

## ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ДВУХТОЧЕЧНОГО РАМОЧНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

*Работа направлена на повышение эффективности мобильных систем коротковолновой радиосвязи, создание малогабаритных широкополосных направленных антенн применительно для установки их на подвижных объектах.*

*В работе предлагается принцип построения широкодиапазонной антенны. Исследуется оригинальный излучатель в виде рамочной антенны с произвольным двухточечным возбуждением. Описан метод определения входного сопротивления. Данный метод основан на результатах измерений входного сопротивления этой же антенны при одноходовом возбуждении и различных нагрузках на ее другом входе. Для расчета и анализа входного сопротивления рамочного излучателя с двухточечным возбуждением использовано его представление в виде двух разомкнутых рамок, совмещенных друг с другом.*

*Получены упрощенные инженерные соотношения, позволяющие анализировать входное сопротивление рамочного излучателя при произвольном двухточечном возбуждении его входов. В данных соотношениях использованы переменные, характеризующие входные сопротивления рамочного излучателя при «коротком замыкании» и «холостом ходе» одного из его входов, которые, в свою очередь, достаточно просто определить экспериментальным путем.*

*С использованием экспериментальных результатов выявлено следующее: при равноамплитудном квадратурном возбуждении рамочного излучателя в двух противоположных точках уровень активной составляющей входного сопротивления антенны повышается; пределы изменения входного сопротивления антенны существенно уменьшаются, что позволяет обеспечить широкодиапазонное согласование антенны при относительно малых ее габаритных размерах. Данное свойство рамочного излучателя при двухточечном возбуждении позволяет сформулировать предположение относительно зависимости входного сопротивления (сопротивления излучения) малогабаритной антенны также от способа ее возбуждения, а не только от габаритных размеров и геометрической конфигурации излучателя.*

*Направлениями дальнейших исследований в этой области являются оптимизация формы излучателя, увеличение точек возбуждения и выбор оптимальных мест их расположения, исследование характеристик направленности такой антенны и разработка широкодиапазонного устройства возбуждения антенны.*

**Ключевые слова:** широкодиапазонная антенна, двухточечный рамочный излучатель, входное сопротивление, произвольное двухточечное возбуждение.

M.B. PROTSENKO

Radio Research and Development Institute, Russia

## CONSTRUCTION PRINCIPLE OF THE BROADBAND ANTENNA BASED ON TWO-POINT LOOP RADIATOR

*The work is aimed at increasing the efficiency of mobile short-wave radio systems, creating small-size broadband directional antennas for installation on mobile objects.*

*Constructing principle of the broadband antenna is proposed. The original radiator in the form of the loop antenna with arbitrary two-point excitation is investigated. The method for determining input impedance is described. This method is based on the results of measurements of the input impedance of the same antenna for single-input excitation and various loads at its other input. For calculation and analysis of the input impedance of the loop radiator with two-point excitation, its representation is used in the form of two unclosed loops, combined with each other.*

*Simplified engineering mathematical expressions which allow analyzing the input impedance of the loop radiator for arbitrary two-point excitation of its inputs are obtained. In these mathematical expressions, variables characterizing the input impedances of the loop radiator in the case of a "short circuit" and "idle" of one of its inputs are used. This input impedances can be determined simply by experiment.*

*Using the experimental results, the following is revealed: when the quadrature excitation of the loop radiator is equal in amplitude at two opposite points, the level of the active component of the input resistance of the antenna increases; the limits of the change in the input impedance of the antenna are substantially reduced, which makes it possible to provide broadband matching of the antenna with its relatively small overall dimensions. This property of the loop radiator with two-point excitation allows us to formulate an assumption regarding the dependence of the input impedance (resistance of radiation) of a small-sized antenna also on the method of its excitation, and not only on the overall dimensions and geometric configuration of the radiator.*

*Directions for further research in this area are optimizing the shape of the radiator, increasing the excitation points and choosing the optimal locations, investigating the directivity characteristics of such an antenna, and developing a broadband antenna excitation device.*

**Key words:** broadband antenna, two-point loop radiator, input impedance, arbitrary two-point excitation.

Одной из актуальных проблем, связанных с повышением эффективности мобильных систем коротковолновой радиосвязи, является создание малогабаритных широкополосных направленных антенн, устанавливаемых на подвижных объектах. Частные методы, такие как минимизация габаритных размеров излучателей [1], создание широкополосных антенн [2] или увеличение направленности антенн по отдельности не дают оптимального решения данной проблемы в целом. Это обусловлено тем, что широкополосность антенны, в частности, по входному сопротивлению (или уровню согласования входа антенны с питающим фидером), и ее направленные свойства взаимосвязаны с габаритными размерами [2]. Кроме того, ограничение на габаритные размеры антенны приводит к необходимости компромиссного

решения для удовлетворения совокупности требований, основываясь на известных элементарных типах излучателей.

