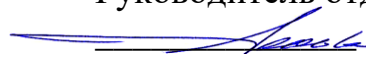


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель отделения ЭФ

 А.М. Лидер

« ___ » _____ 2018 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-24

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХПРОВОДНОЙ
ЛИНИИ**


Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Общая физика» по теме «Колебания и волны»
для студентов всех специальностей

Томск-2018


УДК 53.01

Электромагнитные волны в двухпроводной линии. Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Общая физика» для студентов всех специальностей. - Томск. Изд. ТПУ, 2018.- 17 с.

Составитель: зав. лабораторией

отделения экспериментальной физики:  Т.Н. Мельникова

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром отделения экспериментальной физики 2018 г.

Руководитель отделения ЭФ:  А.М. Лидер

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Цель работы: исследование распределения амплитуд напряжения и тока вдоль двухпроводной линии при различных режимах ее работы на сверхвысоких частотах (СВЧ) и экспериментальное определение длины волны генератора СВЧ волн и скорости их распространения в воздухе методом стоячих волн.

Приборы и принадлежности: генератор СВЧ волн, двухпроводная линия, столик с детекторами для измерения тока и напряжения вдоль линии.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Процесс распространения колебаний в пространстве называется **волновым процессом**.

Возмущения электромагнитного поля (взаимно связанных электрического и магнитного полей), распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью v называются *электромагнитными волнами*. В вакууме электромагнитные волны (рис.) являются *поперечными* и их скорость распространения $c = 299792458$ м/с.

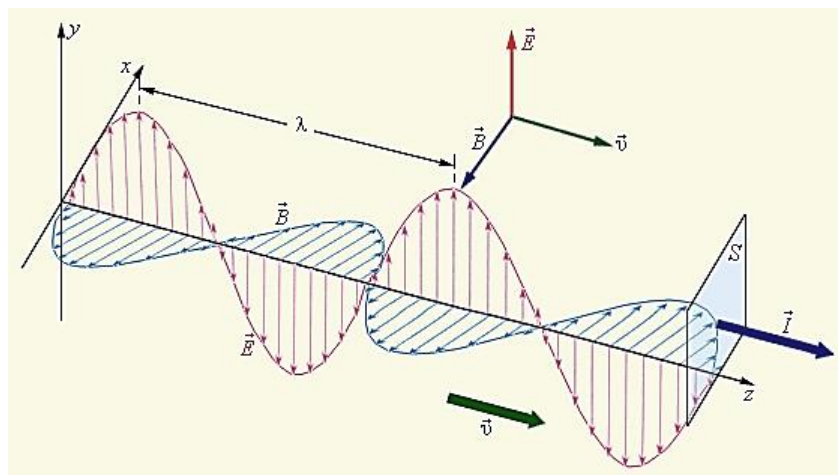


Рис. 1

Особенности электромагнитных волн, законы их возбуждения и распространения полностью описываются уравнениями Максвелла. Исследование электромагнитных волн в пространстве связано с некоторыми экспериментальными трудностями, поэтому Лехером была предложена система, состоящая из двухпроводной линии, источника и приёмника электромагнитных волн.

Во многих случаях приходится иметь дело с короткими линиями, на протяжении которых укладывается сравнительно небольшое число длин волн. В этих случаях существенную роль играет 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.

Для выяснения основных особенностей стоячих электромагнитных волн достаточно рассмотреть только две волны: первичную и одну отраженную от конца линии. Введем координатную ось x , направленную вдоль линии (рис. 2), и положим, что колебания электрического поля первичной волны в точке линии O имеют вид:

$$E_1 = E_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

Тогда колебания в точке линии x будут:

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t - kx). \quad (2)$$

Считая, что волна отражается полностью, колебания поля отраженной волны в одной и той же точке x можно представить формулой:

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t + kx - \varphi). \quad (3)$$

Здесь знак «+» у слагаемого kx выражает то, что отраженная волна распространяется в отрицательном направлении оси x (справа налево, рис.2). Угол φ имеет следующий смысл. Полагая в формуле (3) $x = 0$ и сравнивая ее с (1), видим, что φ есть запаздывание по фазе отраженной волны в точке O по сравнению с колебаниями первичной волны в той же точке.

