

Министерство образования и науки Российской Федерации

Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса

Н.Л. ХАЛАЕВ

В.Н. ГРЯНИК

**КРУГОВАЯ ДИАГРАММА ПОЛНЫХ
СОПРОТИВЛЕНИЙ И ПОЛНЫХ
ПРОВОДИМОСТЕЙ**

Учебно-практическое пособие

Владивосток
Издательство ВГУЭС
2014

УДК
ББК 22.313
Х 17

Рецензенты: *Н.Н. Намоконова*, д-р техн. наук, профессор кафедры электроники ВГУЭС;
П.А. Стародубцев, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой физики и ОТД ТОВВМУ им. С.О. Макарова

Халаев Н.Л., Гряник В.Н.
Х17 КРУГОВАЯ ДИАГРАММА ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ПОЛНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ : учебно-практическое пособие . – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2014. – 52 с.

Даны методики расчета параметров линий передачи энергии с минимальными потерями с использованием круговых диаграмм Вольперта-Смита с примерами, важными в практической деятельности. Содержит краткий теоретический материал, последовательность решения различных задач согласования линий передачи и нагрузок, методические указания по правильности выполнения расчетных операций и перечень контрольных вопросов, обеспечивающих закрепление пройденного материала.

Для студентов 3 и 4 курса бакалавриата по радиотехническим специальностям.

УДК
ББК 22.313

© Издательство Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, 2014

ВВЕДЕНИЕ

При расчете линий передачи часто приходится определять входное сопротивление линии, нагруженной известным по величине сопротивлением, производить расчет эквивалентного сопротивления линии в заданном сечении, производить пересчет эквивалентного сопротивления линии из одного сечения в другое, рассчитывать параметры элементов согласованной линии передачи с нагрузкой и т.д. Для таких расчетов могут быть использованы формулы, полученные в теории длинных линий. Однако указанные вычисления часто оказываются весьма громоздкими и утомительными.

Расчеты, связанные с определением параметров, характеризующих режим работы линии передачи, могут быть значительно упрощены путем использования круговых диаграмм. Наибольшее практическое применение получили круговая диаграмма полных сопротивлений в полярных координатах и круговая диаграмма полных проводимостей. Эти диаграммы представляют собой графическое изображение основных соотношений из теории линий передачи, удобное для быстрого и достаточно точного решения многих задач.

В пособии будут рассмотрены принцип построения указанных круговых диаграмм линий передачи без потерь и наиболее важные примеры практического их применения.

Тема 1. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Передачу электромагнитной энергии при помощи длинных линий на практике стремятся осуществлять с наибольшим коэффициентом полезного действия, то есть в первую очередь с минимальными потерями энергии в самой линии. Поэтому эффективная линия передачи характеризуется малыми потерями. Если же потери в линии невелики, то ее с достаточной для практических целей степенью точности можно рассматривать как линию без потерь.

Рассмотрим линию без потерь с волновым сопротивлением ρ_l , представленную на рис. 1.1. Пусть линия нагружена на конце сопротивлением $Z_H = r_H + jx_H$.

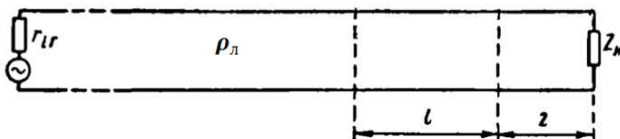


Рис. 1.1. Схема линии без потерь

В начале линии подключен генератор синусоидальных колебаний с круговой частотой ω . Предположим, что генератор согласован с линией, то есть его внутреннее сопротивление $r_{ir} = \rho_l$.

Из теории длинных линий известно, что напряжение и ток без потерь в любом сечении, отстоящем на расстоянии z от ее конца, могут быть представлены в виде следующих сумм падающих и отраженных волн напряжений и тока:

$$\begin{aligned} \dot{U}_z &= \dot{U}_{\text{пад}} e^{j\beta'z} + \dot{U}_{\text{отр}} e^{-j\beta'z}, \\ \dot{I}_z &= \dot{I}_{\text{пад}} e^{j\beta'z} - \dot{I}_{\text{отр}} e^{-j\beta'z}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где

$$\dot{i}_{\text{отр}} = \frac{\dot{U}_{\text{отр}}}{\rho_l},$$

где $\dot{U}_{\text{пад}}$, $\dot{I}_{\text{пад}}$, $\dot{U}_{\text{отр}}$ и $\dot{I}_{\text{отр}}$ — комплексные амплитуды падающих и отраженных волн соответственно напряжения и тока в конце линии; β' — постоянная распространения волны в линии.

Как известно,

$$\beta' = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1.2)$$

где λ – длина волны в линии.

В теории линий передачи широко используется понятие «коэффициент отражения по напряжению» (p_z). Он равен отношению напряжения отраженной волны в каком-либо сечении z линии к напряжению падающей волны в этом же сечении. Следовательно,

$$p_z = \frac{\dot{U}_{отр} e^{-j\beta' z}}{\dot{U}_{пад} e^{j\beta' z}} = |p_z| e^{-j2\beta' z}. \quad (1.3)$$

Из этого выражения следует, что модуль коэффициента отражения постоянен на протяжении всей линии, а его фаза изменяется вдоль линии по линейному закону.

Комплексное сопротивление линии в сечении z может быть определено из выражения (1.1):

$$Z_z = \frac{\dot{U}_z}{\dot{I}_z} = \rho_n \frac{1 + p_z}{1 - p_z}. \quad (1.4)$$

Таким образом, сопротивление линии в произвольном сечении можно легко определить, если известны параметры волновой линии и коэффициент отражения волны в этом сечении линии.

Из формулы (1.4) получаем выражение, с помощью которого может быть определен коэффициент отражения волны в заданном сечении линии, если известно эквивалентное сопротивление в этом сечении:

$$p_z = \frac{Z_z - \rho_n}{Z_z + \rho_n}. \quad (1.5)$$

Поскольку модуль $|p_z|$ постоянен на протяжении всей линии, лучше определить его следующим образом:

$$|p_z| = \left| \frac{Z_z - \rho_n}{Z_z + \rho_n} \right| = |p_n|, \quad (1.6)$$

где $|p_n|$ – модуль коэффициента отражения волны от нагрузки линии.

Последнее выражение играет очень важную роль в расчетах линий передачи.

Рассмотрим выражение (1.7) для случая разомкнутой цепи ($Z_n = \infty$) и для случая короткозамкнутой линии ($Z_n = 0$). В обоих случаях модуль коэффициента отражения будет равен единице. Если же линия нагружена согласованным сопротивлением ($Z_n = \rho_n$), то модуль коэффициента отражения будет равен нулю. Следовательно, при любых значениях сопротивления нагрузки линии модуль коэффициента

отражения волны в этой линии никогда не превышает единицы и не становится меньше нуля:

$$0 \leq |p_n| \leq 1. \quad (1.7)$$

Чтобы придать дальнейшим рассуждениям обобщающий характер, то есть сделать их пригодными для любых линий передачи независимо от величины их волновых сопротивлений, пронормируем значение комплексного сопротивления линии $Z_z = r_z + jx_z$. Для этого разделим величину Z_z на величину ρ_n :

$$Z'_z = \frac{Z_z}{\rho_n} = \frac{r_z}{\rho_n} + j \frac{x_z}{\rho_n} = r'_z + jx'_z. \quad (1.8)$$

Величины Z'_z , r'_z и x'_z носят название соответственно нормированного полного сопротивления, нормированного активного сопротивления и нормированного реактивного сопротивления линии в сечении z .

С учетом произведенного нормирования выражения (1.4) и (1.5) принимают вид:

$$Z'_z = \frac{1 + p_z}{1 - p_z}, \quad (1.9)$$

$$p_z = \frac{Z'_z - 1}{Z'_z + 1} = \frac{(r'_z - 1) + jx'_z}{(r'_z + 1) + jx'_z}. \quad (1.10)$$

Эти выражения показывают, что в любом сечении линии между значениями полного сопротивления линии и коэффициента отражения волны существует однозначное соответствие. Таким образом, режим работы линии передачи целиком характеризуется коэффициентом отражения.

Трансформацию полного сопротивления и коэффициента отражения волны вдоль линии можно представить графиком в виде круговых диаграмм, весьма удобных практических расчетов.

Представим графически трансформацию коэффициента отражения волны вдоль линии без потерь. Как следует из выражения (1.3), коэффициент отражения может быть выражен в алгебраическом виде следующим образом:

$$p_z = \text{Re}p_z + \text{Im}p_z = p'_z + jp''_z, \quad (1.11)$$

где $\text{Re}p_z = p'_z$ – действительная компонента коэффициента отражения;

$\text{Im}p_z = jp''_z$ – мнимая компонента коэффициента отражения.

В соответствии с этим коэффициент отражения в сечении z линии может быть представлен в виде точки комплексной плоскости, вдоль действительной и мнимой осей которой отложены соответственно $\text{Re}p_z$ и $\text{Im}p_z$, как показано на рис. 1.2.

Как следует из рисунка, эта точка определяется прямоугольными координатами p'_z и jp''_z .

Такая форма записи и изображения коэффициента отражения является отображением в прямоугольной системе координат и понадобится нам в дальнейшем. Однако при графическом изображении трансформации коэффициента отражения волны вдоль линии удобнее воспользоваться не прямоугольными, а полярными координатами. Для этого на указанной комплексной плоскости введем полярные координаты (рис. 1.3).

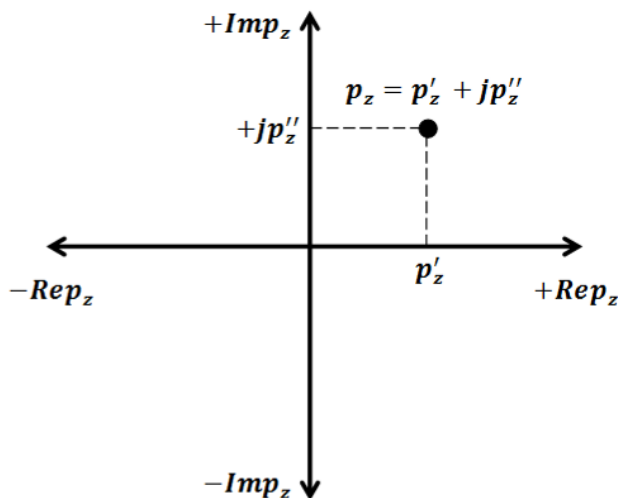


Рис.1.2. Изображение коэффициента отражения в прямоугольных координатах

Таковыми координатами являются радиус-вектор R , исходящий из начала координат (полюса) в рассматриваемую точку комплексной плоскости, и полярный угол φ между действительной (полярной) осью и радиусом-вектором. Этот угол считается положительным при его отсчете от полярной оси против направления вращения часовой стрелки. Если рассматриваемая нами точка A является отображением на комплексной плоскости значения коэффициента отражения в сечении z линии, то в соответствии с теорией комплексных чисел длина радиус-вектора R будет численно равна модулю коэффициента отражения, а угол φ – его аргументом.

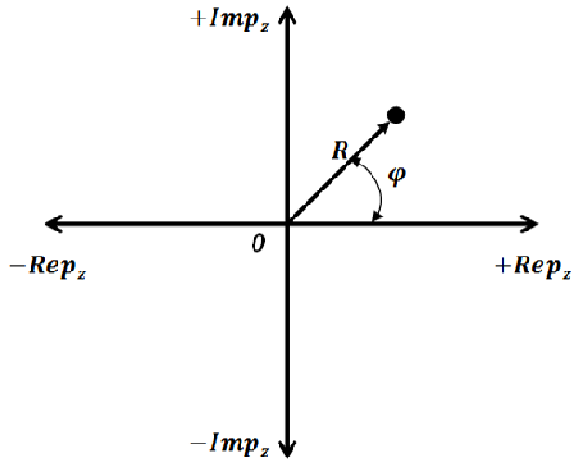


Рис. 1.3. Изображение коэффициента отражения в полярных координатах

Следовательно,

$$R = |p_z| = \sqrt{p_z'^2 + p_z''^2},$$

$$\varphi = \arg p_z = \operatorname{arctg} \frac{p_z''}{p_z'}.$$
(1.12)

Итак, точка A , являющаяся отображением коэффициента отражения на комплексной плоскости, может быть определена полярными координатами R и φ .

Как отмечалось раньше, модуль коэффициента отражения волны в линии никогда не превышает единицы. Поэтому при дальнейших рассуждениях можно ограничиться рассмотрением лишь той части комплексной плоскости, которая находится внутри окружности единичного радиуса (рис. 1.4).

Пусть точка A соответствует значению коэффициента отражения в сечении z линии, определяемому выражением (1.3). Как следует из этого выражения и соотношения (1.7), модуль коэффициента отражения $|p_z| = |p_H|$, а его фаза $\varphi_z = -2\beta'z$.

Определим на этой же плоскости точку B , соответствующую коэффициенту отражения в сечении линии, находящемся на расстоянии l от сечения z по направлению к генератору (против направления движения часовой стрелки), как показано на рис. 1.4.

