

УТВЕРЖДАЮ
Директор ШБИП
_____ Д.В. Чайковский
«__» _____ 2022 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Методические указания к выполнению лабораторной работы К–23
по курсу физики
для студентов всех специальностей

Составители: **Сивов Ю.А.**

Издательство
Томского политехнического университета
2022

УДК 53(076.5)
ББК 22.3я73

Электромагнитные волны в двухпроводной линии: методические указания к выполнению лабораторной работы К–23 по курсу физики для студентов всех специальностей / сост.: Ю.А. Сивов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 12 с.

УДК 53(076.5)
ББК 22.3я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию
методическим семинаром отделения естественных наук ШБИП
«___» _____ 20___ г.

Зав. ОЕН ШБИП
канд. пед. наук

Е.В. Лисичко

Рецензент
доктор физ.-мат. наук, профессор Томского политехнического университета
В.Ф. Пичугин

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2022
© Сивов Ю.А., 2002
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2022

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы: изучение распределения амплитуд токов и напряжений вдоль двухпроводной линии при различных режимах ее работы: разомкнутой на обоих концах, и замкнутой с одного из концов.

Приборы и принадлежности: генератор сантиметровых волн Г4-79, двухпроводная линия, оптическая скамья, измеритель тока, измеритель напряжения.

Из теории Максвелла известно, что электромагнитные колебания, возникнув в некоторой точке пространства, распространяются в нем в виде электромагнитной волны.

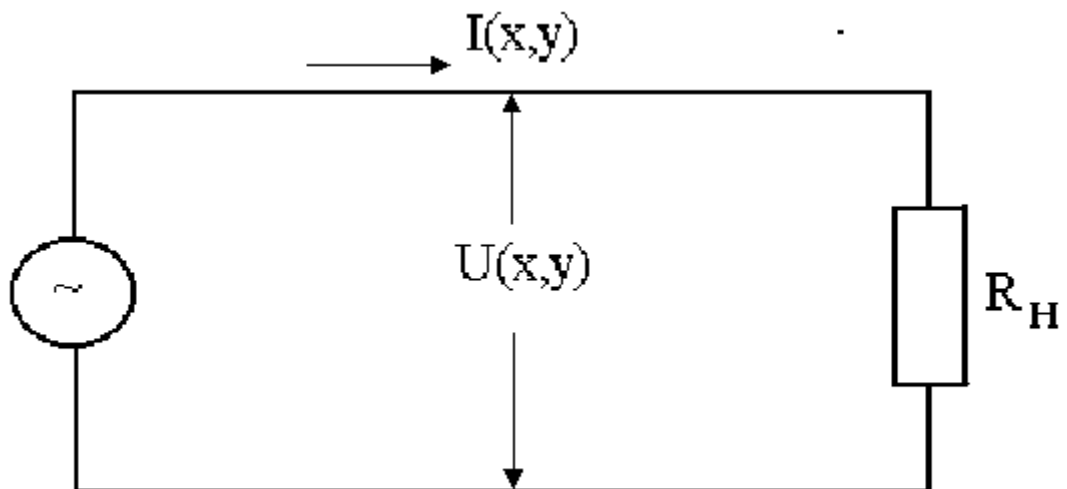


Рис.1.

Поэтому, если в каком-либо месте неограниченной двухпроводной линии (линия из двух прямых проводов - рис. 1) 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. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ перпендикулярны к проводам, а вектор Пойнтинга параллелен проводам. Поэтому возникает поток энергии, параллельный проводам. В бегущей волне ток I и напряжение U между проводами колеблются в одинаковых фазах.

Стоячие волны возникают при наложении волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Рассмотрим вначале процесс образования стоячей электромагнитной волны в свободном пространстве.

