

# Синтез и численное исследование микрополоскового двухэлементного фиксированного фазовращателя

В.П. Мещанов<sup>1</sup>, К.А. Саяпин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НПП «НИКА-СВЧ»

<sup>2</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** разработан и численно исследован микрополосковый фиксированный фазовращатель с двухэлементным фазосдвигающим каналом на основе отрезков связанных линий передачи со шлейфами. Проведено моделирование в приближении Т-волн, а также схемотехническое и электродинамическое моделирование микрополосковой структуры. Расчетное максимальное значение КСВН составило 1,09 в диапазоне частот 0,6639...1,333 ГГц, а отклонение фазочастотной характеристики от заданного номинального значения не превысило 2°.

**Ключевые слова:** фиксированный фазовращатель, связанные линии передачи, шлейф, микрополосковая линия передачи

## 1. Введение

Фиксированные фазовращатели СВЧ (ФФ) обеспечивают заданный сдвиг фаз между сигналами на выходных портах опорного канала (ОК) и фазосдвигающего канала (ФК) в широком диапазоне частот [1].

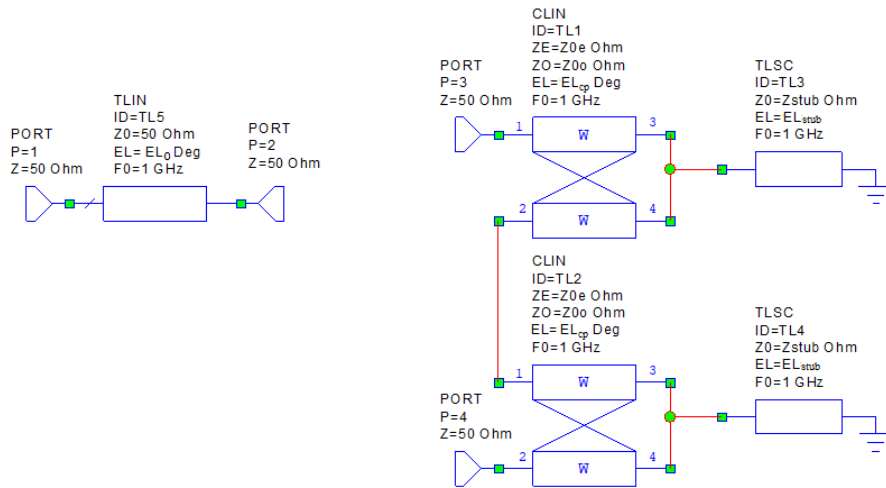
В подавляющем большинстве известных структур ФФ нелинейную ФЧХ имеет только ФК, а ОК выполняется в виде отрезка одиночной однородной линии передачи (ЛП). Все многообразие электрических цепей ФК можно разделить на два типа: структуры на основе одиночных ЛП [2, 3] и связанных ЛП [4-8].

Использование связанных ЛП позволяет обеспечить широкую полосу рабочих частот ФФ, однако сопряжено с рядом технологических трудностей. К их числу относятся малый зазор между связанными ЛП и невозможность реализации перемычки нулевой длины между выходными плечами связанных ЛП, что приводит к значительному ухудшению электрических параметров ФФ по сравнению с моделью в приближении Т-волн. Решить эту проблему удастся за счет использования короткозамкнутого шлейфа в качестве нагрузки отрезка связанных ЛП, который позволяет не только увеличить зазор между линиями, но и соединить их выходные плечи между собой, не вызывая ухудшения частотных характеристик ФФ [6-8]. Дальнейшим развитием структур со шлейфами стали многоэлементные ФК [8]. Исследование их свойств началось относительно недавно, но уже показало возможные перспективы по повышению эксплуатационных параметров ФФ.

Целью данной работы является исследование микрополоскового ФФ с двухэлементной структурой ФК, образованной отрезками связанных ЛП со шлейфами.