Одним из таких излучателей является рамочная антенна. Входное сопротивление такой антенны при относительно малых ее габаритных размерах значительно изменяется в полосе частот, поэтому согласование антенны с питающим фидером возможно только в узкой полосе частот. Улучшение характеристик и параметров рамочной антенны достигается путем включения в разрыв излучающего проводника дополнительных нагрузок. Причем включение реактивных нагрузок (емкостного или индуктивного характера) приводит к возможности согласования антенны более малых габаритных размеров [3], не расширяя при этом полосы частот. Включение активной нагрузки, хотя и приводит к значительному расширению полосы частот, формированию сверхнаправленного излучения [4], однако ограничивает использование рамочной антенны только в режиме приема.

Для значительного расширения диапазона рабочих частот малогабаритного рамочного излучателя, в котором обеспечивается требуемый уровень согласования антенны с питающим фидером, а также придания характеристикам излучения антенны направленности предлагается ее многоточечное возбуждение и, в частном случае, двухточечное. Определение входного сопротивления малогабаритной рамочной антенны даже с двухточечным возбуждением, по сути, является нетривиальной задачей. Сложность задачи существенно возрастает при экспериментальном исследовании входного сопротивления реального макета в коротковолновом диапазоне частот, вследствие его существенной зависимости от условий проведения измерений (электродинамических свойств объекта-носителя, свойств подстилающей поверхности и т. п.).

Учитывая вышеизложенное, целью статьи является представление результатов исследования оригинального излучателя в виде рамочной антенны с произвольным двухточечным возбуждением и описание нового метода определения ее входного сопротивления.

Для расчета и анализа входного сопротивления рамочного излучателя с двухточечным возбуждением (рисунок 1, а) представим его в виде двух разомкнутых рамок, смещенных друг с другом. К входным зажимам первой разомкнутой рамки приложено напряжение  $U_1$ , а на диаметрально противоположной стороне этой же рамки имеется разрыв проводника. Вторая рамка имеет такие же размеры, что и первая, и развернута относительно первой на угол 180 град (в общем случае, угол поворота второй рамки относительно первой может быть произвольным). К входным зажимам второй разомкнутой рамки приложено напряжение  $U_2$ . Аналогичное представление используется в обобщенном методе наводимых ЭДС при дискретизации проволоочного излучателя взаимно пересекающимися сегментами. Однако в отличие от известного метода, здесь рассматривается замкнутая излучающая структура с сегментами криволинейной формы.

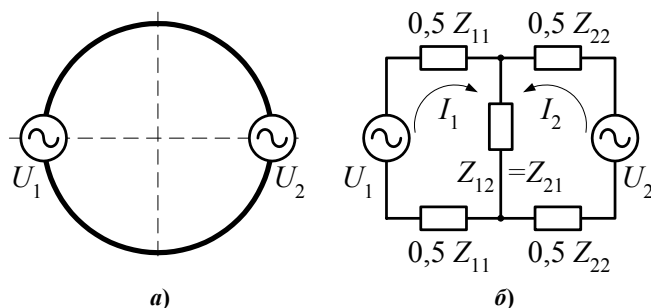


Рис. 1 – Рамочный излучатель с двухточечным возбуждением а) и его эквивалентная схема б)

Предположим также, что взаимное влияние разомкнутых рамок друг на друга носит интегральный характер, то есть изменяются лишь комплексные амплитуды тока через входные зажимы, не изменяя при этом амплитудно-фазового распределения тока вдоль излучающей поверхности каждой из рассматриваемых рамок. Данное предположение также обосновано, если учесть малые габаритные размеры антенны по сравнению с длиной волны (периметр рамки не более половины длины волны).

