

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА»

А.Л. Суркаев, С.О. Зубович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Методические указания



Волгоград
2015

УДК 53 (075.5)

Рецензент:

Канд. физ.-мат. наук, доцент Т.А. Сухова

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

А.Л. Суркаев, **Определение скорости распространения электромагнитных волн** [Электронный ресурс]: методические указания / А.Л. Суркаев, С.О. Зубович //Сборник «Методические указания» Выпуск 3.-Электрон. текстовые дан.(1файл:141Kb) – Волжский: ВПИ (филиал) ГОУВПО ВолгГТУ, 2015.- Систем.требования: Windows 95 и выше; ПК с процессором 486+; CD-ROM.

Методические указания содержат рекомендации к выполнению лабораторной работы, представленной во второй части практикума кафедры «Прикладная физика и математика» Волжского политехнического института.

Предназначены для студентов всех форм обучения.

©Волгоградский
государственный
технический
университет, 2015
© Волжский
политехнический
институт, 2015

Лабораторная работа № 235

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

235.1. Цель работы: Изучение процесса распространения электромагнитных волн и экспериментальное определение их длины и скорости распространения в воздухе методом стоячей волны.

235.2. Описание лабораторной установки

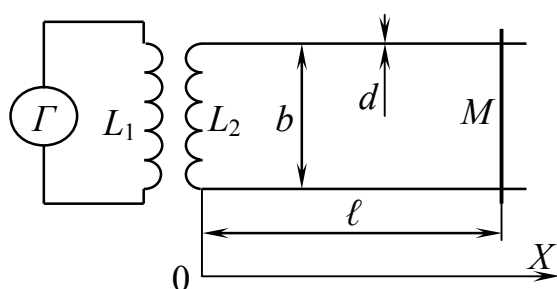


Рис.235.1

В данной работе используется, так называемая схема Лехера, представляющая собой два длинных провода, натянутых параллельно друг другу, в которые через индуктивную связь L_1-L_2 (рис.235.1) передаётся энергия колебаний генератора высокой частоты G , который питает линию переменным напряжением $U = U_m \cdot \sin \omega t$ с постоянной круговой частотой $\omega = 2\pi\nu$, где $\nu = 1,5 \cdot 10^8$ Гц – частота используемого в работе генератора.

Двухпроводная линия имеет конечную длину ℓ , т.к. ограничена с одной стороны омическим сопротивлением R (мостик M)

Роль проводов сводится к тому, что они задают направление распространения электромагнитной волны.

Для определения координат пучностей электрического поля используется мостик с неоновой лампочкой, а для определения координат пучностей магнитного поля – мостик с лампочкой накаливания.

235.3. Методика эксперимента

В 60-х годах XIX в. английский ученый Дж. Максвелл (1831-1879) обобщил экспериментально установленные законы электрического и магнитного полей и создал законченную единую *теорию электромагнитного поля*. Она позволяет решить *основную задачу электродинамики*: найти характеристики электромагнитного поля заданной системы электрических зарядов и токов. Основу теории Максвелла составляет система уравнений в интегральной форме (уравнения Максвелла):

1. Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{\ell} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} .$$

Это уравнение показывает, что магнитные поля могут создаваться либо движущимися зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями.

2. Теорема о циркуляции вектора напряженности суммарного электрического поля:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{\ell} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} .$$

Это уравнение показывает, что источниками электрического поля могут быть не только электрические заряды, но и меняющиеся во времени магнитные поля.

3. Теорема Гаусса для электрического поля:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q = \int_V \rho dV .$$

Согласно теореме электрическое поле создается электрическими зарядами.

4. Теорема Гаусса для магнитного поля:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Согласно теореме в природе нет носителей элементарного магнитного заряда.

Для полного описания явлений в электрических и магнитных полях к уравнениям Максвелла надо добавить выражения, связывающие напряженности поля и индукции в однородных средах – т.н. материальные уравнения:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad \vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где ρ – объемная плотность заряда внутри замкнутой поверхности; γ – удельная проводимость вещества.