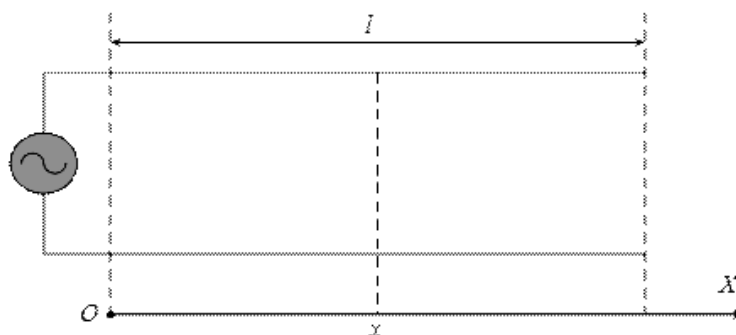


Рис.2 Ограниченная двухпроводная линия.

Складываясь, обе волны дают результирующее поле:

$$E = E_1 + E_2 = E_0 [\sin(\omega t - kx) + \sin(\omega t + kx - \varphi)].$$

Применяя известную формулу тригонометрии о сумме синусов и учитывая еще, что $\cos(-\alpha) = \cos\alpha$ находим:

$$E = 2E_0 \cos(kx - \frac{\varphi}{2}) \sin(\omega t - \frac{\varphi}{2}) \quad (4)$$

Формула (4) показывает, что в линии будут происходить гармонические колебания поля с частотой первичной волны ω и с начальной фазой $(-\varphi/2)$. Однако амплитуда этих колебаний

$$E_A = 2E_0 \cos(kx - \frac{\varphi}{2}) \quad (5)$$

Оказывается, зависящей от координаты x и потому различна в различных точках линии. В определенных точках E_A достигает максимума. Эти точки называются *пучностями* электрического поля. Их координаты определяются условием

$$kx_A - \frac{\varphi}{2} = 0, \pi, 2\pi.$$

Для расстояния Δx между двумя соседними пучностями имеем:

$$kx_A = \pi.$$

Так как $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, то отсюда:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

В точках, называемых узлами электрического поля $E = 0$, x можно найти из условия:

$$kx_y - \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots, (2n+1)\frac{\pi}{2},$$

x_y - координата узла.

Следовательно, два соседних узла отстают друг от друга на расстояние

$$\Delta x = \frac{\pi}{k} = \frac{\lambda}{2}.$$

Расстояние между двумя соседними узлами такое же, как и между пучностями и равно половине длины волны $\lambda/2$.

Рис. 3 поясняет характер колебания поля в стоячей волне (электромагнитной): вдоль горизонтальной оси отложены перемещения x вдоль линии, а на вертикальной оси – амплитуда колебаний поля E_A . Во всех точках между двумя соседними узлами колебания происходят с одинаковой начальной фазой, так что E во всех точках одновременно достигает максимума и одновременно обращается в нуль (в соответствии с формулой (5)). Но при переходе через каждый узел

$$\cos(kx - \frac{\varphi}{2})$$

изменяет знак, что соответствует изменению фазы колебаний на π .

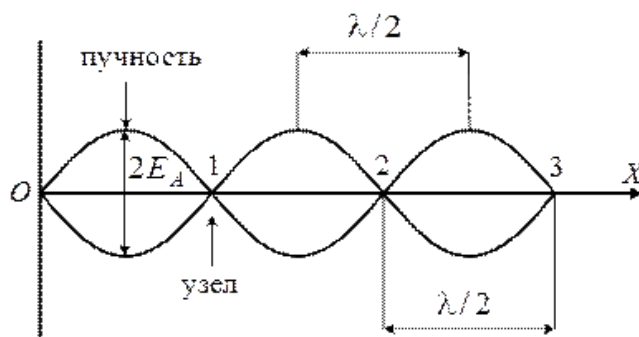


Рис. 3. Колебания электрического поля в стоячей волне.

