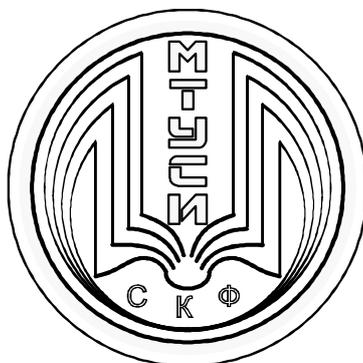


СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФИЛИАЛ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ»



КАФЕДРА «ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»

Ю.В. Жабинский
В.А. Данилов
В.Л. Львов

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Лабораторная работа №7

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ
ДЛИННОЙ ЛИНИИ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ

Ростов-на-Дону
2017 г.

УДК 621.373(076.5)

ББК 32.88

Ж 12

Жабинский Ю.В., Данилов В.А., Львов В.Л. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. Лабораторная работа № 7 - «Исследование распределения напряжения вдоль длинной линии с малыми потерями». Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2017. - 39 с.

Приводятся задание и методические указания для выполнения лабораторной работы № 7 - «Исследование распределения напряжения вдоль длинной линии с малыми потерями» по дисциплине «Теория электрических цепей» для студентов 2 курса всех профилей направления подготовки 11.03.02 - «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Рецензент: заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» СКФ МТУСИ Юхнов В.И., к.т.н., доцент

Утверждено на заседании кафедры ИВТ
(протокол № 2 - от 06.10.2017г.)

© Жабинский Ю.В., Данилов В.А., Львов В.Л., 2017

© СКФ МТУСИ, 2017

И з д а т е л ь с т в о С К Ф М Т У С И

Сдано в набор 23.10.17. Изд. № 252. Подписано в печать 10.11.17. Зак. 266.

Печ. листов 2,4. Учетно-изд. л.1,9. Печать оперативная. Тир. 50 экз.

Отпечатано в Полиграфическом центре СКФ МТУСИ, Серафимовича, 62.

СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация	4
1. Исследование цепей с распределенными параметрами	5
2. Подготовка к выполнению лабораторной работы	22
3. Содержание отчета о результатах проделанной лабораторной работы.....	22
4. Экспериментальное исследование распределения напряжения вдоль искусственной длинной линии с малыми потерями.....	23
5. Порядок выполнения лабораторной работы	27
6. Анализ результатов проведенных исследований	35
7. Контрольные вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы	36
8. Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы	37
9. Список использованной литературы	39

АННОТАЦИЯ

В описании приведены задание и методические указания для выполнения лабораторной работы № 7 - «Исследование распределения напряжения вдоль длинной линии с малыми потерями» по дисциплине «Теория электрических цепей» (ТЭЦ).

Задание и методические указания предназначены для студентов 2 курса очной и заочной форм обучения всех профилей направления подготовки 11.03.02 - «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Основная цель лабораторной работы - углубление, систематизация и закрепление теоретических знаний по дисциплине ТЭЦ, а также приобретение практических навыков исследования цепей с распределенными параметрами.

В методических указаниях рассмотрены следующие вопросы:

- особенности расчета цепей с распределенными параметрами;
- расчета цепей с распределенными параметрами при малых потерях в них;
- распределения напряжения в длинных линиях с малыми потерями при различных режимах работы.

1. Исследование цепей с распределенными параметрами

Линии связи, длина которых соизмерима с длиной электромагнитной волны, распространяющихся вдоль них, называются цепями с распределенными параметрами или длинными линиями. В схеме замещения такой линии каждый элементарный участок линии имеет активное сопротивление R , индуктивность L , емкость C и проводимость изоляции проводов линии G . Эти параметры, отнесенные к единице длины линии, называются первичными (погонными) параметрами линии и обозначаются следующим образом:

- R_0 - активное сопротивление 1 км линии, измеряется в Ом/км,
- L_0 - индуктивность 1 км линии, измеряется в Гн/км,
- C_0 - емкость 1 км линии, измеряется в Ф/км,
- G_0 - активная проводимость изоляции проводов, измеряется в См/км,

Основной особенностью длинной линии является то, что токи и напряжения в любой точке линии зависят не только от времени t , фиксирующего момент наблюдения, но и от пространственной координаты x , определяющей место наблюдения.

Если разбить линию на элементарные участки длиной Δx и для одного из них составить уравнения для изменения напряжения и тока на этом участке в соответствии со схемой замещения, приведенной на рисунке 1, то получим следующие выражения:

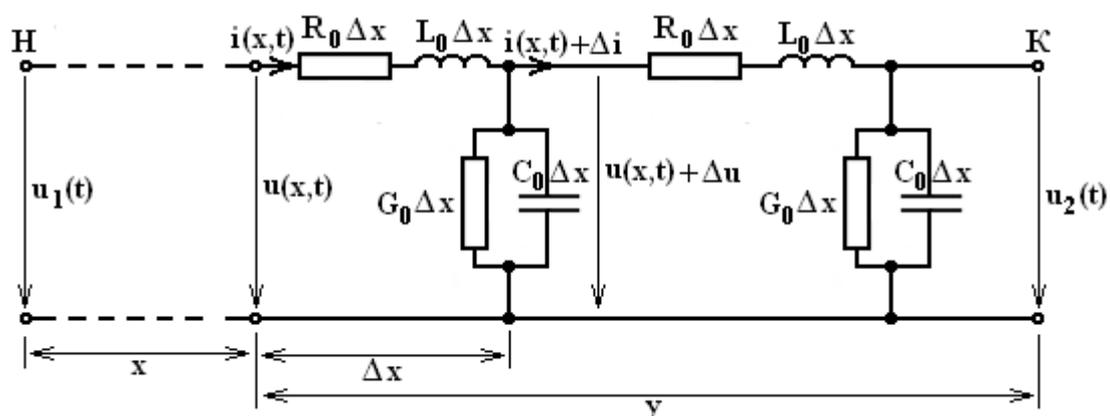


Рисунок 1. Схема замещения длинной линии

$$\begin{cases} -\Delta u = \left(R_0 \cdot i + L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \right) \cdot \Delta x; \\ -\Delta i = \left(G_0 \cdot (u + \Delta u) + C_0 \cdot \frac{\partial (u + \Delta u)}{\partial t} \right) \cdot \Delta x, \end{cases} \quad (1)$$

где n - обозначение начала линии,

k - обозначение конца линии,

x - расстояние от начала линии до рассматриваемой точки,

y - расстояние от конца линии до рассматриваемой точки,

$\ell = x + y$ - длина всей линии,

Δx - длина элементарного участка линии,

$u(x, t)$ - напряжение между проводами в точке x в момент времени t ,

$i(x, t)$ - ток в линии в точке x в момент времени t ,

$\Delta u, \Delta i$ - приращения напряжения и тока на участке Δx .

При стремлении длины участка Δx к нулю точность системы уравнений (1) повышается.

Итак, линия рассматривается как цепная схема с бесконечно большим числом элементарных звеньев, электрические параметры которых бесконечно малы.

Отбросив величины второго порядка малости в выражении

$$\left(G_0 \cdot (u + \Delta u) + C_0 \cdot \frac{\partial (u + \Delta u)}{\partial t} \right) \cdot \Delta x,$$

перейдем в (1) к пределу, когда $\Delta x \rightarrow 0$:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 \cdot i + L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 \cdot u + C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial y} = R_0 \cdot i + L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t}; \\ \frac{\partial u}{\partial y} = G_0 \cdot u + C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t}; \end{cases} \quad (3)$$

где: R_0, L_0, C_0, G_0 - первичные параметры длинной линии.

Выражения напряжения u и тока i в точке, отстоящей на расстоянии x от начала линии (2), и в точке, отстоящей на расстоянии y от конца линии (3), записываются в виде системы дифференциальных уравнений в частных

производных и называются телеграфными уравнениями. В этих уравнениях напряжение и ток в линии представлены частными производными, так как они зависят от двух независимых переменных.

Телеграфные уравнения решаются однозначно при использовании начальных и граничных условий.

Начальными условиями называются значения тока и напряжения в начале или в конце линии в момент времени, принятый за нуль.

Граничные условия определяются связями между напряжением и током в начале или в конце линии в зависимости от заданного режима работы линии. Обычно принимается, что первичные параметры линии связи равномерно распределены вдоль всей линии и такая линия считается однородной.

Если на вход такой линии (рисунок 1) подать синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой, то вследствие линейности телеграфных уравнений ток и напряжение в любой точке линии будут также изменяться во времени по синусоидальному закону с частотой входного сигнала. Применяя комплексную форму записи для тока и напряжения, переходим к телеграфным уравнениям в обычных производных, составленных для комплексных действующих значений тока $\dot{I} = I(x)$ и напряжения $\dot{U} = U(x)$. Подобный переход объясняется тем, что комплексные действующие значения напряжения и тока не зависят от времени t и в системе уравнений остается только одна независимая переменная – x :

$$\begin{cases} -\frac{d\dot{U}}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) \cdot \dot{I}; \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} = (G_0 + j\omega C_0) \cdot \dot{U}; \end{cases} \quad (4)$$

Продифференцировав систему уравнений (4) по x , получаем систему дифференциальных уравнений второго порядка в виде:

$$-\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} = (R_0 + j\omega L_0) \cdot \frac{d\dot{I}}{dx} = -(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0) \cdot \dot{U}, \quad (5)$$

$$-\frac{d^2 i}{dx^2} = (G_0 + j\omega C_0) \cdot \frac{d\dot{U}}{dx} = -(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0) \cdot \dot{I}. \quad (6)$$

Введя $\underline{\gamma}$ в качестве обозначения коэффициента распространения электромагнитной волны вдоль линии:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta, \quad (7)$$

где α - коэффициент ослабления амплитуды волны, распространяющейся вдоль линии, на 1км этой линии (измеряется в дБ/км),

β - коэффициент фазы, показывает изменение фазы волны, распространяющейся вдоль линии, на 1км (измеряется в рад/км),

запишем дифференциальное уравнение, описывающее изменение действующего значения напряжения \dot{U} в точке x в следующем виде:

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \cdot \dot{U}. \quad (8)$$

Аналогично получаем дифференциальное уравнение для действующего значения тока:

$$\frac{d^2 i}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \cdot i. \quad (9)$$

Решая однородные дифференциальные уравнения (8), (9), получаем выражения для действующих значений:

- напряжения \dot{U} в точке, отстоящей от начала линии на расстоянии x :

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} - \underline{\gamma}^2 \cdot \dot{U} = 0, \quad p^2 - \underline{\gamma}^2 = 0, \quad p = \pm \underline{\gamma}. \\ \dot{U} = \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x} \quad (10)$$

- и тока в этой же точке

$$i = \frac{1}{Z_B} (\underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} - \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}), \quad (11)$$

где: \underline{A}_1 и \underline{A}_2 - постоянные интегрирования в комплексной форме,

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} - \text{волновое сопротивление линии.} \quad (12)$$

Волновым называется сопротивление, которое оказывает линия распространяющейся по ней электромагнитной волне.

