

240 ауд.

Федеральное агентство Российской Федерации по образованию
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

раб. 47

Кафедра радиофизики

Лаборатория

«Основы радиоэлектроники и радиофизики»

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ

учебное пособие по лабораторной работе

Дополнительный тираж раздела учебного пособия
«Электромагнитные колебания и волны» — Л.: Изд-во ЛПИ, 1987, стр. 22-41.

Санкт-Петербург
2008 г.

Федеральное агентство Российской Федерации по образованию
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Кафедра радиофизики
Лаборатория
«Основы радиоэлектроники и радиофизики»

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ
учебное пособие по лабораторной работе

Дополнительный тираж раздела учебного пособия
«Электромагнитные колебания и волны» — Л.: Изд-во ЛПИ, 1987, стр. 22-41.

Санкт-Петербург
2008 г.

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ

В лабораторной работе исследуются процессы в двухпроводной воздушной и несимметричной полосковой линиях. Цель работы — знание законов распределения амплитуды и фазы напряжения и тока вдоль длинной линии при различных нагрузках, умение выполнять расчеты основных параметров линии и применять простейшие способы согласования линии с нагрузкой.

Методические указания

Длинные линии служат простейшим примером так называемых систем с распределенными параметрами. Они предназначены для передачи колебаний (сигналов) от источника к удаленной нагрузке (что и объясняет термин «длинные линии»), кроме того, они имеют еще ряд важных применений. Некоторые типы длинных линий, используемых в настоящее время, схематически показаны на рис.1. Несмотря на значительное различие конструкций колебательные процессы во всех типах длинных линий подчиняются общим закономерностям.

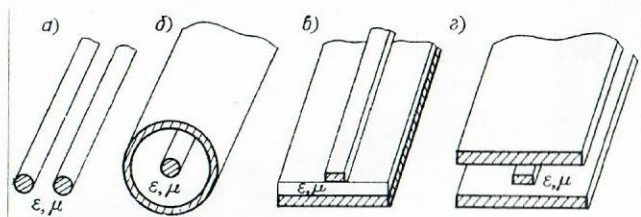


Рис.1. Линии передачи: а — симметричная двухпроводная, б — коаксиальная, в — несимметричная полосковая, г — симметричная полосковая

Протекание тока по проводам происходит под действием приложенного электрического поля, которое, как известно, распространяется с конечной скоростью. Если частота колебаний не слишком велика, можно считать, что изменение внешнего поля передается вдоль провода практически мгновенно, т. е. полагать скорость электромагнитной волны бесконечно большой. Однако такое допущение перестает быть верным на сверхвысоких частотах, когда расстояние, которое волна проходит за период колебания (длина волны), становится сравнимо с длиной провода. Например, при частоте $f=3$ ГГц длина волны в вакууме, а также в воздушной среде составляет $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 3 \cdot 10^9 = 0,1$ м, что сравнимо с размерами применяемых на практике устройств.

В данной работе рассматриваются такие линии, размеры которых только в одном измерении (продольном) сравнимы с λ , а в поперечном сечении расстояние между проводами много меньше λ . При этом условии электромагнитное поле в поперечном сечении имеет квазистатический

характер, и для описания процессов в линии можно использовать обычные понятия напряжения и тока. Однако их надо считать функциями не только времени, но и продольной координаты x , т. е. учитывать запаздывание фазы колебания вдоль проводов линии.

Рассмотрим однородную длинную линию, т. е. такую, у которой конфигурация и размеры поперечного сечения не зависят от продольной координаты x . В режиме установившихся гармонических колебаний частотой ω комплексные амплитуды напряжения и тока имеют следующую зависимость от x :

$$\begin{aligned} U(x) &= U_{\text{пад}}(x) + U_{\text{отр}}(x) = U_{0\text{пад}} \exp \gamma x + U_{0\text{отр}} \exp(-\gamma x); \\ I(x) &= I_{\text{пад}}(x) + I_{\text{отр}}(x) = I_{0\text{пад}} \exp \gamma x + I_{0\text{отр}} \exp(-\gamma x). \end{aligned} \quad (1)$$

Каждому слагаемому отвечает мгновенное напряжение (или ток), зависящее от координаты и времени как $\text{Re} \exp(\pm \gamma x + j\omega t)$. Следовательно, (1) описывает суперпозицию волн напряжения и тока, бегущих навстречу друг другу. Начало координаты x находится в плоскости нагрузки, а положительное направление оси x ориентировано к генератору.

Постоянные $U_{0\text{пад}}, U_{0\text{отр}}, I_{0\text{пад}}, I_{0\text{отр}}$ есть амплитуды волн в сечении $x=0$. Они определяются граничными условиями в начале и конце линии (режимом питания и нагрузки). Постоянная γ зависит исключительно от конструкции линии. Она в общем случае комплексная $\gamma = \alpha + j\beta$ и называется постоянной распространения волны. Вещественная часть постоянной распространения α определяет изменение амплитуды каждой из волн при движении вдоль линии. Она зависит от интенсивности рассеяния энергии в линии (омического сопротивления проводов, потерь в диэлектриках и т. д.).

