ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ
КАФЕДРА ФИЗИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
к выполнению лабораторных работ
по теме

ВОЛНЫ

для студентов I курса очного и заочного отделения
по специальностям ; 090900,200700, 210400, 210700, 090302; 210601;
II курса 010500, 220400, 222000,230100, 230400, 230700, 23100

Составитель: ст.преп. Арсеньев А.Н.
ст.преп. Ефимова А.А.
Редактор: док.ф.-м.н., проф.Глущенко А. Г.
Рецензент: к.ф.-м.н.,доц. Шевченко Г. Н.

Самара 2017

ВНИМАНИЕ!
Подключение лабораторной установки к сети обязательно должно проводиться в присутствии преподавателя или лаборанта!

ПОДГОТОВКА И ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1) При подготовке к выполнению лабораторной работы и к ее защите необходимо изучить краткую теорию и описание к работе; рассмотреть указанный материал по литературе. Изучение материала рационально строить в соответствии с приведенными контрольными вопросами.
2) Подготовить заготовку по лабораторной работе, в которую необходимо включить:
   а) цель работы;
   б) приборы и оборудование;
   в) схема и описание лабораторной установки установки;
   г) вывод расчетных формул;
   е) пустые таблицы для результатов измерений;
   д) после таблиц записать расчетные формулы и оставить пустое место для вычислений.
3) Получить у преподавателя допуск к выполнению работы.
4) Провести измерения и показать их преподавателю.
5) Оформить отчет:
   а) сделать вычисления;
   б) заполнить таблицы;
   в) нарисовать графики;
   г) написать вывод.
6) Сдать письменный отчет и ответить контрольные вопросы преподавателю.

Оглавление

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 61

Измерение скорости звуковой волны методом сложения взаимно-перпендикулярных колебаний

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Используя метод сложения взаимно-перпендикулярных колебаний, опытным путем определить длину звуковой волны и скорость ее распространения в воздухе.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Звуковой генератор, динамик, микрофон, оптическая скамья, усилитель, осциллограф.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите осциллографический метод сложения взаимно-перпендикулярных колебаний.
2. Расскажите об устройстве электронно-лучевой трубки.
3. При каком соотношении фаз взаимно-перпендикулярных колебаний получается прямая? Получить уравнение прямой.
4. При каком соотношении фаз взаимно-перпендикулярных колебаний получается эллипс? Получить уравнение эллипса.
5. Что такое звук?
6. Дайте определение амплитуды, частоты, длины волны. Каким соотношением связаны между собой длина волны, период и скорость распространения волны?
7. Получите уравнение бегущей волны, проанализируйте его.
8. Как в данной работе измеряется скорость звуковой волны? Какие прямые измерения необходимо для этого выполнить?

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения длины звуковой волны используется осциллографический метод сложения колебаний от динамика и микрофона. Схема установки показана на рис. 1.

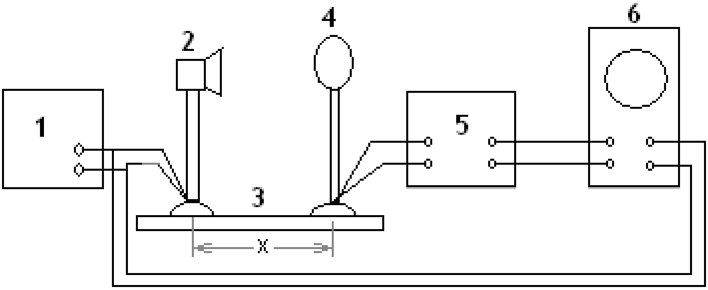

рис.1

Схема установки

1 – звуковой генератор, **2** – динамик, **3** – оптическая скамья, **4** – микрофон, **5** – усилитель, **6** – осциллограф.

Источником звука является динамик. От динамика звук, распространяясь, достигает микрофона. Частоты колебаний в динамике и микрофоне одинаковые, но колебания в микрофоне отстают по фазе от колебаний в динамике. Пусть колебания в динамике происходят по гармоническому закону:

$$S_D = A\cos(\omega t + \alpha)$$

Где S_D – смещение частиц воздуха в точке *D* расположения источника колебаний. $(\omega t + \alpha)$ – фаза колебаний в этой точке. Тогда колебания в микрофоне возбудятся позже спустя время $\tau = \frac{x}{\upsilon}$, необходимое для того, чтобы звуковая волна прошла расстояние x со скоростью υ. Мембрана микрофона будет колебаться с той же частотой, но с отставанием по фазе:

$$S_M = A\cos[\omega(t-\tau)+\alpha] = A\cos\left[\omega\left(t-\frac{x}{\upsilon}\right)+\alpha\right]$$

Таким образом, фаза колебаний на расстоянии x от источника изменилась на величину

$$\Delta\varphi = \frac{\omega x}{\upsilon} = \frac{2\pi x}{\upsilon T} = \frac{2\pi}{\lambda} x$$

Отсюда видно, что если удалить микрофон на расстояние x, равное длине волны λ, то фаза изменится на 2π.

Если преобразовать механические колебания в динамике микрофоне в электрические и подать на осциллограф, то будет осуществлено сложение взаимно-перпендикулярных колебаний одинаковых частот. (см. лабораторную работу №17) При перемещении микрофона изменяется разность фаз $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}$, а следовательно, и вид траектории. При изменении разности фаз от 0 до 2π, траектория будет последовательно изменяться: прямая–эллипс–прямая

Значит, передвинув микрофон на расстояние λ, на экране осциллографа произойдет полный цикл изменений траектории. Если далее увеличивать расстояние, то через $x = \lambda$ все будет повторяться. Это позволяет опытным путем измерить длину звуковой волны, а затем, используя соотношение $\lambda = \frac{\upsilon}{\nu}$ (ν – частота звуковых колебаний), найти скорость распространения звуковой волны.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1.Включают установку. Микрофон располагают вплотную к динамику.
2. Включают звуковой генератор и устанавливают на нем частоту от 2500 до 4000 Гц (по заданию преподавателя).
3. Включают осциллограф и получают на экране траекторию в виде эллипса. Медленно отодвигая микрофон, получают на экране прямую. По оптической скамье измеряют это положение микрофона x_1.
4. Перемещают микрофон дальше, фиксируя каждый раз положение микрофона x_i, когда на экране произойдет полный цикл видоизменений траектории и будет та же прямая.
5. Измерения повторяют, двигая микрофон обратно к динамику.
6. Измерения повторяют для другой частоты звуковой волны.
7. Вычисляют $\lambda_1 = x_2 - x_1$; $\lambda_2 = x_3 - x_2$... $\lambda_{i-1} = x_i - x_{i-1}$,

Среднее значение $\langle \lambda \rangle$ для каждой частоты.

