

Работа I. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы – экспериментальное исследование распределения напряжений вдоль линии передачи при различных сопротивлениях нагрузки; изучение способа согласования с помощью подвижного шлейфа; получение навыков расчета волнового сопротивления двухпроводной линии передачи, коэффициента бегущей волны и согласующего устройства по заданным параметрам и экспериментальным данным.

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- изучить теоретический материал и проверить знания по контрольным вопросам, имеющимся в конце описания лабораторной работы, либо по контрольным картам. Минимально необходимый для выполнения лабораторной работы материал по теории линий передачи изложен ниже. Более полно этот материал излагается в лекциях по курсу "Антенны и устройства СВЧ" [1]. Помимо лекций этот материал имеется в [2, § 1.1...1.5, 1.7, 1.9, 1.11, 1.14...1.16, с. 709–715]. Целесообразно также ознакомиться с расчетом входного сопротивления линии передачи с помощью круговой диаграммы, описание которой имеется в конце данного пособия;

- ознакомиться с описанием лабораторной установки, предстоящими измерениями и требованиями к оформлению отчета. После этого необходимо подготовить будущий отчет с записью этапов работы и необходимых пояснений;

- выполнить расчетное задание и записать его в отчете с приведением расчетных формул, а также промежуточных результатов с внесенными цифровыми данными и окончательных данных.

Основы теории линии передачи

Линия передачи – это устройство, ограничивающее область распространения электромагнитных колебаний и направляющее поток электромагнитной энергии в заданном направлении. В то же время линия передачи должна иметь по возможности большой коэффициент полезного действия и пропускать необходимую мощность.

Наиболее простой и наиболее ранней по времени возникновения является двухпроводная линия передачи. Для устранения эффекта излучения провода этой линии располагают друг от друга на расстоянии много меньшем длины волны, благодаря чему излучение от противоположно направленных токов в противостоящих отрезках проводов в любых направлениях компенсируется. Эта линия широко используется для питания радиоустройств с симметричным входом – в первую очередь антенн средних и высоких частот. Помимо этого, в двухпроводной линии наглядно отображается физическая сущность процессов передачи электромагнитной энергии в нагрузку в более сложных линиях передачи – коаксиальных, волноводных (как металлических, так и диэлектрических), полосковых и других регулярных линиях передачи.

К регулярным линиям передачи относятся линии с неизменными поперечным сечением и электромагнитными свойствами заполняющих сред на всем их протяжении. В таких линиях нарушение условий распространения происходит в месте подключения нагрузки либо в том месте, где создается или возникает какая-либо неоднородность.

С определенными допущениями исследуемая двухпроводная линия передачи может рассматриваться в качестве линии, эквивалентной всем регулярным линиям передачи. Двухпроводная линия, как и другие линии с поперечным типом волны, относится к недисперсионным линиям, в которых скорость распространения волны не зависит от частоты. Фазовая скорость волны V_ϕ в двухпроводной линии связана с погонными параметрами – емкостью C_l и индуктивностью L_l – соотношением

$$V_\phi = \frac{1}{\sqrt{L_l C_l}}, \quad (1.1)$$

которое, как и величины C_l , L_l , можно получить на основе уравнений электродинамики.

Поэтому, когда двухпроводную линию рассматривают в качестве аналога дисперсионных линий, то считают, что погонные параметры L_l , C_l зависят от частоты.

В двухпроводной линии передачи — реальной или эквивалентной — режим работы исследуют на основе анализа распределения вдоль нее напряжения и тока. В этом случае в качестве исходных величин берутся погонные параметры линии g_1 и C_1 , r_1 и L_1 (соответственно активная проводимость и емкость между проводами отрезка линии длиной в один метр, активное сопротивление и индуктивность системы обоих проводов этого же отрезка линии) и сопротивление нагрузки $Z_N = R_N + jX_N$. Для решения поставленной задачи используется координатная система с одной продольной осью z с началом в месте подключения нагрузки (рис. I.1, а).

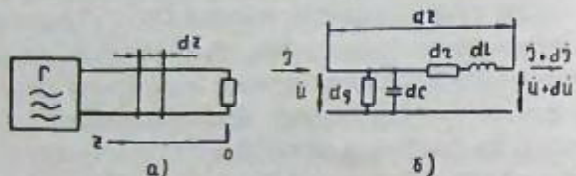


Рис. I.1. К нахождению распределения напряжения и тока вдоль двухпроводной линии передачи:
а — схема включения линии передачи;
б — электрическая схема элементарного участка линии

Приращения напряжения и тока на элементарном отрезке линии длиной dz в соответствии со схемой этого участка (рис. I.1, б) можно записать в виде следующих соотношений:

$$d\dot{U} = (dz + j\omega dL) \cdot \dot{J} = (r_1 + j\omega L_1) \cdot dz \cdot \dot{J} = Z_1 \cdot dz \cdot \dot{J};$$

$$d\dot{J} = (dg + j\omega dC) \cdot \dot{U} = (g_1 + j\omega C_1) \cdot dz \cdot \dot{U} = Y_1 \cdot dz \cdot \dot{U},$$

где $dr = r_1 \cdot dz$; $dL = L_1 \cdot dz$; $dg = g_1 \cdot dz$; $dC = C_1 \cdot dz$; Z_1 и Y_1 — комплексные погонные сопротивление и проводимость; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота.

