

Имитационное трехмерное электромагнитное моделирование плавного фазовращателя

Наталья КИСЕЛЬ
Сергей ГРИЩЕНКО
Дмитрий ДЕРАЧИЦ

Фазовращатели (ФВ) являются элементами многих современных многоканальных приемопередающих трактов коммуникационных систем. Использование в таких системах быстродействующих устройств изменения фазы позволяет управлять положением диаграммы направленности в пространстве и обрабатывать принятый сигнал по заданному алгоритму. Следует отметить, что для обеспечения фазирования необходимо задать не абсолютное значение фазового сдвига в каждом канале, а разность фазовых сдвигов соседних элементов антенны [1].

Введение

Принцип работы ФВ заключается в том, что под воздействием внешних электрических или магнитных полей, а также тока или напряжения происходит изменение параметров элементов, входящих в состав управляющего устройства, а именно комплексного сопротивления полупроводникового элемента. В варакторах и варикапах при изменении управляющего напряжения на обратном смещенном *p-n*-переходе меняется в основном реактивная составляющая комплексного сопротивления, имеющая в области рабочих частот емкостный характер. Изменение емкости происходит плавно, что и обуславливает применение этих управляющих элементов для плавных ФВ. Применение же *pin*-диодов для плавных ФВ ограничено тем, что под воздействием управляющего напряжения скачкообразно меняется активная составляющая сопротивления.

Плавные ФВ можно разделить на ФВ проходного и отражательного типов. Основными элементами отражательных плавных ФВ являются включенные различными способами короткозамкнутые отрезки линий с варакторами. Короткозамкнутые отрезки (отражающие звенья) могут соединяться с общим трактом линии передачи либо непосредственно, либо через четырехполосники. В ФВ проходного типа варакторы подключены непосредственно в тракт линии передачи. Управляющие элементы регулируют фазу сигнала на пути к короткозамыкателю и обратно.

Функциональная характеристика СВЧ-фазовращателя оценивается величиной фазового сдвига и величиной вносимых по-

терь [2]. Качество фазовращателя (*F*) определяется как отношение фазового сдвига $\Delta\varphi$ (°) к вносимым потерям (дБ):

$$F = \Delta\varphi/L.$$

Количественная характеристика ФВ непосредственно связана с фактором коммутационного качества (ФКК) *K* активного элемента, на основе которого реализован ФВ. Максимально достижимое значение качества фазовращателя определяется выражением:

$$F = (6 \dots 9)\sqrt{K}.$$

Упрощенная эквивалентная схема варактора представляет собой последовательно соединенные сопротивление и емкость соответственно для нулевого и ненулевого постоянного напряжения смещения: r_1, C_1 и r_2, C_2 .

При изменении управляющего напряжения сопротивление варактора практически не меняется, и ФКК определяется как

$$K = \frac{\left(\frac{C_{\max}}{C_{\min}} - 1\right)^2}{(\omega C_{\max} R)^2}. \quad (1)$$

Используя соотношения (1), можно выбрать варактор, комбинируя величины C_{\max} , C_{\min} и R , с тем чтобы получить максимальную величину *K*.

Основным достоинством варактора как перестраиваемой емкости является большой параметр управляемости: $C_{\max}/C_{\min} = 10$ и более, что позволяет получить более широкий диапазон перестройки. Кроме того, он имеет высокую добротность, а управляющее напряже-

ние составляет единицы вольт при силе тока в десятки микроампер. Последнее означает, что устройства с варакторным управлением могут перестраиваться с высокой скоростью и малым энергопотреблением.

Одним из перспективных путей сокращения трудоемкости и повышения эффективности проектирования СВЧ-устройств является использование пакетов автоматизированного проектирования [3–5]. Существующие программы позволяют моделировать одно- и многослойные пассивные компоненты, такие как линии передачи, катушки индуктивности, конденсаторы, резисторы, переходные отверстия, воздушные мосты, трансформаторы и т.д. Они дают возможность вычислить электромагнитные поля в любой структуре, а также учесть эффекты излучения, поверхностных волн и взаимодействия с соседними элементами схемы.

В таблице приведен обзор некоторых САПР СВЧ, используемых для анализа СВЧ-устройств в научно-образовательном центре компьютерного моделирования и электронных САПР антенн и устройств СВЧ Южного федерального университета [6–9].