8. По формуле $\langle \upsilon \rangle = \langle \lambda \rangle \cdot \nu$ вычислить скорость звука.

9. Результаты измерений занести в таблицу. Ошибку измерения скорости $\Delta\upsilon$ рассчитать методом косвенных измерений, предварительно по методу Стьюдента определив ошибки $\Delta\lambda$ и ε_λ прямых измерений. Принять относительную ошибку измерения частоты $\varepsilon_\nu = \dfrac{\Delta\nu}{\nu} = 10\%$ ($\Delta\nu$ – цена деления генератора).

№	x_i	λ_i	$\langle \lambda \rangle$	$\Delta\lambda$	ε_λ	ν	ε_ν	$\langle \upsilon \rangle$	ε_υ	$\Delta\upsilon$
1. 2. 3. 4. …	.									

Итоговая таблица

10. Сравнить полученную скорость звука со скоростью, рассчитанной по формуле:

$$V_t = V_0\sqrt{1+\alpha t}$$

где $V_0 = 332\left(\dfrac{м}{с}\right)$ – скорость звука при температуре $t = 0^0 C$, $\alpha = 0{,}004\left(град^{-1}\right)$. Сделать вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 69

Определение частоты звуковых колебаний

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Наблюдая стоячую звуковую волну, найти ее длину волны и частоту.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Генератор звуковых колебаний, сообщающиеся сосуды с водой, линейка.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1.Дайте определение упругой или механической волны.
2. Дайте определение фронта волны, волновой поверхности.
3. Какие волны называются продольными, поперечными? Приведите примеры.
4. Что такое звук? Характеристики звука.
5. Дайте определение длины волны. Каким соотношением связаны между собой длина волны, период и скорость распространения волны?
6. Получите уравнение бегущей волны, проанализируйте его.
7. Дайте определение амплитуды, фазы волны, волнового числа.
8. Получите уравнение стоячей волны и проанализируйте его.
9. Запишите формулу амплитуды стоячей волны. Что называется пучностью и узлом стоячей волны?
10. При каком условии в точке отражения образуется узел или пучность стоячей волны?
11. Скорость звука в газах. Как скорость звука в воздухе зависит от температуры?
12. Опишите метод определения длины волна и частоты звуковой волны в данной работе.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Определение частоты звуковых колебаний

У открытого конца трубы b помещен источник звуковых колебаний – звуковой генератор. Вниз по воздушному столбу распространяется звуковая волна, отражается от поверхности воды.

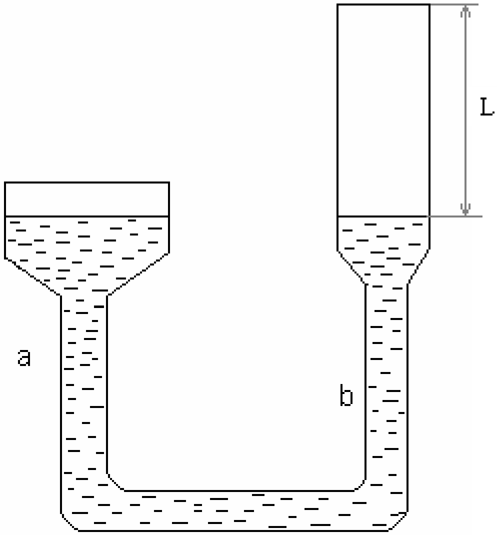

рис. 1
Схема установки.

При наложении бегущей и отраженной волны в воздушном столбе может образовываться стоячая волна. У поверхности воды узел стоячей волны. Если у открытого конца будет расположена пучность стоячей волны, то звучание звука будет иметь максимальную громкость. Это возможно, когда высота воздушного столба равна нечетному числу четвертей длин полуволн:

$$L_1 = \frac{\lambda}{4},\ \ L_2 = \frac{3}{4}\lambda,\ \ L_3 = \frac{5}{4}\lambda \ldots,$$

отсюда расстояние между пучностями:

$$L_2 - L_1 = \frac{\lambda}{2},\ \ L_3 - L_2 = \frac{\lambda}{2},$$

то есть $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$.

Измеряя длины воздушного столба L_1, $L_2 \ldots$ при котором громкость максимальна, можно определить длину звуковой волны λ.
Скорость звука в воздухе равна:

$$V_t = V_0\sqrt{1+\alpha t} \qquad (1)$$

Где $V_0 = 332\left(\frac{м}{c}\right)$ – скорость звука при температуре $t = 0^0 C$, $\alpha = 0{,}004\left(град^{-1}\right)$. Значит, частоту колебаний звукового генератора можно вычислить по формуле:

$$\nu = \frac{V_0\sqrt{1+\alpha t}}{\lambda}.$$

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1.Включить генератор звуковых колебаний в сеть и установить частоту в пределах от 800 Гц до 2000 Гц (частота задается преподавателем).
2. Перемещением сосуда a изменяют длину воздушного столба в трубке b и измеряют ее высоту $L_1, L_2, \ldots L_n$ при наибольшей громкости звука. Измерения повторить 5 – 7 раз. Результаты записать в таблицу 1.

№ изм.	L_1	L_2	…	L_n	ΔL_1	ΔL_2	…	ΔL_{n-1}
1. 3. … n								

Таблица 1.

Здесь обозначено:

$$\Delta L_1 = L_2 - L_1, \quad \Delta L_2 = L_3 - L_2, \ldots \; \Delta L_{n-1} = L_n - L_{n-1}.$$

4. Обрабатывают результаты измерений по методу Стьюдента: вычисляют среднее значение $\langle \Delta L \rangle$, абсолютную и относительную погрешность.

5. Так как $\langle \Delta L \rangle = \dfrac{\langle \lambda \rangle}{2}$, то можно найти среднюю длину волны по формуле $\langle \lambda \rangle = 2\langle \Delta L \rangle$.

6. По термометру определяют температуру в комнате.

