

УДК 621.396

Использование расчетного способа согласования антенны с учетом конечной точности измерителя иммитанса

Д.А. КОВАЛЕВИЧ

Рассмотрены антенные согласующие устройства на основе дискретных наборов реактивных элементов, использующие расчетный способ согласования. Предложен способ, использующий трансформирующий элемент согласующей цепи для снижения требований к измерителю иммитанса. Произведена оценка снижения требований к точности измерений при использовании предложенного способа на примере антенны АШ-4.

Ключевые слова: мобильная антенна, активное и реактивное сопротивление, коэффициент стоячей волны, антенное согласующее устройство, согласующая цепь.

Antenna tuning units based on discrete sets of reactive elements using a calculation method of matching are examined. A method that uses a transforming element of a matching circuit to reduce the requirements for an immittance meter is proposed. An assessment of the reduction in the requirements for the measurement accuracy when using the proposed method was made on the example of the WA-4 antenna.

Keywords: mobile antenna, active and reactive resistance, standing wave ratio, antenna tuning unit, matching circuit.

Введение. Использование расчетного способа согласования антенны с выходными каскадами передатчиков коротковолнового диапазона в серийно выпускаемых автоматических антенных согласующих устройствах (СУ) ограничено как наличием паразитных параметров элементов согласующей цепи (СЦ) [1], так и точностью измерения иммитанса (ИИ) антенны [2]. Предложенный в [1] способ позволяет решить проблему учета паразитных параметров, а в [2] описана методика синтеза требований к ИИ. Однако отсутствует информация о возможности практической реализации ИИ с требуемой точностью для всех типов коротковолновых антенн.

Вместе с тем, существует вероятность того, что при использовании электрически коротких антенн, обладающих малым сопротивлением излучения в нижней части рабочего диапазона частот, наличие конечной точности ИИ, обусловленной его аппаратной реализацией, не позволит получить необходимое качество согласования при использовании расчетных способов.

Основная часть. Для оценки возможности использования расчетного способа согласования применительно к электрически коротким антеннам необходимо определить требования к ИИ на основании параметров антенн данного типа и сравнить их с возможностями доступных интегральных детекторов.

Первоначально определим требования к ИИ для одной из наиболее распространенных мобильных антенн – АШ-4 [3]. Электрические параметры этой антенны, полученные в результате натурных измерений, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Электрические параметры антенны АШ-4

Частота, МГц	Активное сопр., Ом	Реактивное сопр., Ом	Модуль сопротивления, Ом	Фаза сопротивления, град
1,50	4,08	-1197,0	1197,0	-89,80
2,00	3,93	-956,0	956,0	-89,76
3,00	4,25	-624,0	624,0	-89,61
5,00	6,08	-346,0	346,1	-88,99
8,00	11,30	-168,0	168,4	-86,15
12,00	27,80	-17,8	33,0	-32,63

Окончание таблицы 1

16,00	74,00	121,0	141,8	58,55
20,00	222,00	296,0	370,0	53,13
24,00	1085,00	-134,0	1093,2	-7,04
26,00	287,00	-508,0	583,5	-60,54
28,00	94,80	271,0	287,1	70,72
30,00	57,90	-136,0	147,8	-66,94

В соответствии с предложенной в [2] методикой можно определить необходимые параметры ИИ для обеспечения требуемого КСВ, не превышающего SWR_{max} , зная активное R_A и реактивное X_A сопротивление либо активную G_A и реактивную B_A проводимость антенны на произвольной частоте, по формулам из [2]:

– допустимая относительная погрешность измерителей напряжения ε_u и тока ε_i при согласовании при помощи Г-звена:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_u = 0.5\varepsilon_z = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{R_A}{\sqrt{R_A^2 + X_A^2}} \cdot \frac{SWR_{max}^2 - 1}{SWR_{max}^2 + 1 - R_A / R_0}; \quad (1)$$

