_r = 1,15$.

Розв'язання.

Діаграма типів хвиль – графік, на якому показані критичні частоти в залежності від типу хвиль (для різних індексів m та n).

Критична довжина хвилі в прямокутному хвилеводі

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

відповідна критична частота

$$f_{кр} = \frac{v_{св.прост}}{\lambda_{кр}} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}.$$

n	m			
	0	1	2	3
0	-	2a = 46 мм	a = 23 мм	2/3a = 15,33 мм
		6,08 ГГц	12,16 ГГц	18,24 ГГц
1	2b = 20 мм	18,34 мм	15,09 мм	-
	13,99 ГГц	15,25 ГГц	18,54 ГГц	
2	b = 10 мм	9,772 мм	-	-
	27,98 ГГц	28,63 ГГц		

Завдання на самостійну роботу: за даними розрахунків побудувати діаграму типів хвиль.

22. Проведення модульного контролю № 2

23. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.

ЗАНЯТТЯ 6. РЕЖИМИ РОБОТИ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

Мета заняття.

Закріплення теоретичних відомостей про режими роботи лінії передачі.

Набуття практичних навичок з розрахунку основних параметрів, що характеризують режими роботи лінії передачі: коефіцієнт відбиття, вхідний опір відрізка лінії передачі, коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт біжучої хвилі.

Закріплення теоретичних знань із зв'язку між параметрами, що характеризують режими роботи лінії передачі.

24. Розрахунок коефіцієнта відбиття в лінії.

Відомо, що в результаті складання падаючої та відбитої хвиль в лінії передачі будуть спостерігатися максимуми та мінімуми напруги.

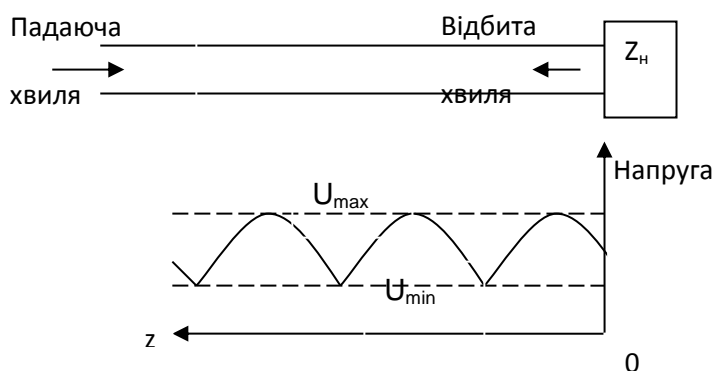


Рис.1. Розподіл напруги в лінії внаслідок складання падаючої та відбитої хвиль.

В тих місцях, де ці дві хвилі синфазні, буде максимум напруги U_{\max} . Там, де хвилі протифазні – спостерігається мінімум.

Дуже важливий параметр – коефіцієнт біжучої хвилі:

$$KCB = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$$

Задача 1.

Дано: хвильовий опір лінії передачі $Z_{xв} = 75$ Ом, опір навантаження $Z_n = 50$ Ом.

Знайти: коефіцієнт стоячої хвилі КСВ, що буде в лінії.

Розв'язання.

Відомо, що коефіцієнт стоячої хвилі та модуль коефіцієнта відбиття пов'язані рівнянням:

$$KCB = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 + P_0}{1 - P_0},$$

де $P_0 = |\dot{P}_0|$ – модуль коефіцієнта відбиття на навантаженні.

Як знайти модуль коефіцієнта відбиття на навантаженні?

Комплексний коефіцієнт відбиття на навантаженні

$$\dot{P}_0 = \frac{\dot{Z}_n - Z_{xв}}{\dot{Z}_n + Z_{xв}} = \frac{50 - 75}{50 + 75} = -0,2.$$

Модуль коефіцієнта відбиття $P_0 = |\dot{P}_0| = 0,2$.