7. Рассчитывают среднюю частоту звуковой волны по формуле:

$$\langle \nu \rangle = \frac{V_0 \sqrt{1 + \alpha t}}{\langle \lambda \rangle}$$

8. Находят по методу Стьюдента для косвенных измерений относительную ε_ν и абсолютную $\Delta \nu$ погрешность измерения частоты. Результаты вычислений заносят в таблицу 2.

$\langle \lambda \rangle$	$\Delta \lambda$	t	Δt	$\langle \nu \rangle$	ε_ν	$\Delta \nu$	$\nu = \langle \nu \rangle \pm \Delta \nu$

Таблица 2.

9. Сравнить вычисленную частоту с частотой генератора звуковых колебаний. Сделать выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 77

Определение скорости звука и модуля Юнга методом Кундта

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить скорость звука в металле и модуль Юнга методом Кундта.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Прибор Кундта, линейка, фланель с канифолью.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой процесс называется волновым?
2. Какие волны называются продольными, поперечными? Приведите примеры.
3. Что такое звук? Характеристики звука.
4. Дайте определение длины волны. Каким соотношением связаны между собой длина волны, период и скорость распространения волны?
5. Получите уравнение бегущей волны, проанализируйте его.
6. Дайте определение амплитуды, фазы волны, волнового числа.
7. Получите уравнение стоячей волны и проанализируйте его.
8. Запишите формулу амплитуды стоячей волны. Что называется пучностью и узлом стоячей волны? Чему равно расстояние между соседними узлами и пучностями?
9. При каком условии в точке отражения образуется узел или пучность стоячей волны?
10. Какие измерения следует провести для определения скорости звука в исследуемом твердом теле? Получите расчетную формулу для определения скорости звука в твердом теле.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе предлагается определить скорость звука в металле V_x по известной скорости звука в воздухе V_t. Если длина полуволны в твердом теле L, а в воздухе l, то

$$\frac{V_x}{V_t} = \frac{L}{l}.$$

Скорость звука при данной температуре определяется по формуле:

$$V_t = V_0\sqrt{1+\alpha t}$$

Таким образом скорость звука в исследуемом теле будет:

$$V_x = V_0 \frac{L}{l}\sqrt{1+\alpha t} \qquad (1)$$

Из теории упругости следует, что скорость волн в твердых телах определяется формулой:

$$V_x = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль Юнга, а ρ – плотность среды. Отсюда модуль Юнга:

$$E = \rho V_x^2 \qquad (2)$$

Прибор Кундта для определения скорости звука в твердых телах состоит из широкой стеклянной трубы **1** длиной около 1 метра, один конец которой закрыт. Труба лежит свободно на подставках в горизонтальном положении. Стержень **4**, сделанный из исследуемого материала, входит своим концом с шайбой **2** внутрь трубы. Середина стержня зажата в стойке **3**. При возбуждении в стержне колебаний в нем возникает механическая продольная стоячая волна с узлом смещения в точке закрепления и пучностями на концах. Шайба **2** колеблется и возбуждает колебания воздуха в трубе **1**. В трубе в воздухе образуются стоячие волны, длина которых зависит от частоты тона, издаваемого стержнем. Положение их можно определить, если внутрь трубы **1** насыпать небольшое количество порошка, например, мелких пробковых опилок, распределить их равномерно по всей длины трубы. При звучании стержня опилки собираются в узлах воздушной стоячей волны, образуя характерные фигуры Кундта. Фигуры Кундта приобретают особенно отчетливый вид, если между закрытым концом трубы и шайбой стержня укладывается целое число полуволн. Этого можно достичь, немного перемещая трубу относительно стержня.

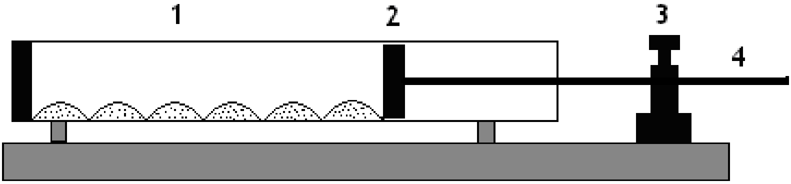

рис. 1

Прибор Кундта.

Измерение расстояния между соседними узлами (или пучностями) дает половину длины звуковой волны, возбужденной в трубке.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Пробковые опилки легкими постукиваниями по трубе **1** распределяют равномерным слоем. Трубу **1** не смещать и не вращать – это приводит к электронизации опилок и их налипанию на стенки.
2. Обхватив стержень рукой с фланелью, посыпанной канифолью, проводят по нему по направлению от шайбы. Стержень издает громкий звук, соответствующий основному тону. Порошок при этом расположиться в фигуры, называемые фигурами Кундта.
3. Измеряют линейкой длину 5 – 6 фигур Кундта, вычисляют длину полуволны в воздухе l_i. Опыт повторяют 3 – 5 раз, предварительно встряхнув опилки.
4. Измеряют длину стержня L .
6. По термометру определяют температуру в комнате.
7. По формуле (1) определяют скорость распространения звука в стержне, а по формуле (2) – модуль Юнга. Плотность материала стержня $\rho = 8900 \left(кг/м^3 \right)$.
8. Все данные заносят в таблицу 1. Прямые и косвенные измерения обрабатывают по методу Стьюдента.

l_i	$\langle l \rangle$	Δl	L	ΔL	t^0	Δt^0	V_x	$V_x \pm \Delta V_x$	ρ	E

Таблица 1

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13
Исследование электромагнитных волн в линии передачи

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование напряженности электрического поля вдоль линии в трех режимах: «бегущей волны», «холостого хода» и «короткого замыкания»; определение длины волны в линии.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Измерительная линия PI-5, генератор дециметрового диапазона, индикатор тока (миллиамперметр), набор нагрузок в линии (2 шт.), обеспечивающих режим «бегущей волны» и «короткого замыкания».