Тогда согласно приведенному представлению и сделанному предположению можно изобразить упрощенную эквивалентную схему рамочного излучателя с двухточечным возбуждением (см. рисунок 1, б), на основании которой записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12}; \\ U_2 = I_1 Z_{21} + I_2 Z_{22}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $U_1$ ,  $U_2$  и  $I_1$ ,  $I_2$  — напряжения, приложенные к входным зажимам разомкнутых рамок, и токи, протекающие через эти зажимы соответственно;  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  и  $Z_{12}$ ,  $Z_{21}$  — собственные и взаимные сопротивления излучения каждой из разомкнутых рамок, представленные в комплексной форме ( $Z = R + jX$ ), для которых на основании принципа взаимности выполняется тождество  $Z_{12} \equiv Z_{21}$ .

С учётом (1) можно определить входное сопротивление рамочного излучателя на каждом из его входов, поскольку все переменные, входящие в (1), отнесены к входным зажимам соответствующих разомкнутых рамок:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{вх}1} &= \frac{U_1}{I_1} = Z_{11} + \frac{I_2}{I_1} Z_{12}; \\ Z_{\text{вх}2} &= \frac{U_2}{I_2} = Z_{22} + \frac{I_1}{I_2} Z_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На основании (1) можно определить и токи, протекающие через соответствующие входные зажимы разомкнутых рамок, если известны подведенные к ним напряжения. Решая (1) относительно  $I_1$  и  $I_2$ , получаем:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= U_1 \frac{Z_{22}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2} - U_2 \frac{Z_{12}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2}; \\ I_2 &= U_2 \frac{Z_{11}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2} - U_1 \frac{Z_{12}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Тогда отношение токов с учётом (3) равно

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{Z_{11} - \frac{U_1}{U_2} Z_{12}}{Z_{22} - \frac{U_2}{U_1} Z_{12}}. \quad (4)$$

Таким образом, входное сопротивление рамочного излучателя с двухточечным возбуждением с учетом заданного возбуждения  $U_1$ ,  $U_2$  на основании (2) и (4) будет определяться только значениями  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  и  $Z_{12}$ , которые зависят от конфигурации, относительных размеров и взаимного расположения излучателей. При достаточно простой формулировке задачи расчета и анализа входного сопротивления рамочного излучателя с двухточечным возбуждением на основе обобщенного метода наводимых ЭДС существуют определенные математические трудности при вычислении  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  и  $Z_{12}$ , среди которых можно выделить следующие:

1) ввиду того, что выражения для комплексных сопротивлений излучения  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  и  $Z_{12}$  имеют интегральную форму, не всегда возможно получить для них замкнутые аналитические выражения, особенно для криволинейных излучателей;

2) решение задачи определения  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  и  $Z_{12}$  относительно входных зажимов излучателей, в том числе с использованием метода интегральных уравнений, часто является неустойчивым и приводит к «расходящимся результатам», что сказывается на точности получаемого решения.

При этом, если для преодоления первой вычислительной особенности можно использовать методы численного интегрирования, то для преодоления второй — необходимо контролировать соотношения между длиной и радиусом кривизны сегмента, радиусом цилиндрического проводника излучателя и длиной волны.

Принципиальная сложность решения поставленной задачи возникает при экспериментальной аттестации входного сопротивления рамочного излучателя на каждом из его входов при произвольном их возбуждении. Это связано, в первую очередь, с тем, что экспериментально можно исследовать входное сопротивление на входе антенной системы в целом (на входе устройства разделения мощности и формирования требуемого фазового сдвига), не убедившись предварительно в правильности теоретического вычисления численного значения входного сопротивления антенны по каждому из ее входов. Кроме того, антенна взаимодействует с окружающей средой, ее входное сопротивление зависит от формы и электродинамических свойств объекта-носителя, что невозможно в полной мере учесть при теоретическом моделировании.

