

Дисциплина

**СВЧ – устройства
электронных
средств**

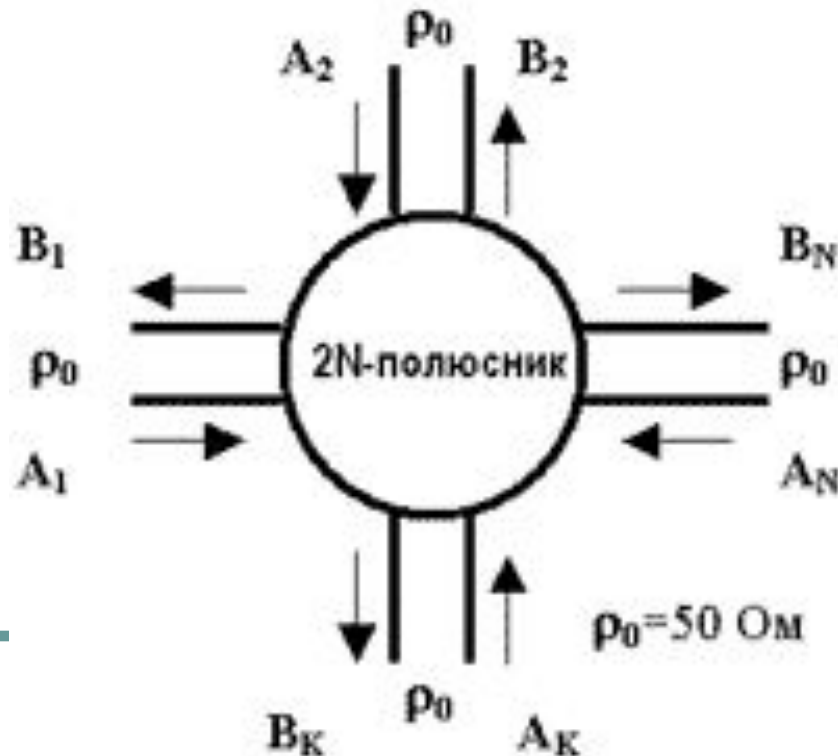
Лекция 1

Матрица рассеяния Согласующие устройства

Метод анализа линейных СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния

Разнообразные типы СВЧ устройств можно описать с помощью падающих и отраженных волн, распространяющихся в подключенных к ним линиях передачи. Связь между этими волнами описывается волновой матрицей рассеяния или матрицей S-параметров.

СВЧ устройство в общем случае можно представить в виде многополюсника, изображенного на рисунке.



Метод анализа линейных СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния

Свойства многополюсника описываются с помощью N уравнений, связывающих комплексные амплитуды падающих и отраженных волн в сечении входных полюсов СВЧ устройства.

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= S_{11} A_1 + S_{12} A_2 \dots \dots \dots + S_{1n} A_N; \\ B_1 &= S_{21} A_1 + S_{22} A_2 \dots \dots \dots + S_{2n} A_N; \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots; \\ B_N &= S_{n1} A_1 + S_{n2} A_2 \dots \dots \dots + S_{nn} A_N, \end{aligned} \right\}$$

Метод анализа линейных СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния

где A_1, A_2, A_N , - комплексные амплитуды волн, входящих в многополюсник (падающие волны);

B_1, B_2, B_N , - комплексные амплитуды волн, выходящих из многополюсника (отраженные волны);

S_{kk} ($k=1, 2, \dots, n$) – коэффициенты отражения по соответствующим входам многополюсника при подключении согласованных нагрузок, равных r_0 , ко всем остальным входам;

S_{km} ($k, m=1, 2, \dots, n, k \neq m$) – коэффициенты передачи амплитуд волн напряжения с m -ой линии в k -ю при подключении согласованных нагрузок, равных r_0 , ко всем остальным входам;

Метод анализа линейных СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния

$$\begin{vmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_N \end{vmatrix}$$

$$[S] = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{vmatrix}$$

Метод анализа линейных СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния

Элементами этой матрицы являются S-параметры СВЧ устройства

S-параметры позволяют определить такие важные характеристики многополюсника, как КСВ и коэффициент ослабления.