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите четыре уравнения Максвелла в интегральной форме. Объясните их физический смысл.
2. Запишите четыре уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Объясните их физический смысл.
3. Объясните процесс возникновения электромагнитных волн в линии.
4. Расскажите, как образуются стоячие волны в линии в режиме «холостого хода».
5. Получите уравнение стоячей волны, проанализируйте его.
6. Дайте определения пучности и узла стоячей волны. Чему равно расстояние между пучностями и узлами стоячей волны.
7. Почему при коротком замыкании линии на конце линии будет узел напряженности электрического поля.
8. Объясните, почему пучности напряженности электрического поля в стоячей волне соответствует узел напряженности электрического поля и наоборот.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Устройство измерительной линии

Для измерения напряженности электрического поля вдоль линии в пространство между проводниками вводится зонд (штырь), возникающий в нем ток возбуждает колебания в резонансной камере (короткозамкнутая коаксиальная линия изменяющейся длины). В пучности напряженности электрического поля этой камеры находится полупроводниковый диод, соединенный с гальванометром. Такая конструкция обеспечивает наибольшую чувствительность к полю внутри линии без существенного влияния на него.

Постоянный ток, протекающий через диод, оказывается пропорциональным квадрату напряженности электрического поля в линии: $i = \alpha E^2$

Подготовка установки к работе

1. Включить генератор Г4-37А в сеть. Для этого включить тумблеры «Сеть» и «Вкл генератор ВЧ".
2. Прогреть генератор 15-20 минут. (Паспортное требование для генераторов такого типа. Электрическая схема данного прибора - лампово-полупроводниковая).
3. Задать рабочую частоту генератора $\nu_{раб}$ (задается преподавателем). Диапазон частот – 800 - 1000 МГц.
4. Настроить индикаторную головку, находящуюся на линии, в резонанс (частота колебаний индикаторной головки должна быть примерно равна рабочей частоте генератора). Для этого, плавно перемещая индикаторную головку вдоль линии, добиться максимального отклонения стрелки индикатора (микроамперметра). Отклонение стрелки должно быть не более 2/3 шкалы (следить, чтобы микроамперметр НЕ ЗАШКАЛИВАЛ).

Примечание. Если стрелка индикатора "зашкаливает", необходимо уменьшить уровень входной мощности генератора, повернув ручку аттенюатора на передней панели генератора (ручка "Регулировка выхода").

5. Поворачивая ручку установки частоты на передней панели индикаторной головки (по часовой стрелке, или против), также добиться максимального отклонения стрелки микроамперметра
6. Окончательно – оба действия в п. 4 и п. 5 проделать одновременно. Индикаторная головка и линия готовы к работе.

Задание 1: Определение длины волны в линии

1. Не подключать к линии никакой нагрузки – "РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА" (выходной конец линии должен быть свободен). Перемещая индикаторную головку вдоль линии, измерить координаты X_i УЗЛОВ напряженности электрического поля, т.е. точек, в которых показания индикатора (микроамперметра) минимальные. Рассчитать расстояние между соседними узлами: $L_i = X_i - X_{i+1}$. Данные занести в таблицу 1:

N	X_i	L_i	$\langle L \rangle$	ΔL	$L = \langle L \rangle \pm \Delta L$	ν
1						
2						
3						
...						

Таблица 1.

2. Аналогично измерить координаты ПУЧНОСТЕЙ, т. е. точек, в которых показания амперметра максимальные. Заполнить таблицу, аналогичную таблице 1.

3. Используя связь $\langle L \rangle = \dfrac{\lambda}{2}$, вычислить длину волны.

4. Из формулы $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$, определить $c = \nu\lambda$ – скорость света, сравнить с табличными данными ($c = 3 \cdot 10^8 \ м/с$).

Задание 2. Исследование распределения амплитуды напряженности электрического поля вдоль линии в различных режимах

1. Перемещая индикаторную головку, исследовать зависимость амплитуды напряженности электрического поля в РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА (к "выходному концу" линии нагрузка не подключена. Провести 20-30 измерений тока i, перемещая индикаторную головку вдоль линии через каждые $2-5 \ см$ (по заданию преподавателя). При этом необходимо также фиксировать положения, соответствующие минимальным и максимальным $i_{\max}$ показаниям индикаторной головки.

2. Такие же измерения провести в РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (линия на выходе закорочена замыкателем - нагрузкой № 1).

3. Такие же измерения провести в РЕЖИМЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ (к линии подключена нагрузка № 2).

Данные занести в таблицу 2.

Координата вдоль линии	x, *см*	1	2	...
Режим холостого хода	i, *мкА*			
	$\left(i / i_{\max} \right)^{1/2}$			
Режим короткого замыкания	i, *мкА*			
	$\left(i / i_{\max} \right)^{1/2}$			
Режим бегущей волны	i, *мкА*			
	$\left(i / i_{\max} \right)^{1/2}$			

Таблица 2.

4. Построить графики зависимости $\dfrac{E_0}{E_{0\max}} = \left(\dfrac{i}{i_{\max}} \right)^{1/2} = f(x)$ где

x – координата вдоль линии; E_0 – амплитудное значение напряженности электрического поля; $E_{0\max}$ – наибольшее амплитудное значение.

ВНИМАНИЕ. *Необходимо следить за уровнем входной мощности. В процессе выполнения работы он должен быть примерно одинаковым.*

Полученные зависимости дают представления о распределении напряженности электрического поля вдоль линии.

Сделать выводы по построенным графикам.

Приложение V

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Механические волны

Упругой средой называется среда, частицы которой связаны между собой упругими силами. Например, газу присуща объемная упругость, то есть способность сопротивляться изменению его объема. Это свойство газа обусловлено тепловым движением молекул газа и проявляется в изменении давления газа **р** при изменении его объема **V**. Если какая-либо точка упругой среды начинает совершать механические колебания, то энергия колебания этой точки будет передаваться окружающим точкам, вызывая их колебания.

Механические колебания, распространяющиеся в упругой среде, называются **упругими или механическими волнами.**

Геометрическое место точек, до которых к данному моменту времени дошли колебания, называется **фронтом волны.** Геометрическое место точек, в которых фаза колебаний имеет одно и то же значение, называется **волновой поверхностью**. Очевидно, что фронт волны является одной из волновых поверхностей.

Среда называется **изотропной**, если её свойства одинаковы во всех направлениях. В такой среде колебания распространяются по всем направлениям с одной и той же скоростью. Волновые поверхности в случае точечного источника колебаний являются сферами с центром в источнике колебаний. Волна называется плоской, если ее волновые поверхности представляют совокупность плоскостей, параллельных друг другу.

