

Руслан Кинзябулатов, kinzyabulatov.rr@arguset.com  
 Николай Калужский, engineering@arguset.com  
 ООО «Аргус-ЭТ»

# Разработка широкополосного 8–19-ГГц циркулятора

**В статье рассматривается разработка полоскового циркулятора низкой мощности, полоса рабочих частот которого полностью перекрывает X- (8–12 ГГц) и Ku-диапазоны (12–18 ГГц), а также частично перекрывает K-диапазон (18–26,5 ГГц). Представлена методология проектирования широкополосных циркуляторов, использующая классическую теорию, и параметризованное моделирование электромагнитного поля.**

## Введение

Современные радиотехнические системы, включая радары, спутниковые и телекоммуникационные системы, требуют использования широкополосных невзаимных устройств, таких как циркуляторы, способных эффективно работать в широком диапазоне частот. Особый интерес представляют полосковые циркуляторы, в которых сочетаются компактность, низкие потери и возможность интеграции в микрополосковые схемы. ООО «Аргус-ЭТ» занимается разработкой и производством циркуляторов различных конфигураций, в том числе и не имеющих аналогов на российском рынке. Однако проектирование циркуляторов, перекрывающих одновременно X- (8–12 ГГц), Ku- (12–18 ГГц) и K-диапазоны (18–26,5 ГГц), представляет собой сложную задачу, требующую тщательного выбора материалов, точного электродинамического моделирования и оптимизации конструкции. В статье рассматривается методика проектирования широкополосного полоскового циркулятора с полосой пропускания 8–19 ГГц, основанная на классической

теории и параметризованном моделировании электромагнитного поля. Представлен аналитический подход к расчету геометрических параметров резонатора, характеристик ферритовой структуры и количества ступеней четвертьволновых трансформаторов, определяющих ширину рабочей полосы.

## Методика проектирования

Проектирование осуществляется по методике, включающей четкую последовательность шагов, которые можно адаптировать в зависимости от требуемой центральной частоты и полосы пропускания. Сначала формулируются технические требования к циркулятору: полоса пропускания, мощность и габариты. На основе этих данных выбирают тип циркулятора (дорезонансный или зарезонансный) и количество ступеней четвертьволновых трансформаторов, от которых зависит ширина полосы. Затем аналитически рассчитываются геометрические размеры резонатора, намагнитченность насыщения и толщина феррита — эти характеристики влияют на добротность резонатора. Предложенная методология

может быть адаптирована для проектирования циркуляторов в других частотных диапазонах с учетом требований к мощности, габаритам и широкополосности.

## Конструкция циркулятора

В нашем случае требуется полоса более 80%, поэтому выбрана модель с двумя трансформаторами (рис. 1). Двухтрансформаторный вариант требует гораздо больше вычислений, чем однострансформаторный. Два трансформатора имеют более высокие вносимые потери, чем один, а также значительно увеличивают габариты циркулятора, поэтому следует использовать один, если только полоса пропускания не предполагает использования двух трансформаторов, как, например, в нашем случае.

## Детали конструкции

Как только определены желаемые развязки циркулятора в полосе частот, с помощью уравнений (1)–(9) можно оценить количество ступеней четвертьволновых трансформаторов и их характеристические сопротивления.

В следующих уравнениях  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_0$  — нижний край полосы частот, верхний край полосы частот и центральная частота соответственно, а  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$  минимальный и максимальный КСВН в полосе частот.

$$w = (f_2 - f_1) / f_0, \quad (1)$$

$$K^2 = ((S_{\min} - 1) / (2\sqrt{(S_{\min})}))^2, \quad (2)$$

$$\varepsilon^2 = ((S_{\max} - 1) / (2\sqrt{(S_{\max})}))^2 - K^2, \quad (3)$$

$$\theta_0 = (2 - w)\pi / 4. \quad (4)$$

Переходные характеристические импедансы  $Z_{11}$  и  $Z_{12}$ , а также добротность  $Q_L$ , действительная  $G'$ - и мнимая  $B'$ -части проводимости резонатора вычисляются через компоненты  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $d_0$ , которые являются функциями от  $K^2$ ,  $\varepsilon^2$  и  $\theta_0$  [1].  $Y_0$  — характе-