Выше было сказано, что в распространяющейся волне колебания электрического и магнитного полей E и H находятся в фазе. В стоячей электромагнитной волне это уже не имеет места, и между колебаниями E и H существует разность фаз, а пучности электрического поля не совпадают с пучностями магнитного поля.

Причина этого различия заключается в том, что при отражении электромагнитной волны от конца линии происходит изменение фазы колебаний. Известно, что направления векторов E и H связаны с направлением скорости распространения v правилом правого винта. Положим, что волна (первичная) движется слева направо и что расположение векторов E и H в волне в конце линии такое, как показано на рис. 4а.

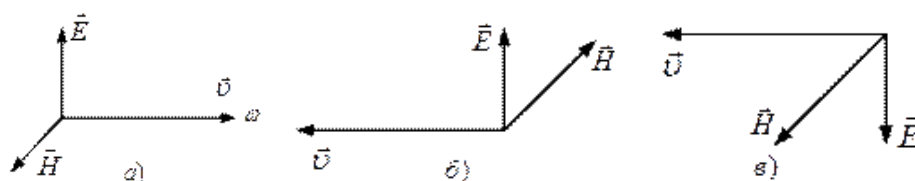


Рис. 4. Взаимная ориентировка электрического и магнитного векторов до (а) и после (б, в) отражения электромагнитной волны.

Чтобы скорость волны изменилась на противоположную, нужно, чтобы один из векторов E и H изменил знак (рис. 4б и в). Но изменение знака поля обозначает изменение фазы колебаний на π . Поэтому при отражении фаза колебаний одного из полей должна обязательно измениться скачкообразно на π . При этом, если изменяется фаза электрического поля, то фаза магнитного поля остается без изменений, и наоборот.

Положим, что линия на конце разомкнута. В этом случае переменные токи, возникающие в проволоках, будут вызывать на конце линии наибольшие колебания зарядов. Здесь, следовательно, будет расположена одна из пучностей электрического поля и напряжения. Это значит, что электрическое поле в отраженной волне

направленно так же, как в падающей, т.е. оно не изменяет фазы. Но при тех же условиях, т.к. проволоки граничат с диэлектриком, амплитуда тока на конце линии будет равна нулю. Здесь будет узел тока, а значит, и узел магнитного поля. Следовательно, магнитное поле в отраженной волне направлено противоположно полю падающей волны, т.е. оно изменяет фазу на π .

Если линия замкнута на конце мостиком, то будет происходить обратное. Так как концы проволоки замкнуты, то напряжение между ними будет всегда равно нулю и на конце линии будет расположен узел напряжения и электрического поля. Напротив амплитуда тока в проводящем мостике будет наибольшая и на конце линии образуется пучность тока. Здесь же будет пучность и магнитного поля.

Таким образом, в стоячей электромагнитной волне узлы электрического поля (напряжения) совпадают с пучностями магнитного поля (тока) и наоборот.

В двухпроводной линии реализуются два различных процесса передачи электромагнитного поля: с помощью *токов проводимости* и с помощью *токов смещения*.

Если быстрота изменения полей мала (малые частоты), то токами смещения по сравнению с токами проводимости можно пренебречь и последние играют основную роль. В этом случае электрические явления существенно зависят от сопротивления линии, и, следовательно, от материала проводников.

Если же поля изменяются быстро (большие частоты), то основную роль играют токи смещения и электрические явления определяются электромагнитными волнами. При этом основные процессы происходят между проводами, в окружающей среде, и электрические явления практически не зависят от свойств материала проводов.

В бесконечной двухпроводной линии распространяется бегущая волна.