## 2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Исследуемая модель в приближении Т-волн фиксированного фазовращателя с двухэлементным ФК показана на рисунке 1. Каждый элемент ФК образован отрезком связанных ЛП с электрической длиной  $\lambda_g/4$  (где  $\lambda_g$  – длина волны на центральной частоте  $f_0$  рабочего диапазона), выходные плечи которого соединены между собой и нагружены на короткозамкнутый шлейф, имеющий длину  $\lambda_g/4$  и волновое сопротивление  $Z_{stub}$ .

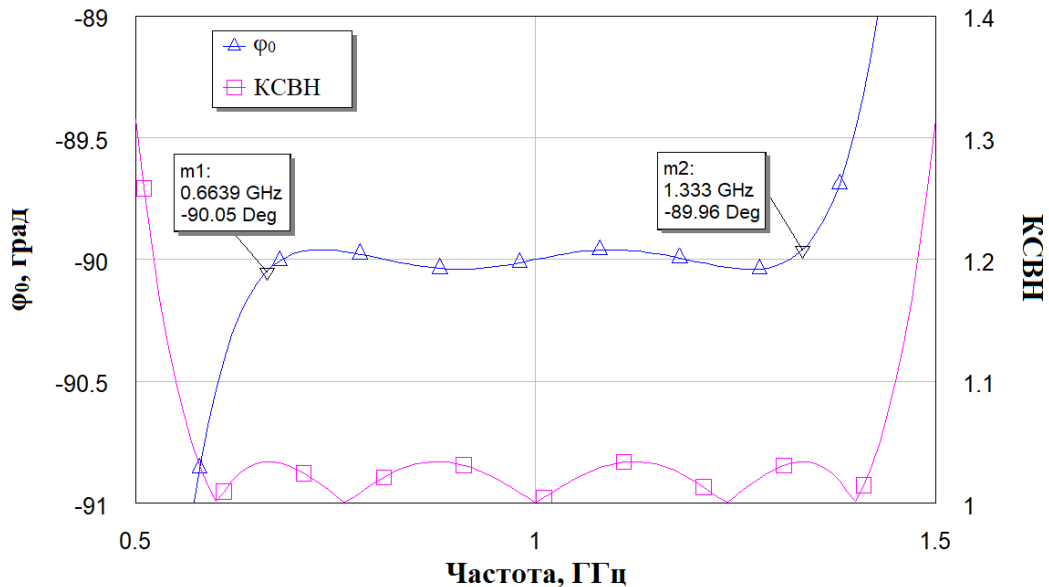


**Рисунок 1.** Модель фиксированного фазовращателя в приближении Т-волн.

Оптимальные электрические параметры ФФ для диапазона частот 0,66...1,33 ГГц и номинального значения фазового сдвига  $\varphi_0=90^\circ$ , полученные с использованием данных работы [8], приведены в таблице 1, а частотные характеристики соответствующей модели в приближении Т-волн – на рисунке 2.

**Таблица 1.** Параметры модели фиксированного фазовращателя в приближении Т-волн

$Z_0$ , Ом	$Z_{0e}$ , Ом	$Z_{0o}$ , Ом	$Z_{stub}$ , Ом	$EL_0$ , град	$EL_{stub}$ , град	$EL_{cp}$ , град
50,0	45,35	38,889	66,128	450	90	90