Уравнения Максвелла – наиболее общие уравнения для электрических и магнитных полей в покоящихся средах. Они играют в учении об электромагнетизме ту же роль, что и законы Ньютона в механике.

Из уравнений Максвелла следует, что изменяющееся электрическое и магнитное поля неразрывно связаны между собой, образуя электромагнитное поле.

В данной лабораторной работе изучаются *электромагнитные волны* – распространяющиеся в пространстве колебания электрического и магнитного полей.

Рассмотрим процесс образования электромагнитной волны. Пусть в некоторой точке A внутри безграничной непроводящей среды каким-либо образом создано электрическое поле \vec{E} (рис. 235.2). Если нет зарядов, поддерживающих это поле, то оно будет убывать. Но убывающее в точке A электрическое поле будет вызывать появление в окружающем пространстве магнитного поля напряженностью \vec{H} (в частности, такое поле возникает в точке B).

Поскольку в среде не имеется постоянных токов, поддерживающих магнитное поле в точке B , то это поле будет убывать и вызовет появление

вихревое электрического поля в точке C приведет к появлению магнитного поля напряженностью \vec{H}_1 в точке K и т.д.

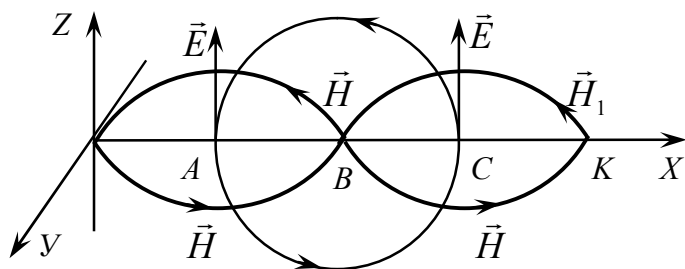


Рис.235.2.

Таким образом, изменение электрического поля в точке A явится началом электромагнитного возмущения, распространяющегося вдоль оси X и представляющего собой электромагнитную волну.

Уравнение плоской электромагнитной волны, распространяющейся в направлении положительной оси X , в непроводящей среде с постоянными ϵ и μ , имеет вид:

$$E = E_m \cdot \cos(\omega t - kx), \quad H = H_m \cdot \cos(\omega t - kx), \quad (235.1)$$

где E и H – мгновенные значения напряженностей электрического поля и магнитного полей; E_m , H_m – их амплитудные значения; ω – круговая частота изменения вектора \vec{E} и \vec{H} волны; $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; v – фазовая скорость распространения волны; λ – длина волны.

В любой точке электромагнитного поля колебания векторов \vec{E} и \vec{H} происходят во взаимоперпендикулярных плоскостях одинаковой фазы. Кроме того, направления колебаний \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны скорости

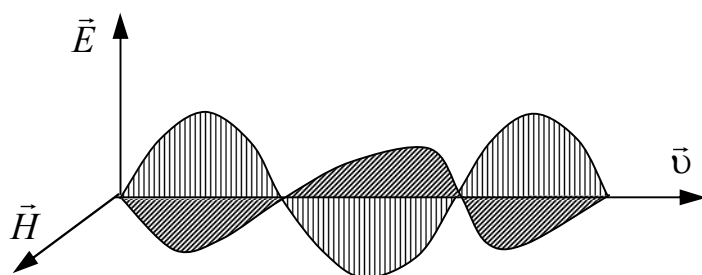


Рис. 235.3

распространения волны v . Таким образом, электромагнитная волна – есть волна поперечная. Направление распространения волны можно определить по правилу

буравчика. Если рукоятку буравчика вращать в направлении от \vec{E} к \vec{H} (рис.235.3), то направление поступательного движения оси буравчика укажет направление распространения волны.