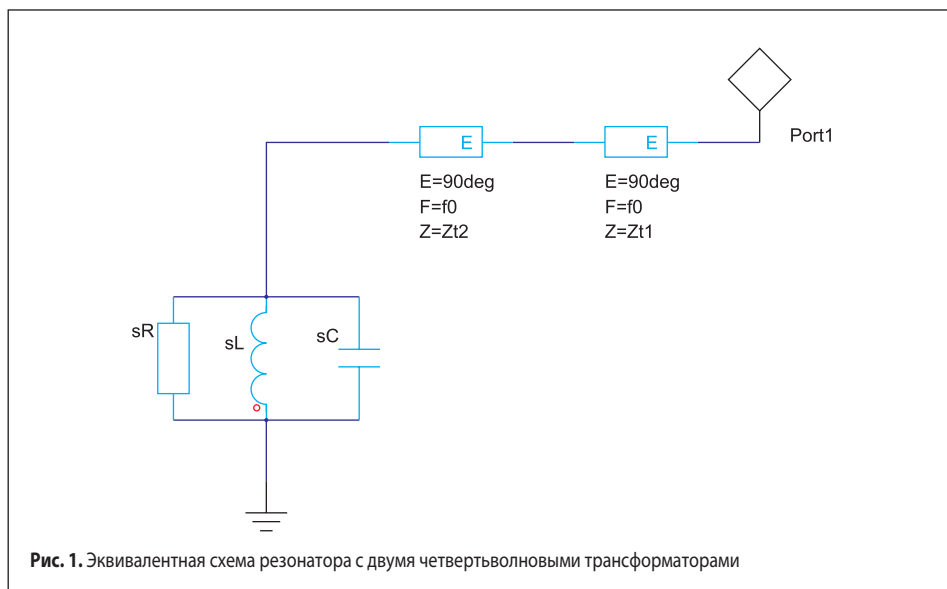
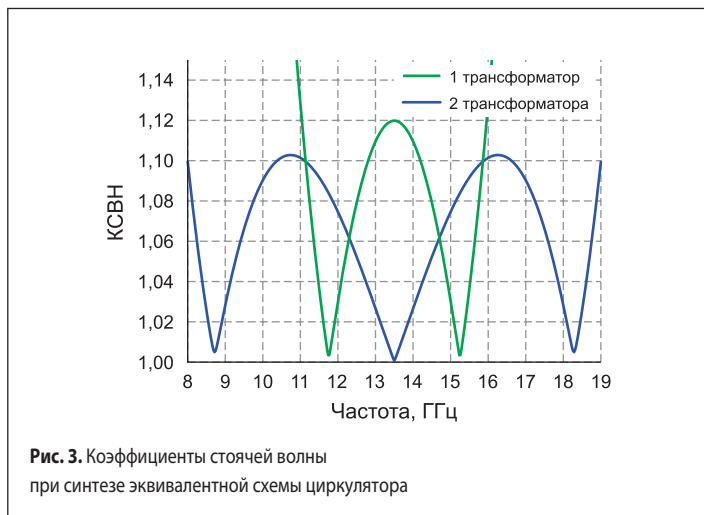
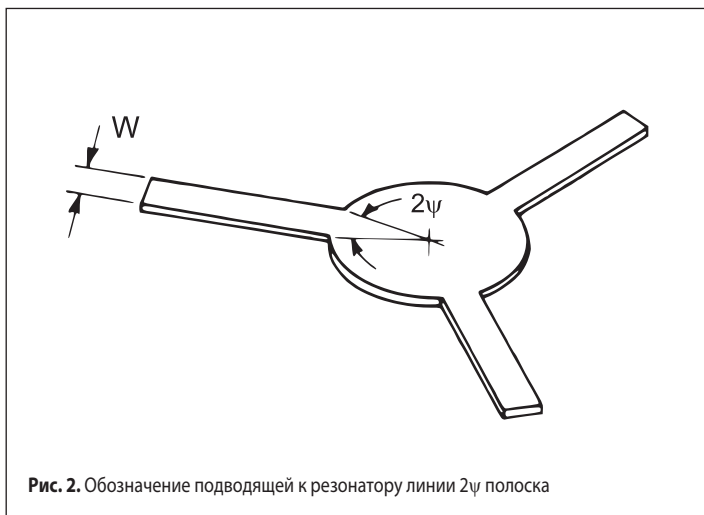


Рис. 1. Эквивалентная схема резонатора с двумя четвертьволновыми трансформаторами