Линии, на которых проводится настоящая работа, выполнены из материалов, имеющих малые потери, кроме того, длина линии l сравнительно невелика, так что αl мало, и поэтому эффектами, связанными с изменениями амплитуды, можно пренебречь ($\exp \alpha l \approx 1$) и считать линию идеальной — не имеющей потерь. Дальнейшее рассмотрение будем проводить, допустив, что $\alpha=0$ и, следовательно, амплитуды падающей и отраженной волн в процессе распространения вдоль линии не изменяются.

Фазовая скорость и длина волны. Скорость движения фазового фронта волны вдоль линии определяется величиной β . Мгновенная (полная) фаза бегущей волны Φ дается аргументом экспоненты $\exp(\pm j\beta x + j\omega t)$: $\Phi = \omega t \pm \beta x + \psi$, где ψ — некоторая начальная фаза, имеющая в общем случае различные значения для каждой из волн, входящих в (1). За время t фазовый фронт волны (фаза $\Phi = \text{const}$) сместится на расстояние x :

$$x = \mp \frac{\omega t + \psi - \psi}{\beta} = \mp \frac{\omega t}{\beta}. \quad (2)$$

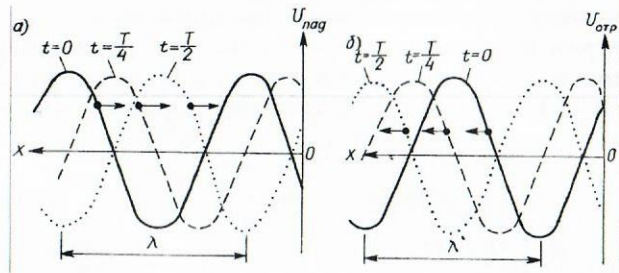


Рис.2. Мгновенные картины распределения напряжения

Следовательно, скорость движения фазового фронта волны равна

$$v_{\phi} = \frac{dx}{dt} = \mp \frac{\omega}{\beta} = \mp \frac{2\pi}{\beta T}. \quad (3)$$

Процесс распространения волн вдоль линии проиллюстрирован на рис.2. Пусть в момент времени $t=0$ распределение напряжения в линии, соответствующее 1-му слагаемому (1), изображается сплошной кривой (рис.2,а). С течением времени эпюра распределения сдвигается вдоль оси x (в момент $t=T/4$ распределение показано штриховой линией, в момент $t=T/2$ — пунктирной и т. д.). Видно, что фаза волны (например, некоторое значение, отмеченное точкой) смещается вдоль линии. Отраженная волна смещается в противоположном направлении (рис.2,б). При рассмотрении рис.2 необходимо помнить, что действительное напряжение в каждом сечении линии определяется суперпозицией этих волн и зависит от соотношения амплитуд и фаз падающей и отраженной волн. Подробнее это будет рассмотрено ниже. При известной фазовой скорости можно определить длину волны в линии. Ясно, что за время, равное периоду колебаний T , фазовый фронт сместится на длину волны λ , т. е.

$$\lambda = v_{\phi} T = \frac{2\pi}{\beta}.$$

Согласно электромагнитной теории

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu / c}, \quad (4)$$

где c — скорость света в вакууме; ϵ и μ — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Данное соотношение справедливо при любой форме поперечного сечения проводников линии, если они находятся в однородной среде без потерь. Следовательно,

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon \mu}}; \quad v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}. \quad (5)$$

Как видно из (5), длина волны в линии оказывается такой же, как у

волны, распространяющейся в однородном пространстве (не имеющем проводников) с такими же, как в линии, параметрами ϵ и μ . Для двухпроводной, а также полосковой линии соотношение (4) справедливо только, если диэлектрик заполняет все пространство вокруг проводников. Фактически объем диэлектрика всегда конечен. Эту ограниченность объема можно учесть, введя в формулу (5) эффективные параметры $\epsilon_{эфф}$, $\mu_{эфф}$. Они определены так, что волна в линии, находящейся в бесконечном диэлектрике с параметрами $\epsilon_{эфф}$, $\mu_{эфф}$, имеет такие же фазовую скорость и длину волны, как и волна в реальной линии.

Путем сравнения длин волн в линиях, заполненных различными диэлектриками, можно определять относительную эффективную диэлектрическую постоянную. Диэлектрики, используемые в лабораторном макете, имеют $\mu=1$.

При анализе процессов в длинных линиях удобно выразить расстояние l в относительных единицах l' (в длинах волн λ) $l' = l/\lambda$ или в угловых единицах, определяемых величиной βl .

Коэффициент отражения. Рассмотрим амплитуды падающей и отраженной волн. Предположим, что к линии конечной длины генератор подключен слева, а произвольная пассивная нагрузка Z_{Π} — справа.

Режим волн в линии зависит от отношения сопротивления нагрузки Z_{Π} к волновому сопротивлению линии W . Величина W является константой, зависящей исключительно от конструкции линии (подробнее об этом будет сказано ниже). Удобной количественной характеристикой волнового режима служит коэффициент отражения.