Запишем выражения \dot{U} и \dot{I} , представив в них комплексные числа в показательной форме:

$$\dot{U} = A_1 e^{j\psi_1} \cdot e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x} + A_2 e^{j\psi_2} \cdot e^{\alpha x} \cdot e^{j\beta x}, \quad (13)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{Z_B} (A_1 e^{j\psi_1} \cdot e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x} - A_2 e^{j\psi_2} \cdot e^{\alpha x} \cdot e^{j\beta x}), \quad (14)$$

где: A_1 и A_2 – модули постоянных интегрирования (они определяются с учетом начальных условий),

ψ_1, ψ_2 – аргументы постоянных интегрирования.

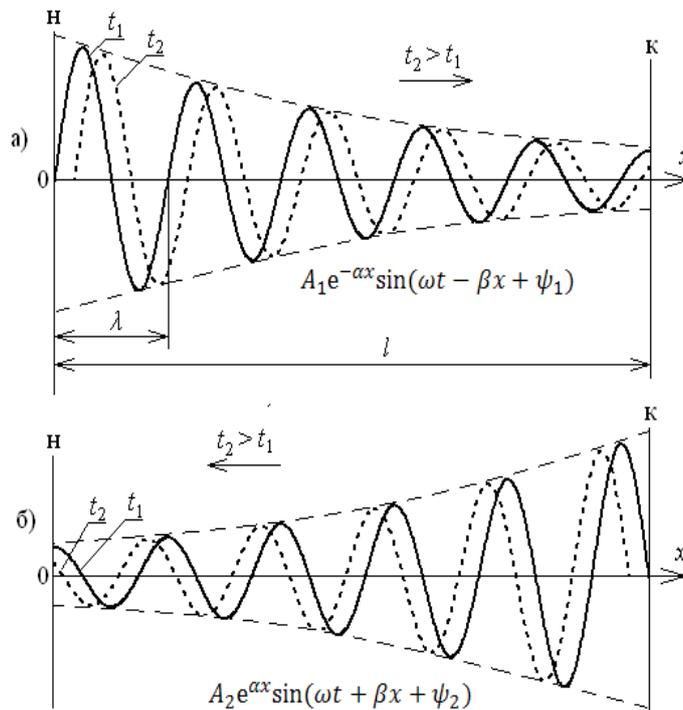
От комплексных действующих значений возвращаемся к мгновенным значениям токов и напряжений в точке, отстоящей от начала линии на расстоянии x . Эти значения являются функциями двух переменных x и t :

$$u(x, t) = \sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi_1) + \sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x + \psi_2) \quad (15)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_B} (\sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_1 - \beta x - \varphi_z) + \sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_2 + \beta x - \varphi_z)), \quad (16)$$

где φ_z – начальная фаза комплексного сопротивления Z_B .

Из выражений (15) и (16) следует, что напряжение u и ток i в любой точке x линии могут быть представлены в виде суммы двух синусоидальных составляющих, амплитуды и фазы которых зависят от координаты x (рисунки 2а и 2б):



Рисунки 2 а и 2б. Падающая и отраженная волны в длинной линии

Первое слагаемое в (15) представляет собой синусоиду (рисунок 2а), амплитуда которой уменьшается по экспоненциальному закону по мере удаления от начала линии ($x \rightarrow \ell$). С течением времени эта синусоида перемещается от начала к концу линии и называется прямой или падающей волной. Второе слагаемое (15) представляет собой синусоиду (рисунок 2б), амплитуда которой увеличивается по экспоненциальному закону по мере удаления от начала линии. Распространяется она от конца линии к ее началу, т.е. в направлении противоположном направлению распространения прямой волны. Называется она обратной или отраженной волной. Падающая волна возникает в линии в результате подачи на вход синусоидального напряжения, а отраженная волна образуется при отражении падающей волны от конца линии. Падающая и отраженная волны перемещаются в противоположных друг другу направлениях с одинаковой скоростью, называемой фазовой. Фазовая скорость определяется как скорость перемещения точки волны, фаза колебания в которой остается постоянной (например, амплитуды волны), и рассчитывается по формуле:

$$v_{\phi} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta} = \lambda f, \quad (17)$$

где λ - длина волны.

Длиной волны напряжения (тока) называется расстояние между двумя точками длинной линии, в которых фазы рассматриваемой слагающей напряжения (тока) отличаются на 2π . Длина волны определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (18)$$

Напряжение или ток в любой точке длинной линии равны сумме падающей и отраженной волн напряжения или тока.

Запишем выражения комплексных действующих значений напряжения и тока в точке с координатой x :

$$\dot{U} = \dot{U}_{\Pi} + \dot{U}_0, \quad (19)$$

$$\text{где } \dot{U}_{\Pi} = \underline{A}_1 e^{-\gamma x} - \text{напряжение падающей волны,} \quad (20)$$

$$\dot{U}_0 = \underline{A}_2 e^{-\gamma x} - \text{напряжение отраженной волны,} \quad (21)$$

$$i = i_{\pi} - i_0, \quad (22)$$

где $i_{\pi} = \frac{\dot{U}_{\pi}}{Z_B}$ - ток падающей волны, (23)

$i_0 = \frac{\dot{U}_0}{Z_B}$ - ток отраженной волны. (24)

Определим постоянные интегрирования, используя начальные условия в начале линии, когда координата x равна 0, а напряжение и ток равны $\dot{U}(0) = \dot{U}_1$ и $i(0) = i_1$:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \underline{A}_1 e^{-\gamma x} + \underline{A}_2 e^{\gamma x} \\ i &= \frac{1}{Z_B} (\underline{A}_1 e^{-\gamma x} - \underline{A}_2 e^{\gamma x}) \\ \dot{U}(0) &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 = \dot{U}_1 \\ i(0) &= \frac{1}{Z_B} (\underline{A}_1 - \underline{A}_2) = i_1 \\ \underline{A}_1 &= \dot{U}_1 - \underline{A}_2 \\ \underline{A}_2 &= \frac{\dot{U}_1 - i_1 Z_B}{2} \\ \underline{A}_1 &= \frac{\dot{U}_1 + i_1 Z_B}{2} \end{aligned}$$

После этого запишем комплексное действующее значение напряжения в точке, отстоящей от начала линии на расстоянии x , выраженное через значения входного напряжения и входного тока:

$$\dot{U} = \underline{A}_1 e^{-\gamma x} + \underline{A}_2 e^{\gamma x} = \dot{U} = \frac{\dot{U}_1 + i_1 Z_B}{2} e^{-\gamma x} + \frac{\dot{U}_1 - i_1 Z_B}{2} e^{\gamma x} \quad (25)$$

После ввода понятия коэффициента отражения волны по напряжению $\underline{\rho}_1$ от начала линии:

$$\underline{\rho}_1 = \frac{\dot{U}_0(0)}{\dot{U}_1(0)} = \frac{\dot{U}_1 - i_1 Z_B}{\dot{U}_1 + i_1 Z_B} = \frac{Z_1 - Z_B}{Z_1 + Z_B}, \quad (26)$$

где

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1}{i_1} \text{ - сопротивление устройства, подключенного ко входу линии,} \quad (27)$$

получим значения напряжения и тока в точке, отстоящей от начала линии на расстоянии x , выраженные через напряжение и ток в начале линии и коэффициент отражения волны от начала линии:

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B}{2} (e^{-\gamma x} + \underline{\rho}_1 e^{\gamma x}) \quad (28)$$

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B}{2 Z_B} (e^{-\gamma x} - \underline{\rho}_1 e^{\gamma x}) \quad (29)$$

Когда известны напряжение и ток в конце линии, то постоянные интегрирования определяются через начальные условия в конце линии. В этом случае расстояние x от начала линии равно длине линии ℓ и постоянные интегрирования выражаются через напряжение и ток в конце линии: $\dot{U}(\ell) = \dot{U}_2$, $\dot{i}(\ell) = \dot{i}_2$:

$$\dot{U}(\ell) = \dot{U}_2 = \underline{A}_1 e^{-\gamma \ell} + \underline{A}_2 e^{\gamma \ell} \quad (30)$$

$$\dot{i}(\ell) = \dot{i}_2 = \frac{1}{2 Z_B} (\underline{A}_1 e^{-\gamma \ell} - \underline{A}_2 e^{\gamma \ell}) \quad (31)$$

Рассчитав постоянные интегрирования и введя коэффициент отражения $\underline{\rho}_2$ падающей волны напряжения от конца линии:

$$\underline{\rho}_2 = \frac{\dot{U}_0(\ell)}{\dot{U}_n(\ell)} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{i}_2 Z_B}{\dot{U}_2 + \dot{i}_2 Z_B} = \frac{Z_H - Z_B}{Z_H + Z_B}, \quad (32)$$

где $Z_H = \frac{\dot{U}_2}{\dot{i}_2}$ - сопротивление нагрузки, подключенной к концу линии, (33)

запишем выражение напряжения и тока в точке линии, отстоящей от конца на расстоянии y , через напряжение и ток в конце этой линии:

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}_2 + \dot{i}_2 Z_B}{2} (e^{\gamma y} + \underline{\rho}_2 e^{-\gamma y}), \quad (34)$$

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_2 + \dot{i}_2 Z_B}{2 Z_B} (e^{\gamma y} - \underline{\rho}_2 e^{-\gamma y}). \quad (35)$$

Коэффициентом отражения падающей волны напряжения $\underline{\rho}_2$ от конца линии называется отношение комплексной амплитуды напряжения отраженной волны в конце линии к комплексной амплитуде напряжения падающей волны в этой же точке.

В общем случае коэффициент $\underline{\rho}_2$ является комплексной величиной. По абсолютной величине он не может быть больше единицы, так как в этом

случае амплитуда отраженной волны была бы больше амплитуды падающей волны.

В случае холостого хода, когда выходные зажимы линии разомкнуты, энергия на выходе не потребляется. При этом происходит полное отражение падающей волны от конца линии и амплитуда падающей и отраженной волн напряжения будут равны друг другу. Коэффициент отражения по напряжению $\underline{\rho}_2$ становится равным 1. Напряжение в конце линии при этом удваивается.

