

МЕТОДИКА СИНТЕЗА СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ КВ-ДИАПАЗОНА

MATCHING UNIT SYNTHESIS TECHNIQUE FOR HF-MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

Н. И. Листопад,

заведующий кафедрой информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, д-р техн. наук, профессор, г. Минск, Республика Беларусь

Д. А. Ковалевич,

аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

N. Listopad,

Head of Information Radio Technologies Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, PhD in Engineering, Professor, Minsk, Republic of Belarus

D. Kavalevich,

PhD Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 25.08.2020 г.

Проведен анализ различных подходов к синтезу согласующих устройств. Разработана методика, позволяющая определить параметры согласующей цепи, которая учитывает особенности построения мобильных систем связи. Определен минимальный набор входных данных, необходимый для расчетов.

Various approaches analysis of the matching units synthesis is carried out. The matching circuit parameters determination technique that takes into account the peculiarities of the mobile communication systems building has been developed. The minimum set of input data required for calculations has been determined.

Ключевые слова: мобильные системы связи, активное и реактивное сопротивление, коэффициент стоящей волны, антенные согласующие устройства.

Keywords: mobile communication systems, active and reactive resistance, standing wave ratio, antenna-matching units.

Введение.

Синтез согласующего устройства (СУ) в общем случае состоит из двух этапов [1]:

- определение типа (либо нескольких типов) согласующей цепи (СЦ);
- определение диапазонов изменения номиналов элементов СЦ (нескольких СЦ).

Основными данными для синтеза являются:

- рабочий диапазон частот;
- параметры антенно-фидерного устройства (АФУ, зависимость сопротивления от частоты);
- допустимый коэффициент стоячей волны (КСВ) на входе СУ.

Для практической реализации устройства дополнительно необходимо задаться следующими параметрами:

- максимальная мощность на входе СУ;
- минимально допустимый коэффициент полезного действия (КПД) СУ.

Эти параметры необходимы для определения требуемой добротности элементов согласующей цепи, их рабочих напряжений и токов, а также для выбора коммутирующих элементов в случае их наличия.

В соответствии с этапами синтеза сначала должна быть выбрана СЦ, которая обеспечивает необходимую область согласования комплексных сопротивлений, то есть необходимую трансформацию входных сопротивлений АФУ, чтобы обеспечивались условия:

$$R_{\text{СУ}}(f) = R_r; X_{\text{СУ}}(f) = 0, \quad (1)$$

где $R_{\text{СУ}}(f)$ — активное сопротивление СУ на его на входе;

R_r — активное сопротивление генератора (источника);

$X_{\text{СУ}}(f)$ — реактивное сопротивление согласующего устройства.

Для обеспечения выполнения каждого равенства из условия согласования, могут быть использованы различные двухэлементные СЦ при независимой перестройке каждо-

го элемента [2]. Все они содержат минимально возможное число управляемых элементов. При этом наибольшей областью согласования обладают СЦ, у которых в компенсирующие и трансформирующие ветви включены элементы противоположных реактивностей либо элементы с распределенными параметрами [1]. Выбор варианта реализации СЦ производится с учетом необходимой области согласования, а также требований по фильтрации и КПД согласующей цепи.

На практике элементы СЦ реализуются в виде дискретных наборов [4, 5]. Это наиболее простой и универсальный способ получения требуемого диапазона изменения их номинала. Поэтому задачу синтеза целесообразно рассматривать применительно к согласующим цепям на дискретных элементах.

Необходимо также отметить, что дискретизация управляемых элементов согласующей цепи приводит к дополнительному остаточному рассогласованию, вызванному тем, что величины дискретных элементов могут отличаться от расчетных на величину шага дискретизации [1]. Величина шага дискретизации, как известно [1], значительно меньше минимального значения номинала согласующего элемента. Именно он обычно определяется из условия обеспечения заданного КСВ на входе СУ на максимальной частоте рабочего диапазона.

Возможны следующие варианты реализации СЦ на дискретных элементах:

- согласующая цепь на сосредоточенных элементах, на распределенных элементах либо гибридная;

- топология фильтра низких частот (ФНЧ) либо фильтра высоких частот (ФВЧ).

Для КВ-диапазона применение элементов с распределенными параметрами является нерациональным в связи с большой длиной волны. Помимо этого, работа с электрически короткими антеннами, обладающими высокой добротностью, связана с высокими напряжениями, что накладывает много ограничений на конструкцию элементов с распределенными параметрами.