Приращения напряжения и тока на единицу длины линии будут соответственно

$$\frac{d\dot{U}}{dz} = Z_1 \cdot \dot{J}, \quad \frac{d\dot{J}}{dz} = Y_1 \cdot \dot{U}, \quad (I.3)$$

т.е. получается система из двух дифференциальных уравнений с двумя неизвестными \dot{U} и \dot{J} . Для получения двух уравнений, в каждом из которых будет только по одному неизвестному, необходимо полученные уравнения продифференцировать по z и заменить сомножители. Используя исходные соотношения, получим

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dz^2} = Z_1 \cdot \frac{d\dot{J}}{dz} = Z_1 \cdot Y_1 \cdot \dot{U}, \quad \frac{d^2 \dot{J}}{dz^2} = Y_1 \cdot \frac{d\dot{U}}{dz} = Y_1 \cdot Z_1 \cdot \dot{J}.$$

Обозначая в полученных соотношениях произведение комплексных погонных параметров $Z_1 \cdot Y_1$ через γ^2 , получаем однотипные дифференциальные уравнения второго порядка для нахождения искомого напряжения и тока

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dz^2} - \gamma^2 \dot{U} = 0, \quad \frac{d^2 \dot{J}}{dz^2} - \gamma^2 \dot{J} = 0. \quad (I.4)$$

Данные уравнения являются одномерными волновыми уравнениями для скалярных комплексных амплитуд \dot{U} и \dot{J} . Решениями этих уравнений будут следующие выражения для напряжения и тока:

$$\dot{U} = \dot{U}_n \cdot e^{\gamma z} + \dot{U}_o \cdot e^{-\gamma z}, \quad \dot{J} = \dot{J}_n \cdot e^{\gamma z} + \dot{J}_o \cdot e^{-\gamma z}, \quad (I.5)$$

где первое слагаемое соответствует падающей волне, распространяющейся от генератора к нагрузке, а второе слагаемое — отраженной волне, распространяющейся в обратном направлении; \dot{U}_n и \dot{J}_n , \dot{U}_o и \dot{J}_o — соответственно комплексные амплитуды падающих и отраженных волн напряжения и тока в сечении, где подключается нагрузка. Комплексный коэффициент распространения волны вдоль рассматриваемой линии

$$\gamma = \sqrt{Z_1 \cdot Y_1} = \sqrt{(r_1 + j\omega L_1)(g_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta \quad (I.6)$$

состоит из α — коэффициента затухания, Нп/м и β — фазового коэффициента, рад/м. В используемых линиях передачи $\alpha \ll \beta$, поэтому заметного влияния на распределение напряжения на отрезке линии в пределах нескольких длин волн он не оказывает.

В реальных линиях с воздушным заполнением коэффициент затухания обуславливается потерями только в металле проводников. В этом случае в (I.6) $g_1 = 0$, $r_1 \ll \omega L_1$ и, как можно убедиться,

$$\alpha \approx \frac{r_1}{2\sqrt{L_1/C_1}} = \frac{r_1}{2 \cdot \rho}, \quad \beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}, \quad (I.7)$$

где $\rho = \sqrt{L_1/C_1} \approx \sqrt{Z_1/Y_1}$ — волновое сопротивление линии передачи.

Пренебрегая потерями ($\alpha = 0$), соотношения (I.5) можно записать как

$$\dot{U} = \dot{U}_n \cdot e^{j\beta z} + \dot{U}_o \cdot e^{-j\beta z}; \quad \dot{J} = \dot{J}_n \cdot e^{j\beta z} + \dot{J}_o \cdot e^{-j\beta z}. \quad (I.8)$$

Если в функции $\exp(\pm j\beta z) = \cos \beta z \pm j \sin \beta z$ аргумент получит приращение на $\pm j2\pi$ за счет изменения координаты z , то значение функции станет точно таким же, но для этого координата должна измениться на длину волны в линии передачи. т.е. $\Delta z = \lambda_s$. Следовательно, поскольку $\beta \Delta z = \beta \cdot \lambda_s = 2\pi$, то

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_s}. \quad (I.9)$$

Запишем теперь выражение для напряжения в виде, более удобном для анализа его зависимости от координаты z :

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_n e^{j\beta z} + \dot{U}_o e^{-j\beta z} = \dot{U}_n \cdot e^{j\beta z} \left(1 + \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_n} e^{-j2\beta z}\right) = \\ &= \dot{U}_n \cdot e^{j\beta z} (1 + \dot{\Gamma}_n e^{-j2\beta z}) = \dot{U}_n \cdot e^{j\beta z} (1 + \dot{\Gamma}),\end{aligned}\quad (1.10)$$

где $\dot{\Gamma}_n = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_n}$ — коэффициент отражения от нагрузки;

$\dot{\Gamma} = \dot{\Gamma}_n \cdot e^{-j2\beta z}$ — коэффициент отражения в линии на расстоянии z от нагрузки.

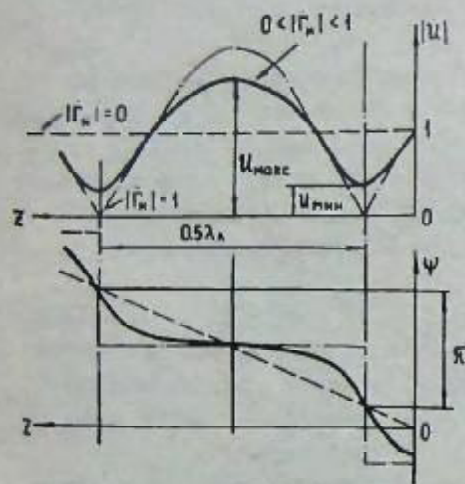


Рис. 1.2. Распределение амплитуды напряжения и его фазы вдоль линии передачи при наличии падающей и отраженной волн

режим работы линии удобно характеризовать коэффициентом бегущей волны

$$K_{БВ} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|}, \quad (1.11)$$

либо коэффициентом стоячей волны $K_{СВ} = I/K_{БВ}$.

Ток в линии передачи, как следует из исходных дифференциальных уравнений (1.3), связан с напряжением в линии и ее погонными параметрами; связь с напряжением в последующих уравнениях потеряно. Восстановить зависимость тока от напряжения в линии можно путем подстановки уравнения (1.5) во второе уравнение (1.3):

$$\dot{J}_n e^{\gamma z} - \gamma \cdot \dot{J}_o e^{-\gamma z} = Y_1 \cdot \dot{U}_n e^{\gamma z} + Y_1 \cdot \dot{U}_o e^{-\gamma z},$$

С учетом этого тождества в форме падающих и отраженных волн имеем следующие уравнения для напряжения и тока:

$$\dot{U} = \dot{U}_n \cdot e^{\gamma z} + \dot{U}_o \cdot e^{-\gamma z}, \quad \dot{J} = \frac{\dot{U}_n}{\rho} e^{\gamma z} - \frac{\dot{U}_o}{\rho} e^{-\gamma z}. \quad (1.12)$$

Напряжение \dot{U} и ток \dot{J} в произвольном сечении линии обычно "привязывают" к напряжению \dot{U}_n и току \dot{J}_n "на нагрузке", т.е. к напряжению и току при $z = 0$, где в рассматриваемой задаче подключается известное сопротивление нагрузки. Учитывая, что $0,5(e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) = \text{ch } \gamma z$ и $0,5(e^{\gamma z} - e^{-\gamma z}) = \text{sh } \gamma z$, получаем наиболее удобные формулы для определения напряжения и тока в произвольном сечении z регулярной линии передачи:

$$\dot{U} = \dot{U}_n \text{ch } \gamma z + \rho \dot{J}_n \text{sh } \gamma z, \quad (1.13)$$

$$\dot{J} = \dot{J}_n \text{ch } \gamma z + \frac{\dot{U}_n}{\rho} \text{sh } \gamma z. \quad (1.14)$$

При пренебрежении потерями в линии ($\alpha = 0$) эти уравнения можно написать с использованием тригонометрических функций:

$$\dot{U} = \dot{U}_n \cos \beta z + j\rho \dot{J}_n \sin \beta z, \quad (1.15)$$

$$\dot{J} = \dot{J}_n \cos \beta z + j \frac{\dot{U}_n}{\rho} \sin \beta z. \quad (1.16)$$

Помимо распределения напряжения и тока вдоль линии, как правило, необходимо знать и входное сопротивление линии передачи в ее любом сечении

$$Z_{ВХ}(z) = \frac{\dot{U}(z)}{\dot{J}(z)}. \quad (1.17)$$

При этом участок линии от рассматриваемого сечения в сторону генератора как бы отбрасывается, а входное сопротивление линии определяется в соответствующем сечении "глядя в сторону нагрузки".

При разомкнутой линии, т.е. при сопротивлении нагрузки, равном бесконечности, $\dot{J}_n = 0$, $\dot{U}_n = U_{\max}$, выражения для напряжения, тока и входного сопротивления будут иметь следующий вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_{\max} \cos \beta z, \quad \dot{J} = j \frac{U_{\max}}{\rho} \sin \beta z = j \dot{J}_n \sin \beta z, \quad Z_{ВХ} = -j \rho \cot \beta z. \quad (1.18)$$

На рис. 1.3 приведены графики распределения в соответствии друг с другом напряжения, тока и входного сопротивления. Из графика следует, что входное сопротивление $Z_{ВХ}$ разомкнутой линии на первом участке длиной $\lambda_n/4$ имеет емкостный характер, на следующем участке — индуктивный, затем опять емкостный и т.д. В области минимума напряжения изменение входного сопротивления аналогично изменению сопротивления контура без потерь при после-

довательном резонансе, а в области максимума напряжения – при параллельном резонансе.

Помимо этого, зная, что входное сопротивление линии переключи в любом произвольном сечении является сопротивлением нагрузки для остальной части линии (от данного сечения до генератора), можно составить представление или вывести формулы для распределения напряжения, тока и входного сопротивления вдоль линии передачи, нагруженной на любое реактивное сопротивление. Так, начиная от сечения z_1 ($0,25\lambda_n > z_1 > 0$) изменения \dot{U} , \dot{I} и $Z_{вх}$ характерны для линии, нагруженной на емкость, от сечения z_2 – для короткозамкнутой линии, а от сечения z_3 ($0,5\lambda_n > z_3 > 0,25\lambda_n$) – для линии передачи, нагруженной на индуктивность.