При наложении бегущей и отраженной от некоторой преграды возникает стоячая электромагнитная волна. При отражении волны, т.е. при изменении направления скорости на противоположное, один из векторов \vec{E} или \vec{H} должен изменить скачкообразно фазу на π . Если при отражении изменяется фаза колебаний вектора \vec{E} на π , то уравнение отраженной электромагнитной волны будет иметь вид:

$$E' = E_m \cdot \cos(\omega t + kx + \pi), \quad H' = H_m \cdot \cos(\omega t + kx). \quad (235.2)$$

В результате наложения бегущей (235.1) и отраженной (235.2) волн получим результирующую (стоячую) волну:

$$E_{рез} = E + E' = 2E_m \cdot \sin(kx) \cdot \sin(\omega t), \quad H_{рез} = H + H' = 2H_m \cdot \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (235.3)$$

или, учитывая, что $E_{рез} = 2E_m \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \sin \omega t$:

$$H_{рез} = 2H_m \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \cos \omega t. \quad (235.4)$$

Из сравнения уравнения (235.1) и (235.4) вытекают некоторые особенности стоячей электромагнитной волны по сравнению с бегущей:

1) в стоячей волне, как видно из (235.4), амплитуда колебаний электрической составляющей волны

$$E_c = \left| 2E_m \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \right| \quad (235.5)$$

и амплитуда колебаний магнитной составляющей волны

$$H_c = \left| 2H_m \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \right| \quad (235.6)$$

зависят от координаты X . В бегущей же волне амплитуды E_m и H_m везде одинаковы.

Точки стоячей волны, в которых E_c максимальна, называются *пучностями* электрического поля. Их координаты определяются из условия

$\sin \frac{2\pi}{\lambda} x = 1$, т.е. при выполнении равенства:

$$\frac{2\pi}{\lambda} = (2n + 1)\frac{\pi}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (235.7)$$

а координаты пучностей магнитного поля – из условия $\cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 1$, т.е. если:

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (235.8)$$

Точки стоячей волны, в которых E_c и H_c равны нулю, называются соответственно *узлами* электрического и магнитного поля. Координаты пучностей электрического поля в стоячей волне совпадают с координатами узлов магнитного поля;

2) в пределах участка стоячей волны от одного узла до соседнего все векторы \vec{E} и \vec{H} колеблются в одинаковой фазе; при переходе к соседнему участку стоячей волны фазы колебаний векторов меняются на обратные. Это видно из рис.235.4, на котором представлен ряд «моментальных фотографий» стоячей волны с интервалом в четверть периода (стрелки на рис.235.4 соответствуют векторам \vec{E} электрической составляющей волны, точки на оси соответствуют значениям $\vec{E} = 0$).

3) В стоячей волне нет одностороннего переноса энергии вдоль оси X , как это имеет место в бегущей волне.

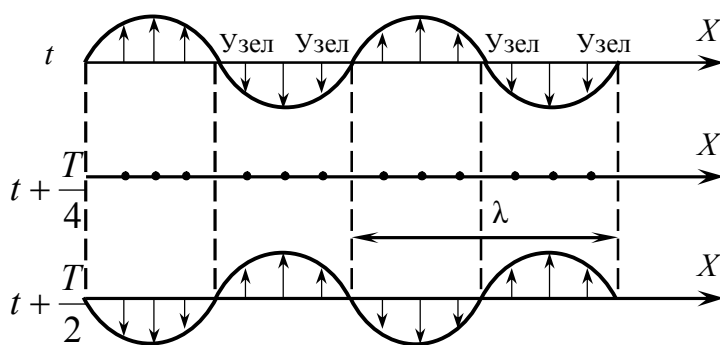


Рис.235.4.

