

УДК 621.37

КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ СИНТЕЗА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

ДУБОВИК И. А., БОЙКАЧЕВ П. В., ИСАЕВ В. О.

Военная академия Республики Беларусь
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: duba-77@mail.ru

Аннотация. Представлен комплексный критерий на основе инварианта чувствительности функции коэффициента отражения к изменению импеданса нагрузки. Использование данного критерия, в сочетании с одним из существующих методов синтеза, позволяет синтезировать широкополосные согласующие устройства, обладающие свойством минимальной чувствительности к изменению импеданса нагрузки, а также обеспечить заданный уровень коэффициента передачи мощности.

Abstract. A complex criterion based on the invariant of the sensitivity of the reflection coefficient function to changes in the load impedance is presented. The use of this criterion, in combination with one of the existing synthesis methods, makes it possible to synthesize broadband matching devices that have the property of minimal sensitivity to changes in load impedance, as well as to provide a given level of power transfer coefficient.

Постановка задачи

Радиотехнические устройства (РТУ) широко используются во многих сферах повседневной жизнедеятельности (радиолокация, радионавигация, медицина и др.). Так, для качественной работы современных информационных технологий необходимо, чтобы РТУ обеспечивали высокоскоростную передачу большого объема информации. Для того, чтобы обеспечить передачу такой информации, необходимо расширять полосу и повышать диапазоны частот. Для качественной работы в широком диапазоне частот (обеспечение передачи максимальной мощности от источника сигнала в нагрузку) используются широкополосные согласующие цепи (ШСЦ), обеспечивающие согласование сопротивления входного тракта радиотехнического устройства с комплексным сопротивлением нагрузки. Но при синтезе ШСЦ не учитывается непостоянство комплексного сопротивления нагрузки, вызванное изменением условий их эксплуатации. В качестве примера в ранее опубликованной работе [1] было показано, что наличие штатного согласующего устройства в антенном устройстве (АУ) AD-44/CW-TA-30-512 не обеспечивает устойчивый уровень передачи мощности в различных условиях эксплуатации (рис. 1).

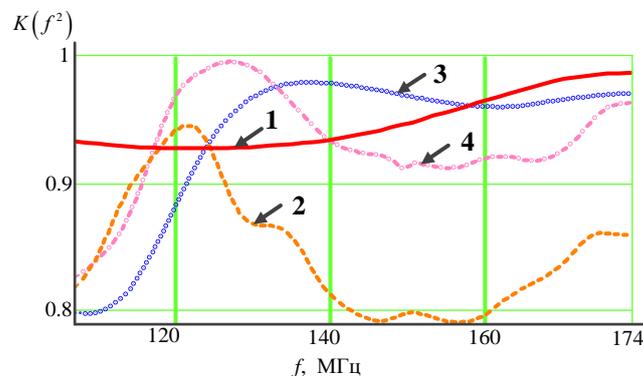


Рис. 1. Зависимость КПМ антенны AD-44/CW-TA-30-512: 1 – в экранизированной безэховой камере; 2 – в помещении; 3 – в лесном массиве; 4 – в непосредственной близости с техникой

Таким образом, для качественной работы РТУ в широком диапазоне частот необходимо синтезировать широкополосное согласующее устройство (ШСУ), обеспечивающее требуемый уровень коэффициента передачи мощности (КПМ) при наличии изменяющегося импеданса нагрузки.

Функция чувствительности

Для синтеза ШСУ, позволяющего обеспечить уровень КПМ не хуже требуемого, при наличии изменяющегося импеданса нагрузки необходимо оценить степень влияния изменения импеданса нагрузки на уровень КПМ. Оценка степени влияния (исходя из [2]) осуществляется с помощью чувствительности функции цепи, которая определяется как частная производная (выражение 1)

$$S_{x_i}^D = S\{D(x_i), x_i\} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial D(x_i)}{\partial x_i}, \quad (1)$$

где $D(x)$ – функции сопротивления ШСУ;

N – количество параметров x_i ;

x_i – параметр функции сопротивления ШСУ.

Под чувствительностью (абсолютной чувствительностью) понимают меру изменения некоторой характеристики ШСУ (функции цепи), которая произошла в результате некоторого изменения одного или нескольких элементов ШСУ [3]. Кроме абсолютной чувствительности используют полуотносительную (выражение 2) и относительную чувствительность (выражение 3)

$$Q_{x_i}^D = Q\{D(x_i), x_i\} = \frac{\partial D(x_i)}{\partial \ln x_i} = x_i \frac{\partial D(x_i)}{\partial x_i}; \quad (2)$$

$$R_{x_i}^D = R\{D(x_i), x_i\} = \frac{\partial \ln D(x_i)}{\partial \ln x_i} = \frac{x_i}{D(x_i)} \frac{\partial D(x_i)}{\partial x_i}. \quad (3)$$

