

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ (СИСТЕМА ЛЕХЕРА)

Цель работы: Определение частоты колебаний электромагнитного поля в двухпроводной линии и оценка влияния сопротивления нагрузки на положение узлов и пучностей магнитного поля.

Приборы и принадлежности: генератор высокочастотных колебаний, двухпроводная линия, каретка с петлевым зондом, детектором и измерителем тока, нагрузочное сопротивление.

Объект измерений: электромагнитного поля в двухпроводной линии.

Средства измерений: микроамперметр, линейка.

1. Теоретическая часть

Если в некоторой области свободного пространства возбудить переменное электрическое поле, то, согласно теории Максвелла, в этой области возникает переменное магнитное поле, в свою очередь порождающее переменное вихревое электрическое поле, и т. д. Эти взаимосвязанные электрические и магнитные поля образуют единое электромагнитное поле, распространяющееся, как это следует из теории Максвелла, со скоростью v :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{n}, \quad (1)$$

где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с, ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная постоянные; ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; $n = c/v$ – показатель преломления среды.

Если в каком-либо месте неограниченной двухпроводной линии (линия из двух прямых проводов) возбудить электромагнитное колебание, то протекающий по проводам переменный ток порождает в окружающем пространстве переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает в окружающем пространстве переменное электрическое поле, и вдоль проводов будет распространяться бегущая электромагнитная

волна, в которой векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} перпендикулярны к проводам. Электромагнитная волна, существующая в двухпроводной линии, так же, как и плоская электромагнитная волна в свободном пространстве, переносит энергию. Величиной, характеризующей плотность потока энергии, переносимой электромагнитной волной, служит вектор Умова-Пойнтинга \mathbf{S} :

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E}, \mathbf{H}] \quad (2)$$

Для электромагнитной волны в бесконечной двухпроводной линии можно ввести отношение разности потенциалов между проводами линии к величине тока в проводах линии – волновое сопротивление линии ρ :

$$\rho = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (3)$$

где L_0 и C_0 – индуктивность и емкость отрезка двухпроводной линии единичной длины; U_{\max} и I_{\max} – амплитуды напряжения и тока в линии.

В бегущей электромагнитной волне векторы \mathbf{v} , \mathbf{E} и \mathbf{H} образуют правую тройку векторов (рис. 1а). Распределение электрических и магнитных полей для фиксированного момента времени в распространяющейся плоской электромагнитной волне приведено на рис. 1б.

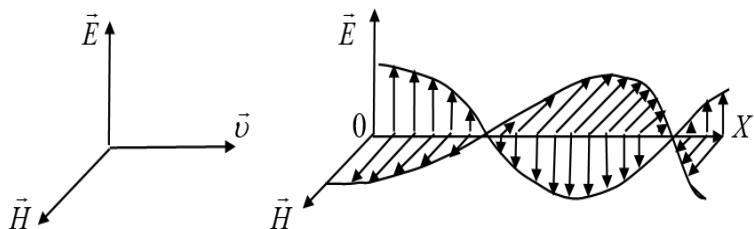


Рис. 1. Векторные изображения электромагнитной волны: а – расположение векторов \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{v} в бегущей волне; б – распределение электрических и магнитных полей в плоской бегущей электромагнитной волне в фиксированный момент времени

Бегущую электромагнитную волну можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} E_y = E_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] = E_0 \sin(\omega t - kx) \\ H_z = H_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] = H_0 \sin(\omega t - kx) \end{cases}, \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая (циклическая) частота; f – частота колебаний; $k = \omega/v = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\lambda = v/f$ – длина волны; x – координата точки, в которой в момент времени t определяется поле.

Распространяющиеся электромагнитные волны возникают в очень длинных линиях, которые можно рассматривать как неограниченные. Во многих случаях, однако, приходится иметь дело с короткими линиями, на длине которых укладывается сравнительно небольшое число длин волн. В этих случаях существенно отражение электромагнитных волн от концов линии. Отраженные волны складываются между собой и с первоначальной волной, в результате чего возникают более сложные формы электромагнитных колебаний – стоячие электромагнитные волны, подобные стоячим механическим волнам в упругом шнуре или струне.

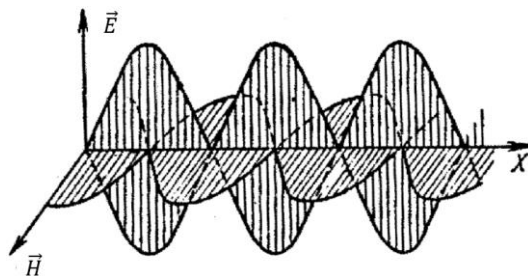


Рис. 2. Стоячая электромагнитная волна

Стоячая электромагнитная волна (рис. 2) состоит из двух стоячих волн: электрической и магнитной, причем между колебаниями \mathbf{E} (электрического поля) и \mathbf{H} (магнитного поля) возникает разность фаз, равная π . Пучности электрического поля совпадают с узлами магнитного поля, а узлы магнитного поля совпадают с пучностями электрического поля. Вектор Пойнтинга обращается

в ноль в узлах (а следовательно, пучностях) как электрического, так и магнитного поля.