Пусть прямые волны имеют вид

$$E = E_m \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

$$H = H_m \cos(\omega t - kx) \quad (2)$$

Волну, распространяющуюся в обратном направлении, можно получить, если изменить знак перед k и у одного из векторов $\vec{E}$ или $\vec{H}$, например, $\vec{H}$, то есть

$$E = E_m \cos(\omega t + kx). \quad (3)$$

$$H = -H_m \cos(\omega t + kx). \quad (4)$$

Здесь знак «+» перед k означает, что волна распространяется в противоположном направлении. Тогда при наложении волн получим

$$E_{\text{рез}} = E_m \cos \omega t \cos(kx). \quad (5)$$

$$H_{\text{рез}} = H_m \sin \omega t \sin(kx), \quad (6)$$

Таким образом, стоячая электромагнитная волна (рис. 2) состоит из двух стоячих волн: электрической и магнитной, причем между колебаниями $\vec{E}$ (электрического поля) и $\vec{H}$ (магнитного поля) возникает разность фаз, равная π . Кроме того, пучности электрического поля совпадают с узлами магнитного поля, а узлы магнитного поля совпадают с пучностями электрического поля. Вектор Пойнтинга $\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}]$ обращается в нуль в узлах (а следовательно, пучностях) как электрического, так и магнитного поля. Поэтому электромагнитная энергия не переходит ни через один из узлов. Ее движение ограничено колебаниями между узлом (пучностью) электрического поля и пучностью (узлом) магнитного поля.

Стоячая электромагнитная волна в линии, возбуждаемой с одного конца, возникает, если линия ограничена с одного из концов. Строгое рассмотрение возможно при применении уравнений Максвелла. Однако, ограничимся качественным рассмотрением процесса образования и особенностей стоячей электромагнитной волны в двухпроводной линии. Понятно, что если линия ограничена, то на ее концах в любой момент времени должны соблюдаться определенные граничные условия. Это значит, что для того, чтобы в двухпроводной линии могли возникнуть стоячие волны, длина электромагнитной волны должна иметь значения, зависящие от длины линии L .

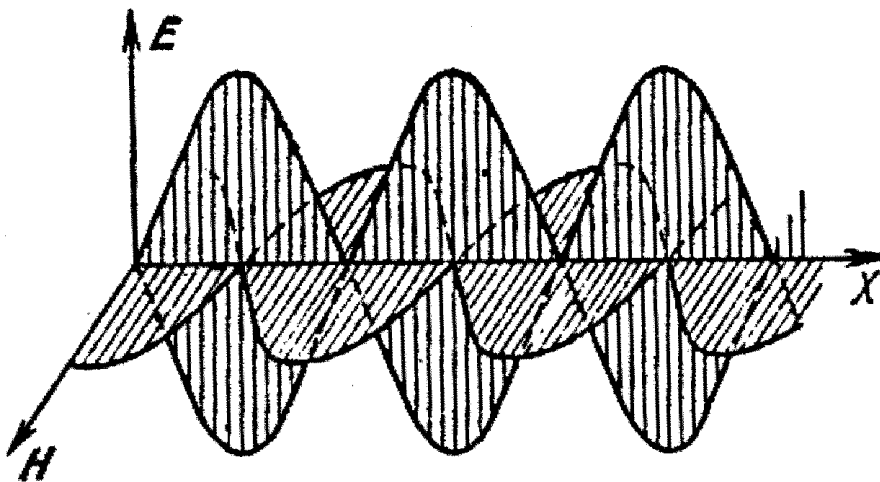


Рис.2

Если концы обоих проводов линии свободны, то на концах линии должен обращаться в нуль электрический ток (возникает узел магнитного поля). Напряжение же на конце линии будет максимальным (возникает пучность электрического поля).

Если концы линии закорочены (концы линии соединены проводом с пренебрежимо малым сопротивлением R), то на концах линии должно обращаться в нуль напряжение, то есть возникают пучность магнитного поля и узел электрического поля. Если бы напряжение на концах линии было конечным, то при $R \rightarrow 0$, $I \rightarrow \infty$, что физически невозможно.

Бегущая волна не удовлетворяет ни одному из этих граничных условий. Поэтому процесс распространения волны изменяется так, что волна отражается от концов линии и при наложении с волной, распространяющейся в положительном направлении оси x , возникает стоячая электромагнитная волна. При отражении электромагнитной волны от концов линии происходит изменение фазы колебаний.