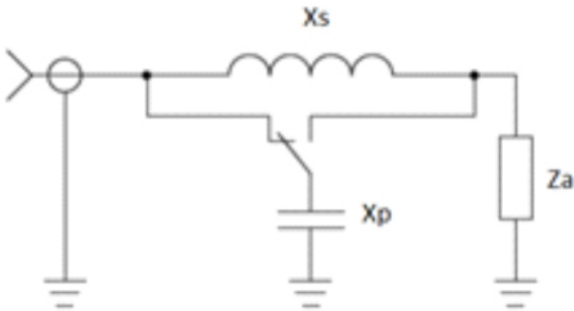


Рис. 1. СЦ в виде переключаемого Г-образного звена

Что же касается выбора структуры СЦ, то предпочтение следует отдать топологии ФНЧ, которая позволяет обеспечить дополнительную фильтрацию гармоник сигнала передатчика. Поэтому наибольшее распространение в серийных устройствах получила СЦ на сосредоточенных элементах [4, 5], которая представляет собой переключаемое Г-образное звено. В данных СЦ емкость может быть подключена как со стороны нагрузки, так и со стороны источника (рис. 1). В этом случае область согласования получается максимально возможной.

Методика синтеза СУ для мобильных систем связи.

Рассмотрим предлагаемую методику синтеза мобильных систем связи. Сам алгоритм включает в себя следующие этапы:

- определение зависимости комплексно сопряженных сопротивлений АФУ (нескольких АФУ) от частоты с учетом их рабочего диапазона;
- сравнение добротности антенны с добротностью используемых индуктивностей и корректировка активного сопротивления антенны с учетом потерь в них;
- расчет номиналов СЦ для максимального количества точек;
- поиск максимальных значений элементов;
- определение допустимого рассогласования, вносимого трансформирующим и компенсирующим элементом;
- расчет допустимого шага дискретизации для максимального количества точек;

- поиск минимального шага дискретизации;
- определение разрядности дискретно перестраиваемых элементов СЦ (аналогично [1]).

Определение зависимости комплексного сопротивления от частоты.

Чтобы точность расчетов была высокой, необходимо иметь как можно больше информации о зависимости сопротивления АФУ от частоты. Особенность использования мобильных систем состоит в том, что на параметры АФУ могут оказывать влияние условия ведения связи. Например, при использовании портативной радиостанции, радиосвязь может вестись из помещения и на открытой местности, на стоянке и в движении. Чтобы СУ обеспечивало требуемое качество согласования в любых условиях, в набор входных данных для синтеза необходимо включить все зависимости сопротивления от частоты, полученные при различных условиях ведения связи.

Учет потерь в индуктивностях.

Существует способ расчета номиналов согласующих элементов [3], который позволяет согласовать два произвольных активных сопротивления. Он основывается на равенстве добротностей Q_N двух комплексно сопряженных сопротивлений, которые образуются за счет последовательного соединения реактивного элемента одного знака с меньшим активным сопротивлением, и параллельного соединения реактивного элемента противоположного знака — с большим активным сопротивлением. Для случая электрически короткой антенны в нижней части коротковолнового диапазона расчетные формулы примут вид:

$$Q_N = \sqrt{\frac{R_0}{R_A} - 1}, \quad (2)$$

где R_0 — активное сопротивление передатчика;

R_A — активное сопротивление АФУ;

$$X_s = Q_N \cdot R_A, \quad (3)$$

где X_s — реактивное сопротивление согласующего элемента, включенного последовательно;

$$X_p = R_0/Q_N, \quad (4)$$

где X_p — реактивное сопротивление согласующего элемента, включенного параллельно.

Если сопротивление антенны комплексное, возможны два варианта: включение реактивности антенны X_A в согласующую цепь (комплексное сопротивление антенны расположено между точками B и C на рис. 2) либо ее компенсация комплексно сопряженной X_L (комплексное сопротивление антенны расположено между точками A и B):

$$X_L = -X_A. \quad (5)$$

Используя этот подход, еще до расчета номиналов СЦ можно определить номинал катушки индуктивности и учесть ее активное сопротивление, прибавив его к сопротивлению антенны:

