

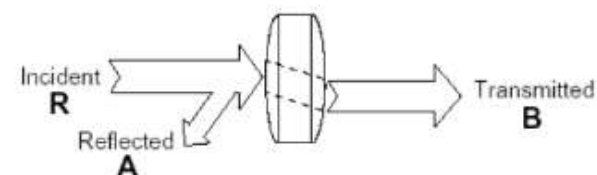
Электрические параметры электрических компонентов и схем изменяют входные сигналы по величине и фазе. Любой синусоидальный сигнал, поступающий на вход, появится и на выходе устройства на той же самой частоте. Новых сигналов при этом не создается. Как активные, так и пассивные нелинейные устройства могут сместить входной сигнал по частоте или внести дополнительные частотные компоненты, например, гармоники или нежелательные комбинационные составляющие. Мощные входные сигналы могут изменить характер работы линейных устройств, приводя к компрессии или насыщению и вызывая нелинейный эффект.

Для того чтобы успешно передавать или принимать радиочастотную мощность, передающие устройства, такие как тракты передачи, антенны или усилители, должны отличаться хорошим согласованием сопротивления с источником сигнала. Рассогласование сопротивления происходит, когда реальные и мнимые части входного и выходного импеданса не идеально согласованы между двумя связанными устройствами.

Важность векторных измерений.

Анализ радиочастотных цепей подразумевает измерение падающей (Transmitted), отраженной (Reflected) и переданной (Incident) волны в тракте передачи. Используя в качестве аналогии оптику можно сказать, что свет, падающий на чистую линзу, представляет собой падающую волну, а часть света которая отражается, это - отраженная волна. Большая же часть света, определенным образом преломляясь, проходит через линзу, и это – переданная энергия. Если линза имеет зеркальную поверхность, то большая часть света отразится, и передано будет мало энергии или же вообще никакой. Хотя длины волн в оптике отличны от радиочастотных сигналов, принципы здесь те же самые. Анализаторы цепей позволяют точно измерять падающую, отраженную и переданную энергию, иными словами, энергию, которая подается на вход тракта передачи, энергию, которая отражается на источник сигнала (из-за рассогласования сопротивлений), и энергию, которая успешно передается на конечное устройство, например, на антенну.

В терминологии векторного анализа цепей падающая волна обычно обозначается как R. Отраженная волна измеряется на порте A, а переданная волна – на порте B. Имея информацию об амплитуде и фазе этих волн, оказывается возможным измерить характеристики отражения и передачи тестируемого устройства.



Относительные измерения позволяют проводить исследования отражения и передачи, которые не зависят от абсолютной мощности или от изменений в мощности источника по отношению к частоте. Относительное отражение часто представляется в виде  $A/R$ , а относительная передача как  $B/R$ .

Самый общий термин для относительного отражения – это комплексный **коэффициент отражения**, или  $\Gamma$  – гамма. Коэффициент отражения – это просто отношение уровня напряжения отраженного сигнала к уровню напряжения падающего сигнала.

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{ист}} - Z_{\text{нагр}}}{Z_{\text{ист}} + Z_{\text{нагр}}}$$

Амплитуда величины  $\Gamma$  называется  $\rho$  (rho). Например, в тракте передачи, идеально согласованном с нагрузкой по сопротивлению  $Z_0$ , вся энергия будет передаваться, так что  $\rho=0$ . Когда сопротивление нагрузки  $Z_{\text{нагр}}$  не равно сопротивлению тракта передачи  $Z_0$ , то часть энергии отражается и  $\rho$  больше нуля. Когда сопротивление нагрузки равно "короткому замыканию" или "холостом ходе", вся энергия отражается и  $\rho$  равно 1. Как видим, диапазон возможных значений для  $\rho$  – это 0...1.



Обратные потери (**return loss** или **RL**)– это способ выражения коэффициента отражения в логарифмическом виде (децибелах). Обратные потери – это количество децибелов, на которое уровень отраженного сигнала ниже уровня падающего сигнала по мощности  $P$  или напряжению  $V$  (чем больше величина return loss, тем лучше согласование). Обратные потери всегда выражаются положительным числом и изменяются в пределах от бесконечности для идеально согласованного тракта передачи до 0 дБ при "коротком замыкании" или "холостом ходе".

