

# СПОСОБЫ СОГЛАСОВАНИЯ ИМПЕДАНСОВ

ЛУИ ФРЕНЦЕЛЬ (Louis E. Frenzel), редактор, Electronic Design

Термин «согласование сопротивлений» означает процесс выравнивания сопротивлений. Нередко возникает необходимость в согласовании полного сопротивления (импеданса) нагрузки с внутренним сопротивлением управляющего источника. Для согласования импедансов можно использовать широкий набор компонентов и схем. В статье рассмотрены базовые принципы и наиболее популярные методы согласования импедансов в схемах различного назначения.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Теорема о максимуме отдаваемой мощности гласит: чтобы передать максимальную величину мощности от источника в нагрузку, импеданс нагрузки должен быть согласован с импедансом источника. В общем случае в схеме может быть источник как постоянного, так и переменного тока, а его внутреннее сопротивление  $R_i$  или выходной импеданс генератора  $Z_g$  управляет сопротивлением нагрузки  $R_L$  или импедансом  $Z_L$  (см. рис. 1):  $R_L = R_i$  или  $Z_L = Z_g$ .

График зависимости мощности в нагрузке от сопротивления нагрузки показывает, что при согласовании импедансов нагрузки и источника достигается максимум мощности (см. рис. 2). Ключевым следствием данной теоремы является то, что когда нагрузка согласована с источником, величина мощности, передаваемой в нагрузку, равна мощности, рассеиваемой в источнике. Поэтому при отдаче максимальной мощности достигается эффективность всего 50%.

Источник должен быть способен рассеивать эту мощность. Чтобы отдавать максимальную мощность в нагрузку, генератор должен быть спроектирован так, чтобы его мощность в два раза превосходила требуемую выходную мощность.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Передача максимальной мощности от источника в нагрузку часто происходит в электронных устройствах. Но не всегда. Например, при согласовании аудиоусилителя с динамиком используется низкий выходной импеданс усилителя (менее 1 Ом), работающего на динамик, чье 8-Ом номинальное сопротивление может меняться от 6 до 25 Ом в зависимости от частоты. Это обеспечивает значение коэффициента демпфирования динамика, приемлемое для качественного воспроиз-

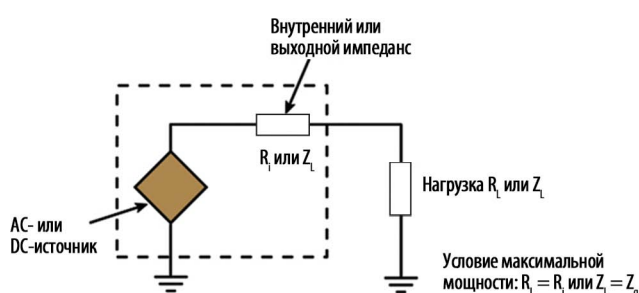


Рис. 1. Максимум мощности отдается от источника в нагрузку, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника



Рис. 2. При согласовании импедансов нагрузки и источника обеспечивается максимум мощности в нагрузке

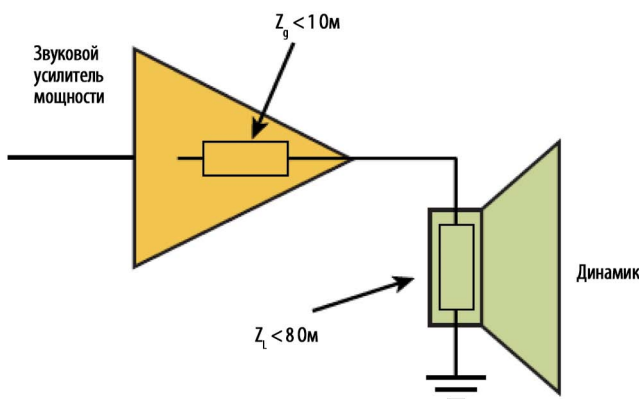


Рис. 3. Согласованные импедансы обеспечивают передачу максимальной звуковой мощности от усилителя в динамик

изведения звука. К тому же, в усилителе рассеивается меньше мощности и тепла (см. рис. 3).

Другим примером может служить передача мощности из одного каскада передатчика в другой (см. рис. 4). Комплексное входное сопротивление ( $R \pm jX$ ) усилителя В должно быть согласовано с комплексным выходным сопротивлением усилителя А. Важно, чтобы реактивные компоненты были взаимно скомпенсированы. Еще одним примером является передача максимальной мощности в антенну (см. рис. 5). В данном случае импеданс антенны согласован с выходным импедансом передатчика.

### СОГЛАСОВАНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Последний пример позволяет сосредоточить внимание на еще одной причине, по которой необходимо согласовывать импеданс. Выход передатчика обычно подключается к антенне через линию передачи, которая обычно представляет собой коаксиальный кабель. В других приложениях линией передачи может быть витая пара или какая-либо другая среда.

Кабель становится линией передачи, когда его длина превышает  $\lambda/8$  на рабочей частоте, где  $\lambda = 300/f_{\text{МГц}}$ . Например, длина волны на частоте 433 МГц будет равна:  $\lambda = 300/f_{\text{МГц}} = 300/433 = 0,7$  м.

Соединительный кабель является линией передачи, если его длина превышает  $0,7/8 = 0,0875$  м. Все линии передачи имеют характеристическое сопротивление  $Z_0$ , которое представляет собой функцию индуктивности и емкости линии:

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

Чтобы достичь максимальной передаваемой по линии передачи

мощности, импеданс линии должен быть согласован с импедансом источника и нагрузки (см. рис. 6). Без согласования импедансов нельзя передать максимальную мощность. Кроме того, вдоль линии будут распространяться стоячие волны. Это означает, что нагрузка не поглотит всю мощность, переданную по линии. Вследствие этого некоторая часть мощности отражается обратно и эффективность снижается. Отраженная мощность может даже вывести из строя источник. Стоячие волны представляют собой распределенный вдоль линии профиль напряжений и токов. Напряжение и ток постоянны в согласованной линии, но могут в значительной степени меняться, если импедансы не согласованы.

Величина потерь мощности из-за отражений зависит от коэффициента отражения  $\Gamma$  и коэффициента стоячей волны SWR. Они определяются степенью рассогласования между импедансом источника и нагрузки.

SWR представляет собой функцию импеданса нагрузки  $Z_L$  и линии  $Z_0$ :

$$\begin{aligned} \text{SWR} &= Z_L/Z_0 \text{ (для } Z_L > Z_0\text{)}, \\ \text{SWR} &= Z_0/Z_L \text{ (для } Z_0 > Z_L\text{)}. \end{aligned}$$

При идеальном согласовании SWR = 1. Предположим, что  $Z_L = 75$  Ом, а  $Z_0 = 50$  Ом, тогда:

$$\text{SWR} = Z_L/Z_0 = 75/50 = 1,5.$$

Коэффициент отражения  $\Gamma$  является еще одним показателем идеального согласования:

$$\Gamma = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0).$$

При идеальном согласовании  $\Gamma$  будет равен 0. Можно рассчитать коэффициент отражения  $\Gamma$  и по величине SWR:

$$\Gamma = (\text{SWR} - 1)/(\text{SWR} + 1).$$

Для примера, описанного выше, расчет дает:

$$\Gamma = (\text{SWR} - 1)/(\text{SWR} + 1) = (1,5 - 1)/(1,5 + 1) = 0,5/2,5 = 0,2.$$

Рассмотрев величину отраженной мощности для данного значения SWR (см. рис. 7), можно заметить, что коэффициент стоячей волны SWR, равный 2 и менее, отвечает требованиям многих приложений. SWR, равный 2, означает, что отраженная мощность составляет 10%. Поэтому 90% мощности достигнет нагрузки.

Не следует забывать, что все линии передачи, подобные коаксиальному кабелю, вносят потери порядка нескольких дБ на метр длины. Эти потери должны быть учтены в любом расчете мощности, которая достигает нагрузки. В документации на коаксиальный кабель представлены эти значения для различных частот.

Еще одним фактором, который нужно принимать во внимание, является то, что если импедансы линии и нагрузки согласованы, то длина линии не имеет значения. Однако когда импедансы линии и нагрузки не согласованы, генератор увидит комплексное значение импеданса, которое является функцией длины линии.

Отраженная мощность обычно выражается через обратные потери  $R_L$ . Они рассчитываются из выражения:

$$R_L(\text{дБ}) = 10 \log (P_{\text{IN}}/P_{\text{REF}}),$$

где  $P_{\text{IN}}$  представляет собой входную мощность линии, а  $P_{\text{REF}}$  – отраженную мощность. Чем больше значение в дБ, тем меньше отраженная мощность и больше величина мощности, переданная в нагрузку.