При коротком замыкании выходных зажимов линии напряжение на выходе линии становится равным нулю, так как выходные зажимы линии закорочены (соединены проводником, сопротивление которого равно нулю). В этом случае амплитуда падающей волны напряжения будет равна амплитуде отраженной волны напряжения, но знаки напряжений у волн будут противоположными. Поэтому суммарное напряжение на выходе линии будет равным нулю.

В случае согласованной нагрузки, когда сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии (линия считается нагруженной согласованно), вся энергия, приносимая в конец линии падающей волной, переходит в нагрузку. Отраженная волна в данном случае отсутствует.

Существуют длинные линии, в которых активные потери пренебрежимо малы. При этом можно считать, что первичные параметры линии R_0 и G_0 практически равны нулю. Коэффициент распространения $\underline{\gamma}$, определяемый выражением (7), в данном случае будет равен:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{j\omega L_0 \cdot j\omega C_0} = j\omega\sqrt{L_0 C_0} = j\beta, \quad (36)$$

где $\alpha = 0$ (коэффициент равен нулю и постоянен), а $\beta = \omega\sqrt{L_0 C_0}$ (коэффициент прямо пропорционален частоте ω).

Волновое сопротивление \underline{Z}_B такой длинной линии будет чисто активным и равным:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{j\omega L_0}{j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = R_B. \quad (37)$$

В соответствии с (36) и (37) амплитуды падающей и отраженной волн, распространяющихся вдоль длинной линии без потерь, будут постоянными по величине по всей длине линии (так как $\alpha = 0$).

Рассмотрим режимы работы длинной линии без потерь при различных нагрузках.

а) режим холостого хода на выходе линии.

В этом случае $Z_H = \infty$. В соответствии с (32) коэффициент отражения по напряжению от конца линии $\underline{\rho}_2$ будет равным 1, а ток в конце линии будет равным:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_H} = 0.$$

Выражения для действующих значений тока и напряжения (34), (35) примут вид:

$$\dot{U}(y) = \dot{U}_2 \cdot \frac{e^{\gamma y} + e^{-\gamma y}}{2} \quad (38)$$

$$\dot{I}(y) = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \cdot \frac{e^{\gamma y} - e^{-\gamma y}}{2} \quad (39)$$

С учетом (36) и (37) эти выражения запишутся следующим образом:

$$\dot{U}(y) = \dot{U}_2 \cdot \frac{e^{j\beta y} + e^{-j\beta y}}{2} = \dot{U}_2 \cdot ch(j\beta y) = \dot{U}_2 \cdot \cos(\beta y), \quad (40)$$

$$\dot{I}(y) = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \cdot \frac{e^{j\beta y} - e^{-j\beta y}}{2} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \cdot sh(j\beta y) = j \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \cdot \sin(\beta y). \quad (41)$$

Выражения для мгновенных значений напряжения и тока будут иметь вид следующий вид:

$$u(y, t) = U_2 \cos(\beta y) \cdot \sin(\omega t + \psi_2) \quad (42)$$

$$i(y, t) = \frac{U_2}{R_B} \sin(\beta y) \cdot \sin(\omega t + \psi_2 + \pi/2) \quad (43)$$

где ψ_2 - начальная фаза комплексного напряжения \dot{U}_2 , а сдвиг фаз в формуле тока, равный $\pi/2$, появился в связи с множителем j , поскольку $j = e^{j\pi/2}$.

Распределение мгновенных значений напряжения и тока по длине линии показано на рисунке 3а, б:

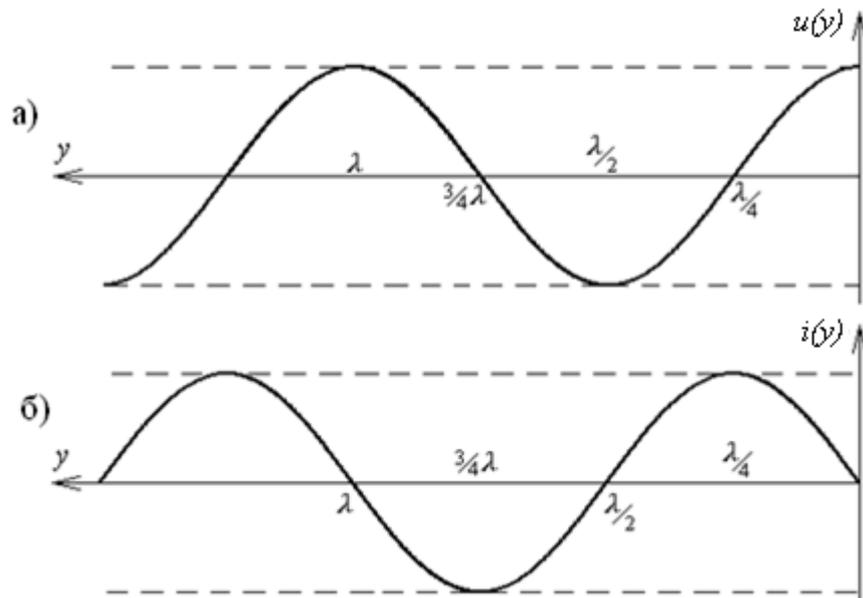


Рисунок 3а, б. Распределение мгновенных значений напряжения и тока вдоль линии без потерь в режиме холостого хода

Как следует из рисунка 3а, б, в некоторых точках линии амплитуда напряжения всегда будет равна нулю. Они называются узлами напряжения.

Расположение узлов напряжения определяется условием:

$$\cos \beta y = 0 \quad \text{или} \quad \beta y = (2k+1)\pi/2 \quad (\text{при } k = 0, 1, 2, \dots) \quad (44)$$

Подставляя в (44) значение $\beta = 2\pi/\lambda$, получим, что узлы напряжения будут соответствовать значениям y , равным: $\lambda/4$; $3\lambda/4$; $5\lambda/4$ и т.д.

Точки линии, в которых амплитуда напряжения всегда будет максимальной, называются пучностями напряжения. Они соответствуют условиям:

$$\cos \beta y = 1; \quad \beta y = k\pi; \quad y = k \lambda/2 \quad (\text{при } k=0, 1, 2, \dots). \quad (45)$$

Из (42), (43) следует, что положение нулей и пучностей напряжения и тока не изменяется во времени. Такой режим называется режимом стоячих волн. Физически появление таких волн обусловлено сложением падающей и

отраженной волн, которые в линии без потерь при $\rho_2 = 1$ имеют равные амплитуды.

В пучностях напряжения (тока) падающая и отраженная волны совпадают по фазе и суммарное напряжение (ток) удваивается. В узлах напряжения (тока) падающая и отраженная волны имеют противоположные фазы и их сумма всегда оказывается равной нулю.

Активная мощность $P = UI \cos \varphi$, передаваемая по линии в режиме стоячих волн, будет равна нулю, так как ток и напряжение в любой точке линии сдвинуты друг относительно друга на угол, равный $\pi/2$ (42), (43).

Если записать по (42) и (43) распределение действующих значений напряжения и тока в линии без потерь в режиме холостого хода, то получим следующие выражения:

$$U(y) = U_2 \cos \beta y. \quad (46)$$

$$I(y) = \frac{U_2}{R_{\text{В}}} \sin \beta y = I_2 \sin \beta y, \quad (47)$$

Распределение действующих значений напряжения и тока показаны на рисунке 4:

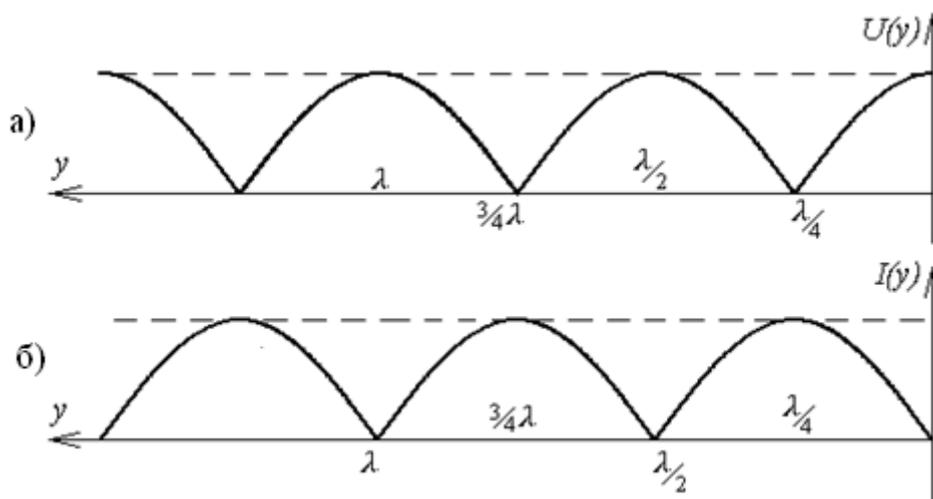


Рисунок 4. Распределение действующих значений напряжения и тока вдоль линии без потерь в режиме холостого хода

Это распределение действующих значений напряжений напоминает распределение амплитуд мгновенных значений этих же напряжений с тем лишь отличием, что отрицательные полуволны становятся положительными.

Получается выпрямленная косинусоида для напряжения и выпрямленная синусоида для тока.

б) режим короткого замыкания на выходе линии.

В этом случае сопротивление нагрузки на выходе линии равно нулю. Коэффициент отражения по напряжению будет равен:

$$\underline{\rho}_2 = \frac{\dot{U}_0(l)}{\dot{U}_n(l)} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B} = \frac{0 - \underline{Z}_B}{0 + \underline{Z}_B} = -1 \quad (48)$$

а напряжение на выходе линии будет равно нулю:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_H = \dot{I}_2 \cdot 0 = 0.$$

Выражения для напряжения и тока в точке, отстоящей от конца линии на расстоянии y , принимают вид:

$$\dot{U}(y) = \frac{\dot{I}_2 \underline{Z}_B}{2} \cdot (e^{\underline{\gamma}y} - e^{-\underline{\gamma}y}) \quad (49)$$

$$\dot{I}(y) = \frac{\dot{I}_2}{2} \cdot (e^{\underline{\gamma}y} + e^{-\underline{\gamma}y}) \quad (50)$$

С учетом (36) и (37) эти выражения запишутся:

$$\dot{U}(y) = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_B \frac{e^{j\beta y} - e^{-j\beta y}}{2} = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_B \operatorname{sh} j\beta y = j\dot{I}_2 \underline{Z}_B \sin \beta y \quad (51)$$

$$\dot{I}(y) = \dot{I}_2 \frac{e^{j\beta y} + e^{-j\beta y}}{2} = \dot{I}_2 \operatorname{ch} j\beta y = \dot{I}_2 \cos \beta y \quad (52)$$

Мгновенные значения напряжения и тока соответственно равны:

$$u(y, t) = I_2 \cdot Z_B \sin \beta y \sin(\omega t + \psi_3 + \pi/2) \quad (53)$$

$$i(y, t) = I_2 \cos \beta y \sin(\omega t + \psi_3) \quad (54)$$

где ψ_3 - начальная фаза тока I_2 .

При коротком замыкании в линии также наблюдается режим стоячих волн. Распределение мгновенных значений напряжения и тока для режима короткого замыкания на выходе линии приведены на рисунке 5а, б:

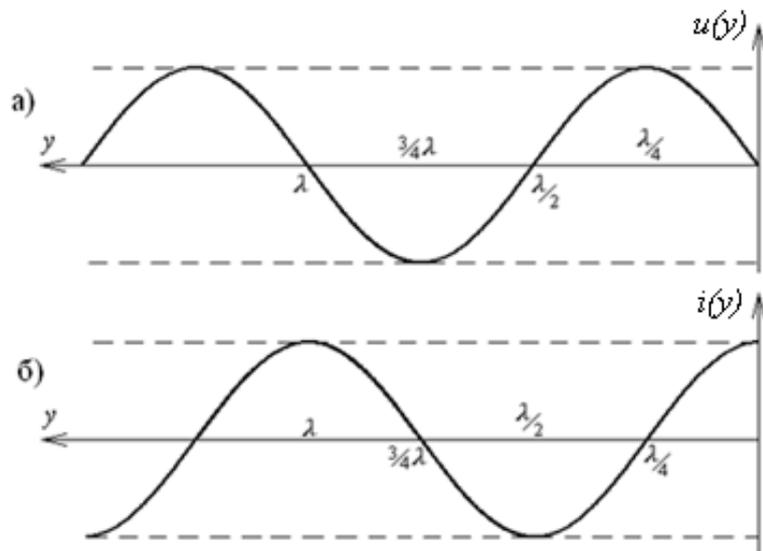


Рисунок 5а, б. Распределение мгновенных значений напряжения и тока вдоль длинной линии в режиме короткого замыкания на выходе линии

Если записать по (53), (54) распределение действующих значений напряжения и тока в линии без потерь в режиме короткого замыкания, то получим следующие выражения:

$$U(y) = I_2 \cdot Z_6 \sin \beta y \quad (55)$$

$$I(y) = I_2 \cos \beta y \quad (56)$$

Распределение действующих значений напряжения и тока показаны на рисунке 6. Оно напоминает распределение амплитуд мгновенных значений напряжений и токов в режиме короткого замыкания с тем только отличием, что отрицательные полуволны становятся положительными:

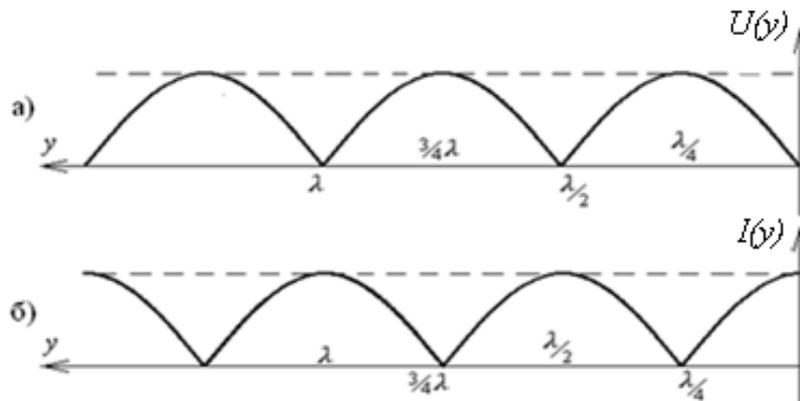


Рисунок 6. Распределение действующих значений тока и напряжения вдоль длинной линии в режиме короткого замыкания на выходе линии

В данном случае получается выпрямленная синусоида для напряжения и выпрямленная косинусоида для тока.

в) *режим согласованной нагрузки на выходе длинной линии.*

Согласованная линия нагружена на сопротивление нагрузки, равное волновому сопротивлению этой линии:

$$Z_{\text{н}} = Z_{\text{в}} = R_{\text{в}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (57)$$

В этом случае коэффициент отражения волны от конца линии равен нулю:

$$\rho_2 = \frac{\dot{U}_0(l)}{\dot{U}_{\text{п}}(l)} = \frac{Z_{\text{н}} - Z_{\text{в}}}{Z_{\text{н}} + Z_{\text{в}}} = \frac{0}{Z_{\text{н}} + Z_{\text{в}}} = 0, \quad (58)$$

а отраженная волна в линии отсутствует.

Выражения для действующих значений напряжения и тока запишутся в виде:

$$\dot{U}(y) = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_{\text{в}}}{2} e^{\gamma y} \quad (59)$$

$$\dot{I}(y) = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_{\text{в}}}{2 Z_{\text{в}}} e^{\gamma y} \quad (60)$$

а с учетом (36) и (37) получаем:

$$\dot{U}(y) = \dot{U}_2 \cdot e^{\gamma y}, \quad (61)$$

$$\dot{I}(y) = \dot{I}_2 \cdot e^{\gamma y}. \quad (62)$$

Мгновенные значения напряжения и тока в линии запишутся следующим образом:

$$u(y, t) = U_2 \sin(\omega t + \beta y + \psi_3), \quad (63)$$

$$i(y, t) = I_2 \sin(\omega t + \beta y + \psi_3), \quad (64)$$

где ψ_3 - начальная фаза U_2 .

Ток и напряжение в данном случае изменяются по синусоидальному закону и представляют собой бегущие волны. В любой точке линии они совпадают по фазе, и в этом режиме по линии передается максимальная активная мощность.

Распределение мгновенных значений напряжения и тока вдоль линии при согласованной нагрузке приведены на рисунке 7:

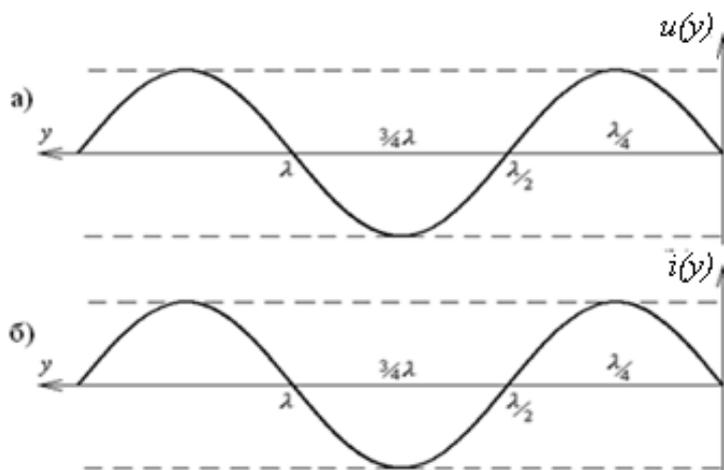


Рисунок 7. Распределение мгновенных значений напряжения и тока вдоль длинной линии без потерь в режиме согласованной нагрузки.

Если записать по (63), (64) распределение действующих значений напряжения и тока в согласованно нагруженной линии без потерь, то они будут иметь вид:

$$U(y) = U_2 \quad (65)$$

$$I(y) = I_2. \quad (66)$$

Графики действующих значений напряжения и тока представляют собой прямые линии. Они показаны на рисунке 8:

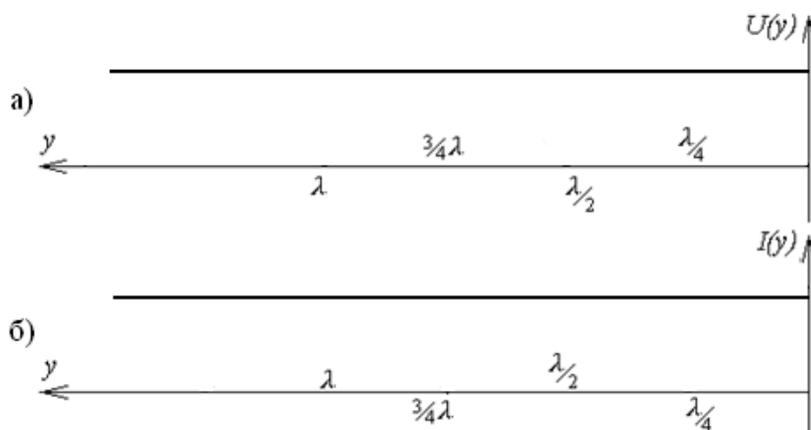


Рисунок 8. Распределение действующих значений напряжения и тока вдоль длинной линии без потерь в режиме согласованной нагрузки.

г) *режим несогласованной нагрузки на выходе линии.*

В этом случае коэффициент отражения $|\rho_2| < 1$, амплитуда отраженной волны будет меньше амплитуды падающей, что приведет к тому, что не будет полной компенсации напряжения (тока). Распределение суммарного напряжения падающей и отраженной волн вдоль длинной линии показано на рисунок 9:

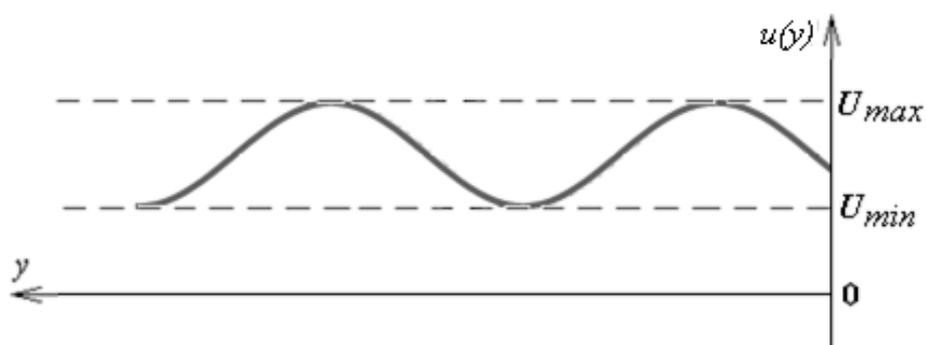


Рисунок 9. Распределение мгновенного значения напряжения вдоль длинной линии без потерь в режиме несогласованной нагрузки на выходе линии.