$$R_L = X_L/Q_{ind}, \quad (6)$$

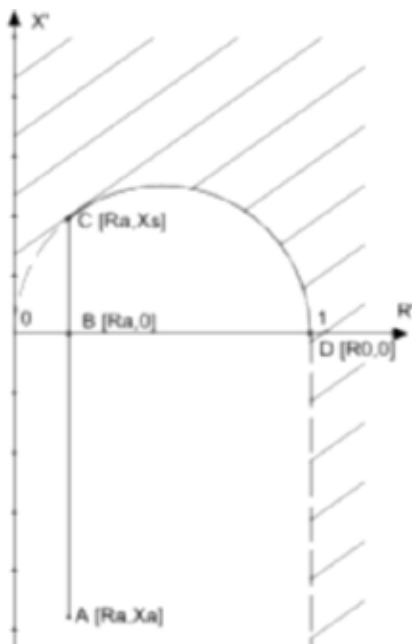


Рис. 2. Область допустимых сопротивлений нагрузки

где Q_{ind} — добротность используемых в СЦ катушек индуктивности;

$$R_A^* = R_A + R_L, \quad (7)$$

где R_A^* — скорректированное активное сопротивление АФУ.

Случай, при котором антенна обладает только активным сопротивлением, равно как и случай включения реактивности антенны в согласующую цепь, не требует корректировки значения активного сопротивления, так как потери в согласующих элементах при этом пренебрежимо малы.

Стоит отметить, что обратное Г-образное звено практически не подвержено влиянию этих потерь, так как катушка индуктивности в такой СЦ включена последовательно с относительно высоким сопротивлением источника.

Расчет номиналов элементов согласующей цепи.

Аналитический способ расчета номиналов элементов СЦ состоит из следующих действий:

- определение типа СЦ (при возможности использования нескольких СЦ);
- расчет номиналов трансформирующего и компенсирующего элементов.

В зависимости от положения точки с координатами нагрузки на комплексной плоскости сопротивлений (проводимостей), необходимо использование одной из возможных СЦ. Для выбора схемы, которая необходима в данном конкретном случае, потребуется выполнить ряд проверок. Так, для рассматриваемой реализации согласующего устройства (см. рис. 1), возможны два варианта включения трансформирующего и компенсирующего элементов.

Условия применения в качестве СЦ Г-звена:

$$G'_A \geq 1; R'_A \leq 1; \text{ при } X'_A \leq 0, \quad (8)$$

где G'_A, R'_A, X'_A — приведенные значения активной проводимости, активного сопротивления

ния и реактивного сопротивления АФУ соответственно.

Условия применения в качестве СЦ обратного Г-звена:

$$R'_A \geq 1; G'_A \leq 1; \text{ при } B'_A \leq 0, \quad (9)$$

где B'_A — приведенное значение реактивной проводимости АФУ.

Процесс согласования для случая установки емкости со стороны источника (Г-образное звено) заключается в трансформации активной проводимости нагрузки за счет последовательного включения с ней катушки индуктивности (трансформирующий элемент) до значения, равного активной проводимости источника. Суммарная реактивная проводимость при этом должна иметь индуктивный характер, чтобы ее можно было компенсировать параллельным включением емкости (компенсирующий элемент).

Индуктивность трансформирующего элемента в этом случае рассчитывается по формуле:

$$L = \frac{X_{tr}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{R_A \cdot R_0 - R_A^2} - X_A}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (10)$$

где X_{tr} — реактивное сопротивление трансформирующего элемента.

Емкость компенсирующего элемента можно определить следующим образом:

$$C = \frac{B_{comp}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{R_A \cdot R_0 - R_A^2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_A \cdot R_0}, \quad (11)$$

где B_{comp} — реактивное сопротивление компенсирующего элемента.

Процесс согласования для случая установки емкости со стороны нагрузки (обратное Г-образное звено) заключается в трансформации активного сопротивления нагрузки за счет параллельного включения с ней конденсатора (трансформирующий элемент), до значения, равного активному сопротивле-

нию источника. Суммарное реактивное сопротивление при этом должно иметь емкостной характер, чтобы его можно было компенсировать последовательным включением катушки индуктивности (компенсирующий элемент).

Емкость трансформирующего элемента в этом случае можно вычислить, используя выражение:

$$C = \frac{B_{tr}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{G_a \cdot G_0 - G_a^2} - B_a}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (12)$$

где B_{tr} — реактивное сопротивление трансформирующего элемента.

