

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

**Исследование новых структур и устройств фазового смещения
радиосигналов**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 242 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика»
код и наименование направления

физического факультета
наименование факультета

Саяпина Кирилла Александровича
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель
д.т.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

В.П.Мещанов
инициалы, фамилия

д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

М.В.Давидович
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:
д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

О.Е. Глухова
инициалы, фамилия

Саратов 2019 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Фиксированный фазовращатель представляет собой пассивное устройство, функциональное назначение которого заключается в обеспечении заданного фазового сдвига электромагнитных волн на выходах опорного (ОК) и фазосдвигающего (ФК) каналов в заданном рабочем диапазоне частот (рис. 1). Фиксированные фазовращатели являются базовыми элементами радиоэлектронной аппаратуры в диапазоне сверхвысоких и крайне высоких частот. В частности, они находят широкое применение в измерительной, контрольной, приемной и передающей аппаратуре. Фиксированные фазовращатели являются неотъемлемой частью ФАР и АФАР, модуляторов и ряда других радиоэлектронных устройств [1].

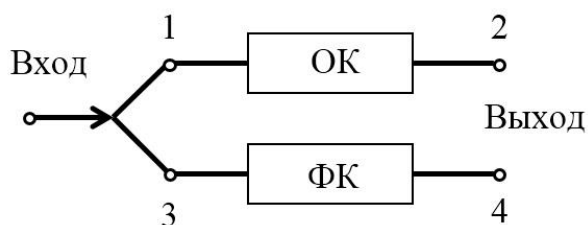


Рис. 1. Структура фиксированного фазовращателя.

Расширение рабочего диапазона частот фиксированных фазовращателей решает одну из главных проблем создания современной широкополосной и сверхширокополосной приемно-передающей и контрольно-измерительной аппаратуры.

Исследование широкополосных и сверхширокополосных фиксированных фазовращателей на линиях передач с Т- и квази-Т-волнами продолжается более пятидесяти лет [2]. За это время тема не утратила своей актуальности и продолжает привлекать внимание отечественных и зарубежных исследователей [1-9].

Цель работы – теоретическое и экспериментальное исследование новых структур фазового смещения радиосигналов и разработка устройств (фиксированных фазовращателей) на их основе.

Основные задачи исследования:

1. Исследование фиксированных фазовращателей, образованных одиночными ступенчатыми и плавными линиями передачами со шлейфами следующих типов:
 - ступенчатыми короткозамкнутыми,
 - плавными короткозамкнутыми;
2. Исследование фиксированных фазовращателей на основе связанных линий передачи следующих типов:
 - линий передачи класса II со шлейфом,
 - плавных линий передачи со шлейфом,
 - плавно-ступенчатых ЛП класса II с плавно-ступенчатым шлейфом.

Методы исследования

Процесс синтеза исследуемых широкополосных и сверхширокополосных ФФ условно разделяется на следующие этапы:

1. Постановка задачи синтеза;
2. Структурная оптимизация и анализ устройства в приближении Т-волн;
3. Постановка и решение задачи параметрической оптимизации в приближении Т-волн;
4. Схемотехническое моделирование микрополосковой реализации устройства и при необходимости проведение дополнительной параметрической оптимизации;
5. Электродинамическое моделирование;
6. Экспериментальное исследование изготовленного макета устройства.

Аргументированность, достоверность и обоснованность результатов работы. В пользу достоверности результатов решения задач синтеза предлагаемых структур фиксированных фазовращателей свидетельствуют электродинамические и экспериментальные данные исследования их микрополосковых реализаций.

Апробация работы. Основные результаты обсуждались на следующих международных и региональных конференциях: «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018», г.Саратов; «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2018 г.; «Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2018», г. Саратов.

Публикации. По материалам выпускной квалификационной работы опубликовано в открытой печати 5 работ, среди которых 1 статья в центральном научном журнале из перечня ВАК и 3 тезиса международных и 1 региональной конференций.

Структура и объем выпускной квалификационной работы. Выпускная квалификационная работа изложена на 91 страницах машинописного текста и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 119 наименований. Работа содержит 11 таблиц и 42 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы выпускной квалификационной работы, формулировку цели и задач. Излагается научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1 посвящена обзору существующих типов структур фиксированных фазовращателей и их основным характеристикам.

Для обеспечения постоянства фазового сдвига в широком диапазоне частот требуются элементы с выраженной нелинейностью ФЧХ. В большинстве исследованных широкополосных ФФ нелинейную ФЧХ имеет только фазосдвигающий канал, а в качестве опорного канала используется отрезок однородной ЛП. В последние годы началось исследование фазовращателей, в которых и в качестве опорного канала используются структуры, обладающие нелинейной фазочастотной характеристикой [9].

Среди широкого многообразия структур фазосдвигающих каналов можно выделить два основных типа: всепропускающие ФК, вносимое затухание которых равно нулю, и отражающие, обладающие малым вносимым

затуханием. Все пропускающая цепь образуется на основе идеально согласованного восьмиполосника с направленностью второго типа [2, 5], выходные плечи которого соединены с помощью отрезка ЛП. Для её построения используют отрезок как ступенчатых, так и плавных ЛП. Отражающие структуры ФК базируются на связанных и одиночных ЛП со шлейфами.

Глава 2 содержит результаты решения задач синтеза фиксированных фазовращателей с фазосдвигающим каналом на основе одиночной линии передачи со шлейфом.

