

УДК 621.396.67  
PACS 84.40. Ba

**В. В. Овсянников**

Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара  
72, пр. Гагарина, Днепр (Днепропетровск), 49010, Украина  
E-mail: ovsyanyan37@i.ua

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЧАСТОТНЫХ (ТРЕХЧАСТОТНЫХ) АНТЕНН С РЕАКТИВНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования распределения амплитуды комплексного тока, входных сопротивлений, коэффициента стоячей волны по напряжению и диаграмм направленности многочастотных и двухчастотных линейных проволочных антенн СВЧ-диапазона с четвертьволновыми коаксиальными, двухпроводными шунтами и с сосредоточенными реактивными нагрузками. В результате исследований выяснено, что при постоянной длине четвертьволнового шунта, прикрепленного к антенне, и при разных размерах антенны относительно шунта она может приобретать или терять свойство многочастотности: при длине проволочного стержня, выступающего за пределы шунта, равной нечетному числу четвертей короткой волны верхнего частотного диапазона, режим многочастотности соблюдается; в противном случае режим многочастотности отсутствует. Предложен и проверен экспериментально принцип устранения отмеченного недостатка и создания двухчастотных антенн для работы с произвольным соотношением совмещаемых частот. Этот принцип заключается в корректировке электрической длины указанного проволочного стержня антенны, выступающего за пределы шунта, путем последовательного включения в его разрыв сосредоточенной реактивной нагрузки, значение которой должно удовлетворять двум условиям: созданию максимальной разности потенциалов в раскрыве шунта на верхней рабочей частоте и обеспечению режима последовательного резонанса антенны на нижней частоте. Приведены результаты исследования в виде таблиц и графиков распределения тока, входных сопротивлений, коэффициента стоячей волны по напряжению и диаграмм направленности подобных антенн, а также значений индуктивных нагрузок, рассчитанных по предложенному выражению и включаемых последовательно в выступающую часть стержня антенны за пределами шунта. Экспериментально проверен предложенный метод расчета и оптимизации подобных двухчастотных антенн для работы с произвольным соотношением совмещаемых частот. Отмечено, что исследованная двухчастотная антенна с двухпроводными линейными шунтами и с включенными индуктивными нагрузками является одним из перспективных вариантов при разработке малогабаритных двухчастотных антенн и антенных решеток в микрополосковом исполнении. Ил. 12. Табл. 3. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** двухчастотная антенна с шунтами, распределение амплитуды комплексного тока на антенне, входное сопротивление антенны, коэффициент стоячей волны по напряжению, индуктивная нагрузка.

Развитие индустрии средств телекоммуникации, радиолокации, радионавигации, космических систем и других отраслей промышленности предъявляет к линейным проволочным антеннам и антенным решеткам на их основе требования по расширению частотного диапазона работы. Многочастотные и двухчастотные вибраторные антенны обычно обеспечивают одновременную передачу или прием радиоволн на нескольких фиксированных частотах или частотных диапазонах. Им присущи улучшенные входные параметры, а именно активная составляющая входного сопротивления ( $R_{вх}$ ), близкая к волновому сопротивлению питающего фидера, и реактивная ( $X_{вх}$ ), равная или близкая к нулю на заданных разнесенных между собой частотах (диапазонах) при обеспечении на этих частотах необходимых диаграмм направленности (ДН). Такие антенны находят применение для обеспечения работы многочастотной радиоаппаратуры при установке ее на мобильных объектах, подлежащих защите от обнаружения радиопеленгационными средствами путем, например, скачкообразного изменения рабочих частот (диапазонов).

Аналогично многочастотным антеннам двухчастотные должны также обеспечивать на разнесенных рабочих частотах требуемые приемлемые входные параметры и ДН. Они востребованы для работы в известных дуплексных мо-

бильных наземных системах телекоммуникаций, например, *GSM*, *VODAFONE*, *LIFE CELL*, а также в дуплексных спутниковых системах передачи информации типа *GLOBALSTAR*, *IRIDIUM*, *ELLIPSO*, *GPS* и других. Зачастую они применяются в виде антенн и антенных решеток в микрополосковом исполнении.

В работе [1] рассмотрена двухчастотная симметричная антенна с так называемыми нагрузками – «ловушками» в виде последовательно включенных в ветви антенны сосредоточенных колебательных *LC*-контуров. Длина плеча этой симметричной антенны  $d = 0,25 \lambda_n = 0,50 \lambda_v$ , где  $\lambda_n$  и  $\lambda_v$  – длины волн нижней ( $\lambda_n$ ) и верхней ( $\lambda_v$ ) рабочих частот.

Однако подобные антенны имеют пониженный коэффициент полезного действия (КПД) из-за джоулевых потерь в их *LC*-контурах и в настоящее время не являются актуальными, так как известны альтернативные варианты с более высокими значениями КПД в СВЧ-диапазоне. Это много- и двухчастотные антенны с резонансными коаксиальными [2, 3] или двухпроводными шунтами [4–6] и др.

В известных работах по подобным многочастотным и двухчастотным антеннам недостаточно опубликовано информации по анализу распределения амплитуды комплексного тока на

них, входному сопротивлению, коэффициенту стоячей волны по напряжению (КСВН), диаграммам направленности и оптимизации основных характеристик таких антенн. Эти вопросы и подходы к совершенствованию многочастотных и двухчастотных антенн с коаксиальными и двухпроводными шунтами рассмотрены в данной статье. Значительное внимание уделяется двухчастотным антеннам с двухпроводными шунтами в связи с их актуальностью при выполнении в микрополосковом исполнении.

**1. Экспериментальные исследования многочастотных и двухчастотных антенн с коаксиальными шунтами.** Рассмотрим входные сопротивления и КСВН антенн с четвертьволновыми коаксиальными шунтами при разных соотношениях рабочих частот и электрических размерах антенн, предназначенных для одновременной работы на двух и более частотах [2, 3]. Для случая работы на двух частотах (нижней  $f_n$  и верхней  $f_b$ ) схема антенны с коаксиальными четвертьволновыми шунтами представлена на рис. 1. Здесь вибраторы 1, входящие внутрь шунтов 2 длиной  $h = 0,25\lambda_b$ , замкнуты накоротко с шунтами в их донной части. В результате в раскрывах 3 шунтов на частоте  $f_b$  создается высокое входное сопротивление, подавляющее ток частоты  $f_b$  на выступающих из шунтов частях вибраторов 4. При этом шунты размером  $\pm h$  возбуждаются током частоты  $f_b$  и работают как полуволновый вибратор на этой частоте.

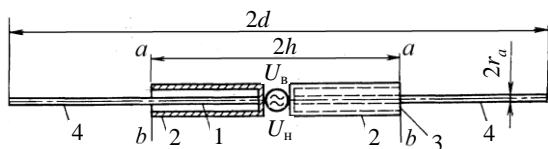


Рис. 1. Двухчастотная антенна с коаксиальными шунтами

Одновременно ток частоты  $f_n$  возбуждает всю антенну длиной  $2d$ , так как в раскрывах шунтов создается индуктивное сопротивление, не препятствующее распространению тока  $I_n$  нижней частоты  $f_n$  вдоль всей антенны и возбуждению ее этим током. При этом ДН антенны на частоте  $f_n$  также будет подобной ДН полуволнового вибратора. Причем наличие некоторого индуктивного сопротивления на этой частоте в «раскрывах» 3 шунтов позволяет несколько укорачивать наружные вибраторы 4.

Далее с целью более глубокого исследования свойств подобных антенн приведем результаты экспериментальных исследований входных характеристик четырех вариантов антенн (рис. 1) одинаковой конструкции, но с разными длинами

выступающих частей 4. Эти исследования выполнялись в безэховой камере на несимметричных вариантах антенн с коаксиальными узлами питания, установленных на алюминиевой плоскости в виде квадрата с размером стороны, равным  $1,5\lambda_n$ , достаточным для получения высокой точности измерений в отсутствие посторонних окружающих предметов вблизи антенн и измерительной установки. В табл. 1 даны основные параметры четырех вариантов исследуемых антенн.

Таблица 1  
Параметры антенн с коаксиальными шунтами

№ п/п	Параметр антенны	Вариант антенны			
		1	2	3	4
1	$f_b / f_n$	1,54	2,04	3,00	3,96
2	$d / h$	1,50	2,00	3,00	4,00
3	$d / \lambda_n$	0,23	0,23	0,24	0,25
4	$d / \lambda_b$	0,36	0,48	0,71	0,95
5	$(d - h) / \lambda_b$	0,11	0,24	0,48	0,71

Для определения закономерностей изменения входных сопротивлений и КСВН данных антенн были выполнены измерения их параметров в широком частотном диапазоне  $f_n \dots f_b$ , соответствующем диапазону электрических длин  $d / \lambda$ . Результаты измерений для вариантов 1–4 (табл. 1) показаны на рис. 2 и 3 непрерывными линиями. Там же пунктирными линиями представлены результаты для антенн, в которых шунты закорочены на «раскрывах» 3 (рис. 1).

Нумерация кривых на графиках и значений  $d$  на горизонтальных осях соответствует номерам вариантов антенн (табл. 1). На графиках реактивных составляющих антенн (рис. 2, 3) точки резонансов антенн помечены цифрами в кружках (№№ 5–8). Кружок № 5 соответствует точке резонансов антенн на частоте  $f_b$ , кружки №№ 6, 7 – резонансам на частоте  $f_n$ , и № 8 – резонансу антенны на частоте  $f_{cp}$ .

Результаты измерений КСВН (сокращенно  $K_c$ ) исследуемых антенн приведены в табл. 2. Как следует из графиков (рис. 2 и 3) и табл. 2, благодаря влиянию шунтов в рассматриваемых случаях с разными длинами  $(d - h) / \lambda_b$  выступающих вибраторов 4 наступает последовательный резонанс антенны, который сопровождается обращением в нуль реактивной составляющей на частоте  $f_b$  (кружки 5). При этом  $K_c$  в питающем фидере антенны на частоте  $f_b$  значительно снижается в сравнении с антенной без шунта, что является положительным фактором для согласования антенны с питающим фидером.

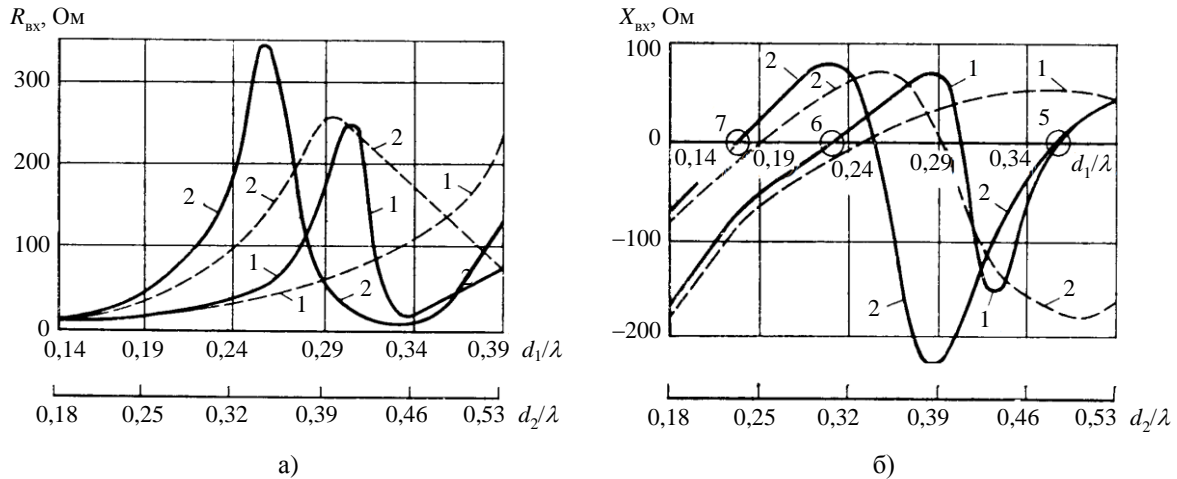


Рис. 2. Активная  $R_{вх}$  (а) и реактивная  $X_{вх}$  (б) составляющие входных сопротивлений двухчастотных антенн с коаксиальными шунтами (рис. 1) для вариантов 1 и 2 (табл. 1)

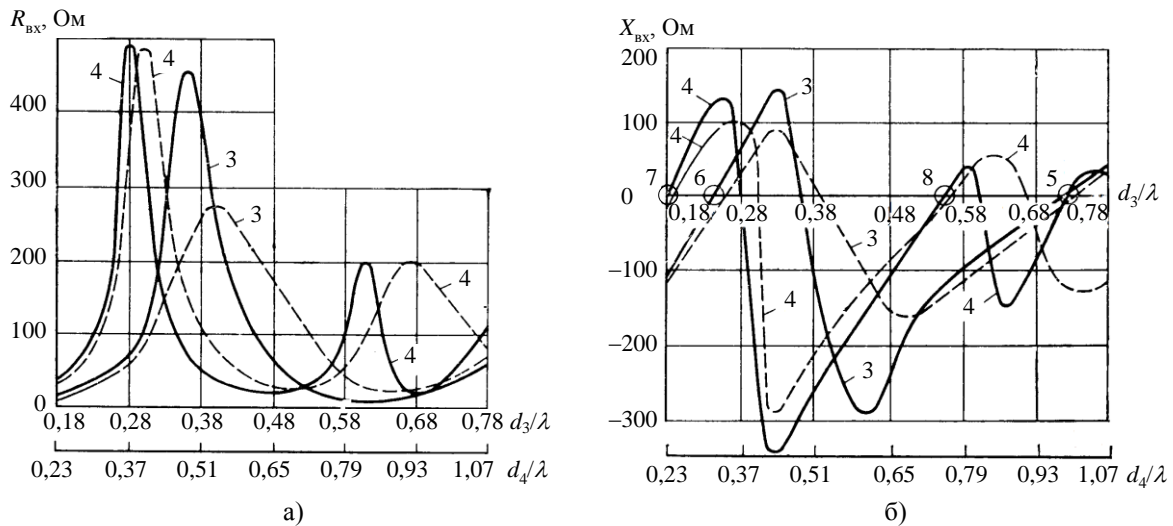


Рис. 3. Активная  $R_{вх}$  (а) и реактивная  $X_{вх}$  (б) составляющие входных сопротивлений двухчастотных антенн с шунтами (рис. 1) для вариантов 3 и 4 (табл. 1)

Таблица 2  
Результаты измерения КСВН исследуемых антенн с коаксиальными шунтами и без них

№ п/п	Частота и констр. антенны	Варианты исследуемых антенн			
		1	2	3	4
1	$f_B$ , с шунтом	1,33	1,33	1,67	1,25
	$f_B$ , без шунта	3,33	7,14	1,52	5,56
2	$f_H$ , с шунтом	1,33	1,11	1,28	1,43
	$f_H$ , без шунта	2,00	1,69	1,76	1,67

Отметим, что для третьего варианта (табл. 2) такой эффект не обнаружен, и даже напротив, КСВН антенны несколько увеличивается со значения 1,52 до 1,67. Позитивное влияние шунта не ощущается, и резонанс в антенне с шунтом наступает приблизительно на той же частоте, что и в антенне без шунта (см. графики на рис. 3).

Нижняя резонансная частота  $f_H$  для всех вариантов антенн определяется суммой длины  $h$  шунта 2 и выступающей части вибратора 4, т. е. общей длиной плеча антенны  $d$ , а также индуктивным сопротивлением, создаваемым в раскрытие  $(a - b)$  шунта (в зависимости от соотношения рабочих частот  $f_B / f_H$ ). На нижней частоте обеспечиваются вполне приемлемые данные по  $K_c = 1,11 \dots 1,43$ .

Следует отметить, что для антенны варианта 4 условие последовательного резонанса выполняется дополнительно и на средней частоте  $f_{cp}$  ( $K_c = 1,18$ , кружок 8) между частотами  $f_B$  и  $f_H$ . Этот третий резонанс можно успешно использовать на указанной средней частоте. Тогда антенна варианта 4 является трехчастотной или трехдиапазонной.

Из вышеизложенных результатов измерений следует, что не при любой длине выступающей части 4 антенны (рис. 1) на ней подавляется ток высокой частоты  $I_B$  в раскрыве шунта ( $a-b$ ) и она не всегда работает в двух- или многочастотном режиме.

Например, для упомянутого выше варианта антенны 3, где  $(d-h) = 0,48\lambda_B$ , ДН, входное сопротивление и КСВН в диапазоне частот мало зависят от наличия в антенне шунтов (рис. 3 и табл. 2). Такое ослабление влияния шунтов является негативным свойством подобных антенн предположительно при  $(d-n) = n(0,48..0,50)\lambda_B$ , где  $n = 2, 4, 6, \dots$ , что соответствует нечетным соотношениям совмещаемых частот ( $f_B/f_H$  равно 3, 5, 7, ...). При этом антенна независимо от наличия шунтов работает подобно обычной вибраторной и не является многочастотной.

С другой стороны, можно предположить, что при  $(d-h) = m0,25\lambda_B$ , а также при  $(d-h) < 0,25\lambda_B$ , где  $m = 1, 3, 5, \dots$  (варианты 1, 2, 4), эффект подавления тока частоты  $f_B$  в «раскрывах» шунтов и, как следствие, на выступающих частях 4 таких вибраторов проявляется наиболее сильно. Эти случаи соответствуют соотношениям совмещаемых частот  $f_B/f_H$ , равным 2, 4, 6, ..., а также при значениях  $f_B/f_H$ , меньших 2. Такие антенны по свойствам являются двух- и многочастотными.

Отмеченные выше негативные свойства антенн варианта 3 (табл. 1 и 2) ограничивают область применения этих антенн в качестве многочастотных, и без усовершенствования структурной схемы их свойства не удастся улучшить. Вопросы улучшения свойств подобных антенн рассмотрены ниже.

**2. Исследование и совершенствование многочастотных и двухчастотных антенн с шунтами.** С учетом публикаций [1–10] и экспериментальных данных, изложенных выше по простейшим многочастотным и двухчастотным антеннам с коаксиальными шунтами, выполним исследование положений и методов совершенствования многочастотных и двухчастотных антенн.

Для исследования и уточнения природы рассмотренных в разд. 1 новых явлений выполним расчеты такого первичного параметра антенн, как распределение амплитуды высокочастотного тока на данных антеннах и других электрических характеристик строгим методом интегральных уравнений (ИУ) [8, 9] на интересующих нас рабочих частотах. При этом воспользуемся известными и доступными программными средами, например, *NEC WIN*, *MMANA*, *FEKO* и др.

Коаксиальные шунты 1–3 антенны (рис. 1), с учетом положений теории эквивалентной длинной линии (ЭДЛ) [9, 11, 12], аналогичны по свойствам линейным двухпроводным шунтам (рис. 4) такой же электрической длины, подключенным к основной части антенны подобно коаксиальным шунтам. Учитывая отмеченное, для упрощения моделирования и расчетов характеристик многочастотных антенн, исследуем с помощью вышеуказанных компьютерных программ аналогичную антенне (рис. 1) антенну с линейными двухпроводными шунтами, представленную на рис. 4.

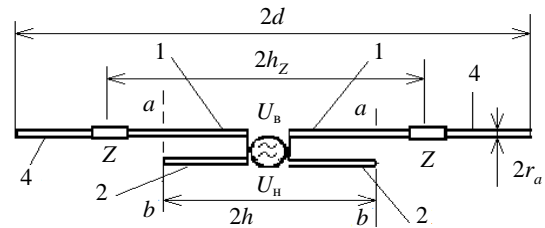


Рис. 4. Двухчастотная (трехчастотная) антенна с линейными двухпроводными шунтами (Z-реактивные нагрузки)

Полученные расчетные значения распределения токов на проводниках 1, 4 общей длиной  $d$  и проводниках 2 длиной  $h$  (рис. 4) при четном соотношении совмещаемых частот  $f_B/f_H = 2/1$  в отсутствие в проводниках 4 нагрузок ( $Z = 0$ ) представлены графически на рис. 5. Из этого рисунка видно, что амплитуда тока частоты  $f_B$  на выступающей части 4 проводника  $(d-h)$  намного меньше амплитуды тока на другой его части ( $h$ ), т. е. наблюдается эффект «отсечки» тока частоты  $f_B$  в сечении  $(a-b)$ . Значение тока на выступающей части  $(d-h)$  по сравнению с его значением на шунте ( $h$ ) ослаблено приблизительно на 40 дБ.

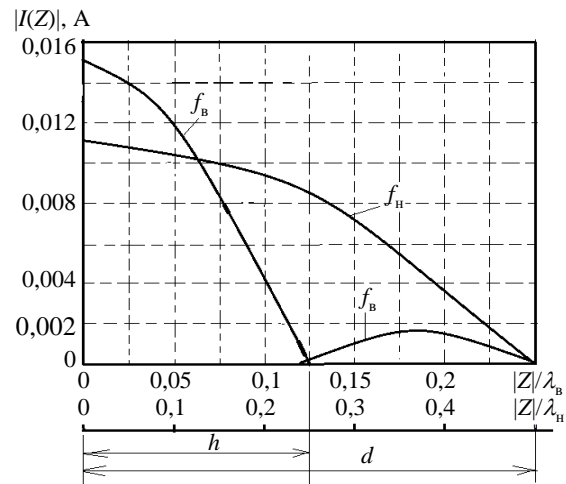


Рис. 5. Распределение амплитуды тока на двухвибраторной антенне с соотношением рабочих частот  $f_B/f_H = 2/1$

Таким образом, ток частоты  $f_B$  благодаря эффекту четвертьволновой линии, закороченной в центре антенны, встречает в сечении  $(a - b)$  двухпроводного шунта большое сопротивление и значительно затухает на выступающей части 4. В этом варианте антенна работоспособна одновременно на частотах  $f_B$  и  $f_H$ , имея обычные двухлепестковые ДН в виде «восьмерки» на обеих частотах, аналогичные полуволновому вибратору.

В другом случае (рис. 6) при нечетном соотношении рабочих частот  $f_B/f_H = 3/1$  вибратор 1 антенны и выступающая часть  $(d - h)$  (рис. 4) интенсивно возбуждаются током частоты  $f_B$ .

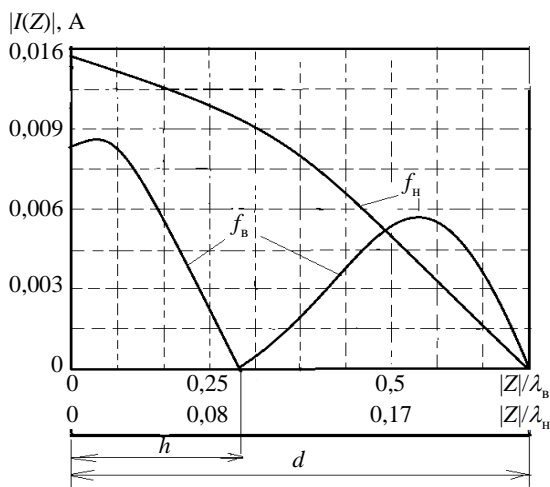


Рис. 6. Распределение амплитуды тока на двухвибраторной антенне с рабочим соотношением частот  $f_B/f_H = 3/1$

Этот эффект является следствием того, что ток частоты  $f_B$  беспрепятственно проходит на длинный вибратор через «раскрыт» четвертьволнового отрезка линии в сечении  $(a - b)$ , возбуждает выступающую часть  $(d - h)$  как на обычной вибраторной антенне без шунта. В таком случае эта антенна приобретает характеристики обычного вибратора на частоте  $f_B$  (по КСВН случай подобен варианту 3 табл. 2).

Обнаруженные и изложенные выше свойства исследуемых многочастотных антенн с шунтами при соотношении частот  $f_B/f_H = 3/1$  представляют значительный интерес. Это можно объяснить отсутствием разности потенциалов на частоте  $f_B$  между проводниками 1 и 2 антенны в сечении  $(a - b)$  «раскрыва» шунта (рис. 4), что препятствует запирающему действию этого раскрыва четвертьволновой линии, закороченной в центре антенны.

Учитывая, что для обеспечения максимальной разности потенциалов в сечении  $(a - b)$  длина выступающей части 4 должна быть равной

нечетному числу четвертой короткой волны  $f_B$ , направление усовершенствования таких антенн должно быть сосредоточено на получении в раскрывах шунтов режима последовательного резонанса выступающих частей  $(d - h)$  вибраторов на частоте  $f_B$ , если условно считать их отдельными штыревыми антеннами. При этом общая длина антенны  $2d$  должна быть такой, чтобы в узле возбуждения в центре антенны был создан режим последовательного резонанса также и на частоте  $f_H$ .

Если реализовать указанные два условия, то можно получить антенну, работающую на произвольно разнесенных двух и более частотах. Такой режим можно обеспечить, изменяя физическую или электрическую длину выступающих частей 4 вибраторов до значений  $(d - h) = m \cdot 0,25 \lambda_B$ , или  $(d - h) < 0,25 \lambda_B$ , где  $m = 1, 3, 5, \dots$ , контролируя и обеспечивая при этом резонансный размер  $d / \lambda_H \approx 0,25$ .

Указанную электрическую длину выступающих частей 4 предлагается получать путем последовательного включения в их разрывы сосредоточенных или распределенных реактивных нагрузок  $Z$  (рис. 4) индуктивного или емкостного типа. При этом переменными регулируемые параметрами должны быть величина реактивной нагрузки  $Z$ , точки ее включения  $\pm h_Z$  и электрическая длина выступающей части  $(d - h)$ . Очевидно, что применение индуктивных нагрузок (ИН) в сравнении с емкостными позволяет несколько уменьшить реальную длину антенны, что является положительным фактором.

Так как у короткого четвертьволнового вибратора  $h$  в точке «b» на частоте  $f_B$  потенциал в любом случае имеет максимальное значение, для получения максимальной разности потенциалов в сечении  $(a - b)$ , включаемые реактансы  $Z$  должны обеспечивать в точке «a» вибратора 1 минимальный или нулевой потенциал.

Выражение для значения индуктивности сопротивления нагрузки  $Z$ , удовлетворяющего этому условию, с учетом теории ЭДЛ и работ [7–12] имеет вид

$$L_{rez1} = \frac{W_1}{4\pi f_B} \times \left\{ \operatorname{ctg} \left[ \eta_{(d-h)} \frac{2\pi}{\lambda_B} (d - h_L) \right] - \operatorname{tg} \left[ \eta_{(d-h)} \frac{2\pi}{\lambda_B} (h_L - h) \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\text{где } W_1 = 120 \left[ 2,3 \operatorname{lg} \frac{d-h}{r_a} - 1 \right] - \quad (2)$$

волновое сопротивление выступающей части 4;

$$\eta_{(d-h)} = 1 + \left[ 4,6 \lg \frac{d-h}{r_a} \right]^{-1} \quad (3)$$

коэффициент укорочения выступающей части.

На частоте  $f_n$  должен быть обеспечен последовательный резонанс на входе всей антенны (рис. 4), при этом реактивная составляющая входного сопротивления на этой частоте должна обращаться в нуль. Выражение для определения значений индуктивности  $L_{rez2}$ , обеспечивающее этот режим, запишем следующим образом:

$$L_{rez2} = \frac{W_2}{4\pi f_n} \left\{ \text{ctg} \left[ \eta_d \frac{2\pi}{\lambda_n} (d - h_L) \right] - \text{tg} \left[ \eta_d \frac{2\pi}{\lambda_n} h_L \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $W_2 = 120 \left[ 2,31 \lg \frac{d}{r_a} - 1 \right] -$  (5)

волновое сопротивление антенны с длиной плеча  $d$ ;

$$\eta_d = 1 + \left[ 4,6 \lg \frac{d}{r_a} \right]^{-1} \quad (6)$$

коэффициент укорочения антенны длиной  $d$ .

Выражения (1) и (4) представляют собой систему двух уравнений, которые при условии равенства обеих индуктивных сопротивлений нагрузки  $Z$  в двухчастотной антенне ( $L = L_{rez1} = L_{rez2}$ ) могут применяться для обеспечения одновременной работы антенны с двухпроводными шунтами (рис. 4) на обеих частотах  $f_b$  и  $f_n$ . Приравняв выражения (1) и (4), получаем трансцендентное уравнение вида

$$\begin{aligned} & \frac{W_1}{4\pi f_1} \left\{ \text{ctg} \left[ \eta_{(d-h)} \frac{2\pi}{\lambda_1} (d - h_L) \right] - \right. \\ & \left. - \text{tg} \left[ \eta_{(d-h)} \frac{2\pi}{\lambda_b} (h_L - h) \right] \right\} = \\ & = \frac{W_2}{4\pi f_n} \left\{ \text{ctg} \left[ \eta_d \frac{2\pi}{\lambda_n} (d - h_L) \right] - \text{tg} \left[ \eta_d \frac{2\pi}{\lambda_n} h_L \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

При заданных рабочих частотах  $f_b$ ,  $f_n$  и размерах антенн из уравнения (7) можно определить оптимальные точки  $h_L$  включения ИН с соответствующим значением индуктивного сопротивления  $Z$ .

**3. Исследование вариантов многочастотных и двухчастотных антенн с шунтами и индуктивными нагрузками  $Z$  для работы при различных соотношениях рабочих частот.** В данном разделе изложены результаты исследования с помощью предложенного выше метода расчета многочастотных или двухчастотных антенн с шунтами и с применением индуктивных нагрузок  $L$  (на рис. 4 обозначены буквой  $Z$ ) с использованием выражений (1, 4, 7) для обеспече-

ния одновременной работы на любых совмещаемых частотах. Рассмотрим результаты расчета и экспериментальной проверки различных вариантов двухчастотных антенн.

*3.1. Двухчастотные антенны для работы на частотах с соотношением  $f_b/f_n = 3/1$ .* Выше отмечалось, что обычные антенны с шунтами (рис. 1, 4) без реактивных нагрузок ( $Z = 0$ ) не обеспечивают совмещение рабочих частот с нечетными соотношениями  $f_b/f_n = 3, 5, 7, \dots$

Исследуем возможность обеспечения двухчастотной работы такой антенны в диапазоне СВЧ при соотношении рабочих частот  $f_b/f_n = 3$ . Пусть в выступающие части 4 антенны (рис. 4) включены нагрузки  $Z$ , имеющие индуктивный характер.

Рассмотрим пример двухчастотной антенны с двухпроводными линейными шунтами (рис. 4) с индуктивными нагрузками  $L$  для работы на частотах с соотношением  $f_b/f_n = 3/1$  и следующими исходными данными:  $f_b = 900$  МГц,  $f_n = 300$  МГц,  $h = 0,25 \lambda_b$ ,  $d = (0,50 \dots 0,66) \lambda_b$ ,  $h_L = (0,48 \dots 0,50) \lambda_b$ , волновое сопротивление питающего тракта  $W = 50$  Ом. Определим зависимость величины включаемой индуктивности  $L$  и координаты ее включения  $h_L$  от параметров антенны, в том числе от величины выступающей части  $(d - h)$ . При этом будем исходить из принципов, изложенных в разд. 2, выполняя расчеты в соответствии с уравнениями (1), (4), (7). При этом для каждого значения длины вибратора  $d$  получаем пару значений  $L_{rez}$  и  $h_L$ . В качестве примера на рис. 7 приведены результаты расчетов  $L_{rez}$ .

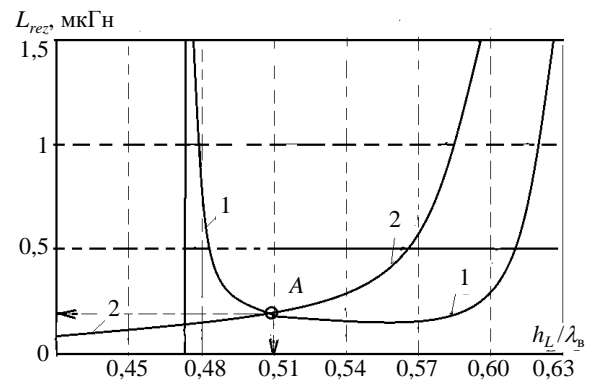


Рис. 7. Расчетные зависимости  $L_{rez}$  нагрузок от точек их включения  $h_L$  для заданного значения  $d = 0,62\lambda_b$

Приведенная на рис. 7 расчетная зависимость 1 вычислена по формуле (1), а кривая 2 — по формуле (4). Пересечению этих кривых в точке  $A$  соответствует искомая пара значений  $h_L = 0,51 \lambda_b$  и  $L_{rez} = 0,173$  мкГн.

Диаграммы направленности подобной антенны с шунтами и без них приведены на рис. 8. При этом для антенны без шунтов и ИН диаграмма направленности многолепестковая и «изрезанная», как у обычного полуволнового вибратора. Однако при наличии шунтов и ИН диаграмма направленности становится неизрезанной, что свидетельствует о позитивном влиянии шунтов и ИН на параметры антенны. На частоте  $f_H$  ее ДН имеет вид «восьмерки» – как у обычного полуволнового вибратора.

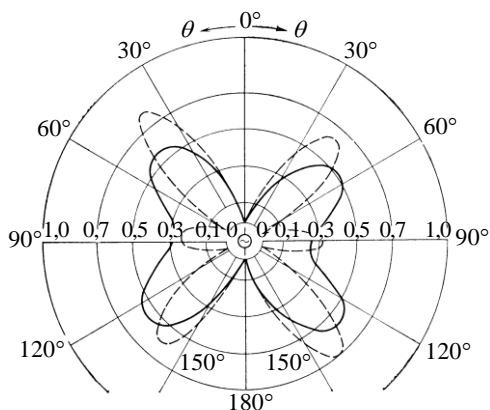


Рис. 8. Экспериментальные диаграммы направленности антенн с шунтами (—) и без них (---) в плоскости  $E$  антенны на частоте  $f_b$  при соотношении рабочих частот  $f_b/f_H = 3/1$

Отметим, что для заданных выше исходных данных каждому значению длины вибратора  $d$  и длины выступающей части ( $d-h$ ) соответствует одна пара значений  $L_{rez}$  и  $h_L$ , если электрическая длина выступающей части не превышает половины длины волны верхней частоты  $f_b$ . Однако при  $(d-h) > 0,5 \lambda_b$  получаем две и более пар решений (см., например, рис. 11).

Зависимость пар значений  $L_{rez}$  и  $h_L$  от длины вибратора  $d$  в указанных выше пределах для случая  $h = \text{const} = 0,25 \lambda_b$  представлена на графиках рис. 9.

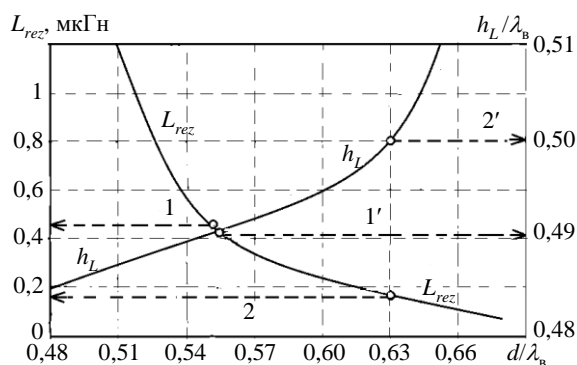


Рис. 9. Расчетные зависимости значений индуктивности  $L_{rez}$  индуктивной нагрузки от точек ее включения  $h_L$  и длины антенны  $d$

На рис. 9 пунктирными линиями со стрелками показаны два варианта полученных пар решений ( $L_{rez}$  и  $h_L$ ). Первый вариант для  $d = 0,56 \lambda_b$ , а второй для  $d = 0,63 \lambda_b$ . Соответственно, для первого варианта (линии 1 и 1') получено  $L_{rez} = 0,43$  мкГн,  $h_L = 0,49 \lambda_b$ , а для второго (линии 2 и 2') –  $L_{rez} = 0,173$  мкГн,  $h_L \approx 0,50 \lambda_b$ .

Для уточнения результатов, полученных выше с учетом метода ЭДЛ, при заданных частотах  $f_b$ ,  $f_H$  и конфигурации антенны решаем задачу более строгим методом ИУ в сочетании с методом математического программирования [9, 13] по критерию заданного КСВН ( $K_c^{Tp}$ ) на этих частотах (при  $h_L = \text{const}$ ) и определяем необходимое значение  $L$  в соответствии с критериями оптимальности:

$$F_1(L) = \min \left\{ \left[ K_{c,1}(L_m) - K_c^{Tp} \right] / K_c^{Tp} \right\}^2, \quad (8)$$

$$m = 1, 2, \dots, M, L_m \in (L_1, L_M);$$

$$F_2(L) = \min \left\{ \left[ K_{c,2}(L_n) - K_c^{Tp} \right] / K_c^{Tp} \right\}^2, \quad (9)$$

$$n = 1, 2, \dots, N, L_n \in (L_1, L_N),$$

где  $F_1(L), F_2(L)$  – парциальные функционалы общей целевой функции  $F(L)$  для частот  $f_b$  и  $f_H$ , соответственно;  $L_m, L_n$  – исходные значения индуктивности в начальном приближении, подлежащие оптимизации. При этом общая целевая функция задачи имеет вид

$$F(L) = \sum_{j=1}^2 p_j F_j(L), \quad (10)$$

где  $p_j$  – весовые коэффициенты, учитывающие степень важности значений  $K_c$  для частот  $f_b$  и  $f_H$ .

Подобным образом оптимизируем координаты  $h_L$  включения ИН при найденном значении индуктивности нагрузки ( $L = \text{const}$ ) по критерию заданного КСВН на этих частотах. Обе процедуры оптимизации повторяем многократно до тех пор, пока разность между полученным и предыдущим значениями  $L$  и  $h_L$  будет равной или меньшей заданного ограничения. Если не удастся решить задачу в соответствии с выражениями (8)–(10), корректируем критерий работоспособности  $K_c^{Tp}$  либо изменяем структурную схему антенны и повторяем процедуры анализа и оптимизации.

Результаты сравнительного анализа  $K_c$  и оптимизации значений ИН и координат их включения методами ЭДЛ и ИУ приведены в табл. 3. Здесь значения  $K_c$  даны для несимметричного

варианта антенны, установленной вертикально на идеально проводящем бесконечном экране.

Таблица 3  
Результаты анализа и оптимизации значений  $K_c$ , ИИ  $L_{rez}$  и координат их включения  $h_L / \lambda_B$

№ варианта	$d / \lambda_B$	Метод ЭДЛ		Метод ИУ и мат. програм.		Частота	$K_c$
		$L_{rez}$ , мкГн	$h_L / \lambda_B$	$L_{rez}$ , мкГн	$h_L / \lambda_B$		
1	0,56	0,43	0,49	0,38	0,51	$f_B$	1,10
						$f_H$	1,60
2	0,63	0,17	0,50	0,19	0,56	$f_B$	1,15
						$f_H$	1,50

Как следует из данной таблицы, определение начального приближения значений  $L_{rez}$  и  $h_L$  методом ЭДЛ по выражению (7) получаем с погрешностью, относительно результатов опти-

мизации и строгого метода ИУ, не превышающей 10...15%. Это позволяет сделать вывод о приемлемой на практике точности начального приближения, получаемого с помощью метода, предложенного в разд. 2. Применение этого метода может зачастую быть достаточным при разработке двухчастотных антенн с шунтами.

Результаты экспериментальной проверки антенны с соотношением частот  $f_B / f_H = 3$  приведены на рис. 10 для частотного диапазона  $f_H \dots f_B$ . Как следует из данного рисунка, последовательные резонансы в антенне возникают в нижнем и верхнем диапазонах на частотах  $f_H$  и  $f_B$  при приемлемых значениях коэффициента стоячей волны (для несимметричного варианта антенны  $W = 50$  Ом). Следовательно, принцип включения реактивных нагрузок  $Z$  (рис. 4) в выступающие части вибратора с шунтами для обеспечения двухчастотной работы антенны с нечетным соотношением частот дает положительный результат не только по ДН, но и по входным параметрам двухчастотных антенн.

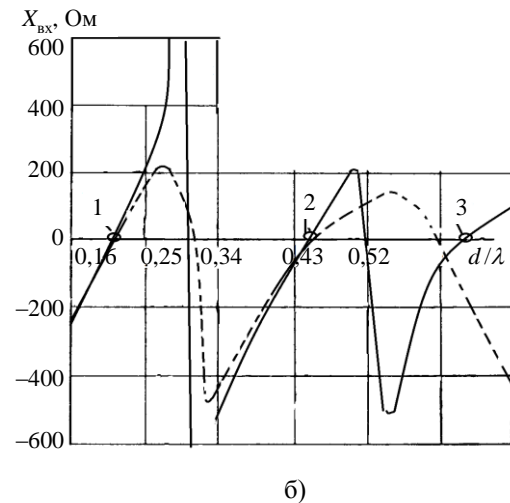
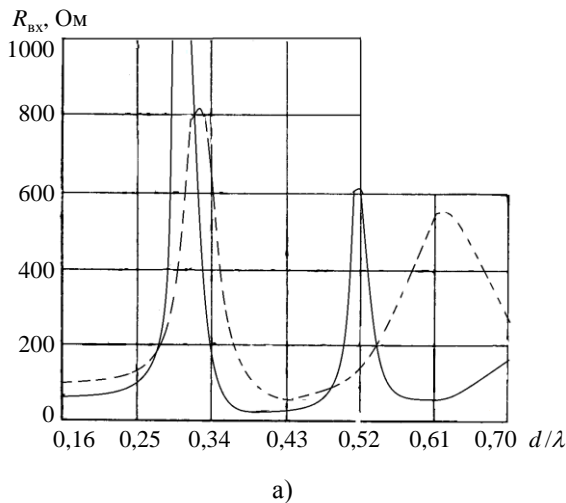


Рис. 10. Экспериментальные частотные зависимости активной  $R_{вх}$  (а) и реактивной  $X_{вх}$  (б) составляющих входных сопротивлений трехчастотной антенны с шунтами (—) и без них (---) с индуктивными нагрузками для соотношения частот  $f_B / f_H = 3$ : 1, 2, 3 – точки последовательного резонанса антенны на частотах  $f_H$ ,  $f_{cp}$ ,  $f_B$  соответственно

Кроме этого, как следует из графиков рис. 10, на частоте  $f_{cp}$  (кружок 2) в рассматриваемой антенне наступает еще один последовательный резонанс – третий на средней частоте. При этом ДН в ряде случаев может удовлетворять требованиям практики. В таких случаях рассмотренная антенна является трехчастотной или трехдиапазонной.

3.2. Двухчастотные укороченные антенны для работы на частотах с соотношением  $f_B / f_H = 4/1$ . Как следует из предыдущего пункта 3.1, затруднительно осуществлять совмещение частот

с соотношением  $f_B / f_H = 3$  без использования реактивных нагрузок  $Z$  в выступающей части 4 антенны (рис. 4).

Поскольку ИИ, кроме своего основного назначения – создания в «раскрытых» шунтов режима последовательного резонанса выступающих частей вибраторов на частоте  $f_B$ , выполняют функцию укорочения антенны, их можно применять при совмещении частот с любым соотношением, в том числе  $f_B / f_H = 2/1, 4/1, 6/1, \dots$ , с целью уменьшения размера двухчастотной антенны с шунтами.



В качестве примера рассмотрим результаты расчетов и экспериментальной проверки антенн с ИН для случая  $f_B/f_H = 4/1$ , близкого к варианту 4 (табл. 1 и 2, рис. 2) без ИН. На рис. 11 даны результаты расчета значений ИН и мест их включения, а на рис. 12 – результаты экспериментальной проверки входных сопротивлений исследуемой антенны. В этом случае кривые 1 и 2 пересекаются два раза при  $h_L/d = 0,30$ ,  $L = 0,17$  мкГн (точка 3) и  $h_L/d \approx 0,66$ ,  $L = 0,4$  мкГн (точка 4). Следовательно, уравнение (7) с использованием двухпроводной модели шунтов (рис. 4) при рассматриваемом соотношении частот имеет два решения.

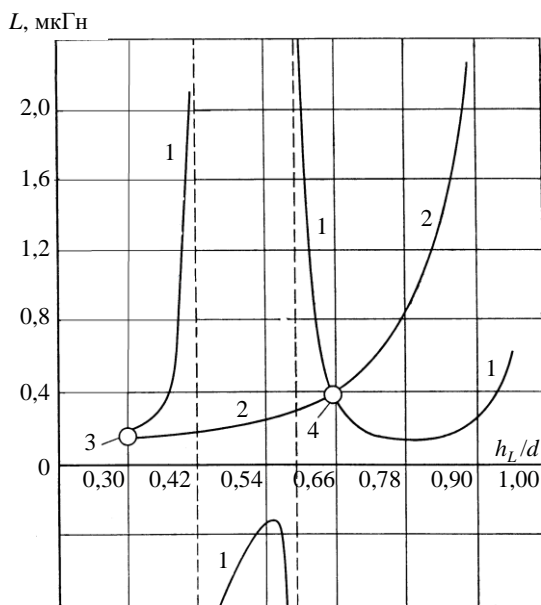
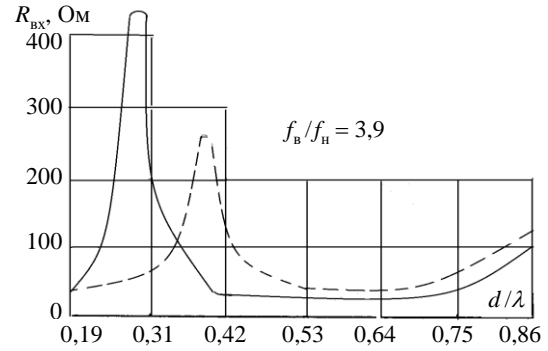


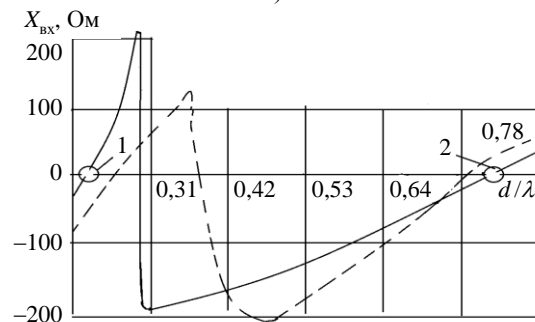
Рис. 11. Расчетные зависимости индуктивностей  $L_1$  (1) и  $L_2$  (2) от координат их включения в антенну ( $h_L/d$ ) по выражениям (1) и (4), соответственно

Результаты экспериментальной проверки входного импеданса варианта антенны при  $h_L/d = 0,30$ ,  $L = 0,17$  мкГн (точка 3 пересечения кривых 1 и 2 на рис. 11) в полосе частот, соответствующей диапазону  $f_H \dots f_B$ , показаны на рис. 12. Из графиков следует, что в нижнем диапазоне последовательный резонанс наступает на частоте  $f_H$  (кружок 1 на рис. 12), а в верхнем – на частоте  $f_B$  кружок 2 (для несимметричного варианта антенны при  $W = 50$  Ом).

Обратим внимание, что в отличие от рассмотренной нами двухчастотной антенны с ИН (рис. 11, 12), антенна с коаксиальными шунтами без ИН является трехчастотной. Результаты экспериментальных исследований трехчастотной антенны без включенных ИН изложены в разд. 1 (рис. 1, вар. 4).



а)



б)

Рис. 12. Экспериментальные зависимости активной  $R_{вх}$  (а) и реактивной  $X_{вх}$  (б) составляющих входных сопротивлений двухчастотной антенны с ИН с шунтами (—) и без них (---), работающей на частотах с соотношением  $f_B/f_H \approx 4$ , от ее электрической длины; 1, 2 – точки последовательного резонанса антенны на частотах  $f_H$  и  $f_B$ , соответственно

3.3. *Дополнительная проверка и настройка электрических параметров двухчастотных (трехчастотных) антенн с индуктивными нагрузками.* При разработке и изготовлении многочастотных антенн с ИН ( $Z$ ) и шунтами (рис. 4) рекомендуется экспериментально уточнять наличие последовательного резонанса на частоте  $f_B$  на выступающих из «раскрытов» шунтов частях 4 антенн, что является условием эффективной работы антенны на верхней частоте. Выполнение данного условия проверяем расчетным путем методом ИУ и экспериментально на так называемой «дополнительной» антенне в симметричном или несимметричном исполнении, плечи которой составлены только из выступающих частей 4 вибраторов вместе с ИН.

Подключая такую антенну к прибору для измерения  $Z_{вх}$  и КСВН и регулируя длину выступающей части 4, значение индуктивности ИН и координаты точек ее включения, добиваемся первого последовательного резонанса дополнительной антенны на частоте  $f_B$  ( $X_{вх} = 0$ ), который возникает при электрической длине плеча этой антенны, равной (или меньшей) нечетному числу четвертей короткой волны. После уточнения параметров и структуры дополнительной антенны

переносим их на структуру общей конструкции многочастотной антенны (рис. 1 или 4), а затем проверяем  $Z_{\text{вх}}$ , КСВН и ДН последней на частотах  $f_{\text{н}}$ ,  $f_{\text{ср}}$  и  $f_{\text{в}}$ .

**Выводы.** С помощью рассмотренных многочастотных антенн с шунтами и реактивными нагрузками удастся совмещать рабочие частоты с любым соотношением при одновременном укорочении антенны.

Как показала экспериментальная проверка, погрешность расчетов многочастотных антенн упрощенным методом электрической длиной линии с помощью предложенного трансцендентного уравнения (7) приемлема для практических расчетов двух- и многочастотных антенн, как с коаксиальными, так и с двухпроводными шунтами.

Изложенный материал может быть полезным при разработке более сложных многочастотных антенн с большим количеством включенных шунтов для большего числа совмещаемых частот (диапазонов).

Рассмотренные в статье двух- и трехчастотные антенны, подобные антенне, представленной на рис. 4, целесообразно использовать при разработке двухчастотных антенных решеток СВЧ-диапазона в микрополосковом исполнении для мобильных объектов. Это позволит экономить массу и поверхность, антенной занимаемую решеткой.

Автор выражает благодарность ведущему инженеру кафедры электронных средств телекоммуникаций ДНУ Е. Р. Безносовой за участие в подготовке статьи.

#### Библиографический список

1. Smit D. L. The Trap-Loaded Cylindrical Antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1975. Vol. 23, N 1. P. 20–27.
2. Coaxial Multiband Antenna: пат. 3139620 США, Cl. 343–730 / K. L. Leidy and H. D. Cribbage. Заявл. 23.12.59; опубл. 30.06.64; 3 с.
3. Multifrequency Antenna System Including an Isolation Section Open Circuited at Both Ends: пат. 3735413 США, МКИ Н01Q 1/00, 9/16 / Oukley Mc Donald Woodward. Заявл. 19.08.71; Опубл. 22.05.73; 5 с.
4. Tai, Chen To. Ann. Arbor. Manypole Broadband Antenna, 1970 Pat. USA No. 3.550.145, Н01Q 21/00, 9/38, 1/50/343/826, 22.12.1970, 3 p. Manypole Broadband Antenna: пат. 3550145 США, МКИ Н01Q 21/00, 9/38, 1/50 343/826 / Tai, Chen To. Ann. Arbor. (США); заявл. 03.08.68; опубл. 22.12.70; 3 с.
5. Гриф А. Я. Антенны спутниковые, ТВ, РВ, СИ-БИ, КВ, УКВ. Москва: Символ-Р, 1998. 320 с.
6. Taylor C. D., Aronson E. A., Harrison C. W. Theory of Coupled Monopoles. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1970. Vol. 18, N 3. P. 360–366.
7. Krjukov A., Ovsyanikov V. The Antennas for Mobile Radio Communication. *Proc. of 31st European Micr. Conf.* (EuMA). (27 Sept. 2001). London, 2001. Vol. 3. P. 469–472.
8. Ovsyanikov V. V. Designing of Multifrequency wire Antennas with Shunts. *Int. Conf. Antenna Theory and Techniques* (17–21 Sept., 2007). Sevastopol, Ukraine. P. 250–252.

9. Овсяников В. В. Состояние разработок вибраторных, диэлектрических и плазменных антенн в контексте исторического развития антенной техники. *Радиофизика и электроника*. 2016. Т. 7(21), № 3. С. 58–73.
10. Овсяников В. В. Электрически малые вибраторные, спиральные и петлевые антенны. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 8(22), № 1. С. 57–67.
11. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л. *Антенно-фидерные устройства*. Москва: Сов. радио, 1961. 816 с.
12. Никольский В. В. Антенны. Москва: Связь, 1966. 368 с.
13. Моисеев Н. Н., Иванюков Ю. П., Столярова Е. М. *Методы оптимизации*. Москва: Наука, 1978. 352 с.

#### REFERENCES

1. Smit D. L., 1975. The Trap-Loaded Cylindrical Antenna // *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **23**(1), pp. 20–27.
2. Leidy, K. L. and Cribbage, H. D., 1964. Coaxial Multiband Antenna. U. S. Pat. 3,139,620.
3. Oukley Mc Donald Woodward, 1973. Multifrequency Antenna System Including an Isolation Section Open Circuit at Both Ends. U. S. Pat. 3,735,413.
4. Chen To Tai, Ann. Arbor, 1970. Manypole Broadband Antenna. U. S. Pat. 3,550,145.
5. Gryph, A. Ya., 1998. *Antennas satellite, TV, RV, SI-BI, HF, VHF*. Moscow: Symbol-R Publ. (in Russian).
6. Taulor, C. D., Aronson, E. A., Harrison, C. W., 1970. Theory of Coupled Monopoles. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **18**(3), pp. 360–366.
7. Krjukov, A., Ovsyanikov, V., 2001. The antennas for Mobile Radio Communications. In: *Proc. of 31st European Micr. Conf.* (EuMA). (27 Sept. 2001). London, 2001. Vol. 3. P. 469–472.
8. Ovsyanikov, V. V., 2007. Designing of Multifrequency wire Antennas with Shunts. In: *Int. Conf. Antenna Theory and Techniques* (17–21 Sept., 2007). Sevastopol, Ukraine. P. 250–252.
9. Ovsyanikov, V. V., 2016. State of development of vibrator, dielectric and plasma antennas in the context of the historical development of antenna technology. *Radiofizika i elektronika*, **7**(21)(3), pp. 58–73 (in Russian).
10. Ovsyanikov, V. V., 2017. Electrically small vibratory, spiral and loop antennas. *Radiofizika i elektronika*, **8**(22)(1), pp. 57–67 (in Russian).
11. Drabkin, A. L., Zuzenko, V. L., 1961. Antenna-feeder devices. Moscow: Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
12. Nikolsky, V. V., 1966. Antennas. Moscow: Svyaz' Publ. (in Russian).
13. Moiseev, N. N., Ivanilov, Yu. P., Stolyarova, E. M., 1978. Optimization methods. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).

Рукопись поступила 17.05.2017.

V. V. Ovsyanikov

#### ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF TWO-FREQUENCY (THREE-FREQUENCY) ANTENNAS WITH REACTIVE LOADS

The results of a theoretical and experimental study of the distribution of the amplitude of a complex current, input resistances, the standing wave voltage coefficient, and the directional patterns of multifrequency and two-frequency linear microwave wire antennas with quarter-wave coaxial, two-wire shunts and with concentrated reactive loads are presented. As a result of the research, it was found that with a constant size of a quarter-wave shunt attached to the antenna and with different sizes of the antenna relative to the shunt, it can acquire or lose the multifrequency property. Namely, with the length of the wire rod protruding beyond the shunt equal to an odd number of quarters of the short wave of the upper frequency range the multifrequency mode is

observed. Otherwise, the multifrequency mode is not respected. The principle of eliminating the drawback noted above and the creation of two-frequency antennas for working with an arbitrary ratio of co-placed frequencies is proposed and tested experimentally. This principle consists in adjusting the electrical length of the wire rod of the antenna that protrudes beyond the shunt by sequentially including a concentrated reactive load in its rupture, the value of which must satisfy two conditions. Namely, the condition for creating the maximum potential difference in the opening of the shunt at the upper operating frequency and the condition for ensuring the mode of successive resonance of the antenna at the lower operating frequency. The results of the research are presented in the form of tables and graphs of current distribution, input resistances, VSWR and directional patterns of similar antennas, as well as the values of inductive loads calculated according to the proposed expression and included in the protruding part of the antenna rod outside the shunt. The proposed method for calculating and optimizing two-frequency antennas for working with an arbitrary ratio of compatible frequencies was experimentally tested. It is noted that the investigated two-frequency antenna with two-wire linear shunts and with included inductive loads, is one of the promising options for the development of small-size dual-frequency antennas and antenna arrays in microstrip performance.

**Key words:** two-frequency antenna with shunts, distribution of the amplitude of the complex current on the antenna, the input impedance of the antenna, standing wave ratio by voltage, inductive load.

В. В. Овсяников

#### АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОЧАСТОТНЫХ (ТРИЧАСТОТНЫХ) АНТЕН З РЕАКТИВНЫМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

Наведено результати теоретичного та експериментального дослідження розподілу амплітуди комплексного струму, вхідних опорів, коефіцієнту стоячої хвилі за напругою

і діаграм спрямованості багаточастотних і двочастотних лінійних дротових антен НВЧ-діапазону з чвертьхвильовими коаксіальними, двопровідними шунтами і з зосередженими реактивними навантаженнями. У результаті досліджень з'ясовано, що при постійному розмірі чвертьхвильового шунта багаточастотних антен, прикріпленого до антени, і при різних розмірах антени щодо шунта, вона може набувати або втрачати властивість багаточастотності: при довжині дротяного стержня, що виступає за межі шунта на непарне число чвертей короткої хвилі верхнього частотного діапазону, режим багаточастотності дотримується. В іншому випадку режим багаточастотності не зберігається. Запропоновано і перевірено експериментально принцип усунення зазначеного вище недоліку і створення двочастотних антен для роботи з довільним співвідношенням частот, що суміщаються. Цей принцип полягає в доопрацюванні електричної довжини зазначеного дротяного стержня антени, який виступає за межі шунта, шляхом послідовного включення в його розрив зосередженого реактивного навантаження, значення якого повинно відповідати двом умовам: створенню максимальної різниці потенціалів у розриві шунта на верхній робочій частоті і забезпеченню режиму послідовного резонансу антени на нижній робочій частоті. Наведено результати дослідження у вигляді таблиць і графіків розподілу струму, вхідних опорів, коефіцієнту стоячої хвилі за напругою і діаграм спрямованості подібних антен, а також значень індуктивних навантажень, розрахованих за пропонуваним методом і які включаються послідовно у виступаючу частину стержня антени за межами шунта. Експериментально перевірено запропонований метод розрахунку та оптимізації двочастотних антен для роботи з довільним співвідношенням частот, які суміщаються. Зазначено, що досліджена двочастотна антена з двопровідними лінійними шунтами і з включеними індуктивними навантаженнями є одним з перспективних варіантів для розробки малогабаритних двочастотних антен і антенних решіток у мікросмужковому виконанні.

**Ключові слова:** двочастотна антена з шунтами, розподіл амплітуди комплексного струму на антені, вхідний опір антени, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою, індуктивне навантаження.