Далее находим индуктивность компенсирующего элемента СЦ:

$$L = \frac{X_{comp}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{G_a \cdot G_0 - G_a^2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot G_a \cdot G_0}, \quad (13)$$

где X_{comp} — реактивное сопротивление компенсирующего элемента.

Определение допустимого рассогласования.

Результирующий КСВ на входе СУ является функцией двух переменных:

- номинала трансформирующего элемента;
- номинала компенсирующего элемента.

Предположим в дальнейших расчетах, что неточность согласования обусловлена только одним из элементов. В этом случае требуется рассчитать допустимое рассогласование, вносимое шагом дискретизации каждого элемента в отдельности, таким образом, чтобы суммарное рассогласование не превысило допустимого.

На рис. 3 изображена окружность с радиусом, равным КСВ. Ее радиус задается максимально допустимым КСВ на входе СУ, обозначенным как SWR_{max} . Все точки, находящиеся внутри нее, образуют область допустимых приведенных значений комплексной проводимости на входе СУ.

Радиус окружности можно представить как вектор, состоящий из активной и реактивной составляющей проводимости:

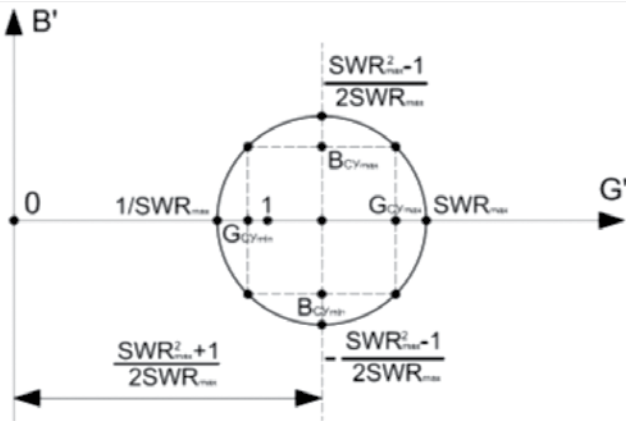


Рис. 3. Область допустимых значений проводимости на входе СУ

$$\left(\frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}\right)^2 = \left(k \cdot \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}\right)^2 + \left(\sqrt{1 - k^2} \cdot \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}\right)^2, \quad (14)$$

где k — весовой коэффициент, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1, который определяет вклад элементов СЦ в результирующее согласование. Для равного вклада $k = 0,707$.

Определим допустимые значения приведенной активной (G'_{CYmin} , G'_{CYmax}) и реактивной (B'_{CYmin} , B'_{CYmax}) проводимости на входе СУ. Графически это координаты вершин прямоугольника, вписанного в окружность постоянного КСВ (рис. 3).

Для трансформирующего элемента Г-образного звена:

$$G'_{CYmin} = \frac{(1 - k) \cdot SWR_{max}^2 + (1 + k)}{2SWR_{max}}, \quad (15)$$

$$G'_{CYmax} = \frac{(1 + k) \cdot SWR_{max}^2 + (1 - k)}{2SWR_{max}}. \quad (16)$$

Для компенсирующего элемента Г-образного звена:

$$B'_{CYmax} = \sqrt{1 - k^2} \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}, \quad (17)$$

$$B'_{CYmin} = -\sqrt{1 - k^2} \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}. \quad (18)$$

По аналогии с Г-образным звеном определим допустимые значения приведенного активного (R'_{CYmin} , R'_{CYmax}) и реактивного

(X'_{CYmin} , X'_{CYmax}) сопротивления на входе СУ для обратного Г-образного звена. Для трансформирующего элемента:

$$R'_{CYmin} = \frac{(1 - k) \cdot SWR_{max}^2 + (1 + k)}{2SWR_{max}}, \quad (19)$$

$$R'_{CYmax} = \frac{(1 + k) \cdot SWR_{max}^2 + (1 - k)}{2SWR_{max}}. \quad (20)$$

Для компенсирующего элемента:

$$X'_{CYmax} = \sqrt{1 - k^2} \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}; \quad (21)$$

$$X'_{CYmin} = -\sqrt{1 - k^2} \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}. \quad (22)$$

Определение допустимого шага дискретизации.

Величина шага дискретизации ΔC и ΔL определяется допустимым отклонением значения фактического комплексного сопротивления на входе СУ от целевого. Целевые значения входного сопротивления СУ отражены в условии согласования (1).