Коэффициент отражения по напряжению в некотором сечении линии с координатой x определяется как отношение

$$\Gamma_v = \frac{U_{отр}}{U_{пад}} = \frac{U_{0отр} \exp(-j\beta x)}{U_{0пад} \exp(j\beta x)} = \Gamma_v(0) \exp(-j2\beta x). \quad (6)$$

Аналогично определяется и коэффициент отражения для волн тока

$$\Gamma_I = \Gamma_I(0) \exp(-j2\beta x).$$

Между коэффициентами отражения по току и напряжению существует простая связь

$$\Gamma_v = -\Gamma_I = \Gamma. \quad (7)$$

Коэффициент отражения от конца линии определяется выражением (получаемым из граничных условий на конце линии)

$$\Gamma_v(0) = \frac{Z_{\Pi} - W}{Z_{\Pi} + W} \quad (8)$$

Разумеется, фактически отражение волны происходит только в тех сечениях, где нарушается однородность линии (т. е. подключена нагрузка, не равная волновой, или подсоединены какие-либо дополнительные

устройства), далее отраженная волна распространяется вдоль линии, не меняя амплитуды. Напряжение и ток в линии на основании (1), (6), (7) могут быть представлены в виде:

$$U = U_{\text{пад}}(1 + \Gamma); I = I_{\text{пад}}(1 - \Gamma). \quad (9)$$

В линии без потерь модуль коэффициента отражения $|\Gamma|$ не зависит от рассматриваемого сечения (физически ясно, чем это вызвано) и фаза Γ изменяется вдоль линии по закону $2\beta x$. Изменение амплитуды напряжения вдоль линии (сумма волн) легко проиллюстрировать векторной диаграммой (рис.3). Закон изменения амплитуды задается вектором $(1 + \Gamma)$, изображенным в виде суммы единичного вектора и вектора Γ . При движении вдоль линии изменяется фаза вектора Γ , $\varphi = \varphi_0 + 2\beta x$, что на векторной диаграмме соответствует вращению Γ , следовательно, изменяется длина вектора $(1 + \Gamma)$. Таким образом, амплитуда напряжения (а также тока) оказывается различной в разных сечениях линии. Период изменения амплитуды составляет $\lambda/2$.

Распределение амплитуд напряжения и тока вдоль линии.

Рассмотрим несколько характерных частных случаев.

1. Линия закорочена на конце ($Z_n = 0$). Ясно, что в этом случае напряжение на конце линии равно нулю, т.е. в плоскости нагрузки напряжения падающей и отраженной волн равны по амплитуде и находятся в противофазе. Иначе говоря, $\Gamma_v(0) = -1$. Согласно векторной диаграмме амплитуда напряжения вдоль линии изменяется от 0 до $2U_{\text{пад}}$ (рис.4). Режимы, при которых $|\Gamma| = 1$, называют режимами стоячих волн; при этом вся энергия, переносимая падающей волной, возвращается генератору отраженной волной. Распределение амплитуды тока вдоль линии представляется аналогичной кривой, но сдвинутой вдоль линии на $\lambda/4$.

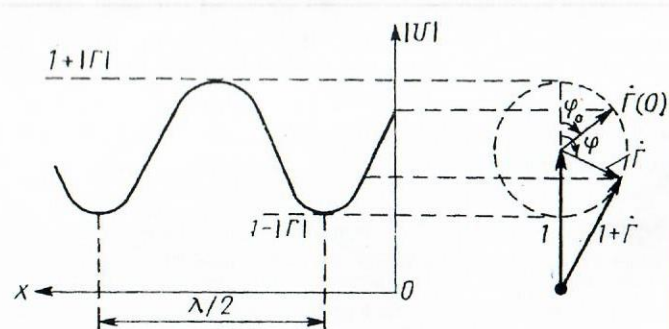


Рис.3. Зависимость амплитуды напряжения от координаты

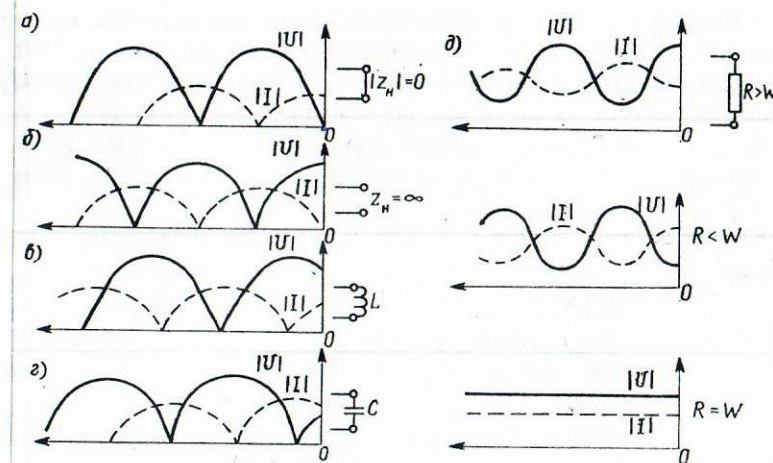


Рис.4. Эпюры распределения амплитуд напряжения и тока вдоль линии

2. Линия разомкнута на конце ($Z_n = \infty$). В этом случае ток на конце линии должен быть равным нулю, т.е. векторы падающей и отраженной волн тока в конце линии равны по амплитуде и противофазны. ($\Gamma_i(0) = -1$, $\Gamma_v(0) = 1$). Значит, как и в предыдущем случае, происходит полное отражение от конца линии, и в ней возникает стоячая волна. Закон изменения амплитуд тока и напряжения показан на рис.4,б.