Рассмотрим режимы работы линии при различных сопротивлениях нагрузки.

1. Линия на конце разомкнута: $Z \rightarrow \infty$.

Переменные токи, возникающие в линии, на конце ее будут вызывать наибольшие колебания зарядов. Так как проводимость между проводами идеальной линии отсутствует, то амплитуда тока проводимости на конце линии будет равна нулю, следовательно, будет равно нулю магнитное поле, а электрическое поле будет максимальным.

В результате сложения идущей и отраженной волн в линии будут происходить гармонические колебания с частотой ω :

$$E = E_{\text{пад}} + E_{\text{отр}} = E_0 \sin(\omega t - kx) + E_0 \sin(\omega t + kx) = 2E_0 \cos(kx) \cdot \sin(\omega t).$$

$$H = H_{\text{пад}} + H_{\text{отр}} = H_0 \sin(\omega t - kx) - H_0 \sin(\omega t + kx) = -2H_0 \sin(kx) \cdot \cos(\omega t).$$

Амплитуды колебаний электрического поля $2E_0 \cos(kx)$ и магнитного поля $2H_0 \sin(kx)$ оказываются зависимыми от координаты, которая здесь отсчитывается от конца линии, и поэтому различны в разных точках линии. В определенных точках величина **E** (или **H**) достигает максимума. Эти точки называются пучностями электрического (или магнитного) поля. В точках, называемых узлами электрического (или магнитного) поля, амплитуда напряжённости электрического и магнитного полей обращается в ноль.

Координаты узлов магнитного поля находим из условия $kx_{\text{пн}} = n\pi$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, то есть:

$$x_{\text{пн}} = n \frac{\lambda}{2}. \quad (5)$$

Из условия $kx_{\text{пн}} = (2n+1)\pi/2$, находим координаты пучностей:

$$x_{\text{пн}} = (2n+1) \frac{\lambda}{4}. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) следует, что для магнитного поля, так же, как и для электрического, расстояние между двумя соседними узлами составляет $\lambda/2$; между соседними узлами располагается одна пучность, а между пучностями – узел.

2. Линия на конце коротко замкнута: $Z = 0$

В этом случае напряжение на конце линии будет всегда равно нулю, т. е. электрическое поле там будет отсутствовать. В закорачивающем линию сопротивлении будет наибольшая амплитуда тока, и на конце линии – наибольшее магнитное поле.

Результирующие электрическое и магнитное поля:

$$E = E_{\text{пад}} + E_{\text{отр}} = -2\sin(kx) \cdot \cos(\omega t).$$

$$H = H_{\text{пад}} + H_{\text{отр}} = 2\cos(kx) \cdot \sin(\omega t).$$

Из условия $kx_{\text{н}} = (2n + 1) \pi/2$ находим координаты узлов магнитного поля:

$$x_{\text{нH}} = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}. \quad (7)$$

Из условия $kx_{\text{нH}} = \pi n$ находим координаты пучностей магнитного поля:

$$x_{\text{нH}} = n \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Из формул (7) и (8) следует, что для магнитного и электрического полей, расстояние между двумя соседними узлами также составляет $\lambda/2$.

2. Методика измерений и описание аппаратуры

Схема установки для изучения электромагнитных волн в двухпроводной линии приведена на рис. 4. Генератор 1 создает в двухпроводной линии 2 высокочастотные колебания. В линии устанавливается распределение электромагнитного поля, зависящее от величины нагрузочного сопротивления Z . Вдоль линии перемещается каретка, на которой расположены: зонд 3, детекторная секция 4 и измеритель тока 5. Наводимая в зонде э. д. с. детектируется, и выпрямленный ток измеряется измерителем 5.

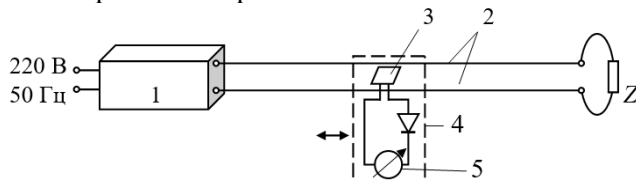


Рис. 3. Блок-схема лабораторной установки для изучения электромагнитных волн в двухпроводной линии

Величина тока, протекающего через измеритель 5, зависит как от местоположения зонда, так и от его конструкции (это может быть петлевой зонд – рис. 4 а, реагирующий на магнитную составляющую H электромагнитного поля, или вибратор – 4 б, который реагирует на электрическую составляющую поля E).