В линии наблюдается режим смешанных волн. Для количественной оценки степени не согласованности нагрузки линии служит коэффициент бегущей волны КБВ:

$$\text{КБВ} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 - |\rho_2|}{1 + |\rho_2|} \quad (67)$$

Иногда рассматривается коэффициент стоячей волны КСВ:

$$\text{КСВ} = \frac{1}{\text{КБВ}} \quad (68)$$

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

При подготовке к выполнению лабораторной работы студенту необходимо:

- ознакомиться с описанием данной лабораторной работы, уяснить цель этой работы,
- изучить основные теоретические положения, приведенные в описании лабораторной работы,
- ответить на контрольные вопросы для допуска к выполнению и защите лабораторной работы, приведенные в конце описания,
- ознакомиться со схемой проведения исследования, используемыми приборами и порядком выполнения лабораторной работы.

3. Содержание отчета о результатах проделанной лабораторной работы

В отчете по итогам выполнения лабораторной работы должны быть приведены:

- название и цель лабораторной работы,
- структурная схема электрической цепи, предназначенной для проведения исследования, с указанием всех её элементов, включая измерительные приборы и источник питания,
- математический аппарат, использованный при подготовке к проведению исследования и обработке полученных результатов,
- результаты измерений, полученные в процессе эксперимента, а также итоговые результаты обработки этих результатов, оформленные численно и графические,
- выводы о результатах проведенных исследований.

4. Экспериментальное исследование распределения напряжения вдоль искусственной длинной линии с малыми потерями

В лабораторных условиях для исследования цепи с распределенными параметрами используется искусственная длинная линия с сосредоточенными параметрами. Эта линия состоит из 16 каскадно включенных звеньев с сосредоточенными параметрами. Вообще, чем больше число звеньев в искусственной линии, тем больше похожи процессы, происходящие в ней, и в реальной линии с распределенными параметрами.

В данной лабораторной работе исследуется при различных режимах нагрузки искусственная длинная линия (рисунок 10) с малыми потерями, звенья которой состоят из индуктивности L_0 и емкости C_0 , представляющих собой первичные параметры линии:

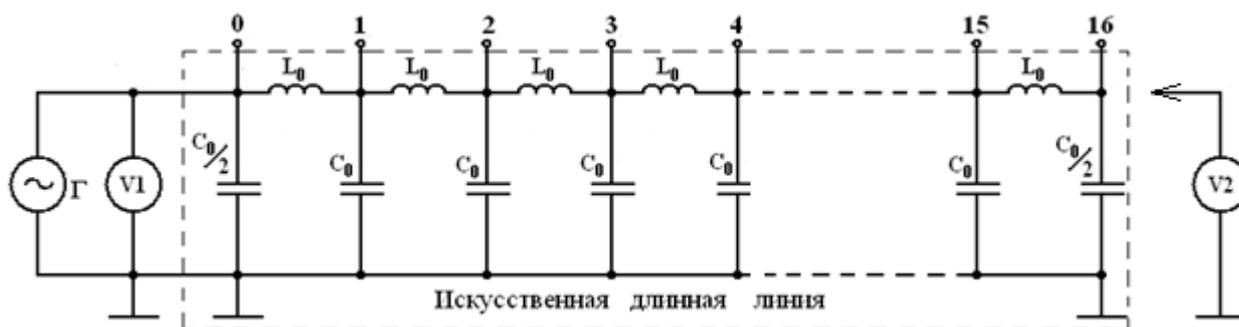


Рисунок 10. Схема замещения длинной линии

По заданным первичным параметрам линии L_0 и C_0 рассчитывается частота генератора f_{Γ}^{pac} , при которой в этой линии должна укладываться целая длина волны генератора λ_{Γ} , подключенного к ней:

$$f_{\Gamma}^{\text{pac}} = \frac{1}{n \sqrt{L_0 C_0}} \quad (69)$$

$$\lambda_{\Gamma} = \frac{c}{f_{\Gamma}^{\text{pac}}} \quad (70)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Данная искусственная линия, состоящая из 16 звеньев с первичными параметрами L_0 и C_0 , будет эквивалентна двухпроводной линии с такими

же первичными параметрами, а ее эквивалентная длина линии ℓ_3 будет равна длине волны генератора: $\ell_3 = \lambda_r$.

У реальной линии при частоте f_r^{pac} время задержки t_3 будет таким же, как и у искусственной линии. Если это время t_3 равно периоду колебания $T = \frac{1}{f_r^{\text{pac}}}$, то расстояние, проходимое сигналом за это время в обеих линиях будет равно длине волны λ_r .

Далее рассчитываются вторичные параметры линии \underline{Z}_B и $\underline{\gamma}$:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = R_B; \quad \underline{\gamma} = j\beta = j\omega\sqrt{L_0 C_0}$$

и собирается схема электрической цепи (рисунок 10), в которой будет проводиться исследование. Оно будет проводиться для 3 режимов нагрузки линии: холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки.

Перед началом проведения исследования **режима холостого хода** следует убедиться, что теоретически рассчитанная частота f_r^{pac} соответствует частоте, при которой в данной искусственной линии укладывается целая длина волны колебания, вырабатываемого генератором. Несовпадение рассчитанного f_r^{pac} и действительных значений этой частоты $f_r^{\text{д}}$ возможно из-за несовпадения номиналов элементов исследуемой цепи, указанных на маркировках с действительными значениями. Связано это с тем, что все элементы электрической цепи изготавливаются с определенным классом точности, а с течением времени происходит старение элементов, изменяются условия их эксплуатации и существуют другие причины.

Для определения действительного значения частоты $f_r^{\text{д}}$ необходимо в собранной схеме (рисунок 10) установить режим холостого хода, т.е. разомкнуть выходные зажимы линии. Затем потенциальный зажим милливольтметра V_2 искусственной линии включить в клемму 4. Так как искусственная линия имеет 16 клемм, то клемма 4 будет соответствовать длине $\lambda/4$, если в линии уложится целая длина λ .

Изменяя частоту генератора около $f_{\Gamma}^{\text{рас}}$, находим частоту $f_{\Gamma}^{\text{д}}$, при которой напряжение в точке $\lambda/4$ будет минимальным. Напряжение в этих точках будет минимальным, но не равным нулю. Это связано с тем, что искусственная линия не является идеальной. Ее элементы: индуктивность и емкость имеют определенные активные сопротивления и в них будут потери энергии.

После получения минимального значения напряжения в клемме 4 значение найденной действительной частоты $f_{\Gamma}^{\text{д}}$ заносят в таблицу 1 и измеряют милливольтметром V_2 напряжения во всех точках искусственной линии. Полученные результаты записываются в соответствующий столбец таблицы 1. В первом столбце этой таблицы указаны номера всех клемм, где проводятся замеры напряжения.

При исследовании **режима короткого замыкания** на выходе линии необходимо:

- собрать схему цепи, приведенную на рисунке 11,
- снизить напряжение на генераторе до минимума,
- закоротить выходные зажимы линии,
- повысить выходное напряжение генератора до значения, при котором напряжение в клемме 4, станет равным значению, которое подавалось с генератора при исследовании режима холостого хода (3В). В режиме короткого замыкания в клемме 4 будет пучность напряжения и напряжение в ней должно быть максимальным:

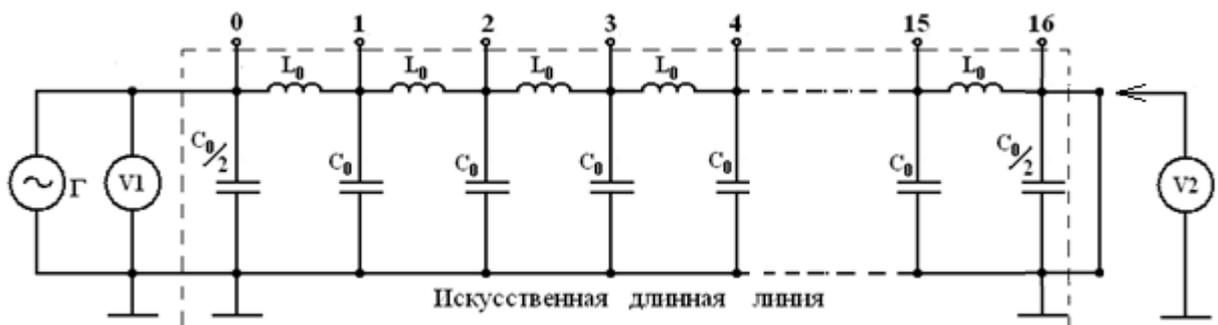


Рисунок 11. Схема исследования искусственной линии при коротком замыкании на выходе линии.

Значение 3В устанавливается для того, чтобы результаты, полученные при исследовании всех режимов, были бы сопоставимыми. Далее производятся замеры напряжения во всех остальных точках линии. Полученные результаты заносятся в соответствующий столбец таблицы 1.

В *режиме согласованной нагрузки* измерения проводятся также как и при режиме холостого хода, только на выходе линии подключается сопротивление нагрузки, равное волновому сопротивлению линии (рисунок 12):

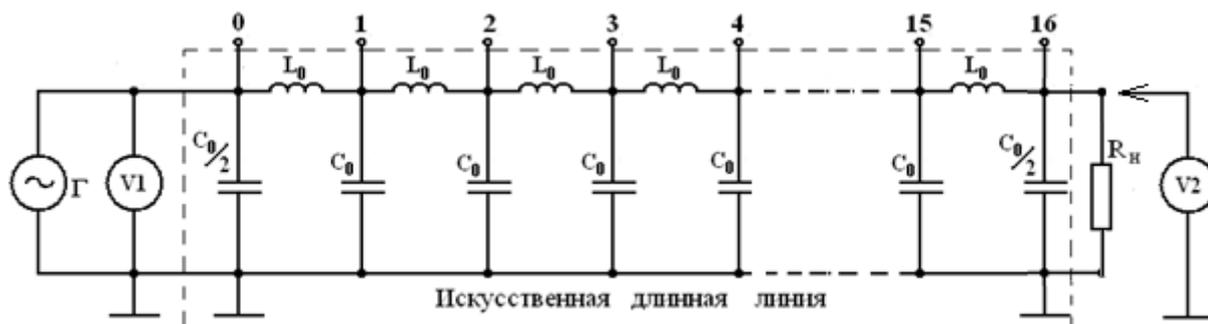


Рисунок 12. Схема исследования искусственной линии при согласованной нагрузке.

5. Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется студентом в составе бригады, состоящей из 2-3 человек. Перед началом проведения занятия ведущий преподаватель путем тестирования определяет готовность каждого студента группы к выполнению лабораторной работы. После проверки готовности всех студентов бригада допускается на рабочее место и приступает к выполнению лабораторной работы.