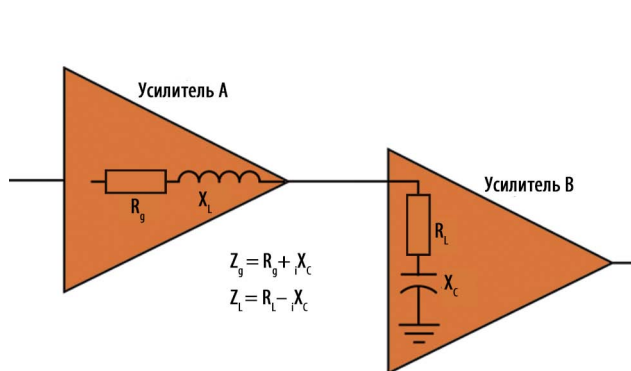


Рис. 4. При согласовании импедансов в радиочастотных схемах следует учитывать индуктивную и емкостную составляющие полного сопротивления

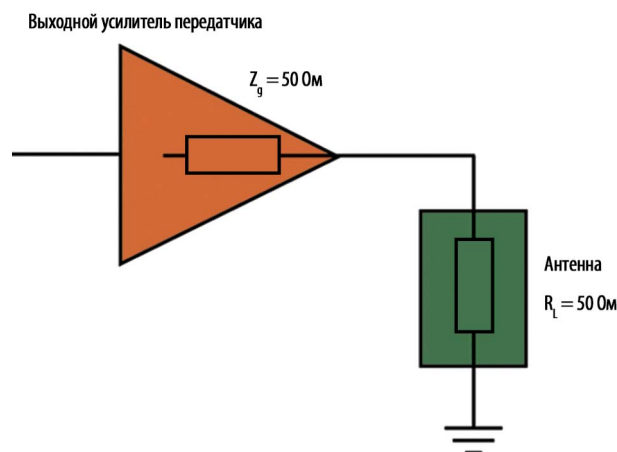


Рис. 5. Чтобы получить максимальную мощность, необходимо, чтобы импеданс антенны был равен выходному импедансу передатчика

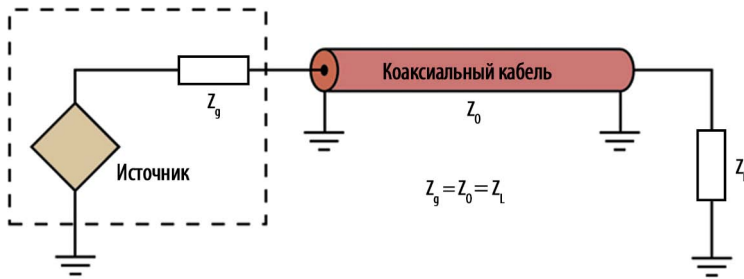


Рис. 6. Линия передачи имеет характеристическое сопротивление  $Z_0$ , которое должно быть согласовано с нагрузкой, чтобы обеспечить максимальную мощность передачи и преодолеть потери из-за стоячих волн

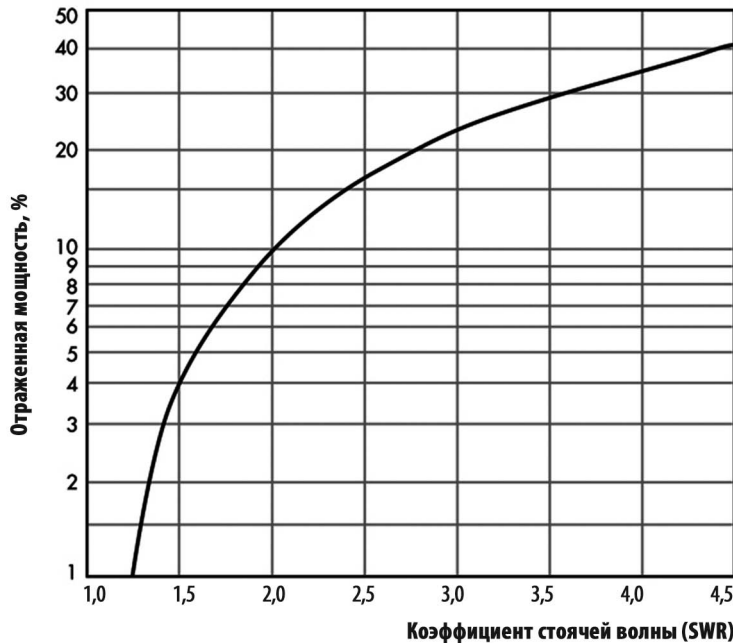


Рис. 7. График показывает зависимость отраженной мощности в несогласованной линии передачи от SWR