ристический импеданс короткозамкнутого шлейфа эквивалентной схемы резонатора.

$$Z_{t1} = n_2 / (Y_0(n_1 + n_3)), \quad (5)$$

$$Z_{t2} = (n_3/n_1)Z_{t1}, \quad (6)$$

$$G_r = Y_0 n_1^2, \quad (7)$$

$$B' = (Y_0 n_1 d_0 \pi) / 4, \quad (8)$$

$$Q_L = B' / G_r = (d_0 \pi) / (4n_1). \quad (9)$$

Для оценки радиуса резонатора можно использовать приближение Босмы [2], применяя его к центральной частоте:

$$\mu_{eff} = 1 - (\gamma^2 M_0^2) / (\omega_0^2), \quad (10)$$

$$R_{rez} = (1,84\lambda_0) / (2\pi\sqrt{(\mu_{eff})\epsilon_r}). \quad (11)$$

При расчете параметров резонатора используется трехмодовое приближение. Сначала задается ширина подводящей к резонатору линии через угол  $\psi$  (рис. 2), а затем из уравнения получают решения для мод  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ .

Для широкополосных решений угол  $\psi$  часто принимают в пределах 0,5–0,6. В таблице 1 указаны значения, удовлетворяющие соответствию действительной части проводимости резонатора при расчете в трехмодовом приближении и при расчете двух трансформаторов:

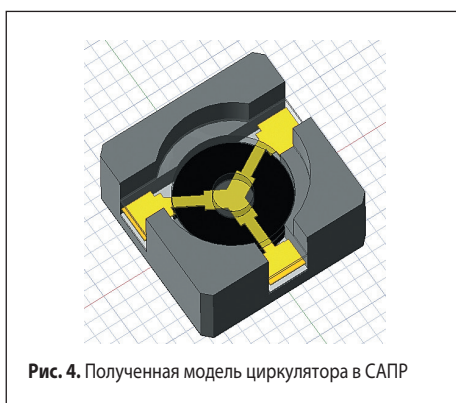
$$\sin\psi = W / (2R_{rez}), \quad (12)$$

$$Z_n = (j3\sqrt{(\mu_{eff})} Z_\psi \sin^2 m\psi) / (n^2 \pi\psi) \times [1 / ((J_{(n-1)}(kR)) / (J_n(kR)) - n((1+|k|) / kR))], \quad (13)$$

где  $Z_\psi = 50 / \sqrt{(\epsilon_r)}$ .

**Таблица 1.** Подобранные параметры для расчета в трехмодовом приближении

Параметр	Значение
$M_0$ , Гс	1900
$\kappa/\mu$	0,39
$\psi$	0,55



Резонатор при расчете представлен RLC-цепью. Параметры параллельной RLC-цепи могут быть рассчитаны с использованием (14)–(16):

$$R = 1 / G_r, \quad (14)$$

$$L = 1 / (2\pi f_0 Q_L G_r), \quad (15)$$

$$C = (Q_L G_r) / (2\pi f_0). \quad (16)$$

Из результатов моделирования эквивалентной схемы циркулятора (рис. 1) с полученных КСВн, приведенных на рис. 3, следует, что необходимо использовать два трансформатора. В таблице 2 показаны численные результаты синтеза цепи.

**Таблица 2.** Численные значения результатов синтеза цепи

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$S_{min}$	1,0	$Z_{\psi}$ , Ом	12,91
$S_{max}$	1,06	$Z_{t1}$ , Ом	41,38
$Y_0$ , см	0,02	$Z_{t2}$ , Ом	26,02
$G_r$	0,044	$R$ , Ом	19,8
$B'$	0,053	$L$ , нГн	0,66
$Q_L$	1,201	$C$ , пФ	0,21

### Электромагнитное моделирование и реализация циркулятора 8–19 ГГц

Существует и другой подход к разработке широкополосных устройств — применение композитных ферритовых структур. Истекший патент US 4,496,915 Mathew and Weisz [3] опи-

сывает данную технологию, в которой используется комбинация нескольких ферритов с различными свойствами. Внутренний диск обеспечивает циркуляцию в верхней части диапазона, внешнее кольцо — в нижней.

Эмпирические формулы для намагниченности насыщения нижней и верхней границ диапазона соответственно:

$$M_{out} = 0,817f_1/\gamma, \quad (17)$$

$$M_{in} = 1,4f_1/\gamma. \quad (18)$$

Диаметры внешнего и внутреннего ферритов:

$$D_{out} = c / (2 \times f_1 \times \sqrt{(\epsilon_{out})}), \quad (19)$$

$$D_{in} = c / (3,44 \times f_1 \times \sqrt{(\epsilon_{in})}). \quad (20)$$

**Таблица 3.** Полученные параметры для расчета композитной структуры феррита

Параметр	Значение
$M_{out}$ , Гс	1843
$M_{in}$ , Гс	3011
$D_{out}$ , мм	6,55
$D_{in}$ , мм	3,89

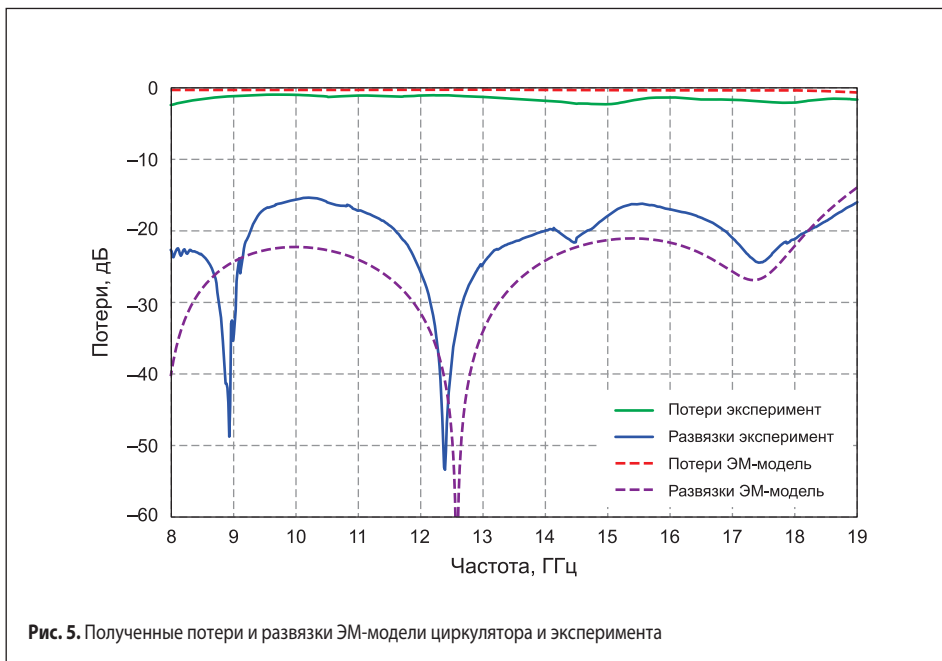
На основе численных значений результатов синтеза цепи (таблица 2) и определения параметров композитной ферритовой структуры (таблица 3) был спроектирован широкополосный циркулятор, с использованием значений волновых сопротивлений  $Z_{t1}$  и  $Z_{t2}$ , были построены четвертьволновые трансформаторы  $t_1$  и  $t_2$  соответственно, с помощью значений  $Q_L$  и  $G_r$  построена модель резонатора.

Результаты моделирования и параметры реализованного устройства отображены на рис. 5.

Из анализа S-параметров можно сделать следующие выводы: потери и развязки измеренного устройства во многом совпадают с моделью, построенной в САПР.

### Заключение

В статье представлена комплексная методика проектирования широкополосного полоскового циркулятора, предназначенного



для работы в частотном диапазоне 8–19 ГГц. Применен комплексный подход, сочетающий аналитический расчет на основе классической теории и современное параметризованное электромагнитное моделирование. Важным аспектом разработки стало использование композитной ферритовой структуры, что обеспечило требуемые характеристики циркуляции в столь широкой полосе. Экспериментальные измерения изготовленного в ООО «Аргус-ЭТ» образца подтвердили адекватность расчетных моделей и корректность примененной методологии.

#### Литература

1. *Helszajn J. Stripline Circulators: Theory and Practice. John Wiley & Sons, 2008.*
2. *Bosma H. On stripline  $y$ -circulation at uhf // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1964. Vol. 12. No. 67.*
3. *Mathew M. G., Weisz T. J. Microwave transmission device materials having having different gyromagnetic saturation magnetizations. 1985.*