– допустимая относительная погрешность измерителей напряжения и тока при согласовании при помощи обратного Г-звена:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_u = 0.5\varepsilon_y = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{G_A}{\sqrt{G_A^2 + B_A^2}} \cdot \frac{SWR_{max}^2 - 1}{SWR_{max}^2 + 1 - G_A / G_0}; \quad (2)$$

– допустимая абсолютная погрешность измерителя разности фаз $\Delta\varphi$ при согласовании при помощи Г-звена:

$$\Delta\varphi = \arctg \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{R_A}{\sqrt{R_A^2 + X_A^2}} \cdot \frac{SWR_{max}^2 - 1}{SWR_{max}^2 + 1 - R_A / R_0} \right); \quad (3)$$

– допустимая абсолютная погрешность измерителя разности фаз при согласовании при помощи обратного Г-звена:

$$\Delta\varphi = \arctg \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{G_A}{\sqrt{G_A^2 + B_A^2}} \cdot \frac{SWR_{max}^2 - 1}{SWR_{max}^2 + 1 - G_A / G_0} \right); \quad (4)$$

– динамический диапазон измерителя напряжения:

$$D_u = \sqrt{\frac{(R_0 + R_a)^2 + X_a^2}{(R_a^2 + X_a^2)}}; \quad (5)$$

– динамический диапазон измерителя тока:

$$D_i = \sqrt{\frac{(R_0 + R_a)^2 + X_a^2}{R_0^2}}. \quad (6)$$

Из полученных значений выбирается наибольшее значение динамического диапазона и наименьшая допустимая погрешность измерения. Результаты расчета для антенны АШ-4 при допустимом КСВ на входе СУ не более 2 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к ИИ

Параметр	Значение
Допустимая относительная погрешность измерителя I, %	0,073
Допустимая относительная погрешность измерителя U, %	0,073
Динамический диапазон измерителя I, дБ	27,6
Динамический диапазон измерителя U, дБ	7,7
Допустимая абсолютная погрешность измерителя φ , град	0,084

В качестве измерителя иммитанса будем использовать предложенное в [2] решение: датчик тока, датчик напряжения и датчик разности фаз между ними. Для оценки его реализуемости произведем анализ технических данных различных доступных интегральных детекторов [4]–[7]. Если проанализировать параметры интегральных детекторов напряжения (таб-

лица 3), можно обнаружить, что погрешность находится в пределах 3–25 %, что свидетельствует о невозможности достижения целевого качества согласования во всем рабочем диапазоне частот антенны при их использовании.

Таблица 3 – Параметры интегральных детекторов переменного напряжения

Марка ИМС	Тип преобразования	Динамический диапазон, дБ	Погрешность	
			дБ	%
AD8361	линейное	14	0,25	2,9
		23	1	12,2
		26	2	25,9
AD8362	логарифмическое	62	0,5	5,9
		65	1	12,2
ADL5511	линейное	46	1	12,2
LMH2120	линейное	36	1	12,2
		43	3	41,3

Что касается детекторов фазового сдвига, то только одно доступное серийно выпускаемое интегральное решение содержит в своем техническом описании [8] сведения о погрешности измерений. В дальнейших расчетах будем опираться на эти данные (таблица 4).

Таблица 4 – Параметры интегрального измерителя разности фаз

Марка ИМС	Разность фаз, град	Погрешность, град
AD8302	0...15	7
	15...165	1
	165...180	7

Зададимся точностью измерителя модуля сопротивления $\varepsilon_{\text{факт}}$. Опираясь на это значение можно приблизительно определить максимально допустимую разность фаз между током и напряжением φ_{MAX} для обеспечения целевого КСВ по формуле из [2]:

$$\cos \varphi_{\text{max}} = \frac{2SWR_{\text{max}}}{SWR_{\text{max}}^2 - 1} \varepsilon_{\text{факт}} \quad (7)$$