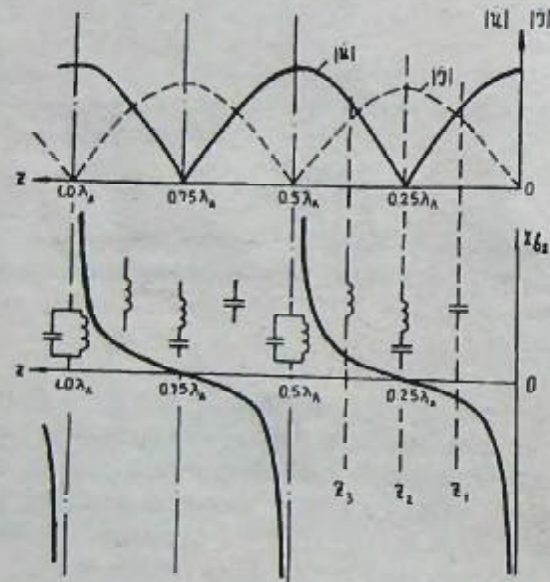


Рис. 1.3. Графики распределения напряжения, тока и входного сопротивления вдоль разомкнутой линии передачи

При подключении к линии передачи "чисто" активного сопротивления нагрузки R_n с учетом соотношения $\dot{I}_n = \frac{\dot{U}_n}{R_n}$ можно получить следующие выражения для напряжения, тока и входного сопротивления линии:

$$\dot{U} = \dot{U}_n \cos \beta z + j \rho \frac{\dot{U}_n}{R_n} \sin \beta z; \quad |\dot{U}| = |\dot{U}_n| \sqrt{\cos^2 \beta z + \left(\frac{\rho}{R_n}\right)^2 \sin^2 \beta z}, \quad (1.19)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_n}{R_n} \cos \beta z + j \frac{\dot{U}_n}{\rho} \sin \beta z, \quad (1.20)$$

$$Z_{вх} = \rho \frac{1 + j \frac{\rho}{R_n} \operatorname{tg} \beta z}{\frac{\rho}{R_n} + j \operatorname{tg} \beta z}. \quad (1.21)$$

На рис. 1.4 показаны графики распределения напряжения при различных соотношениях сопротивления активной нагрузки R_n и волнового сопротивления линии ρ . Из графиков видно, что при $R_n = \rho$ в линии передачи отсутствует отраженная волна, т.е. в этом случае вся энергия падающей волны поглощается в нагрузке; такая нагрузка называется согласованной с линией. Для линии передачи с волновым сопротивлением ρ согласованной нагрузкой является $Z_n = Z_{\text{сog}} = \rho + j0$, т.е. нагрузка с конкретными значениями активной составляющей ее сопротивления $R_n = \rho$ и реактивной $jX_n = 0$.

На рис. 1.5 показаны в соответствии друг с другом графики распределения напряжения и составляющих входного сопротивления линии передачи для трех значений $K_{св}$. Эти графики позволяют получить представление о входном сопротивлении линии передачи в любом сечении при различных значениях $K_{св}$ и даже при произвольных нагрузках. В последнем случае достаточно вспомнить, что входное сопротивление линии в каком-то сечении является сопротивлением нагрузки для остальной части линии в сторону генератора.

Необходимо отметить, что отрезок линии передачи является трансформатором, коэффициент трансформации которого зависит от длины отрезка, а также от соотношения между его волновым сопротивлением и сопротивлением нагрузки. В частности, коэффициент трансформации отрезка линии длиной $\lambda_n/2$ равен единице, а отрезка линии длиной $\lambda_n/4$ может быть определен из соотношения $Z_{вх}(z) \cdot Z_{вх}(z + \lambda_n/4) = \rho^2$, т.е. произведение входных сопротивлений линии в сечениях, отстоящих на $\lambda_n/4$, равно квадрату ее волнового сопротивления.

Следует также обратить внимание на то, что входное сопротивление согласованной линии равно его волновому сопротивлению. Поэтому с физической точки зрения волновое сопротивление линии передачи – это ее входное сопротивление при отсутствии отраженной волны, например, при очень большой длине линии и коэффициенте затухания, не равном нулю.

В линиях передачи стремятся обеспечить режим бегущей волны, т.е. согласовать линию с нагрузкой и тем самым приблизить $K_{св}$ как можно ближе к единице. В таком режиме работы линии передает боль-

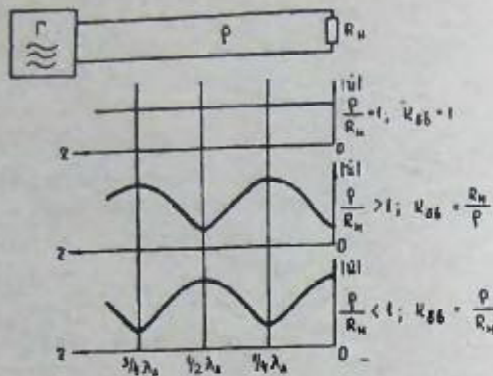


Рис. 1.4. Распределение напряжения вдоль линии передачи при различной величине сопротивления активной нагрузки

