

## Что такое входное сопротивление антенны и что с ним делать?

Все знают, что входное сопротивление (импеданс) антенны редко когда бывает равный волновому сопротивлению фидерной линии. Здесь постараюсь показать, как согласовать нагрузку с фидером эффективными методами. Далее все примеры будут даны для коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 ом, но принцип расчёта действителен и для других как несимметричных, так и симметричных линий передач.

### Входное сопротивление антенны

Сначала выясним, что такое входное сопротивление антенны. Считается, что оно представляет собой последовательно соединённые реактивное и активное сопротивления. Но в антенне или в фидере нет реального резистора, конденсатора или катушки индуктивности. Всё это только результат расчёта эквивалентных им сопротивлений антенной цепи. Пусть в качестве нагрузки будет использован некий «чёрный ящик», на входной разъём которого подаётся ВЧ напряжение. На этом разъёме реально можно измерить мгновенное напряжение  $u'$  и ток  $i'$ , а также разницу фазы между ними  $\varphi$ . Входное сопротивление есть рассчитанное активное и реактивное сопротивления, подключая к которым данное ВЧ напряжение получим точно такие же  $u'$ ,  $i'$  и  $\varphi$ . Известно, что такой эквивалент может иметь как последовательное (serial,  $Z_s = R_s + jX_s$ ), так и параллельное (parallel,  $Z_p = R_p \parallel +jX_p$ ) соединение активных и реактивных сопротивлений. Каждому последовательному соединению активного ( $R_s$ ) и реактивного ( $X_s$ ) сопротивлений соответствует параллельное соединение активного ( $R_p$ ) и реактивного ( $X_p$ ) сопротивлений. В общем случае  $R_s \neq R_p$  и  $X_s \neq X_p$ . Привожу формулы, по которым можно пересчитать численные значения с одного соединения на другое.

$$Z_p = R_p \parallel +jX_p \qquad R_p = R_s \left( 1 + \frac{X_s^2}{R_s^2} \right) \qquad X_p = X_s \left( 1 + \frac{R_s^2}{X_s^2} \right)$$
$$Z_s = R_s + jX_s \qquad R_s = \frac{R_p}{1 + \frac{R_p^2}{X_p^2}} \qquad X_s = \frac{X_p}{1 + \frac{X_p^2}{R_p^2}}$$


Например, пересчитаем последовательное соединение  $Z_s = 40 + j30 \Omega$  в параллельное  $Z_p$ .

$$Z_p = R_p \parallel +jX_p = R_s \left( 1 + \frac{X_s^2}{R_s^2} \right) + j \cdot X_s \left( 1 + \frac{R_s^2}{X_s^2} \right) = 40 \left( 1 + \frac{30^2}{40^2} \right) + j30 \left( 1 + \frac{40^2}{30^2} \right) = 62.5 \parallel +j83.33$$

Чаще используют эквивалент последовательного включения, но и эквивалент параллельного включения имеет такое же практическое значение.  $Z_s$  называется импедансом последовательного включения,  $R$  – резистансом,  $X$  – реактансом, а  $Z_p$  импедансом параллельного включения. В параллельном включении часто используется админтанс, но это проводимость, и наглядность при его использовании сильно уменьшается. Обычно термин „импеданс“ указывает, что речь идёт о последовательном соединении эквивалентного активного и реактивного сопротивлений. Однако, пересчёт последовательного соединения сопротивлений в параллельное соединение довольно часто нужен для компенсации реактивной составляющей. Только следует иметь в виду, что при последовательной и параллельной компенсации получаем разные активные составляющие

сопротивления. Для пересчёта  $Z_s$  в  $Z_p$  и наоборот очень хорошо подходит программа [NETCALC](#). Можно посчитать и здесь.

$$R_s = \boxed{\phantom{000}} \quad X_s = \boxed{\phantom{000}}$$

$$R_p = \boxed{\phantom{000}} \quad X_p = \boxed{\phantom{000}}$$

$$SWR = \boxed{\phantom{000}}$$

Возникает вопрос, как измерить параметры комплексной нагрузки. К сожалению, простой измеритель КСВ тут мало пригоден. Я для этого пользуюсь векторным анализатором [VA1](#), который на дисплее показывает все нужные цифровые значения.

### Компенсация реактивной составляющей

Реактивную составляющую сопротивления (импеданса) полезно компенсировать. Это уменьшает КСВ. Суть компенсации есть выравнивания фаз напряжения и тока. Менять угол фазы между напряжением и током можно подключая реактивный элемент последовательно или параллельно. Чтобы разница в углах фаз стала равна нулю, надо подключить такое реактивное сопротивление, какое присутствует в эквивалентной схеме нагрузки, только с противоположным знаком. Известно, что реактивное сопротивление ёмкости имеет отрицательный знак, индуктивности – положительный. В случае последовательной компенсации дополнительный эквивалентный реактивный элемент с противоположным знаком включается последовательно и получается последовательный контур, а в случае параллельной компенсации – параллельно, получается параллельный контур. В случае последовательного соединения сопротивлений они просто складываются

$$X_{S_{\text{sum}}} = X_S + X_{\text{комп}}$$

А в случае параллельного соединения

$$\frac{1}{X_{P_{\text{sum}}}} = \frac{1}{X_P} + \frac{1}{X_{\text{комп}}}$$

Если нагрузку полностью скомпенсировать, эти контура находятся в резонансе, при этом  $X_s=0$  или  $X_p=\infty$ . Например, имеем нагрузку  $Z_s=50+j30\Omega$  ( $Z_p=68||+j113\Omega$ ),  $SWR=2$ . Если последовательно с нагрузкой включим ёмкость с  $X_c=-30\Omega$ , получим  $Z=50\Omega$  и  $SWR=1$ . Если параллельно нагрузке подключим ёмкость с  $X_c=-113\Omega$ , получим  $Z=68\Omega$  и  $SWR=1,36$ . В случае последовательной компенсации дополнительный элемент с эквивалентном соответствует последовательному контуру, в случае параллельного – параллельному.

### Согласование сопротивлений

Как я уже писал, по-разному подключая компенсирующий элемент, в общем случае получаем разный  $Z$ , тем самым и КСВ. Посмотрим, как можно скомпенсировать (согласовать) нагрузку  $Z_s=22+j25\Omega$  ( $Z_p=50,4||+j44\Omega$ ),  $SWR=2,94$ . Последовательно подключив конденсатор с  $X_c=-25\Omega$  получим  $Z=22\Omega$  ( $SWR=2,27$ ). Если параллельно нагрузке подключим конденсатор с  $X_c=-44\Omega$ , получим  $Z=50,4\Omega$  и  $SWR=1,01$ . Как видим, в данном случае параллельная компенсация бесспорно лучше. Если такая нагрузка будет подключена к передатчику, который работает на частоте 14 MHz, то параллельно нагрузке следует подключить конденсатор ёмкостью

$$C = -\frac{1}{2\pi X_c} = -\frac{1}{2\pi \cdot 14 \cdot 10^6 \cdot (-44)} = 258 \text{ pF}$$

Если передатчик имеет выходной П-контур, то эту ёмкость надо добавить к выходному (холодному) конденсатору. Это можно сделать с помощью выходного конденсатора, если его увеличить на необходимую величину. В таком случае получим хорошее согласование передатчика,

рассчитанного на  $50\Omega$ , с нагрузкой (в точке соединения фидера с передатчиком,  $\rho=0$ ), хотя КСВ в кабеле останется 2,94. Если нагрузка будет  $Z_p=50,4||-j44\Omega$ , то параллельно конденсатору П-контура надо подключить индуктивность  $0,5\text{mH}$  ( $X_l=44\Omega$ ) или, если есть такая возможность, ёмкость „холодного“ конденсатора П-контура уменьшить на  $258\text{pF}$  ( $X_s=-44\Omega$ ). Частично из-за этого, настраивая П-контур на реальную нагрузку, мы и получаем неодинаковую ёмкость „холодного“ конденсатора сравнительно с  $50\Omega$  эквивалентом. Частично потому что, меняя ёмкость конденсаторов П-контура, можно в некоторых пределах настроить передатчик на нагрузку, не равную рассчитываемой при проектировании передатчика. Если передатчик не имеет П-контура или тюнера, то эта не скомпенсированная реактивность расстраивает выходной фильтр передатчика, коэффициент отражения  $\rho>0$  и передатчик не способный отдать в фидер рассчитанную мощность. Хочу отметить, что ни П-контур, ни тюнер в трансивере или около него, КСВ в фидере не изменяет. Эти устройства способны только согласовать выходное сопротивление передатчика с входным сопротивлением фидера в точке его подключения к передатчику (не путать с волновым сопротивлением фидера), т.е. улучшить коэффициент отражения  $\rho$ . Чтобы улучшить КСВ в кабеле, надо согласовать нагрузку с волновым сопротивлением фидера в точке их соединения.

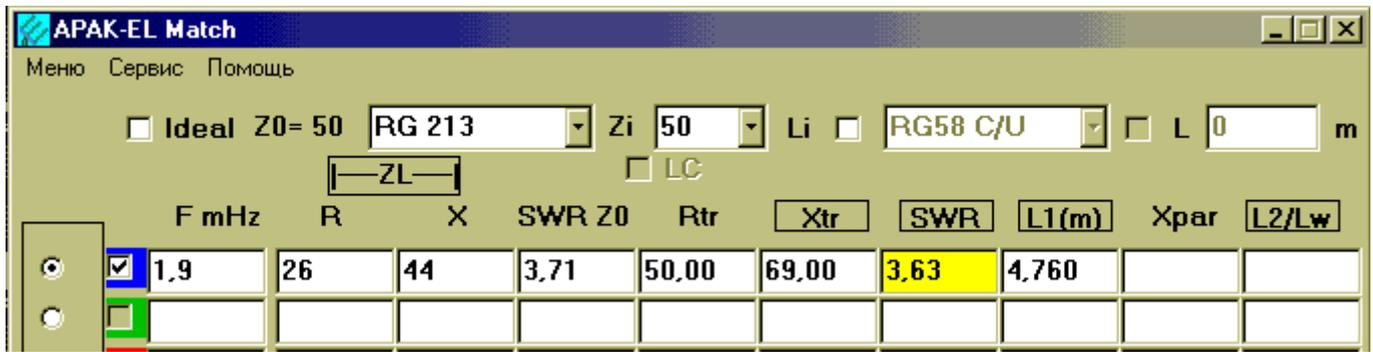
Можно одновременно применять последовательную и параллельную компенсацию. Это зависит от конкретного случая. Приведу реальный пример. Сопротивление антенны на  $1,9\text{MHz}$  имеет импеданс  $Z_s=26+j44\Omega$  ( $Z_p=100||+j59\Omega$ ),  $\text{SWR}=3,7$ . Если параллельно нагрузке подключить конденсатор с  $X_c=-59\Omega$ , получим  $Z=100\Omega$ ,  $\text{SWR}=2$ , если последовательно подключим конденсатор с  $X_c=-44\Omega$ , получим  $Z=26$ ,  $\text{SWR}=1,92$ . Последний вариант лучше, но всё равно плохой. Теперь, не изменяя  $R_s$ , подберём  $X_s$  такое, что бы  $R_p$  стало бы  $50\Omega$ . Этому варианту соответствует  $Z_s=26+j25\Omega$ . Последовательно с нагрузкой подключим реактивность  $X_s=(26+j25)-(26+j44)=-j19\Omega$  (конденсатор  $4,4\text{nF}$ ). Полученный  $Z_s=26+j25\Omega$  пересчитаем в  $Z_p=50||+j52\Omega$ . Теперь параллельно подключаем реактивность  $X_p=-j52\Omega$  (конденсатор  $1,6\text{nF}$ ) и получаем  $Z=50\Omega$  и  $\text{SWR}=1$ . Всё, антенна с  $50\Omega$  фидером согласована!

Всё это без труда можно посчитать с помощью программы [MMANA](#). Я всё это писал для того, что бы был понятен механизм настройки и что на что влияет.

The screenshot shows the 'Сервис и установки' (Service and Settings) window of the MMANA software. The 'Контур' (Circuit) tab is selected, showing a parallel LC circuit configuration. The frequency is set to 1.9 MHz. The antenna resistance is 50.0 Ohms. The antenna reactance is 44.0 Ohms (inductive). The software has calculated the required series reactance to be -19.020 Ohms (capacitive) and the required parallel reactance to be -52.042 Ohms (capacitive). The resulting antenna impedance is 26.0 Ohms (resistive) and 44.0 Ohms (inductive reactance).

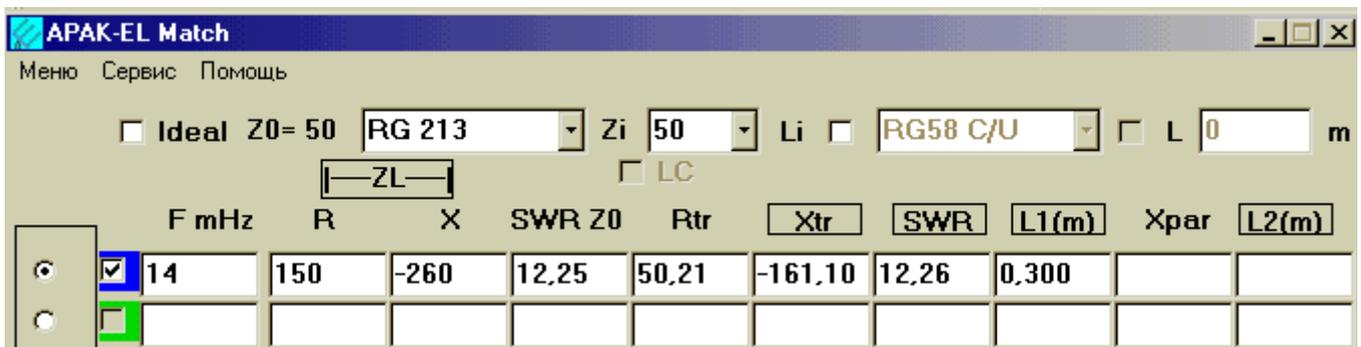
Parameter	Value	Unit
Frequency	1.9	МГц
Antenna Resistance ( $R_{\text{ант}}$ )	50.0	Ом
Antenna Reactance ( $X_{\text{ант}}$ )	44.0	Ом
Required Series Reactance	-19.020	Ом
Required Parallel Reactance	-52.042	Ом
Resulting Resistance	26.0	Ом
Resulting Inductive Reactance	44.0	Ом

Можно согласовать и другим способом. Известно, что если к фидеру подключить нагрузку, сопротивление которой не равно волновому сопротивлению фидера, то фидер будет трансформировать сопротивление нагрузки. Численное значение сопротивления на входе фидера будет зависеть от сопротивления нагрузки, волнового сопротивления и длины фидера. С помощью программы [АРАК-EL](#) находим, что если к нагрузке  $Z_s=26+j44\Omega$  подключить фидер  $50\Omega$  длиной  $4,76\text{m}$ , то на частоте  $1,9\text{MHz}$  на его входе получим  $Z_s=50+j69\Omega$ . Если в этом месте включим последовательно ёмкость с  $X_c=-69\Omega$  (конденсатор  $1,2\text{nF}$ ), то получим  $Z=50\Omega$  и  $\text{SWR}=1$ . С этого места можно подключать  $50\Omega$  фидер любой длины.



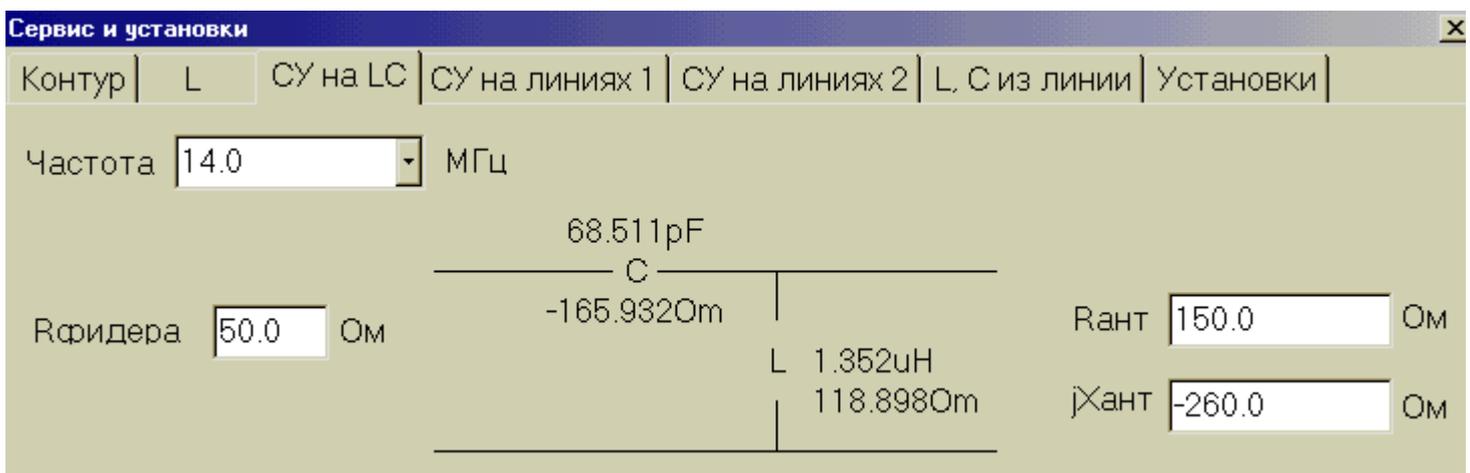
Возможны и другие варианты согласования. Это зависит от понимания сути и фантазии.

Теперь попробуем согласовать антенну на 14 МГц, сопротивление которой  $Z_s=150-j260\Omega$  ( $Z_p=600||-j346\Omega$ ). Как видим, одним компенсирующим элементом не обойдёмся. Нам нужно получить  $50\Omega$ , а не  $150\Omega$  или  $600\Omega$ . Вводим данные в АПАК-EL и находим ближайшую к нагрузке точку, где  $R_{tr}=50\Omega$ .



Как видим, длина дополнительного кабеля будет только 30см. В этом месте будем иметь  $Z_s=50-j161\Omega$ . Если в этом месте последовательно подключим индуктивность с  $X_l=161\Omega$ , то получим полное согласование ( $Z=50\Omega$ ,  $SWR=1$ ).

Всё это можно согласовать и в месте подключения нагрузки к фидеру. Пример с MMANA



Как видим, согласовать можно, подключив индуктивность  $1,35\mu\text{H}$  параллельно нагрузке, а сигнал на нагрузку подавать через конденсатор  $68,5\text{pF}$ .

### Шлейфы

Шлейфами называются закороченные или открытые отрезки фидера. В идеальном фидере (фидере без потерь) сопротивление таких отрезков есть чисто реактивное, активной части нет. Такими отрезками фидера можно пользоваться при компенсации реактивной составляющей. Это удобно, если применяется параллельное компенсирование. Часто используется отрезки до четверти длины волны. Они могут быть и длиннее, но реальные фидеры имеют потери и, чем длиннее линия, тем

больше. Замкнутый шлейф электрической длины до  $1/4\lambda$  имеет на конце индуктивное реактивное сопротивление, разомкнутый – ёмкостное. Такими отрезками фидера можно имитировать как индуктивность, так и ёмкость. Но надо не забыть, что индуктивность или ёмкость шлейфа зависят от частоты. В приведённом примере мы видим, что надо подключить индуктивность  $1,352\mu\text{H}$ . С помощью MMANA получаем, что такую индуктивность на 14 MHz имеет закороченный на конце шлейф с кабеля RG58/U длиной 2,62м.

**Сервис и установки**

Контур | L | СУ на LC | СУ на линиях 1 | СУ на линиях 2 | L, C из линии | Установки

Частота  МГц      Коэф. укорочения

Тип линии       Zo  Ом

Линия на конце:  
 разомкнута  
 закорочена

Длина  см      Fo=19.154953MHz (1/4wl)

Реактанс  Ом      L  uH

На том же примере попробуем то же согласовать с помощью MMANA другим способом, используя только шлейф.

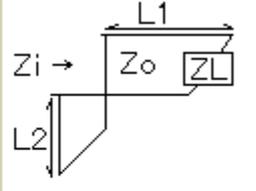
**Сервис и установки**

Контур | L | СУ на LC | СУ на линиях 1 | СУ на линиях 2 | L, C из линии | Установки

Нагрузка ZL  
R  Ом  
X  Ом

Линия  
Zo  Ом  
Коэффициент укорочения

F  МГц  
Zi  Ом



Вариант 1  
L1 :0.1828wl (257.4 cm)  
ZS :4.41-j14.17  
XS :15.54Om (0.176 uH)  
L2s:0.0479wl (67.5 cm)  
L2o:0.2979wl (419.6 cm)  
Zi :49.95+i0.00 SWR:1.00

Вариант 2  
L1 :0.2713wl (382.1 cm)  
ZS :4.41+j14.17  
XS :-15.54Om (728.845 pF)  
L2s:0.4520wl (636.6 cm)  
L2o:0.2020wl (284.5 cm)  
Zi :49.99-i0.00 SWR:1.00

Таким образом, если короткозамкнутый шлейф длиной 67,5см. подключить параллельно фидеру на расстоянии 2,57м. от нагрузки, то так же полностью согласуем фидер с нагрузкой. Или же, можно параллельно подключить разомкнутый шлейф длиной 2,84м. на расстоянии от нагрузки 3,82м. Возможны и другие варианты согласования. Но следует помнить, что потери в низкоомных (коаксиальных) фидерах при больших величинах КСВ значительны, так что желательно выбирать такой способ согласования, при котором получаются самые короткие отрезки фидера с большим КСВ и применять толстые качественные кабели.

Как видите, практически можно согласовать все и по-разному. Только для этого нужен

измерительный прибор, ну, и конечно, компьютер. Комплексное сопротивление антенны не измеришь ни тестером, ни измерителем КСВ. Без этих данных согласование превращается в трудоёмкое занятие и часто приводит к неудовлетворительным результатам. В этой статье я описал несколько методов согласования. Постарался описать суть вопроса как можно проще, но очень просто в таком вопросе не получается.

Эта статья мною написана несколько лет назад на литовском языке и сейчас переведена на русский. В настоящее время имеются другие версии программ АРАК-EL и ММАНА, примеры же приведены используя старые версии. АРАК-EL имеет утилиту, с помощью которой тоже можно рассчитать компенсирующие реактивности. Однако сам принцип согласования от этого не меняется.

Надеюсь, что статья кое-кому будет полезна.

**Vytas (LY3BG), ly3bg@takas.lt**