Упругая волна называется **продольной**, если точки среды колеблются в направлении распространения волны. Продольные волны обусловлены объемной упругостью среды и могут распространяться в любой среде – твердой, жидкой, газообразной. Примером таких волн являются звуковые волны в воздухе. Волна, колебания в которой совершаются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, называется **поперечной** волной. Примером поперечных волн могут служить волны, распространяющиеся вдоль струн музыкальных инструментов.

Звуком, звуковыми или акустическими волнами называются упругие волны малой интенсивности, распространяющиеся в упругой среде. Звуковые волны частотой от 16 Гц до 20 кГц – слышимые звуки, менее 16 Гц – инфразвук, более 20 кГц – ультразвук. Воспринимаемые звуки люди различают по громкости, высоте и тембру. Громкость определяется интенсивностью звуковой волны, пропорциональной ее амплитуде. Любой реальный звук является наложением колебаний с определенным набором частот, называемым акустическим спектром. Сплошным спектром обладают шумы. Звук с линейчатым спектром слышится как звук с определенной частотой. Высота определяется основной или наименьшей частотой. Относительная интенсивность волн с другими частотами определяет тембр звука.

Получим **уравнение бегущей волны**. Пусть волна распространяется вдоль оси **OX** от источника колебаний, находящегося в начале координат – точке O. Все точки на оси **OX** будут повторять колебания точки O с некоторым запозданием во времени. Но закон движения для них будет одинаков, то есть они будут в отсутствии потерь энергии колебаться с одной и той же частотой и одинаковой амплитудой. Точка O совершает гармоническое колебание, смещение точки O описывается законом:

$$S(0,t) = A \cdot \sin \omega t \tag{1}$$

Здесь обозначено: S – смещение точки O, A – амплитуда, ω – циклическая частота колебаний , t – время, отсчитанное от вступления точки O в колебание.

В упругой волне все точки среды, расположенные вдоль оси **OX,** не перемещаются, а совершают колебания с циклической частотой ω вокруг собственных положений равновесия. $S(x,t)$ – это смещение точки с координатой x в момент времени t от своего собственного положения равновесия. В монохроматической волне амплитуды и частоты колебаний всех точек одинаковы, а фазы разные. Для произвольной точки x на оси **OX** уравнение колебаний имеет вид:

$$S(x,t) = A \cdot \sin \omega t_1$$

где t_1 – время, отсчитанное от начала вступления точки x в колебательный процесс. Эта точка начала колебаться позднее, чем точка O на время τ, поэтому $t_1 = t - \tau$. Если скорость распространения волны V , тогда $\tau = \dfrac{x}{V}$, где x – координата рассматриваемой точки. Тогда уравнение можно переписать в виде:

$$S(x,t) = A \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{V} \right) \tag{2}$$

Фаза волны $\omega(t-\frac{x}{V})$ зависит от времени и координаты. Смещение S является периодической функцией двух переменных: времени t и координаты x. Значит, волновой процесс – это периодический процесс, повторяющийся во времени и пространстве.

Длиной волны называется расстояние, на которое волна распространяется за период:

$$\lambda = VT$$

Если ввести понятие **волнового числа** $k=\frac{\omega}{V}=\frac{2\pi}{TV}=\frac{2\pi}{\lambda}$, то уравнение бегущее вдоль оси OX волны примет вид:

$$S(x,t)=A\cdot\sin\left(\omega t-kx\right) \tag{3}$$

Стоячей волной называется волна, образующаяся в результате наложения двух волн, которые распространяются навстречу друг другу и имеют одинаковые частоты и амплитуды, а в случае поперечной волны еще и одинаковую поляризацию. Стоячую звуковую волну можно получить следующим образом. Возьмем стеклянную трубу длиной L (рис. 1), закрытую с одной стороны. У открытого конца трубы будем возбуждать гармоническое колебание воздуха (включим звуковой генератор).

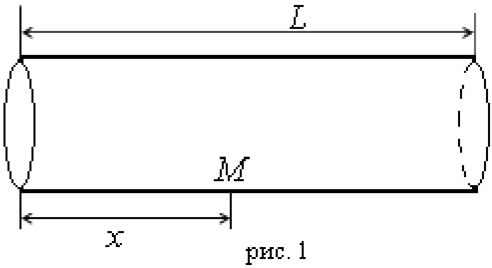

рис. 1
Установка для наблюдения стоячей волны.

Вдоль трубы будут распространяться звуковые волны; дойдя до закрытого конца, волны отразятся и будут распространяться в сторону открытого конца. Падающие и отраженные волны накладываются, интерферируют, и в трубе образуются стоячие волны.

Выведем **уравнение стоячей волны.** Уравнение падающей волны $S_1\left(x,\,t\right)$ для точки **M** имеет вид (2). Уравнение отраженной волны для той же точки:

$$S_2(x,t)=-A\cdot\sin\omega\left(t-\frac{2L-x}{V}\right)$$

Знак «минус» учитывает перемену фазы на противоположную при отражении звуковой волны от более плотной среды (воздух-стекло). Результирующее смещение для точки M будет равно:

$$S(x,t) = S_1 + S_2 = A \cdot \left\{ \sin\omega\left(t - \frac{x}{V}\right) - \sin\omega\left(t - \frac{2L - x}{V}\right) \right\}$$

Используя формулу разности синусов:

$$\sin\alpha - \sin\beta = 2 \cdot \cos\frac{\alpha+\beta}{2} \cdot \sin\frac{\alpha-\beta}{2},$$

получим уравнение стоячей волны:

$$S(x,t) = 2A \cdot \sin\omega\frac{L-x}{V} \cdot \cos\omega\left(t - \frac{L}{V}\right) \qquad (4)$$

Абсолютное значение множителя $\left|2A \cdot \sin\omega\frac{L-x}{v}\right|$, не зависящего от времени, является **амплитудой стоячей волны**.

Точки, смещение которых все время равно нулю называются **узлами** стоячей волны. Найдем координаты узлов. Для этого запишем уравнение:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{L-x}{V}\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{L-x}{V} = n\pi$$

где $n = 0, 1, 2, \ldots$; учитывая, что, $\lambda = VT$ запишем:

$$\frac{2\pi}{\lambda}(L - x) = n\pi,$$

Координаты нулевого, первого, второго, n-го узлов:

$$x_0 = L, \quad x_1 = L - \frac{\lambda}{2}, \quad x_2 = L - \lambda, \quad x_n = L - n\frac{\lambda}{2}$$

У закрытого конца трубы образуется узел и все узлы расположены на расстоянии полуволны друг от друга.