САПР для анализа полосковых СВЧ-устройств

Пакеты САПР СВЧ для электромагнитного моделирования базируются на различных способах решения (таблица): на методе моментов (МоМ) для планарных структур, методе конечных элементов (FEM) и методе конечного интегрирования (FIT) для произвольных структур. С их помощью можно выполнить анализ структур в частотной области. Кроме того, существует несколь-

Таблица. Обзор некоторых САПР СВЧ, используемых для анализа СВЧ-устройств

Компания	Название программного обеспечения	Тип анализируемой структуры	Метод анализа	Анализируемая область
ANSYS	HFSS	3D произвольная	FEM	Частотная
EM Software & Systems-S.A.	FEKO		MoM FEM	
Zeland Software	IE3-D		MoM	
CST	CST Studio		MoM FIT	

ко методов анализа во временной области: метод линий передач (Transmission Line Method, TLM) и метод конечных разностей во временной области (Finite Different Time Domain, FDTD), а для перехода в частотную область используется быстрое преобразование Фурье.

Пакеты машинного проектирования позволяют оценить влияние технологических допусков и разбросов электрических параметров входящих в устройство элементов на его характеристики, а также исследовать чувствительность по отношению к параметрам паразитных элементов.

Проектирование СВЧ-микрополосковых устройств включает этапы систематического проектирования (выбор принципов работы и структурных схем устройств), схемотехнического и/или электродинамического проектирования (выбор и расчет принципиальной схемы устройства, моделирование), конструкторского проектирования (разработка топологии фазовращателя), технологического проектирования (разработка технологического процесса изготовления устройства).

Исходные данные для моделирования — базовая топология ФВ с указанием электрофизических параметров применяемых материалов и параметры эквивалентной схемы варакторов, используемых в качестве переменной емкости. Характеристики устройства, полученные в результате анализа, сравниваются с заданными техническими требованиями. Если полученные результаты не соответствуют заданным требованиям, то параметры устройства могут изменяться либо самим разработчиком по определенному алгоритму, либо оптимизироваться с помощью встроенных программ. Метод оптимизации выбирается из условия достижения минимума целевой функции и в процессе проектирования может меняться, при этом достигнутые значения параметров будут являться исходными при использовании следующего метода оптимизации. При оптимизации устройства в качестве оптимизируемых функций выступают элементы S-матрицы устройства, то есть коэффициент передачи, коэффициент стоячей волны (КСВН) или же другие характеристики. Если модель ФВ была выбрана правильно, то получается достаточно высокое совпадение характеристик рассчитанного и изготовленного устройства.

Конструкция одного звена электрически управляемого плавного СВЧ ФВ приведена на рис. 1. Устройство состоит из диэлектрической подложки, нижняя поверхность которой полностью металлизирована и заземлена; на верхней стороне подложки выполнена полосковая структура, представляющая собой неоднородную микрополосковую линию, в разрывы которой включены варакторы. К участкам микрополосковой линии, примыкающим к местам включения варакторов, подключены микрополосковые шлейфы. Схематически ФВ является шестизвенным ФВ на основе Т-мостов, степень связи между которыми определяется емкостью варакторов и длиной шлейфов. В многозвенной конструкции при изменении емкости варакторов происходит смещение фазы сигнала на входе очередного Т-моста, что приводит к соответствующему сдвигу фазы на выходе, и в рабочей полосе частот Т-мостов устройством может работать как управляемый плавный ФВ.

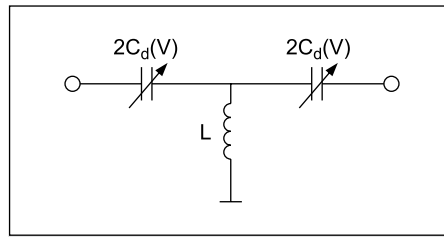


Рис. 1. Одиночный каскад ФВ с варакторами, подключенными в проходном режиме

В конструкцию ФВ не включены вспомогательные элементы, мало влияющие на режим работы устройства на СВЧ: цепи подачи постоянного напряжения смещения на варакторы, разделительные конденсаторы цепей смещения варакторов от внешних линий, а также разделительные входной и выходной конденсаторы, емкости которых определяют из условия оптимального согласования.