3. Чисто реактивные нагрузки (емкость, индуктивность). Так как реактивные нагрузки мощность не поглощают, то и в этом случае должно существовать полное отражение падающей волны от нагрузки. Модуль коэффициента отражения равен единице, и в линии должен наблюдаться режим стоячих волн при нагружении как на емкость, так и на индуктивность. Различие между этими двумя нагрузками будет только в фазе коэффициента отражения $\Gamma(0)$. В соответствии с этим и различен характер изменения амплитуды напряжения при движении от нагрузки (см. рис.3 и 4,в,г).

4. Чисто активная нагрузка ($Z_n = R$). В этом случае коэффициент отражения от нагрузки вещественный и распределение амплитуды напряжения вдоль линии обязательно имеет экстремум на нагрузке. Фаза коэффициента отражения $\Gamma(0)$ равна нулю или π . При $R_n < W$ на нагрузке будет минимум напряжения, а при $R_n > W$ — максимум. Легко видеть, что результаты, полученные в пп.1,2, являются соответствующими предельными случаями.

При $R_n \neq 0, \infty$ часть энергии падающей волны поглощается нагрузкой и поэтому $|\Gamma| < 1$. Режимы в линии, в которых $0 < |\Gamma| < 1$, называются режимами смешанных волн.

5. Особый интерес на практике представляет режим, существующий в линии при $R_n = W$. В этом случае отраженная волна отсутствует, $\Gamma = 0$, вся энергия падающей волны рассеивается в нагрузке. При этом амплитуды напряжения и тока вдоль линии постоянны, а их отношение равно W (рис.4,б). Данный режим называют режимом бегущей волны. Нетрудно убедиться в том, что расчет по формулам (7), (8) приводит к таким же результатам.

Коэффициенты стоячей и бегущей волны. Для характеристики неравномерности амплитуды напряжения вдоль линии вводят понятие коэффициента стоячей волны, который определяет соотношением

$$\text{КСВ} = \frac{|U_{\max}|}{|U_{\min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{|I_{\max}|}{|I_{\min}|}. \quad (10)$$

Не менее часто используют и другой параметр — коэффициент бегущей волны (КБВ), являющийся величиной, обратной КСВ,

$$\text{КБВ} = \frac{1}{\text{КСВ}}. \quad (11)$$

Возможные значения КСВ: $1 \leq \text{КСВ} \leq \infty$, а КБВ лежит в пределах от 0 до 1.

Входное сопротивление. Оно определяется как отношение напряжения к току в данном сечении линии:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U(x)}{I(x)} = W \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (12)$$

или

$$Z_{\text{вх}} = W \frac{1 + \Gamma_U(0) \exp(-j2\beta x)}{1 - \Gamma_U(0) \exp(-j2\beta x)}. \quad (13)$$

Согласно этому отрезок длиной линии может быть заменен некоторым эквивалентным сосредоточенным сопротивлением, ток и напряжение в котором такие же, как в рассматриваемом сечении линии; значение эквивалентного сопротивления зависит от частоты.

Очевидно, что если выражение (13) рассматривается при $x=0$, то $Z_{\text{вх}} = Z_{\text{н}}$.

Входное сопротивление, как и коэффициент отражения, есть периодическая функция длины линии с периодом $\lambda/2$ и зависит от соотношения сопротивления нагрузки и волнового сопротивления линии. Подстановка (8) в (13) приводит к выражению

$$Z_{\text{вх}} = W \frac{Z_{\text{н}} \cos \beta x + jW \sin \beta x}{W \cos \beta x + jZ_{\text{н}} \sin \beta x}. \quad (14)$$

В сечениях линии, соответствующих минимуму и максимуму напряжения, сопротивление чисто активное (это видно, например, из диаграммы рис.3). Если рассмотреть линию длиной $\lambda/4$, нагруженную на $Z_{\text{н}}$, то ее входное сопротивление будет равно

$$Z_{\text{вх}, \lambda/4} = \frac{W^2}{Z_{\text{н}}} = W^2 Y_{\text{н}}. \quad (15)$$

Модуль входного сопротивления в минимумах напряжения всегда меньше волнового, в максимумах — больше.

Круговая диаграмма. По соотношениям (13), (14), зная сопротивление нагрузки, можно определить входное сопротивление в произвольном сечении линии, а также решить обратную задачу — по известному входному сопротивлению и длине линии найти сопротивление нагрузки. Однако на практике эти расчеты по формулам проводят сравнительно редко, чаще пользуются так называемой диаграммой полных сопротивлений (употребляются также названия диаграмма Вольперта-Смита, круговая диаграмма). Эта диаграмма представляет собой отображение плоскости комплексного сопротивления на плоскость коэффициента отражения. Смысл ее заключается в том, что на плоскости Γ указывают значения сопротивления, обуславливающего данный коэффициент. Целесообразно использовать безразмерные сопротивления, т. е. отнесенные к волновому сопротивлению линии W , тогда диаграмма будет иметь универсальный вид, пригодный для любой конструкции линии. На плоскости Γ диаграмма занимает внутренность круга радиуса 1, так как $|\Gamma| \leq 1$ (см. рис.6). Внутри этого круга наносят линии постоянных значений активной части сопротивления и постоянных значений реактивной части сопротивления. Они представляют собой окружности, закономерности расположения которых рассматриваются во многих учебниках.