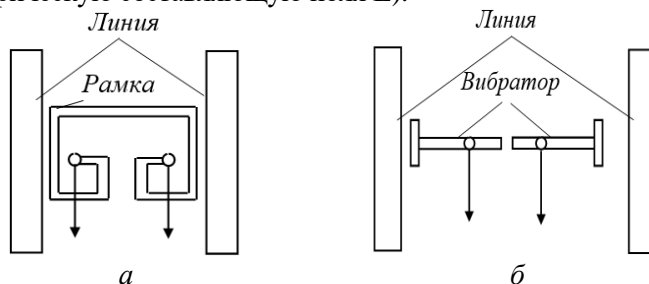


Рис. 4. Конструкции зондов для изучения распределения составляющих электромагнитного поля:
а – петлевой зонд (рамка); б – вибратор

В имеющихся экземплярах работ (рис. 5 и 6) используется расположенный в плоскости двухпроводной линии петлевой зонд, максимумы тока в котором соответствуют пучностям магнитного поля. При перемещении каретки вдоль линии по показаниям микроамперметра снимается распределение магнитного поля в линии при разных сопротивлениях нагрузки.

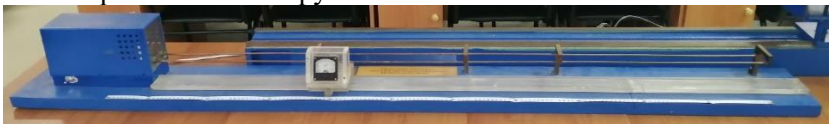


Рис. 5. Внешний вид экспериментальной установки (ауд. 14110)



Рис. 6. Внешний вид экспериментальной установки (ауд. 14206)

3. Порядок выполнения работы

1. Включить генератор в сеть; включить тумблер питания генератора и дать ему прогреться в течение 2-3 мин.

2. Включить требуемую нагрузку линии ($Z=0$ или $Z \rightarrow \infty$).

3. Перемещая каретку вдоль линии, снять зависимость показаний измерителя тока от расстояния от конца линии для двух значений сопротивления нагрузки. Измерения проводить через 2-3 см для расстояния от конца линии от 0 до 130-140 см. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Измеренные значения силы тока вдоль линии

| № п/п | Расстояние от конца линии x , см | Показания прибора I , мкА (перемычка замкнута $Z=0$) | Показания прибора I , мкА (перемычка разомкнута $Z \rightarrow \infty$) |
|-------|------------------------------------|--|---|
| 1 | 0 | | |
| 2 | 5 | | |
| ... | | | |
| 29 | 140 | | |

Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений, записанным в табл. 1, построить графики распределения вдоль линии силы тока $I(x)$, отражающего распределение магнитного поля.

2. Отметить на графике положения узлов и пучностей.

3. Определить длину волны λ из измерений расстояния между соседними пучностями (длина волны λ – это удвоенное расстояние между соседними узлами или соседними пучностями) или соседними узлами на графиках $I(x)$ (не менее 6-ти значений) и найти $\lambda_{\text{ср}}$ как среднеарифметическое из измеренных значений длин волн λ_i .

4. Определить частоту колебаний генератора $f_{\text{ср}} = c/\lambda_{\text{ср}}$, где $c=2,998 \cdot 10^8$ м/с.

5. Оценить относительную ошибку определения частоты генератора δf по формуле $\delta f = \Delta \lambda / \lambda_{\text{ср}}$. Коэффициент Стьюдента α для доверительной вероятности 95 % и числе измерений $N=6$ следует принять $\alpha=2,6$.

$$\Delta\lambda = \alpha \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_{\text{ср}})^2}{N(N-1)}}$$

6. Найти абсолютную ошибку определения частоты генератора Δf по формуле $\Delta f = \delta f f_{\text{ср}}$.

7. Записать окончательный ответ в виде: $f = f_{\text{ср}} \pm \Delta f$

4. Контрольные вопросы

1. Что представляет собой электромагнитная волна. Какова ее скорость распространения в вакууме?
2. Запишите волновое уравнение для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в направлении оси ОХ и поясните входящие в него величины.
3. Что означает выражение «вектора образуют правую тройку»?
4. Как определяются величина и направление вектора Пойнтинга?
5. Когда в двухпроводной линии существует бегущая и когда стоячая волна? Как отличается распределение амплитуд в бегущей и стоячей волнах?
6. Чему соответствуют максимумы силы тока, регистрируемые датчиком петлевого зонда в работе?
7. Как связаны расстояния между соседними пучностями и узлами с длиной волны генератора?
8. Что определяет волновое сопротивление линии и как его рассчитать?

5. Список литературы

В качестве литературы по электромагнитным волнам рекомендуется [1, §109-111; 2, §153-155]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество. Волны. Оптика. С.-Пб.: Лань, 2022. – 468 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2006. – 560 с.