ФВ выполняется на основе микрополосковой линии (МПЛ). При моделировании использовались следующие конструктивные параметры устройства:

- подложка длиной 45,8, шириной 22,7 и толщиной 1 мм;
- относительная диэлектрическая проницаемость материала RF4 $\epsilon = 4,6$;
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,001$;
- ширина участков МПЛ: 0,9 мм;
- длина входного и выходного участков: 3,2 мм;
- длина соединительных участков: 4,1 мм;
- длина участков, входящих в состав Т-мостов: 1,5 мм;
- длина шлейфа: 16,8 мм;
- ширина шлейфа: 0,961 мм.

Характеристики рассчитаны для пяти значений управляющего напряжения, реализующего емкости варакторов: 0,5; 1,8; 3; 5,1; 7,5 пФ.

Предварительный инженерный расчет ФВ по Т-схеме дает фазовый сдвиг для одной секции [10, 11]:

$$\sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{4\omega^2 LC_d(V_R)}$$

Рабочая частота фазовращателя должна быть выше частоты Брегга:

$$\omega_B = \frac{1}{2\sqrt{C_d(V_R)L}}$$

Если рабочая частота ФВ соответствует условию $\omega \gg \omega_B$, то фазовый сдвиг становится очень небольшим и может быть найден по приближенной формуле:

$$\beta \approx \frac{1}{\omega\sqrt{C_d(V_R)L}}$$

а входное сопротивление определяется как:

$$Z_o \approx \sqrt{\frac{L}{C_d(V_R)}}$$

Обеспечивая минимум отражения в линии передачи $Z_o = 50$ Ом, емкость варактора должна соответствовать требованию:

$$C_{is} = \frac{\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} C_d(V_R) dV_r}{U_{\max} - U_{\min}}$$

В результате фазовый сдвиг для одной секции:

$$\Delta\beta = \frac{1}{\omega\sqrt{L}} \left(\frac{1}{\sqrt{C_d(V_{\max})}} - \frac{1}{\sqrt{C_d(V_{\min})}} \right),$$

а для нескольких секций соответственно:

$$\Delta\phi = \Delta\beta \times n.$$

Исследуемый модуль ФВ представляет собой включенные последовательно шесть каскадов, построенных по Т-схеме (рис. 2).

Исследование и оптимизация одного каскада (Т-схемы) является базовой задачей моделирования, решение которой позволяет затем перейти к моделированию многозвенного модуля ФВ, состоящего из нескольких каскадов.

Для оптимизации и моделирования устройства использовалась программа электромагнитного моделирования FEKO компании EM Software. В результате оптимизации фазовый сдвиг одного каскада (Т-схемы) составил порядка 60° в полосе 1,4–1,6 ГГц. Изменение фазы имеет линейный характер как в диапазоне частот 1,2–2,5 ГГц, так и при изменении управляющего напряжения на варакторе. Максимальный коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в полосе частот 1,4–1,6 ГГц не превышает 2.

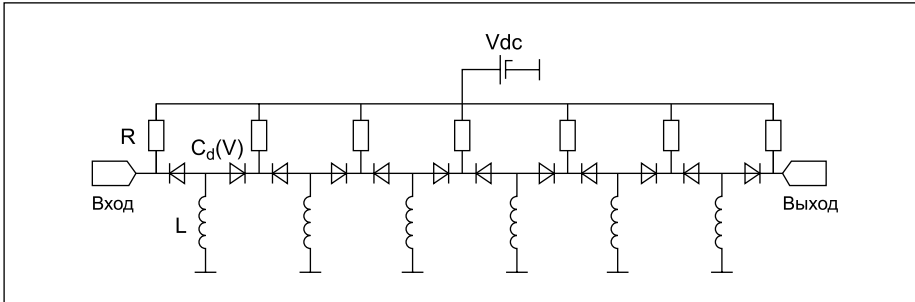


Рис. 2. Шестиэванный модуль ФВ, построенного по Т-схеме

Коэффициент отражения (S_{11}) ФВ по входу не превышает -12 дБ. Увеличение емкости варактора приводит к расширению полосы частот, в пределах которой КСВН не превышает 2. Однако с ростом емкости уменьшается скорость изменения фазы. Максимальные потери (S_{21}) в диапазоне рабочих частот 1,4–1,6 ГГц равны 0,3 дБ и имеют малую неравномерность. С ростом частоты уровень потерь возрастает тем больше, чем меньше емкость варактора, и составляет -1 дБ для 7,5 пФ и -2 дБ для 1,8 пФ. Увеличение количества каскадов приводит к практически пропорциональному увеличению уровня потерь в ФВ. Ухудшение характеристик может быть связано с необходимостью дополнительного согласования между каскадами.

