

УДК 621.396.674.33

## ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩАЯ АНТЕННА ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

М. А. Лаптев

ФГУП Специальное конструкторское бюро Института радиотехники и электроники  
Российской академии наук,  
141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. им. академика Б. А. Введенского, д. 4

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2019 г.

**Аннотация.** В данной статье описан способ широкополосного согласования укороченной симметричной вибраторной антенны типа «бабочка». Приведены результаты расчетов согласующего устройства. Проведены расчёты и представлены графики зависимостей коэффициента полезного действия (КПД) и рабочей полосы частот антенны от сопротивлений шунтирующих резисторов. Приведены результаты натурных измерений параметров  $S_{11}$  уменьшенного макета и полноразмерной антенны. Показано, что разработанный метод согласования позволяет достичь рабочей полосы частот антенны свыше 30%.

**Ключевые слова:** симметричная вибраторная антенна, согласующее устройство.

**Abstract.** In this article, a method for broadband matching of a shortened symmetrical dipole antenna with a 50-ohm feeder line is presented. The method is based on the use of a two-link Chebyshev bandpass filter scheme for matching the reactive component of the antenna input impedance. With this type of matching, the capacitance of the series circuit of the bandpass filter is formed by the input capacity of the antenna. At the same time, the antenna radiation resistance is the load resistance of the filter of the shortened dipole. Results of calculations of the matching device of the reduced antenna model are presented. Calculations are performed and graphs of the dependences of the efficiency and the operating frequency band of the antenna on the values of the shunt resistors are presented. The results of full-scale measurements of the  $S_{11}$  parameters of the lessened model and the full-size antenna are presented. It is shown that the developed matching method allows to extend the

antenna bandwidth up to  $\approx 35\%$  in terms of the reflected signal level minus 10 dB, which corresponds to the VSWR  $\approx 2$ . At the same time, the antenna dimensions are reduced by 2.5 times in comparison with the half-wave dipole. The developed matching method can be used to match symmetrical dipole antennas, which are used in conditions of limited installation space and to reduce mass-dimensional characteristics.

**Keywords:** symmetrical dipole antenna, matching device.

## 1. Введение

В наземных радиолокационных и приемопередающих станциях, а также радиолокаторах для космических аппаратов часто применяют антенны в виде полуволнового симметричного вибратора.

Полуволновая антенна имеет большие габариты при работе в КВ и УКВ диапазонах длин волн. Зачастую размещение такой крупногабаритной антенны (более 3 метров) на космическом аппарате без специальных конструктивных решений, невозможно.

В статье рассмотрена конструкция укороченной вибраторной антенны типа «бабочка». Расчет параметров такой антенны представлен в работе [1]. Способ широкополосного согласования позволяет сократить длину антенны в два и более раза, и при этом исключается необходимость в разработке сложной разворачиваемой конструкции. Расчет согласования антенны приводится ниже.

## 2. Расчет антенны с согласующим устройством

Входное сопротивление антенны с укороченными вибраторами можно записать в комплексном виде:

$$Z_{\text{вх}} = R_a - j \frac{1}{\omega C}, \quad (1)$$

где  $R_a$  – активное сопротивление;

$\omega$  – круговая частота, равная произведению  $2\pi$  на частоту колебаний  $f$  [Гц].

Эквивалентная схема входного сопротивления вибратора антенны приведена на рис. 1.

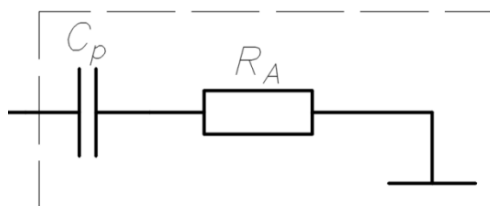


Рис. 1 Эквивалентная схема входного сопротивления вибратора антенны.

Для согласования реактивной составляющей входного сопротивления антенны будем использовать двухзвенный чебышевский полосовой фильтр [2], ёмкость последовательного контура которого образована входной ёмкостью антенны. При этом, сопротивление излучения антенны является сопротивлением нагрузки фильтра укороченного диполя. Так же, полосовой фильтр имеет широкую полосу пропускания и малые габариты, что немаловажно для решения поставленной задачи.

Для подтверждения приведенных выше рассуждений был проведен эксперимент на уменьшенном макете антенны. Все линейные размеры макета в пять раз меньше линейных размеров исследуемой антенны. В таком макете центральная частота  $f_M=100$  МГц будет в пять раз выше рабочей частоты полномасштабной антенны. В дальнейшем номиналы элементов согласующего устройства будут пересчитаны на рабочую частоту 20 МГц и проведен эксперимент с полноразмерной антенной.

Для расчета ёмкости  $C$  в эквивалентной схеме рис. 1 воспользуемся формулами [3]:

$$C = \frac{1}{\omega X}, \text{ и } X = \frac{-120 \cdot \ln\left(\frac{0,575 \cdot 2l}{d}\right)}{\tan\left(\frac{\pi \cdot 2l}{\lambda}\right)}, \quad (2)$$

где  $X$  – реактивное сопротивление антенны,  
 $d$  – ширина вибратора,  $l$  – длина вибратора.

На рис. 2 приведена фотография конструкции антенны, которая состоит из двух треугольных вибраторов, согласующего устройства и металлического экрана.



Рис. 2 Внешний вид макета антенны

Принципиальная схема согласующего устройства приведена на рис. 3.

Согласующее устройство состоит из трансформатора  $T$ , имеющего симметричные выходы обмоток, которые соединяются с двумя параллельными  $LC$ -контурами, образованными емкостями и индуктивностями  $C_1L_1$  и  $C_2L_2$ , последовательно которым подключены индуктивности  $L_3$  и  $L_4$ , соединенные последовательно с вибраторами антенны (эквивалентная схема вибраторов обведена пунктирной линией). Последовательно соединенные входные емкости  $C_p$  вибраторов с индуктивностями  $L_3$  и  $L_4$  образуют последовательные контуры чебышевских двухзвенных полосовых фильтров, параллельные контуры которых образуют  $LC$ -контуры  $C_1L_1$  и  $C_2L_2$ . Для расширения рабочей полосы частот параллельно индуктивностям  $L_3$  и  $L_4$  подключены резисторы [4].

Предварительный расчет согласующего устройства проводился для антенны с параметрами:  $X=200$  Ом,  $R=15$  Ом. Далее на этапе проведения эксперимента проводилась точная настройка КСВ антенны путем подстройки

индуктивности, значение которой экспериментально было подобрано и составило  $L_{3,4}=307$  нГн. Для увеличения полосы пропускания антенны пришлось уменьшить добротность последовательной индуктивности (параллельно подключался резистор  $R_{1,2}$  с сопротивлением пределах от 1 до 5 кОм). Параллельный LC-контур имеет емкость  $C_{1,2}=47$  пФ и индуктивность  $L_{1,2}=56$  нГн. Как показывает эксперимент, емкость параллельного контура влияет на рабочую полосу антенны (расстояние между минимумами КСВ). При увеличении емкости минимумы сближаются, что приводит к сужению полосы пропускания. Согласование антенны с 50- омной питающей линией было осуществлено через широкополосный трансформатор.

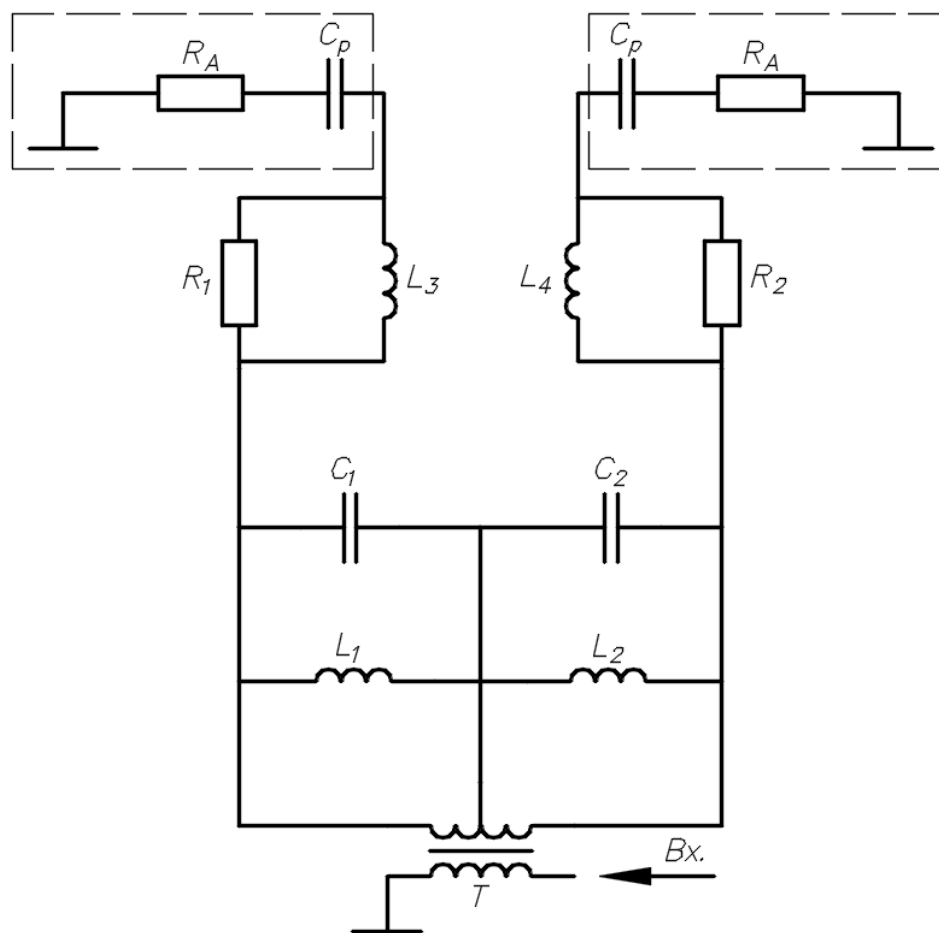


Рис. 3 Электрическая схема согласующего устройства.

После всех расчетов и настроек согласующего устройства КСВ антенны был измерен на векторном анализаторе цепей Anritsu MS2028C. На рис. 4

показан результат измерений КСВ. На центральной частоте уровень отраженного сигнала составляет минус 10,83 дБ, что соответствует КСВ≈1,8. Полоса пропускания по этому уровню КСВ составляет Δf ≈30 МГц.

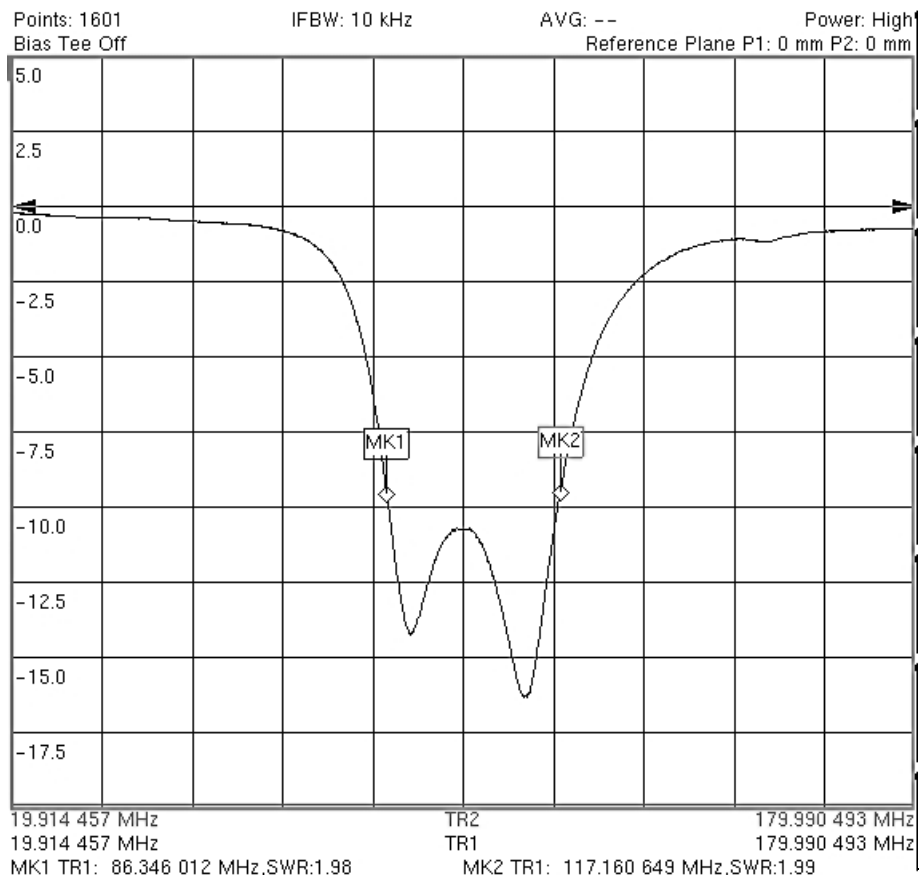


Рис. 4 Коэффициент отражения на входе укороченного вибратора после настройки.

### 3. Расчет КПД антенны

Для оценки эффективности работы антенны рассчитаем коэффициент полезного действия по формуле:

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{Q_{\text{ант}}} + \frac{1}{Q_{\text{согл}}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где:  $Q_{\text{ант}}$  – добротность макета антенны, равная отношению реактивного сопротивления  $X$  к активному  $R_{\text{изл}}$ , при этом реактивная составляющая сопротивления определяется емкостью антенны (рис. 1),  $Q_{\text{согл}}$  – добротность

устройства согласования, которая в основном определяется добротностью индуктивности  $L_1$  ( $L_2$ ) шунтированной резистором  $R_1$  ( $R_2$ ),

Добротности остальных элементов в согласующем устройстве не учитывались, так как они много больше добротностей последовательных индуктивностей.

В процессе эксперимента, при настройке макета антенны, были подобраны номиналы последовательных индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$ , компенсирующих емкостную составляющую сопротивления макета антенны. На частоте 100 МГц индуктивности, которые компенсируют реактивные сопротивления вибраторов антенны, имеют реактивное сопротивление 192,9 Ом. Это означает, что реактивное сопротивление макета антенны  $\approx -192,9$  Ом.

Определив реактивное сопротивление антенны, можно более точно определить значение активного сопротивления антенны, используя график зависимости сопротивлений антенны от размеров относительно  $\lambda$  (рис. 5) [5].

На рис. 5 приведены графики зависимости активной и реактивной составляющих входного импеданса симметричного вибратора от отношения длины плеча вибратора к длине волны для трех значений диаметра проводника вибратора [5].

Для расчета примем активное сопротивление антенны равным 17 Ом. Разделив реактивное сопротивление макета антенны на активное, получаем добротность 11,5.

Для определения добротности устройства согласования рассчитаем комплексное сопротивление шунтированной резистором индуктивности по формуле:

$$Z_{yc} = \frac{i\omega L \cdot R}{i\omega L + R}, \quad (4)$$

где  $L$  и  $R$  – значения номиналов индуктивности и шунтирующего резистора соответственно.

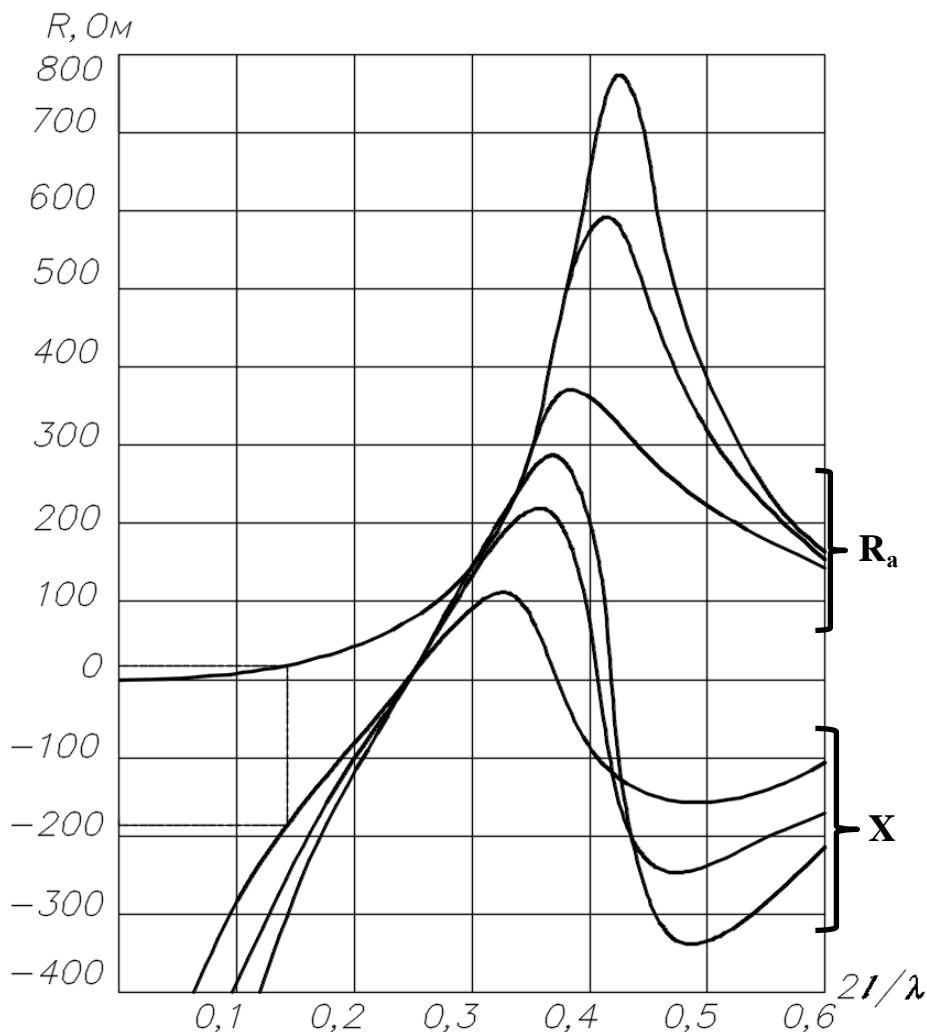


Рис. 5 График зависимости сопротивлений антенны от размеров относительно  $\lambda$ .

Комплексное сопротивление устройства согласования равно  $Z_{yc}=35,9+i186$  (Ом), где 35,9 Ом – активное сопротивление, а 186 Ом – реактивное. Отсюда добротность устройства согласования  $Q_{согл}$  макета антенны равна 5,18 при  $R_1$  и  $R_2$  равных 1 кОм.

На рис. 6 приведен график зависимости КПД от сопротивлений шунтирующих резисторов в цепи согласования антенны.

На рис. 7 приведена зависимость рабочей полосы антенны  $\Delta f$  от сопротивлений шунтирующих резисторов  $R$ . При этом рабочая полоса антенны оценивалась по уровню  $KCB = 2$ . Расчет согласования производился для макета антенны (рис. 2).



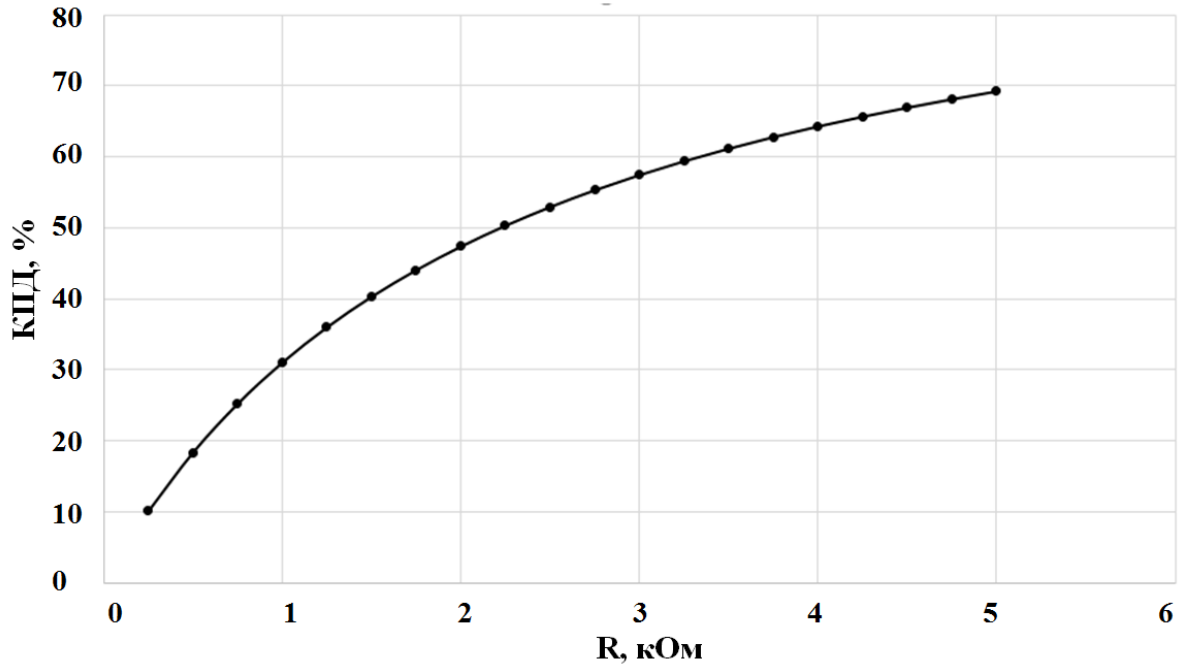


Рис. 6 График зависимости КПД от сопротивлений шунтирующих резисторов.

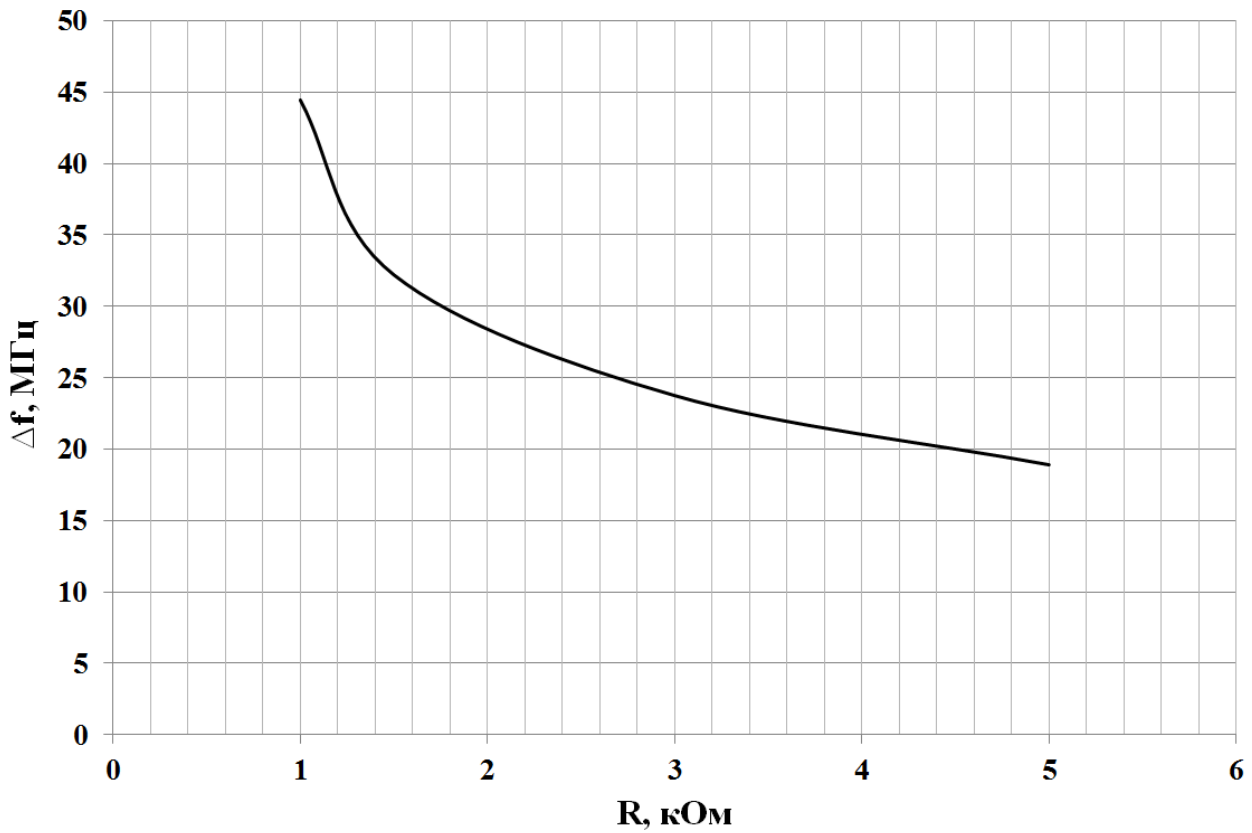


Рис. 7 Зависимость рабочей полосы антенны от сопротивлений шунтирующих резисторов.

#### 4. Укороченная вибраторная антенна на 20 МГц

После проведенного эксперимента с уменьшенным макетом антенны была изготовлена полноразмерная антенна на 20 МГц и были проведены натурные измерения КСВ. Т.к. параметры схемы согласования антенны имеют линейную зависимость от частоты, то для согласования антенны на частоте 20 МГц номиналы элементов были увеличены в 5 раз относительно уменьшенного макета и составили:  $L_{3,4}=1,56$  мкГн,  $L_{1,2}=280$  нГн,  $C_{1,2}=235$  пФ,  $R_{1,2}=5$  кОм. На рис. 8 приведена фотография антенны.



Рис. 8 Фотография укороченной вибраторной антенны на 20 МГц.

В результате натурных измерений были измерены параметры  $S_{11}$  (рис. 9) антенны с помощью векторного анализатора цепей Anritsu MS2028C.

В результате проведенных расчетов, настроек и экспериментальных измерений получены следующие характеристики укороченной вибраторной антенны на 20 МГц: ширина рабочей полосы частот антенны увеличена до  $\approx 35\%$  по уровню отраженного сигнала минус 10 дБ, а это соответствует КСВ  $\approx 2$ ; габариты антенны по сравнению с полуволновым диполем уменьшены в 2,5 раза.

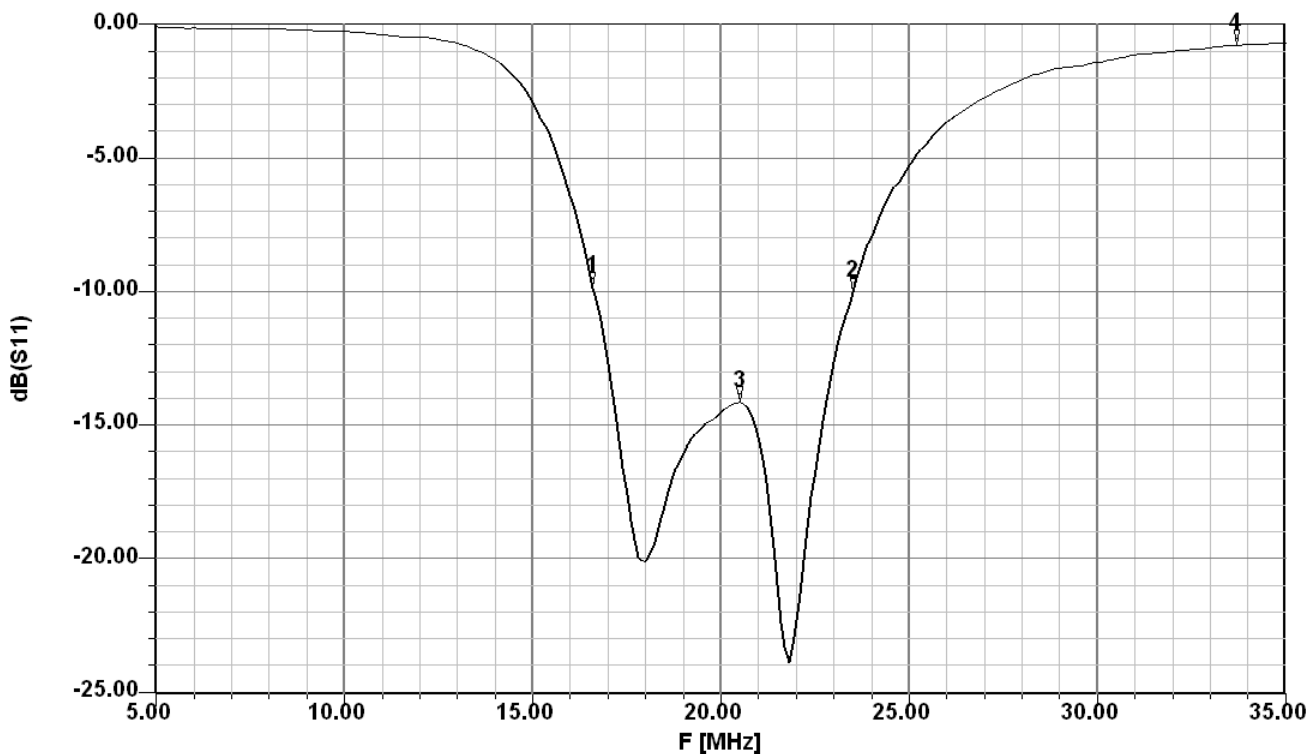


Рис. 9 График зависимости  $S_{11}$  от частоты для вибраторной антенны на 20 МГц с согласующим устройством.

## 5. Заключение

В статье рассмотрен способ согласования укороченной симметричной вибраторной антенны в широкой полосе частот (свыше 30%), приведены результаты расчетов согласующего устройства уменьшенного макета антенны, приведены результаты измерений параметров уменьшенного макета и полноразмерной антенны. Проведены расчёты и представлены графики зависимостей КПД и рабочей полосы частот антенны от сопротивлений шунтирующих резисторов.

Рассмотренный способ может применяться для согласования симметричных вибраторных антенн, которые используются в условиях ограниченного установочного пространства и для уменьшения массо-габаритных характеристик. Полученные результаты могут быть использованы при разработке антенн космического и наземного базирования.

## Литература

1. Г. Г. Гошин. Устройства СВЧ и антенны: Учебное пособие. В 2-х частях. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. Часть 2: Антенны. С. 65 – 69
2. Б. В. Чернышев. Широкополосное согласование укороченных антенн. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/1/text.pdf>
3. Гречихин А. Электрически малые антенны: возможности и заблуждения. Радио, 1992, №11, С. 9
4. Симметричная вибраторная антенна: пат. 175491 Российская Федерация, МПК H01Q 9/04 (2006.01) / Лаптев М. А.; Заявитель и патентообладатель, Федеральное государственное унитарное предприятие Специальное конструкторское бюро Института радиотехники и электроники Российской академии наук (RU) - № 2017123712; заявл. 04.07.2017; опубл. 06.12.17, Бюл. № 34
5. Н. И. Войтович, А. В. Ершов, А. Н. Соколов. УКВ вибраторные антенны. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. 49 с.

### Для цитирования:

М. А. Лаптев. Приёмно-передающая антенна декаметрового диапазона длин волн. Журнал радиоэлектроники. [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/8/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.8