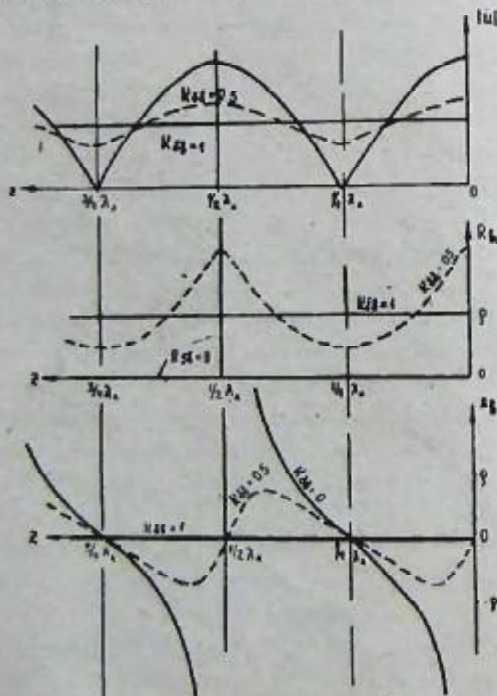


Рис. 1.5. Входное сопротивление линии передачи при различных значениях K_{BV}

шую мощность без опасности пробоя; имеет наибольший коэффициент полезного действия; мало влияет на режим работы генератора, так как зависимость входного сопротивления линии от ее электрической длины незначительна.

Хорошим режимом работы линии передачи считается режим при $K_{BV} \geq 0,7$.

В узкой полосе частот согласование линии достигается включением реактивной согласующей проводимости jb в сечение, отстоящее на расстоянии Δz от минимума напряжения, в котором активная составляющая входной проводимости линии $\frac{1}{Z_{BX}}$ равна волновой проводимости линии $\frac{1}{\rho}$.

Если согласующей проводимостью в этом сечении скомпенсировать реактивную составляющую входной проводимости, то, начиная от рассматриваемого сечения, отраженной волны не будет. При прочих равных условиях согласующую реактивность целесообразно включать в сечение, находящееся ближе к нагрузке; в этом случае большая часть линии будет работать в режиме бегущей волны.

При отсчете координаты z и расстояния Δz от минимума напряжения ("привязка" начала отсчета к сечению с минимальным значением напряжения осуществляется с большей точностью) условие согласования с помощью параллельно включенной реактивной проводимости можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{Z_{BX}(\Delta z)} + jb = \frac{1}{\rho}. \quad (1.22)$$

С учетом выражения (1.21) и того, что при отсчете координаты от минимума напряжения $\frac{\rho}{R_N} = \frac{1}{K_{BV}}$ (см. рис. 1.4) получим

$$\frac{1}{\rho} \frac{1 + jK_{BV}tg\beta\Delta z}{K_{BV} + jtq\beta\Delta z} + jb = \frac{1}{\rho}. \quad (1.23)$$

Избавляясь от минимума в знаменателе, будем иметь

$$\frac{1}{\rho} \frac{K_{BV} - jtq\beta\Delta z + jK_{BV}^2tg\beta\Delta z + K_{BV}tg^2\beta\Delta z}{K_{BV}^2 + tg^2\beta\Delta z} + jb = \frac{1}{\rho}. \quad (1.24)$$

Из равенства действительных частей соотношения (1.24) получим формулу для нахождения места включения реактивной проводимости

$$tg\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta z\right) = \pm \sqrt{K_{BV}}. \quad (1.25)$$

Используя равенство мнимых частей и соотношение (1.25), получим величину согласующей реактивности

$$b = \pm \frac{1}{\rho} \frac{1 - K_{BV}}{\sqrt{K_{BV}}}. \quad (1.26)$$

При согласовании линии передачи с помощью короткозамкнутого шлейфа длиной $l = 0 \dots \lambda_n/4$ его проводимость можно вычислить по формуле

$$b_{ш} = -\frac{1}{\rho_{ш}} \operatorname{ctg} \beta l. \quad (I.27)$$

С учетом соотношения (I.26) можно определить необходимую длину шлейфа:

$$\operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda_n} l = \frac{\rho}{\rho_{ш}} \cdot \frac{\sqrt{K_{БВ}}}{1 - K_{БВ}}. \quad (I.28)$$

Расчетное задание для домашней подготовки

При подготовке к лабораторной работе необходимо заранее выполнить следующие расчеты:

1. Рассчитать волновое сопротивление воздушной двухпроводной линии передачи и шлейфа по формуле

$$\rho = 276 \lg \frac{D}{r} \quad \text{Ом}, \quad (I.29)$$

где D - расстояние между центрами проводов линии или центрами стержней шлейфа (20 мм); r - радиус провода линии (1 мм) или стержня шлейфа (2,5 мм).

2. Рассчитать $K_{БВ}$ в линии передачи и положение минимума напряжения z_{\min} (в долях волны, которая при выполнении лабораторной работы определяется экспериментально и находится в пределах 60...80 см) при подключении к линии комплексного сопротивления, указанная в табл. I.1,

Т а б л и ц а I.1

Вариант	$R_n + jX_n$
1	$240 + j306$
2	$180 + j290$
3	$210 + j290$
4	$277 + j340$
5	$202 + j260$
6	$180 + j280$
7	$148 - j245$
8	$173 - j198$
9	$144 - j173$
10	$162 - j195$

залается отдельно для каждой бригады студентов в зависимости от выполняемого варианта лабораторной работы.

Коэффициент бегущей волны определяется по формуле (I.11), где модуль коэффициента отражения

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{(R_n - \rho)^2 + |X_n|^2}{(R_n + \rho)^2 + |X_n|^2}}, \quad (I.30)$$

здесь ρ - волновое сопротивление линии передачи; R_n и X_n - активная и реактивная составляющие сопротивления нагрузки.