Рассмотрим порядок выполнения лабораторной работы при следующих исходных данных:

$$L_0 = 390 \text{ мкГн}, \quad C_0 = 4700 \text{ пФ}, \quad n = 16, \quad U_1 = 3 \text{ В}$$

1. По заданным исходным данным рассчитаем частоту генератора, при которой в линии укладывается одна длина волны входного напряжения:

$$f_{\text{рас}} = \frac{1}{n \sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{16 \cdot \sqrt{390 \cdot 10^{-6} \cdot 4700 \cdot 10^{-12}}} = 46,17 \cdot 10^3 \text{ Гц},$$

где L_0 и C_0 – первичные параметры линии

n – число звеньев в искусственной линии,

а также вторичные параметры искусственной линии с малыми потерями:

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{390 \cdot 10^{-6}}{4700 \cdot 10^{-12}}} = 288 \text{ Ом}$$

$$\gamma = j\beta = j\omega \sqrt{L_0 C_0} = j\omega \sqrt{390 \cdot 10^{-6} \cdot 4700 \cdot 10^{-12}} = j1,35 \cdot 10^{-6} \omega \text{ км}^{-1}$$

2. На стенде лабораторной учебной установки ТЭЦ собираем схему цепи для исследования распределения напряжения вдоль линии в *режиме холостого хода* (рисунок 13):

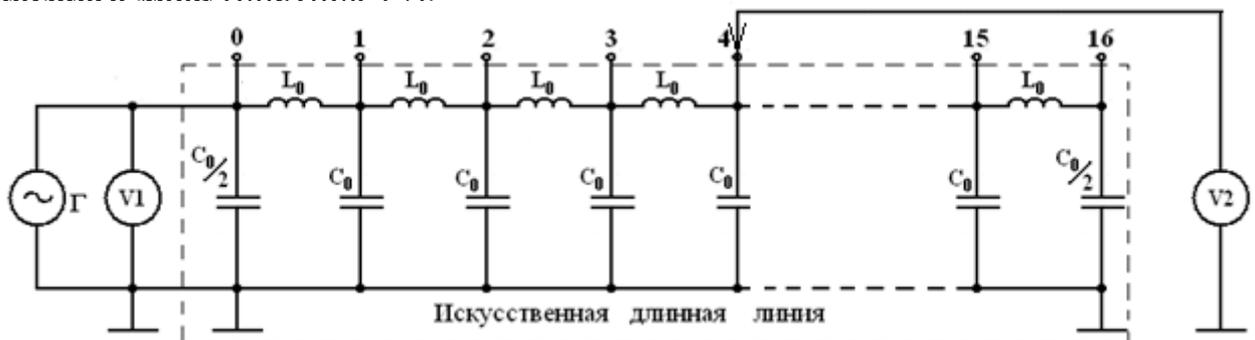


Рисунок 13. Схема исследования длинной линии при холостом ходе на выходе линии

3. Подготовим схему цепи для исследования режима холостого хода на выходе линии. Для этого разомкнем выходной конец линии. Далее потенциальный конец вольтметра V_1 включим на вход линии (клемма 0) и установим на входе линии с помощью генератора напряжение, равное 3В. Затем потенциальный конец вольтметра V_2 включим в клемму 4 и, регулируя частоту генератора около рассчитанной частоты $f_{г\text{pac}}$, добиваемся минимального показания вольтметра V_2 . При этом на генераторе будет указано действительное значение частоты $f_{г\text{д}}$, а в линии уложится одна длина волны входного напряжения. Включая потенциальный конец вольтметра V_2 в соответствующие клеммы макета длинной линии, измерим напряжение во всех 16 точках линии. Полученные значения частоты $f_{г\text{д}}$ и напряжений во всех точках линии заносим в соответствующий столбец таблицы 1:

Таблица 1 - Результаты исследования распределения напряжения вдоль искусственной линии при различных режимах ее работы

Номера клемм искусственной линии	Напряжение, измеренное в различных режимах работы линии		
	режим холостого хода, В	режим согласованной нагрузки, В	режим короткого замыкания, В
0	3	3	1.4
1	2.95	2.8	0.8
2	2.45	2.6	1.6
3	1.45	2.5	2.5
4	0.57	2.6	3.0
5	1.2	2.75	3.1
6	2.1	2.8	2.7
7	2.8	2.75	1.8
8	3.0	2.6	0.65
9	2.7	2.4	0.9
10	1.95	2.25	2.0
11	0.85	2.3	2.7
12	0.42	2.4	3.0

13	1,5	2,5	2.9
14	2.4	2.55	2.3
15	2.9	2.45	0.8
16	2.95	2.2	0

По полученным действующим значениям напряжения во всех точках линии построим график распределения значений этих напряжений вдоль линии в режиме холостого хода (рисунок 14):

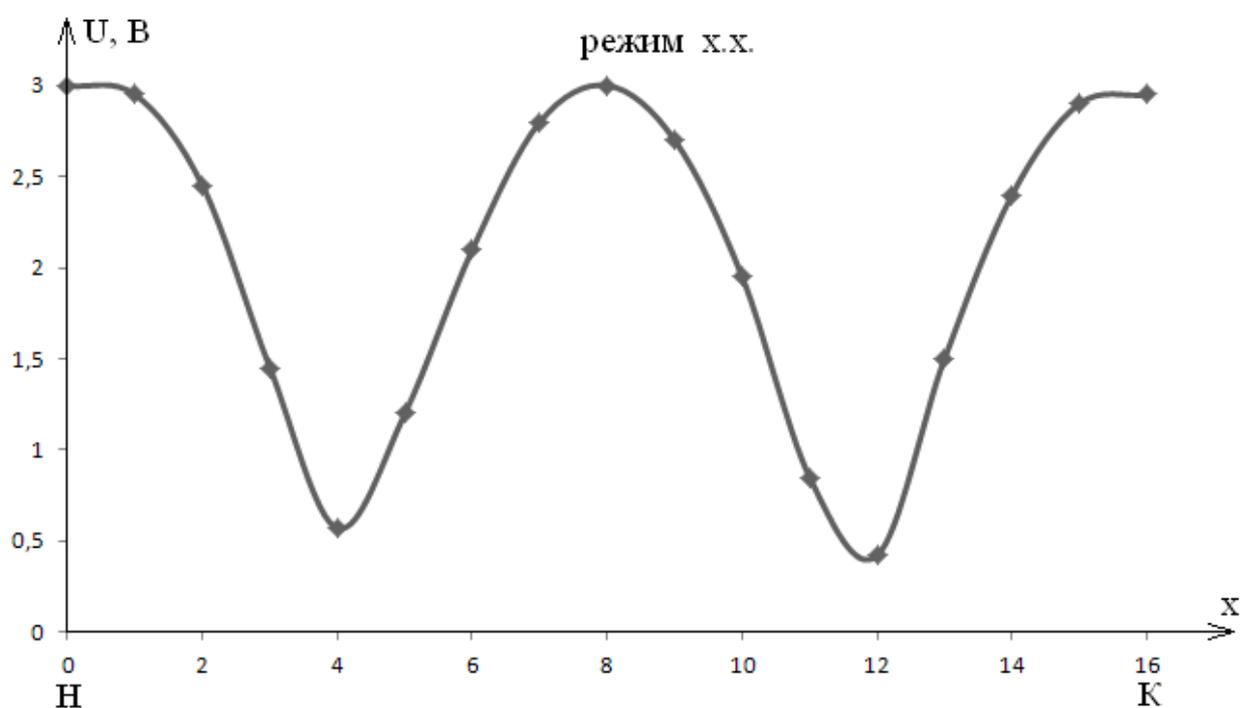


Рисунок 14. Распределение действующих значений напряжения вдоль искусственной длинной линии в режиме холостого хода.

4. Определим распределение напряжения вдоль линии при *согласованной нагрузке*.

Для этого на выход линии подключим переменный резистор R_n и установим на нем сопротивление равное волновому сопротивлению линии. Напряжение на входе линии и частота генератора не меняются. Необходимо измерить напряжение во всех точках линии с помощью вольтметра V_2 , а полученные значения напряжений занести в соответствующий столбец таблицы 1.

График распределения действующих значений напряжения вдоль линии при согласованной нагрузке линии приведен на рисунке 15:

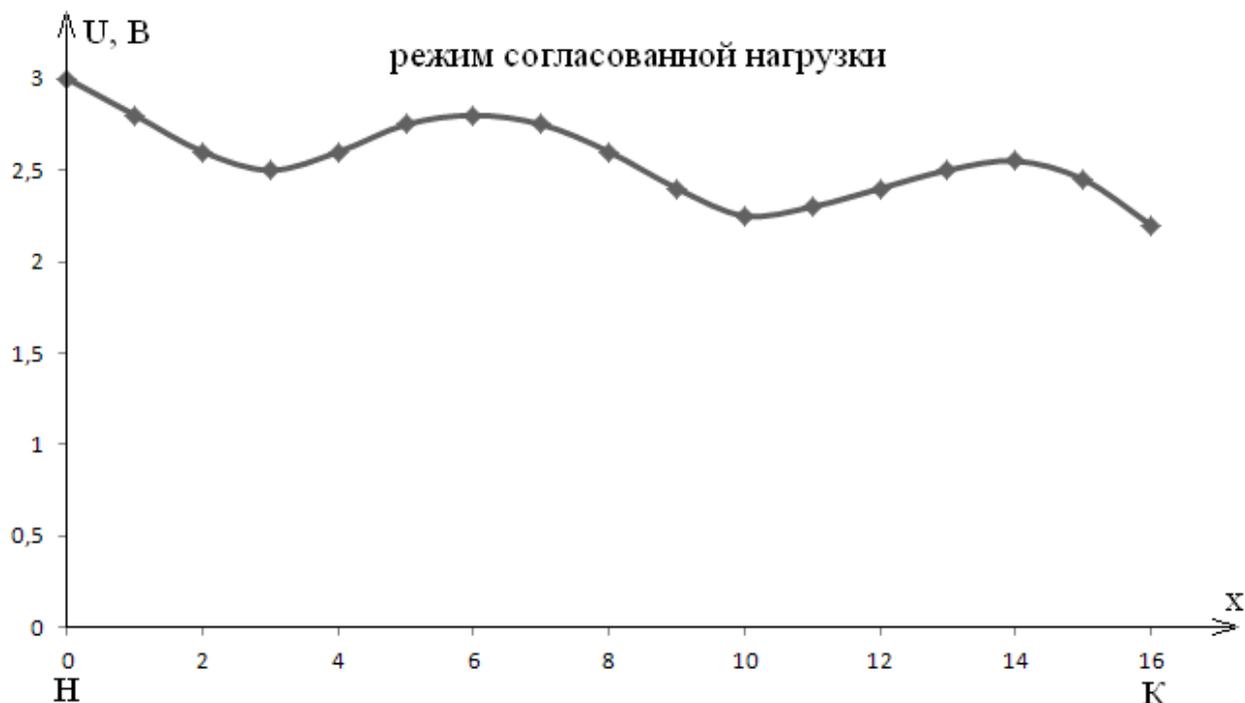


Рисунок 15. Распределение действующих значений напряжения вдоль искусственной длинной линии в режиме согласованной нагрузки.