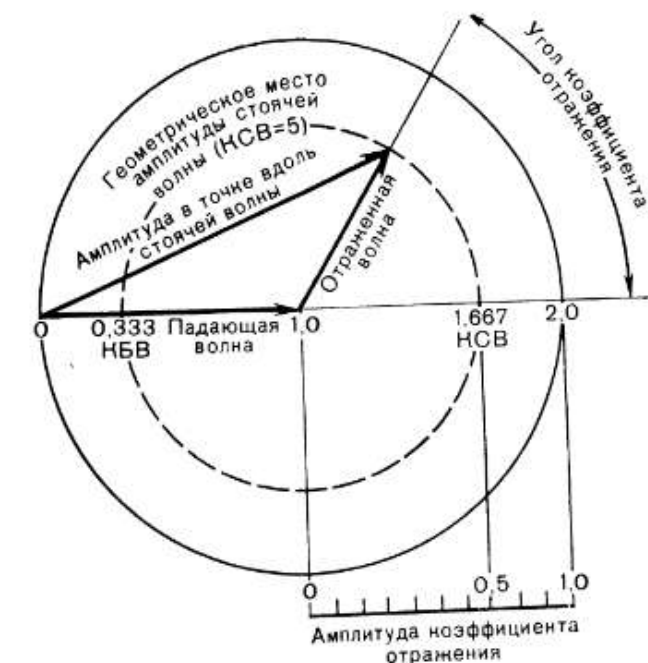
$$RL_{dB} = -10 \log_{10}(P_{REFL} / P_{FWD})$$

$$= -20 \log_{10}(V_{REFL} / V_{FWD}) = -20 \log_{10}(\rho)$$

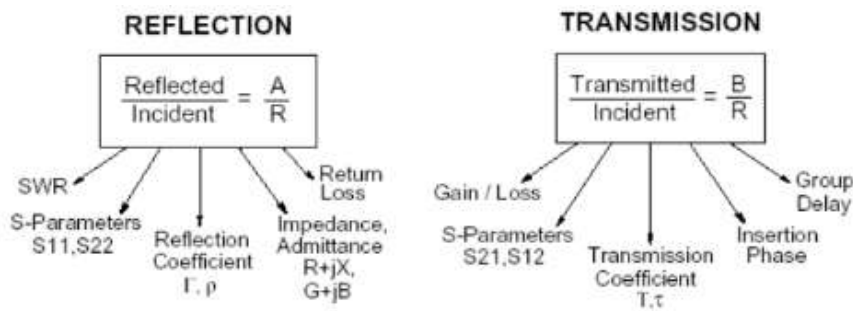
Другой общий термин для оценки отражения – это **коэффициент стоячей волны** по напряжению или КСВ (VSWR), а также его обратная величина коэффициент бегущей волны КБВ. Он определяется как отношение максимума огибающей сигнала к ее минимуму. Через  $\rho$  он выражается как  $(1+\rho)/(1-\rho)$ . Диапазон значений КСВ: от 1 (отражения нет) до бесконечности ( полное отражение ). Коэффициент передачи определяется как отношение переданного напряжения к падающему напряжению. Если абсолютное значение переданного напряжения больше, чем абсолютное значение падающего напряжения, то в тестируемом устройстве мы имеем усиление. Если абсолютное значение переданного напряжения меньше, чем абсолютное значение падающего напряжения, то в тестируемом устройстве мы имеем затухание либо вносимые потери.

No reflection ( $Z_L = Z_0$ )		Full reflection ( $Z_L = \text{open, short}$ )
0	$\rho$	1
$\infty$ dB	RL	0 dB
1	VSWR	$\infty$

Параметры передачи и отражения могут быть представлены в векторном виде (фаза и амплитуда), скалярном виде (только амплитуда ), а также только как фаза. Например, обратные потери (return loss) – это скалярное измерение отражения, в то время как сопротивление – это векторное измерение отражения.