Расстояние от сопротивления нагрузки до минимума напряжения вычисляется по формуле

$$z_{\min} = \left(\frac{\varphi^\circ}{360^\circ} + \frac{1}{4} \right) \lambda, \quad (I.31)$$

где угол φ° находится из соотношения

$$\operatorname{tg} 2\varphi^\circ = \frac{2X_n \cdot \rho}{R_n^2 + X_n^2 - \rho^2}. \quad (I.32)$$

В формулу (I.32) необходимо подставить величину $\pm X_n$, но не $\pm jX_n$. Угол $2\varphi^\circ$ берется со знаком "+" и в таком квадранте, чтобы знак " $\sin 2\varphi^\circ$ " совпадал со знаком числителя, а знак " $\cos 2\varphi^\circ$ " - со знаком знаменателя выражения (I.32) (при несоблюдении этих указаний домашний расчет с вероятностью 0,9 получится с ошибкой).

3. Рассчитать (в долях волны) длину согласующего шлейфа и место его подключения для комплексной нагрузки, указанной выше.

Длина шлейфа до середины закорачивающего мостика находится по формуле (I.28).

Место включения шлейфа $z_{ш}$ при отсчете расстояния от нагрузки определяется как

$$z_{ш} = z_{\min} - \Delta z, \quad (I.33)$$

где величина Δz определяется из соотношения (I.25), причем берется со знаком "+".

Экспериментальная часть^{*}

Описание установки и ее схема.

Двухпроводная линия передачи натянута между привинченной к полу стойкой и стеной (рис. I.6). Для крепления линии на ее обоих концах применены металлические изоляторы - короткозамкнутые отрезки линии передачи длиной $\lambda/4$. Металлический изолятор соединен со стеной двумя цилиндрическими пружинами, поддерживающими провода линии в натянутом состоянии. Диаметр проводов линии передачи - 2 мм, а расстояние между их центрами - 20 мм.

Энергия высокой частоты от лабораторного генератора подается к двухпроводной линии через коаксиальный кабель. В качестве симметрирующего устройства между коаксиальным кабелем и двухпроводной линией использовано "U-колесо". Длина волны генератора установле-

^{*} Бригады студентов выполняют эксперименты на стандах с номером работы, индекс которого соответствует заданному варианту.

на в диапазоне 60...80 см отдельно для каждого варианта лабораторной работы. При выполнении лабораторной работы бригады студентов уточняют длину волны генератора своей установки путем измерения в двухпроводной линии расстояния между узлами напряжения.

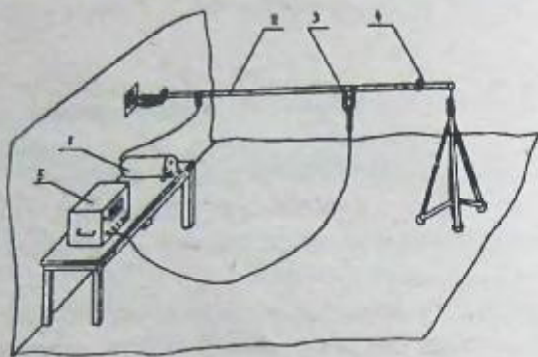


Рис. 1.6. Лабораторная установка по исследованию режимов работы двухпроводной линии передачи:

1 - генератор; 2 - линия передачи; 3 - детекторная головка; 4 - нагрузка линии; 5 - измерительный усилитель

Величина напряжения между проводами линии измеряется с помощью детекторной головки и измерительного усилителя, имеющего стрелочный прибор. Для определения положения детекторной головки параллельно проводам натянута лента со шкалой, имеющей нуль в начале линии передачи (место подключения нагрузки). Рабочим элементом детекторной головки является полупроводниковый диод, который имеет емкостную связь с проводами линии. Выпрямленное напряжение с диода через развязывающие индуктивности и экранированный кабель подается на вход измерительного усилителя. Со шкалы стрелочного прибора усилителя напряжение считывается в относительных единицах.

Показания стрелочного прибора усилителя вследствие нелинейности характеристики полупроводникового диода пропорциональны второй степени напряжения в линии.

Нагрузками двухпроводной линии являются: конденсатор, катушка индуктивности и комплексная нагрузка. Все нагрузки имеют пружинные заделки, с помощью которых они подключаются к проводам линии.

Основой конденсатора и катушки индуктивности является цилиндр из органического стекла. Конденсатор образован двумя изогнутыми

пластинами из латуни, привинченными к цилиндру; катушка индуктивности состоит из двух витков медного провода.

Комплексная нагрузка представляет собой аналогичный конденсатор либо катушку индуктивности с параллельно подключенным активным сопротивлением. Входное сопротивление такой нагрузки, входящей в комплект соответствующей установки, указано в табл. I.1.

Для согласования линии с нагрузкой в установках применяется индуктивный шлейф переменной длины. Шлейф имеет пружинные заделки и может подключаться к линии в необходимом месте. Диаметр стержней шлейфа - 5 мм, а расстояние между их осями - 20 мм.

Принципиальная схема лабораторной установки показана на рис. 1.7.

Все компоненты установки заземлены, низкочастотное или постоянное напряжение между проводами линии отсутствует, а высокочастотное напряжение мало; поэтому для работающих установка безопасна. Подключение или отключение нагрузок и шлейфа можно производить при работающем генераторе.