В электронике Лехеровыми линиями или Лехеровой системой называются пары параллельных проводов или стержней, с помощью которых измеряют длину радиоволн в основном на УВЧ и СВЧ диапазонах.

Эти провода образуют короткую сбалансированную линию передачи. При подключении к источнику высокочастотной энергии, например, к радиопередатчику, радиоволны образуют стоячие волны по всей длине линии передачи. Передвигая токопроводящую перемычку (мостик), соединяющую накоротко оба провода системы, можно физически измерить длину волны.

Австрийский физик Эрнст Лехер, усовершенствовав методы, используемые Оливером Лоджем и Генрихом Герцем, разработал примерно в 1888 году свой метод измерения длины волны.

ЛЕХЕР Эрнст (Lecher Ernst) (1.VI.1856 - 19.VII.1926) - австрийский физик-экспериментатор. Р. в Вене.

Работы в области электричества, термоэлектричества, электромагнитных колебаний и волн.



Сегодня доступны более совершенные методы измерения частоты, и Лехерова линия в настоящее время чаще всего используется в качестве элементов схемы при использовании в высокочастотном оборудовании, например, в телевизорах, Лехерова линия используется в качестве резонансных контуров, в узкополосных фильтрах и в устройствах согласования импедансов. Она используется на частотах, лежащих между КВ/УКВ диапазонами, там, где используются сосредоточенные компоненты, и на диапазонах УВЧ/СВЧ, где применяются объёмные резонаторы.

Электромагнитная энергия передается полностью от источника на нагрузку через двухпроводную линию только тогда, когда в линии нет потерь и отражений энергии, т.е. имеет место *бегущая волна*. В бегущей волне амплитуды напряжения и тока не зависят от координаты x . Чисто бегущая волна могла бы существовать в бесконечно длинной однородной линии без потерь. В ограниченной по длине линии тоже может иметь место бегущая волна, если на конце линии, между проводами, включить определенное сопротивление, равное входному сопротивлению аналогичной бесконечной линии и так же, как бесконечная линия, способное поглотить всю энергию, поступающую от источника.

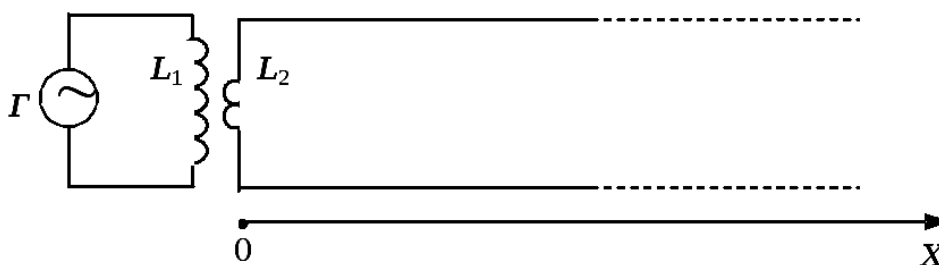


Рис. 5
Схема Лехера

Это сопротивление, которое равно отношению амплитуды напряжения к амплитуде тока в бегущей волне, называют *волновым сопротивлением* линии. Волновое сопротивление линии зависит только от ее геометрических и электрических свойств. Если считать, что тепловые потери тока в линии малы, а утечка между проводами незначительна, то приближенно волновое сопротивление будет равно:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (7)$$

где L – индуктивность единицы длины линии, C – емкость единицы длины между проводами. Индуктивность L и емкость C зависят от геометрических размеров проводов и их взаимного расположения.

Для того чтобы электромагнитную энергию полностью передать от источника через двухпроводную линию в приемник, необходимо сделать входное сопротивление приемника равным волновому сопротивлению линии. Волновое сопротивление приближенно можно выразить через геометрические размеры линии:

$$Z_0 = 276 \lg \frac{a}{d}, \quad (8)$$

где a – расстояние между проводами, d – диаметр провода.