Как видно из уравнений (235.7) и (235.8) расстояние между соседними пучностями электрической составляющей волны, как и расстояние между соседними пучностями магнит-

ной составляющей волны равно половине длины волны (см. рис. 235.4):

$$x_{(n+1)} - x_n = \frac{\lambda}{2}. \quad (235.9)$$

В настоящей работе измеряется расстояние между соседними пучками и по формуле (235.9) вычисляется длина электромагнитной волны.

Скорость распространения волны определяется по формуле:

$$v = \lambda \cdot \nu, \quad (235.10)$$

где ν – частота колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} электромагнитной волны.

Ещё до того, как электромагнитные волны были впервые получены практически, Максвелл на основе своей теории электромагнитного поля вычислил их скорость. В диэлектрике скорость распространения электромагнитных волн:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}}, \quad (235.11)$$

где ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; $\epsilon_0 = 8,854188 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная.

В вакууме $\epsilon = 1$, $\mu = 1$ и, согласно формуле (235.11), расчеты дают значение $v = 299\,792\,458 \text{ м/с}$, что совпадает с точным значением:

$$c = (299\,792\,458 \pm 1,2) \text{ м/с}, \text{ или } c = 1\,079\,252\,848,8 \text{ км/ч.}$$

Для решения школьных задач и разного рода оценок, не требующих большой точности, обычно используют значение $c = 300\,000\,000 \text{ м/с}$ ($3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$).

Практически таким же является значение скорости распространения электромагнитных волн в воздухе, т.к. значения диэлектрической и магнитной проницаемости среды для воздуха близки к единице:

$$\epsilon_{\text{возд}} = 1,000590; \mu_{\text{возд}} = 1,00000038.$$

Расчеты по формуле (235.11) дают значение $v = 299\,703\,998 \text{ м/с}$, что всего на 0,03% отличается от табличного.

Используемый в данной работе метод определения скорости распространения электромагнитной волны в воздухе основан на аналогии процессов распространения плоской электромагнитной волны в свободном про-

странстве и процессов, происходящих на длинной идеальной двухпроводной линии. Двухпроводная линия может быть отнесена к классу длинных при условии, что $d \ll b$, $b < \frac{\lambda}{4}$, $\ell > \lambda$, где d – диаметр проводов линии, b – расстояние между проводами, ℓ – длина линии, λ – длина волны. Линия называется идеальной, если она однородна и потерями энергии электромагнитной волны можно пренебречь. При выполнении этих условий образующаяся вдоль проводов электромагнитная волна будет иметь плоский фронт и описываться уравнением (235.1).

Для ограничения двухпроводной линии на нее надет мостик малого омического сопротивления $R \ll Z$, где Z – волновое сопротивление двухпроводной линии. При отражении электромагнитной волны от такого мостика электрическая составляющая волны изменяет фазу на π , а магнитная составляющая не изменяет фазу, что дает возможность описывать отраженную волну уравнением (235.2), а в двухпроводной линии при этом возникает стоячая волна, определяемая уравнением (235.4). В этом случае, в конце двухпроводной линии (в месте отражения) располагается узел электрической составляющей стоячей волны и пучность магнитной составляющей.

Для получения резко выраженных пучностей и узлов необходимо двухпроводную линию настроить в резонанс с генератором УВЧ. Для этого перемещают проводящий мостик, устанавливая его так, чтобы на линии укладывалось нечетное число четвертей длин волн, т.е.

$$\ell = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \text{ где } n - \text{любое целое число.}$$

Положение пучностей электрического поля определяется с помощью мостика с неоновой лампочкой. Неон, как и другие разреженные газы, в тлеющем разряде может светиться только при воздействии электрического поля и не светится под действием магнитного поля.

Пучности магнитного поля обнаруживаются с помощью мостика с лампой накаливания. Лампочка накаливания наиболее ярко светится в местах пучностей магнитного поля, поскольку в этом случае в лампочке, как в мостике с малым омическим сопротивлением, продолжает сохраняться пучность тока и пучность магнитного поля. При помещении же лампочки накаливания в тех местах линии, где находятся пучности электрического поля - из-за ее малого сопротивления нарушается условие резонанса, длина линии становится кратной четному числу четвертей длины волны и стоячая волна не возникает. Следовательно, в местах пучностей электрического поля лампочка накаливания не светится.