Коефіцієнт стоячої хвилі

$$КСВ = \frac{1 + P_0}{1 - P_0} = \frac{1 + 0,2}{1 - 0,2} = 1,5.$$

Висновок. Чим ближче КСВ до одиниці, тим краще для передачі сигналів в лінії передачі, бо це означає, що амплітуда відбитої хвилі менше, і більше енергії сигналу потрапляє до навантаження.

КСВ = 1 у тому випадку, коли відбитої хвилі немає, $\dot{P}_0 = \frac{\dot{Z}_n - Z_{xb}}{\dot{Z}_n + Z_{xb}} = 0$, тобто коли опір навантаження Z_n дорівнює хвильовому опорі лінії передачі Z_{xb} .

25. Розрахунок вхідного опору відрізка лінії передачі.

Відомо, що вхідний опір відрізка лінії передачі $Z_{вх}$, довжиною L , з'єднаного в кінці з навантаженням Z_n , у загальному випадку має комплексне значення. Якщо не враховувати загасання в лінії передачі, то справедлива формула:

$$\dot{Z}_{вх} = Z_{xb} \frac{\dot{Z}_n + iZ_{xb} \operatorname{tg} \beta L}{\dot{Z}_{xb} + i\dot{Z}_n \operatorname{tg} \beta L},$$

де β - повздовжня стала розповсюдження хвилі (фазова стала).

Задача 2.

Дано: хвильовий опір лінії передачі $Z_{xb} = 50$ Ом,
опір навантаження $Z_n = 25$ Ом,
довжина відрізка лінії $L = 0,8 \lambda$.

Знайти: вхідний опір відрізка лінії передачі $Z_{вх}$.

Розв'язання.

Для розв'язання задачі потрібно пов'язати фазову сталу β з довжиною хвилі в лінії передачі λ .

Відомо, що фазова швидкість V_ϕ пов'язана з фазовою сталою β рівнянням

$$V_\phi = \frac{\omega}{\beta},$$

$$\text{звідки } \beta = \frac{\omega}{V_\phi}.$$

З іншого боку, довжина хвилі λ – це відстань, яку проходить хвиля з фазовою швидкістю V_ϕ за один період коливань T :

$$\lambda = V_\phi T = \frac{V_\phi}{f}, \text{ тому } V_\phi = \lambda f.$$

$$\text{Звідки } \beta = \frac{\omega}{V_\phi} = \frac{2\pi f}{\lambda f} = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Вхідний опір:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{вх} &= Z_{xb} \frac{\dot{Z}_n + iZ_{xb} \operatorname{tg} \beta L}{\dot{Z}_{xb} + i\dot{Z}_n \operatorname{tg} \beta L} = 50 \frac{25 + i50 \operatorname{tg} \left(0,8\lambda \frac{2\pi}{\lambda} \right)}{50 + i25 \operatorname{tg} \left(0,8\lambda \frac{2\pi}{\lambda} \right)} = 50 \frac{25 + i50 \operatorname{tg} (1,6\pi)}{50 + i25 \operatorname{tg} (1,6\pi)} = 50 \frac{25 - i50 \cdot 3,08}{50 - i25 \cdot 3,08} = \\ &= 50 \frac{(25 - i154) \cdot (50 + i77)}{(50 - i77) \cdot (50 + i77)} = 50 \frac{13108 - i9625}{50^2 + 77^2} = 77,8 - i57,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Висновок: незважаючи на те, що опір навантаження має дійсне значення 25 Ом, вхідний опір відрізка лінії передачі є комплексним, та має уявну складову.
Для того, що вхідний опір був дійсним, необхідна рівність хвильового опору лінії передачі та опору навантаження.

26. Розрахунок розмірів направлено розгалужувача.

Задача 3.