Точки, для которых $\left|\sin\omega\frac{L-x}{V}\right| = 1$ имеют максимальную амплитуду, равную 2A. Эти точки называются **пучностями** стоячей волны. Найдем их координаты. Для этого положим:

$$\sin\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{L-x}{V} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{L-x}{V} = \frac{\pi}{2} + 2\pi m$$

Учитывая, что $\lambda = VT$, запишем: $\frac{2\pi}{\lambda}(L-x) = \frac{\pi}{2} + 2n\pi$

Координаты узлов смещения:

$$x_0 = L - \frac{\lambda}{4}, \quad x_1 = L - 3\frac{\lambda}{4}, \quad x_n = L - (2n+1)\frac{\lambda}{4}.$$

Пучности расположены на расстоянии полуволны друг от друга. Множитель $\cos\omega\left(t - \frac{L}{V}\right)$ показывает, что все точки в стоячей волне совершают гармонические колебания с периодом Т.

Условия отражения от границы раздела сред: если среда, от которой происходит отражение, более плотная, чем среда в которой волна распространяется, то на границе получается узел смещения. Это объясняется тем, что волна, отражаясь от более плотной среды, в месте отражения меняет свою фазу на противоположную. Это явление называется отражением с «потерей полуволны». Отражаясь от менее плотной среды, волна не меняет фазы в месте отражения, потери полуволны не происходит. Фазы падающей и отраженной волн у границы одинаковы и в этом месте получается пучность смещения в результате сложения колебаний одинаковых фаз.

Приложение VI

Электромагнитные волны

Система уравнений Максвелла

Вся совокупность наших сведений об электромагнитном поле в сжатой форме содержится в четырех уравнениях Максвелла. Мы приведем их математические формулировки и поясним физический смысл.

1-е уравнение Максвелла

Является обобщением закона электромагнитной индукции Фарадея. Всякое изменяющееся во времени магнитное поле создает в пространстве вихревое электрическое поле $\vec{E}'$, циркуляция которого по произвольному контуру определяет электродвижущую силу в этом контуре. Для электростатического (потенциального) электрического поля $\vec{E}_{Ý}$ такая циркуляция равна нулю.

Интегральная форма уравнения:

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_{S} \vec{B} d\vec{S} - \int_{S} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} .$$

Циркуляция вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ по любому контуру Γ равна со знаком минус производной по времени от потока индукции магнитного поля через любую поверхность S, опирающуюся на контур Γ. При этом под вектором $\vec{E}$ понимается не только вихревое, но и электростатическое поле $\vec{E} = \vec{E}' + \vec{E}_{Ý}$.

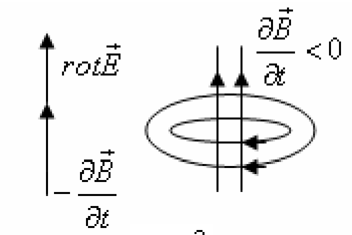

рис. 2
К первому уравнению Максвелла

Дифференциальная форма уравнения:

$$rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} .$$

Ротор вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ в любой точке поля равен скорости уменьшения во времени вектора $\vec{B}$ в этой точке

2-е уравнение Максвелла.

Является обобщением закона полного тока (теоремы о циркуляции вектора напряженности магнитного поля). Всякое изменяющиеся во времени электрическое поле наряду с током проводимости создает в пространстве вихревое магнитное поле.

Интегральная форма уравнения:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H}\, d\vec{l} = \int_{S} \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}\ .$$

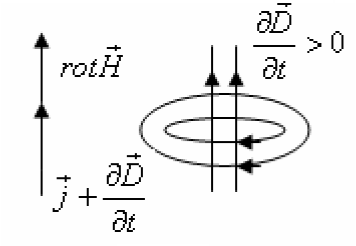

рис. 3

К второму уравнению Максвелла

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$ по любому контуру Γ равна сумме потока вектора плотности тока проводимости и потока вектора плотности тока смещения через произвольную поверхность S, опирающуюся на контур Γ. Напомним, что поток вектора плотности тока есть ток, так что справа стоит сумма токов проводимости и смещения, охватываемых контуром Γ: $\int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S j_n dS$ – ток проводимости.

Дифференциальная форма уравнения:

$$rot\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\ .$$

Ротор вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$ в любой точке пространства равен сумме векторов плотности тока проводимости $\vec{j}$ и плотности тока смещения $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j}_{см}$.

3-е уравнение Максвелла.

Является формулировкой теоремы Гаусса для вектора индукции электрического поля $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$. Векторные линии индукции $\vec{D}$ начинаются и заканчиваются только на свободных (сторонних) зарядах. В то время как источником электрического поля $\vec{E}$ являются свободные и связанные заряды.

Интегральная форма уравнения:

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

Поток вектора индукции электрического поля $\vec{D}$ через произвольную замкнутую поверхность S равен суммарному свободному электрическому заряду, расположенному внутри этой замкнутой поверхности S (ограничивающей объем V). Справа – объемный интеграл от объемной плотности свободного электрического заряда.

Дифференциальная форма уравнения:

$$div\vec{D} = \rho .$$

Дивергенция вектора индукции электрического поля $\vec{D}$ в любой точке равна объемной плотности свободного электрического заряда ρ в этой точке.

4-е уравнение Максвелла.

Является формулировкой теоремы Гаусса для вектора индукции магнитного поля $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$. Утверждает, что векторные линии магнитной индукции $\vec{B}$ всегда замкнуты; в природе нет магнитных зарядов.

Интегральная форма уравнения:

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

Поток вектора индукции магнитного поля $\vec{B}$ через произвольную замкнутую поверхность S равен нулю.

Дифференциальная форма уравнения:

$$div\vec{B} = 0 .$$

Дивергенция вектора индукции магнитного поля $\vec{B}$ в любой точке поля равна нулю.

Возникновение волн в двухпроводной линии.

Линией передачи называют систему проводников, вдоль которых может распространяться электромагнитная волна с малыми потерями энергии. Рассмотрим для определенности бесконечную двухпроводную линию (два параллельных проводника, в частном случае два провода), рис. 4 (а, б).

Предположим, что на конце линии OO' источник переменного синусоидального напряжения создается переменное электрическое поле (см. рис. 1а). Оказывается, что электрическое поле начнет распространятся вдоль линий. Рассмотрим это явление качественно.

Предположим, что в данный момент времени электрическое поле $\vec{E}_0$ между точками $1-1'$ увеличивается. Согласно основному положению теории Максвелла изменяющееся электрическое поле (см. 2-е уравнение Максвелла) создает вихревое магнитное поле. Так как $\vec{E}_0$ увеличивается $\frac{\partial \vec{E}_0}{\partial t} > 0$, следовательно, вектор плотности тока смещения $\vec{j}_{см} = \frac{\partial \vec{D}_0}{\partial t} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_0}{\partial t}$ (линии находятся в воздухе, или в вакууме, для воздуха $\varepsilon \approx 1$) направлен в ту же сторону, что и $\vec{E}_0$.

Находим, что магнитное поле $\vec{H}_0$ направлено, как показано на рис. 4 (по правилу правого винта). Это магнитное поле также будет меняться во времени: $\vec{H}_0 = \vec{H}_0(t)$.

Но изменяющееся магнитное поле вызывает (см. 1-е уравнение Максвелла) появление вихревого электрического поля $\vec{E}_1$ (его направление

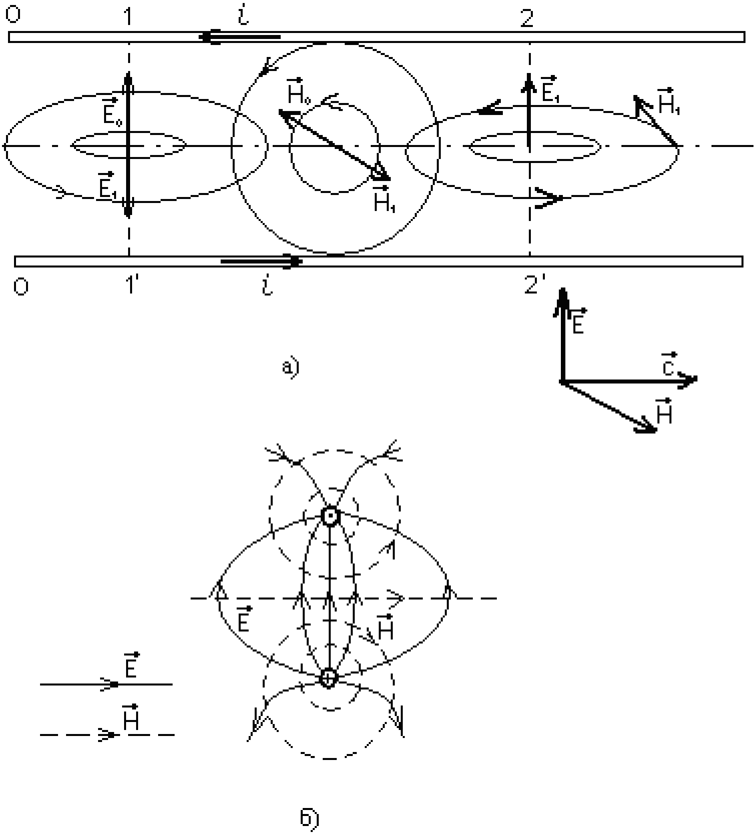

рис. 4

Физические процессы при распространении волны в линии а) и структура поля б).

связано с направлением $\dfrac{\partial \vec{B}_0}{\partial t}$ правилом левого винта). Поле $\vec{E}_1$ (линии вектора $\vec{E}_1$ показаны пунктиром вне линии) в месте расположения проводников вызывает в проводниках ток проводимости $\vec{j}$, а между точками $2-2'$ линии – ток смещения (его плотность $j_{см}$). Поле $\vec{E}_1$ в точках $1-1'$ направлено противоположно полю $\vec{E}_0$, и, следовательно, гасит $\vec{E}_0$. Поле $\vec{H}_1$, создаваемое током смещение между точками $2-2'$, гасит поле $\vec{H}_0$. Таким образом, поля $\vec{E}_0$, $\vec{H}_0$ в точках $1-1'$ исчезнут, зато появятся в точках $2-2'$. Строго говоря, все точки $1,\ 2$ и т. д. следует считать бесконечно близкими. Электрические и магнитные поля, взаимно превращаясь и поддерживая друг друга, будут распространяться вдоль линии. Как видно из рис. 1а, в распространяющейся электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ перпендикулярны друг другу и к направлению распространения волны, т. е. вектору скорости $\vec{c}$. Направления $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{c}$ (см. рис. 4) этих векторов связаны правилом буравчика: направление $\vec{c}$ совпадает с направлением поступательного движения буравчика с правой нарезкой, если его рукоятка вращается в направлении от $\vec{E}$ к $\vec{H}$.

Распределение электрического и магнитного полей в распространяющейся волне представлены на рис. 4б.

Если поле в точках OO' меняется по гармоническому закону с частотой $\nu = \dfrac{\omega}{2\pi}$, $E_0 = E_m \cos \omega t$, то следовательно, в какой- либо точке A, удаленной на расстояние x от O, возникнут колебания поля с некоторым опозданием $\tau = \dfrac{x}{c}$, где $\vec{c}$ – скорость распространения волны. Следовательно, в любой точке A $E = E_m \cos \omega \left(t - \dfrac{x}{c} \right) = E_m (\omega t - kx)$, здесь $k = \dfrac{\omega}{c} = \dfrac{2\pi}{\lambda}$. Аналогично для вектора $\vec{H}$: $H = H_m \cos(\omega t - kx)$.

Поскольку токи проводимости тоже создают магнитные поля, то структура поля в поперечном сечении линии (см. рис. 4б) довольно сложна и зависит от геометрии проводников линии. В частности, в используемой измерительной линии $PI-5$ электромагнитная волна распространяется вдоль цилиндрического внутреннего и двух плоских параллельно соединенных вместе проводников.

Если концы линии разомкнуты (линии разорвана) или замкнуты на проводнике (линия закорочена), в ней возникают **стоячие электромагнитные волны**. Рассмотрим качественно работу линии передачи при этих режимах.

Режим «холостого хода».

При разрыве линии бегущая волна, дойдя до конца линии, отражается и двигается обратно к генератору, таким образом, в линии распространяются две волны: одна – падающая, другая – отраженная. Физически этот процесс объясняется следующим образом: когда падающая волна доходит до разомкнутого конца линии, то там начинают накапливаться заряды, т. е. возникает дополнительная разность потенциалов. Напряженность электрического поля в конце линии, следовательно, имеет максимальное значение. Поскольку концы линии разомкнуты, ток проводимости отсутствует и напряженность магнитного поля равна нулю. Поэтому при отражение от разомкнутого конца говорят, что фаза колебаний электрического вектора не изменяется, а фаза магнитного вектора электромагнитной волны изменяется на противоположную, т. е. на π .

Дополнительное напряжение, возникающее на концах линии, действует подобно напряжению некоторого генератора и возбуждает новую бегущую волну, движущуюся от конца линии к началу ее. Если в падающей волне направление векторов в точке падения соответствует (рис. 5а), то в отраженной волне будет иметь место другое направление этих векторов (рис. 5б).

Введем координаты оси x , направленную вдоль линии. Колебания электрического поля в любой точке A линии (в падающей прямой волне) будут выражаться уравнением:

$$E_1(x) = E_m \cos(\omega t - kx) \tag{5}$$

Считая, волна отражается полностью, колебания электрического поля отраженной волны в той же точке A можно представить, как

$$E_2(x) = E_m \cos(\omega t + kx - \varphi) \tag{6}$$

Знак (+) у слагаемого kx выражает тот факт, что отраженная волна распространяется в отрицательном направлении оси x. Сдвиг по фазе

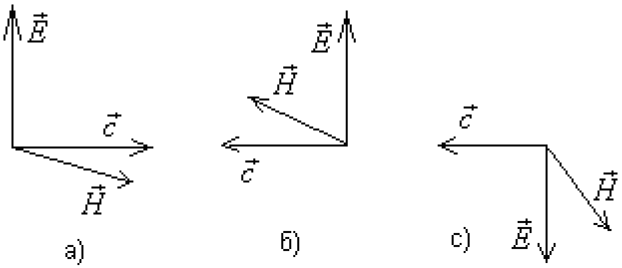

рис. 5

Расположение векторов полей в электромагнитной волне а) - падающей, б) - отраженной от открытого конца, в) - от закороченного конца линии в).

(запаздывание по фазе отраженной волны в точке A по сравнению с падающей) определяется расстоянием $2l - x$, которое должна пройти волна, чтобы вернутся в точку A, поэтому (6) примет вид

$$E_2(x) = E_m \cos[\omega t - k(2l - x)] = E_m \cos(\omega t + kx - 2kl) \qquad (7)$$

где l – длина линии и $\varphi = \dfrac{4\pi l}{\lambda}$ в (6).

Кроме того, в общем случае возможно изменение фазы колебаний при самом отражении (в нашем случае в режиме «холостого хода», как сказано выше, изменение фазы колебаний вектора $\vec{E}$ при отражении не происходит).

Складываясь, обе волны дают результирующее поле:

$$E_0(x) = E_1 + E_2 = E_m\{\cos(\omega t - kx) + \cos(\omega t + kx - \varphi)\} =$$
$$= 2E_m \cos\left(kx - \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right). \qquad (8)$$

Формула (8) есть **уравнение стоячей волны**, которое показывает, что в линии будут происходить колебания E с частотой ω и начальной фазой $-\varphi/2$. Амплитуда E_{om} этих колебаний зависит от координаты

$$E_{om} = 2E_m \left| \cos\left(kx - \frac{\varphi}{2} \right) \right| \qquad (9)$$

В точках, где фаза $kx_n - \frac{\varphi}{2} = 0, \pi, \ldots, n\pi$, амплитуда стоячей волны E_{om} максимальна и равна $2E_m$. Эти точки называются **пучностями** стоячей волны. Расстояние между соседними пучностями равно: $\Delta x = x_n - x_{n-1} = \frac{\lambda}{2}$.

В точках, где $kx_n - \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \ldots, (2n+1)\frac{\pi}{2}$, амплитуда стоячей волны равна нулю . Эти точки называются **узлами**. Легко видеть, что расстояние между соседними узлами так же равно $\lambda/2$.

На основании выше сказанного мы заключаем, что при работе линии в режиме «холостого хода» на конце линии образуется пучность электрического поля.

Можно показать (аналогично тому, как это сделано ниже для вектора $\vec{E}$), что магнитное поле при этом имеет узел. Таким образом, на конце линии будет наблюдаться узел магнитного поля и пучность электрического, т. е. в стоячей электромагнитной волне узлы магнитного поля совпадают с пучностями электрического поля и наоборот. (Сравните с бегущей волной).

Режим «короткого замыкания».

При коротком замыкании линии на ее концах возникает дополнительный ток проводимости между проводниками линии, который возбуждает отраженную волну. Поскольку в месте короткого замыкания напряженность электрического поля $E_0 = 0$, то фаза отраженной волны должна отличаться на π от фазы падающей волны. В этом случае φ в (6) определится из соотношения $\varphi = \frac{4\pi\ l}{\lambda} + \pi$.

Определяя координаты узлов и пучностей, найдем, что расположение их будет противоположным режиму «холостого хода», т. е. на конце линии будет узел электрического поля (и пучности магнитного).

ЛИТЕРАТУРА

1) Арсеньев А.Н., Топоркова Л.В. Физика. Часть 1. [Электронный ресурс] / А.Н. Арсеньев, Л.В. Топоркова; ПГУТИ, Каф. физики. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : __Мб). - Самара : ИНУЛ ПГУТИ, 2017.

2) Арсеньев А.Н., Топоркова Л.В. Физика. Часть 2. [Электронный ресурс] / А.Н. Арсеньев, Л.В. Топоркова; ПГУТИ, Каф. физики. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : __Мб). - Самара : ИНУЛ ПГУТИ, 2017.

3) Трофимова, Т. И. Курс физики [Текст] : учеб. пособие для вузов / Трофимова, Т. И. - 19-е изд., стер. - М. : Академия, 2012. - 559 с. : ил. - (Высшее профессиональное образование)

4) Епифанов, Г. И. Физика твердого тела [Текст] : учебное пособие / Г. И. Епифанов. - 4-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2011. - 288 с

5) Кузнецов, С. И.Курс физики с примерами решения задач [Текст] : учеб. пособие для вузов / С. И. Кузнецов. - 3-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Лань, 2014 - Ч. 1 : Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. - 464 с. . - (Учебники для вузов. Специальная литература).