Если мы нагрузим линию на конце сопротивлением большим или меньшим волнового, то появится отраженная волна и наряду с бегущей волной в линии установятся колебания, имеющие форму стоячей волны. Если линия закорочена ($R_H = 0$) или разомкнута ($R_H = \infty$), на конце линии происходит полное отражение энергии и в линии без потерь установится только *стоячая волна*.

В том случае, когда частота колебаний источника близка к одной из собственных частот линии, имеет место резкое увеличение амплитуды колебаний тока и напряжения в линии (явление *резонанса*). Частоты собственных колебаний линии определяются из условия, что по длине линии укладывается целое число четвертей длины волны (в соответствии с условиями на ее концах).

Если линия закорочена (или открыта) на обоих концах, то при каждом собственном колебании на линии должно уложиться *четное число четвертей волны*. Если линия с одного конца закорочена, а с другого конца открыта, то на линии при каждом собственном колебании уложится *нечетное число четвертей волны*.

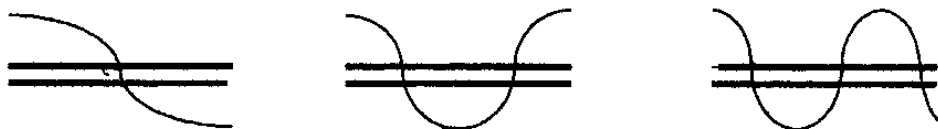
На графике (рис. 6) указано распределение амплитуд колебаний напряжения и тока для первых трех собственных колебаний линии при различных условиях на ее концах.

Первый тон

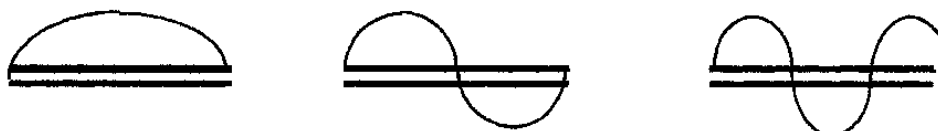
Второй тон

Третий тон

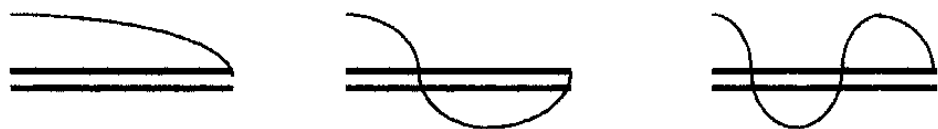
Распределение амплитуд тока при $R_H = 0$



Напряжение



Распределение амплитуд тока при $R_H = \infty$



Напряжение

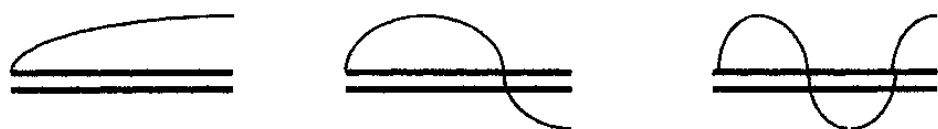


Рис. 6

Необходимо иметь в виду, что в реальных двухпроводных линиях не могут быть практически осуществлены режимы чисто бегущей или чисто стоячих волн. Причины этого состоят в наличии во всякой реальной линии отражений и потерь на джоулево тепло и на излучение электромагнитной энергии в окружающее пространство.

Таким образом, в реальной двухпроводной линии всегда имеет место смешанный режим бегущих и стоячих волн. В настоящей работе, меняя сопротивление R_H на конце линии, можно добиться условий, при которых будут преобладать или бегущие волны ($R_H \approx Z_0$), или стоячие волны ($R \rightarrow 0$ или $R_H \rightarrow \infty$).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает генератор СВЧ волн Г4-79, двухпроводную линию, установленную на оптической скамье, столик, на котором расположены детекторы – витки связи, подключенные через керамические СВЧ диоды к микроамперметрам. Длина линии – 120 см. Диаметр провода линии – 5 мм, а расстояние между проводами – 50 мм. Таким образом, волновое сопротивление линии – 276 Ом. Связь

между генератором и линией осуществляется отрезком коаксиального провода с волновым сопротивлением 50 Ом. В линии возбуждается поперечная электромагнитная волна. Исследование распределения амплитуд тока и напряжения вдоль линии производится приборами – микроамперметром и милливольтметром, включенными в витки связи (которые определенным образом ориентируются относительно схемы Лехера), последовательно с кристаллическими СВЧ диодами.