Направлений розгалужувач має конструкцію, показану на рис. 2:

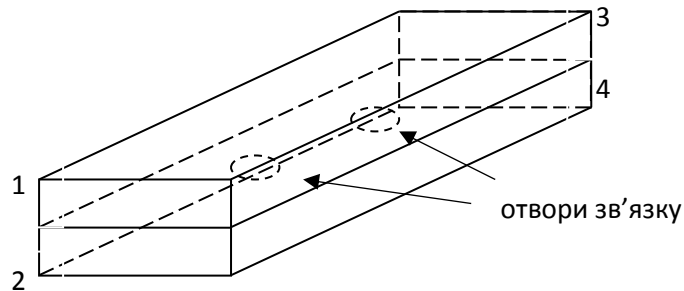


Рис. 2. Два хвилеводи, з'єднані широкими стінками, створюють направлений розгалужувач. В загальній стінці є два отвори зв'язку.

Дано: широка стінка хвилеводів $a = 0,04$ м,
частота $f = 5$ ГГц,
енергія поступає в плече 1.

Розрахувати: відстань між отворами зв'язку, щоб енергія не проходила в плече 2.

Розв'язання.

Для того, щоб енергія не проходила в плече 2, необхідно, щоби хвилі у хвилеводі 2-4, збуджені від отворів зв'язку у напрямку кінця 2, були протифазні. Це буде у випадку, коли відстань x між отворами буде $\frac{\lambda_{xв}}{4}$.

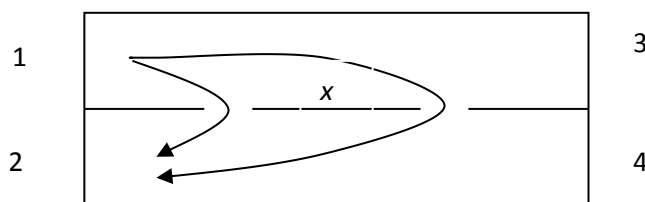


Рис. 3. Протифазні хвилі у плечі 2 розгалужувача.

При цьому хвилі, збуджені від отворів, пройдуть різні шляхи, які відрізняються на $\frac{\lambda_{xв}}{4} + \frac{\lambda_{xв}}{4} = \frac{\lambda_{xв}}{2}$. Тоді такі хвилі будуть протифазними та будуть компенсувати одна іншу.

Довжина хвилі у хвилеводі

$$\lambda_{xв} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}},$$

де λ - довжина хвилі в середовищі, що наповнює хвилевод. Якщо не вказано окремо, то вважається, що у хвилеводі повітря, $\varepsilon_r=1$, $\mu_r=1$ - відносні діелектрична і магнітна проникності повітря,

$\lambda_{кр}$ - критична довжина хвилі для типу хвилі H_{10} .

В прямокутному хвилеводі для хвиль типу E_{mn} і H_{mn}

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}}, \quad (1)$$

де a і b - розміри поперечного перерізу (широкої стінки a та вузької стінки b , $a > b$);

m, n - цілі числа, що характеризують структуру електромагнітної хвилі в площині поперечного перерізу хвилеводу.

Тип хвилі, який має найбільшу критичну довжину хвилі або найменшу критичну частоту, називається основним типом. Основний тип хвилі може розповсюджуватись у хвилеводі один, без інших типів хвиль. Всі інші типи хвиль називаються вищими типами.

В прямокутному хвилеводі основним є тип хвилі H_{10} ($m=1, n=0$), для якого з формули (1) виходить, що $\lambda_{кр} = 2a$.

Розрахунок.

Довжина хвилі у вакуумі $\lambda = \frac{C}{f}$.

Швидкість світла у вакуумі $C = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$.

Критична довжина хвилі $\lambda_{кр} = 2a = 0,08$ м.

Довжина хвилі у необмеженому середовищі $\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9} = 0,06$ м.

Відстань між отворами зв'язку $x = \frac{\lambda_{xв}}{4} = \frac{\lambda}{4\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{0,06}{4 \cdot 10^9 \sqrt{1 - \left(\frac{0,06}{0,08}\right)^2}} = 0,0227$ м.

27. Завдання на самостійну роботу.

Задача 4. Розрахунок опору навантаження за результатами виміру КСВ в лінії.