Порядок выполнения эксперимента

В начале занятия каждой бригаде студентов необходимо с разрешения преподавателя или лаборанта включить приборы лабораторной установки для их предварительного прогрева перед началом эксперимента.

I. Снять распределение напряжения вдоль линии, нагруженной на емкость; по результатам измерений вычислить величину емкости.

В начало линии, т.е. в то место, где находится нуль шкалы, подключают конденсатор. Детекторную головку передвигают в пучность напряжения, а чувствительность измерительного усилителя делают такой, чтобы стрелка прибора показала 0,9...0,95 от максимального значения. Затем, вынув из входной розетки прибора вилку кабеля, идущего от детекторной головки, проверяют установку стрелки прибора на нулевое деление. После этого снимают распределение напряжения вдоль линии при одном и том же усилении прибора.

Напряжение измеряют при перемещении детекторной головки через каждые 3-4 см. Первое показание прибора записывают, когда детекторная головка находится от нагрузки на расстоянии 1,5-2,0 см. Ближе располагать детекторную головку нельзя, так как паразитная емкостная связь между головкой и конденсатором (или катушкой индуктивности, комплексной нагрузкой) завышает показания прибора.

Построенный график распределения (квадрата) напряжения вдоль линии должен иметь вид, показанный на рис. 1.8, и содержать три узла напряжения.

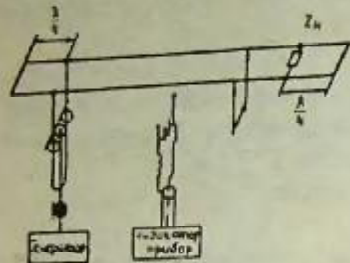


Рис. 1.7. Схема лабораторной установки по исследованию режимов работы двухпроводной линии передачи

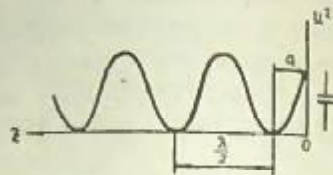


Рис. 1.8. График распределения квадрата напряжения вдоль линии передачи, нагруженной на емкость

По сравнению с описанными теоретическими графиками экспериментальный график распределения напряжения имеет не столь резко выраженные узлы напряжения вследствие того, что показания прибора пропорциональны примерно второй степени напряжения.

По построенному графику распределения напряжения определяют длину волны генератора и расстояние "а" между первым узлом и началом линии. После этого по нижеприведенной формуле вычисляется емкость конденсатора, подключенного к линии передачи,

$$C = \frac{\epsilon g \left(360^\circ \frac{\lambda/4 - a}{\lambda} \right)}{\omega \cdot p} \quad \Phi, \quad (1.34)$$

где $\omega = 2\pi \cdot \frac{3 \cdot 10^{10}}{\lambda}$ (здесь λ — в сантиметрах).

2. Снять распределение напряжения вдоль линии, нагруженной на индуктивность; по результатам измерений вычислить величину индуктивности.

К линии передачи подключается катушка индуктивности. Все измерения и построение графика проводятся в соответствии с п. 1.

Построенный график напряжения должен иметь вид, показанный на рис. 1.9, и содержать три узла.

По построенному графику распределения напряжения определить расстояние δ между первым узлом и началом линии. После этого по нижеприведенной формуле вычислить величину индуктивности катушки, подключенной к линии передачи.

$$L = \frac{p}{\omega \epsilon g \left(360^\circ \frac{\delta - \lambda/4}{\lambda} \right)} \quad \Gamma_n. \quad (1.35)$$

3. Исследовать режимы работы линии, нагруженной на комплексное сопротивление.

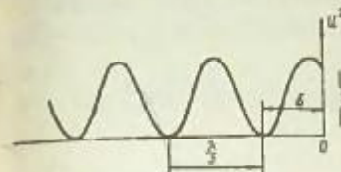


Рис. 1.9. График распределения квадрата напряжения вдоль линии передачи, нагруженной на индуктивность

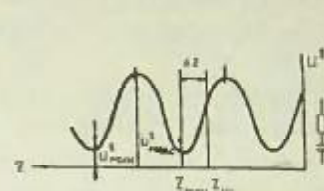


Рис. 1.10. График распределения квадрата напряжения вдоль линии передачи, нагруженной на комплексное сопротивление

К линии передачи подключается комплексная нагрузка, а измерительный усилитель подготавливают к измерениям так же, как при выполнении п. 1; распределение напряжения снимают через кабели 3-4 см, начиная с расстояния 1,5-2,0 см от нагрузки.

По полученным данным строят график распределения напряжения (рис. 1.10), определяют коэффициент бегущей волны и значения, соответствующие положению минимумов напряжения. С учетом измеренной длины волны результаты теоретических расчетов места подключения шлейфа и его длины, выполненных ранее, переводят в сантиметры.

Коэффициент бегущей волны в линии передачи определяют как

$$K_{БВ} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \sqrt{\frac{U'_{\min}}{U'_{\max}}}, \quad (1.36)$$

где U'_{\min} и U'_{\max} — показания прибора измерительного усилителя, и сравнивают с теоретическим. Кроме того, для комплексной нагрузки с индуктивной составляющей входного сопротивления сравнивают с теоретическим значение, соответствующее положению первого минимума напряжения, а для комплексной нагрузки с емкостной реактивной составляющей — значение, соответствующее положению второго минимума напряжения. Если экспериментально полученные данные существенно отличаются от расчетных, то необходимо выяснить причину расхождения, а место подключения согласующего шлейфа и его длину пересчитать с учетом экспериментальных данных.