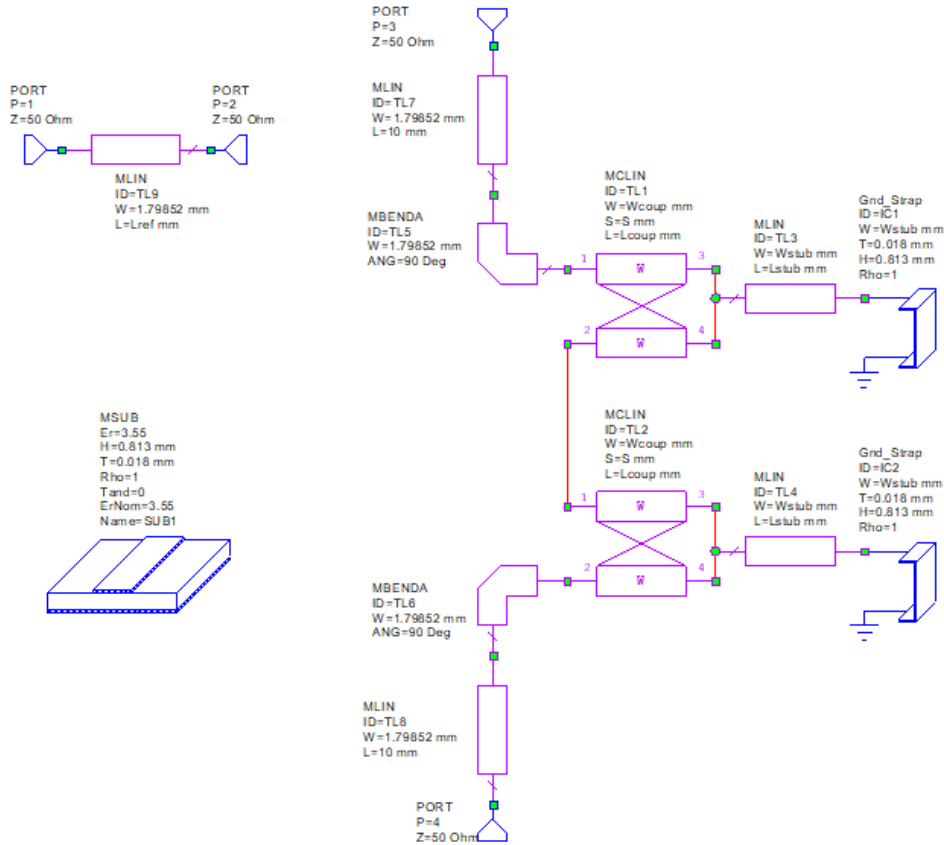


**Рисунок 2.** Частотные характеристики модели фиксированного фазовращателя в приближении Т-волн.

Отклонение  $\Delta\varphi$  фазочастотной характеристики (ФЧХ) от заданного номинального значения  $\varphi_0$  составляет не более  $0,05^\circ$  в полосе частот 0,6639...1,333 ГГц. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в том же диапазоне частот не превышает 1,04.

На основе полученных начальных приближений была создана схемотехническая модель микрополоскового ФФ (рисунок 3), где в качестве подложки был задан СВЧ-

ламинат Rogers RO4003С, имеющий эффективную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r=3,38$ . При этом при расчетах использовано значение  $\epsilon_r=3,55$ , рекомендуемое производителем. Полным аналогом данного материала является доступный на отечественном рынке ламинат WL-CT338 китайского производителя «Taizhou Wangling». Толщина подложки  $h=0,813$  мм, толщина металлизации  $t=18$  мкм.



**Рисунок 3.** Схематехническая модель микрополоскового фиксированного фазовращателя.

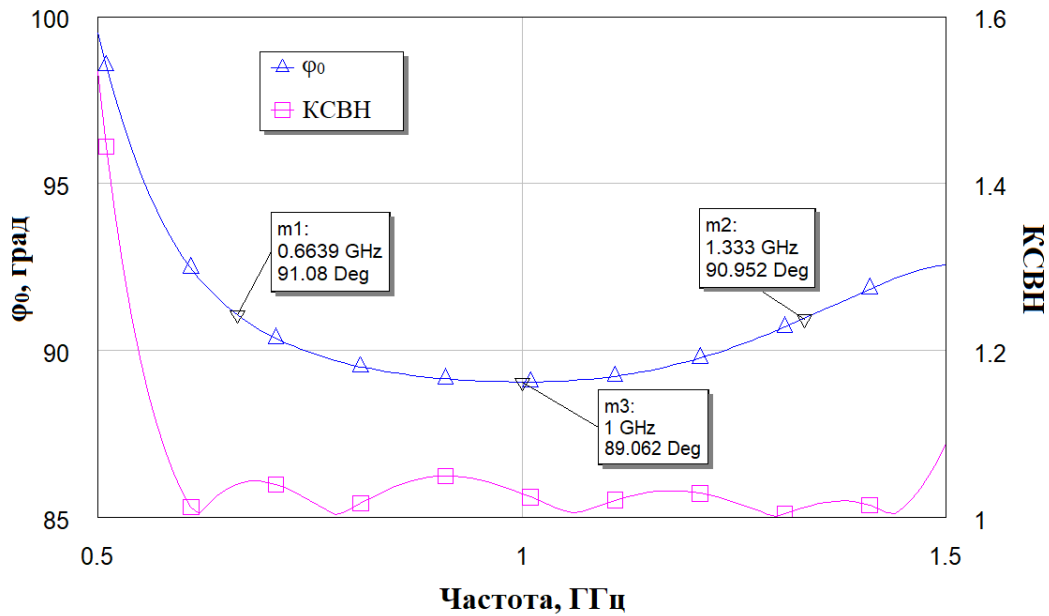
В схеме введены отрезки подводящих ЛП, необходимые для подключения ФФ к внешней цепи. Это вызвало необходимость увеличения длины ОК. Кроме того, проведена параметрическая оптимизация структуры с помощью метода Нелдера-Мида. Необходимость оптимизации вызвана изменением частотных характеристик из-за перехода к квази-Т-волнам, являющимся основным типом волн, распространяющихся в микрополосковой ЛП.