Если ко входу k подключен источник сигнала, а ко всем остальным входам – согласованные нагрузки, равные r_0 , то

$$КСВ_k = \frac{1 + |S'_{kk}|}{1 - |S'_{kk}|}$$

Метод анализа линейных СВЧ устройств с помощью матрицы рассеяния

а коэффициент ослабления между входами k и m

$$\alpha_{mk} = 10 \lg \left(\frac{P_k}{P_m} \right) = 20 \lg \left(\frac{A_k}{B_m} \right) = -20 \lg |S_{mk}|$$

Коэффициент α_{mk} показывает, какая часть мощности сигнала, подведенная к k -му входу достигает m -го входа.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Согласование линий передачи (фидеров) необходимо для подавления отраженных от нагрузки волн. Условием этого является равенство полного сопротивления нагрузки и волнового сопротивления

линии передачи: $Z_H = Z_{\text{л}}$,

$$R_H = R_{\text{л}}; \quad X_H = X_{\text{л}}.$$

В случае полного согласования всех элементов фидера и питающего генератора в линии передачи отраженная волна отсутствует (режим бегущей волны), коэффициент отражения $\Gamma=0$,

а коэффициент отражения $=1$

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Если нагрузка не согласована с линией передачи, возникает ряд нежелательных эффектов:

1) изменяется частота и мощность генератора из-за эффекта затягивания;

2) уменьшается мощность P_H , поступающая в нагрузку

$$P_H = P_{\text{кэд}} - P_{\text{отр}} = P_{\text{кэд}} (1 - |\Gamma|^2),$$

3) уменьшается предельное значение передаваемой мощности из-за электрического пробоя в тракте

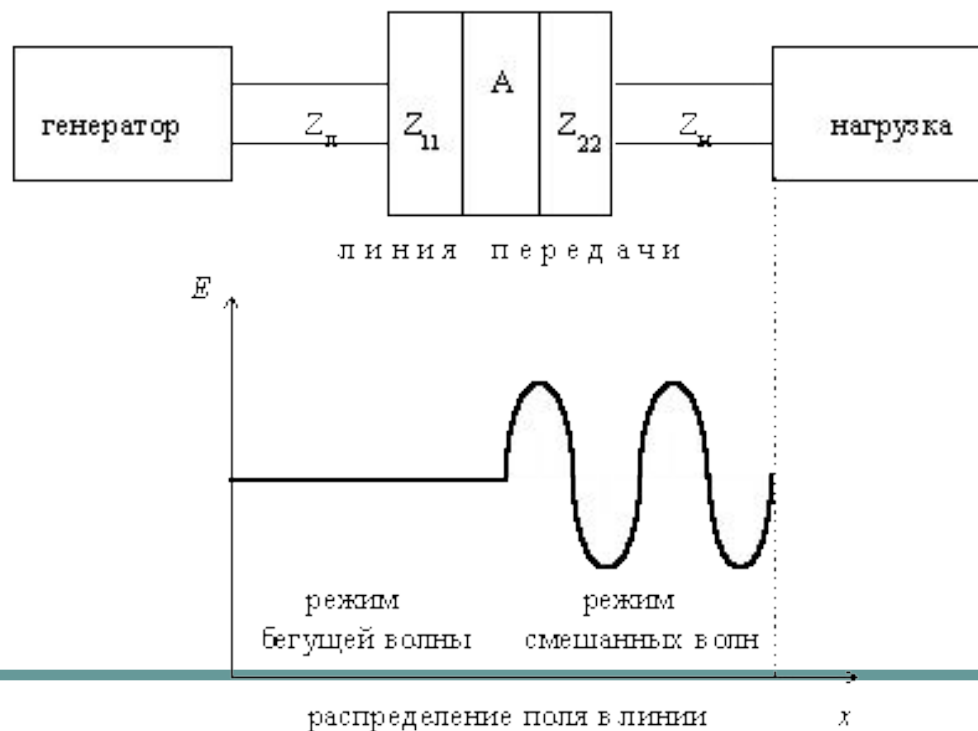
$$P_{\text{кр}} = P_{\text{max}} / \sigma,$$

4) уменьшается широкополосность передающего тракта;

5) увеличиваются активные потери в линии передачи.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Для получения согласования произвольной нагрузки Z_H с линией передачи вблизи от нагрузки должен быть включен согласующий четырехполюсник. Назначением этого четырехполюсника является преобразование сопротивления $Z_{22} = Z_H$ в сопротивление $Z_{11} = Z_{\text{л}}$, т. е. обеспечение в линии режима бегущей волны



СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Существующие способы согласования линий передач можно разделить на три группы в зависимости от характера согласуемых сопротивлений.

Первый способ - согласование только активных составляющих полных сопротивлений, т.е. достижение условия $R_H = R_L$ при выполненном $R_H = R_L$.

Второй способ согласования сопротивлений применяют, если реактивные сопротивления нагрузки и линии передачи неравны, т.е. условие $R_H = R_L$ не выполнено.

Третий способ согласования применяется в случае неравенства как активных, так и реактивных сопротивлений нагрузки и линии.

Выравнивание активных составляющих полных сопротивлений чаще всего необходимо при соединении линий передач с разными волновыми сопротивлениями.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Четвертьволновый трансформатор - это отрезок линии или волновода длиной четверть волны $l_{\text{в}}$, имеющий определенное волновое сопротивление $Z_{\text{в}} = Z_{\text{BC}}$ и включаемый между согласуемыми активными сопротивлениями (элементами линии передачи) Z_{B_1} и Z_{B_2} . Волновое сопротивление трансформатора подбирается таким, чтобы создавались два равных по амплитуде сигнала на его входе и выходе. Поскольку длина трансформатора $l_{\text{в}}/4$, то отражения на входе компенсируются отражениями, возникающими на его выходе. Это возможно, если четвертьволновой трансформатор имеет сопротивление Z_{BC} , равное среднему геометрическому из согласуемых сопротивлений Z_{B_1} и Z_{B_2} :

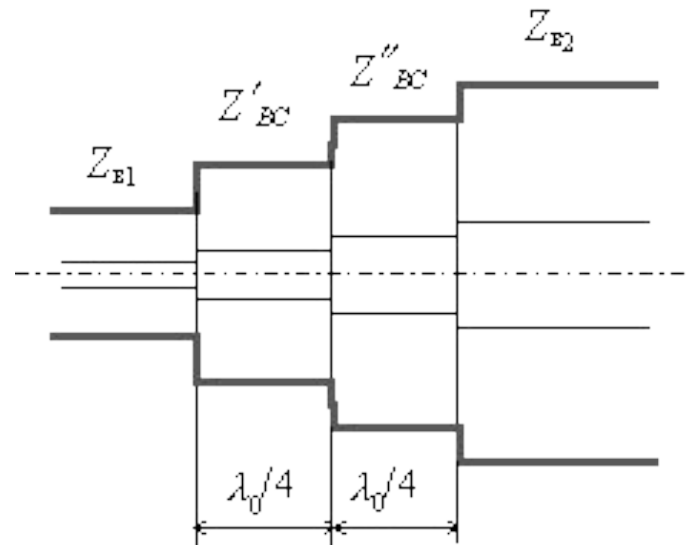
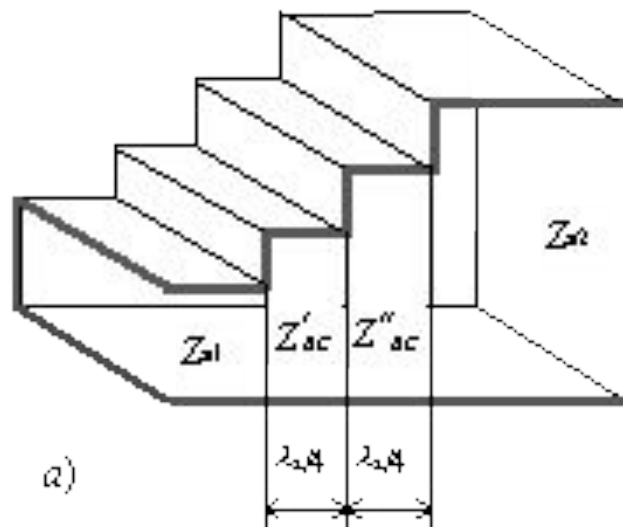
$$Z_{\text{BC}} = \sqrt{Z_{\text{B}_1} Z_{\text{B}_2}}$$

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Четвертьволновый трансформатор является узкополосным согласующим устройством: при отклонении длины волны от среднего значения электрическая длина трансформатора уже не равна $\lambda_g/4$. Волны в основном фидере становятся смешанными, а входное сопротивление самого фидера - комплексным.

Для решения задачи широкополосного согласования активных сопротивлений применяют ступенчатые переходы - трансформаторы, представляющие собой каскадное соединение четвертьволновых трансформаторов (ступенек) с различными волновыми сопротивлениями.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ



Ступенчатые переходы прямоугольного волновода (а) и коаксиальной линии (б)

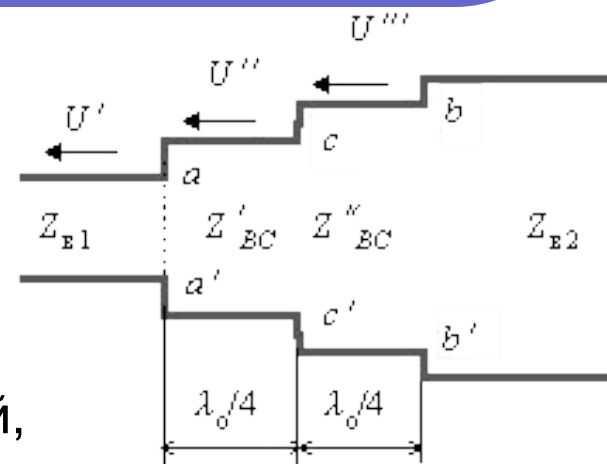
СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Рассмотрим переход, составленный из двух последовательно включенных трансформаторов длиной $\lambda_g/4$ каждый.

Их волновые сопротивления подбирают с таким расчетом, чтобы от сечений $a-a'$ и $b-b'$ волны отражались с одинаковой амплитудой,

а от сечения $c-c'$ - с вдвое большей амплитудой. Поскольку волна от $a-a'$ до $b-b'$ и обратно проходит путь $2\lambda_g/2 = \lambda_g$, то волны U' и U''' , отраженные от $a-a'$ и $b-b'$ совпадают по фазе и складываются.

Вместе с тем они полностью компенсируются волной U'' , отраженной от сечения $c-c'$, так как путь от $a-a'$ до $c-c'$ и обратно равен $2\lambda_g/4 = \lambda_g/2$, что соответствует сдвигу по фазе 180° .



СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Для улучшения характеристик ступенчатого перехода скачки волновых сопротивлений отдельных ступенек делаются различными в соответствии с определенными законами: чаще всего пропорционально коэффициентам бинома Ньютона (биномиальные переходы) или пропорционально полиномам Чебышева (чебышевские переходы).

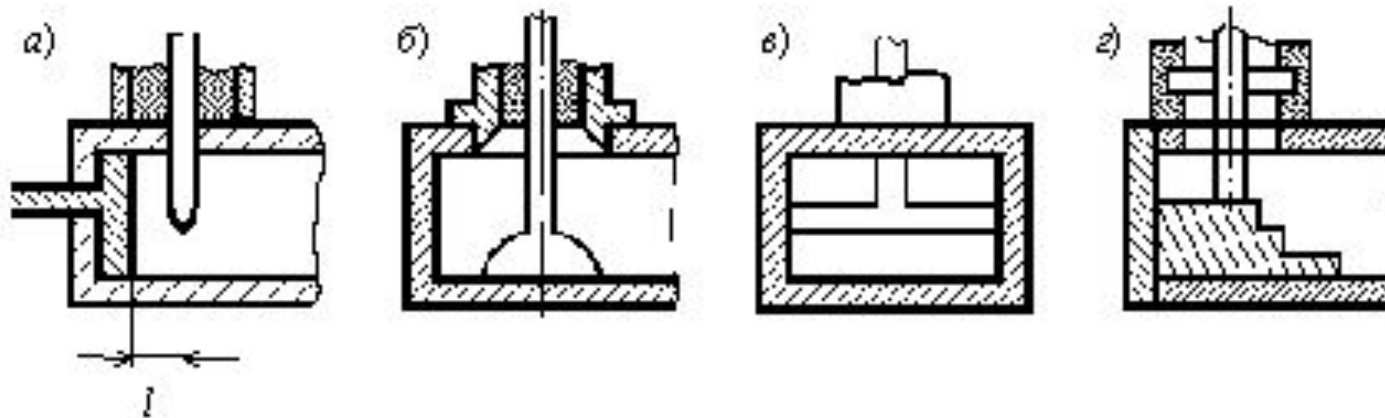
Сущность согласования при помощи **плавных переходов** заключается в постепенном изменении геометрических размеров линии передач. Плавные переходы как бы содержат бесконечно большое число ступенек n при длине каждой из них ($\Delta l \rightarrow 0$). Называются такие плавные переходы экспоненциальным, линейным или чебышевским трансформатором в зависимости от того, по какому из этих законов изменяется волновое сопротивление линии по длине перехода.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Одним из наиболее распространенных устройств для сопряжения фидеров различных видов с преобразованием волны одного типа в другой является **коаксиально-волноводный переход**, примеры конструкций которого показаны на рисунке. Они применяются для подключения к волноводным устройствам коаксиальных кабелей или других коаксиальных устройств, во вращающихся соединениях и т.д. Действие этих переходов основано на возбуждении отрезка волновода электрическим или магнитным излучателем, служащим элементом связи между коаксиальным и прямоугольными волноводами. При этом T -волна в коаксиальном волноводе трансформируется в волну типа H_{10} в прямоугольном волноводе.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

В конструкциях переходов согласование осуществляют с помощью выбора места расположения и геометрических размеров возбуждающего устройства и с помощью согласующих элементов в виде короткозамкнутых настраиваемых (рис. а) или ненастраиваемых (рис. б, в) отрезков линий, ступенчатых переходов (рис. г) и др.



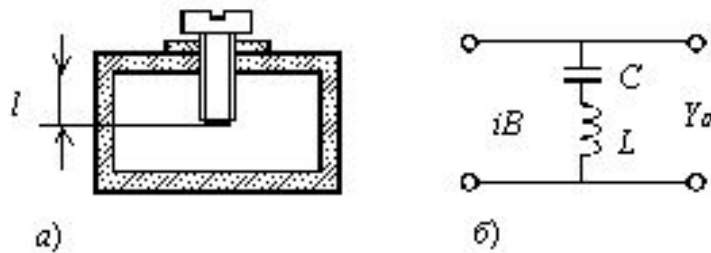
СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Переходы одного типа волновода в другой, например прямоугольного в круглый, H-образный или др., осуществляются плавным изменением формы и размеров поперечного сечения, приводящим к постепенному изменению структуры электромагнитного поля.

Согласование реактивных составляющих полных сопротивлений достигается введением в линию компенсирующего реактивного сопротивления, равного по величине и противоположного по знаку реактивному сопротивлению нагрузки. Наиболее распространенными **реактивными компенсирующими устройствами** являются штыри, диафрагмы и шлейфы. Сопротивление каждого из них имеет индуктивный или емкостной характер.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Реактивный штырь представляет собой металлический, обычно медный стержень, помещенный в волновод. Штырь можно располагать или вблизи узкой стенки, или вводить его через среднюю часть широкой стенки. Эквивалентная схема штыря в волноводе без учета активных потерь представляет собой реактивную проводимость iB , шунтирующую линию с волновой проводимостью Y_0 .



Волноводный реактивный штырь (а) и его эквивалентная схема (б)

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

При малой глубине $l < \lambda_g/4$ преобладает емкостная составляющая B_C , так как короткий металлический стержень, направленный вдоль линий электрического поля, увеличивает местное электрическое поле и действует как местная эквивалентная емкость.

При $l = \lambda_g/4$ имеет место резонанс последовательного типа ($B_C = B_L$). Проводимость в этом случае обращается в бесконечность, что соответствует короткому замыканию, и волна в волноводе полностью отражается.

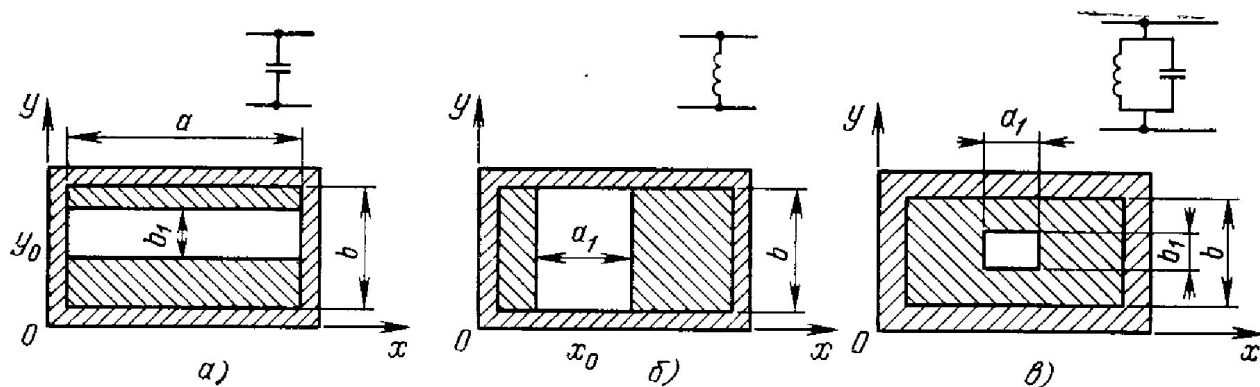
Наконец, при $l > \lambda_g/4$ преобладает индуктивная составляющая B_L . Энергия поля такого штыря определяется протекающим по нему током, т.е. является энергией магнитного поля.

Для компенсации неоднородностей в волноводных передающих линиях, когда к ним не предъявляются требования большой широкополосности, применяются диафрагмы.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Волноводные диафрагмы представляют собой тонкие металлические пластины, частично перекрывающие волновод. Эквивалентная схема бесконечно тонкой диафрагмы представляет собой реактивную проводимость, шунтирующую линию передачи.

Пластины, свободные края которых перпендикулярны линиям электрического поля, образуют емкостные диафрагмы



СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Концентрация зарядов на краях такой диафрагмы приводит к накоплению энергии электрического поля, что аналогично действию конденсатора, шунтирующего линию передачи.

Индуктивные диафрагмы образованы пластинами, свободные края которых параллельны линиям электрического поля основного типа волны (рис. б). Действие такой диафрагмы основано на концентрации магнитного поля, что эквивалентно индуктивности, шунтирующей линии передачи. Сочетание индуктивной и емкостной диафрагм позволяет осуществить резонансную диафрагму (резонансное окно), эквивалентная схема которой представляет собой параллельный колебательный контур (рис. в).

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

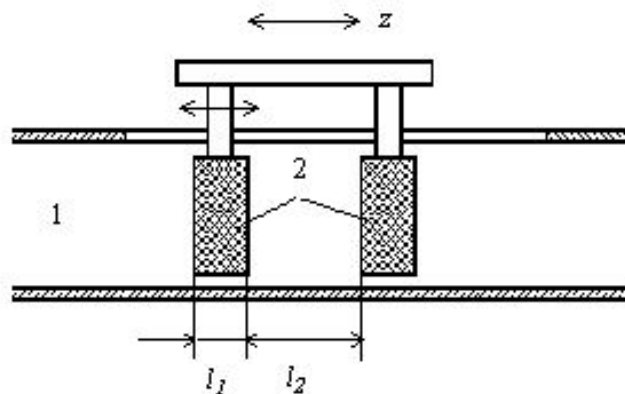
Роль реактивности в волноводных линиях передачи может выполнять **реактивный шлейф** - короткозамкнутый или разомкнутый отрезки линий передач различной длины. Конструктивно короткозамкнутый реактивный шлейф представляет собой жесткое механическое соединение под углом 90° двух отрезков волноводных линий передачи, один из которых замкнут подвижным короткозамкнутым поршнем, обеспечивающим возможность получения переменных значений входной реактивности, а другой обеспечивает возможность включения шлейфов в СВЧ тракт.

При решении задачи согласования полных сопротивлений нагрузки и линии передачи используются указанные компенсирующие устройства, а также устройства, поглощающие отраженные волны, и трансформаторы полных сопротивлений.

Метод поглощения отраженной волны основан на включении перед согласуемым устройством поглощающего четырехполюсника, не вносящего дополнительных отражений - **аттенюаторов** и **невзаимных ослабителей** (ферритовых вентиляей).

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Пластинчатый диэлектрический трансформатор, конструкция которого приведена на рисунке, состоит из волновода 1 прямоугольного сечения, где установлены две диэлектрические пластины 2 длиной $l_1 \sim \lambda'_g/4$ (где λ'_g - длина волны в волноводе, заполненном диэлектриком). С помощью стержней, проходящих через продольную щель в широкой стенке волновода, пластины можно перемещать относительно друг друга, меняя размер l_2 , и передвигать совместно в направлении z относительно волновода; если шайбы сдвинуть вместе, то участок волновода, заполненный диэлектриком, будет иметь длину $\lambda'_g/2$ и, следовательно, диэлектрик не возмущает линию, и трансформация сопротивлений при этом отсутствует.



СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Если же расстояние между пластинами сделать $\lambda'_g/4$, то такая система будет иметь максимальный КСВ, приблизительно равный квадрату относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r . Перемещая пластины вдоль волновода, можно при этом получить любую фазу отраженной волны и, значит, скомпенсировать имеющиеся отражения волны в диапазоне, определяемом P_{max} .

Одношлейфовые и пластинчатые трансформаторы используются обычно на низком уровне мощности, так как наличие шлейфов или диэлектрических пластин уменьшает электрическую прочность этих устройств.

Пластинчатый трансформатор включается в волноводную линию между нагрузкой и генератором. Волна, распространяющаяся по волноводу, прежде чем достигнуть нагрузки проходит через кварцевые пластины с весьма малыми потерями. От каждой плоскости раздела между кварцем и воздухом происходит отражение волны.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

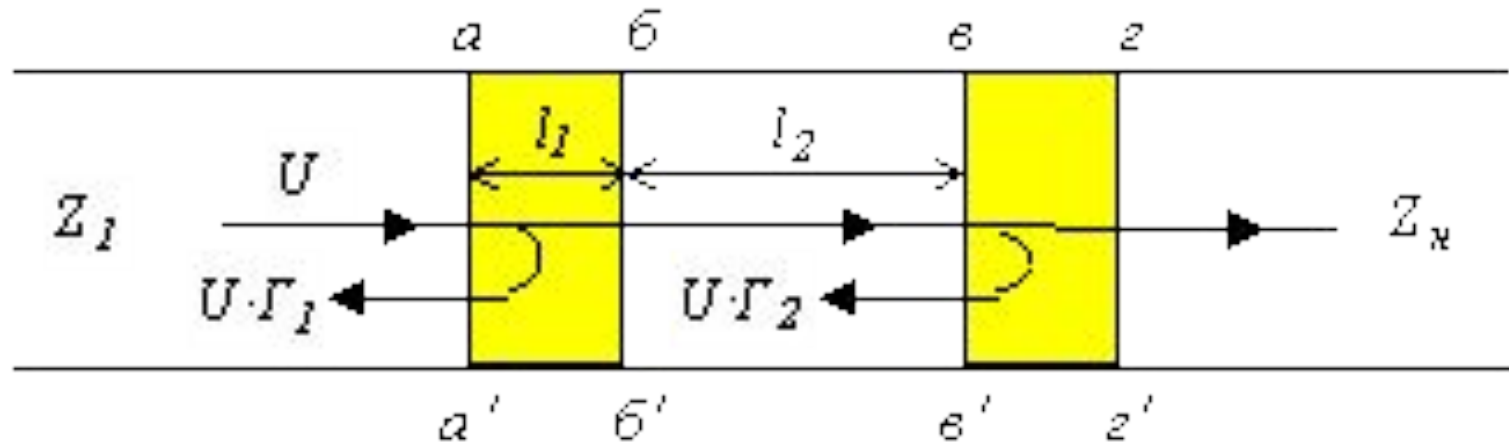
Результирующий КСВ перед первой пластинкой определяется значением КСВ нагрузки и системы пластинок, а также расстоянием между нагрузкой и пластинками, которое определяет фазу каждой из отраженных волн. Если фазы волн, отраженных от нагрузки и системы пластинок, противоположны, а их КСВ равны, то до трансформатора в волноводе имеет место чисто бегущая волна, т.е. полное согласование сопротивления нагрузки с волноводом.

КСВ системы пластинок зависит от значения КСВ каждой из них и расстояния между ними. Поэтому с целью расширения диапазона согласуемых нагрузок величина КСВ, обусловленного одной пластиной, сделана наибольшей. Это достигнуто выбором ширины пластинки вдоль оси волновода, равной $\lambda'_в/4$, где $\lambda'_в$ - длина волны на участке волновода, заполненном кварцем. При этом общий КСВ пластинки равен квадрату КСВ одной из ее сторон. Изменяя расстояние между пластинками, можно регулировать величину КСВ всей системы от единицы до максимума, равного приблизительно квадрату КСВ каждой из пластинок.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Передвигая всю систему пластинок вдоль волновода, подбирают такое их положение, при котором волна, отраженная от пластинок, окажется в противофазе с волной, отраженной от нагрузки.

Каждая пластинка представляет собой четвертьволновый трансформатор сопротивлений.



СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Длина диэлектрической пластинки l_1 определяется по формуле:

$$l_1 = \lambda_B / 4 \sqrt{\epsilon' \epsilon_0}$$

где λ_B - длина волны в волноводе; $\epsilon/\epsilon_0 = 3,8$ - относительная диэлектрическая проницаемость кварца. Волновое сопротивление в месте расположения кварцевых пластинок Z_{mp} меньше волнового сопротивления волновода на участках с воздушным заполнением Z_1 в $\sqrt{\epsilon' \epsilon_0}$ раз. Если расстояние между пластинками $l_2 = 0$, то обе пластинки образуют сплошную попуволновую линию, имеющую в начале и в конце одинаковое по величине волновое сопротивление Z_1 . То же самое получается при $l_2 = \lambda_B / 2$. Наибольший коэффициент трансформации получается при $l_2 = \lambda_B / 4$.

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Если волноводная линия согласована, то входное сопротивление трансформатора в сечении $a-a'$ равно волновому сопротивлению волновода Z_1 . Так как все три участка согласующего устройства при $\ell_2 = \lambda_B/2$ являются четвертьволновыми, то волновое сопротивление:

в сечении б-б' равно :

$$Z_{\text{тр}}^2 / Z_1;$$

в сечении в-в' равно :

$$Z_1^2 / (Z_{\text{тр}}^2 / Z_1) = Z_1^3 / Z_{\text{тр}}^2$$

а в сечении г-г' равно :

$$Z_{\text{тр}}^2 / (Z_1^3 / Z_{\text{тр}}^2) = Z_{\text{тр}}^4 / Z_1^3.$$

Следовательно, таким способом можно трансформировать сопротивление нагрузки, равное $Z_{\text{тр}}^4 / Z_1^3$, в сопротивление Z_1 и обратное,

СОГЛАСОВАНИЕ В ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

т.е. максимальная величина коэффициента трансформации достигает значения

$$Z_{\text{нр}}^4 / Z_1^4 = (Z_1 / \sqrt{\epsilon \epsilon_0})^4 / Z = (\epsilon_0 / \epsilon)^2,$$

(или $(\epsilon / \epsilon_0)^2$ для обратного направления распространения волны).

Трансформатор с пластинками из кварца имеет максимальную величину коэффициента трансформации, равную 14,5. Такая его величина обычно является достаточной для согласования волновых сопротивлений, поскольку КСВ несогласованных волноводных линий крайне редко превышает значение 15.

Спасибо за внимание!!!