Непосредственным дифференцированием выражения (3) можно убедиться, что вещественная и мнимая части относительной чувствительности комплексной характеристики связаны с чувствительностями ее модуля и аргумента простыми соотношениями (выражение 4 и 5)

$$R_{x_i}^D = \operatorname{Re}[R\{D(x_i), x_i\}] = R\{|D(x_i)|, x_i\}; \quad (4)$$

$$R_{x_i}^D = \operatorname{Im}[R\{D(x_i), x_i\}] = Q\{\arg D(x_i), x_i\}. \quad (5)$$

Функция КПМ определяется как отношение мощности в нагрузке к максимальной мощности, которая может быть получена генератором или же через модуль функции коэффициента отражения [4, с. 8].

$$K(f^2) = \frac{P_H}{P_0} = 1 - |S_{in}(f, Z_H, Z_{сц})|^2, \quad (6)$$

где $S_{in}(f, Z_H, Z_{сц}) = \frac{Z_H(f) - Z_{сц}(-f)}{Z_H(f) + Z_{сц}(f)}$ – функция коэффициента отражения (коэффициент

рассогласования);

$Z_H(f)$ – комплексное сопротивление нагрузки;

$Z_{сц}(f)$ – комплексное сопротивление согласующей цепи.

Выражение (6) является четной частью функции сопротивления (вещественной частью). В свою очередь, сопротивление нагрузки является комплексной величиной. В случае изменения импеданса нагрузки, вызванное изменением условий эксплуатации, изменяется как реальная, так и мнимая составляющие. В связи с этим целесообразно оценивать чувствительность функции коэффициента отражения к изменению импеданса нагрузки, так как она является комплексной величиной и позволяет в полной мере оценить вариации как реальной, так и мнимой составляющей комплексного сопротивления нагрузки. Таким образом, для обеспечения требуемого уровня КПМ при наличии изменяющегося импеданса нагрузки необходимо, чтобы синтезируемое ШСУ обладало свойством минимальной чувствительности функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки.

Комплексный критерий синтеза ШСУ на основе инварианта чувствительности

Для того, чтобы ШСУ обладало свойством минимальной чувствительности функции коэффициента отражения к изменению параметров нагрузки (исходя из [2, с. 51]) необходимо минимизировать квадрат модуля относительной чувствительности (выражение 7).

$$\left| R \left\{ S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \right\} \right|^2 \rightarrow \min . \quad (7)$$

Для нахождения относительной чувствительности функции коэффициента отражения воспользуемся инвариантным свойством чувствительности. Оно показывает соответствующие соотношения, связывающие функцию чувствительности по различным параметрам типовых функций цепей [2, с. 41]. Это позволит избавиться от дифференцирования функции коэффициента отражения. Проведя некоторые преобразования, получаем квадрат модуля относительной чувствительности функции коэффициента отражения (выражение 8).

$$\left| R \left\{ S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \right\} \right|^2 = \left| \frac{2 \operatorname{Re} \{ Z_{ЦЦ} (f) \} Z_H (f)}{(Z_H (f) + Z_{ЦЦ} (f))(Z_H (f) - Z_{ЦЦ} (-f))} \right|^2 . \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет оценить потенциальные возможности синтезируемой ШСУ к изменению импеданса нагрузки на фиксированной частоте. Для того чтобы оценить возможности ШСУ в диапазоне частот $f_H \leq f \leq f_B$ необходимо проинтегрировать выражение (8) по частоте. В результате чего получим

$$\int_{f_H}^{f_B} \left| R \left\{ S_{in} (Z_H, Z_{ЦЦ}) \right\} \right|^2 df = \int_{f_H}^{f_B} \left| \frac{2 \operatorname{Re} \{ Z_{ЦЦ} (f) \} Z_H (f)}{(Z_H (f) + Z_{ЦЦ} (f))(Z_H (f) - Z_{ЦЦ} (-f))} \right|^2 df , \quad (9)$$

где f_H, f_B – нижняя, верхняя частоты рабочего диапазона частот.

Так как основной задачей синтеза ШСУ является обеспечение требуемого уровня КПМ (выражение 6), то достаточно оценить лишь чувствительность модуля функции коэффициента отражения. В этом случае (исходя из выражения 7) выражение (9) принимает вид

$$\int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left\{ R \left\{ S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \right\} \right\} \right|^2 df = \int_{f_H}^{f_B} \left| \frac{\left(1 - |S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2 \right)^2 \left(|Z_H (f)|^2 - |Z_{ЦЦ} (f)|^2 \right)}{|S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2 8 \operatorname{Re} \{ Z_{ЦЦ} (f) \} \operatorname{Re} \{ Z_H (f) \}} \right|^2 df . \quad (10)$$

Таким образом, для обеспечения требуемого уровня КПМ и минимальной чувствительности функции коэффициента отражения, необходимо решить систему уравнений (выражение 11)

$$\begin{cases} \int_{f_H}^{f_B} \left(K_{\text{треб}} - \left(1 - |S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ})|^2 \right) \right)^2 df \leq \varepsilon \\ \int_{f_H}^{f_B} \left| \operatorname{Re} \left\{ R \left\{ S_{in} (f, Z_H, Z_{ЦЦ}) \right\} \right\} \right|^2 df \rightarrow \min \end{cases} \quad (11)$$

где ε – допустимое отклонение уровня КПМ в рабочем диапазоне частот;

$K_{\text{треб}}$ – требуемый уровень КПМ.