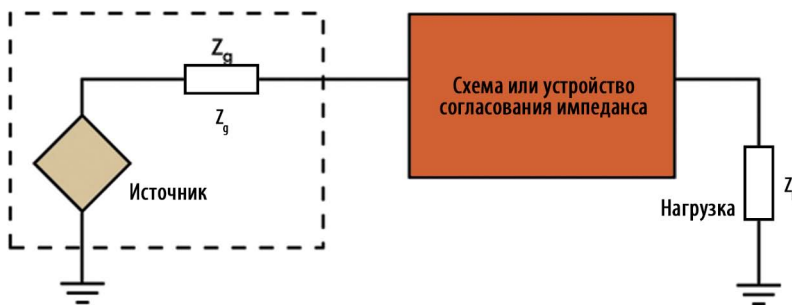


Рис. 8. Схема или устройство согласования делает импеданс нагрузки согласованным с генератором

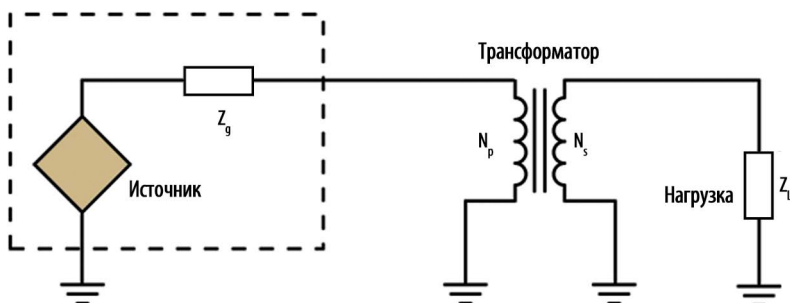


Рис. 9. Трансформатор обеспечивает почти идеальное согласование импедансов

### СОГЛАСОВАНИЕ ИМПЕДАНСОВ

Общую проблему рассогласования импеданса нагрузки и источника можно скорректировать путем подключения устройства согласования импеданса между источником и нагрузкой (см. рис. 8). Устройством согласования может быть компонент, схема или часть оборудования. При таком способе возможен широкий спектр решений. Два простейших способа предполагают применение трансформатора и согласующей  $\lambda/4$ - (или четвертьволновой) секции.

Трансформатор обеспечивает согласование импедансов с помощью коэффициента трансформации  $N = N_s/N_p$ , где  $N_s$  – число витков вторичной обмотки трансформатора, а  $N_p$  – число витков первичной обмотки трансформатора (см. рис. 9).

Соотношение между импедансами рассчитывается следующим образом:

$$Z_s/Z_p = (N_s/N_p)^2, \text{ или } N_s/N_p = \sqrt{Z_s/Z_p}.$$

$Z_p$  представляет собой импеданс первичной цепи, который является выходным импедансом управляющего источника  $Z_G$ .  $Z_s$  – импеданс вторичной цепи или нагрузки  $Z_L$ . Например, выходной импеданс источника, равный 300 Ом, преобразуется в 75 Ом посредством трансформатора для согласования 75-Ом нагрузки с помощью коэффициента трансформации, равного 2:1:

$$N_s/N_p = \sqrt{Z_s/Z_p} = \sqrt{300/75} = \sqrt{4} = 2.$$

Высокоэффективный трансформатор обеспечивает широкую полосу пропускания. Современные трансформаторы с ферритовым сердечником имеют полосу пропускания до нескольких сот МГц.

Автотрансформатор с одной обмоткой и выводами также может с успехом использоваться для согласования импедансов. В зависимости от подключения импедансы могут быть либо увеличены (см. рис. 10а), либо уменьшены (см. рис. 10б). Для расчета используется та же формула, что и в случае обычных трансформаторов. Обмотка трансформатора находится в катушке и может даже быть частью резонансной цепи с конденсатором.