Для погрешности измерителя тока и напряжения, реализованного на базе интегрального детектора AD8362, в 5,9 % получим погрешность определения модуля сопротивления $\varepsilon_{\text{факт}}$ в 11,8 %. При допустимом КСВ на входе СУ, равным 2, рассчитаем максимально допустимую разность фаз между током и напряжением:

$$\varphi_{\text{max}} = \pm \arccos \left(\frac{2SWR_{\text{max}}}{SWR_{\text{max}}^2 - 1} \varepsilon_{\text{факт}} \right) = \pm \arccos \left(\frac{4}{3} \cdot 0,118 \right) = \pm 80,94 \text{ град}. \quad (8)$$

Зададимся точностью измерителя разности фаз $\Delta\varphi_{\text{факт}}$. Опираясь на это значение можно приблизительно определить допустимую разность фаз между током и напряжением для обеспечения целевого КСВ по формуле из [2]:

$$\cos \varphi_{\text{max}} = \frac{2SWR_{\text{max}}}{SWR_{\text{max}}^2 - 1} \text{tg} \Delta\varphi_{\text{факт}} \quad (9)$$

Для фактической погрешности измерителя тока и напряжения на базе интегрального детектора AD8302 в 7 градусов и допустимом КСВ на входе СУ, равным 2, рассчитаем максимально допустимую разность фаз между током и напряжением:

$$\varphi_{\text{max}} = \pm \arccos \left(\frac{2SWR_{\text{max}}}{SWR_{\text{max}}^2 - 1} \text{tg} \Delta\varphi_{\text{факт}} \right) = \pm \arccos \left(\frac{4}{3} \cdot 0,1227 \right) = \pm 80,58 \text{ град}. \quad (10)$$

Для дальнейших вычислений необходимо опираться на меньшее из двух рассчитанных по формулам (8) и (10) значений. Тут стоит отметить, что погрешность датчика разности фаз зависит от измеряемого значения, а наибольшая точность измерений необходима при определении фазовых сдвигов, близких к 90 градусам. Поэтому в расчетах можно использовать значение абсолютной погрешности для разности фаз от 15 до 165 градусов (таблица 4). В этом случае максимально допустимая разность фаз между током и напряжением составит $\pm 88,67$ градусов.

Если сравнить результат расчета с фазой сопротивления антенны АШ-4 на различных частотах (таблица 1), то можно обнаружить, что при использовании выбранных интегральных решений получить ожидаемое качество согласования будет возможно только на частотах выше 12 МГц.

Наиболее очевидным решением в этой ситуации может показаться использование трансформирующего элемента при проведении измерений для уменьшения реактивного сопротивления (проводимости) антенны, и как следствие, снижения требований к точности ИИ до необходимого значения. После чего производится повторное измерение и коррекция номинала трансформирующего элемента до значения, обеспечивающего целевое качество согласования. Такой способ напоминает итерационный расчетный алгоритм [9], суть которого состоит в том, что при приближении иммитанса системы «антенна-СУ» к целевому снижаются требования к точности измерений, что позволяет использовать датчики с конечной погрешностью. Отличие этих подходов заключается в том, что при использовании итерационного расчетного алгоритма потребуется осуществить количество измерений, равное количеству разрядов дискретного трансформирующего элемента. В предложенном выше случае достаточно осуществить только два измерения.

Произведем расчет необходимого значения реактивного сопротивления трансформирующего элемента X_{TR} для обеспечения требуемого качества согласования при погрешности датчиков напряжения и тока равным ε , в случае использования СЦ в виде Г-звена. Перепишем формулу (1) в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{R_A}{\sqrt{R_A^2 + (X_A + X_{TR})^2}} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1 - R_A/R_0}. \quad (11)$$

Преобразуем ее следующим образом:

$$|X_A + X_{TR}| = \sqrt{\left(\frac{R_A}{2\sqrt{2}\varepsilon} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1 - R_A/R_0} \right)^2 - R_A^2}. \quad (12)$$