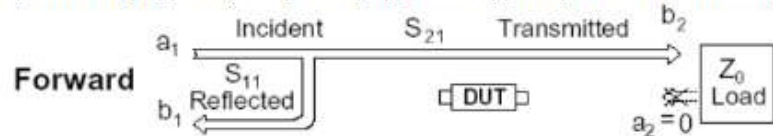


Для того чтобы полностью исследовать неизвестное линейное двух портовое устройство, мы должны провести измерения при разных условиях и вычислить целый ряд параметров . Эти параметры могут использоваться для полного описания электрического поведения вашего устройства (цепи), даже если источник и нагрузка окажутся отличными от тех , при которых производились измерения.

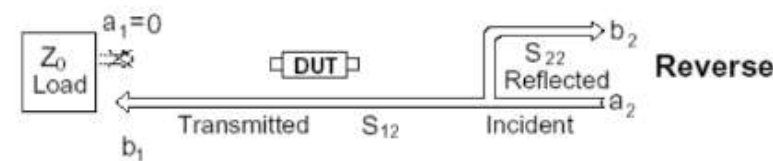


Поскольку на высоких частотах трудно измерить абсолютные значения напряжения и тока, обычно вместо них измеряются S-параметры. Эти параметры соотносятся с уже знакомыми нам понятиями, такими, как усиление, потери и коэффициент отражения. Их относительно легко измерить, кроме того, они не требуют подключать к тестируемому устройству дополнительные, нежелательные нагрузки. Измеренные S-параметры нескольких устройств в системе можно сложить для того, чтобы понять, как будет работать вся система в целом. Количество S-параметров равно квадрату количества портов. Например, двух портовое устройство имеет четыре S-параметра.

Нумерация S-параметров осуществляется по следующему принципу: первая цифра указывает порт, на который энергия приходит, а вторая – порт, на который она первоначально подается. Так, S21 это результат измерения мощности, приходящей на порт 2 в результате подачи на порт 1 радиочастотного сигнала. Когда цифры совпадают (например, S11), речь идет об измерении характеристики отражения. Прямые S-параметры определяются путем измерения модуля амплитуды и фазы падающего, отраженного и переданного сигналов, когда на выходе источника мы имеем нагрузку, точно согласованную с сопротивлением тестируемой системы. В случае двух портовой цепи (четырёхполюсника) S11 является комплексным коэффициентом отражения или импедансом тестируемого устройства DUT (Device Under Test) - коэф-т отражения от входа, при условии, что нагрузка на выходе энергию не отражает, а S21 – комплексным коэффициентом прямой передачи (коэф-т передачи "падающей волны" от входа к выходу).



Если мы подадим сигнал на выход тестируемого устройства, а на вход поместим согласованную нагрузку, то мы сможем измерить два другие (обратные - reverse) S-параметры. Параметр S22 равен выходному комплексному коэффициенту отражения или выходному сопротивлению тестируемого устройства, а S12 – это комплексный коэффициент обратной передачи (коэф-т передачи от выхода к входу).



### Диаграмма Смита

Диаграмма Смита построена основываясь на стандартной формуле коэффициента отражения (в зависимости от сопротивлений источника и нагрузки): Набор окружностей на диаграмме получен по значениям этой формулы, и центры окружностей находятся в разных местах на графике или за его пределами, и каждая из которых представляет собой либо постоянное активное сопротивление, либо постоянное реактивное сопротивление.

После простого преобразования эту формулу можно представить как

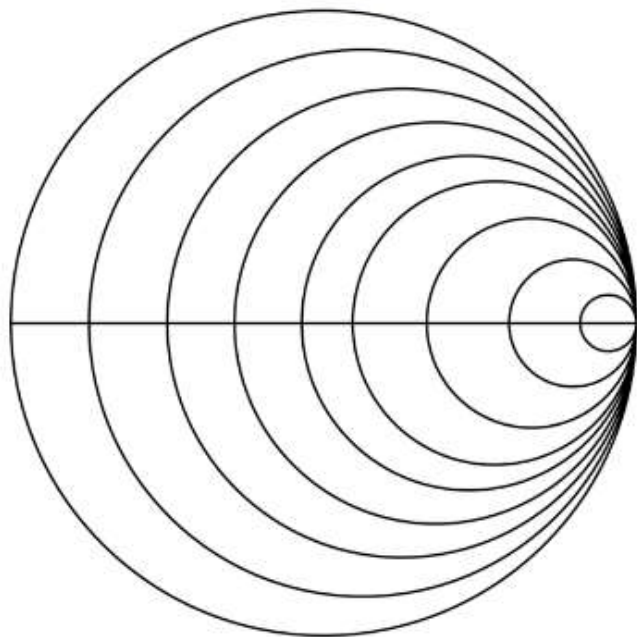
$$\Gamma = \frac{Z_O - 1}{Z_O + 1}, \text{ где } Z_O = \frac{Z_{\text{ист}}}{Z_{\text{нагр}}}$$