Для компенсирующего элемента Г-образного звена:

$$\Delta B_1 = B'_{CYmax} - B'_{CYopt} = \sqrt{1 - k^2} \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}} - 0, \quad (23)$$

$$\Delta B_2 = B'_{CYopt} - B'_{CYmin} = 0 + \sqrt{1 - k^2} \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}, \quad (24)$$

$$\Delta B_1 = \Delta B_2 = \sqrt{1 - k^2} \frac{SWR_{max}^2 - 1}{2SWR_{max}}, \quad (25)$$

$$\Delta C = \frac{\Delta B' \cdot G_0}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (26)$$

По аналогии для компенсирующего элемента обратного Г-образного звена получим:

$$\Delta L = \frac{\Delta X' \cdot R_0}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (27)$$

Как видно из расчетов, допустимое отклонение номинала компенсирующего эле-

мента связано только с допустимым значением КСВ на входе СУ и рабочей частотой.

Для трансформирующего элемента Г-образного звена можно выделить два случая.

1. Активное приведенное сопротивление АФУ находится в диапазоне (точка А на рис. 4):

$$0 < R'_A \leq 1 / G'_{CYmax} \quad (28)$$

На основании принятого допущения о том, что компенсирующий элемент будет обеспечивать значение реактивного сопротивления на входе СУ с требуемой точностью, произведем расчет:

$$G'_{CY} = \frac{R'_A}{R_A'^2 + X_\Sigma'^2}, \quad (29)$$

где X_Σ' — суммарное реактивное сопротивление АФУ и трансформирующего элемента.

$$X_\Sigma'^2 = \frac{R'_A}{G'_{CY}} - R_A'^2, \quad (30)$$

$$X_\Sigma' = \sqrt{\frac{R'_A}{G'_{CY}} - R_A'^2}. \quad (31)$$

Для точки С определим оптимальное значение суммарного реактивного сопротивления:

$$X'_{\Sigma opt} = \sqrt{R'_A - R_A'^2}. \quad (32)$$

Для точки D определим максимально допустимое значение суммарного реактивного сопротивления:

$$X'_{\Sigma max} = \sqrt{\frac{R'_A}{G'_{CYmin}} - R_A'^2}. \quad (33)$$

Для точки В определим минимально допустимое значение суммарного реактивного сопротивления:

$$X'_{\Sigma min} = \sqrt{\frac{R'_A}{G'_{CYmax}} - R_A'^2}. \quad (34)$$

Рассчитаем допустимое отклонение сопротивления трансформирующего элемента:

$$\Delta X'_1 = X'_{\Sigma max} - X'_{\Sigma opt}, \quad (35)$$

$$\Delta X'_2 = X'_{\Sigma opt} - X'_{\Sigma min}. \quad (36)$$

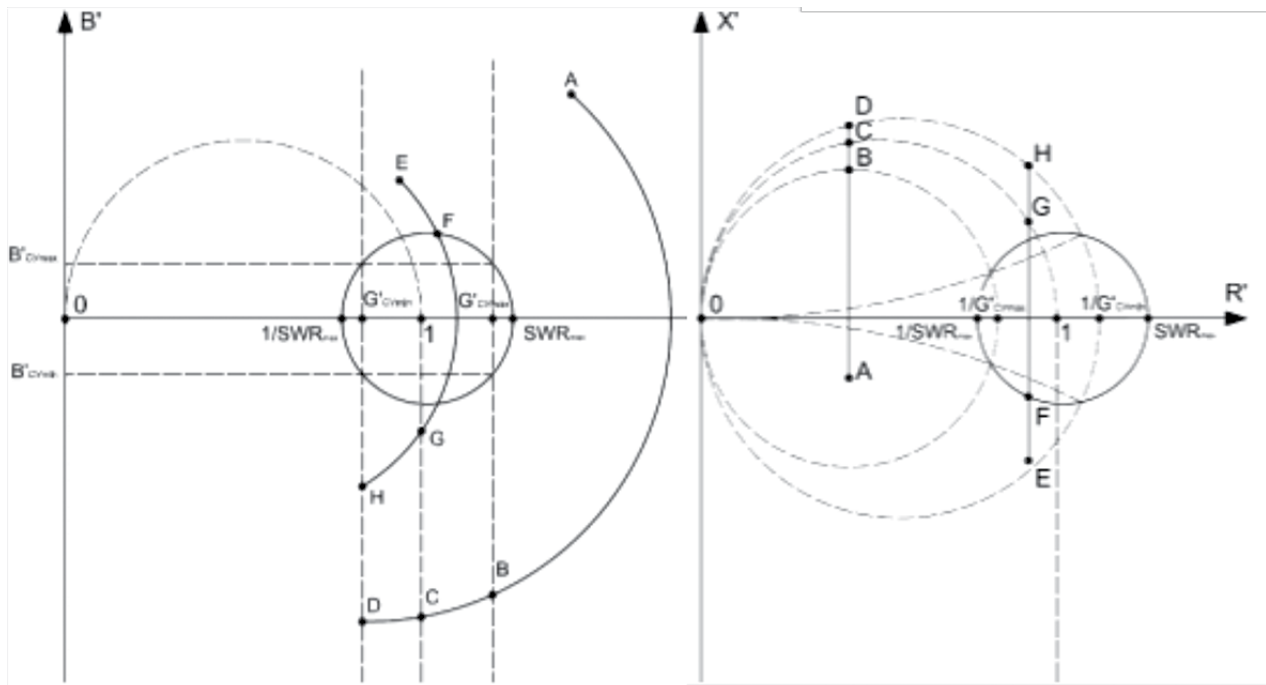


Рис. 4. Траектория изменения сопротивления и проводимости на входе СУ

Допустимый шаг дискретизации будет определяться наименьшим отклонением из двух, обозначенным $\Delta X'_{min}$:

$$\Delta X'_{min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta L}{R_0}, \quad (37)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta X'_{min} \cdot R_0}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (38)$$

2. Активное приведенное сопротивление АФУ находится в диапазоне (точка Е на рис. 4):

$$1/G'_{CYmax} < R'_A \leq 1. \quad (39)$$

В этом случае для точки G:

$$X'_{\Sigma opt} = \sqrt{R'_A - R'^2_A}. \quad (40)$$

Для точки H:

$$X'_{\Sigma max} = \sqrt{\frac{R'_A}{G'_{CYmin}} - R'^2_A}. \quad (41)$$

Что касается минимально допустимого суммарного реактивного сопротивления, то оно имеет емкостной характер. Это означает, что компенсирующий элемент не используется, и согласующая цепь будет содержать только один элемент (трансформирующий), а значит, результирующее рассогласование будет определяться только его дискретизацией (точка F).

$$\left(\frac{SWR_{max} - 1}{SWR_{max} + 1} \right)^2 = \frac{(1 - R'_A)^2 + X'^2_{\Sigma}}{(1 + R'_A)^2 + X'^2_{\Sigma}}, \quad (42)$$

$$X'^2_{\Sigma min} = SWR_{max} \cdot R'_A + \frac{R'_A}{SWR_{max}} - 1 - R'^2_A, \quad (43)$$

$$X'_{\Sigma min} = -\sqrt{SWR_{max} \cdot R'_A + \frac{R'_A}{SWR_{max}} - 1 - R'^2_A}. \quad (44)$$

Далее с использованием выражений (35–38) определяется шаг дискретизации.

Стоит отметить, что существует диапазон значений сопротивлений АФУ, в котором может быть использована СЦ, как только с трансформирующим, так и с двумя согласующими элементами:

$$\frac{1}{SWR_{max}} < R'_A \leq 1/G'_{CYmax}, \quad (45)$$

По аналогии рассмотрим два случая для обратного Г-образного звена.

1. Активная приведенная проводимость АФУ находится в диапазоне:

$$0 < G'_A \leq 1/R'_{CYmax}, \quad (46)$$

Оптимальное, максимальное и минимальное значение суммарной приведенной реактивной проводимости при этом можно определить при помощи выражений:

$$B'_{\Sigma opt} = \sqrt{G'_A - G'^2_A}, \quad (47)$$

$$B'_{\Sigma max} = \sqrt{\frac{G'_A}{R'_{CYmin}} - G'^2_A}, \quad (48)$$

$$B'_{\Sigma min} = \sqrt{\frac{G'_A}{R'_{CYmax}} - G'^2_A}. \quad (49)$$

Рассчитаем допустимое отклонение проводимости трансформирующего элемента:

$$\Delta B'_1 = B'_{\Sigma max} - B'_{\Sigma opt}, \quad (50)$$

$$\Delta B'_2 = B'_{\Sigma opt} - B'_{\Sigma min}. \quad (51)$$

Шаг дискретизации будет определяться наименьшим отклонением из двух:

$$\Delta B'_{min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta C}{G_0}, \quad (52)$$

$$\Delta C = \frac{\Delta B'_{min} \cdot G_0}{2 \cdot \pi \cdot f}. \quad (53)$$

2. Активная приведенная проводимость АФУ находится в диапазоне:

$$1/R'_{CYmax} < C'_A \leq 1. \quad (54)$$

В этом случае:

$$B'_{\Sigma opt} = \sqrt{G'_A - G'^2_A}, \quad (55)$$

$$B'_{\Sigma max} = \sqrt{\frac{G'_A}{R'_{CYmin}} - G'^2_A}, \quad (56)$$

$$B'_{\Sigma min} = -\sqrt{SWR_{max} \cdot G'_A + \frac{G'_A}{SWR_{max}} - 1 - G'^2_A}. \quad (57)$$

Затем с использованием выражений (50–53) определяется допустимый шаг дискретизации.

В качестве примера ниже произведен синтез элементов СУ для штыревой антенны длиной 2,4 м, расположенной на корпусе носимой радиостанции. Параметры антенны и результаты промежуточных вычислений приведены в таблице. Для синтеза использовались следующие исходные данные:

- $SWR_{max} = 3$;
- $Q_{ind} = 200$;
- $k = 0,707$.

Параметры синтезированного СУ:

- тип СЦ: переключаемое Г-звено;
- количество разрядов набора катушек индуктивности: 12;
- количество разрядов набора конденсаторов: 9;
- значение младшего разряда набора катушек индуктивности: 75 нГн;
- значение младшего разряда набора конденсаторов: 6,3 пФ.

Заключение.

Разработана методика синтеза СУ для мобильных систем связи, позволяющая полу-

чить минимально возможный диапазон перестройки элементов СЦ по зависимости изменения комплексного сопротивления АФУ от частоты. Предложенная методика позволяет производить расчет номиналов элементов согласующей цепи, определять допустимое расхождение и допустимый шаг дискретизации, учитывая при этом все зависимости сопротивлений и проводимостей СУ от частоты, полученные при различных условиях ведения связи. В качестве примера произведен синтез СУ мобильной радиостанции с использованием описанной методики.

Литература:

1. Бабков, В. Ю. Основы построения устройств согласования антенн / В. Ю. Бабков, Ю. К. Муравьев. — ВАС, 1980. — 240 с.
2. Лапицкий, Е. Г. Расчет диапазонных радиопередатчиков / Е. Г. Лапицкий, А. М. Семенов, Л. Н. Соновкин. — Л., 1974. — 272 с.
3. Grebennikov, A. RF and microwave power amplifier design / A. Grebennikov. — New York, 2004. — 420 p.
4. HF + 50MHz Automatic Antenna Tuner AH-4. Service manual. — ICOM, 1998. — 23 p.
5. CU-2397/G. Fast Tune Automatic Antenna Coupler. Instruction manual. — HARRIS RF Communications, 1987. — 128 p.

Параметры АФУ и результаты вычислений

f, кГц	R _A , Ом	X _A , Ом	R' _A , Ом	Тип СЦ	L, нГн	C, пФ	ΔL, нГн	ΔC, пФ
1500	10,1	-1832	19,26	Г-звено	196 963	2681	704,34	2001,0
2000	6,13	-1408	13,17	Г-звено	113 798	2662	406,40	1500,8
2800	3,01	-1051	8,27	Г-звено	60 796	2555	218,47	1072,0
3900	1,72	-714	5,29	Г-звено	29 765	2373	121,93	769,6
5600	7,1	-511	9,66	Г-звено	15 084	1162	119,73	536,0
6000	8,38	-458	10,67	Г-звено	12 692	1019	118,71	500,3
7500	8,47	-340	10,17	Г-звено	7642	840	92,23	400,2
9500	10,56	-247	11,80	Г-звено	4494	603	79,77	315,9
12 000	14,47	-171	15,33	Г-звено	2574	399	74,87	250,1
15 000	20,76	-160	21,56	Г-звено	1960	244	76,81	200,1
20 000	35,6	-129	36,25	Г-звено	1204	98	96,76	150,1
25 000	68,8	53	68,80	обратное	348	108	300,15	19,3
30 000	121,3	209	121,30	обратное	779	51	250,13	6,3