235.4. Порядок выполнения работы

1. Включите генератор УВЧ в сеть.
2. Мостик с лампочкой накаливания подвесьте в начале линии. Плавно передвигая мостик вдоль линии, определите координаты точек, в которых лампочка горит наиболее ярко. Полученные значения координат пучностей магнитного поля $X_n(H)$ занесите в таблицу 235.1.
3. Подвесьте в начале линии мостик с неоновой лампочкой. Плавно перемещая мостик вдоль линии, определите координаты точек, в которых лампочка горит наиболее ярко. Полученные значения координат пучностей электрического поля $X_n(E)$ занесите в таблицу 235.1.

Таблица 235.1. *Определение длины и скорости распространения электромагнитных волн в воздухе.*

$X_n(H),$ м	$\lambda_H,$ м	$\langle \lambda_H \rangle,$ м	$X_n(E),$ м	$\lambda_E,$ м	$\langle \lambda_E \rangle,$ м	$\langle \lambda \rangle,$ м	$v,$ м/с

235.5. Обработка результатов измерений

1. Вычислите длину волны магнитной составляющей λ_H и электрической составляющей λ_E по формуле:

$$x_{(n+1)} - x_n = \frac{\lambda}{2},$$

и полученные значения занесите в таблицу 235.1.

2. Вычислите средние значения $\langle \lambda_H \rangle$ и $\langle \lambda_E \rangle$, а затем среднее значение длины электромагнитной волны $\langle \lambda \rangle = \frac{\langle \lambda_H \rangle + \langle \lambda_E \rangle}{2}$. Полученные результаты занесите в таблицу 235.1.

3. Рассчитайте скорость распространения электромагнитной волны в воздухе по формуле:

$$v = \lambda \cdot \nu$$

Частота используемого в работе генератора равна $\nu = 1,5 \cdot 10^8$ Гц.

4. Сравните полученный результат с табличным и сделайте вывод.

235.6. Контрольные вопросы

1. Понятие тока смещения.
2. Каков физический смысл каждого уравнения Максвелла?
3. Что такое электромагнитная волна?
4. Какими свойствами обладают электромагнитные волны.
5. Как выглядит волновое уравнение и его решение?
6. Что такое волновой вектор?
7. Как образуется стоячая волна? Что такое амплитуда, узел, пучность?
8. В чем заключается физический смысл вектора Умова-Пойтинга?

9. От каких факторов зависят случайные погрешности в данной экспериментальной работе?

Литература, рекомендуемая для обязательной проработки: [1], §§2.1, ..., 2.6; [2], §§254, ..., 272; [3], §§109, ..., 113; [4], §§81, ..., 84; [5], §§161, ..., 164; [6], §§IV.11.1, ..., IV.11.7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы: Учебное пособие для физич. спец. вузов. – 5-е изд., испр. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 263 с.
2. Калашников С.Г. Электричество. – 6-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: КноРус, 2012. – Т.2. – 576 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – Т.3. – 656 с.
5. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – 8-е изд., испр. и перераб. – М.: Изд-во «Оникс», 2008. – 1056 с.

Учебное издание

Анатолий Леонидович Суркаев
Сергей Олегович Зубович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Методические указания

в авторской редакции

Темплан 2007 г., поз.№ 27. В
Лицензия ИД № 04790 от 18.05.2001 г.

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,16.

Уч.-изд. л. 1,2 на магнитоносителе

Волгоградский государственный технический университет.
400131, г. Волгоград, просп. им. В.И. Ленина 28.

РПК “Политехник” Волгоградского государственного
технического университета.
400131, Волгоград, ул. Советская, 35.