Легко получить представление о структуре координатных линий диаграммы, проанализировав выражение, связывающее коэффициент отражения и сопротивления в данном сечении линии $\Gamma = (Z - 1)/(Z + 1)$; ($Z = Z/W$), имея в виду свойства функций комплексного переменного. Это дробно-линейное преобразование осуществляет отображение плоскости Z на плоскость Γ . При этом полуплоскость $\text{Re} Z \geq 0$, соответствующая пассивным нагрузкам, отображается на внутренность круга радиуса 1 в плоскости Γ . Преобразование координатных линий показано на рис.5.

На той же плоскости указаны значения Γ . Линии $|\Gamma| = \text{const}$ — это окружности с центром в начале координат, а линии постоянной фазы коэффициента отражения — радиусы. Фактически разметка указанных величин осуществляется следующим образом: значение фазы коэффициента отражения размещают на внешнем круге диаграммы, а на окружностях «постоянный модуль Γ » указывают значения коэффициентов стоячей и бегущей волн. Так как фаза коэффициента отражения есть периодическая функция длины линии (с периодом $\lambda/2$), то на внешнем круге указывают также относительную длину линии (в длинах волн), на

которую приходится данный фазовый угол. На многих диаграммах приведена только эта величина, удобная для практического использования. Отсчет длины ведется от точки, соответствующей узлу напряжения, причем размечено направление как в сторону нагрузки, так и в сторону генератора. За положительное направление (от нагрузки к генератору, в соответствии с выбранным направлением оси x) принято направление по часовой стрелке. Реальная круговая диаграмма показана на рис.6.

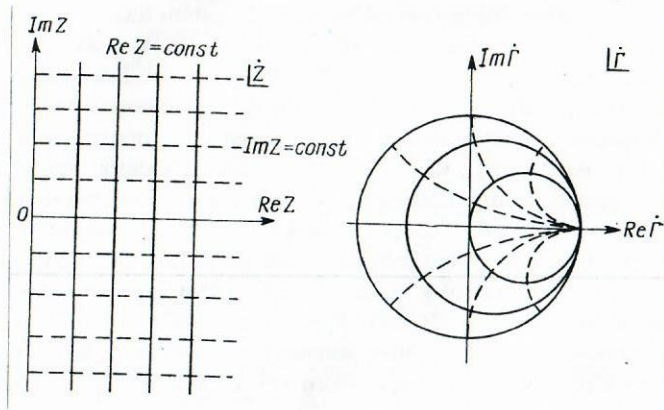


Рис.5. Отображение линий $\text{Re } Z = \text{const}$ и $\text{Im } Z = \text{const}$ на плоскость Γ

Для пользования диаграммой сопротивлений полезна ясно представлять расположение на ней некоторых характерных нагрузок.

1. Сопротивление, равное волновому сопротивлению, — это центр диаграммы ($\text{КСВ} = \text{КБВ} = 1$, $\Gamma = 0$).
2. Чисто активные сопротивления изображаются точками вертикальной прямой, проходящей через центр круга. Верхняя точка этой прямой на диаграмме сопротивлений изображает короткое замыкание ($R_n = 0$), а нижняя — бесконечно большое сопротивление (рис.6).

Точки верхней половины этой прямой — активные сопротивления, меньшие волнового, и, следовательно, соответствуют входным сопротивлениям в минимумах напряжения, а точки нижней половины — сопротивления, большие волнового, соответствуют входным сопротивлениям в максимумах напряжения.

3. Чисто реактивные нагрузки изображаются окружностью радиуса, равного 1 (внешняя граница круга). Правой половине соответствуют положительные реактивности (сопротивления индуктивного характера), а левой — отрицательная реактивность (емкостные сопротивления).

Примеры использования круговой диаграммы. Диаграмма позволяет весьма оперативно решать ряд задач, встречающихся в практике работы с длинными линиями. Рассмотрим некоторые из них.