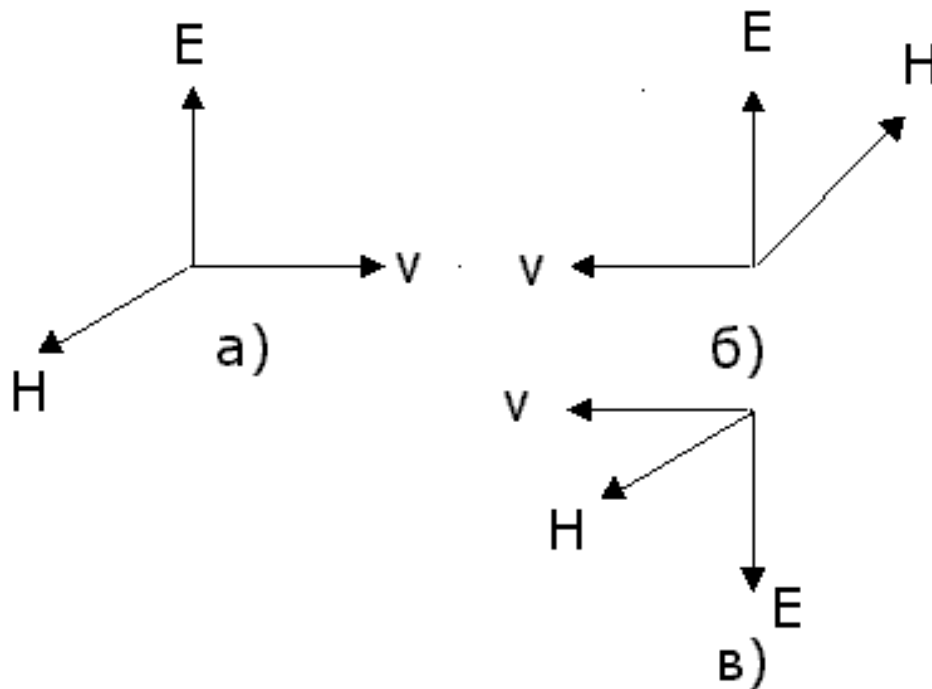


Рис. 3. Взаимная ориентировка электрического и магнитного векторов до (а) и после (б и в) отражения электромагнитной волны.

Действительно направления векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ связаны с направлением скорости распространения волны $\vec{v}$ правилом правого винта. Если волна движется слева направо, то взаимная ориентация векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в волне в конце линии показана на рис.3а. Чтобы скорость волны изменилась на противоположную нужно, чтобы один из векторов $\vec{E}$ или $\vec{H}$ изменил знак (рис.3б, 3в), то есть фазы колебаний $\vec{E}$ или $\vec{H}$ изменились на π .

Таким образом, если линия закорочена, на конце линии возникает пучность магнитного поля и узел электрического, а если разомкнута, то

пучность электрического и узел магнитного поля. Расстояние между соседними узлами или пучностями l_1 стоячей волны равно