Осциллограммы входного напряжения и напряжения в точках линии, отстоящих от начала линии на расстоянии $\lambda/4$, $\lambda/2$, $3\lambda/4$ и λ при согласованной нагрузке, снятые с помощью двухлучевого осциллографа, приведены на рисунках 16, 17, 18, 19:

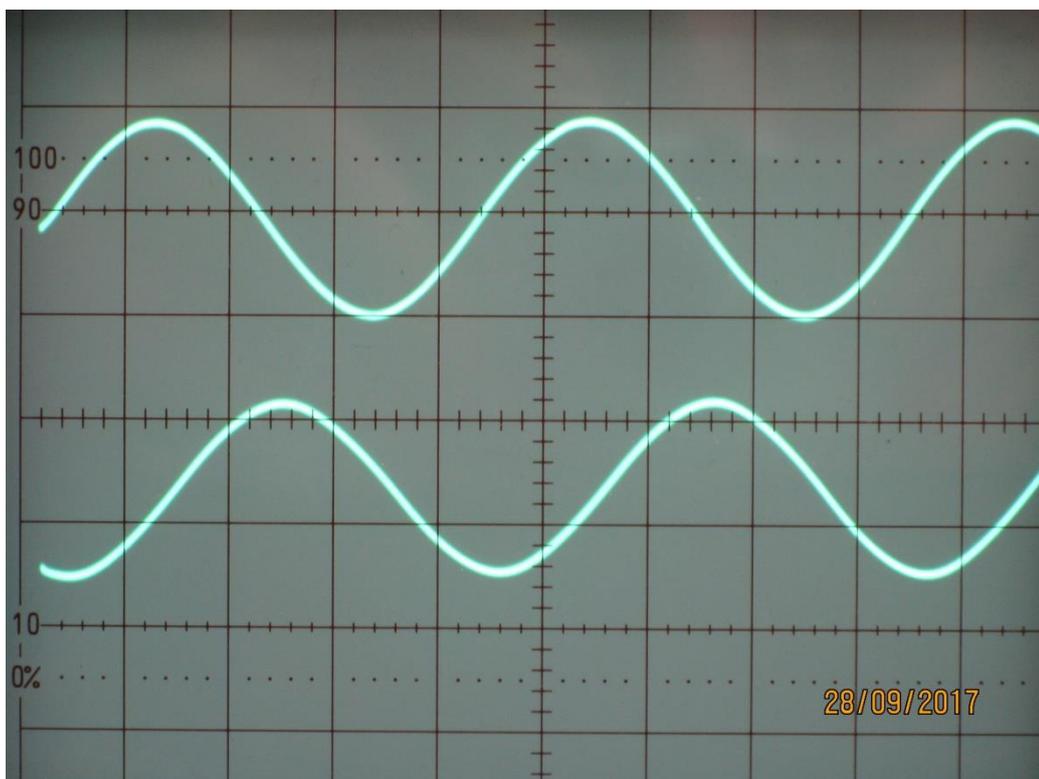


Рисунок 16. Распределение мгновенных значений напряжения в начале линии и в точке, соответствующей расстоянию от начала линии, равному $\lambda/4$.

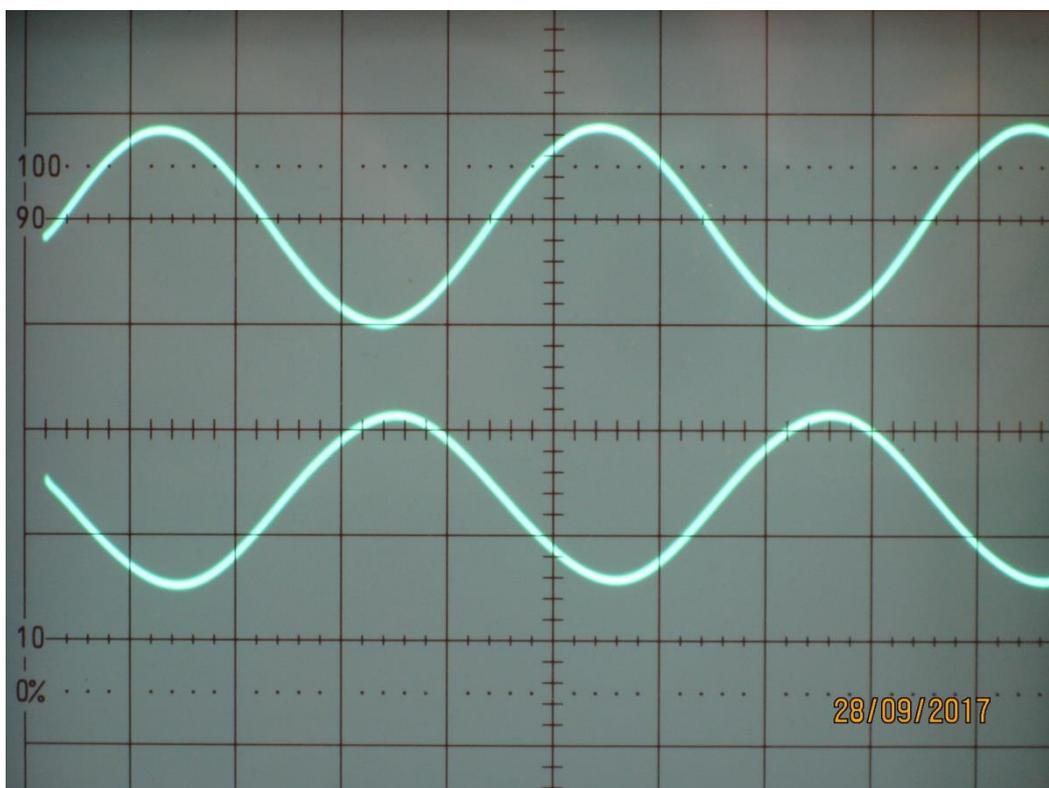


Рисунок 17. Распределение мгновенных значений напряжения в начале линии и в точке, соответствующей расстоянию от начала линии, равному $\lambda/2$.

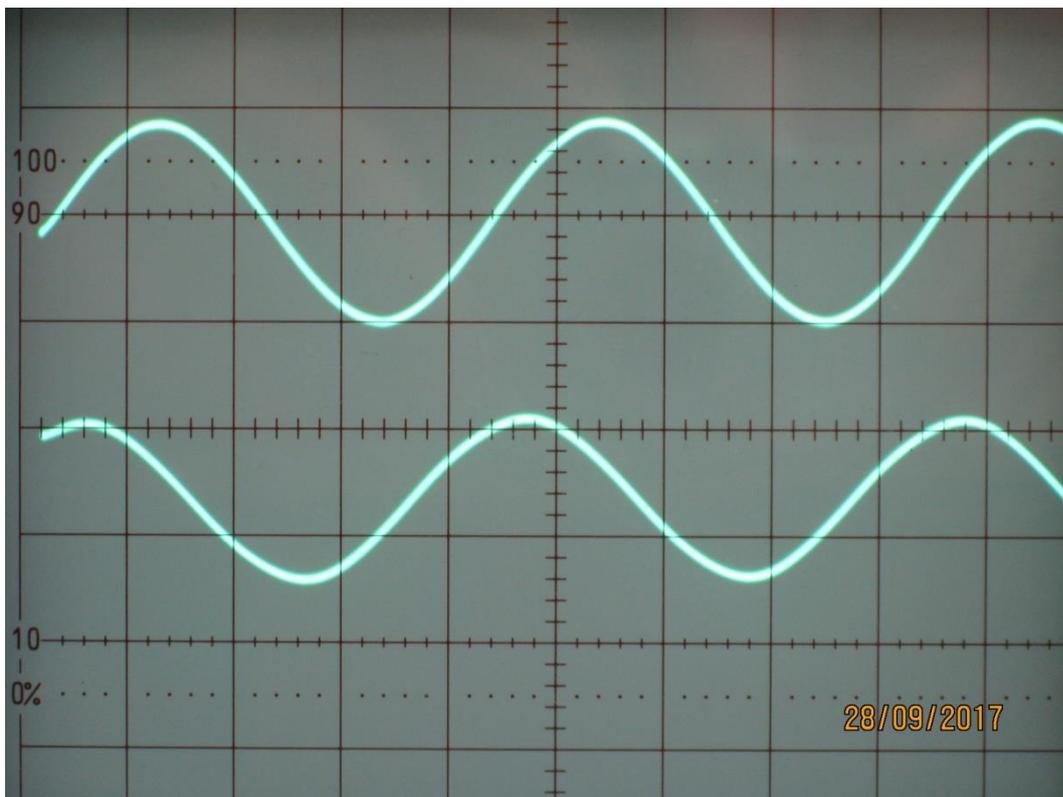


Рисунок 18. Распределение мгновенных значений напряжения в начале линии и в точке, соответствующей расстоянию от начала линии, равному $3\lambda/4$.