После этого к линии в расчетное сечение (но не ближе 2 см к нагрузке) подключить шлейф и определить $K_{БВ}$. При определении $K_{БВ}$

со шлейфом полный график распределения напряжения снимать не надо, а необходимо только измерить напряжение в местах максимума и минимума и извлечь из их отношения квадратный корень. Если величина $K_{БВ}$ равна 0,8 и ниже, то следует произвести подстройку на более высокий $K_{БВ}$, которую производят путем изменения длины шлейфа и места его подключения. Согласование считается законченным, если $K_{БВ} \geq 0,85$.

Настройку на бегущую волну целесообразно выполнить методом последовательных приближений:

1) изменяя последовательно длину шлейфа примерно на 1 см, добиваются наибольшего повышения минимума напряжения (положение минимума при этом перемещается, поэтому уровень минимума определяют при перемещении детекторной головки);

2) перемещая шлейф вдоль линии с шагом в 1 см, добиваются наибольшего повышения минимума напряжения;

3) манипуляции пп. 1 и 2 поочередно повторять до тех пор, пока не будет достигнут $K_{БВ} \geq 0,85$.

После окончания согласования необходимо записать величину $K_{БВ}$, длину и место подключения шлейфа и сравнить их с расчетными значениями. Различие между экспериментальными и теоретическими величинами может обуславливаться неточным знанием характеристики детекторной головки, погрешностями измерений и влиянием сопротивления контактов шлейфа и нагрузки.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется в тетради школьного типа.

На титульном листе указывается название лабораторной работы, ее вариант, номер группы и фамилия студента.

Отчет должен иметь деление на этапы работы и необходимые пояснения.

В отчете к данной лабораторной работе должны быть представлены:

- схема лабораторной установки (см. рис. 1.7);
- результаты выполнения расчетного задания;
- три таблицы с данными измерений и три рисунка с графиками распределения (в квадрате) вдоль линии передачи;
- результаты экспериментального определения величины емкости, индуктивности, длины и места подключения шлейфа, значения $K_{БВ}$ при установке теоретических значений длин и эти же данные после согласования линии передачи.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под термином "регулярная линия передачи"?
2. Что такое волновое сопротивление линии передачи (дать математическое и физическое толкование этого сопротивления)?
3. Для чего стремятся обеспечить в линии передачи как можно более высокое значение $K_{БВ}$?
4. Постройте график распределения напряжения вдоль линии, нагруженной на емкость. Поясните, какие изменения произойдут в распределении напряжения при увеличении или уменьшении емкости; чему равен $K_{БВ}$?
5. Постройте график распределения напряжения вдоль линии, нагруженной на индуктивность. Поясните, какие изменения произойдут в распределении напряжения при увеличении или уменьшении индуктивности; чему равен $K_{БВ}$?
6. Постройте график распределения напряжения в линии, нагруженной на активное сопротивление, величина которого больше волнового сопротивления линии. Постройте аналогичный график для сопротивления, величина которого меньше волнового сопротивления линии. Поясните, чем отличаются графики, чему равен $K_{БВ}$?
7. Постройте график распределения напряжения в линии передачи, нагруженной на комплексное сопротивление с положительной реактивной составляющей, а затем - с отрицательной. Поясните, чем отличаются графики.
8. Постройте график распределения напряжения в линии при $K_{БВ} = 0,5$. В соответствии с графиком напряжения построьте графики активной и реактивной составляющей входного сопротивления линии в зависимости от ее длины; чему равно в долях волнового сопротивления входное сопротивление линии в сечениях экстремумов напряжения?
9. Постройте график распределения напряжения в линии при $K_{БВ} < 1$. Покажите на графике область, где находится сечение с выходным сопротивлением (проводимостью) линии, обеспечивающим согласование с помощью параллельного короткозамкнутого шлейфа, длина которого может изменяться в пределах от нуля до четверти длины волны.
10. Каким образом практически производится согласование линии передачи с помощью шлейфа для получения более высокого $K_{БВ}$?
11. Чему равно входное сопротивление четвертьволнового отрезка линии с $R = 200 \text{ Ом}$, если он нагружен на активное сопротивление $R_H = 100 \text{ Ом}$?

12. Определите с помощью круговой диаграммы входное сопротивление линии длиной $0,6 \lambda$ (волновое сопротивление линии 100 Ом , нагрузкой является активное сопротивление величиной 50 Ом).

13. Определите с помощью круговой диаграммы входное сопротивление нагрузки линии с волновым сопротивлением 100 Ом , если $K_{\text{БВ}}$ в линии равен $0,5$, а минимум напряжения расположен на расстоянии $0,15 \lambda$ от места включения нагрузки.

14. Определите с помощью круговой диаграммы величину $K_{\text{БВ}}$ в линии и расстояние от нагрузки до значения, соответствующего положению первого минимума напряжения, если волновое сопротивление линии $\rho = 50 \text{ Ом}$, сопротивление нагрузки $Z_H = 75 + j 150 \text{ Ом}$, длина волны в линии $\lambda_{\text{л}} = 50 \text{ см}$.