Виток связи прибора, который мы будем называть *прибором тока*, ориентируется перпендикулярно к направлению магнитного поля H (рис. 7). Индукционный ток, наводимый в нем высокочастотным магнитным полем H , будет пропорционален амплитуде тока в том сечении линии, около которого расположен виток связи.

Два последовательно соединенных витка связи прибора, который мы будем называть *прибором напряжения*, располагаются около линии таким образом (рис. 8), что обеспечивают лишь емкостную связь с проводами линии. Высокочастотное электрическое поле E будет индуцировать в цепи прибора ток, пропорциональный амплитуде напряжения между проводами в том сечении линии, около которого расположены витки связи.

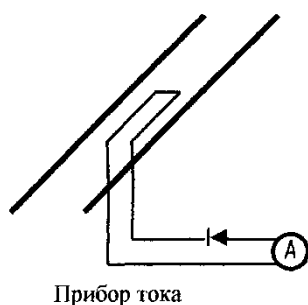


Рис. 7

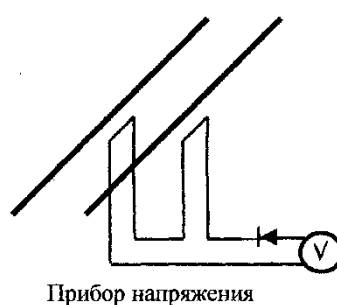


Рис. 8

Необходимо учесть, что напряженность электрического и магнитного полей вблизи провода очень сильно убывает с расстоянием от провода; так, например, изменение расстояния на один-два миллиметра может привести к значительной ошибке, поэтому необходимо при измерении виток прибора держать на одном и том же расстоянии от линии на всей ее длине. Кроме этого, необходимо во время измерений держаться по возможности дальше от линии, так как, находясь вблизи линии, экспериментатор влияет на распределение поля.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА СВЧ

Схема Лехера при наличии измерительного прибора тока (или напряжения) может служить *волномером* – прибором, измеряющим длину волны и частоту колебаний.

Для измерения длины волны с помощью двухпроводной линии удобно использовать условия, когда в линии установилось одно из ее собственных колебаний (т.е. имеет место резонанс линии с генератором). Это соответствует настройке линии в резонанс с генератором. С этой целью линия замыкается переключкой с весьма малым сопротивлением и при помощи индикаторов отыскивается положение этой переключки, соответствующее вышеуказанной настройке линии. Именно индикаторы напряжения и тока дают тем большие показания, соответственно, в пучностях напряжения или тока, чем точнее линия настроена в резонанс. Надо иметь в виду, однако, что при перемещениях переключки в поисках резонанса смещаются и положения пучностей, в которые надо помещать индикаторы.

Расстояние l между двумя, максимумами напряжения или тока будет равно $\frac{1}{2}\lambda$ (рис. 6), в которых колебания отличаются по фазе на π . Следовательно, $\lambda = 2l$ см. Таким образом можно определить и частоту, помня, что $v = \frac{c}{\lambda}$, где c – скорость распространения электромагнитной волны. Она принимается равной $3 \cdot 10^8$ м/с (скорости света).

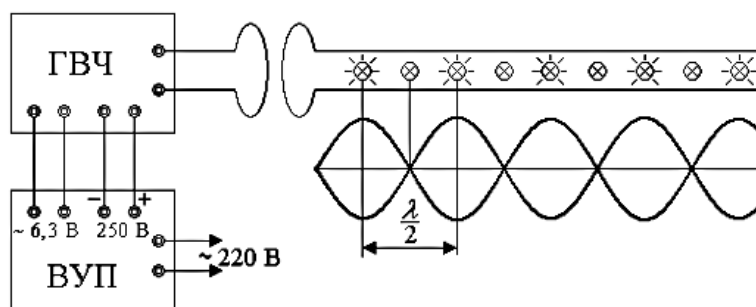


Рис. 9

В стоячей волне, в отличие от бегущей, колебания электрического и магнитного полей не находятся в одной фазе – они сдвинуты, причём так, что пучность одного поля совпадает с узлом другого. Это объясняется изменением фазы колебаний при отражении от конца двухпроводной линии. Измеряя расстояние между двумя соседними пучностями в стоячей волне и учитывая то, что оно равно половине длины бегущей волны, легко вычислить искомую длину волны.

ЗАДАНИЕ

1. Измерьте распределение амплитуд тока и напряжения для трех нагрузок на конце линии:

а) $R_H = 0$ – линия короткозамкнутая;

б) $R_H = \infty$ – линия с открытым концом;

с) $R_H = Z_0$ – линия нагружена волновым сопротивлением, где R_H – сопротивление на конце линии, а Z_0 – волновое сопротивление линии, равное для нашей линии 276 Ом.

2. Определите длину волны и частоту электромагнитных волн, излучаемых генератором СВЧ Г4-83.

3. Подсчитайте погрешность измерений $\bar{\lambda} = \tilde{\lambda} \pm \Delta\tilde{\lambda}$ и $\bar{\nu} = \tilde{\nu} \pm \Delta\tilde{\nu}$.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Включите генератор Г4-79 и прогрейте его в течении 5 мин.
2. Установите платформу с витками связи и измерительными приборами в конце линии.
3. Переключите линию, непосредственно над центром держателя витков связи, проводником с сопротивлением, близким к нулю. В этом случае линия короткозамкнута.
4. Подберите с помощью ручки на передней панели генератора такую частоту электромагнитных волн, поступающих на линию, чтобы прибор, показывающий ток, показывал максимальное значение, а прибор, показывающий напряжение – минимальное значение. Это означает, что в линии установилась стоячая волна и частота колебаний генератора близка к одной из собственных частот линии. Значение частоты запишите в отчет.
5. Измерьте распределение амплитуд тока и напряжения, медленно перемещая платформу с приборами по направлению к генератору и записывая показания микроамперметра и милливольтметра через каждые 1 см. В пучностях и узлах измерения проведите наиболее тщательно для повышения точности определения координат узлов и пучностей. Координату определяйте по указателю, который расположен на передней стороне бегунка и прибавляйте к этому значению половину ширины бегунка. Результаты измерений занесите в таблицу 1 и в таблицу 2.

6. Постройте на одной координатной сетке графики зависимости амплитуд токов и напряжений. Отметьте на графике положения узлов и пучностей.
7. Рассчитайте на основе полученных графиков среднее значение длины волны генератора λ из измерений расстояния между пучностями на графике $I(x)$ и определите его частоту колебаний $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с.
8. Рассчитайте погрешность в определении длины волны.
9. Оцените ошибку определения частоты генератора по формуле

$$\delta\nu = \frac{\Delta\nu}{\nu} = \delta c + \delta\lambda = \frac{\Delta c}{c} + \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\Delta I}{I_0}},$$

где ΔI — абсолютная ошибка измерений тока, определяемая классом прибора.

$$I_0 = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2},$$

где I_{\max} и I_{\min} — токи прибора, соответствующие пучности и узлу соответственно.

Таблица 1

Координата x , см														
Амплитуда тока, I , мкА.														

Таблица 2

Координата x , см														
Амплитуда напряжения U , мВ														

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Когда в двухпроводной линии существует бегущая и когда стоячая волна? Как отличается распределение амплитуд в бегущей и стоячей волнах?
2. Какие условия необходимы для возникновения стоячей электромагнитной волны?
3. Как устроена схема Лехера и каково ее назначение?

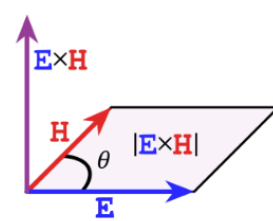
4. Как определяется длина волны и частота электромагнитной стоячей волны в схеме Лехера?
5. Какие волны называются стоячими и каковы условия их возникновения?
6. Какова связь между длиной волны и ее частотой?
7. Запишите волновое уравнение для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в произвольном направлении и в направлении оси x , и его решение.
8. В чем заключается физический смысл вектора Умова - Пойнтинга?
9. Как определяются величина и направление вектора Пойнтинга?
10. Когда в двухпроводной линии существует бегущая и когда стоячая волна? Как отличается распределение амплитуд в бегущей и стоячей волнах?
11. Какие волны называют падающими и какие отраженными? Запишите выражение для падающей и отраженной волн, если коэффициент отражения $\rho_H = -1$.
12. Запишите выражение для падающей и отраженной волн, если коэффициент отражения $\rho_E = -1$.
13. От каких величин и как зависит коэффициент отражения? Как в двухпроводной линии получить режим бегущей волны?
14. От каких характеристик среды зависит скорость распространения электромагнитных волн?
15. Как образуется стоячая электромагнитная волна в двухпроводной линии?
16. Запишите и поясните уравнение стоячей волны.
17. Что называется пучностью и узлом стоячей волны?
18. Каким образом проводится определение длины волны?
19. Расскажите о порядке выполнения работы.
20. Явление резонанса. Условия резонанса в линии Лехера, разомкнутой с обоих концов, и в линии, замкнутой на одном конце.
21. Запишите формулу - определение волнового сопротивления линии.
22. Соотношения между амплитудами тока и напряжения в падающей и отраженной волне.
23. От чего зависит амплитуда и фаза стоячей волны? Чему равны координаты узлов и пучностей?
24. Понятие тока смещения.
25. Каков физический смысл каждого уравнения Максвелла?
26. Что такое волновой вектор?

ГЛОССАРИЙ

1. **Бегущая волна** – волновое движение, при котором поверхность равных фаз (фазовые волновые фронты) перемещается с конечной скоростью (постоянной для однородной среды).
2. **Вектор Умова–Пойнтинга** – вектор плотности потока энергии электромагнитного поля, компоненты которого входят в состав компонент тензора энергии-импульса электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга

$$S = [\vec{E} \times \vec{H}],$$

где E и H – векторы напряженности электрического и магнитного полей соответственно.



3. **Волновой процесс** – распространение колебаний в среде.
4. **Волновое сопротивление** – характеристика среды распространения волны.
5. **Волномер** – прибор, измеряющий длину волны и частоту колебаний.
6. **Пучности стоячей волны** – точки, в которых колебания имеют максимальную амплитуду.
7. **Резонанс** – частотно-избирательный отклик колебательной системы на периодическое внешнее воздействие, который проявляется в резком увеличении амплитуды стационарных колебаний при совпадении частоты внешнего воздействия с определёнными значениями, характерными для данной системы.
8. **Стоячая волна** – явление интерференции волн, распространяющихся в противоположных направлениях, при котором перенос энергии ослаблен или отсутствует. Это периодическое изменение *амплитуды* напряженности электрического и магнитного полей вдоль направления распространения, вызванное интерференцией падающей и отраженной волн.
9. **Ток проводимости** – это направленное движение на большие расстояния свободных зарядов (например, ионов или свободных электронов).
10. **Ток смещения** – величина, пропорциональная скорости изменения индукции электрического поля.
11. **Узлы стоячей волны** – точки, амплитуда колебаний в которых равна нулю.

12. **Электромагнитные волны** – электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды.

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.