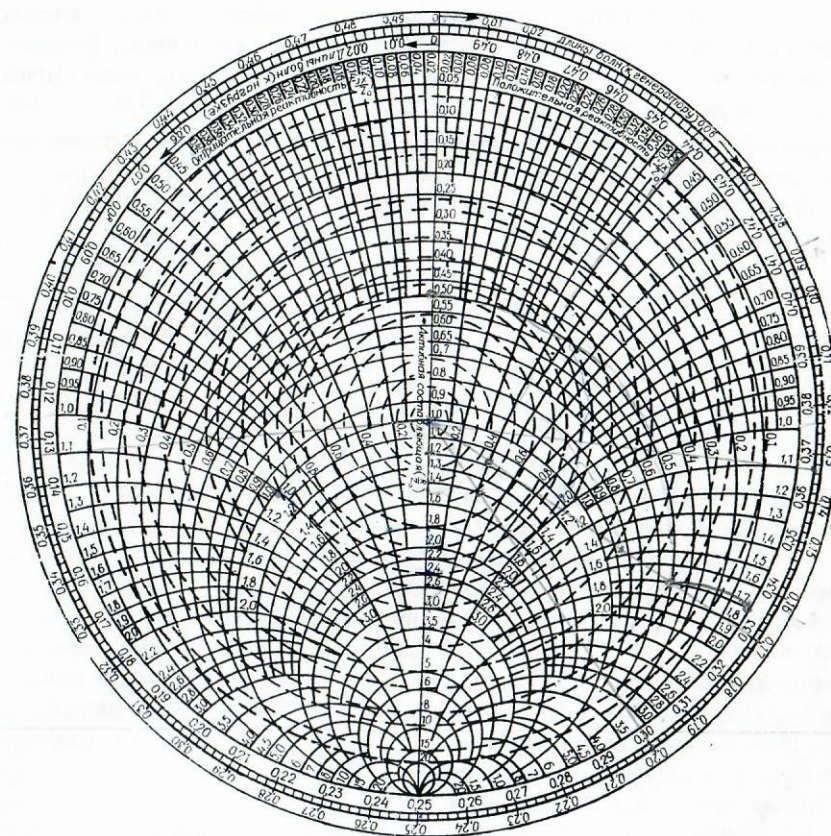


Рис.6. Круговая диаграмма

1. Найти КСВ и КБВ в линии без потерь по заданному сопротивлению нагрузки Z_n .

При нахождении искомых величин достаточно отсчитать значение, нанесенное на линии $\text{КСВ} = \text{const} (\text{КБВ})$, проходящей через точку Z_n .

2. Найти входное сопротивление отрезка линии длины l , нагруженного на сопротивление Z_n .

Так как при движении вдоль линии изменяется лишь фаза коэффициента отражения, то входное сопротивление отрезка линии изображается точкой, смещенной от точки, изображающей нагрузку на угол, равный фазовому сдвигу на отрезке линии длиной l .

Практически поступают следующим образом: проводят радиус-вектор в точку, изображающую сопротивление нагрузки, поворачивают его на угол l/λ в сторону к генератору по окружности $\text{КСВ} = \text{const}$ и отсчитывают величину входного сопротивления. В частности, с помощью диаграммы

удобно рассмотреть зависимость входного сопротивления короткозамкнутой (или разомкнутой) линии от ее длины. Входное сопротивление такой линии всегда реактивное (изображающая точка находится на окружности КБВ=0). При длине линии $l = \lambda/4$ входное сопротивление становится бесконечно большим. Поэтому подключение параллельно линии короткозамкнутого отрезка длиной $\lambda/4$ не влияет на процессы в линии, поскольку его входная проводимость бесконечно мала (четвертьволновый изолятор).

Входное сопротивление изменяется при изменении частоты. Если увеличить длину волны (по сравнению с $\lambda=4l$), то оно становится индуктивным, а если несколько уменьшить, то емкостным. На этом основании говорят, что отрезок линии длиной $\lambda/4$, закороченный на конце, эквивалентен параллельному контуру, аналогично, отрезок длиной $\lambda/2$ — последовательному.

3. Найти расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимума (максимума) напряжения, если известно сопротивление нагрузки.

При движении вдоль линии входное сопротивление изменяется так, что КСВ постоянен. Поскольку в минимуме (максимуме) напряжения входное сопротивление чисто активное, то ясно, что искомое расстояние есть длина, которую надо пройти от нагрузки до соответствующей точки вертикальной линии. Практически расстояние находят так: проводят радиус-вектор в точку, изображающую сопротивление нагрузки, и поворачивают его в сторону генератора до совпадения с вертикальной линией.

Искомое расстояние есть разность отсчетов длин у конца радиус-вектора в этих двух положениях. Аналогичным образом решается и обратная задача о нахождении сопротивления нагрузки по известному коэффициенту стоячей волны и расстоянию от нагрузки до максимума (или минимума) напряжения. В этом случае от точки минимума (максимума) активного сопротивления поворачивают радиус-вектор на угол, соответствующий расстоянию до нагрузки, и отсчитывают сопротивление нагрузки, соответствующее заданному КСВ.

4. По заданному сопротивлению нагрузки (или входному сопротивлению) найти проводимость нагрузки (или входную проводимость) $\bar{Y} = \bar{G} + j\bar{B}$. Проводимость — величина, обратная сопротивлению. Из рис.7 и формулы (12) видно, что безразмерная проводимость переходит в сопротивление, если изменить знак Γ . Поэтому диаграмма проводимостей представляет собой повернутую вокруг центра на 180° диаграмму сопротивлений. Иначе говоря, проводимость, отвечающая заданному сопротивлению, изображается точкой, симметричной относительно центра диаграммы. На диаграмме проводимости верхняя точка линии $B=0$ изображает разомкнутую линию (нулевая проводимость), а нижняя — короткое замыкание ($Y = \infty, Z=0$).