Систему уравнений можно использовать в качестве комплексного критерия в сочетании с одним из существующих численных методов синтеза ШСУ.

Результаты и выводы

В качестве примера на рис. 2 (схема ШСУ) и рис. 3 (функция КПМ) представлены результаты синтеза ШСУ для АУ АД-44/CW-TA-30-512, где в качестве критерия синтеза использовался

комплексный критерий (11), а в качестве метода синтеза ШСУ (исходя из [5]) использовался метод вещественных частот [6].

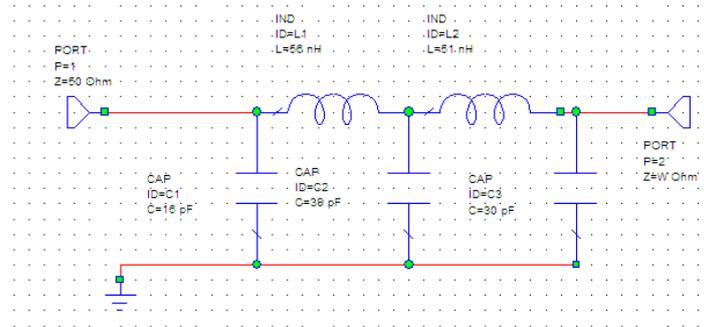


Рис. 2. Схема ШСУ для АУ AD-25/CW-3512

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что синтезированное ШСУ обеспечивает уровень КПМ не менее 0,9 во всем рабочем диапазоне частот в различных условиях обстановки.

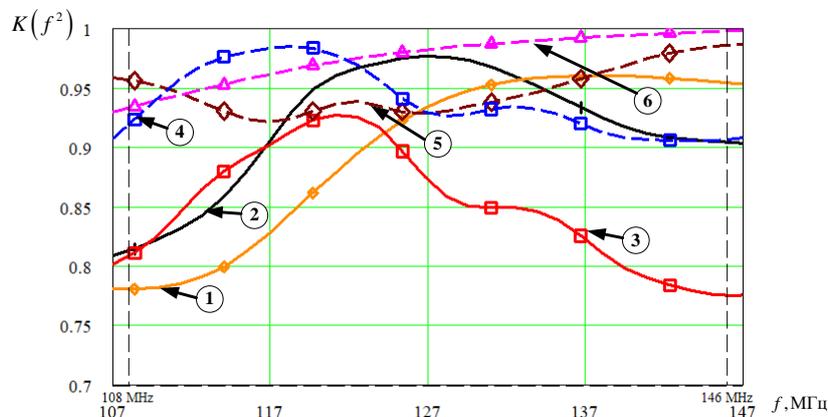


Рис. 3. Зависимость КПМ от частоты АУ AD-25/CW-3512: 1 – в непосредственной близости с техникой (со штатным ШСУ); 2 – в лесном массиве(со штатным ШСУ), 3 – в помещении (со штатным ШСУ); 4 – с синтезированным ШСУ в помещении ; 5 – с синтезированным ШСУ в непосредственной близости с техникой; 6 – с синтезированным ШСУ в лесном массиве.

Таким образом, использование в качестве критерия синтеза ШСУ выражение 11 позволяет синтезировать ШСУ, обладающее минимальной чувствительностью функции коэффициента отражения к изменению импеданса нагрузки, и обеспечивающее требуемый уровень передачи мощности в заданном диапазоне частот.

Список использованных источников

1. Бойкачев, П. В. Результаты исследования влияния условий эксплуатации на импеданс антенных устройств радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов / П. В. Бойкачев, И. А. Дубовик, В. О. Исаев // «Вестник» ВАРБ. – 2019. – №2(63). – С. 32–40.
2. Гехер, К., ред: Ю. Л. Хотунцева. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. М.Сов. радио. 1973.
3. Хьюдсман Л. П. Введение в теорию и расчет активных фильтров / Л. П. Хьюдсман, Ф. Е. Аллен. – Будапешт, 1973, 200 с.
4. Филиппович, Г. А. Широкополосное согласование сопротивлений / Г. А. Филиппович. – Минск, 2004.
5. Адаптивное согласование широкополосных радиотехнических устройств к изменяющемуся импедансу нагрузки / И. А. Дубовик, П. В. Бойкачев, В. О. Исаев, М. А. Янцевич // Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного применения.: сб. науч. статей 8-й Междунар. науч. конф., Минск, 16–17 мая 2017 г. Минск, 2019. – С. 50–53
6. Yarman, B. S. Design of ultra wideband antenna matching networks / B. S. Yarman. – Istanbul: Springer, 2008. – 308 с.