Для обеспечения большего фазового сдвига рассмотрен ФВ в виде каскадного соеди-

нения шести Т-мостов. На вход и выход ФВ добавлены разделительные емкости, осуществляющие развязку по питанию от других устройств СВЧ-тракта. Каждая ячейка имеет пару блокировочных емкостей и индуктивностей для блокировки СВЧ-сигнала на устройстве управления. Питание каскадов осуществляется параллельно; в цепи питания последовательно включены токоограничивающие сопротивления для защиты варакторов.

На рис. 3 приведена топология исследуемого ФВ.

Как видно на рис. 4а, происходит сдвиг фаз колебаний при изменении значения емкостей. Разность фаз при значениях емкостей 1,8 и 7,5 пФ уже составляет больше 360° . Изменение фазы носит практически линейный характер как в диапазоне напря-

жений, так и в частотном диапазоне. КСВН ФВ в полосе частот 1,4–1,6 ГГц не превышает 3 (рис. 4б) при емкости варактора до 5,1 пФ. Коэффициент отражения (S_{11}) ФВ по входу (рис. 5а) имеет максимальное значение -6 дБ. Максимальные потери составили 3 дБ (рис. 5б). Можно заметить, что при небольших значениях емкостей наблюдается нелинейность в фазовой характеристике обратных потерь и КСВН, а с увеличением емкости варактора более 7,5 пФ происходит замедление изменения фазы ФВ и рост коэффициента отражения в диапазоне 1,4–1,6 ГГц.

Таким образом, наиболее интересным диапазоном изменения емкостей является 1,8–7,5 пФ. Перекрытие по емкости составляет 4. Изменение фазы ФВ — более 360° .

На рис. 6 приведены результаты численного моделирования характеристик ФВ и экспериментально полученные данные для вносимых и обратных потерь. Экспериментальные характеристики хорошо согласованы с результатами численного исследования. Отличия объясняются неточностями между реальной топологией и расчетными параметрами, несоответствием сопротивлений и емкостей варакторов, а также возможным разбросом электрофизических параметров подложки.