Таким образом, возникает задача определения входного сопротивления рамочного излучателя с произвольным двухточечным возбуждением  $U_1$ ,  $U_2$  не через переменные  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  и  $Z_{12}$ , а через переменные, которые можно определить экспериментальным путем. В качестве таких переменных предлагается использовать входное сопротивление разомкнутого рамочного излучателя, которое согласно предложенной модели антенны численно равно  $Z_{\text{оо}} = Z_{11} = Z_{22}$ , и входное сопротивление короткозамкнутого рамочного излучателя  $Z_{\text{кз}}$ . Определить  $Z_{\text{кз}}$  возможно на основании (2) и (4), учитывая, что в этом случае  $U_2 = 0$ ,

$$Z_{\dot{e}\dot{c}} = Z_{\dot{o}\dot{o}} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{\dot{o}\dot{o}}}. \quad (5)$$

Тогда, опустив промежуточные преобразования, выражения (2) с учётом (3) и (5), можем переписать в виде:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\dot{a}\dot{o}1} &= \frac{Z_{\dot{e}\dot{c}} Z_{\dot{o}\dot{o}}}{Z_{\dot{o}\dot{o}} - \frac{U_2}{U_1} \sqrt{Z_{xx}^2 - Z_{\dot{e}\dot{c}} Z_{\dot{o}\dot{o}}}}; \\ Z_{\dot{a}\dot{o}2} &= \frac{Z_{\dot{e}\dot{c}} Z_{\dot{o}\dot{o}}}{Z_{\dot{o}\dot{o}} - \frac{U_1}{U_2} \sqrt{Z_{xx}^2 - Z_{\dot{e}\dot{c}} Z_{\dot{o}\dot{o}}}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Представленные выше выражения были использованы для определения входного сопротивления действующего макета антенны, который представлял собой несимметричный рамочный излучатель (полурамка) с двухточечным возбуждением. Полурамка располагалась ортогонально над плоским проводящим экраном, моделирующим форму объекта-носителя, точки возбуждения находились в плоскости экрана. Полурамка выполнена из проводника цилиндрической формы диаметром 20 мм, габаритные размеры и длина полурамки соответственно составляли 1500x750 мм и 2350 мм. Измерения входного сопротивления антенны при коротком замыкании и холостом ходе одного из входов проводились в коротковолновом диапазоне частот (1,5...30,5 МГц) на открытой площадке с помощью измерительного комплекса HEWLETT-PACKARD 85869PC.

Результаты измерений в виде частотных зависимостей изображены на рисунке 2, где цифрами 1 и 2 соответственно обозначены зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления исследуемой антенны при разомкнутом и короткозамкнутом одном из входов. Представленные данные наглядно характеризуют особенности частотного изменения входного сопротивления короткозамкнутого и разомкнутого рамочного излучателя. В частности, активная составляющая входного сопротивления для обоих случаев в низкочастотной части диапазона имеют незначительный уровень, а реактивные составляющие имеют противоположные знаки: разомкнутая полурамка в низкочастотной части диапазона имеет ёмкостной характер реактивной составляющей входного сопротивления, в то время как короткозамкнутая полурамка — индуктивный характер.

В ходе дальнейших исследований на основе известных значений  $Z_{\dot{e}\dot{c}}$ ,  $Z_{\dot{o}\dot{o}}$ , полученных как теоретически, так и экспериментально, проведено численное моделирование входного сопротивления антенны (с использованием (6)) при ее произвольном амплитудно-фазовом возбуждении. Лучший результат, выбранный по критерию наименьшего изменения  $Z_{\dot{a}\dot{o}}$  в широкой полосе частот и достаточный уровень  $R_{\dot{a}\dot{o}}$  для возможности согласования антенны со стандартным фидером, получен при двухточечном равноамплитудным квадратурным возбуждением. Частотные изменение составляющих  $Z_{\dot{a}\dot{o}}$  для данного режима возбуждения рамочной антенны изображены на рисунке 2, где обозначены цифрой 3.

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

Во-первых, получены упрощенные инженерные соотношения, позволяющие анализировать входное сопротивление рамочного излучателя при произвольном двухточечном возбуждении его входов. В данных соотношениях использованы переменные, характеризующие входные сопротивления рамочного излучателя при коротком замыкании и холостом ходе одного из его входов, которые, в свою очередь, достаточно просто определить экспериментальным путем.

Во-вторых, с использование экспериментальных результатов выявлено, что при равноамплитудном квадратурном возбуждении рамочного излучателя в двух противоположных точках уровень активной составляющей входного сопротивления антенны повышается, пределы изменения входного сопротивления антенны существенно уменьшаются, что позволяет обеспечить широкодиапазонное согласование антенны при относительно малых ее габаритных размерах.