Дано: в лінії передачі існує режим, при якому КСВ = 2,
хвильовий опір лінії передачі $Z_{хв} = 75$ Ом.

Знайти: опір навантаження Z_n , якщо відомо, що від має дійсне значення.

Розв'язання.

Зв'язок між КСВ та модулем коефіцієнта відбиття P_0 :

$$КСВ = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 + P_0}{1 - P_0}.$$

З цього рівняння знаходимо $P_0 = \frac{КСВ - 1}{КСВ + 1}$.

В випадку, коло опір навантаження Z_n - дійсна величина, з відомого рівняння

$$\dot{P}_0 = \frac{\dot{Z}_n - Z_{хв}}{\dot{Z}_n + Z_{хв}}$$

знаходимо, що коефіцієнт відбиття на навантаженні може бути також тільки дійсним, але може бути позитивним чи негативним.

Тому по знайденому модулю коефіцієнта відбиття на навантаженні P_0 знаходимо два можливі варіанти:

$$\dot{P}_0 = \pm P_0. \quad (2)$$

Розв'язуємо рівняння (2) відносно опору навантаження $\dot{Z}_n = Z_{xв} \frac{1 + \dot{P}_0}{1 - \dot{P}_0}$.

Розрахунок:

Модуль коефіцієнта відбиття на навантаженні $P_0 = \frac{КСВ - 1}{КСВ + 1} = \frac{2 - 1}{2 + 1} = \frac{1}{3}$.

Коефіцієнт відбиття на навантаженні $\dot{P}_0 = \pm P_0 = \pm \frac{1}{3}$.

а) $\dot{P}_0 = +\frac{1}{3},$

$$\dot{Z}_n = Z_{xв} \frac{1 + \dot{P}_0}{1 - \dot{P}_0} = 75 \cdot \frac{1 + \frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{3}} = 150 \text{ Ом}.$$

б) $\dot{P}_0 = -\frac{1}{3},$

$$\dot{Z}_n = Z_{xв} \frac{1 + \dot{P}_0}{1 - \dot{P}_0} = 75 \cdot \frac{1 - \frac{1}{3}}{1 + \frac{1}{3}} = 37,5 \text{ Ом}.$$

Висновок: безпосередньою перевіркою можливо впевнитися, що обидва значення Z_n відповідають значенню $КСВ = 2$.

28. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.

ТЕМА 8. ПРИСТРОЇ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ ТА МЕТОДИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАНЯТТЯ 7. МОСТОВІ СХЕМИ НВЧ

Мета заняття.

Закріплення теоретичних відомостей про кільцевий міст, подвійний хвилевід ний трійник, щілинний міст.

Набуття практичних навичок з оцінки режимів роботи мостових схем НВЧ, побудови пристроїв НВЧ на мостових схемах.

Закріплення теоретичних знань із структури електромагнітного поля, що обумовлюють роботу елементів хвилевідного тракту.

Проведення модульного контролю № 3.

29. Аналіз структури електромагнітного поля в подвійному хвилевідному трійнику.

Подвійний хвилевідний трійник складається з двох трійників: типу Е та типу Н.

Питання 1: Намалювати трійник типу Е та пояснити його роботу.

Відповідь: Структура електромагнітного поля в трійнику типу Е показана на рис.1 - 4.

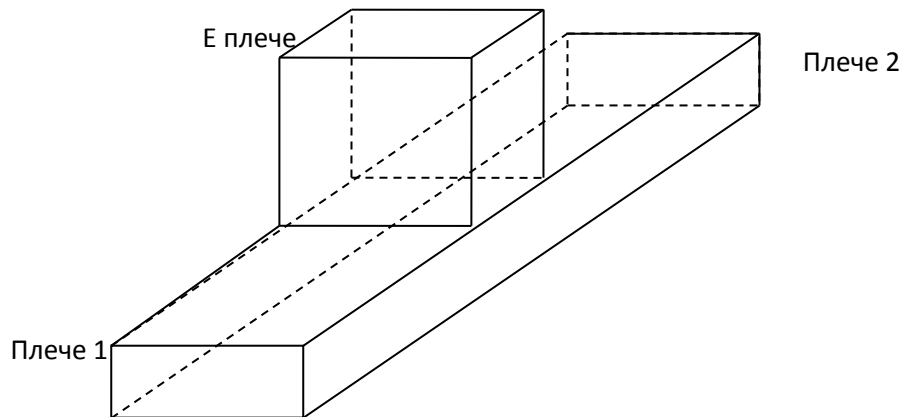


Рис. 1. Загальний вид трійника Е-типу.

1. При підключенні джерела сигналу до плеча Е збуджується хвиля типу H_{10} , структура силових ліній вектора Е показана червоним кольором. На малюнку видно, що у бокових плечах 1 та 2 будуть збуджуватися протифазні хвилі однакової амплітуди.

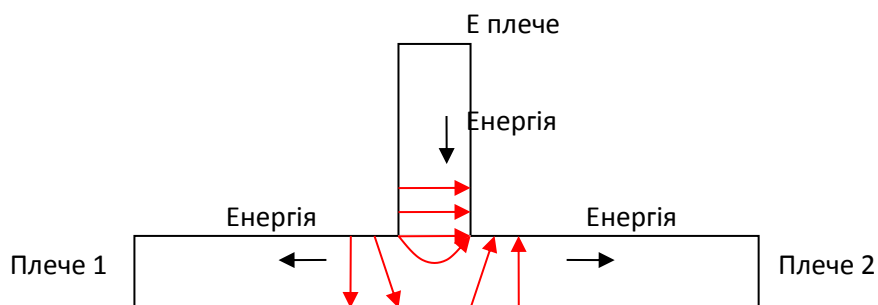


Рис. 2.

Структура поля в Е-трійнику при підключенні енергії в плече Е.

2. При підключенні синфазних джерел сигналів до плечей 1 та 2 структура поля буде така, що у місці з'єднання в плечі Е повинна бути збуджена хвиля типу Е. Така хвиля розповсюджуватися не може, тому що ми працюємо на хвилі основного типу H_{10} .

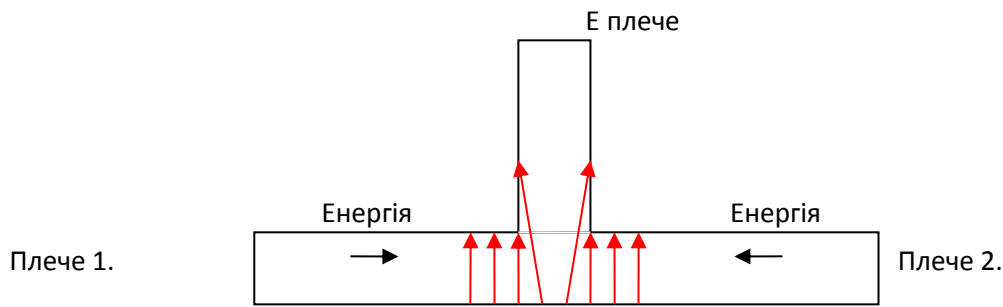


Рис. 3. Структура поля в трійнику при синфазному підключенні енергії в плечі 1 та 2.

Таким чином, енергія в плече E проходить не буде.

3. При підключенні протифазних джерел сигналів до плечей 1 та 2 структура поля буде така, що у місці з'єднання в плечі E повинна бути збуджена хвиля типу H_{10} . Така хвиля розповсюджуватися може.