$$l = \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

а между соседними узлами и пучностями

$$l_1 = \frac{\lambda}{4}. \quad (8)$$

Отсюда длина электромагнитной волны

$$\lambda = 2l. \quad (9)$$

или

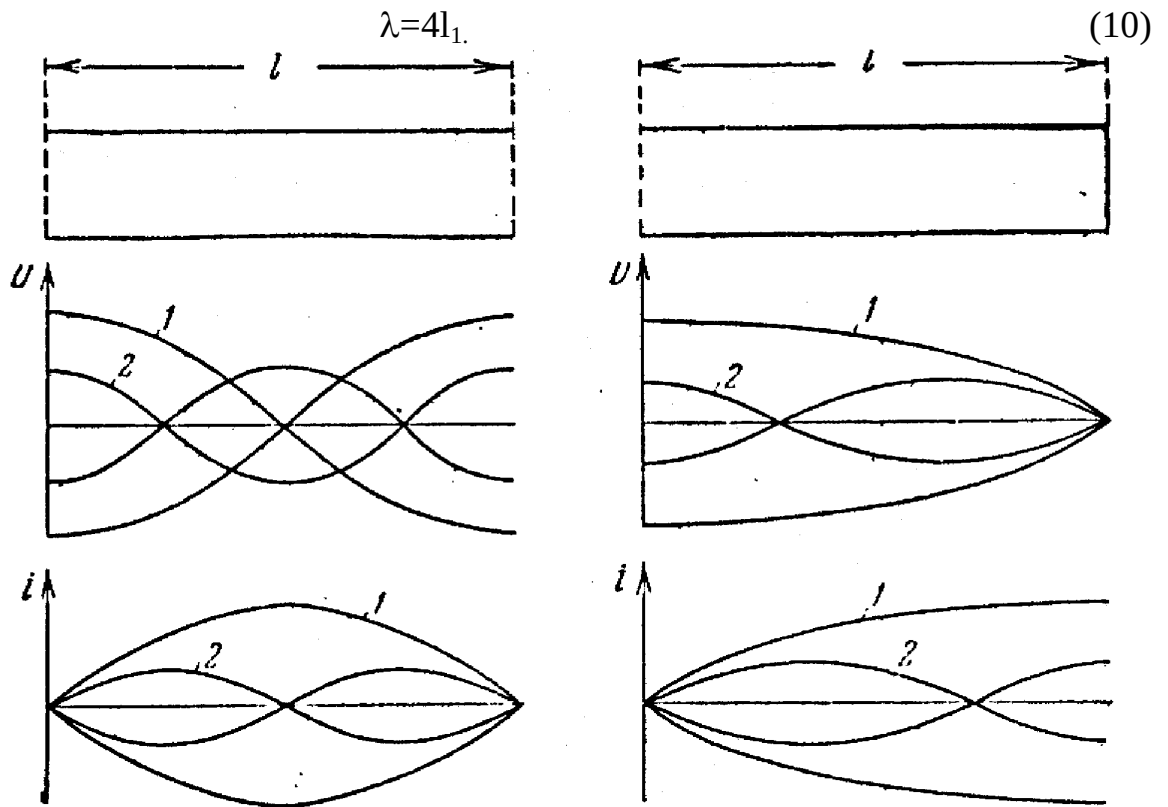


Рис. 4. Два первых колебания двух-
двухпроводной линии, разомкнутой
замкнутой на концах.

Рис. 5. Два первых колебания
проводной линии,
одном конце проводящим
мостиком.

Рассмотрим случай, когда на концах линии образуются пучности одного и того же поля (например, при разомкнутой на обоих концах линии, пучности электрического поля). Тогда стоячие волны возникают, если длина волны в соответствии с (7), удовлетворяет соотношению

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

На рис.4 и 5 представлены две возможные стоячие волны при $n = 1$ и $n = 2$.

Первая из них имеет одну пучность тока и один узел напряжения, расположенные на середине линии. Вторая имеет два узла напряжения и две пучности тока. В обоих случаях на концах линии находятся пучности напряжения и узлы тока в соответствии с граничными условиями. Помимо этих возможно еще бесконечное множество других стоячих волн, которым соответствуют $n = 3, 4, \dots$ и т.д.

Найдем частоту колебаний, установившихся в стоячей волне. Поскольку

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (12)$$

где v - скорость распространения электромагнитных волн в среде, то длина линии

$$L = \frac{nv}{2f}. \quad (13)$$

Отсюда

$$f_n = \frac{vn}{2L}. \quad (14)$$

Тогда при $n = 1$

$$f_1 = \frac{v}{2L}. \quad (15)$$

Собственные колебания с наименьшей частотой f_1 называются основными, а все остальные собственные колебания – обертонами или гармониками.

Аналогичные зависимости мы получим и тогда, когда оба конца линии будут замкнуты проводящим мостиком. Различие состоит лишь в том, что во втором случае на концах линии будут находиться узлы напряжения (вместо пучностей) и пучности тока (вместо узлов).

Если линия разомкнута с одного из концов, то колебания в соответствии с (2), возникнут при условии

$$L = n \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (16)$$

Отсюда

$$f_n = \frac{v(2n+1)}{4L}. \quad (17)$$

Наименьшая частота колебаний в этом случае

$$f_1 = \frac{v}{4L}. \quad (18)$$

Следовательно, при замыкании одного из концов частота основного колебания уменьшается в два раза.

Отсюда в ограниченной двухпроводной линии возможны только определенные стоячие волны, которые удовлетворяют условиям на границе линии. Эти стоячие волны называются собственными нормальными колебаниями. Формулы (4) и (12) показывают, что собственные колебания имеют дискретный характер. Чтобы возбудить в линии одно из собственных

колебаний, источник электромагнитных колебаний, питающий линию, должен иметь частоту, совпадающую с одной из собственных частот линии f_n .

Если электромагнитная волна распространяется в вакууме, то в формулы (12)-(16) входит c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, равная $3 \cdot 10^8$ м/с.

При определенных условиях на границе в ограниченной по длине двухпроводной линии может существовать бегущая волна. Это имеет место, если на конце линии между проводами включено определенное сопротивление, равное входному сопротивлению аналогичной бесконечной линии. Тогда вся энергия, поступающая от источника, поглощается этим сопротивлением, и отраженной волны не возникает.