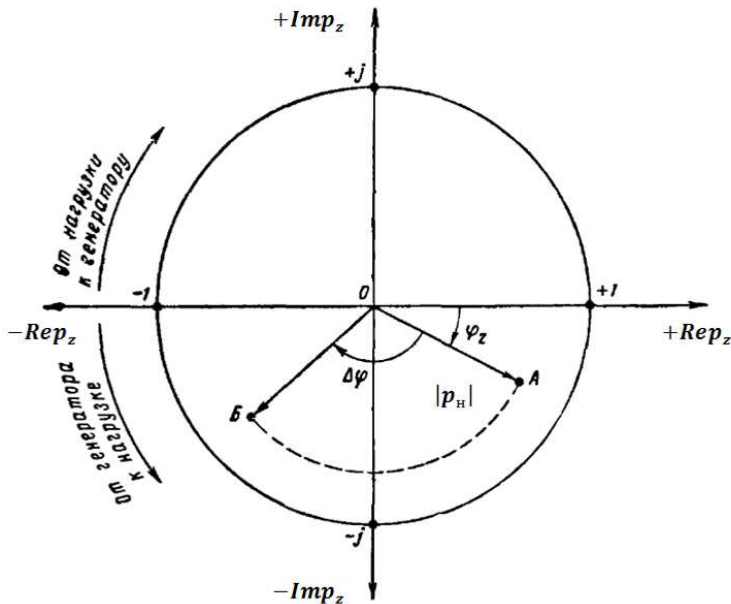


Рис. 1.4. Графические операции на комплексной плоскости

Напишем выражение для коэффициента отражения в сечении $(z + l)$ линии:

$$p_{z+l} = |p_{z+l}| e^{-j(2\beta'z + 2\beta'l)}. \quad (1.13)$$

Как указывалось выше, модуль коэффициента отражения при движении вдоль линии остается постоянным. Следовательно, $|p_{z+l}| = |p_z| = |p_H|$. Значит искомая точка B должна находиться на окружности радиуса $|p_H|$ с центром в начале координат.

Фазовый угол коэффициента отражения в сечении $(z + l)$ отличается от фазового угла коэффициента отражения в сечении z на величину

$$\Delta\varphi = \varphi_z - \varphi_{z+l} = -2\beta'l = -4\pi \frac{l}{\lambda}.$$

Это значит, что движение в комплексной плоскости по окружности с радиусом $|p_H|$ из точки A в точку B должно происходить по направлению вращения часовой стрелки на угол $\Delta\varphi$. Таким образом, положение точки B на плоскости определено.

Целесообразно подчеркнуть, что в соответствии с выражением (1.3) движению вдоль линии *от нагрузки к генератору* соответствует движе-

ние на комплексной плоскости по окружности постоянного модуля коэффициента отражения в направлении вращения часовой стрелки.

Наоборот, движению вдоль линии *от генератора к нагрузке* соответствует движение по окружности постоянного модуля коэффициента отражения против направления вращения часовой стрелки (рис. 1.4).

Важно также отметить, что при продвижении вдоль линии на длину

$l = \frac{\lambda}{4}$ радиус-вектор коэффициента отражения поворачивается на угол

$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} = -\pi$, то есть на половину длины окружности. При про-

движении вдоль линии на длину $l = \frac{\lambda}{2}$ радиус-вектор коэффициента

отражения поворачивается на угол $\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2} = -2\pi$, то есть со-

вершает один полный оборот. Это обстоятельство в полном соответствии с выражением (1.3) свидетельствует о том, что фаза коэффициента отражения при движении вдоль линии изменяется периодически. Период изменения фазы равен половине длине волны, что соответствует углу 2π на комплексной плоскости. При продвижении вдоль линии от генератора к нагрузке происходит увеличение фазы коэффициента отражения, при продвижении вдоль линии от нагрузки к генератору – уменьшение фазы коэффициента отражения.

Итак, семейство концентрических окружностей на комплексной плоскости, центры которых находятся в начале координат, а радиусы изменяются от 0 до 1, является семейством кривых $|p_z| = \text{const}$. Семейством кривых постоянной фазы коэффициента отражения ($\arg p_z = \text{const}$) являются радиальные прямые, исходящие из начала координат. Оба семейства кривых показаны на рис. 1.5.

Для определения фазы коэффициента отражения на периферии круговой диаграммы может быть нанесена градусная или радианная шкала. Однако для практических расчетов гораздо удобнее иметь на периферии круговой диаграммы шкалу поворота в долях длины волны, то есть шкалу, соответствующую продвижению вдоль линии на расстояния, выраженные в долях длины волны. Такая шкала обычно и наносится на круговую диаграмму.

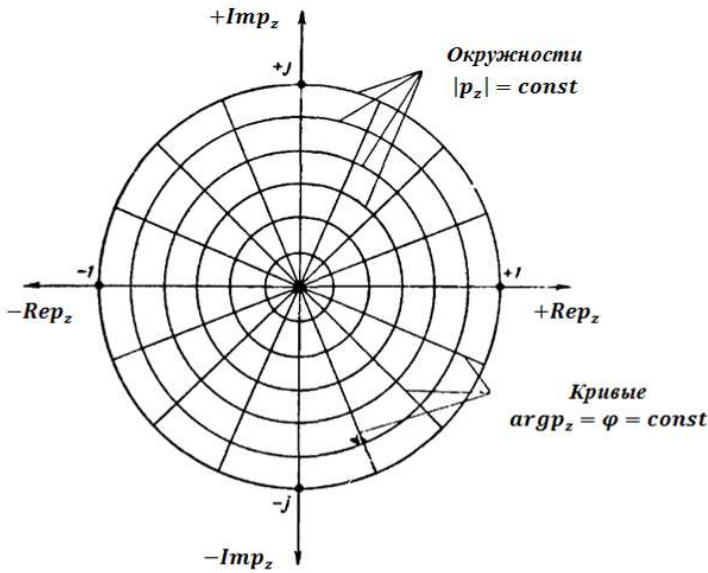


Рис. 1.5. Семейство кривых постоянных фазы и модуля коэффициента отражения

Кривые $|p_z| = \text{const}$ и $\arg p_z = \text{const}$ имеют простую форму и, как правило, не наносятся на круговую диаграмму.

Для определения полного сопротивления линии с помощью круговой диаграммы на рассмотренную комплексную плоскость коэффициента отражения дополнительно наносят два семейства кривых. Эти семейства кривых дают возможность весьма просто определить нормированные активное и реактивное сопротивления в заданном сечении линии по известной величине коэффициента отражения в этом сечении. Рассмотрим подробно метод построения указанных семейств кривых. Воспользуемся сначала выражениями (1.8) и (1.9) для определения полного нормированного сопротивления линии в наиболее характерных точках круговой диаграммы. Из этих выражений получаем

$$Z'_z = r'_z + jx'_z = \frac{1 + p_z}{1 - p_z}. \quad (1.14)$$

В начале координат $p_z = 0$. Следовательно, начало координат на круговой диаграмме соответствует режиму бегущей волны ($Z'_z = \rho_n$), так как в соответствии с выражением (1.14) в этой точке $x'_z = 0$ и $r'_z = 1$.

В точке $p_z = |p_z|e^{-j0} = +1$ получаем $Z'_z = \infty$.

Следовательно, точка $p_z = +1$ на круговой диаграмме соответствует холостому ходу линии (разомкнутому концу линии).

В точке $p_z = |p_z|e^{-j\pi} = 1 \cos \pi = -1$ в соответствии с выражением (1.14) получаем $Z'_z = 0$.

Следовательно, точка $p_z = -1$ на круговой диаграмме соответствует короткому замыканию линии (короткозамкнутому концу линии).

Для любого значения коэффициента отражения, соответствующего точкам, лежащим на вещественной оси комплексной плоскости, выражение $\frac{1+p_z}{1-p_z}$ вещественно. Это означает, что вещественная ось комплексной плоскости коэффициента отражения соответствует чисто активным нормированным сопротивлениям линии ($Z'_z = r'_z$ и $x'_z = 0$), значения которых изменяются от 0 до ∞ в направлении от точки $p_z = -1$ к точке $p_z = +1$, как видно из рис. 1.6.

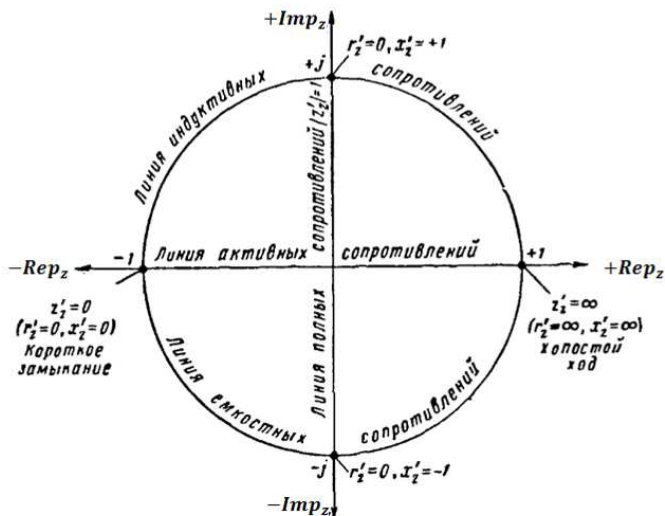


Рис. 1.6. Семейство кривых сопротивлений коэффициента отражения на комплексной плоскости круговой диаграммы

В точке $p_z = |p_z|e^{j\frac{\pi}{2}} = 1 \left(j \sin \frac{\pi}{2} \right) = +j$ выражение для Z'_z имеет

вид

$$Z'_z = \frac{1+p_z}{1-p_z} = \frac{1+j}{1-j} = j, \text{ то есть } r'_z = 0 \text{ и } x'_z = 1.$$

Следовательно, точка $p_z = +j$ на круговой диаграмме соответствует индуктивному сопротивлению линии $X_z = +\rho_1$.

Аналогично в точке $p_z = |p_z|e^{j\frac{3\pi}{2}} = 1 \left(j \sin \frac{3\pi}{2} \right) = -j$ получаем $Z'_z = \frac{1+p_z}{1-p_z} = \frac{1+j}{1-j} = j$, то есть $r'_z = 0$ и $x'_z = -1$.

Следовательно, точка $p_z = -j$ на круговой диаграмме соответствует емкостному сопротивлению линии $x_z = -\rho_1$.

Для любого другого значения коэффициента отражения, соответствующего точкам, лежащим на мнимой оси комплексной плоскости, и равного $p_z = -ja$, где a – вещественное число, изменяющееся в пределах от -1 до +1, получаем:

$$Z'_z = \frac{1+ja}{1-ja} \text{ и } |Z'_z| = \frac{\sqrt{1+a^2}}{\sqrt{1+a^2}} = 1.$$

Это значит, что мнимая ось комплексной плоскости коэффициента отражения соответствует полным нормированным сопротивлениям линии, модули которых равны единице (рис. 1.6).

Исходя из простых физических соображений, можно определить, каким значениям нормированных сопротивлений соответствуют различные участки окружности единичного радиуса на комплексной плоскости коэффициента отражения. Действительно, в любой точке окружности единичного радиуса модуль коэффициента отражения равен единице. Это значит, что мощность отраженной волны в линии равна мощности падающей волны, то есть *сопротивление нагрузки линии без потерь чисто реактивное*. Следовательно, *окружность единичного радиуса является линией чисто реактивных нормированных сопротивлений*. В соответствии с выражением (1.9) для чисто реактивных нормированных сопротивлений получаем

$$jx'_z = \frac{1 + e^{j\varphi}}{1 - e^{j\varphi}} = \frac{e^{-j\frac{\varphi}{2}} + e^{j\frac{\varphi}{2}}}{e^{-j\frac{\varphi}{2}} - e^{j\frac{\varphi}{2}}} = j \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}. \quad (1.15)$$

Из этого выражения следует, что для верхней полуокружности единичного радиуса ($0 < \varphi < \pi$) $x'_z > 0$, а для нижней полуокружности ($\pi < \varphi < 2\pi$) $x'_z < 0$. Таким образом, верхняя полуокружность соответствует нормированным индуктивным сопротивлениям, а нижняя – нормированным емкостным сопротивлениям.

Любой точке, расположенной на комплексной плоскости внутри окружности единичного радиуса, соответствует определенное значение комплексного нормированного сопротивления линии. При этом в верхней полуплоскости полное сопротивление линии имеет индуктивный характер, а в нижней полуплоскости – емкостной.

Чтобы с помощью круговой диаграммы можно было непосредственно определять по известному коэффициенту отражения соответствующие значения нормированного активного и реактивного сопротивлений линии, на комплексной плоскости, как указывалось ранее, наносятся два дополнительных семейства кривых. Каждая из кривых первого семейства представляет собой геометрическое место точек постоянных значений нормированного активного сопротивления линии. Каждая из кривых второго семейства является геометрическим местом точек постоянных значений нормированного реактивного сопротивления линии.

Выведем уравнения этих кривых.

Как следует из выражения (1.11), коэффициент отражения может быть представлен в виде суммы его действительной и мнимой компонент. Тогда в соответствии с выражением (1.14) нормированные активное и реактивное сопротивления линии также можно выразить через действительную и мнимую компоненты коэффициента отражения. Действительно, используя указанные выражения, получаем:

$$r'_z = \frac{1 - p_z'^2 - p_z''^2}{(1 - p_z')^2 + p_z''^2}, \quad (1.16)$$

$$x'_z = \frac{2p_z''}{(1 - p_z')^2 + p_z''^2}.$$

Следовательно, каждой точке на комплексной плоскости коэффициента отражения с осями $\text{Re}p_z$ и $\text{Im}p_z$ (рис. 1.2) соответствуют определенные значения r'_z и x'_z . Выражения (1.16) можно переписать в следующем виде:

$$p_z'^2 + p_z''^2 - 2p_z' \frac{r'_z}{1 + r'_z} - \frac{1 - r'_z}{1 + r'_z} = 0, \quad (1.17)$$

$$p_z'^2 + p_z''^2 - 2p_z' - 2\frac{1}{x'_z} p_z'' + 1 = 0. \quad (1.18)$$

Если сравнивать два последних выражения с общим уравнением второго порядка в декартовой системе координат, то можно легко установить, что они являются уравнениями окружностей.

Действительно, уравнение (1.17) для заданного значения r'_z является уравнением окружности с радиусом $R = \frac{1}{1 + p_z'}$, координаты центра которой определяются выражениями

$$p_z' = \frac{r'_z}{1 + r'_z}, \quad (1.19)$$

$$p_z'' = 0.$$

Следовательно, для всех возможных значений нормированного активного сопротивления ($0 \leq r'_z \leq \infty$) уравнение (1.18) определяет

семейство окружностей, центры которых лежат на действительной оси комплексной плоскости коэффициента отражения, а радиусы изменяются от единицы (при $r_z^f = 0$) до нуля (при $r_z^f = \infty$).

Таким образом, задаваясь различными значениями r_z^f , можно рассчитать и построить на комплексной плоскости семейство окружностей постоянных значений нормированных активных сопротивлений линии. Семейство таких окружностей, рассчитанных для $r_z^f = 0; 0,25; 0,5; 1; 2; 4$ и 8 , показано на рис. 1.7.

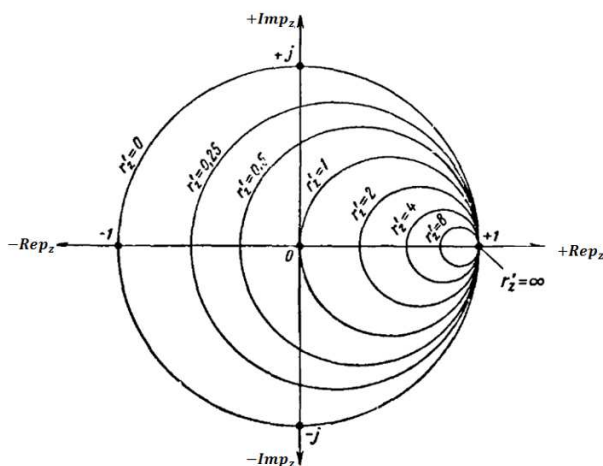


Рис. 1.7. Семейство окружностей постоянных значений для r_z^f

Как видно из рисунка, все окружности постоянных значений r_z^f касаются точки, определяемой координатами

$$\begin{aligned} p_z^f &= +1, \\ p_z^{f'} &= 0. \end{aligned}$$

Тот факт, что при $r_z^f = 0$ мы получили окружность с центром в начале координат и радиусом, равным единице, подтверждает сделанный ранее вывод: окружность единичного радиуса на комплексной плоскости коэффициента отражения является линией чисто реактивных нормированных сопротивлений.

Уравнение (1.18) для заданного значения r_z^f является уравнением окружности с радиусом $R^f = 1/r_z^f$, координаты центра которой определяются выражениями

$$p_z^f = 1, \tag{1.20}$$

$$p_z'' = \frac{1}{x_z'}.$$

Следовательно, для всех возможных значений нормированного сопротивления ($-\infty \leq x_z' \leq \infty$) уравнение (1.18) определяет семейство окружностей постоянных значений x_z' на комплексной плоскости коэффициента отражения. Центры этих окружностей находятся на прямой, параллельной мнимой оси и проходящей через абсциссу $p_z' = +1$. Семейство таких окружностей, рассчитанных для $x_z' = 0; \pm 0,25; \pm 0,5; \pm 1; \pm 2; \pm 4$ и ± 8 , показано на рис. 1.8.

При $x_z' = 0$, радиусе окружности $R' = \infty$, участок этой окружности, лежащей внутри окружности единичного радиуса, представляет собой прямую линию, совпадающую с действительной осью. Это подтверждает тот факт, что действительная ось комплексной плоскости коэффициента отражения внутри окружности единичного радиуса (то есть кроме точки $p_z' = +1$) является линией чисто активных нормированных сопротивлений.

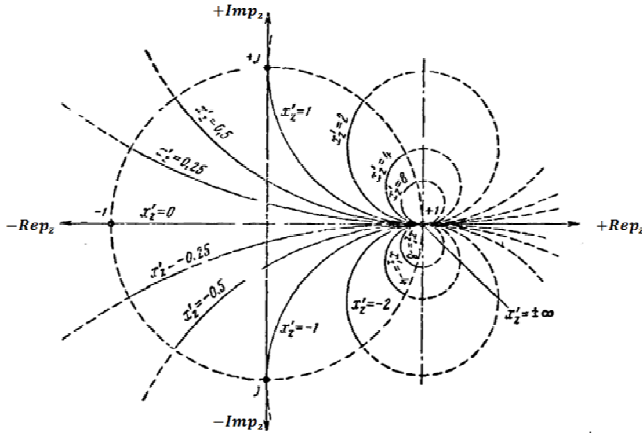


Рис. 1.8. Семейство окружностей постоянных значений для x_z'

При $x_z' = \pm\infty$ радиусы соответствующих окружностей равны нулю, то есть эти окружности вырождаются в точку с координатами $p_z' = +1, p_z'' = 0$.

Полученным ранее выводам соответствует и тот факт, что окружности постоянных положительных значений x_z' расположены над дей-

ствительной осью, а окружности постоянных отрицательных значений x'_z – под действительной осью комплексной плоскости.

Определенные таким образом семейства окружностей постоянных значений r'_z и x'_z наносят (в одном масштабе) на семейство окружностей постоянных значений модуля коэффициента отражения. При этом по-прежнему рабочая часть круговой диаграммы ограничивается окружностью единичного радиуса. Пример такой диаграммы показан на рис. 1.9 (окружности постоянных значений $|p_z|$ проведены пунктиром).

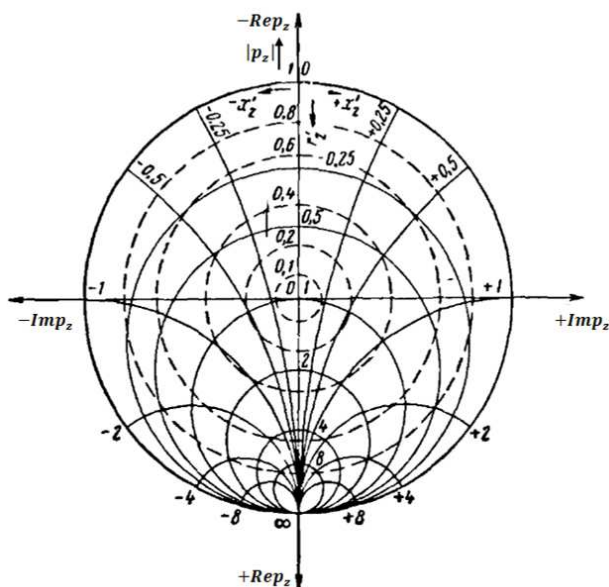


Рис. 1.9. Выполнение масштабов $|p_z|$, r'_z и $\pm x'_z$ на круговой диаграмме

Для обеспечения большей точности расчета круговую диаграмму выполняют с достаточно мелкими сетками нормированных сопротивлений и коэффициентов отражения. При этом масштабы $|p_z|$ и r'_z указывают на действительной оси комплексной плоскости, а масштабы $\pm x'_z$ – на внутренней стороне окружности единичного радиуса (рис. 1.9).

Часто для удобства работы с круговой диаграммой масштаб модуля коэффициента отражения наносят на прозрачную планку, которая может вращаться вокруг центра диаграммы. Это освобождает от нанесения на диаграмму окружностей постоянных значений модуля коэффициента отражения, которое затеняет диаграмму и затрудняет работу с ней.

В большинстве практических случаев измерение величины коэффициента отражения встречает серьезные трудности, так как для этого необходимо разделить падающую и отраженную волны, одновременно существующие в линии. Поэтому режим работы линии передачи удобнее характеризовать другой величиной, легко определяемой экспериментально. Такой величиной является коэффициент стоячей волны в линии, обозначенной обычно буквой s (или сокращенно КСВ). Этот коэффициент численно равен отношению амплитуды высокочастотного напряжения в максимуме стоячей волны к напряжению в минимуме этой волны. Чтобы подчеркнуть, что измеряемой величиной является напряжение, иногда пользуются сокращенной записью следующего вида:

$$s = \text{КСВН} = \frac{|\dot{U}|_{\max}}{|\dot{U}|_{\min}}. \quad (1.21)$$

Для упрощения записи знаки модулей опускают:

$$\text{КСВН} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}. \quad (1.22)$$

Величина, обратная коэффициенту стоячей волны, называется *коэффициентом бегущей волны* в линии по напряжению и обозначается буквой k (или сокращенно КБВН).

Следовательно,

$$k = \text{КБВН} = \frac{1}{s} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}. \quad (1.23)$$

Оба эти коэффициента остаются постоянными на протяжении всей линии без потерь и характеризуют режим работы линии в целом. Однако, как будет показано ниже, использование понятия коэффициента бегущей волны при работе с круговой диаграммой является более удобным, чем понятия коэффициента стоячей волны.

Если применяют понятие КБВН на круговой диаграмме, то вместо окружностей $|p_z| = \text{const}$ наносят окружности соответствующих значений $k = \text{const}$. Переход от первых окружностей ко вторым легко осуществляется при использовании следующего соотношения:

$$k = \frac{1 - |p_z|}{1 + |p_z|}. \quad (1.24)$$

При этом масштаб КБВН совпадает с масштабом r_z' в пределах отрицательной действительной полуоси. Действительно (рис. 1.4), в пределах этой полуоси коэффициент отражения $p_z = -|p_z|$. Следовательно, в соответствии с выражением (1.10) получаем (для отрицательной полуоси)

$$Z = \frac{1 + p_z}{1 - p_z} = \frac{1 - |p_z|}{1 + |p_z|} = r_z' = k. \quad (1.25)$$

Отсюда следует, что коэффициент бегущей волны в линии может быть определен по круговой диаграмме без каких-либо дополнительных вычис-

лений. Для этого достаточно отсчитать значение нормированного активного сопротивления, соответствующее точке пересечения окружности из семейства $|p_z| = \text{const}$, проходящей через рассматриваемую точку круговой диаграммы, с отрицательной действительной полуосью. Здесь же необходимо отметить, что значение нормированного активного сопротивления в точке пересечения этой окружности с положительной действительной полуосью численно равно значению коэффициента стоячей волны в линии. В самом деле, в пределах положительной действительной полуоси $p_z = |p_z|$.

Следовательно,

$$Z = \frac{1 + p_z}{1 - p_z} = \frac{1 + |p_z|}{1 - |p_z|} = r_z' = \frac{1}{k} = s. \quad (1.26)$$

Отсюда видно, что по круговой диаграмме без каких-либо дополнительных вычислений может быть также определен коэффициент стоячей волны в линии.

Из сказанного следует, что каждой точке на круговой диаграмме соответствуют определенные значения r_z' , x_z' и k (или s , или p_z), равные значениям параметров их окружностей, пересекающихся в рассматриваемой точке диаграммы.

Фазу коэффициента отражения, как указывалось ранее, наносят в долях длины волны с внешней стороны окружности единичного радиуса в виде двух шкал. Одна из этих шкал (внутренняя) соответствует перемещению вдоль линии от сечения, соответствующего начальной точке на круговой диаграмме, в сторону нагрузки и снабжается надписью «Относительные длины l/λ (к нагрузке)». Другая шкала (внешняя) соответствует перемещению

вдоль линии в обратном направлении и снабжается надписью «Относительные длины l/λ (к генератору)». Практически в качестве

начальной точки шкалы фазы коэффициента отражения наиболее целесообразно взять ту точку на круговой диаграмме, которая соответствует нормированному сопротивлению линии, равному нулю ($r_z' = 0$, $x_z' = 0$). Эта точка соответствует узлу напряжения в линии без потерь со стоячей волной ($k = 0$) и обозначена на круговой диаграмме нулем. Положение сечения исследуемой линии, соответствующего минимуму напряжения, может быть определено экспериментально. Так как распределение амплитуды напряжения вдоль линии повторяется с периодичностью, равной половине длине волны, то для определенности считают, что начальной точке на круговой диаграмме соответствует тот узел напряжения в исследуемой линии, который расположен на ближайшем расстоянии от нагрузки (так называемый первый узел напряжения).

На рисунке 1.10 показана круговая диаграмма полных сопротивлений, обычно используемая для практических расчетов (сетка окружностей $k = \text{const}$ нанесена пунктиром).

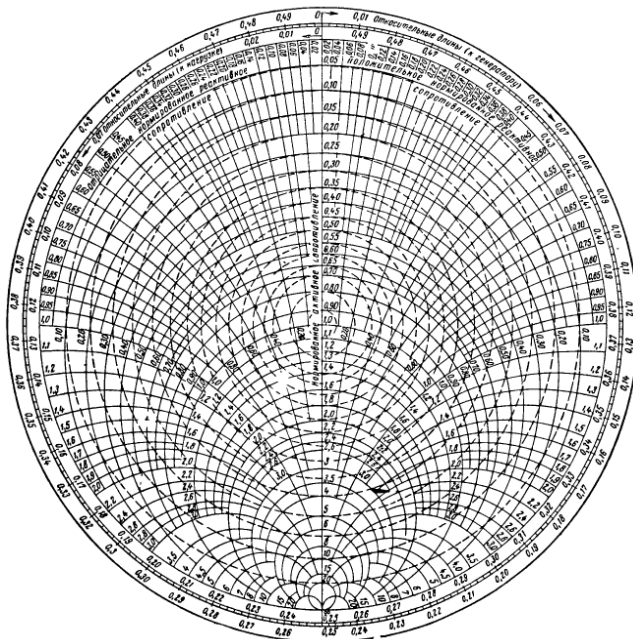


Рис. 1.10. Диаграмма Волперта-Смита

Контрольные вопросы

1. Что является основным критерием эффективности передачи энергии по длинным линиям?
2. Перечислить основные параметры, характеризующие длинные линии.
3. Как определяется коэффициент отражения по напряжению?
4. Как определяется комплексное сопротивление линии?
5. Как представляется коэффициент отражения на комплексной плоскости?
6. Показать на диаграмме Вольперта-Смита семейство окружностей постоянного модуля коэффициента отражения.
7. Показать на диаграмме Вольперта-Смита семейство кривых постоянной фазы коэффициента отражения.
8. Почему сопротивление нагрузки линии без потерь является чисто реактивным?
9. Рассказать устройство круговой диаграммы Вольперта-Смита.

Тема 2. КРУГОВАЯ ДИАГРАММА ПОЛНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ

При решении ряда задач, связанных в первую очередь с расчетом элементов согласования линии передачи с нагрузкой, удобнее пользоваться не понятиями нормированных сопротивлений, а понятиями нормированных проводимостей. Однако и в этих случаях может быть с успехом использована круговая диаграмма полных сопротивлений. При этом остаются в силе все числовые обозначения круговой диаграммы сопротивлений, меняется только физический смысл ее характерных точек.

Доказательство применимости круговой диаграммы полных сопротивлений в терминах полных проводимостей может быть произведено следующим образом.

Так как проводимость является величиной, обратной сопротивлению, то с учетом принятых ранее обозначений напомним следующее выражение для комплексной проводимости линии передачи в сечении Z :

$$Y_z = \frac{1}{Z_z} = g_z + jb_z, \quad (2.1)$$

где

$$g_z = \frac{r_z}{r_z^2 + x_z^2}$$

и

$$b_z = -\frac{x_z}{r_z^2 + x_z^2}.$$

Волновая (характеристическая) проводимость линии составляет величину

$$Y_n = \frac{1}{\rho_n}, \quad (2.2)$$

Разделив почленно выражение (2.1) на (2.2.), получим выражение для полной нормированной проводимости линии в сечении Z :

$$Y'_z = \frac{Y_z}{Y_n} = g'_z + jb'_z,$$

где $g'_z = \frac{g_z}{Y_n} = g_z \rho_n$ – нормированная активная проводимость линии в сечении z ;

$b'_z = \frac{b_z}{Y_n} = b_z \rho_n$ – нормированная реактивная проводимость линии в сечении z .

Подставляя выражение $Z'_z = \frac{1}{Y'_z} = \frac{1}{g'_z + jb'_z}$ в выражение (1.11), получаем

$$p_z = \frac{Z'_z - 1}{Z'_z + 1} = \frac{1 - Y'_z}{1 + Y'_z} = -\frac{(g'_z - 1) + jb'_z}{(g'_z + 1) + jb'_z} \quad (2.3)$$

и

$$Y'_z = \frac{1 - p_z}{1 + p_z}. \quad (2.4)$$

Эти выражения показывают, что в любом сечении линии между полной нормированной проводимостью и коэффициентом отражения имеется однозначное соответствие.

Легко заметить, что выражения (2.3) и (2.4) отличаются от соответствующих им выражений (1.10) и (1.9), связывающих полное нормированное сопротивление линии в том же сечении с коэффициентом отражения, только знаком коэффициента отражения. Следовательно, семейства окружностей постоянных значений активных и реактивных сопротивлений совпадают с соответствующими семействами окружностей, рассчитанных для тех же числовых значений активных и реактивных проводимостей.

Началом отсчета на диаграмме полных проводимостей по-прежнему является точка, обозначенная нулем. Однако эта точка теперь соответствует минимуму проводимостей, то есть максимуму напряжения в линии. Как и ранее, считают, что начальная точка на круговой диаграмме полных проводимостей соответствует тому сечению линии без потерь со стоячей волной ($k = 0$), в котором находится ближайшая к нагрузке пучность напряжения.

С учетом указанных изменений методика работы с круговой диаграммой полных проводимостей такая же, как и методика работы с круговой диаграммой полных сопротивлений.

Контрольные вопросы

1. Доказать применимость круговой диаграммы полных сопротивлений в терминах полных проводимостей.
2. Показать соответствие между полной нормированной проводимостью и коэффициентом отражения в любом сечении линии.

Тема 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

3.1. Примеры применения круговых диаграмм

3.1.1. Отображение сопротивления линии в виде точки на круговой диаграмме

Простейшей манипуляцией с круговой диаграммой полных сопротивлений является нахождение на ней точки, соответствующей известному сопротивлению линии в заданном сечении. В частном случае таким сопротивлением может быть входное сопротивление линии или сопротивление нагрузки.

Пусть, например, входное сопротивление линии с волновым сопротивлением $\rho_{\lambda} = 75$ Ом равно $Z_{\text{вх}} = (60 + j45)$ Ом. Найдем на круговой диаграмме точку, соответствующую этому сопротивлению. Поскольку диаграмма построена в относительных единицах, то есть для нормирования значений сопротивлений, делим входное сопротивление линии на ее волновое сопротивление и получаем

$$Z'_{\text{вх}} = \frac{Z_{\text{вх}}}{\rho_{\lambda}} = \frac{60}{75} + j \frac{45}{75} = (0,8 + j0,6) \text{ отн. ед.}$$

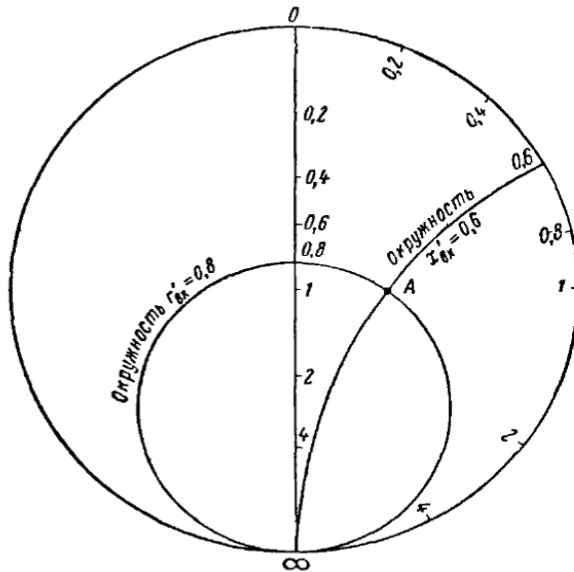


Рис. 3.1. Определение входного сопротивления на круговой диаграмме

Находим на круговой диаграмме (рис. 3.1) окружность нормированного активного сопротивления, обозначенную цифрой 0,8 (при необходимости следует произвести интерполяцию – показать на примере). Находим также дугу окружности нормированного положительного реактивного сопротивления, обозначенную цифрой 0,6.

Точка пересечения этих кривых (точка А) является отображением входного сопротивления на плоскости круговой диаграммы.

3.1.2. Определение КБВ (КСВ) в линии с известной нагрузкой

Пусть линия с волновым сопротивлением $\rho_{\lambda} = 75$ Ом нагружена сопротивлением $Z_{\text{н}} = (41,25 - j22,5)$ Ом. Определим с помощью круговой диаграммы коэффициент бегущей волны в этой линии. Нормируем сопротивление нагрузки:

$$Z'_{\text{н}} = \frac{Z_{\text{н}}}{\rho_{\lambda}} = \frac{41,25}{75} - j \frac{22,5}{75} = (0,55 - j0,3) \text{ отн. ед.}$$

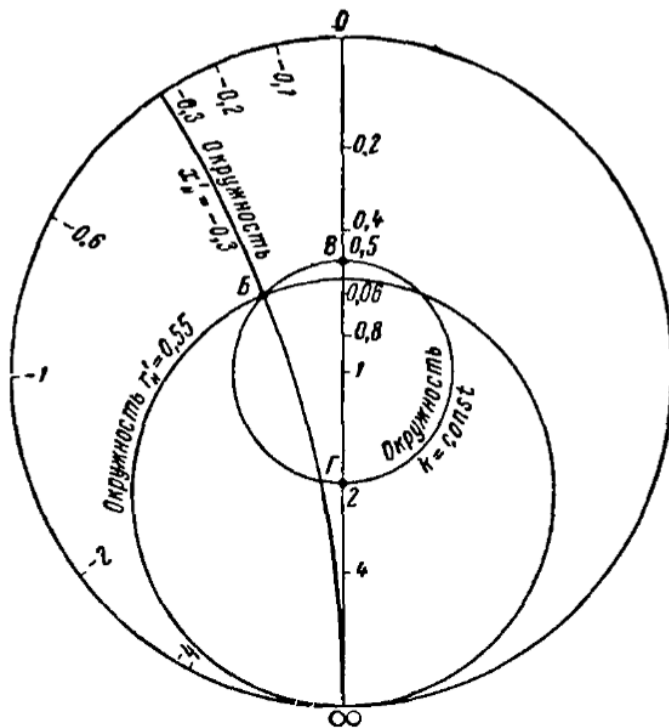


Рис. 3.2. Определение КБВН в линии с известной нагрузкой

Находим на круговой диаграмме точку пересечения окружностей, соответствующих значениям $r_{\text{н}}' = 0,55$ и $x_{\text{н}}' = -0,3$ (точка Б на рис. 3.2).

Для определения коэффициента бегущей волны в линии проводим из центра круговой диаграммы (точка 1 на рис. 3.2.) окружность, проходящую через точку Б. Как указывалось ранее, нормированное активное сопротивление в точке пересечения окружности $k = \text{const}$ с прямой $x_{\text{н}}' = 0$ (точка В на рис. 3.2) численно равно коэффициенту бегущей волны в линии. В данном случае КБВН равен 0,5.

Нормированное активное сопротивление во второй точке пересечения окружности $k = \text{const}$ с прямой $x_{\text{н}}' = 0$ (точка Г на рис. 3.2.) численно равна коэффициенту стоячей волны в рассматриваемой линии. В данном случае КСВН равен 2.

3.1.3. Определение входного сопротивления линии

С помощью круговой диаграммы достаточно просто можно определить входное сопротивление линии, длина, волновое сопротивление, сопротивление нагрузки и длина рабочей волны которой известны. Определение входного сопротивления линии в этом случае сводится к нахождению окружности постоянного значения КБВН, проходящей через точку, соответствующую значению нормированного сопротивления нагрузки, и к повороту по этой окружности от нагрузки в сторону генератора (по часовой стрелке) на угол, соответствующий отношению длины линии к длине рабочей волны в этой линии $\frac{l_{\text{л}}}{\lambda}$. Получаемая таким образом точка на окружности $k = \text{const}$ соответствует нормированному входному сопротивлению линии. Нормированные активную и реактивную составляющие входного сопротивления линии определяют по соответствующим окружностям, проходящим через найденную точку. Числовое значение входного сопротивления линии определяется путем *умножения нормированного входного сопротивления на волновое сопротивление линии.*

Например, пусть имеется линия длиной $l_{\text{л}} = 5,7$ см с волновым сопротивлением $\rho_{\text{л}} = 75$ Ом, нагруженная сопротивлением $Z_{\text{н}} = (41,25 - j22,5)$ Ом и работающая на волне $\lambda = 30$ см. Определим с помощью круговой диаграммы входное сопротивление линии.

Определяем нормированное сопротивление нагрузки:

$$Z_{\text{н}}' = \frac{Z_{\text{н}}}{\rho_{\text{л}}} = \frac{41,25}{75} - j \frac{22,5}{75} = (0,55 - j0,3) \text{ отн. ед.}$$

Как следует из предыдущего примера, этому значению нагрузки соответствует точка Б на круговой диаграмме (рис. 3.3).

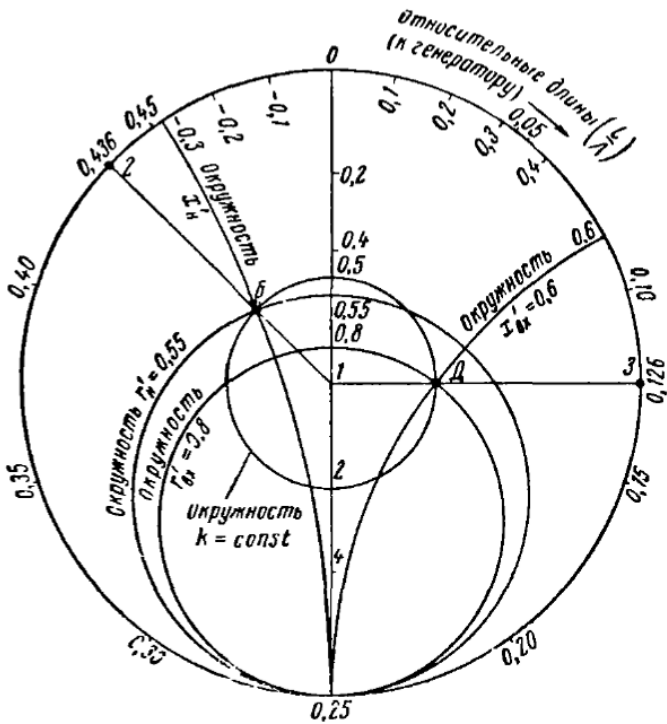


Рис. 3.3. Определение входного сопротивления линии

Определяем относительную длину линии: $\frac{l_{\pi}}{\lambda} = \frac{5,7}{30}$.

Проводим прямую линию 1-2, проходящую из центра круговой диаграммы через точку Б до окружности единичного радиуса. Точка пересечения этой прямой с окружностью единичного радиуса (точка 2 на рис. 3.3) соответствует фазе коэффициента отражения в конце линии (на нагрузке). Эта точка определяет исходный фазовый угол, соответствующий $\frac{l}{\lambda} = 0,436$. Затем поворачиваем прямую 1-2 по часовой стрелке (к генератору) до положения 1-3, в котором эта прямая пересекает окружность единичного радиуса в точке 3, соответствующей значению $\frac{l}{\lambda} = 0,436 + 0,19 = 0,626$ по шкале фазы коэффициента отражения. Поскольку шкала относительных длин имеет период, равный $\frac{l}{\lambda} = 0,5$ (рис. 3.3), точке 3 соответствует значение $\frac{l}{\lambda} = 0,626 - 0,5 = 0,126$.

Эта точка соответствует фазе коэффициента отражения на входе линии.

Точка пересечения прямой 1–3 с окружностью $k = \text{const}$ (точка Д на рис. 3.3) соответствует нормированному входному сопротивлению линии. Как видно из рисунка, через точку Д проходят окружности $r'_{\text{вх}} = 0,8$ и $x'_{\text{вх}} = 0,6$. Следовательно, нормированное входное сопротивление линии составляет $Z'_{\text{вх}} = (0,8 + j0,6)$ отн. ед.

Умножая полученное значение $Z'_{\text{вх}}$ на волновое сопротивление линии, получаем искомое значение входного сопротивления: $Z_{\text{вх}} = Z'_{\text{вх}} \rho_n = (0,8 + j0,6) \cdot 75 = (60 + j45)$ Ом.

Примечание. Поворачивая прямую 1–2 от исходного положения по часовой стрелке на угол, соответствующий какому-либо заданному значению $\frac{x}{\lambda} < \frac{l_n}{\lambda}$, можно таким же образом определить полное сопротивление линии в сечении, отстоящем от нагрузки на расстоянии X см.

3.1.4. Определение полной проводимости линии по заданной величине полного сопротивления

Пусть линия с волновым сопротивлением ρ_n имеет в сечении Z полное сопротивление $Z_z = r_z + jx_z$. Тогда в соответствии с выражением (2.1) полная проводимость линии в этом сечении будет равна: $Y_z = g_z + jb_z$.

Для нормирования значений сопротивления и проводимости выше были получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} Z'_z &= r'_z + jx'_z \\ Y'_z &= g'_z + jb'_z. \end{aligned}$$

Из теории длинных линий известно, что произведение полных сопротивлений в двух сечениях линии, находящихся друг от друга на расстоянии в четверть длины волны, равно квадрату волнового сопротивления линии. Следовательно, можно записать:

$$Z_z Z_{z+\lambda/4} = \rho_n^2. \quad (3.1)$$

Это уравнение называется уравнением четвертьволнового трансформатора.

Для нормированных сопротивлений уравнение (3.1) записывается в следующем виде:

$$Z'_z Z'_{z+\lambda/4} = 1, \quad (3.2)$$

где $Z'_z = Z_z / \rho_n$, а $Z'_{z+\lambda/4} = Z_{z+\lambda/4} / \rho_n$.

Из уравнения (3.2) следует, что

$$Z'_{z+\lambda/4} = \frac{1}{Z'_z} = Y'_z \quad (3.3)$$

и

$$Z'_z = \frac{1}{Z'_{z+\lambda/4}} = Y'_{z+\lambda/4}. \quad (3.4)$$

Выражение (3.4) свидетельствует о том, что нормированное полное сопротивление линии в сечении z численно равно нормированной полной проводимости этой линии в сечении, расположенном на расстоянии в четверть длины волны от сечения z .

Выражение (3.3) позволяет сделать вывод о том, что нормированное полное сопротивление линии в сечении, отстоящем на четверть длины волны от сечения z , численно равно нормированной полной проводимости этой линии в сечении z .

Как известно, перемещению вдоль линии на четверть длины волны $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ соответствует поворот по окружности $k = \text{const}$ на 180° . Это определяет следующие весьма полезные свойства круговой диаграммы: для определения нормированной проводимости линии в сечении z по заданному нормированному сопротивлению линии в этом сечении достаточно найти точку, расположенную на окружности $k = \text{const}$ диаметрально противоположную точке, соответствующей заданному нормированному сопротивлению линии.

Нормированное сопротивление, соответствующее найденной точке на круговой диаграмме, определяют обычным способом. Это сопротивление и будет численно равно нормированной проводимости линии в сечении z . Величину искомой проводимости линии в этом сечении получают путем деления найденной нормированной проводимости на волновое сопротивление линии.

В качестве примера определим с помощью круговой диаграммы входную проводимость линии, рассмотренной выше. Напомним, что волновое сопротивление этой линии $\rho_{\lambda} = 75$ Ом, а входное сопротивление $Z_{\text{вх}} = (60 + j45)$ Ом.

Как видно из рис. 3.3, нормированному входному сопротивлению линии на плоскости круговой диаграммы соответствует точка D . Чтобы не затенять этот рисунок, указанная точка перенесена на рис. 3.4.

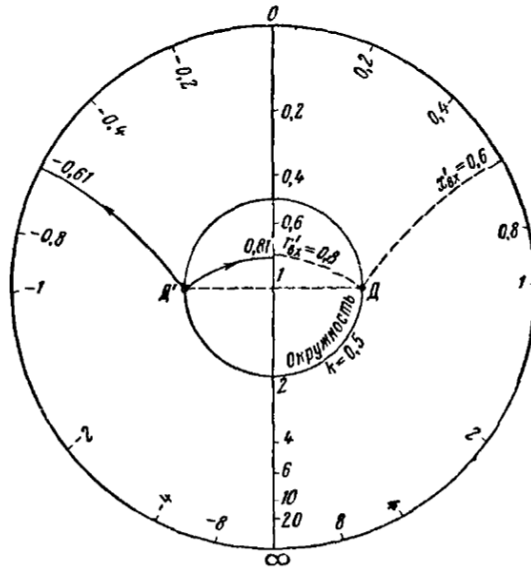


Рис. 3.4. Определение полной проводимости линии по величине ее полного сопротивления

Диаметрально противоположной ей точкой является точка D' . Пользуясь круговой диаграммой, определяем нормированную активную и реактивную проводимости, соответствующие точке D' . Из рисунка 3.4 видно, что эти проводимости равны

$$\begin{aligned} g'_{вх D'} &= 0,81, \\ b'_{вх D'} &= -0,61 \end{aligned}$$

Следовательно, искомая входная проводимость линии

$$Y_{вх} = \frac{g'_{вх D'}}{\rho_n} + j \frac{b'_{вх D'}}{\rho_n} = \frac{0,81}{75} - j \frac{0,61}{75} = (0,0108 - j0,008) \text{ сим.}$$

Примечание. Ту же самую величину входной проводимости линии получаем расчетным путем:

$$\begin{aligned} Y_{вх} &= \frac{1}{Z_{вх}} = \frac{r_{вх}}{r_{вх}^2 + x_{вх}^2} - j \frac{x_{вх}}{r_{вх}^2 + x_{вх}^2} = \frac{60}{60^2 + 45^2} - j \frac{45}{60^2 + 45^2} = \\ &= \frac{60}{5625} - j \frac{45}{5625} = (0,0107 - j 0,008) \text{ сим.} \end{aligned}$$

Сравнивая полученные в обоих случаях результаты, убеждаемся в том, что точность определения входных проводимостей по круговой диаграмме вполне удовлетворяет практическим требованиям.

3.1.5. Определение сопротивления нагрузки линии

С помощью круговой диаграммы может быть определено сопротивление нагрузки линии, если известны следующие параметры линии: длина, волновое сопротивление, входное сопротивление и длина волны (λ) . Действительно, при наличии этих данных задача становится обратной задачей определения входного сопротивления линии. Однако практически более доступными для измерений и достаточными для определения сопротивления нагрузки линии являются коэффициент бегущей волны в линии и расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимума напряжения в линии.

Как известно, геометрическим местом минимумов напряжения в линии на круговой диаграмме полных сопротивлений является радиус, соединяющий центр диаграммы с точкой короткого замыкания $(Z_z^i = 0)$, являющейся начальной точкой отсчета на круговой диаграмме. Измеренная величина КБВВ в линии определяет на круговой диаграмме соответствующую окружность $k = \text{const}$, которая пересекает линию минимумов в одной-единственной точке. Пусть такой точкой является точка A (рис. 3.5).

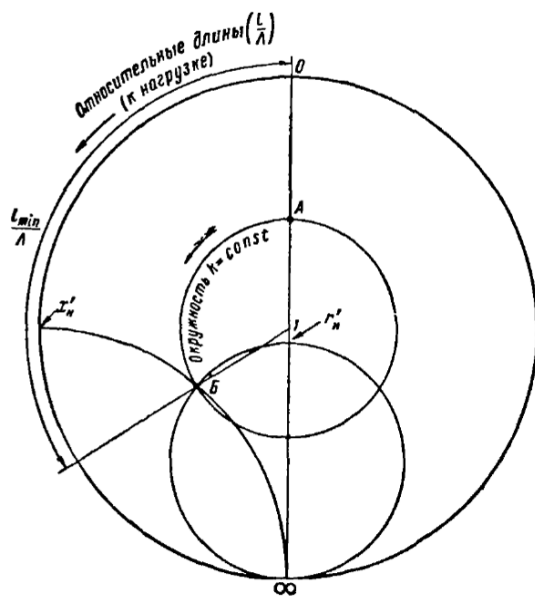


Рис. 3.5. Определение сопротивления нагрузки линии

Таким образом, точка A отображает на круговой диаграмме полное нормированное сопротивление линии в сечении, где находится ближайший к нагрузке минимум напряжения.

Поскольку расстояние от минимума напряжения до нагрузки (l_{\min}) известно из эксперимента, дальнейшее решение задачи не представляет труда. Действительно, в этом случае задача сводится к определению сопротивления нагрузки линии длиной l_{\min} по известной величине входного сопротивления. Достаточно теперь произвести поворот по окружности $k = \text{const}$ от точки A против часовой стрелки (k нагрузке) на угол, соответствующий величине $\frac{l_{\min}}{\lambda}$, чтобы в соответствующей точке (точка B на рис. 3.5) отсчитать значение нормированного сопротивления нагрузки линии. Далее обычным путем определяют искомую величину сопротивления нагрузки.

При работе с линиями передачи не всегда бывает удобно непосредственно измерять расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимума напряжения. В таком случае можно воспользоваться результатом измерения расстояния от нагрузки до любого другого минимума напряжения в линии, поскольку увеличение длины линии на величину, равную целому числу полуволн, не изменяет результатов расчета.

Величина (λ) определяется экспериментально как удвоенное расстояние между двумя соседними минимумами стоячей волны в линии.

3.1.6. Определение проводимости нагрузки линии

Методика определения проводимости нагрузки линии с помощью круговой диаграммы полных проводимостей по известному значению КБВН в линии и измеренному расстоянию от нагрузки до ближайшего минимума напряжения совпадает с рассмотренной методикой определения по тем же данным сопротивления нагрузки линии. Отличие заключается в том, что начальная точка на круговой диаграмме полных проводимостей соответствует не минимуму, а максимуму напряжения стоячей волны в линии. Минимуму напряжения стоячей волны в линии на круговой диаграмме соответствует точка бесконечно большой проводимости ($Y_2 = \infty$). Линия, соединяющая эту точку с центром круговой диаграммы, является геометрическим местом точек минимумов напряжения.

Как и прежде, величина КБВН в линии определяет на круговой диаграмме полных проводимостей соответствующую окружность $k = \text{const}$. Эта окружность пересекает линию минимумов напряжения в одной-единственной точке (точка A на рис. 3.6).

Таким образом, точка A отображает на круговой диаграмме полную нормированную проводимость линии в сечении, совпадающем с местом расположения ближайшего к нагрузке минимума напряжения.

Для определения нормированной проводимости нагрузки, как и ранее, следует произвести поворот по окружности $k = \text{const}$ от точки A против

часовой стрелки (к нагрузке) на угол, соответствующий величине $\frac{l_{min}}{\lambda}$.
 Найденная таким образом точка B (рис. 3.6) является отображением на плоскости круговой диаграммы полных проводимостей нормированной проводимости нагрузки линии.

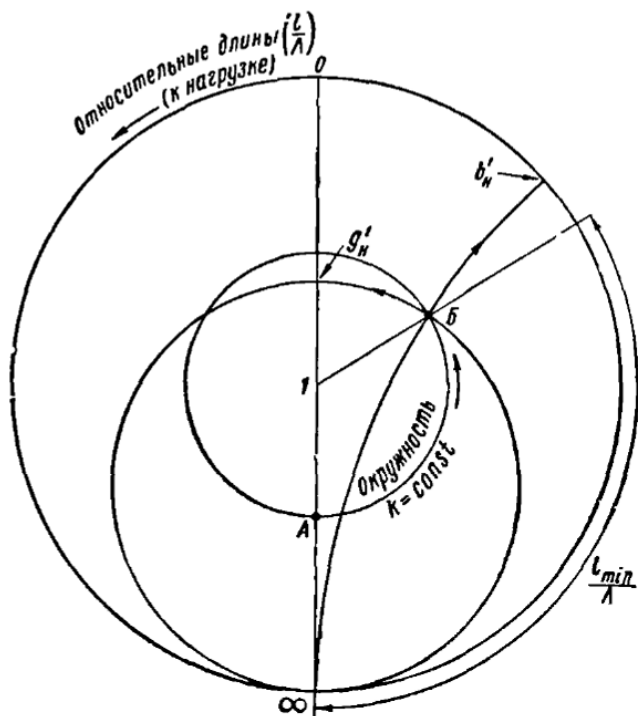


Рис. 3.6. Определение проводимости нагрузки линии

Значение нормированной проводимости определяют по диаграмме обычным путем.

Искомую проводимость нагрузки линии определяют делением нормированной проводимости нагрузки на волновое сопротивление линии.

3.1.7. Согласование линии с нагрузкой при помощи четвертьволнового трансформатора

Согласование линии передачи с нагрузкой является одной из наиболее важных практических задач. Необходимость такого согласования возникает всякий раз, когда линия нагружается заведомо не согласован-

ной нагрузкой или когда соединяются друг с другом различные по волновым сопротивлениям участки линии передачи. В таких случаях для обеспечения согласования между концом линии и нагрузкой или между двумя различными участками линии включают так называемые трансформаторы полных сопротивлений.

Одним из наиболее простых и в то же время наиболее широко используемых трансформаторов сопротивлений является четвертьволновый трансформатор, или четвертьволновая вставка. Этот трансформатор представляет собой однородный отрезок линии длиной в четверть длины волны, волновое сопротивление которого вычисляется определенным образом.

Свойства отрезка однородной линии без потерь длиной в четверть волны хорошо известны и частично были рассмотрены выше.

В частном случае, когда отрезок линии длиной $\frac{\lambda}{4}$ с волновым сопротивлением $\rho_{\text{тр}}$ нагружен чисто активным сопротивлением $r_{\text{н}}$, его входное сопротивление в соответствии с уравнением (3.1) будет чисто активным и равным

$$r_{\text{вх}} = \frac{\rho_{\text{тр}}^2}{r_{\text{н}}} \quad (3.5)$$

Это свойство четвертьволнового отрезка линии широко применяется для согласования двух линий с различными волновыми сопротивлениями, а также для согласования линии с нагрузкой, представляющей собой чисто активное сопротивление.

Условия согласования в этих случаях проиллюстрированы на рис. 3.7.

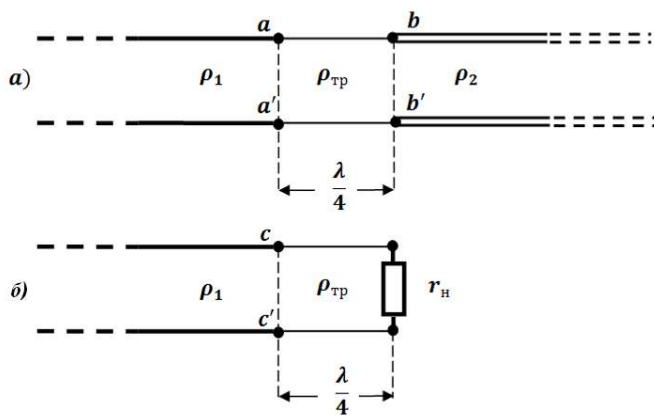


Рис. 3.7. Иллюстрация согласования двух линий с помощью четвертьволнового отрезка

Математические условия согласования выражены равенствами:

$$r_{aa'} = \frac{\rho_{\text{ТР}}^2}{\rho_2} = \rho_1, \quad r_{cc'} = \frac{\rho_{\text{ТР}}^2}{r_{\text{Н}}} = \rho_1. \quad (3.6)$$

Четвертьволновый трансформатор используется также для согласования линии с нагрузкой, представляющей собой комплексное сопротивление. При этом трансформатор включается в том ближайшем к нагрузке сечении линии, в котором сопротивление является чисто активным.

Место включения четвертьволнового трансформатора в линию с комплексной нагрузкой может быть определено с помощью круговой диаграммы полных сопротивлений. Схема вычислений показана на рис. 3.8.

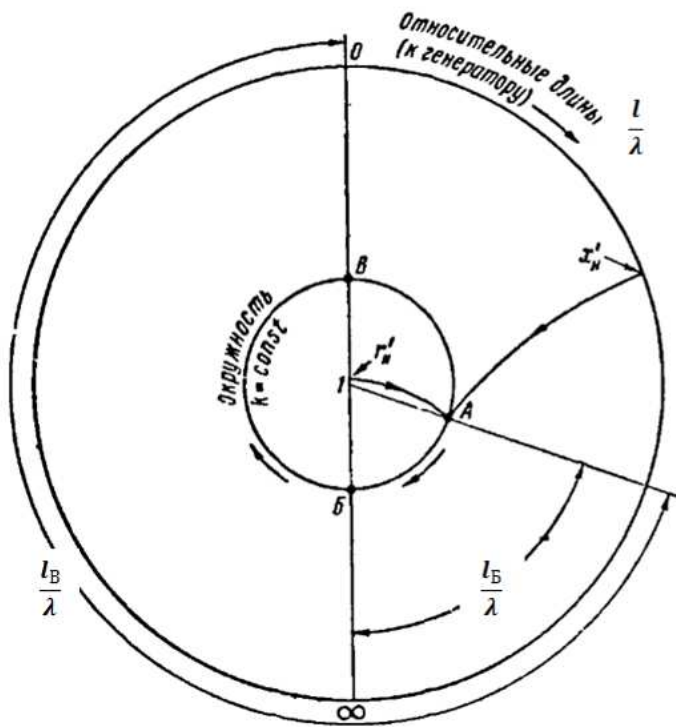


Рис. 3.8. Схема вычислений четвертьволнового трансформатора

Пусть, например, линия передачи с волновым сопротивлением $\rho_{\text{л}}$ нагружена сопротивлением, нормированное значение которого равно $Z'_{\text{Н}} = r'_{\text{Н}} + jx'_{\text{Н}}$. На рисунке 3.8 это сопротивление отображено в виде точ-

ки A , через которую проведена окружность $k = \text{const}$, соответствующая значению КБВН в исследуемой линии.

Как известно, перемещению вдоль линии от нагрузки к генератору соответствует движение по окружности $k = \text{const}$ с линией чисто активных сопротивлений (точки B и B' на рис. 3.8). Эти точки отображают на круговой диаграмме сопротивлений линии в соответствующих сечениях. Так, например, точка B , соответствующая сечению линии, в котором расположен максимум напряжения, является отображением чисто активного сопротивления линии, равного

$$Z_B = \frac{\rho_l}{k}. \quad (3.7)$$

Это сечение, как видно из круговой диаграммы, расположено на наименьшем расстоянии от нагрузки, равном l_B .

Точка B' , соответствующая сечению линии, в котором расположен минимум напряжения, является отображением также чисто активного сопротивления линии, равного

$$Z_{B'} = \rho_l k. \quad (3.8)$$

Это сечение, как видно из круговой диаграммы, расположено на расстоянии $l_{B'}$ от нагрузки. Расстояния l_B и $l_{B'}$ легко определить с помощью круговой диаграммы, если известна длина волны λ в линии. Пояснения к вычислениям даны на рис. 3.9.

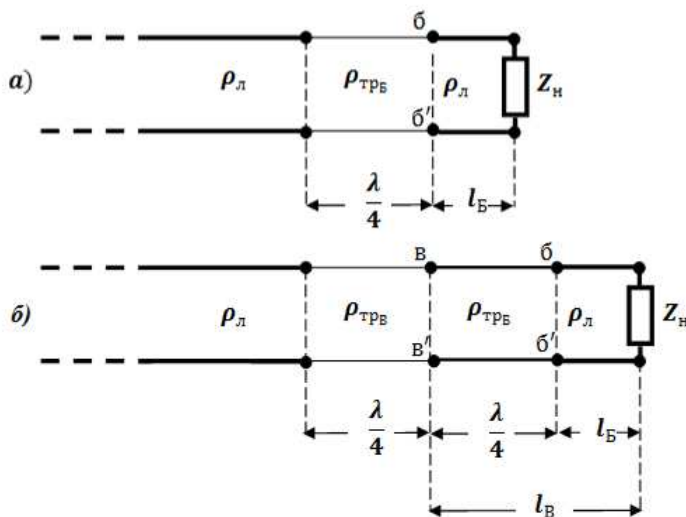


Рис. 3.9. Пояснение к вычислениям l_B и $l_{B'}$

Следовательно, для согласования исследуемой линии с комплексной нагрузкой необходимо разрезать линию в сечении bb' , находящемся от нагрузки на расстоянии l_B (рис. 3.9а), и включить в это сечение четвертьволновый трансформатор с волновым сопротивлением

$$\rho_{\text{трБ}} = \sqrt{Z_B \rho_{\text{л}}} = \frac{\rho_{\text{л}}}{\sqrt{k}} \quad (3.9)$$

Возможен и второй вариант согласования линии с нагрузкой при помощи четвертьволнового трансформатора. При этом линия должна быть разрезана сечением vv' , находящимся от нагрузки на расстоянии $l_B = l_B + \frac{\lambda}{4}$ (рис. 3.9,б). В это сечение следует включить четвертьволновый трансформатор с волновым сопротивлением

$$\rho_{\text{трВ}} = \sqrt{Z_B \rho_{\text{л}}} = \rho_{\text{л}} \sqrt{k} \quad (3.10)$$

Примечание. Диапазон волн, в пределах которого сохраняется практически приемлемое согласование линии с нагрузкой при помощи четвертьволнового трансформатора, невелик. Это объясняется тем, что при изменении длины волны относительная длина трансформатора изменяется. Эта длина будет равна $\frac{\lambda}{4}$ только на одной фиксированной частоте, на которой был произведен расчет трансформатора.

3.1.8. Согласование линии с нагрузкой при помощи одного параллельного шлейфа

Согласование линии передачи с нагрузкой при помощи параллельного шлейфа, называемого обычно одношлейфным трансформатором полных сопротивлений, производится в том случае, когда сопротивление нагрузки является комплексным. Шлейф подключается параллельно к линии в том ближайшем к нагрузке сечении, в котором активная составляющая проводимости линии равна ее волновой проводимости. При этом длина шлейфа берется такой, чтобы его входная проводимость была равна по величине и противоположна по знаку реактивной проводимости линии в точках подключения шлейфа. Возможность согласования линии передачи с нагрузкой при помощи параллельного шлейфа впервые была доказана В.В. Татариновым.

Действительно, как указывалось выше, в максимуме напряжения сопротивление линии является чисто активным и равным $\frac{\rho_{\text{л}}}{k}$. В минимуме напряжения сопротивление линии также является чисто активным и равным $\rho_{\text{л}} k$. Поэтому в некотором сечении линии, расположенном между минимумом и максимумом напряжения, активное сопротивление линии будет равно ее волновому сопротивлению. Следовательно, в этом

сечении и активная проводимость линии будет равна ее волновой проводимости.

Пусть это сечение линии соответствует сечению aa' , как показано на рис. 3.10а. Если в этом сечении подключить параллельно к линии короткозамкнутый или разомкнутый реактивный шлейф (рис. 3.10б) такой длины, при которой суммарная реактивная проводимость между точками подключения шлейфа будет равна нулю, то на всем протяжении линии от генератора до места подключения шлейфа будет существовать только бегущая волна.

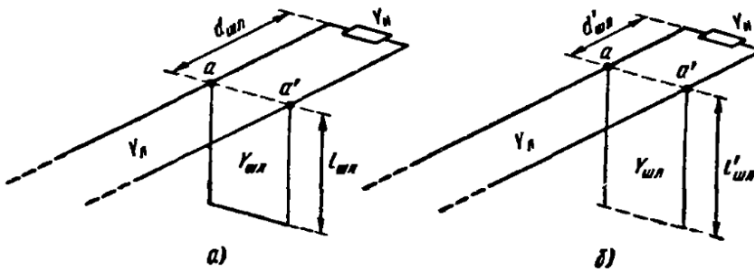


Рис. 3.10. Пояснение к вычислению параллельного шлейфа

Условие согласования линии с нагрузкой в этом случае будет иметь следующий вид:

$$Y_{aa'l} + Y_{aa'шл} = Y_{л} \quad (3.11)$$

где $Y_{aa'l}$ – полная проводимость линии в точках подключения к ней шлейфа;

$Y_{aa'шл}$ – входная проводимость шлейфа;

$Y_{л}$ – волновая проводимость линии.

Если известны величины $Y_{aa'l}$ и $Y_{л}$, то длину шлейфа $l_{шл}$ и расстояние от нагрузки до места подключения шлейфа к линии $d_{шл}$ определяют по формуле (3.11) с учетом выражения, характеризующего зависимость входной проводимости шлейфа от его длины. При этом волновую проводимость и конструкцию шлейфа чаще всего выбирают, руководствуясь следующими соображениями.

Длина настраивающего шлейфа должна быть по возможности наиболее короткой. В большинстве случаев удается выбрать длину шлейфа меньше четверти длины волны. При этом короткозамкнутый шлейф имеет отрицательную входную проводимость, а разомкнутый шлейф – положительную. Следовательно, короткозамкнутый шлейф целесообразно применять тогда, когда реактивная проводимость линии в точках

подключения шлейфа положительна. Наоборот, разомкнутый шлейф необходимо использовать тогда, когда реактивная проводимость линии в точках подключения отрицательна.

Короткозамкнутый параллельный шлейф подключается к настраиваемой линии на участке в одну восьмую длины волны, расположенном от максимума к минимуму напряжения в сторону генератора (рис. 3.11а). Разомкнутый шлейф подключается к линии на участке, расположенном от максимума к минимуму напряжения в сторону нагрузки (рис. 3.11б).

Однако в некоторых практических случаях тип параллельного шлейфа и место его подключения к линии выбирают из чисто конструктивных соображений. При этом расчет стремятся произвести так, чтобы выполнение согласующего устройства линии было наиболее простым. С этой точки зрения наиболее пригодным является короткозамкнутый шлейф, так как имеющийся у него короткозамыкающий мостик можно использовать в качестве опоры. Кроме того, потери в короткозамкнутом шлейфе меньше, чем в разомкнутом.

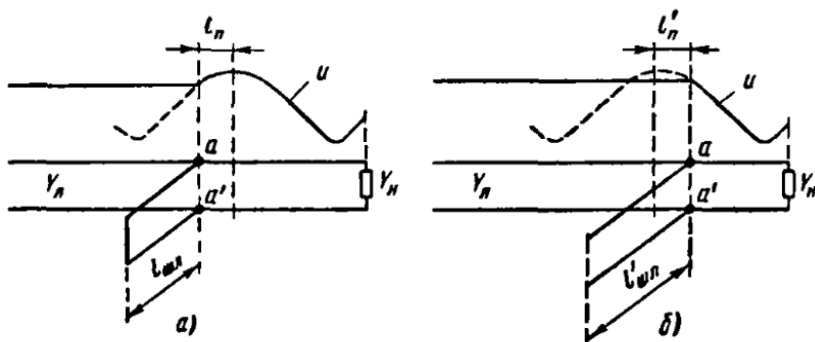


Рис. 3.11. Подключение параллельных короткозамкнутого и разомкнутого шлейфов к линии

Чтобы быстрее и проще производить расчеты для согласования линии с нагрузкой при помощи параллельного шлейфа, можно использовать круговую диаграмму полных проводимостей. Действительно, пусть короткозамкнутый шлейф подключен параллельно к линии в сечении aa , как показано на рис. 3.12.

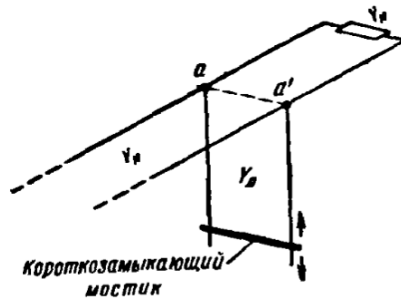


Рис. 3.12. Подключение короткозамкнутого шлейфа к линии

Длина шлейфа может быть изменена путем перемещения его короткозамыкающего мостика. Напишем выражение для суммарной проводимости в точках $a - a'$ линии:

$$Y_{aa'\Sigma} = Y_{aa'l} + Y_{aa'\text{шл}}. \quad (3.12)$$

Принимая во внимание, что $Y_{aa'l} = g_{aa'l} + jb_{aa'l}$ и $Y_{aa'\text{шл}} = jb_{aa'\text{шл}}$, получаем

$$Y_{aa'\Sigma} = g_{aa'l} + j(b_{aa'l} + b_{aa'\text{шл}}) = g_{aa'l} + jb_{aa'\Sigma}. \quad (3.13)$$

Если считать, что волновая проводимость шлейфа равна волновой проводимости линии ($Y_{\text{шл}} = Y_l = \frac{1}{\rho_n}$), то нормированная суммарная проводимость в точках $a - a'$ будет равна

$$Y'_{aa'\Sigma} = \frac{Y_{aa'\Sigma}}{Y_l} = g_{aa'l}\rho_n + jb_{aa'\Sigma}\rho_n = g'_{aa'l} + jb'_{aa'\Sigma}. \quad (3.14)$$

В этом случае условиями согласования линии с нагрузкой будут следующие равенства:

$$\begin{aligned} g'_{aa'l} &= 1, \\ b'_{aa'\Sigma} &= 0. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Следовательно, для согласования линии с нагрузкой параллельный шлейф должен быть подключен в том сечении линии, в котором нормированное значение активной проводимости линии равно единице. При этом длина шлейфа должна быть выбрана такой, чтобы суммарная реактивная проводимость в этом сечении линии была равна нулю.

Пусть нормированная проводимость нагрузки линии с волновой проводимостью Y_l равна

$$Y_n' = g_n' + jb_n', \quad (3.16)$$

где $g_n' = g_n\rho_n$; $b_n' = b_n\rho_n$.

На круговой диаграмме полных проводимостей (рис. 3.13) этой проводимости соответствует точка A .

Как было показано, для обеспечения согласования реактивный параллельный шлейф должен быть подключен в линии в том сечении, где $g'_{aa'l} = 1$. Перемещению вдоль линии от нагрузки до места подключения шлейфа соответствует на круговой диаграмме вращение от точки A по окружности $k = \text{const}$ в направлении вращения часовой стрелки до точки пересечения этой окружности с окружностью $g'_{aa'l} = 1$. Как видно из рис. 3.13, имеются две точки пересечения окружности $k = \text{const}$ с окружностью $g'_{aa'l} = 1$ — точки B и B' . В любом из двух сечений линии, соответствующих точкам B и B' и отстоящих от нагрузки соответственно на расстояниях l_B и $l_{B'}$, может быть подключен к линии параллельный шлейф. Эти расстояния легко определить с помощью круговой диаграммы (рис. 3.13), если известна длина волны (λ) в линии. Как указывалось, подключение шлейфа к линии в сечении, находящемся на небольшом расстоянии от нагрузки, является наиболее целесообразным.

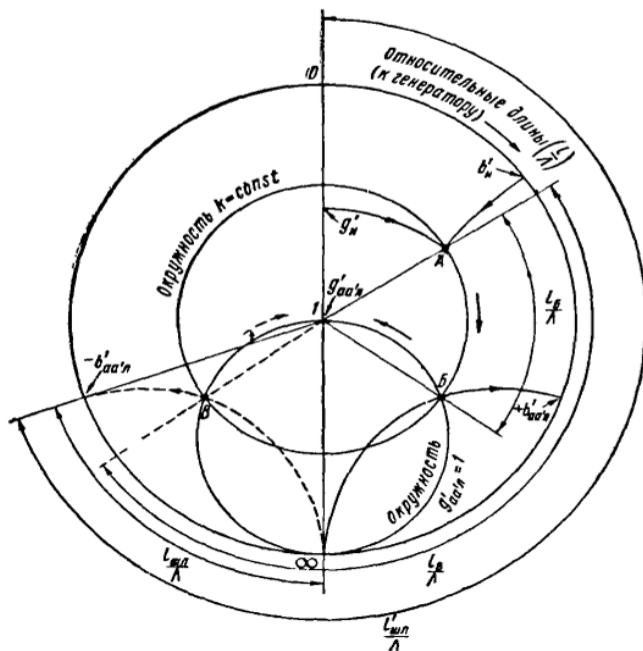


Рис. 3.13. Вычисление нормированной проводимости нагрузки с заданной волновой проводимостью

После того как шлейф подключен к линии в одном из указанных сечений, путем изменения длины шлейфа изменяют величину его входной проводимости так, чтобы суммарная реактивная проводимость в точках подключения шлейфа стала равной нулю ($h'_{\alpha\alpha'} = 0$).

Как известно, при изменении длины реактивного шлейфа его реактивная проводимость периодически изменяется в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. При этом периодически изменяется и суммарная реактивная проводимость в точках подключения шлейфа к линии. Активная проводимость в точках подключения шлейфа к линии при изменении его длины не изменяется.

Следовательно, изменению длины шлейфа, подключенного к линии, соответствует на круговой диаграмме движение по окружности $g'_{\alpha\alpha'} = 1$. Для получения согласования в нашем случае это движение должно быть произведено от точки B (или от точки B) по окружности $g'_{\alpha\alpha'} = 1$ к центру круговой диаграммы. В обоих случаях при соответствующем выборе длин шлейфов можно добиться выполнения условий (3.15), то есть настройки линии на бегущую волну. Необходимая длина настраивающего шлейфа определяется с помощью круговой диаграммы следующим образом.

Пусть согласование линии с нагрузкой производится при помощи короткозамкнутого шлейфа, подключаемого к линии в сечении, соответствующем точке B . Нормированная реактивная проводимость линии в этом сечении равна $+jb'_{\alpha\alpha'}$. Следовательно, нормированная входная проводимость согласующего короткозамкнутого шлейфа должна быть равна $-jb'_{\alpha\alpha'}$.

При определении длины короткозамкнутого шлейфа начальной точкой на круговой диаграмме является нижняя точка, обозначенная знаком ∞ , так как в конце короткозамкнутой линии проводимость бесконечно велика. При этом поворот от начальной точки по окружности чисто реактивных проводимостей до деления, соответствующего заданной входной проводимости шлейфа, должен производиться в направлении вращения часовой стрелки (к генератору).

Как видно из рис. 3.13, входную нормированную проводимость $-jb'_{\alpha\alpha'}$ будет иметь короткозамкнутый шлейф, относительная длина которого равна $\frac{l_{шл}}{\lambda}$.

Аналогично могут быть определены нормированные входные проводимости и относительные длины короткозамкнутого и разомкнутого параллельных шлейфов, которые используются для согласования рассматриваемой линии с нагрузкой при подключении их к линии в сечении, отстоящем от нагрузки на расстоянии l_B .

Абсолютные значения входной проводимости и длины согласующего фильтра можно определить обычным путем, если заданы его волновая проводимость и длина рабочей волны.

Согласование линии с нагрузкой при помощи параллельного шлейфа может быть произведено и в том случае, когда проводимость нагрузки неизвестна. Для этого достаточно знать волновое сопротивление линии, а также определить экспериментально КБВ в линии и расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимума напряжения ($l_{\text{п.н}}$).

Действительно, зная величину КБВН, можно провести на круговой диаграмме соответствующую окружность $k = \text{const}$ (рис. 3.14).

Минимуму напряжения в линии соответствует на круговой диаграмме точка A . Совершая поворот по окружности $k = \text{const}$ от точки A против движения часовой стрелки (к нагрузке) на угол, соответствующий значению $\frac{l_{\text{п.н}}}{\lambda}$, мы попадаем в точку B , являющуюся отображением на круговой диаграмме величины нормированной проводимости нагрузки линии:

$$Y'_n = g_n \rho_n + j b_n \rho_n.$$

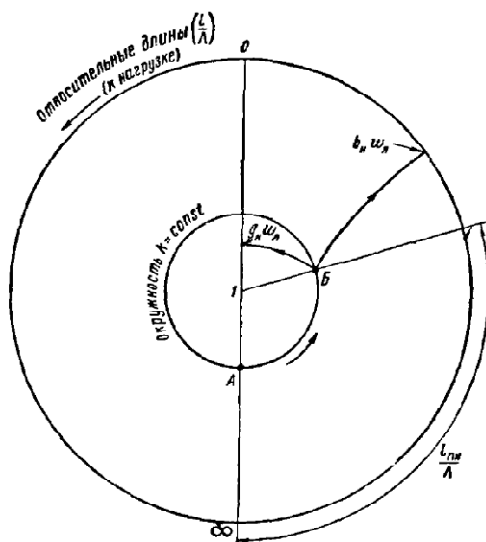


Рис. 3.14. Согласование линии с нагрузкой с использованием круговой диаграммы

После этого рассмотренным ранее способом определяем место подключения к линии и длину согласующего шлейфа.

Очевидно, что согласование линии с нагрузкой при помощи одного параллельного шлейфа может быть осуществлено только на одной фиксированной частоте. Только на этой частоте КБВ в линии будет равен единице. Даже незначительное отклонение от расчетной приводит к быстрому уменьшению величины КБВН.

3.1.9. Согласование линии с нагрузкой при помощи двух параллельных шлейфов

Удовлетворительное согласование линии с нагрузкой в некотором диапазоне частот может быть произведено при помощи согласующего устройства, состоящего из двух короткозамкнутых шлейфов, подключаемых параллельно к линии по схеме, показанной на рис. 3.15.

Такое согласующее устройство получило название двухшлейфового трансформатора полных сопротивлений.

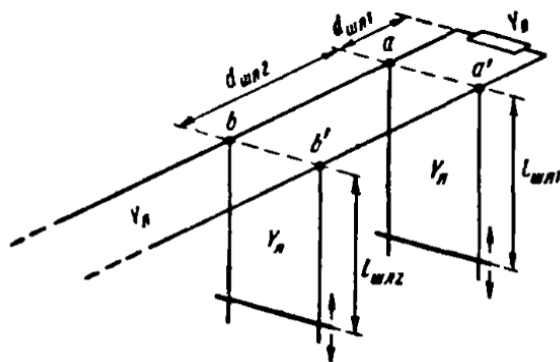


Рис. 3.15. Схема двухшлейфового трансформатора полных сопротивлений

Принцип согласования заключается в следующем. Путем изменения длины первого шлейфа изменяют положение максимума напряжения в линии. При этом длину первого шлейфа выбирают такой, чтобы в точках подключения к линии второго шлейфа активная проводимость стала равной волновой проводимости. Длину второго шлейфа выбирают такой, чтобы суммарная реактивная проводимость в точках его подключения к линии стала равной нулю. Таким образом, линия оказывается настроенной в режим бегущей волны на всем протяжении от генератора до точек подключения к ней второго шлейфа.

Расстояние между шлейфами должно быть отличным от половины длины волны, так как в противном случае оба шлейфа оказались бы эк-

вивалентными одному неподвижному шлейфу. Обычно расстояние между шлейфами берется равным $\frac{\lambda}{8}$ или $\frac{3\lambda}{8}$. При этом большее расстояние берется в том случае, когда меньшее расстояние не является достаточным для конструктивного выполнения согласующего устройства.

Входную проводимость обоих реактивных шлейфов на практике изменяют путем передвижения их короткозамкнутых мостиков. Волновые проводимости этих шлейфов чаще всего принимают равными волновой проводимости линии.

Как следует из принципа согласования, второй шлейф выполняет те же функции, что и одиночный параллельный шлейф. Различие заключается в том, что при использовании одиночного шлейфа определение места его подключения к линии производилось передвижением шлейфа вдоль линии от нагрузки к генератору, а в данном случае выполнение этого условия согласования достигается изменением длины первого шлейфа. При этом изменение длины второго шлейфа приводит не только к изменению реактивной проводимости в точках его подключения, но и к изменению активной проводимости в точках подключения первого шлейфа.

Проанализируем действие двухшлейфового трансформатора с помощью круговой диаграммы полных проводимостей. Начнем анализ с точек подключения к линии второго шлейфа (точек $b - b'$ на рис. 3.15). В этих точках при согласовании линии суммарная нормированная проводимость имеет вид: $Y'_{bb'\Sigma} = (1 + j0)$ отн. ед.

Поскольку изменение длины второго шлейфа не влияет на активную проводимость линии в точках $b - b'$, то полная нормированная проводимость линии в этих точках до подключения к ним первого шлейфа должна соответствовать какой-либо точке круговой диаграммы, находящейся на окружности $g'_{bb'} = 1$. Пусть такой точкой является точка А круговой диаграммы, показанной на рис. 3.16.

Полная нормированная проводимость в точках подключения к линии первого шлейфа (в точках $a - a'$ на рис. 3.15) при подключенном первом шлейфе и не подключенном втором шлейфе должна соответствовать на круговой диаграмме точке В, повернутой по окружности $k = \text{const}$ относительно точки А в направлении «к нагрузке» на угол, соответствующий значению $\frac{a_{шл1}}{\lambda}$. На основании этого можно утверждать, что геометрическим местом точек на плоскости круговой диаграммы, соответствующих всем возможным значениям полной проводимости в точках $a - a'$ линии при подключенном первом шлейфе и не подключенном втором шлейфе, является окружность $g'_{bb'} = 1$, повернутая против часовой стрелки (от генератора к нагрузке) на угол, соот-

ветствующий величине $\frac{d_{шл2}}{\lambda}$. На рисунке 3.16 эта окружность показана для случая, когда $d_{шл2} = \frac{\lambda}{8}$, и обозначена «окружность № 3».

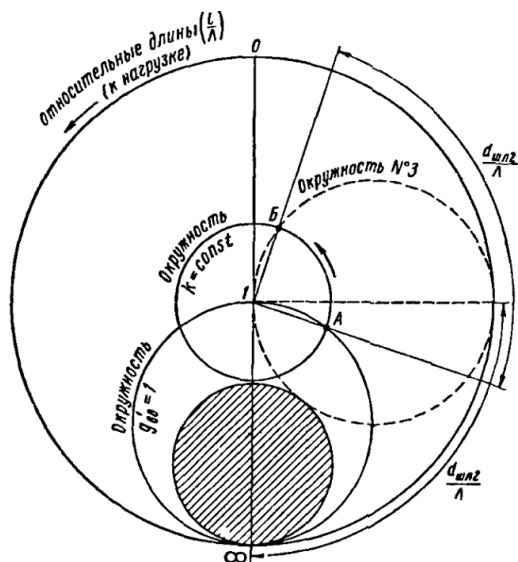


Рис. 3.16. Расчет двухшлейфового трансформатора полных сопротивлений с помощью круговой диаграммы

Первый шлейф, как известно, также не может изменить активной проводимости в точках его подключения к линии. Следовательно, для попадания после подключения первого шлейфа на окружность $g_{aa'} = 1$ полная нормированная проводимость линии в точках $a - a'$ до подключения к линии шлейфов должна быть такой, чтобы отображающая ее на круговой диаграмме точка лежала за пределами круга, ограниченного окружностью $g' = const$, касательной к окружности №3. На рисунке 3.16. этот круг заштрихован.

Учитывая, что проводимость линии в точках $a - a'$ до подключения к ней шлейфов определяется проводимостью нагрузки, на основании произведенного анализа можно сделать следующий вывод: согласование линии с нагрузкой при помощи двухшлейфного трансформатора возможно не при всех значениях проводимости нагрузки. Это является основным недостатком двухшлейфного трансформатора.

Как видно из круговой диаграммы, область недопустимых значений проводимости нагрузки будет тем больше, чем ближе расстояние

между шлейфами к четверти длины волны. Эта область уменьшается при уменьшении расстояния между шлейфами. В пределе, когда расстояние между шлейфами равно нулю, указанная область также рана нулю, но при этом оба шлейфа становятся эквивалентными одному параллельному шлейфу. То же самое получается при расстоянии между шлейфами, равном половине длине волны.

Рассмотрим подробно согласование линии с нагрузкой при помощи двухшлейфного трансформатора.

Пусть линия согласуется с нагрузкой при помощи двух короткозамкнутых шлейфов, подключенных к линии параллельно по схеме рис. 3.15. Пусть при этом расстояние между шлейфами $d_{шл2} = \frac{3}{8}\lambda$, а полная нормированная проводимость нагрузки $Y'_н = g'_н + jb'_н$. Требуется определить по круговой диаграмме относительные длины обоих шлейфов, при которых линия будет согласована с нагрузкой.

Обычно эта задача решается следующим образом. При отсутствии согласующих шлейфов участок линии с нагрузкой, расположенный вправо от сечения $a - a'$ (рис. 3.15), заменяется входной проводимостью, нормированная величина которой равна $Y'_{aa'}$. В этом случае первая часть задания сводится к определению нормированной входной проводимости линии длиной $d_{шл1}$ с нагрузкой, нормированная проводимость которой равна $Y'_н$. Пусть нормированная проводимость нагрузки отображена на круговой диаграмме точкой A , как показано на рис. 3.17.

В соответствии с вышеприведенным нормированная проводимость $Y'_{aa'}$ будет отображена точкой B . Величину этой проводимости легко определить по круговой диаграмме: $Y'_{aa'} = g'_{aa'} + jb'_{aa'}$.

Далее определяют нормированную проводимость в точках $a - a'$ при подключенном первом настраивающем шлейфе. Эта проводимость, как указывалось, находится в прямой связи с проводимостью линии в точках $b - b'$. Известно, что при подобранной длине первого шлейфа и произвольной длине второго шлейфа полная нормированная проводимость в точках $b - b'$ должна отображаться на круговой диаграмме точкой, находящейся на окружности $g'_{bb'} = 1$. Так как длина участка линии между точками $a - a'$ и $b - b'$ равна $\frac{3}{8}\lambda$, то с целью определения необходимой для согласования нормированной проводимости в точках $a - a'$ при подключенном первом шлейфе необходимо повернуть окружность $g'_{bb'} = 1$ против часовой стрелки (к нагрузке) на угол, соответствующий значению $\frac{d_{шл2}}{\lambda} = \frac{3}{8}$. В результате получаем окружность №3 (рис. 3.17).

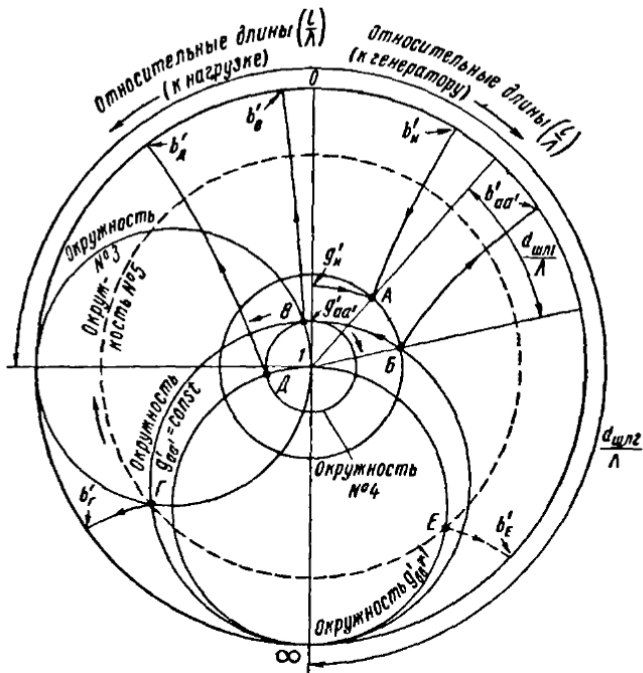


Рис. 3.17. Согласование линии с нагрузкой при помощи двух короткозамкнутых шлейфов

Путем изменения длины первого шлейфа изменяют не столько реактивную проводимость в точках $a - a'$, сколько активную проводимость в точках $b - b'$, стремясь сделать ее равной волновой проводимости линии. Поэтому с целью определения требуемой для согласования полной нормированной проводимости в точках $a - a'$ необходимо путем подбора длины первого шлейфа перейти из точки B по соответствующей ей окружности $g' = \text{const}$ в точку пересечения указанных окружностей – точки V и Γ . Необходимая для такого перехода входная нормированная проводимость первого шлейфа легко определяется с помощью круговой диаграммы. Для перехода из точки B в точку V входная нормированная проводимость первого шлейфа должна быть равна

$$Y'_{шл1B} = b'_B - b'_{aa'}.$$

Соответственно для перехода из точки B в точку Γ указанная проводимость первого шлейфа должна быть равна

$$Y'_{шл1\Gamma} = b'_\Gamma - b'_{aa'}.$$

Таким образом, мы получаем различные по длине короткозамкнутые шлейфы, которые при подключении к линии в точках $\alpha - \alpha'$ обеспечивают условия, необходимые для успешного проведения последующих операций по согласованию линии.

Относительные длины этих шельфов определяют рассмотренным в предыдущем параграфе способом. После этого определяют полную нормированную проводимость линии в точках $b - b'$ при настроенном первом шлейфе, но при отсутствии второго.

Пусть к линии подключен первый шлейф, соответствующий точке B . Тогда для определения полной нормированной проводимости линии в точках $b - b'$ необходимо произвести поворот от точки B по соответствующей ей окружности $k = \text{const}$ (окружность № 4) в направлении часовой стрелки (к генератору) на угол, соответствующий значению $\frac{d_{шл2}}{\lambda} = \frac{\pi}{8}$. Таким образом, мы попадаем в точку D , находящуюся на окружности $g'_{bb'} = 1$. В этом случае, как видно из круговой диаграммы, искомая нормированная проводимость линии будет равна

$$Y'_{bb'D} = 1 + jb'_D.$$

Аналогично, совершая поворот от точки Γ по окружности № 5, находим на круговой диаграмме точку E , являющуюся отображением нормированной проводимости линии в точках $b - b'$ при подключенном шлейфе, соответствующем точке Γ . В этом случае нормированная проводимость будет равна

$$Y'_{bb'E} = 1 + jb'_E.$$

Как указывалось, для согласования линии с нагрузкой входная проводимость второго шлейфа должны быть равна по величине и противоположна по знаку реактивной проводимости линии в точках $b - b'$. Следовательно, входная нормированная проводимость второго шлейфа, соответствующего точке D , должна быть равна

$$Y'_{вх,шл2D} = -jb'_D.$$

Аналогично входная проводимость второго шлейфа, соответствующего точке E , должна быть равна

$$Y'_{вх,шл2E} = -jb'_E.$$

Относительные длины этих шлейфов определяют по круговой диаграмме так же, как и длины первых шлейфов.

Таким образом, мы определили входные нормированные проводимости и относительные длины следующих двух комбинаций параллельных короткозамкнутых шлейфов, при помощи которых может быть произведено согласование с нагрузкой:

первый и второй шлейфы соответствуют точкам B и D ;

первый и второй шлейфы соответствуют точкам Γ и E .

Из этих двух комбинаций шлейфов выбирают ту, в которой шлейфы имеют меньшую длину.

При подключении к линии шлейфов той или другой комбинации суммарная нормированная проводимость в точках $b - b'$ становится равной единице, что соответствует центру круговой диаграммы и свидетельствует о настройке линии на бегущую волну.

Контрольные вопросы

1. Определить входное сопротивление линии передачи на круговой диаграмме.
2. Определить КБВН в линии передачи с известной нагрузкой с использованием круговой диаграммы.
3. Определить полную проводимость линии передачи по заданной величине ее полного сопротивления.
4. Определить сопротивление нагрузки линии передачи.
5. Определить проводимость нагрузки линии передачи с помощью круговой диаграммы по известному значению КБВН и расстоянию от нагрузки до ближайшего минимума напряжения.
6. Произвести согласование линии передачи с нагрузкой при помощи четвертьволнового трансформатора.
7. Произвести согласование линии передачи с нагрузкой при помощи короткозамкнутого параллельного шлейфа.
8. Произвести согласование линии передачи с нагрузкой при помощи разомкнутого реактивного шлейфа.
9. Раскрыть особенности согласования линии с нагрузкой при помощи двух параллельных шлейфов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для установления в линиях передачи режима бегущих волн необходимо произвести согласование линии передачи с нагрузкой.

Основными методами такого согласования являются:

- метод трансформаторных и автотрансформаторных схем;
- метод непосредственного подбора волнового сопротивления линий передачи;
- метод четвертьволновых трансформаторов или вставок;
- метод реактивных шлейфов;
- метод ступенчатых и экспоненциальных переходов.

Использование всех вышеперечисленных методов может быть реализовано с использованием круговых диаграмм полных сопротивлений и проводимостей или диаграмм Вольперта-Смита.

Именно этот фактор определяет важность и необходимость написанного пособия.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Баскаков, С.И. Основы электродинамики: учеб. пособие для вузов / С.И. Баскаков. – М.: Наука, 2008. – 248 с.
2. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 1980. – 152 с.

Дополнительная

3. Шипков, Г.А. Задачник по антенно-фидерным устройствам / Г.А. Шипков. – М.: Высш. шк., 1996. – 180 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Тема 1. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ	4
Тема 2. КРУГОВАЯ ДИАГРАММА ПОЛНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ	21
Тема 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ	23
3.1. Примеры применения круговых диаграмм	23
3.1.1. Отображение сопротивления линии в виде точки на круговой диаграмме	23
3.1.2. Определение КБВ (КСВ) в линии с известной нагрузкой	24
3.1.3. Определение входного сопротивления линии	25
3.1.4. Определение полной проводимости линии по заданной величине полного сопротивления	27
3.1.5. Определение сопротивления нагрузки линии	30
3.1.6. Определение проводимости нагрузки линии	31
3.1.7. Согласование линии с нагрузкой при помощи четвертьволнового трансформатора	32
3.1.8. Согласование линии с нагрузкой при помощи одного параллельного шлейфа	36
3.1.9. Согласование линии с нагрузкой при помощи двух параллельных шлейфов	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	51

Учебное издание

Халаев Н.Л.

Гряник В.Н.

КРУГОВАЯ ДИАГРАММА ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ПОЛНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ

Учебно-практическое пособие

Редактор М.А. Шкарубо

Компьютерная верстка М.А. Портновой

Подписано в печать .10.2014. Формат 60×84/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. .

Уч.-изд. л. . Тираж 600 экз. Заказ

Издательство Владивостокского государственного университета
экономики и сервиса

690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41

Отпечатано во множительном участке ВГУЭС

690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41