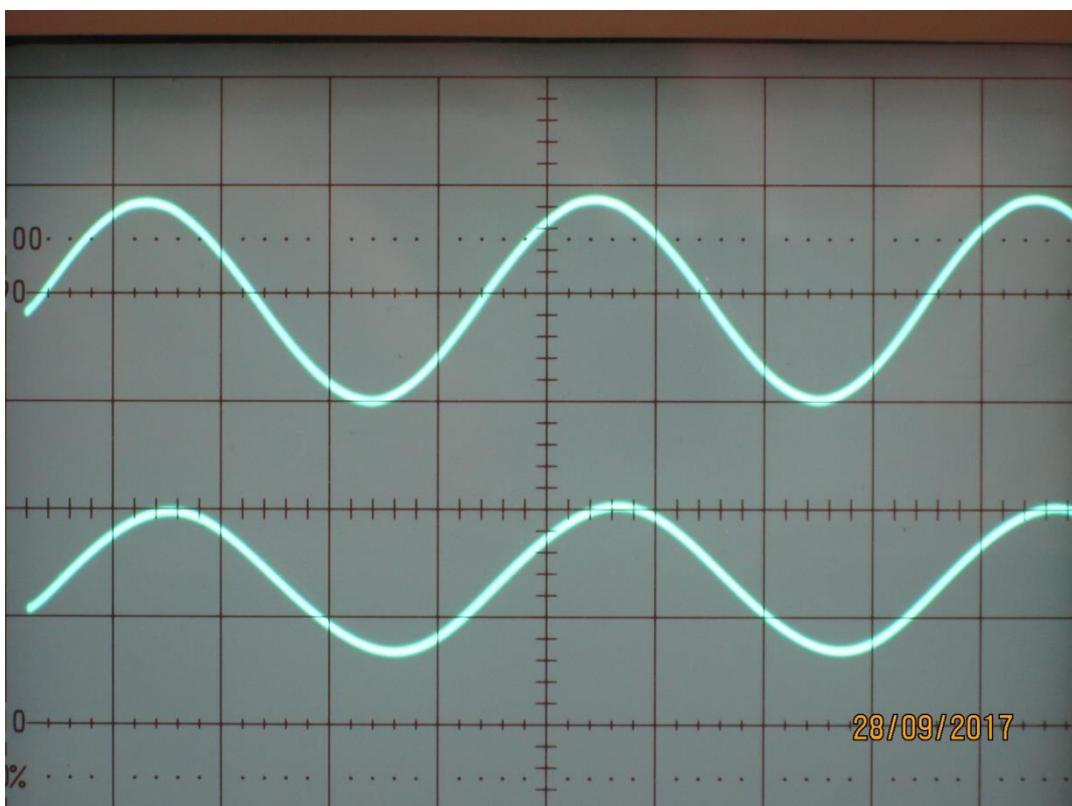


Рисунок 19. Распределение мгновенных значений напряжения в начале линии и в точке, соответствующей расстоянию от начала линии, равному λ .

На каждом рисунке приведены по две осциллограммы. На верхней из них всегда представлена осциллограмма напряжения на входе линии. На нижней осциллограмме показаны напряжения в точках линии, смещенных вперед на расстояние $\lambda/4$. Из приведенных осциллограмм, видно, как фаза входного напряжения при перемещении его от начала к концу линии увеличивается на $\pi/2$ в каждой последующей точке линии. В конце линии, когда $x=\lambda$, фаза колебания увеличивается на 2π и совпадает с фазой колебания в начале линии, т.е. завершается полный период изменения напряжения в линии.

Так как сопротивление линии в данном режиме будет чисто активным, то фазы напряжения и тока в каждой точке линии будут совпадать $\varphi_u = \varphi_i$, и, следовательно, передаваемая по линии активная мощность будет максимальной:

$$P = UI \cos \varphi,$$

$$\cos \varphi = \cos (\varphi_u - \varphi_i) = \cos 0 = 1, \quad (64)$$

$$P = UI$$

5. Определим распределение напряжения вдоль линии при **коротком замыкании** выходных зажимов линии.

Для этого необходимо уменьшить напряжение на выходе генератора до нуля и замкнуть выходные зажимы линии. Потенциальный конец вольтметра V_2 включить в клемму 4 и, регулируя напряжение на выходе генератора, установить в точке 4 напряжение, равное 3В. Далее, не меняя частоту генератора и установленное напряжение, измерить напряжения во всех точках линии. Полученные данные занести в соответствующий столбец таблицы 1. График распределения напряжения вдоль линии при коротком замыкании выходных зажимов линии приведен на рисунке 20:

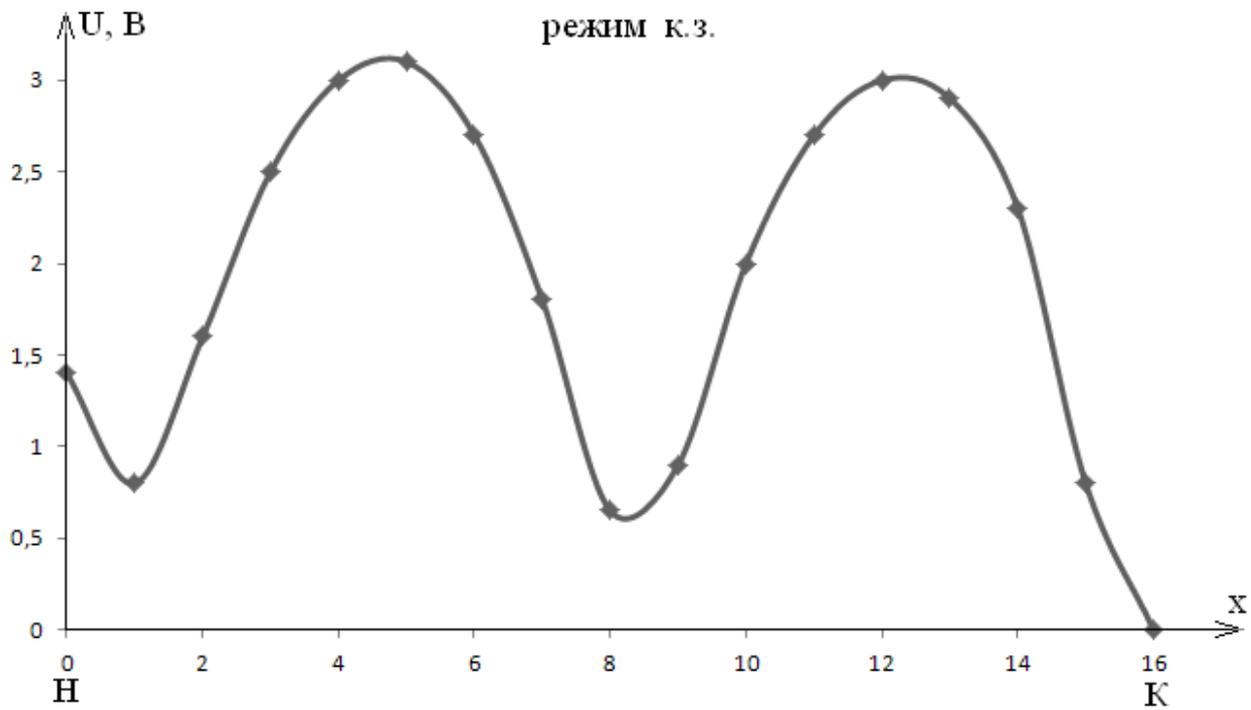


Рисунок 20. Распределение действующих значений напряжения вдоль искусственной линии в режиме короткого замыкания на выходе линии.

6. Анализ результатов проведенных исследований

В результате проведенных исследований было экспериментально подтверждено, что в цепи с распределенными параметрами при подаче на ее вход синусоидального напряжения возникает падающая, а при определенных условиях и отраженная волна напряжения.

В зависимости от значения нагрузки на выходе линии в ней наблюдаются следующие режимы работы: режим холостого хода, режим короткого замыкания, режим согласованной нагрузки. Были рассмотрены и исследованы все эти режимы работы в искусственной длинной линии с малыми потерями.

Подробно исследован режим стоячей волны. Визуально подтверждено образование стоячих волн в линии при холостом ходе и коротком замыкании, когда происходило полное отражение падающей волны от конца линии.

Экспериментально подтверждены теоретически установленные законы распределения напряжения вдоль такой линии в режиме стоячей волны при холостом ходе и коротком замыкании. Сняты графики распределения напряжения вдоль линии в этих режимах.

Исследован режим бегущей волны. Подтверждено отсутствие в линии отраженной волны при согласованной нагрузке. Показано также, что в этом режиме волновое сопротивление линии становится чисто активным, так как отсутствует сдвиг фаз между напряжением и током по всей длине линии.

Неполное совпадение при различных режимах работы линии ее амплитудно-частотных характеристик, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально, объясняется наличием определенных потерь в линии и погрешностью показаний отдельных измерительных приборов, имеющих определенный класс точности.

7. Контрольные вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы

1. Какой формы испытательный сигнал используется в данной работе?
2. Какие приборы используются при проведении лабораторной работы?
3. Как определяется частота, используемая при проведении исследования?
4. Какие электрические цепи считаются цепями с распределенными параметрами?
5. Что такое однородная длинная линия?
6. Какие уравнения используются для описания режима работы цепей с распределенными параметрами?
7. Дайте определение длинной линии.
8. Какие линии считаются линиями без потерь?
9. Чем отличается схема замещения линии с потерями от схемы замещения линии без потерь?
10. Какие характерные режимы используются при исследовании длинных линий?
11. Какие волны возникают в длинной линии при подаче на ее вход синусоидального напряжения?
12. Дайте определения длины волны, возникающей в линии?
13. Что такое фазовая скорость?
14. Что такое коэффициент отражения волны от начала и от конца линии?
15. В каких пределах может меняться коэффициент отражения волны?
16. Чем отличается коэффициент отражения волны напряжения и тока?

17. Какой режим работы линии называется согласованным, в чем его особенность?

18. Дайте определение коэффициентов бегущей и стоячей волны.

8. Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1. Какие параметры линии являются первичными и сколько их?

2. Какие параметры линии называются волновыми и почему?

3. Чем отличаются вторичные параметры у линии с потерями и у линии без потерь?

5. Что такое волновое сопротивление?

6. Какой физический смысл коэффициента распространения электромагнитной волны вдоль линии?

7. Запишите выражение коэффициента распространения для линии с потерями и без потерь.

8. Запишите телеграфные уравнения линии для определения тока и напряжения в линии в точке, отстоящей на определенном расстоянии от конца линии.

9. С какой скоростью распространяется электромагнитная волна вдоль линии?

10. Запишите формулу для расчета длины волны в линии.

11. Запишите формулу для расчета фазовой скорости волны в линии.

12. Дайте определение фазовой скорости волны в линии.

13. Как определить частоту электромагнитного колебания, при которой в искусственной длинной линии уложится целая длина волны.

14. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения (тока) вдоль линии, разомкнутой на конце.

15. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения (тока) вдоль линии, замкнутой на конце.

16. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения вдоль линии с согласованной нагрузкой.

17. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения вдоль линии при не согласованной нагрузке.

18. В каком режиме по линии передается активная мощность?

19. В каком режиме по линии не передается активная мощность и почему?

9. Список использованной литературы

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теория цепей: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. – 596 с.
2. Витков М.Г., Смирнов Н.И. Основы теории цепей. Лабораторный практикум: Учебное пособие для вузов - М.: Радио и связь, 2001. – 224 с.
3. Учебная лабораторная установка «Теория линейных электрических цепей» СПб государственного университета телекоммуникаций, 2012. – 11 с.
4. Бакалов В.П., Журавлева О.Б., Крук Б.И. Основы анализа цепей: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2014. – 392с.
5. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1990. - 544 с.