Полученные оптимальные геометрические параметры ФФ приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Параметры схематехнической модели фиксированного фазовращателя

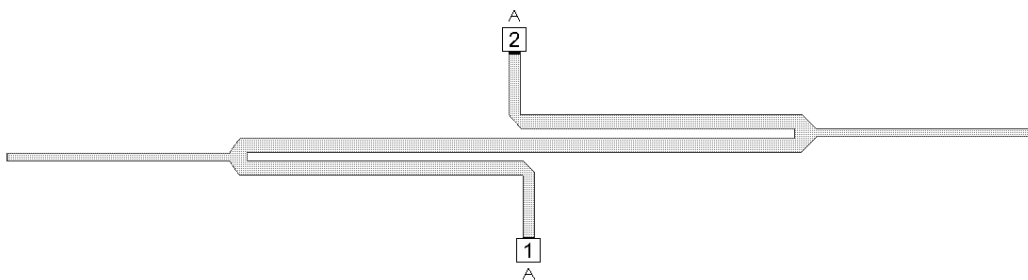
$W_{\text{coupl}}$ , мм	$L_{\text{coupl}}$ , мм	$S$ , мм	$L_{\text{stub}}$ , мм	$W_{\text{stub}}$ , мм	$L_{\text{ref}}$ , мм	$W_0$ , мм
2,27	44,97	1,41	36,76	1,187	242,89	1,7985

На рисунке 4 приведены частотные характеристики схематехнической модели ФФ. Из них следует, что, в сравнении с моделью в приближении Т-волн, несколько изменился вид ФХЧ, а также увеличилось значение параметра  $\Delta\phi$  до  $1^\circ$ . В то же время максимальное значение КСВН портов ФК в рабочем диапазоне частот изменилось незначительно и составило 1,05.



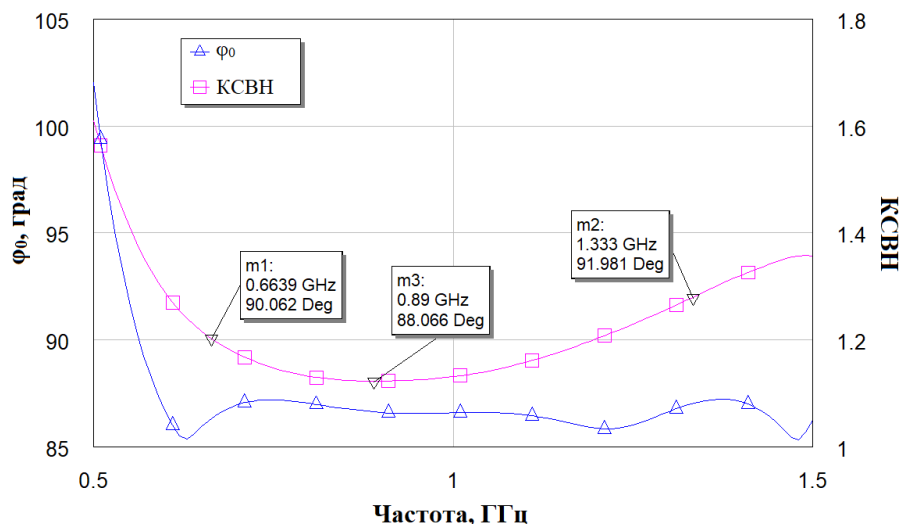
**Рисунок 4.** Частотные характеристики схемотехнической модели фиксированного фазовращателя.