Заключение

Таким образом, показана возможность моделирования СВЧ-модуля плавного ФВ

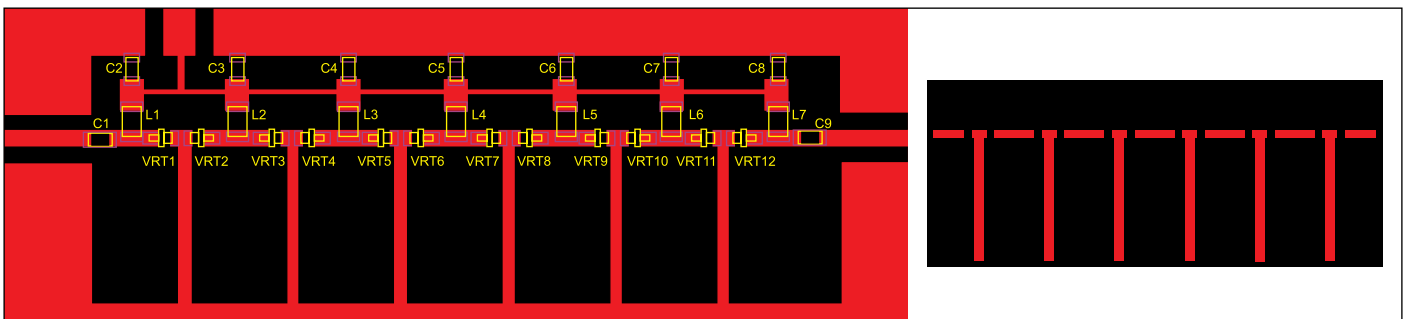


Рис. 3. Топология ФВ с цепями управления и без них

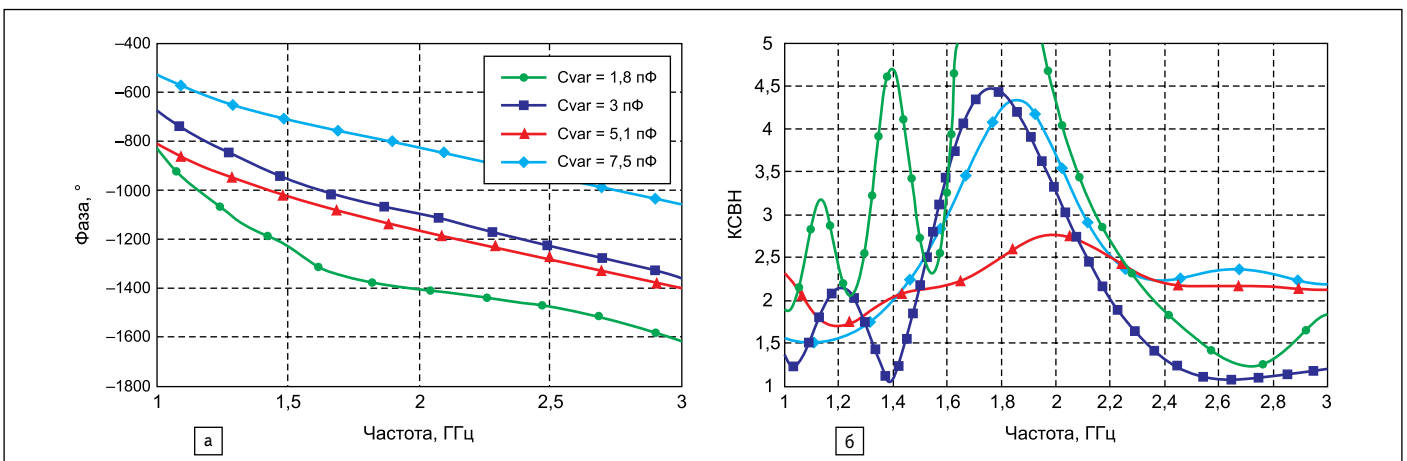


Рис. 4. Зависимость от емкости варактора: а) фазового сдвига; б) КСВН

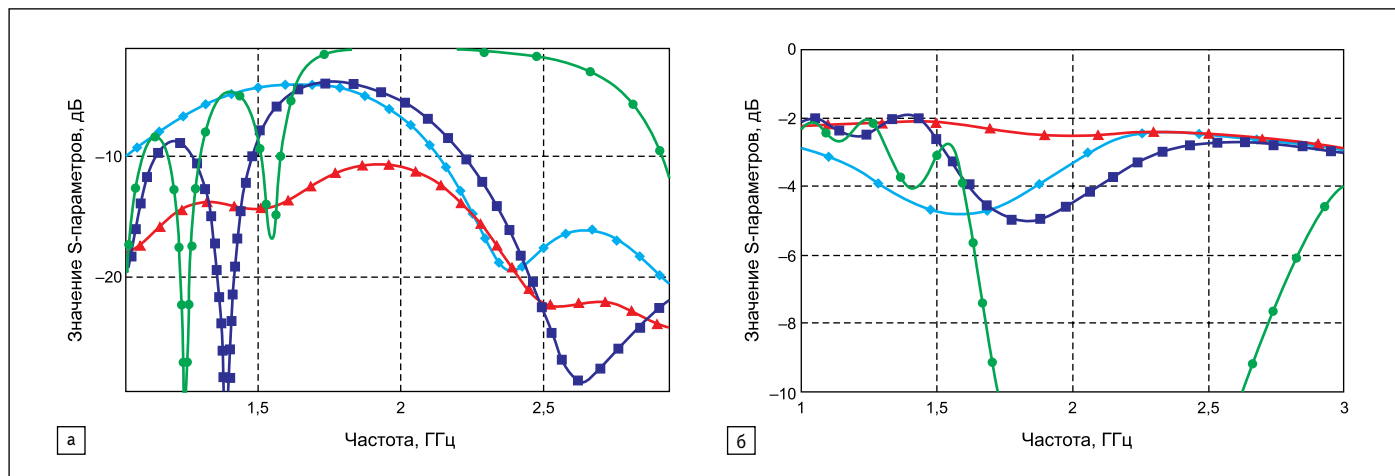


Рис. 5. Частотная зависимость от емкости варактора: а) обратных потерь (S_{11}) ФВ; б) вносимых потерь (S_{21}) ФВ