В рассматриваемом случае реактивное сопротивление антенны будет иметь отрицательное значение, а трансформирующий элемент для СЦ такого типа – это катушка индуктивности с положительным реактивным сопротивлением. Определим минимальное значение реактивного сопротивления трансформирующего элемента:

$$X_{TR} = -X_A - \sqrt{\left(\frac{R_A}{2\sqrt{2}\varepsilon} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1 - R_A/R_0} \right)^2 - R_A^2}. \quad (13)$$

При использовании СЦ в виде обратного Г-звена расчет необходимого значения проводимости трансформирующего элемента B_{TR} производится по формуле:

$$B_{TR} = -B_A - \sqrt{\left(\frac{G_A}{2\sqrt{2}\varepsilon} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1 - G_A/G_0} \right)^2 - G_A^2}. \quad (14)$$

Однако, паразитные параметры элементов дискретной СЦ изменяются не монотонно с изменением номинала трансформирующего элемента, а определяются типом используемых компонентов непосредственно в каждом разряде набора. К тому же погрешность определения номинала каждого разряда имеет конечное значение, которое должно быть учтено в расчетах. Поэтому использовать какой-либо разряд для снижения требований к точности измерений и не использовать его при согласовании не представляется возможным.

Для решения этой проблемы предлагается иной способ. Он заключается в том, что при возникновении ситуации, когда измеренный иммитанс антенны не позволяет использовать полученное значение в расчетах из-за погрешности измерителя, производится предварительный расчет номинала трансформирующего элемента и установка необходимого числа старших разрядов дискретного набора с последующим повторным измерением иммитанса. После этого определяется состояние оставшихся младших разрядов, при этом состояние старших уже не изменяется.

Алгоритм такого способа согласования изображен на рисунке 1.

При старте процесса согласования определяется иммитанс системы «антенна-СУ». По результатам измерения производится расчет требуемого реактивного сопротивления (проводимости) дискретного трансформирующего элемента и определяется необходимое состояние

его разрядов для получения расчетного значения сопротивления. Далее все разряды проверяются по очереди, начиная со старших. Если разряд используется в текущем состоянии дискретного трансформирующего элемента, то его значение сопротивления сохраняется и в дальнейшем, сравнивается с минимально допустимым сопротивлением трансформирующего элемента по условиям требуемой точности измерений (13) либо (14). Если его сопротивление недостаточно, то обнаруживается следующий используемый разряд, и его сопротивление прибавляется к имеющемуся до тех пор, пока суммарное сопротивление не превысит минимально допустимое значение. После этого все обнаруженные разряды включаются, и производится повторное измерение иммитанса системы «антенна-СУ». По результатам измерений рассчитывается точное значение сопротивления дискретного трансформирующего элемента и включаются те используемые разряды, которые не участвовали в проверке.



Рисунок 1 – Алгоритм проверки разрядов трансформирующего элемента

Можно аналитически определить диапазон допустимых значений трансформирующего элемента, в котором будет обеспечиваться требуемая точность измерений иммитанса системы «антенна-СУ». Для этого определим максимальное значение реактивного сопротивления трансформирующего элемента, которое не должно превышать необходимую для согласования величину:

$$X_{TR} = \sqrt{R_A R_0 - R_A^2} - X_A. \quad (15)$$

Тогда диапазон сопротивлений трансформирующего элемента можно описать неравенством:

$$\sqrt{R_A R_0 - R_A^2} - X_A \geq X_{TR} \geq -X_A - \sqrt{\left(\frac{R_A}{2\sqrt{2\varepsilon}} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1 - R_A / R_0} \right)^2 - R_A^2}. \quad (16)$$

При использовании СЦ в виде обратного Г-звена неравенство примет вид:

$$\sqrt{G_A G_0 - G_A^2} - B_A \geq B_{TR} \geq -B_A - \sqrt{\left(\frac{G_A}{2\sqrt{2\varepsilon}} \cdot \frac{SWR_{\max}^2 - 1}{SWR_{\max}^2 + 1 - G_A / G_0} \right)^2 - G_A^2}. \quad (7)$$