Полученные геометрические параметры ФФ использованы при построении электродинамической модели ФК (рисунок 5) в программе проектирования СВЧ-устройств AXIEM пакета AWR DE. В области сочленения отрезков связанных ЛП и шлейфа добавлены плавные переходы с целью минимизации КСВН. Также скорректированы микрополосковые повороты в местах подключения подводящих ЛП, поскольку в этой области возникает паразитная электромагнитная связь между ЛП разных элементов ФК, не учитываемая в схемотехнической модели. В связи с этим незначительной корректировке подверглись длины связанных ЛП и шлейфов.



**Рисунок 5.** Двухмерная модель фазосдвигающего канала.

Частотные характеристики электродинамической модели ФФ, полученные с помощью решения уравнений Максвелла методом моментов, представлены на рисунке 6. Максимальное значение КСВН составило 1,09. ФЧХ имеет зависимость, аналогичную схемотехнической модели, при этом параметр  $\Delta\phi$  увеличился до  $2^\circ$ .



**Рисунок 6.** Частотные характеристики электродинамической модели фиксированного фазовращателя.

### 3. Заключение

Разработан и численно исследован микрополосковый фиксированный фазовращатель с номинальным значением фазового сдвига  $\phi_0=90^\circ$  для рабочей полосы частот 0,6639...1,333 ГГц (коэффициент перекрытия диапазона частот  $k \geq 2$ ). Проведено моделирование в приближении Т-волн, а также схематехническое и электродинамическое моделирование микрополосковой модели фиксированного фазовращателя.

Полученное максимальное значение КСВН электродинамической модели фазосдвигающего канала составило 1,09 во всем рабочем диапазоне частот. Отклонение ФЧХ от заданного номинального значения не превысило  $2^\circ$ .

Исследованная структура может быть рекомендована к использованию в приемопередающей и контрольно-измерительной аппаратуре.

#### Список литературы

1. Schiffman В.М. A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters // IRE Trans. – 1958. – V. МТТ-6. – No. 4. – P. 232-237.
2. Губин Д.С. и др. Синтез фазовращателей на основе ступенчатой одиночной линии передачи со шлейфом // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 2. – С. 162-167.
3. Мещанов В.П., Саяпин К.А., Шерстюков Д.Н. Математическое моделирование и экспериментальное исследование микрополосковых фазовращателей на основе одиночной линии передачи со ступенчатым шлейфом // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – С. 395-399.
4. Мещанов В. П., Метельникова И. В., Фокеев Л. Г. Оптимальный синтез ступенчатых фазовращателей II класса // Радиотехника и электроника. – 1983. – Т. 28. – № 12. – С. 2341-2346.
5. Аристархов Г.М., Алексеев А.А. Широкополосные фазовращатели на связанных микрополосковых линиях с кратными электрическими длинами // Радиотехника. – 1987. – №12. – С. 58-60.
6. Исаев В.М., Мещанов В.П., Семенчук В.В., Шикова Л.В. Сверхширокополосные фиксированные фазовращатели на связанных линиях передачи со шлейфами // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60. – № 6. – С. 604-609.
7. Корчагин А.И. и др. Комплексные исследования фазосмещающих свойств ступенчатой структуры класса II на связанных линиях передачи с несогласованными нагрузками // Известия саратовского университета. Новая серия. Серия: физика. – 2021. – Т. 21. – №3. – С. 264-274.
8. Алексеев В.В., Мещанов В.П., Семечнчук В.В., Шикова Л.В. Сверхширокополосные фиксированные фазовращатели на ступенчатых связанных линиях передачи со шлейфом // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2015. – С. 139-141.