

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ – МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ САПР

Н.Кисель, к.т.н. nnkisel@sfedu.ru  
С.Грищенко, к.т.н. grishchenko@sfedu.ru  
Д.Дерачиц derachitc@mail.ru

Фазовращатели (ФВ) являются элементами многих современных многоканальных приемо-передающих трактов коммуникационных систем. Использование в таких системах быстродействующих устройств изменения фазы дает возможность управлять положением диаграммы направленности в пространстве и обрабатывать принятый сигнал по заданному алгоритму [1]. Значительно повысить эффективность разработки ФВ позволяют системы автоматизированного проектирования (САПР), о результатах применения которых рассказывается в статье.

Принцип работы ФВ заключается в том, что под воздействием внешних электрических или магнитных полей, а также тока или напряжения, изменяется комплексное сопротивление элементов, входящих в состав управляющего устройства. В варакторах и варикапах при изменении управляющего напряжения на обратном смещенном р-п-переходе меняется реактивная составляющая комплексного сопротивления, имеющая емкостной характер. Изменение емкости происходит медленно, что и обуславливает применение этих управляющих элементов для ФВ с плавной регулировкой фазы. Использование рпн-диодов для таких ФВ ограничено тем, что под воздействием управляющего напряжения скачкообразно меняется активная составляющая сопротивления.

ФВ с плавной регулировкой фазы можно разделить на устройства двух типов: проходные и отражательные. Основными элементами отражательных ФВ являются включенные различными способами короткозамкнутые отрезки (отражающие звенья) линий с варакторами. Они могут соединяться с общим трактом линии передачи либо непосредственно, либо через четырехполюсники. В ФВ проходного типа варакторы подключены непосредственно к тракту линии передачи. Управляющие элементы регулируют фазу сигнала на пути к короткозамыкателю и обратно.

Качество фазовращателя  $F$  определяется как отношение фазового сдвига  $\Delta\varphi$  (градусы) к вносимым потерям  $L$  (дБ) [2]:

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

Максимально достижимое значение  $F$  определяется выражением:

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

где  $K$  – фактор коммутационного качества (ФКК) активного элемента.

Упрощенная эквивалентная схема варактора представляет собой последовательно соединенные сопротивление и емкость соответственно для нулевого и ненулевого постоянного напряжения смещения:  $R_1, C(U=0)$  и  $R_2, C(U)$ . При изменении управляющего напряжения от 0 В до  $U_{\max}$  сопротивление варактора практически не меняется ( $R_1=R_2=R$ ) и ФКК определяется как:

$$K = \frac{\left(\frac{C(U_{\max})}{C(0)} - 1\right)^2}{(\omega C(U_{\max})R)^2},$$

где  $\omega$  – рабочая частота фазовращателя. Используя это соотношение, можно выбирать варактор,

САПР для анализа полосковых СВЧ-устройств

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

комбинируя величины его емкости, с тем, чтобы получить максимальную величину  $K$ .

Основным достоинством варактора как перестраиваемой емкости является параметр управляемости

$$\frac{C(U_{\max})}{C(0)} = 10 \text{ и более, что обеспечивает широкий диа-}$$

пазон перестройки. Кроме того, варакторы отличаются высокой добротностью, а управляющие напряжения составляют единицы вольт при силе тока в десятки микроампер. Последнее означает, что устройства с варакторным управлением могут перестраиваться с высокой скоростью и малым энергопотреблением.

Один из перспективных путей снижения трудоемкости и повышения эффективности проектирования СВЧ-устройств – 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 др. Они дают возможность вычислить электромагнитные поля в любой структуре, а также оценить влияние технологических допусков и разброса электрических параметров, входящих в устройство элементов на его характеристики.

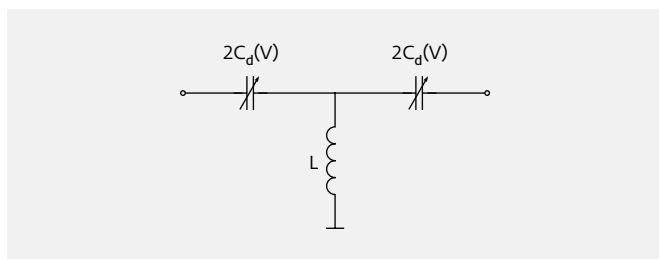


Рис.1. Одиночный каскад ФВ с варакторами, подключенными в проходном режиме

Пакеты САПР СВЧ для электромагнитного моделирования (см. таблицу) [6–9] базируются на различных методах: методе моментов (Method of Moments, MoM) для планарных структур, методе конечных элементов (Finite Element Method, FEM) и методе конечного интегрирования (Finite Integration Technique, FIT) для произвольных структур. На основе этих методов выполняется анализ в частотной области. Кроме того, существует несколько методов анализа во временной области: метод линий передачи (Transmission Line Method, TLM) и метод конечных разностей (Finite Difference Time Domain, FDTD), а для перехода в частотную область используется быстрое преобразование Фурье.

Проектирование СВЧ микрополосковых устройств включает этапы системотехнического 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 архитектура ФВ с указанием электрофизических параметров применяемых материалов

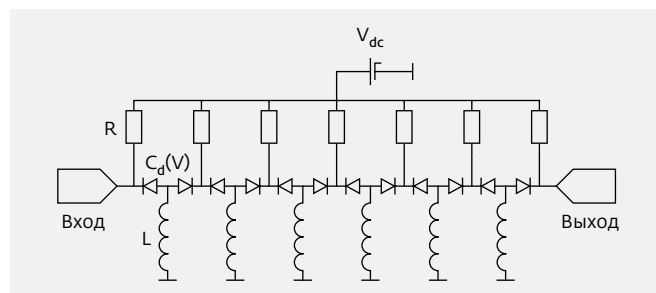
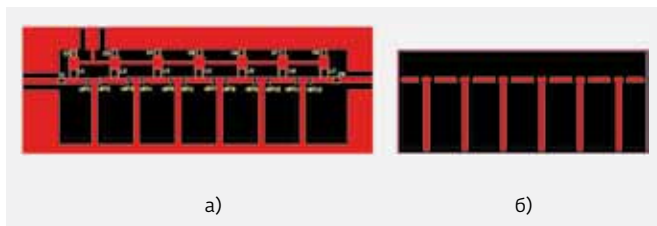


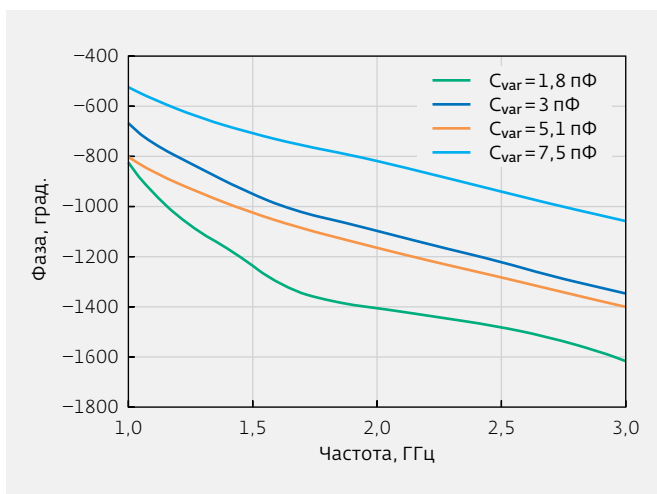
Рис.2. Шестизвенный ФВ, построенный по Т-схеме



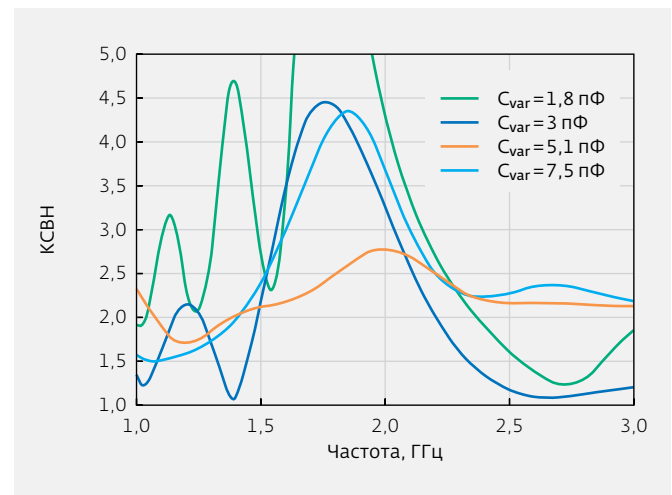
**Рис.3.** Топология ФВ с цепями управления (а) и без них (б)

и параметры эквивалентной схемы варакторов, используемых в качестве переменных емкостей. Характеристики устройства, полученные в результате анализа, сравниваются с заданными техническими требованиями. Если полученные результаты не соответствуют требованиям, то параметры устройства могут быть изменены разработчиком по определенному алгоритму, либо оптимизированы с помощью встроенных программ. Метод оптимизации выбирается из условия достижения минимума целевой функции и в процессе проектирования может меняться, при этом достигнутые значения параметров считаются исходными при использовании следующего метода оптимизации. В качестве оптимизируемых функций выступают элементы  $S$ -матрицы устройства, то есть коэффициент передачи, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) или другие характеристики. Если модель ФВ была выбрана правильно, обеспечивается достаточно высокое совпадение характеристик рассчитанного и изготовленного устройства.

Рассмотрим примеры моделирования ФВ. Базовыми задачами моделирования являются



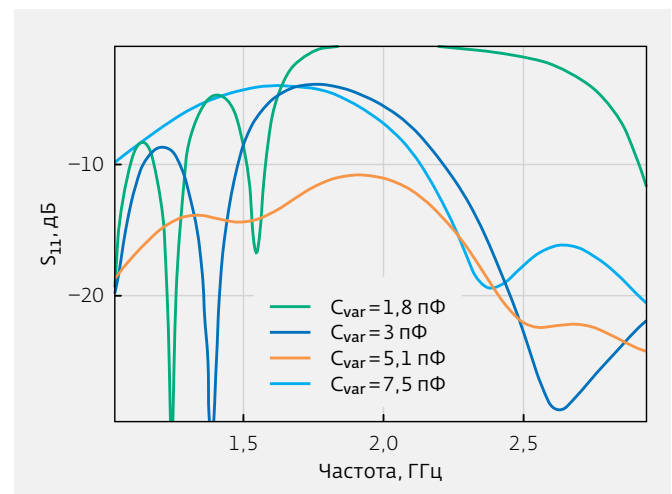
**Рис.4.** Частотные зависимости фазового сдвига для различных емкостей варактора



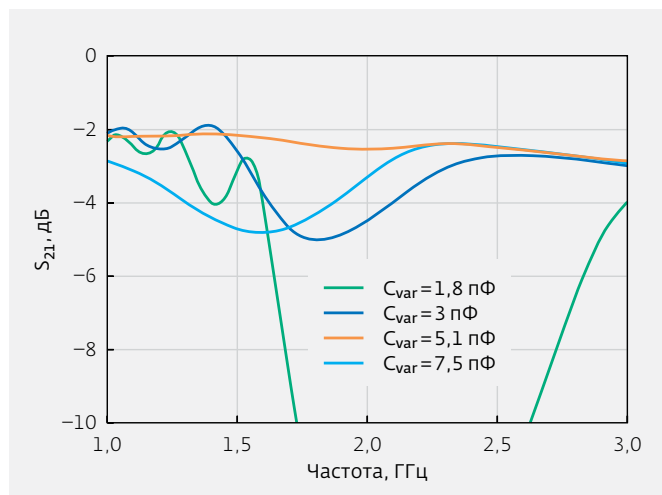
**Рис.5.** Частотные зависимости КСВН

исследование и оптимизация одного каскада (Т-схемы) (рис.1). Затем можно перейти к моделированию многозвенного модуля ФВ, состоящего из нескольких каскадов. В данной работе рассматривался шестизвенный ФВ на основе Т-мостов (рис.2, 3).

Звено электрически управляемого СВЧ ФВ состоит из диэлектрической подложки, нижняя поверхность которой полностью металлизирована и заземлена; на верхней стороне подложки выполнена полосковая структура, представляющая собой неоднородную микрополосковую линию (МПЛ), в разрывы которой включены варакторы. К участкам этой линии, прилегающим к местам включения варакторов, подключены микрополосковые шлейфы. В многозвенной конструкции при изменении емкости варакторов смещается фаза сигнала на входе очередного



**Рис.6.** Частотные зависимости обратных потерь ( $S_{11}$ ) ФВ



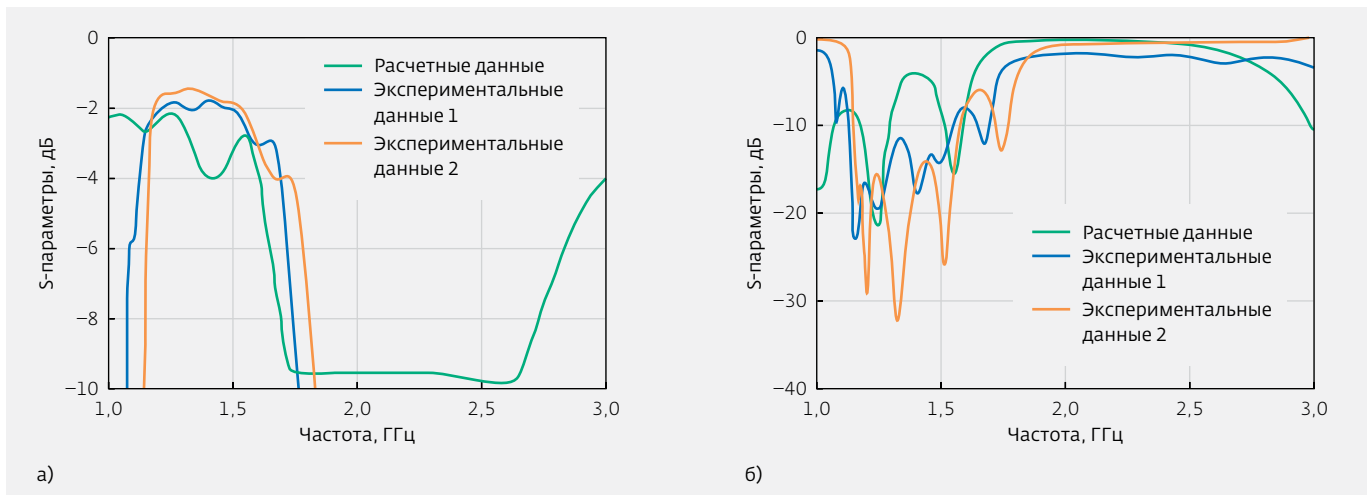
**Рис.7.** Частотные зависимости вносимых потерь ( $S_{21}$ ) ФВ

Т-моста, что приводит к соответствующему сдвигу фазы на выходе. И устройство в рабочей полосе частот Т-мостов может функционировать как управляемый ФВ с плавной регулировкой фазы.

При моделировании учитывались следующие конструктивные параметры устройства: подложка длиной 45,8 мм, шириной 22,7 мм 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  $C_{var}$  равные 0,5; 1,8; 3; 5,1 и 7,5 пФ.

Для численного моделирования устройства использовалась программа электромагнитного моделирования FEKO компании EM Software. В результате оптимизации фазовый сдвиг одного каскада (Т-схемы) составляет примерно  $60^\circ$  в полосе 1,4–1,6 ГГц. Изменение фазы имеет линейный характер, как в зависимости от частоты (в диапазоне 1,2–2,5 ГГц), так и при варьировании управляющего напряжения на варакторе. Максимальный КСВН в полосе частот 1,4–1,6 ГГц не превышает 2. Коэффициент отражения ФВ на входе ( $S_{11}$ ) не превышает -12 дБ. Увеличение емкости варактора приводит к расширению полосы частот, в пределах которой КСВН не превышает 2. Однако по мере увеличения емкости уменьшается скорость изменения фазы. Максимальные потери ( $S_{21}$ ) в диапазоне рабочих частот 1,4–1,6 ГГц, составившие 0,3 дБ, отличаются



**Рис.8.** Сравнение результатов численного моделирования и экспериментального исследования вносимых (а) и обратных (б) потерь при емкости варактора 3 пФ

малой неравномерностью. С увеличением 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.

Для обеспечения большего фазового сдвига использовался ФВ в виде каскадного соединения шести Т-мостов (см. рис.3). На вход и выход ФВ добавлены разделительные емкости, реализующие развязку по питанию от других устройств СВЧ-тракта. Каждая ячейка имеет пару емкостей и индуктивностей для блокировки СВЧ-сигнала на устройство управления. Питание каскадов выполняется параллельно, в цепи питания последовательно включены токоограничивающие сопротивления для защиты варакторов. Моделирование такого модуля дало следующие результаты.

При изменении значения емкостей происходит сдвиг фаз колебаний (рис.4). Разность фаз между значениями 1,8 и 7,5 пФ превышает  $360^\circ$ . Изменение фазы носит практически линейный характер как в диапазоне изменения напряжений, так и в частотном диапазоне. КСВН ФВ на частоте 1,5 ГГц не превышает 3 (рис.5), максимальный коэффициент отражения ( $S_{11}$ ) ФВ на входе (рис.6) составляет  $-8$  дБ, а максимальные вносимые потери равны  $-3$  дБ (рис.7) при изменении емкости варактора от 1,8 до 5,1 пФ (дальнейшее увеличение емкости приводит к недопустимому росту  $S_{11}$  и  $S_{21}$ ).

Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными (рис.8) для частотных характеристик вносимых и обратных потерь ФВ, подключенного в прямом ( $S_{21}$ ,  $S_{11}$ , кривая 1) и обратном ( $S_{12}$ ,  $S_{22}$ , кривая 2) направлениях. Выяснилось, что экспериментальные и расчетные

характеристики хорошо согласуются друг с другом. Различия объясняются несоответствием между реальной архитектурой ФВ и расчетными параметрами, а также возможным разбросом электрофизических параметров подложки.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают эффективность применения САПР для разработки фазовращателей с плавной регулировкой фазы.

## 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, V. 48, № 5, p. 802-808.
3. **Гупта К., Гардж Р., Чадха Р.** Машинное проектирование СВЧ устройств / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987.
4. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / В.В.Никольский, В.П.Орлов, В.Г.Феокистов и др. / Под. ред. В.В.Никольского. – М.: Радио и связь, 1982.
5. **Фуско В.** СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990.
6. [www.appwave.com/products/si](http://www.appwave.com/products/si).
7. [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
8. [www.cst.com](http://www.cst.com).
9. **Кисель Н.Н.** Моделирование прикладных задач электродинамики и антенн на супервычислительной системе в пакете ФЕКО: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013.