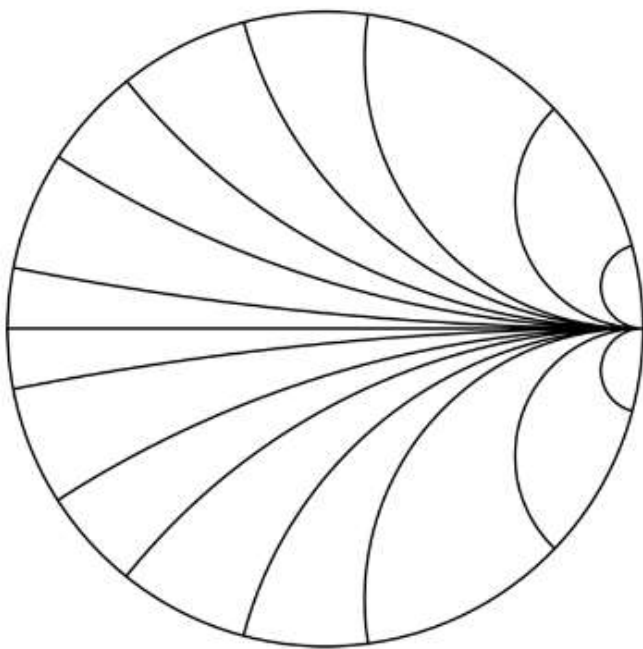
Напомним, что  $Z_O$  является комплексным значением импеданса и может быть представлено в виде  $R + jX$ . Так как коэффициент отражения (который обычно представлен в полярной форме) может быть также представлен и в прямоугольных координатах (для этого мы будем использовать  $A + jB$ ), приведенная выше формула может быть преобразована в следующую:

$$A + jB = \frac{R + jX - 1}{R + jX + 1}$$

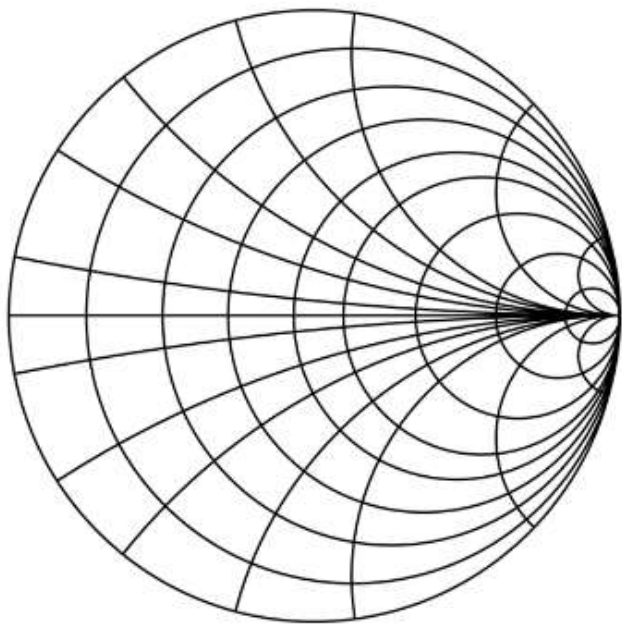
Теперь посмотрим, как строится диаграмма Смита. Она состоит из окружностей постоянного активного сопротивления  $A$



и дуг постоянного реактивного сопротивления  $B$ .