Данное свойство рамочного излучателя при двухточечном возбуждении позволяет сформулировать предположение относительно зависимости входного сопротивления (сопротивления излучения) малогабаритной антенны также от способа ее возбуждения, а не только от габаритных размеров и геометрической конфигурации излучателя. Этот факт не отмечен ранее в научной литературе и является одной из задач дальнейших исследований. Кроме этого, направлениями дальнейших исследований в этой области являются оптимизация формы излучателя, увеличение точек возбуждения и выбор оптимальных мест их расположения, исследование характеристик направленности такой антенны и разработка широкодиапазонного устройства возбуждения антенны.

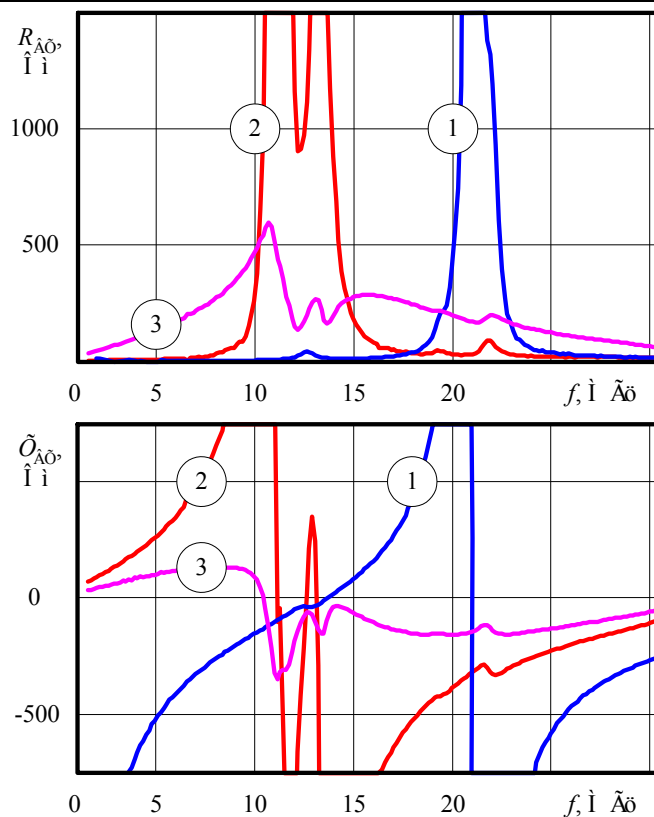


Рис. 2 – Входное сопротивление рамочной антенны при различном возбуждении: одиточечное возбуждение 1 (разомкнутая), 2 (короткозамкнутая); двухточечное возбуждение 3 (равноамплитудное квадратурное)

### Литература

1. Киселев В.П. Современное состояние исследований малогабаритных антенн // Зарубежная радиоэлектроника, 1990, № 5 — 82–87с.
2. Киселев В.П. Широкополосные малогабаритные антенны УКВ диапазона // Зарубежная радиоэлектроника, 1990, № 2. — 54–60с.
3. Овсяников В.В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками / М.: Радио и связь, 1985. — 120с.
4. Проценко М.Б., Громоздин В.В. Широкодиапазонная малогабаритная антенна с повышенной направленностью излучения // Радиотехника: Всеук. Межвед. науч.-техн. сб., Харьков, 2002, Вып. 125. — 8–12с.

### References

1. V.P. Kiselev Sovremennoe sostoyanie issledovaniy malogabaritnykh antenn // Zarubezhnaya radioelektronika, 1990, № 5 — 82–87s.
2. V.P. Kiselev Shirokopolosnye malogabaritnye anteny UKV diapazona // Zarubezhnaya radioelektronika, 1990, № 2. — 54–60s.
3. V.V. Ovsyanikov Vibratormye anteny s reaktivnymi nagruzkami / M.: Radio i svyaz', 1985. — 120s.
4. M.B. Protsenko, V.V. Gromozdin SHirokodiapazonnaya malogabaritnaya antenna s povyshennoy napravlennoy izlucheniya // Radiotekhnika: Vseuk. Mezhved. nauch.-tekh. sb., Har'kov, 2002, Vyp. 125. — 8–12s.

Отримана/Received : 21.9.2017 р. Надрукована/Printed : 21.1.2018 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією