

УДК 621.396.67

## ШИРОКОПОЛОСНАЯ КОМПАКТНАЯ РАМОЧНАЯ АНТЕННА С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

В.В. КЕДА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 26 сентября 2017*

**Аннотация.** Описана новая конструкция широкополосной рамочной антенны, в которой реализована возможность управления поляризацией путем возбуждения антенны по двум развязанным входам. Разработанная антенна имеет малые габариты, низкий уровень излучения с кроссполяризацией, обладает коэффициентом направленного действия (КНД) 7...8 дБ и шириной главного лепестка диаграммы направленности около 70° в *E*-плоскости и 86° в *H*-плоскости. Относительная полоса частот антенны, в которой обеспечивается максимальное значение коэффициента стоячей волны (КСВ)  $КСВ_{MAX} = 1,3...2,0$ , составляет (24...54) %. В работе приведены результаты оптимизации геометрических параметров антенны по максимуму полосы частот для различных значений максимального уровня КСВ в рабочем диапазоне. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке антенн для радиотехнических систем, в которых требуются антенны с управляемой поляризацией.

*Ключевые слова:* рамочная антенна, управление поляризацией.

**Abstract.** The new construction of the broadband loop antenna with possibility of polarization control by excitement of the antenna on two isolated inputs is described. The designed antenna has a small size, low level of radiation with cross-polarization, directive gain 7...8 dB and the half power beamwidth about 70° in the *E*-plane and 86° in the *H*-plane. The bandwidth of the antenna, which provides maximum SWR  $SWR_{MAX} = 1.3...2.0$  is (24...54) %. The results of antenna geometric parameters optimization on the maximum of the frequency band for various values of the maximum SWR level in the working frequency range are presented. The obtained results can be used in designing of antennas for radiosystems with controlled polarization.

*Keywords:* loop antenna, polarization control.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 111, No. 1, pp. 5-11**  
**Broadband compact loop antenna with controllable polarization**  
**V.V. Keda**

### Введение

Использование управляемой поляризации в радиотехнических системах значительно расширяет их возможности и помехозащищенность [1]. Для излучения и приема волн с управляемой поляризацией в диапазоне метровых и дециметровых волн нашли применение антенны в виде перпендикулярно расположенных вибраторов [2] с развязанными входами. Вместе с тем рамочные антенны по сравнению с вибраторными более широкополосны, обладают более высоким КНД и меньшими размерами. Управление поляризацией путем возбуждения антенны по двум развязанным входам возможно в шунтовой рамочной антенне [3–5], однако такая антенна имеет высокое входное сопротивление, в том числе и заметную его реактивную составляющую, что затрудняет ее согласование. В работах [6, 7] описаны рамочные антенны, в которых управление поляризацией осуществляется путем переключения их входов, но не рассмотрена возможность управления их поляризацией путем возбуждения антенны по двум развязанным входам. Кроме того, в указанных антеннах

присутствует заметное излучение с кроссполяризацией, обусловленное несимметричной конструкцией согласующих элементов относительно  $H$ -плоскости. Указанные недостатки были устранены в двухвходовой рамочной антенне, описанной в [8, 9], путем замены несимметричных согласующих элементов симметричными. В работе [9], кроме антенны с симметричными согласующими элементами и развязанными входами, рассмотрена ее модификация с переключаемыми входами. В этой работе показано, что два новых варианта антенны по своим характеристикам ничем не уступают исходному варианту антенны, рассмотренному в [6, 7]. В работе [10] рассмотрена модификация антенны, описанной в [8, 9], в которой, благодаря добавлению дополнительной согласующей рамки, удалось расширить ее рабочий диапазон. В работе [11] проведено уточнение размеров антенны, полученных в работе [10], путем использования трех программ численного моделирования, а также рассмотрена возможность применения разработанной антенны в качестве излучателя линейной синфазной антенной решетки.

Настоящая статья является продолжением работ [6–11]. Целью работы является описание исследований варианта двухвходовой антенны, обладающей минимальными размерами и максимальной полосой рабочих частот.

В процессе исследований проведена оптимизация (по критерию максимума полосы частот, при заданных максимальных значениях КСВ) геометрических параметров излучателя [5, 6], а также применена улучшенная конструкция согласующих элементов, упрощающая изготовление и настройку антенны, а также увеличивающая ее электрическую прочность. Расчет характеристик и оптимизация геометрических параметров антенны по максимуму полосы частот производились в трех программах: CST MICROWAVE STUDIO, MMANA-GAL и в разработанной оригинальной программе. Использование нескольких программ численного моделирования позволяет верифицировать полученные результаты. Во всех трех программах использован метод интегральных уравнений с использованием тонкопроволочной модели тока в проводниках. Разработанная программа построена на основе математической модели, использующей уравнение Поклингтона для тока в тонких проводниках [12]. Интегральное уравнение решается методом Галеркина при использовании в качестве базисных и весовых функций – импульсных функций. Аналогичная математическая модель использована в более ранних исследованиях [6–11], где показала хорошее совпадение расчетных результатов с экспериментальными данными.

В результате исследования разработана и оптимизирована новая конструкция рамочной антенны, обладающая характеристиками, лучшими, чем у ранее описанных рамочных антенн с управляемой поляризацией. Приведенные в работе геометрические параметры и характеристики оптимизированных антенн могут быть использованы при разработке антенных систем с управляемой поляризацией.

### **Конструкция антенны**

Конструктивно антенна состоит из активной излучающей рамки с двумя развязанными входами – рис. 1, 2 ( $in_1$ ,  $in_2$ ) и квадратного рефлектора. Антенна представляет собой модификацию двухвходовой антенны, описанной ранее [8, 9]. Управление поляризацией в антенне осуществляется путем изменения амплитуд и фаз возбуждения по входам  $in_1$  и  $in_2$ , что позволяет получить произвольную линейную либо эллиптическую поляризацию. Главное отличие заключается в конструкции согласующих элементов. В ходе натурных и численных экспериментов с предыдущим вариантом антенны выяснилось, что оптимальное согласование антенны достигается при очень близком расположении друг к другу концов близлежащих согласующих элементов. При этом требуется очень точное соблюдение этого расстояния, что приводит к необходимости экспериментального уточнения геометрических параметров согласующих элементов. Исходя из вышесказанного было сделано предположение о необходимости обеспечивать емкостную связь между концами согласующих элементов. Для обеспечения связи между согласующими элементами были введены дополнительные элементы связи (рис. 1). Необходимая емкость между концами элементов достигается выбором длины согласующих элементов  $L_{sy}$  и длины элементов связи  $L_{sy2}$ . В данной конструкции хорошее согласование обеспечивается при значительно большем расстоянии между концами

согласующих элементов, чем в прежнем варианте, что увеличивает электрическую прочность антенны и снижает ее чувствительность к точности изготовления. Кроме того, в новой антенне сравнительно несложно можно реализовать возможность экспериментальной подстройки согласования антенны путем изменения длины элементов связи  $L_{sy2}$ .

Поскольку целью работы было получить излучатель, обладающий минимальными размерами и максимальной полосой рабочих частот, в конструкции отсутствуют металлические стойки крепления рамки к рефлектору, которые, как показано в [8], ухудшают согласование и уровень бокового излучения антенны. Ранее в [8] было показано, что чем выше входное сопротивление антенны, тем шире ее рабочий диапазон, в связи с чем в настоящей антенне использовано питание через согласующе-симметрирующий трансформатор, позволяющий запитывать антенну, оптимизированную под входное сопротивление 200 Ом, коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом.

### Результаты численного моделирования

Моделирование и оптимизация геометрических параметров антенны по максимуму полосы частот производились в трех программах: CST MICROWAVE STUDIO, MMANA-GAL и в разработанной программе. Характеристики антенны для случаев возбуждения горизонтальной и вертикальной поляризации одинаковы. Различия заключаются в том, что при смене поляризации плоскости  $E$  и  $H$  меняются местами. Поэтому все расчеты произведены для случая возбуждения горизонтальной поляризации ( $XZ$  – горизонтальная плоскость,  $YZ$  – вертикальная).

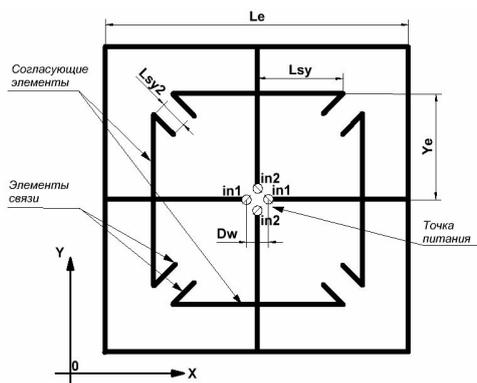


Рис.1. Конструкция излучающей части антенны

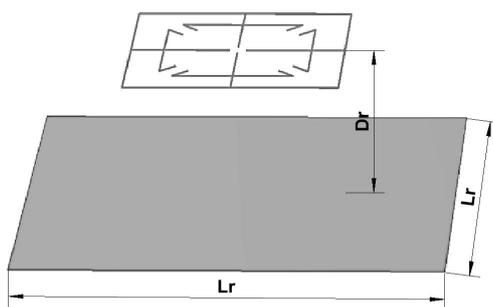


Рис. 2. Общий вид антенны

Оптимизация геометрии проводилась в CST по критерию максимальной относительной полосы частот при заданном максимальном уровне  $KCB_{MAX}$ . В качестве  $KCB_{MAX}$  выбраны три значения 1,3, 1,5, 2,0. Полученные в ходе оптимизации размеры антенн приведены в табл. 1. Диаметр элементов антенны равен 4,6 мм. При моделировании антенны в программах MMANA-GAL и разработанной программе использована модель рефлектора в виде сетки из проводников, в программе CST – экран моделировался бесконечно тонким металлическим листом. В табл. 2–4 приведены параметры оптимизированных антенн, полученные в трех программах. Под усредненными параметрами в последней строке каждой таблицы подразумеваются среднее арифметическое параметров, рассчитанных в трех программах.

Под средними значениями (1-я строка, 5-я колонка) подразумеваются средние арифметические параметров, рассчитанных для трех рабочих частот (одна центральная –  $F2$  и две крайних –  $F1$  и  $F3$ ). Параметр  $\delta F, \%$  – относительная полоса частот, в которой КСВ не превышает значения  $КСВ_{MAX}$ . Параметры  $2\theta_{0,5XZ}$  и  $2\theta_{0,5YZ}$  – ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) в главных плоскостях  $XZ$  и  $YZ$ .

Таблица 1. Размеры антенн, оптимизированных под разное значение  $КСВ_{MAX}$

$КСВ_{MAX}$	$Le, \text{ мм}$	$Lsy, \text{ мм}$	$Lsy2, \text{ мм}$	$Dw, \text{ мм}$	$Ye, \text{ мм}$	$Dr, \text{ мм}$	$Lr, \text{ мм}$
1,3	174	54	18	14	60	125	350
1,5	174	60	18	14	66	125	350
2	193	54	19	15	66	140	388

Таблица 2. Параметры антенны, оптимизированной под  $КСВ_{MAX} = 1,3$

Использованная программа	$F1 = 511 \text{ МГц}$			$F2 = 600 \text{ МГц}$			$F3 = 692 \text{ МГц}$			Средние значения			$\delta F, \%$
	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	
ММАНА-GAL	7,8	70	86	7,7	70	84	7,6	70	86	7,7	70	85,3	23,9
CST	8,0	70	86	8,1	70	83	8,1	69	81	8,1	69,7	83,3	30
Разработанная программа	7,8	72	88	7,8	72	86	7,7	72	86	7,8	72	86,7	25,2
Усредненные параметры	7,9	70,7	86,7	7,9	70,7	84,3	7,8	70,3	84,3	7,9	70,6	85,1	26,4

Таблица 3. Параметры антенны, оптимизированной под  $КСВ_{MAX}=1,5$

Использованная программа	$F1 = 490 \text{ МГц}$			$F2 = 600 \text{ МГц}$			$F3 = 714 \text{ МГц}$			Средние значения			$\delta F, \%$
	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	
ММАНА-GAL	7,8	70	88	7,7	70	84	7,5	70	88	7,7	70	86,7	35,3
CST	8,0	70	86	8,0	70	84	8,0	69	81	8,0	69,7	83,6	37,1
Разработанная программа	7,8	72	88	7,7	72	86	7,5	72	88	7,7	72	87,3	29,9
Усредненные параметры	7,9	70,7	87,3	7,8	70,7	84,7	7,7	70,3	85,7	7,8	70,6	85,9	34,1

Таблица 4. Параметры антенны, оптимизированной под  $КСВ_{MAX} = 2,0$

Использованная программа	$F1 = 434 \text{ МГц}$			$F2 = 600 \text{ МГц}$			$F3 = 772 \text{ МГц}$			Средние значения			$\delta F, \%$
	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	КНД, дБ	$2\theta_{0,5XZ}$ , град	$2\theta_{0,5YZ}$ , град	
ММАНА-GAL	7,8	72	88	7,6	70	84	7,2	68	96	7,5	70	89,3	53,6
CST	8	70	86	8,1	69	82	8,1	67	85	8,1	68,7	84,3	56
Разработанная программа	7,9	72	90	7,7	72	86	7,3	71	92	7,6	71,7	89,3	54,5
Усредненные параметры	7,9	71,3	88	7,8	70,3	84	7,5	68,7	91	7,7	70,1	87,6	54,7

На рис. 3 приведены результаты расчета ДН антенны с  $КСВ_{MAX} = 2,0$  для основной и ортогональной поляризации, полученные для трех рабочих частот. Из результатов следует, что ДН слабо зависит от частоты. Поле с ортогональной поляризацией имеет уровень ниже 50 дБ. Причем точность расчета ДН для кроссполяризации невысокая, что следует из несимметричности ДН для кроссполяризации у симметричной антенны. Аналогичные ДН были получены для вариантов с  $КСВ_{MAX} = 1,3$  и  $КСВ_{MAX} = 1,5$ . На рис. 4, 5 показаны зависимости КСВ и входного сопротивления для варианта с  $КСВ_{MAX} = 2,0$ , полученные в программе CST.

Из результатов моделирования следует, что разработанная антенна имеет очень низкий уровень излучения с кроссполяризацией, который определяется, в основном, точностью изготовления и симметрирования антенны, имеет КНД 7...8 дБ, ширину главного лепестка ДН около  $70^\circ$  в  $E$ -плоскости и  $86^\circ$  в  $H$ -плоскости. Относительная полоса частот антенны, в которой обеспечивается  $КСВ_{MAX} = 1,3...2,0$ , составляет (24...54) %, что более чем на 10 % больше, чем в вариантах [10, 11]. Антенна обладает малыми размерами: размер стороны рамки  $Le = 0,348...0,386\lambda$ , что делает возможным использование антенны в качестве излучателя в решетках с широкоугольным сканированием.

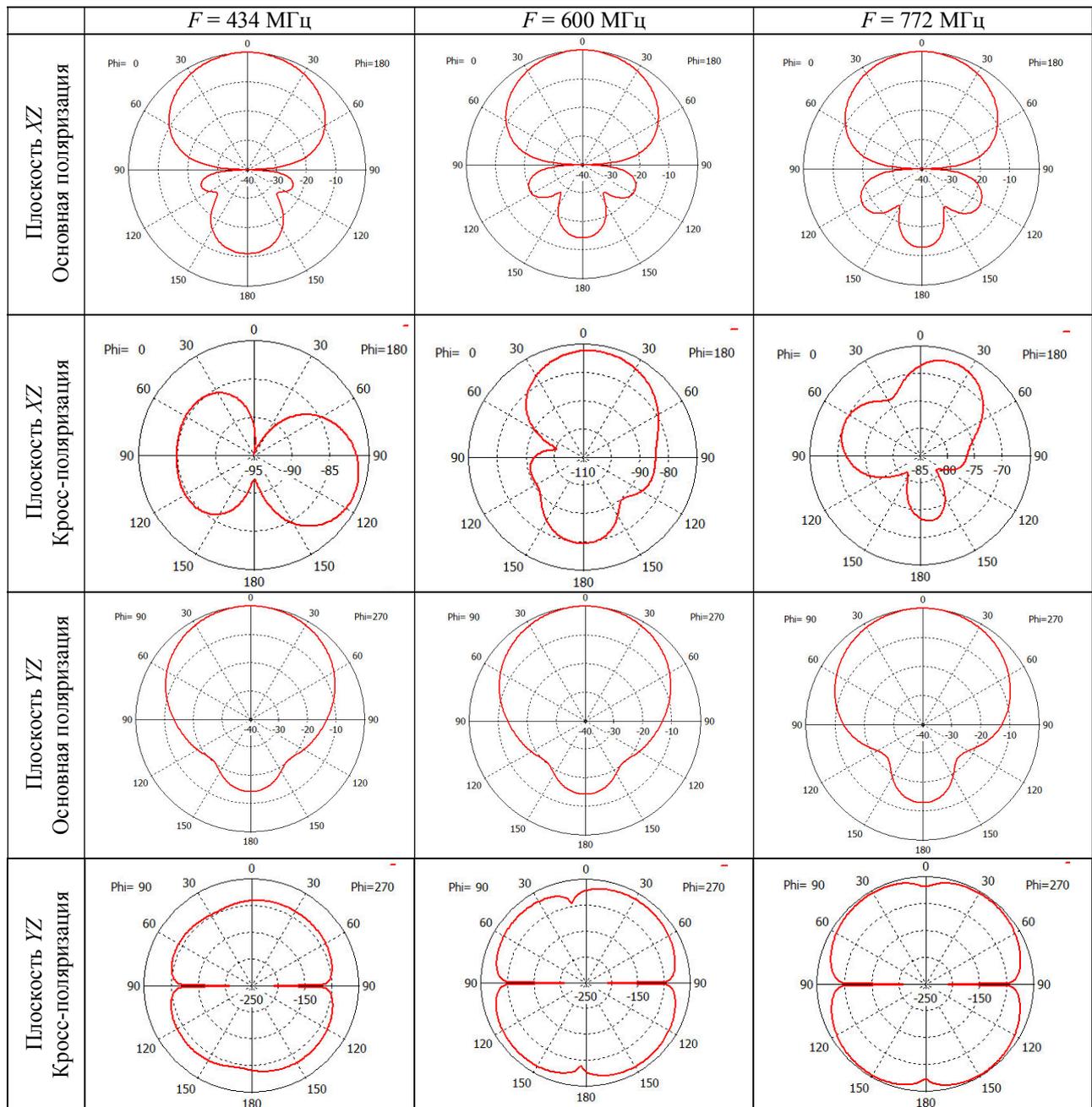


Рис.3. ДН антенны с  $KCB_{\max} = 2,0$  в главных плоскостях на основной и ортогональной поляризации, полученные в программе CST

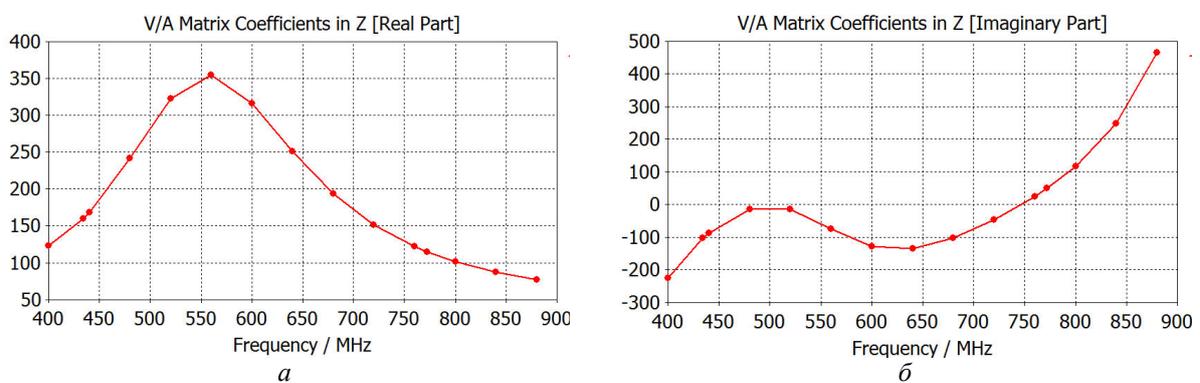


Рис. 4. Зависимости активной (а) и реактивной (б) части входного сопротивления от частоты варианта с  $KCB_{\max} = 2,0$ , полученные в программе CST

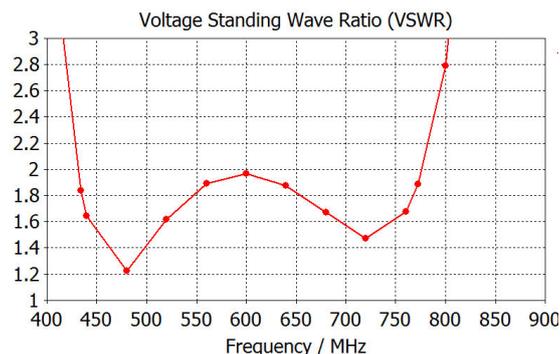


Рис. 5. Зависимость КСВ от частоты варианта с  $K_{CB_{max}}=2,0$ , полученная в программе CST

### Заключение

В ходе работы разработана и численно исследована широкополосная рамочная антенна с управляемой поляризацией. В статье приведены результаты оптимизации геометрических параметров антенны по максимуму полосы частот для различных значений максимального уровня КСВ в рабочем диапазоне. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке антенн для радиотехнических систем с управляемой поляризацией.

### Список литературы

1. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966. 439 с.
2. Mailloux Robert J. Phased Array Antenna Handbook. Artech house, 2005. P. 515.
3. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. М.: Данвел, 2007. 416 с.
4. Григоров И.Н. Практические конструкции антенн. М.: ДМК Пресс, 2005. 352 с.
5. Колчев Г.И. УКВ антенна с управляемой поляризацией поля // Радиоаматор. 2005. № 4 (140). С. 47.
6. Юрцев О.А., Бобков Ю.Ю., Кеда В.В. Новая модификация рамочной антенны // Докл. БГУИР. 2015. № 6. С. 30–35.
7. Кеда В.В., Бобков Ю.Ю., Юрцев О.А. Рамочная антенна с переключаемой поляризацией // Матер. XIII междунар. науч.-техн. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов». Казань, 21–25 сент. 2015 г. Казань, 2015. С. 60.
8. Кеда В.В., Рубаник А.В., Турук Г.П. Рамочная антенна с управляемой поляризацией // Электроника инфо. 2016. № 6 (132). С. 53–58.
9. Кеда В.В., Садовский И.С., Юрцев О.А. Двухвходные рамочные антенны с низким уровнем поля с ортогональной поляризацией // Матер. XXI междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация навигация связь». Воронеж, 19–21 апр. 2016 г. Воронеж, 2016. С. 794–801.
10. Кеда В.В. Новая конструкция рамочной антенны // Матер. IV Всеросс. Микроволновой конф. Москва, 23–25 нояб. 2016 г. М., 2016. С. 54–58.
11. Кеда В.В. Линейная антенная решетка рамочных излучателей с переключаемой поляризацией // Сб. науч. ст. 7-й междунар. научн. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. Ч. 2. Минск, 20–22 мая 2017 г. Минск, 2017. С. 111–120.
12. Вычислительные методы в электродинамике // под ред. Р. Митры. М.: Мир, 1977. 494 с.

### References

1. Kanarejkin D.B., Pavlov N.F., Potehin V.A. Poljarizacija radiolokacionnyh signalov. M.: Sov. radio, 1966. 439 s. (in Russ.)
2. Mailloux Robert J. Phased Array Antenna Handbook. Artech house, 2005. R. 515.
3. Rothammel' K., Krishke A. Antenny. M.: Danvel, 2007. 416 s. (in Russ.)
4. Grigorov I.N. Prakticheskie konstrukcii antenn. M.: DMK Press, 2005. 352 s. (in Russ.)
5. Kolchev G.I. UKV antenna s upravljaemoj poljarizaciej polja // Radioamator. 2005. № 4 (140). S. 47. (in Russ.)
6. Jurcev O.A., Bobkov Ju.Ju., Keda V.V. Novaja modifikacija ramochnoj antennoj // Dokl. BGUIR. 2015. № 6. S. 30–35. (in Russ.)

7. Keda V.V., Bobkov Ju.Ju., Jurcev O.A. Ramochnaja antenna s perekljuchaemoj poljarizaciej // Mater. XIII mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Fizika i tehničeskie prilozhenija volnovyh processov». Kazan', 21–25 sent. 2015 g. Kazan', 2015. S. 60. (in Russ.)
8. Keda V.V., Rubanik A.V., Turuk G.P. Ramochnaja antenna s upravljaemoj poljarizaciej // Jelektronika info. 2016. № 6 (132). S. 53–58. (in Russ.)
9. Keda V.V., Sadovskij I.S., Jurcev O.A. Dvuhvodnye ramochnye anteny s nizkim urovnem polja s ortogonal'noj poljarizaciej // Mater. XXI mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Radiolokacija navigacija svjaz'». Voronezh, 19–21 apr. 2016 g. Voronezh, 2016. S. 794–801. (in Russ.)
10. Keda V.V. Novaja konstrukcija ramochnoj anteny // Mater. IV Vseross. Mikrovolnovoj konf. Moskva, 23–25 nojab. 2016 g. M., 2016. S. 54–58. (in Russ.)
11. Keda V.V. Linejnaja antennaja reshetka ramochnyh izluchatelej s perekljuchaemoj poljarizaciej // Sb. nauch. st. 7-j mezhdunar. nauchn. konf. po voenno-tehničeskim problemam, problemam oborony i bezopasosti, ispol'zovaniju tehnologij dvojnogo primenenija. Ch. 2. Minsk, 20–22 maja 2017 g. Minsk, 2017. S. 111–120. (in Russ.)
12. Vychislitel'nye metody v jelektrodinamike // pod red. R. Mitry. M.: Mir, 1977. 494 s. (in Russ.)

#### **Сведения об авторе**

Кеда В.В., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Information about the author**

Keda V.V., PG student of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел.+375-44-745-38-86;  
e-mail: ew1bbe@mail.ru  
Кеда Владимир Васильевич

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-44-745-38-86;  
e-mail: ew1bbe@mail.ru  
Keda Uladzimir Vasil'evich