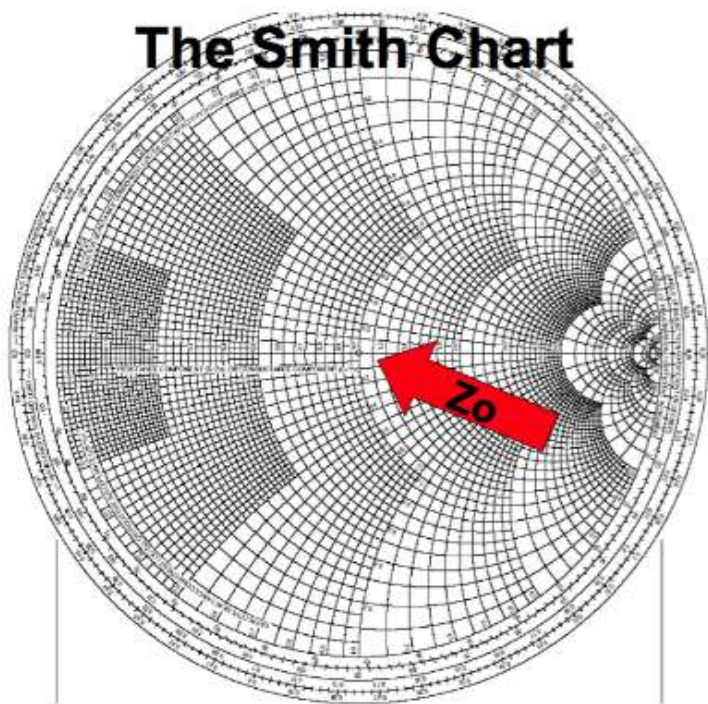


Ниже вы можете увидеть упрощенное изображение (базовая диаграмма Смита) постоянного активного и реактивного сопротивления вместе.



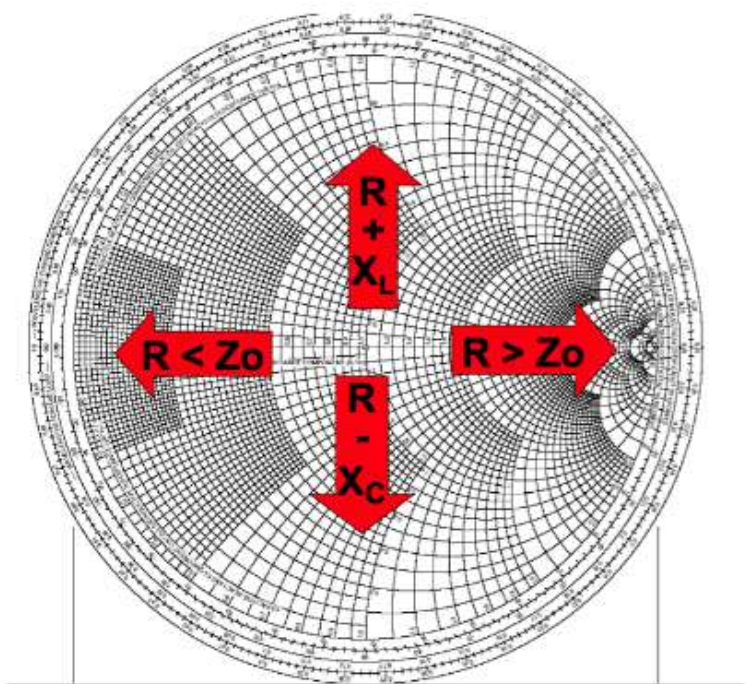
Как интерпретировать диаграмму Смита? Вот несколько моментов, на которые стоит обратить внимание: Точка в центре имеет чисто активное сопротивление  $R = Z$  ;

## The Smith Chart



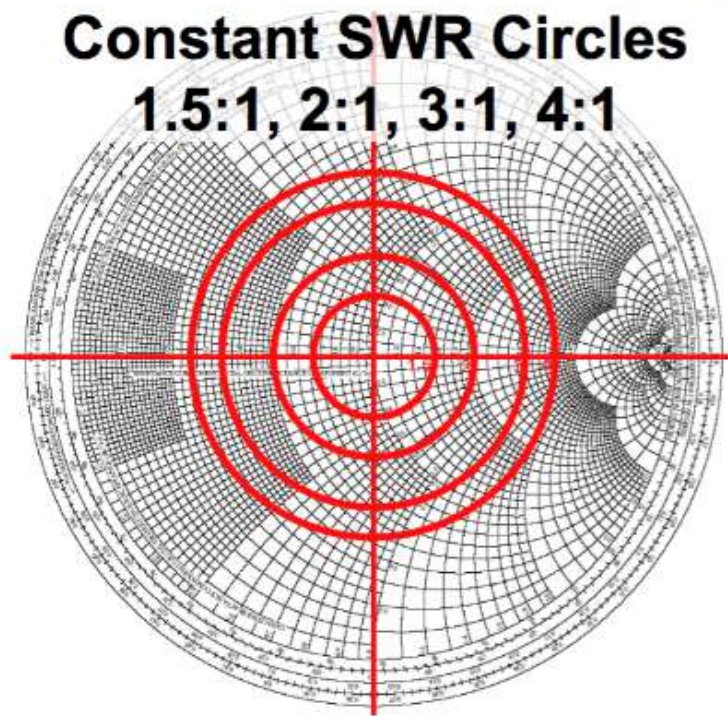
При  $X = 0$  дуга реактивного сопротивления будет иметь бесконечный радиус; это соответствует горизонтальной линии, пересекающей центр диаграммы. Эту линию часто называют действительной осью. Касательно реактивного сопротивления, линии выше действительной оси на диаграмме представляют собой индуктивные реактивные сопротивления, а линии ниже— емкостные реактивные сопротивления; при бесконечных  $R$  и  $X$  окружности активного сопротивления и дуги реактивного сопротивления сходятся в одном месте на крайней правой точке; При  $R = 0$  , точка на диаграмме в крайней левой точке.





окружности вокруг центра диаграммы соответствуют сопротивлению для соответствующего постоянного КСВ;

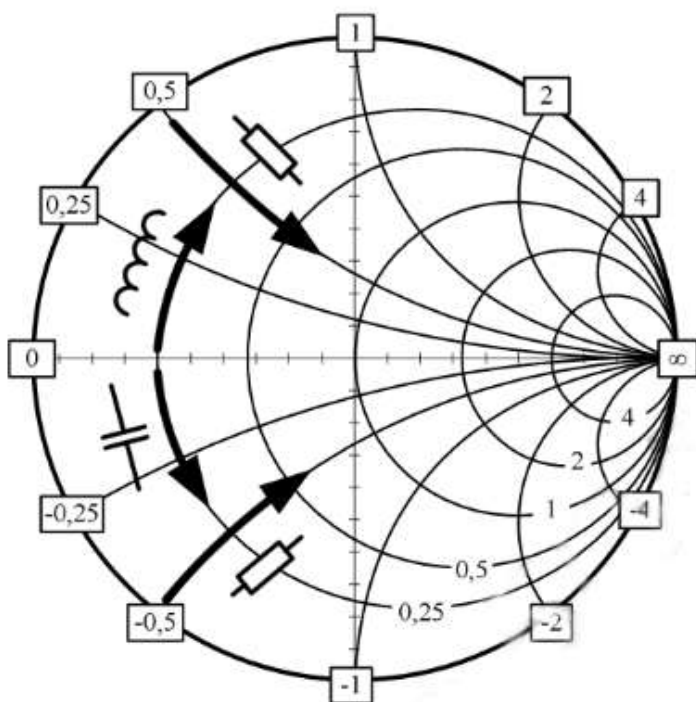
# Constant SWR Circles 1.5:1, 2:1, 3:1, 4:1



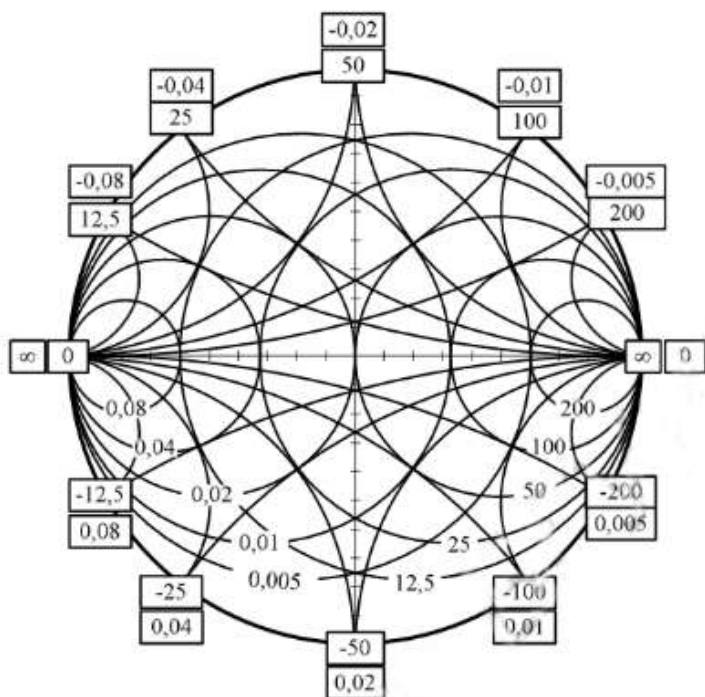
Полный круг по любому диаметру диаграммы соответствует повороту фазы на 180 градусов, а расположенные диаметрально противоположные точки соответствуют повороту фазы на 90 градусов. Это замечание полезно тем, что позволяет использовать кабели определенной длины для согласования импедансов. Поскольку кабель электрической длиной  $\lambda/2$  поворачивает фазу на 180 градусов, то на диаграмме Смита такой элемент возвращает точку в исходное состояние не трансформируя ни активное, ни реактивное сопротивление. Кабель электрической длиной  $\lambda/4$  поворачивает фазу на 90 градусов и на диаграмме Смита такой элемент трансформирует сопротивление симметрично относительно центра диаграммы и трансформирует сопротивление в зависимости от  $Z_{тр}$  кабеля, которое можно рассчитать из формулы  $Z_{тр} = \sqrt{Z_{Вх} \cdot Z_{Вых}}$ .



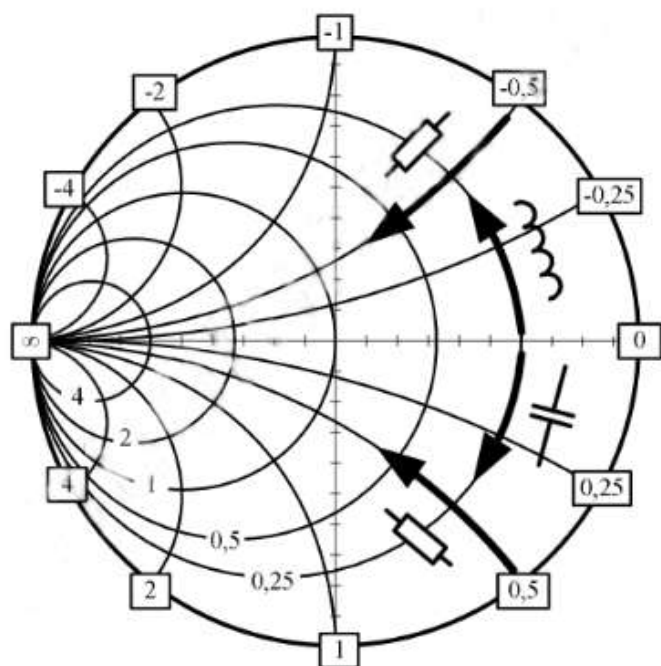
На основе знаний, которые у нас теперь есть, об активном и реактивном сопротивлениях на диаграмме, мы знаем, что каждая точка представляет собой последовательную комбинацию активного и реактивного сопротивлений ( $R + jX$ ). Перемещение вдоль окружности равного активного сопротивления по часовой стрелке означает увеличение положительного реактивного сопротивления, т.е. введение индуктивности. А перемещение вдоль окружности равного активного сопротивления против часовой стрелки означает уменьшение положительного реактивного сопротивления, т.е. введение емкости. Перемещение вдоль дуги равного реактивного сопротивления против часовой стрелки в верхней полуплоскости и по часовой стрелке в нижней полуплоскости означает увеличение активного сопротивления.



До сих пор мы не упоминали о комплексной проводимости на диаграмме Смита. Если вы не знаете, то комплексная проводимость (адмиттанс) является величиной, обратной комплексному сопротивлению (импедансу), или  $Y=1/Z$ . Активное и реактивное сопротивления в этом случае соответствуют активной и реактивной проводимостям. На самом деле, построить аналогичную диаграмму для проводимостей удивительно просто – всё, что вам нужно сделать, это отразить диаграмму сопротивлений по горизонтали. Подобное преобразование очень важно, так как теперь у вас есть диаграмма, которая поможет вам при работе с шунтирующими компонентами (включенными между корпусом и линией связи, параллельно источнику и нагрузке), а не только с включенными последовательно. Процесс нанесения проводимости на диаграмму противоположен – при добавлении индуктивности в цепь последовательно необходимо перемещать значение импеданса по часовой стрелке вдоль окружности постоянного активного сопротивления, а при добавлении шунтирующей индуктивности (включенной параллельно) необходимо перемещаться против часовой стрелки вдоль окружности постоянной активной проводимости; аналогично и с конденсаторами, шунтирующий конденсатор перемещает ваши значения по часовой стрелке на диаграмме комплексной проводимости, а конденсатор, включенный последовательно, – против часовой. Сочетание обоих типов диаграмм даст вам то, что называется диаграммой комплексных сопротивления и проводимости (иммитанса), которая становится еще более полезной, чем стандартная диаграмма Смита, хотя она и будет выглядеть более устрашающей для тех, кто не знает, как она была создана.



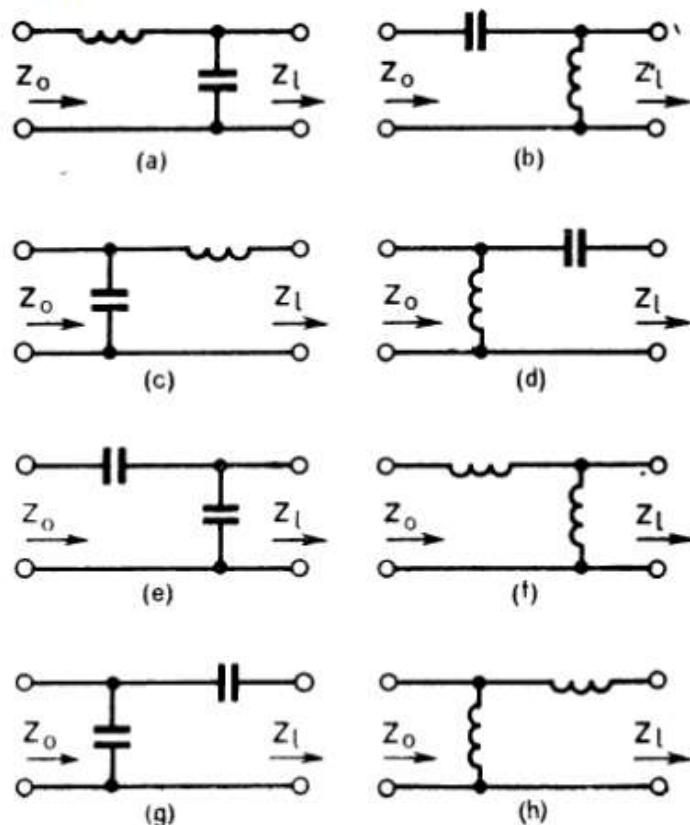
Положительные значения характеризуют емкостную проводимость, а отрицательные – индуктивную. Перемещение вдоль дуг равной реактивной проводимости по часовой стрелке в верхней полуплоскости и против часовой стрелки в нижней полуплоскости означает увеличение активной проводимости. Перемещение вдоль окружности равной активной проводимости по часовой стрелке означает увеличение положительной реактивной проводимости, т.е. введение ёмкости. А перемещение вдоль окружности равной активной проводимости против часовой стрелки означает уменьшение положительной реактивной проводимости, т.е. введение индуктивности.





## Согласующие звенья

Имеется всего восемь возможных вариантов комбинаций согласующих звеньев из реактивных элементов (индуктивность, емкость).



Каждое из этих восьми звеньев способно трансформировать комплексное сопротивление нагрузки в активное сопротивление заданной величины. Значение трансформируемых сопротивлений, соответствующих каждому звену, можно условно представить на круговой диаграмме в виде импедансов, изменяющихся в ограниченной области. На каждой из диаграмм показана заштрихованная область ("недосягаемая зона"). Если желаемое сопротивление нагрузки оказывается в пределах "недосягаемой зоны", то эта нагрузка не может быть трансформирована в  $Z$  выбранным типом согласующего звена. В этом случае необходимо попробовать использовать другой тип согласующего звена из оставшихся семи.