Это сопротивление равно отношению амплитуды напряжения между проводами к амплитуде тока и называется волновым сопротивлением линии. Волновое сопротивление линии зависит от ее геометрических размеров и ее электрических характеристик.

Если считать, что тепловые потери тока в линии малы ($R_{\text{линии}} = 0$), а утечка между проводами незначительна, то волновое сопротивление линии равно

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (19)$$

где L и C – индуктивность линии и емкость единицы длины между проводами.

В реальных двухпроводных линиях не могут быть практически осуществлены режимы чисто бегущих 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.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Система, состоящая из источника электромагнитных колебаний, двухпроводной линии и приемника электромагнитных волн, называется системой Лехера по имени ученого, впервые ее осуществившего. Такая система, состоящая из генератора Г4-79, генерирующего высокочастотные электромагнитные колебания частотой f , двухпроводной линии, расположенной на оптической скамье, платформы, на которой расположены детекторы-витки связи, подключенные через керамические СВЧ-диоды к микроамперметрам, используется в работе. Длина линии $L = 120$ см, диаметр провода линии – 5 мм, расстояние между проводами – 50 мм.

Для тонких цилиндрических проводов радиуса a индуктивность и емкость единицы длины линии соответственно равны

$$L=2\mu\ln\frac{d}{a}, C=\frac{\varepsilon}{2\ln\frac{d}{a}}, \quad (20)$$

где d - расстояние между проводами.

Тогда волновое сопротивление линии, используемой в работе, согласно (13) – 276 Ом.

Связь между генератором и линией осуществляется отрезком коаксиального провода сопротивлением 50 Ом, то есть со стороны генератора линия разомкнута.

Исследование распределения амплитуд тока и напряжения вдоль линии производится посредством двух измерителей поля – один измеряет величину, пропорциональную квадрату амплитуды напряжения (объемной плотности энергии электрического поля), другой - величину, пропорциональную квадрату силы тока (объемной плотности энергии магнитного поля)

Виток связи измерителя тока (рис.6) ориентирован перпендикулярно к направлению магнитного поля $\vec{H}$. Э.д.с. индукции, наводимая в нем переменным магнитным полем $\vec{H}$, пропорциональна амплитуде тока в том сечении линии, около которого расположен виток связи. Микроамперметр измерителя тока включен через диод, причем используемый начальный участок характеристики соответствует квадратичной зависимости силы тока от э.д.с.индукции. Поэтому показания микроамперметра пропорциональны квадрату силы тока (объемной плотности энергии магнитного поля)

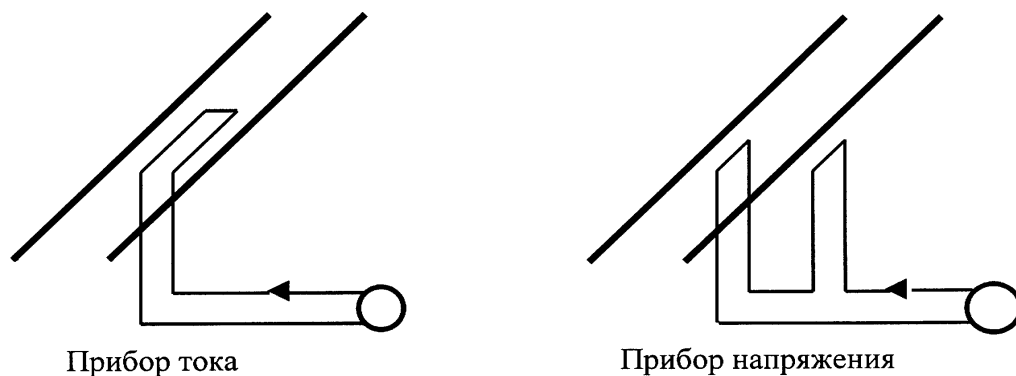


Рис.6.

Два последовательно соединенных витка связи, который будем называть измерителем напряжения, располагаются около линии таким образом (рис.6), что обеспечивают лишь емкостную связь с проводами линии. Высокочастотное электрическое поле $\vec{E}$ будет индуцировать в цепи измерителя ток, пропорциональный амплитуде напряжения между проводами в том сечении линии, около которого расположены витки связи.