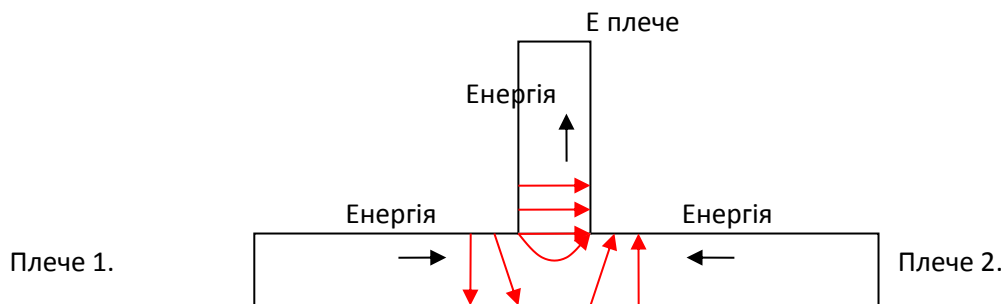


Рис. 4. Структура поля в трійнику при протифазному підключенні енергії в плечі 1 та 2.

структура силових ліній вектора E показана червоним кольором. На малюнку видно, що у бокових плечах 1 та 2 будуть збуджуватися протифазні хвилі однакової амплітуди. Таким чином, енергія в плече E проходить буде.

Питання 2: Намалювати трійник типу H та пояснити його роботу.

Відповідь: Загальний вид та структура електромагнітного поля в трійнику типу H показана на рис.4 та 5.

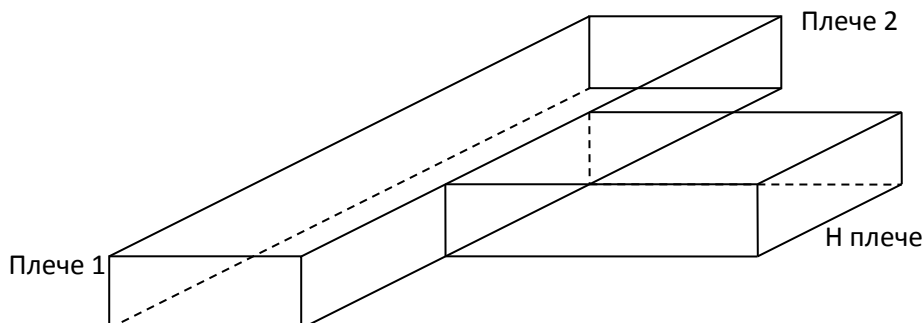


Рис. 4. Загальний вид трійника H-типу.

1. При підключенні джерела сигналу до плеча H збуджується хвиля типу H_{10} , структура силових ліній вектора E показана червоним кольором. На малюнку видно, що у бокових плечах 1 та 2 будуть збуджуватися синфазні хвилі однакової амплітуди.

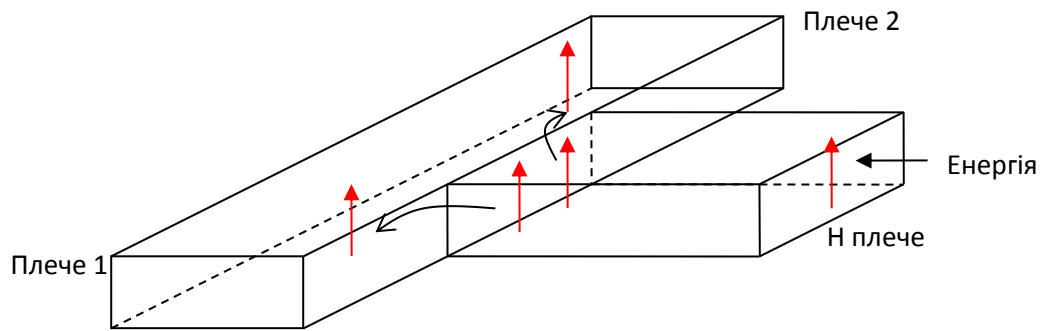


Рис. 5. Структура поля в Н-трійнику при підключенні енергії в плече Н.

2. Навпаки, при збудженні синфазних хвиль в плечах 1 та 2 енергія буде проходити у зворотному напрямку – в плече Н.
3. При збудженні протифазних сигналів в плечах 1 та 2 буде спроба в плечі Н збуджувати хвилю типу H_{20} , яка розповсюджуватись не може.