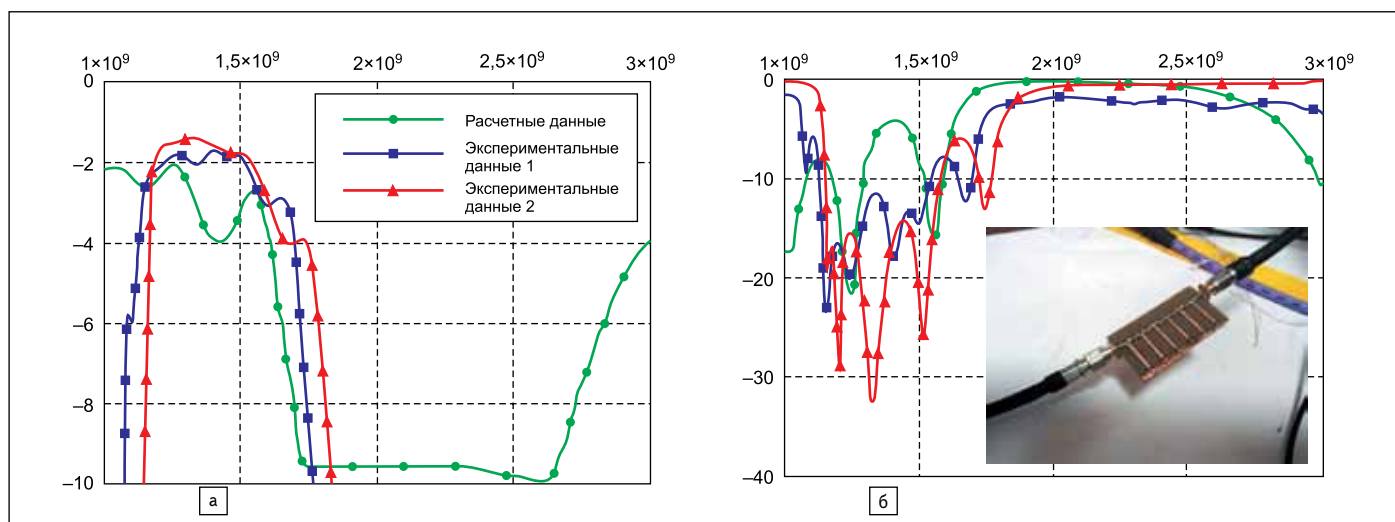


Рис. 6. Сравнение результатов численного и экспериментального моделирования при емкости варактора 3 пФ: а) вносимых потерь; б) обратных потерь

при каскадном соединении четырехполюсников. Представлены результаты численного моделирования плавных многокаскадных ФВ на основе элементов с управляемой емкостью. Приведенные экспериментальные частотные характеристики ФВ, изготовленного по результатам численного моделирования, полностью согласуются с расчетными данными.

Литература

1. Хижа Г. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984.
2. Vendik L. B., Vendik O. G., Kollberg E. L. Commutation quality factor of two-state switching devices // IEEE Trans, on Microwave Theory and Tech. 2000. Vol. 48. No 5.

3. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987.
4. Никольский В. В., Орлов В. П., Феоктистов В. Г. и др. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ. М.: Радио и связь, 1982.
5. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990.
6. <http://www.appwave.com/products/si>
7. www.ansys.com
8. www.cst.com
9. Кисель Н. Н. Моделирование прикладных задач электродинамики и антенн на супервычислительной системе в пакете FEKO: Уч. пос. Таганрог: изд-во ЮФУ, 2013.
10. Кисель Н. Н., Грищенко С. Г., Богаченко Д. А. Моделирование электрически управляемого фазовращателя со структурой полосно-заграждающего фильтра // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 5.
11. Kim H., Kozyrev A. B., Karbassi A. Van Der Weide Linear tunable shifter using a left-handed transmission line // IEEE Microwave and Wireless components letters. 2005. Vol. 15. No 5.