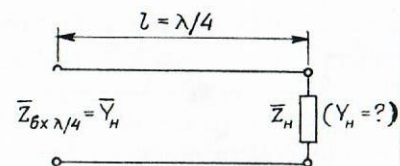


Рис.7. Преобразование сопротивления нагрузки четвертьволновым отрезком линии

Согласование нагрузки с линией. Применим полученные сведения для решения одной практически важной задачи. Речь пойдет о способах создания в линии режима бегущей волны в случае, когда сопротивление в конце линии Z_n не равно волновому. Режим бегущей волны является наиболее практичным для осуществления передачи энергии от генератора к нагрузке, так как при этом обеспечиваются наибольший коэффициент полезного действия (при рассмотрении этой величины надо учитывать потери энергии в линии), а также наибольшая допустимая передаваемая мощность (величина, определяемая пробивным напряжением). При передаче широкополосных (негармонических) сигналов режим бегущей волны обеспечивает наименьшие частотные искажения сигнала.

Поставленная задача решается путем включения в некоторое сечение линии четырехполосника, который осуществляет трансформацию сопротивления нагрузки к волновому сопротивлению линии.

1. Простейшим из таких устройств является четвертьволновый трансформатор — отрезок линии длиной $\lambda/4$. Его волновое сопротивление (отличное от W основной линии!) и место включения в линию подбираются специальным образом, а именно: трансформатор включают в сечение линии, в котором входное сопротивление чисто активное $Z_{вх} = R_{вх}$, а величина волнового сопротивления трансформатора (отрезка линии длиной $\lambda/4$) выбирается согласно выражению

$$W_{тр} = \sqrt{R_{вх} W}. \quad (16)$$

Общая схема такого устройства показана на рис.8.а. Поскольку расстояние l нами выбрано так, что входное сопротивление участка линии, расположенного справа от точек aa , чисто активное, то рис.8.б представляет собой, схему, эквивалентную рис.8.а. Входное сопротивление участка, расположенного справа от точек bb , по свойству отрезка линии длиной $\lambda/4$, равно:

$$Z_{вхbb} = W_{тр}^2 / R_{вх}.$$

Следовательно, если величина волнового сопротивления четвертьволнового трансформатора подобрана в соответствии с (16), то

$$Z_{вхbb} = W$$

и справедлива эквивалентная схема (рис.8.в). Таким образом, на частоте, когда $l_{тр} = \lambda/4$, нагрузка окажется согласованной с линией.

Положение шлейфа удобно определять как расстояние от минимума (или максимума), а не от нагрузки. Пусть известен коэффициент стоячей волны в линии $KCB=K_0$ и место расположения некоторого минимума напряжения. Тогда для того, чтобы найти по диаграмме место включения шлейфа, необходимо, двигаясь по линии постоянного КСВ ($K_0=\text{const}$), достичь точки пересечения с окружностью $\bar{G}=1$ (рис.10) — всегда найдутся две такие точки a , (a'). Расстояние $l_1(l'_1)$, отсчитанное от минимума к генератору, определяет место включения шлейфа. Так как величина реактивных проводимостей в сечениях a и a' различна (jB для точки a и $-jB$ для точки a'), то и длина шлейфа при различных местах включения оказывается различной ($l'_{шл}$ для точки a' и $l_{шл}$ для точки a) — см. рис.10. От рассматриваемого минимума напряжения шлейф можно поместить не только ближе к генератору, но и в сторону нагрузки (если позволяет расстояние). Тогда для расчета мест включения необходимо двигаться по диаграмме против часовой стрелки.

Описание лабораторной установки. Работа выполняется на двухпроводной воздушной (рис.11,а) и несимметричной полосковой линиях (рис.11,б). Обе линии предназначены для работы в дециметровом диапазоне волн. Источником электромагнитных колебаний служит генератор Г4-144 (рис.12), подсоединяемый к каждой из линий переключателем K . На другой конец линий включаются исследуемые нагрузки.

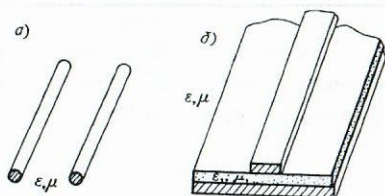


Рис.11. Линии, используемые в работе

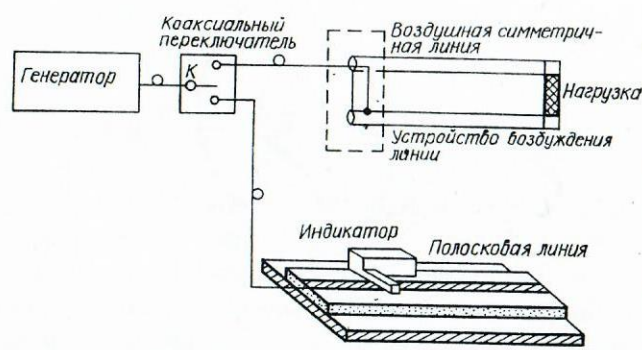


Рис.12. Схема лабораторной установки

В двухпроводной линии имеется возможность измерять как амплитуду тока, так и амплитуду напряжения. Индикация величин производится по постоянному току детекторов (см. микроамперметр на рис.13), включенных во вспомогательные линии, электрически связанные с основной.

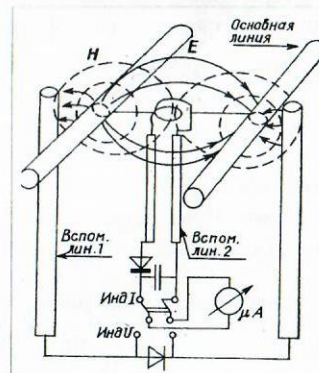


Рис.13. Устройство индикатора воздушной линии

Одна вспомогательная линия возбуждается электрическим полем основной линии и ток детектора позволяет судить о величине напряжения. Возбуждение второй линии вызывается магнитным полем основной линии и, следовательно, в этом случае можно вести индикацию тока. Структура электромагнитного поля и способы связи вспомогательных линий с основной показаны на рис.13. Вспомогательные линии выполнены на диэлектрической пластине. Индикаторное устройство укреплено на подвижной каретке. Переключение прибора на индикацию тока (напряжения) производится кнопками « U » и « I » на каретке. Ток детектора пропорционален квадрату напряжения (квадратичный детектор). Следовательно, $KCB=\sqrt{a_{\text{max}}/a_{\text{min}}}$, где a_{max} , a_{min} — максимальное и минимальное показания индикатора прибора.

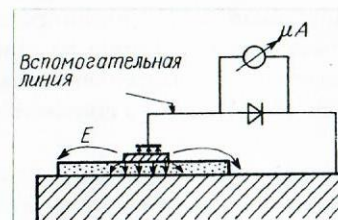


Рис.14. Схема подключения индикатора в полосковой линии

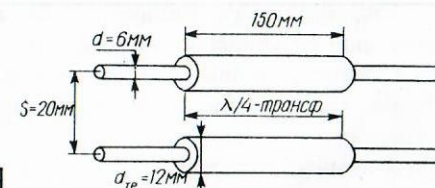


Рис.15. Воздушная линия с четвертьволновым трансформатором

Аналогичным образом устроен индикатор напряжения в полосковой линии. Картина электрического поля и схема подключения диода и

индикатора в полосковой линии показаны на рис.14. Здесь имеется только индикация напряжения. Волновое сопротивление полосковой линии $W_{пл}=37 \text{ Ом}$.

Геометрические размеры двухпроводной линии, необходимые для расчета волнового сопротивления, приведены на рис.15. Волновое сопротивление линии определяется выражением

$$W_{Ом} = \frac{2761g(2S/d)}{\sqrt{\epsilon}}$$

В комплекте оборудования работы имеются нагрузки различного характера и реактивный шлейф для подключения в воздушную линию.

Четвертьволновый трансформатор закрепляется на линии с помощью скобок на торцах накладок. При выполнении разделов работы, не требующих установки трансформатора, его необходимо снять с линии.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте эпюры распределения амплитуды напряжения вдоль линии при следующих нагрузках: а) резистор, б) емкость, в) индуктивность.
2. Что такое КСВ?
3. Как с помощью круговой диаграммы определить входную проводимость линии заданной длины?
4. Объясните принцип согласования нагрузки: а) четвертьволновым трансформатором, б) реактивным шлейфом.
5. Поясните принцип работы индикаторных устройств экспериментальной установки.

Порядок выполнения работы

Двухпроводная воздушная линия

1. Рассчитайте волновые сопротивления четвертьволнового трансформатора и воздушной линии, а также частоту, на которой они могут быть применены.
2. Снимите эпюры распределения напряжения и тока вдоль линии, закороченной на конце, на частоте, определенной в п. 1. Измерьте длину волны в линии. Для повышения точности нахождения следует определять расстояние между несколькими минимумами. Распределение снимайте от конца линии.
3. Снимите распределение амплитуды напряжения и тока вдоль линии, нагруженной на комплексное сопротивление. Определите Γ , КСВ, КБВ.
4. С помощью диаграммы полных сопротивлений определите сопротивление Z_{in} , а также входное сопротивление в сечениях линии, где оно чисто активное.

5. Согласуйте нагрузку четвертьволновым трансформатором. Место включения трансформатора определите по результатам в п. 3 и 4. После получения согласования снимите распределение напряжения вдоль всей линии.

6. Согласуйте нагрузку (ту же, что и в п. 3) с помощью параллельно подключаемого шлейфа, предварительно определив место включения и необходимую длину шлейфа по круговой диаграмме. Реализуйте один из возможных вариантов длины согласующего шлейфа. Сравните результаты эксперимента с расчетными.

7. Снимите зависимость КСВ нагрузки, согласованной реактивным шлейфом, от частоты.

Полосковая линия

8. Измерьте длину волны в полосковой линии на той же частоте генератора, что и в п. 2. По полученным результатам определите эффективную диэлектрическую проницаемость диэлектрика.

9. Снимите эпюры распределения напряжения в линии, нагруженной на различные элементы: а) емкость, б) индуктивность, в) активное сопротивление.

10. По результатам, полученным в п. 9, рассчитайте величины емкости, индуктивности, сопротивления.

Литература

1. Калинин Р.Н., Герштени Г.М. Введение в радиофизику — М.: Гостехиздат, 1957.
2. Пиппард А. Физика колебаний / Пер. с англ. под ред. А.Н. Матвеева. — М.: Высшая школа, 1985.

Лицензия ЛР №020593 от 07.08.97

Подписано в печать 04.06.2008. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 25. Заказ 30706.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного составителем,
в Цифровом типографском центре Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Тел.: 550-40-14

Тел./факс: 297-57-76