Милливольтметр измерителя напряжения также включен через диод, причем используемый начальный участок характеристики также соответствует квадратичной зависимости силы тока от напряжения. Поэтому

показания милливольтметра пропорциональны квадрату напряжения (объемной плотности энергии электрического поля)

Необходимо учесть, что напряженность электрического и магнитного полей вблизи провода очень сильно убывает при изменении расстояния от провода: так, например, изменение расстояния на один-два миллиметра может привести к значительной ошибке. Поэтому при измерении необходимо витки измерителей устанавливать на одном и том же расстоянии от линии по всей ее длине. Кроме того, по возможности, экспериментатору необходимо находиться дальше от линии, так как, находясь вблизи линии, экспериментатор влияет на распределение поля.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ 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. Перемкните линию непосредственно над центром держателя витков связи проводником с сопротивлением, близким к нулю. В этом случае линия короткозамкнута.
4. Подберите с помощью ручки «МНz» на передней панели генератора такую частоту электромагнитных колебаний, поступающих на линию, чтобы микроамперметр показывал максимальное значение, а милливольтметр - минимальное значение. Это означает, что в линии установилась стоячая волна и частота колебаний генератора близка к одной из собственных частот линии.
5. Измерьте распределение амплитуд токов и напряжений, медленно перемещая платформу с приборами по направлению к генератору и записывая показания микроамперметра и милливольтметра через 1 см. В пучностях и узлах измерения провести наиболее тщательно для повышения точности определения координат узлов и пучностей. Участок линии, вдоль которого проводятся измерения, должен содержать не менее шести узлов. Результаты измерений занесите в табл. 1 и табл. 2.
6. Опыты, аналогичные в пп. 4,5, проведите при $R_n = \infty$ (при разомкнутом втором конце). Результаты занесите в табл. 3-4.
7. Постройте графики распределения амплитуд тока $I = f(x)$ и напряжений $U = U(x)$ для случая стоячей волны при $R_n = 0$ и $R_n = \infty$ (разомкнутой на втором конце). Полученные зависимости амплитуд токов и напряжений $i = f(x)$ и $U = U(x)$ изобразить на одном графике, соответственно, для $R_n = 0$ и $R_n = \infty$.
8. Рассчитайте для всех случаев по (9) или (10) на основе полученных графиков средние значения длины электромагнитной волны и по (12) частоты собственных колебаний, возбуждаемых в линии.
9. Оцените по формулам (15) и (18) частоту основных колебаний и сравните с результатами расчета п. 8.
10. Оцените погрешность результатов.

Таблица 1

Координата х, см											$\tilde{l}$, см	$\tilde{\lambda}$, м	$\tilde{\nu}$, Гц
Амплитуда тока, мкА													
Расст. между узлами тока, см													

Таблица 2

Координата х, см											$\tilde{l}$, см	$\tilde{\lambda}$, м	$\tilde{\nu}$, Гц
Амплитуда напряжения, мВ													
Расст. между узлами напряжения, см													

Таблица 3

Координата х, см											$\tilde{l}$, см	$\tilde{\lambda}$, м	$\tilde{\nu}$, Гц
Амплитуда тока, мкА													
Расст. между узлами тока, см													

Таблица 4

Координата х, см											$\tilde{l}$, см	$\tilde{\lambda}$, м	$\tilde{\nu}$, Гц
Амплитуда напряжения, мВ													
Расст. между узлами напряжения l, см													

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные положения теории Максвелла?
2. Что общего имеет ток смещения с током проводимости? Чем отличается ток смещения от тока проводимости?
3. Может ли электромагнитная волна распространяться в вакууме?
4. Каков физический смысл вектора Пойнтинга?
5. Как устроена линия Лехера и каково ее назначение?
6. Что возникает на конце двухпроводной линии, если линия закорочена? свободна с одного из концов?
7. Чему равно расстояние между соседними узлами (пучностями) стоячей волны? соседними узлами и пучностями стоячей волны?
8. Чему равна частота основного колебания, если линия замкнута с обоих концов? разомкнута с одного из концов?

ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Высшая школа, 1970. С. 953.
2. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. - М.: Высшая школа. 1972.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука. 1998. Т.4. С. 228.
4. Физический практикум. Электричество и оптика по ред. В. И. Ивероной. – М.: «Наука». 1968. С. 815.