Решение для согласования импедансов на основе линии передачи использует  $\lambda/4$ - (четвертьволновую) секцию линии передачи определенного импеданса (которая называется Q-секцией) для согласования нагрузки и источника (см. рис. 11):

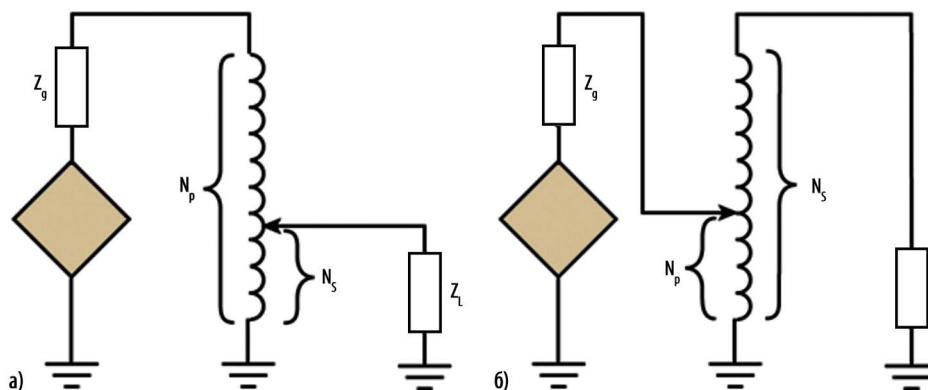


Рис. 10. Однообмоточный автотрансформатор с выводами может либо понижать (а), либо повышать (б) импедансы как обычный двухобмоточный трансформатор

$$Z_Q = \sqrt{Z_0 Z_L},$$

где  $Z_Q$  — характеристическое сопротивление Q-секции;  $Z_0$  — характеристическое сопротивление входной от управляющего источника линии передачи, а  $Z_L$  — импеданс нагрузки.

На рисунке 11 показана схема, в которой 36-Ом импеданс четвертьволновой вертикальной антенны с горизонтальными отражающими элементами согласован с 75-Ом выходным сопротивлением передатчика с помощью 52-Ом коаксиального кабеля. Сопротивление коаксиального кабеля рассчитывается следующим образом:

$$Z_Q = \sqrt{75 \times 36} = \sqrt{2700} = 52 \text{ Ом.}$$

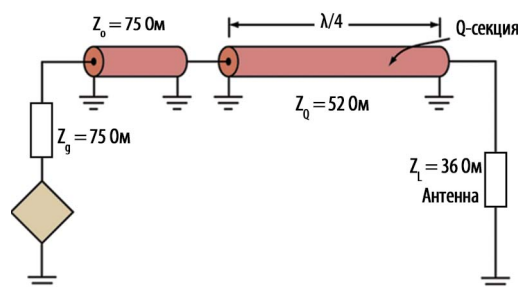


Рис. 11. С помощью четвертьволновой Q-секции линии передачи можно согласовать нагрузку и генератор на одной частоте

При рабочей частоте 50 МГц длина волны будет равна:

$$\lambda = 300/f_{\text{МГц}} = 300/50 = 6 \text{ м,}$$

$$\lambda/4 = 20/4 = 1,5 \text{ м.}$$

При использовании, например, 52-Ом коаксиальной линии передачи типа RG-8/U с коэффициентом замедления 0,66:

$$\lambda/4 = 1,5 \text{ м} (0,66) = 1 \text{ м.}$$

Следует отметить, что существует несколько важных ограничений при использовании данного метода. Во-первых, нужно использовать кабель с требуемым характеристическим сопротивлением. Такой кабель не всегда доступен, поскольку большинство кабелей поставляются всего с несколькими базовыми сопротивлениями (50, 75, 93,125 Ом). Во-вторых, необходимо учитывать, что длина кабеля влияет на рабочую частоту, которая принимает участие в расчете длины волны и коэффициента замедления линии передачи.

Эти ограничения следует особенно принимать во внимание при работе на низкой частоте. Поэтому этот метод более просто реализовать в приложениях, работающих в УВЧ- и СВЧ-диапазонах при использовании микрополосковых линий передачи на печатной плате. В этом случае можно применять любую нужную величину характеристического сопротивления линии передачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Louis E. Frenzel. *Back To Basics: Impedance Matching* 101//*electronicsdesign.com*

**АЛЕКСАНДЕР  
ЭЛЕКТРИК**  
ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Российский производитель  
модулей и блоков  
вторичного электропитания  
промышленного, коммерческого  
и специального назначения  
от 5 до 12000 Вт,  
DC/DC, AC/DC,  
ИБП



ООО «АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК источники электропитания»  
129226, Москва, пр-т Мира, 125, тел: (909)156-54-97, (499)181-19-20,  
(499)181-26-04, тел/факс: (916)950-87-53, (499)181-05-22  
e-mail: alecsan@aeip.ru www.aeip.ru

РЕКЛАМА