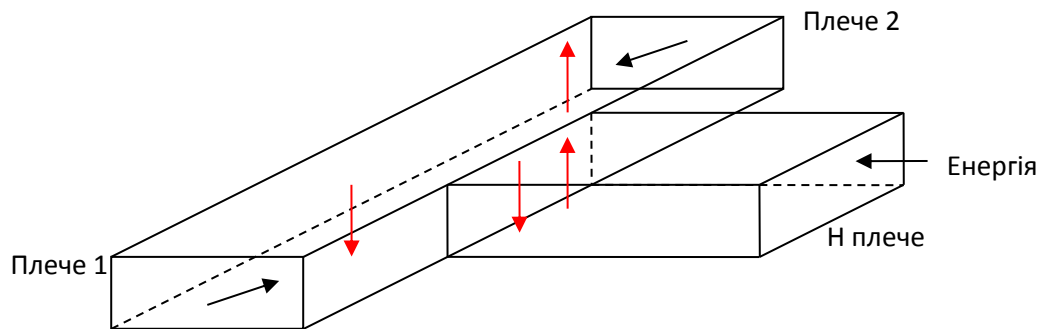


Рис. 6. Структура поля в Н-трійнику при протифазному підключенні енергії в плечі 1 та 2.

Висновок: У подвійному хвилевідному трійнику, що об'єднує трійники Е та Н-типу, при підключенні енергії в плечі 1 та 2 синфазно енергія буде проходити в плече Н. При протифазних сигналах в плечах 1 та 2 енергія проходить в плече Е. При підключенні сигналу в плече Е будуть збуджуватися плечі 1 та 2 протифазно, а при підключення сигналу в плече Н – синфазно.

30. Аналіз структури електромагнітного поля в кільцевому мості.

Кільцевий міст може бути Е та Н-типу. Коли у кільце згорнуто трійники Е-типу, то отримують міст Е-типу. При згортанні трійника Н-типу отримують міст Н-типу.

Фізичні принципи роботи мостів обох типів однакові, різниця полягаю тільки в тому, що в мості Н-типу в кільці збуджуються синфазні хвилі, а в мості Е-типу протифазні.

З іншого боку, для збудження бокових хвилеводів в першому випадку потрібні синфазні сигнали, в другому – протифазні.

Тому розглянемо роботу моста Н-типу, що зображений на рис. 7.

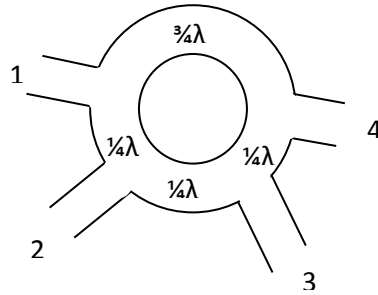


Рис. 7. Структура Н-кільцевого моста.

Принциповим моментом є відстань між місцями підключення бокових хвилеводів 1-2, 2-3, 3-4 $\lambda/4$ та між хвилеводами 1-4 $3\lambda/4$.

Питання 1: Пояснити роботу Н-кільцевого моста при підключенні сигналу до плеча 1.

Відповідь: В кільці будуть збуджуватися синфазні хвилі, що йдуть проти часової стрілки та за часовою стрілкою.

1. Ці дві хвилі будуть підходити до плеча 4 синфазно, тому що проходять однаковий шлях. В результаті плече 4 збуджується.
2. Хвилі до плеча 3 підходять протифазно. Одна з них проходить шлях $4\lambda/4$, інша $2\lambda/4$, різниця шляху $\lambda/2$, що відповідає різниці фаз π . Плече 3 збуджуватися не буде.
3. До плеча 2 хвилі підходять синфазно, різниця шляхів $5\lambda/4 - \lambda/4 = \lambda$. Плече 2 буде збуджуватись.

Аналогічно аналізується робота моста при підключенні сигналу в інші плечі.

Висновок: кільцеві схеми використовуються в техніці НВЧ при побудові пристроїв, що виконують підсумовування та віднімання сигналів.

31. Проведення модульного контролю № 3.

32. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.