В качестве примера произведем расчет необходимого количество старших разрядов трансформирующего элемента для осуществления измерений при согласовании антенны АШ-4 на частоте 2 МГц. Рассчитаем по формуле (15) необходимое по условиям согласования индуктивное сопротивление трансформирующего элемента, а по формуле (13) – минимально необходимое для осуществления измерений при $\varepsilon_i = \varepsilon_u = 6\%$ и допустимом КСВ, равным 2. Погрешность датчика разности фаз не учитываем. Результаты расчетов представим в виде неравенства:

$$969,5 \text{ Ом} \geq X_{TR} \geq 942,4 \text{ Ом}. \quad (18)$$

Состояния разрядов дискретного трансформирующего элемента в случае измерения и согласования представлены в таблице 5. Как видно из таблицы, для осуществления измерений достаточно включить только три разряда из десяти имеющихся в составе предложенного дискретного трансформирующего элемента. Необходимая точность датчиков тока и напряжения, рассчитанная по формуле (1), составляет $\varepsilon_i = \varepsilon_u = 0,88\%$. Таким образом, предложенный способ позволил снизить требования к точности измерений в 6,82 раза для частоты 2 МГц и антенны АШ-4.

Таблица 5 – Состояния разрядов дискретного трансформирующего элемента

Номер разряда	Номинал разряда, мкГн	Сопротивление разряда, Ом	Состояние разряда при согласовании	Состояние разряда при измерении
1	0,125	1,57	0	0
2	0,25	3,14	1	0
3	0,5	6,28	0	0
4	1	12,57	1	0
5	2	25,13	0	0
6	4	50,27	1	1
7	8	100,53	1	1
8	16	201,06	0	0
9	32	402,12	0	0
10	64	804,25	1	1

Заключение. Определены требования к динамическому диапазону и допустимой погрешности ИИ на примере электрически короткой антенны АШ-4. Произведен анализ погрешностей распространенных интегральных измерителей напряжения и разности фаз для определения возможности их использования в СУ, проектируемого для этой антенны. Предложена модификация расчетного способа согласования, учитывающая погрешность используемого ИИ, которая заключается в том, что производится два измерения иммитанса системы «антенна-СУ»: предварительное, в результате которого производится расчет номинала дискретного трансформирующего элемента СЦ и установка его старших разрядов таким образом, чтобы понизить требования к точности ИИ до необходимого значения, и основное, в результате которого определяется состояние оставшихся разрядов с необходимой точностью. В качестве примера произведен расчет состояния дискретного трансформирующего элемента для случаев измерения и согласования.

Литература

1. Ковалевич, Д. А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика / Д. А. Ковалевич // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 31–39.
2. Ковалевич, Д. А. Синтез требований к измерителю иммитанса для согласующих устройств расчетного типа / Д. А. Ковалевич // Новости науки и технологий. – 2021. – № 3 (58). – С. 29–38.
3. ОАО «Техника Связи». Средства связи и боевая экипировка [Электронный ресурс]. – Режим доступа :<http://t-c.by/wp-content/uploads/2019/10/Katalog-TVN.pdf> – Дата доступа: 28.10.2021.
4. AD8361 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8361.pdf>. – Дата доступа: 28.10.2021.
5. AD8362 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8362.pdf>. – Дата доступа: 28.10.2021.
6. ADL5511 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5511.pdf>. – Дата доступа: 28.10.2021.
7. LMH2120 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmh2120.pdf?ts=1637229581410&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMH2120. – Дата доступа: 28.10.2021.
8. AD8302 Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8302.pdf>. – Дата доступа: 28.10.2021.
9. Жуков, В. М. Устройства автоматики в системах радиосвязи : учеб. пособ. / В. М. Жуков, А. А. Шилов. – Тамбов, 2013. – 99 с.