В первом разделе приведено исследование ФФ со ступенчатым ФК с однородным шлейфом. Длина отрезков ЛП, образующих ФК уменьшена по сравнению с [6], что позволило уменьшить габариты устройства, однако при этом частотные характеристики устройства несколько ухудшились.

Второй раздел главы посвящен ФФ с ФК на основе ступенчатой одиночной ЛП с короткозамкнутым ступенчатым шлейфом. В приближении Т-волн для трехступенчатой структуры получены два типа решений, отличающихся соотношениями между электрическими длинами и волновыми сопротивлениями отрезков ЛП, образующих ФК.

На основе решений первого и второго типов для номинального фазового сдвига $\varphi_0=45^\circ$ и перекрытия рабочего диапазона частот $\kappa=2$ разработаны схемотехнические модели ФФ на микрополосковой ЛП и выполнено электродинамическое моделирование. Частотные характеристики электродинамических моделей, выполненных в ЕМ-симуляторе AWR AXIEM, представлены на рис. 2, в-е. Для экспериментального подтверждения полученных решений изготовлены опытные образцы ФК двух типов (рис. 2, а, б). Экспериментально полученные частотные характеристики ФФ приведены на рис. 2, в-е. Для ФФ первого типа максимальное экспериментальное значение КСВН составляет 1,17, отклонение ФЧХ от номинального значения фазового сдвига не превышает $0,823^\circ$, для второго типа – $KCBH_{\max}=1,102$,

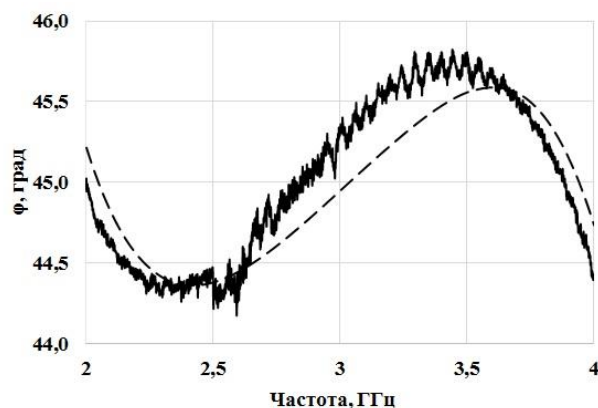
отклонение ФЧХ от номинального значения фазового - $0,660^\circ$.



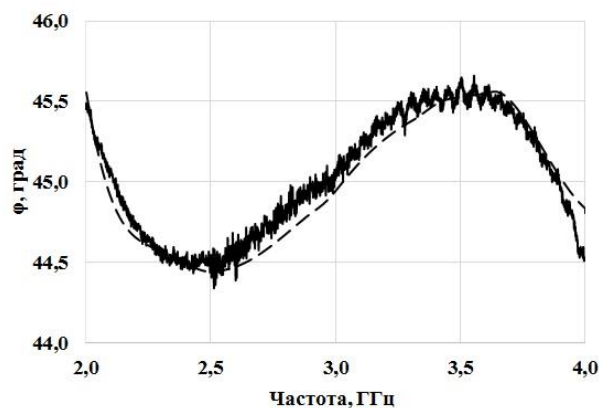
а



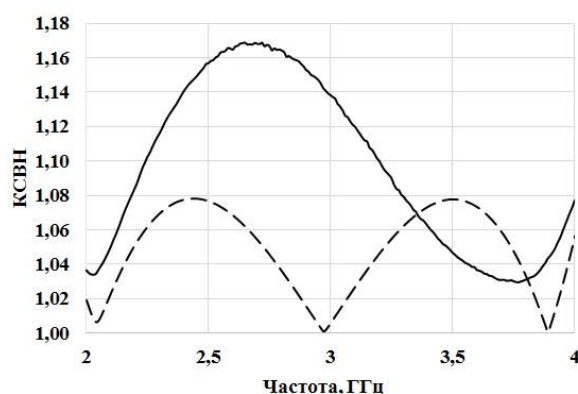
б



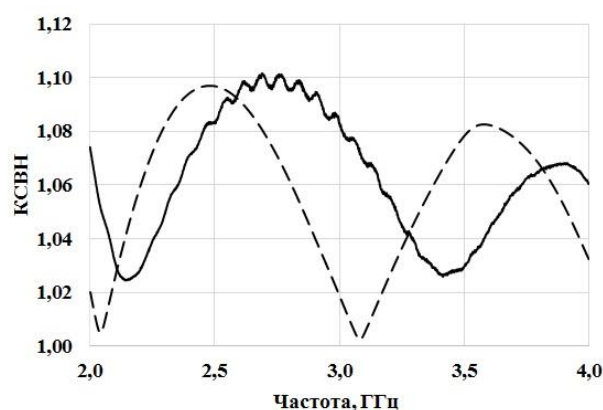
в



г



д

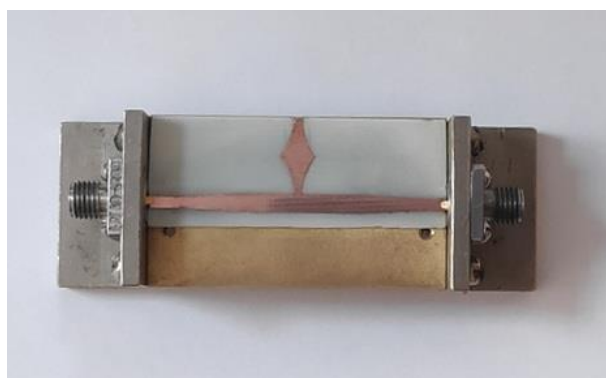


е

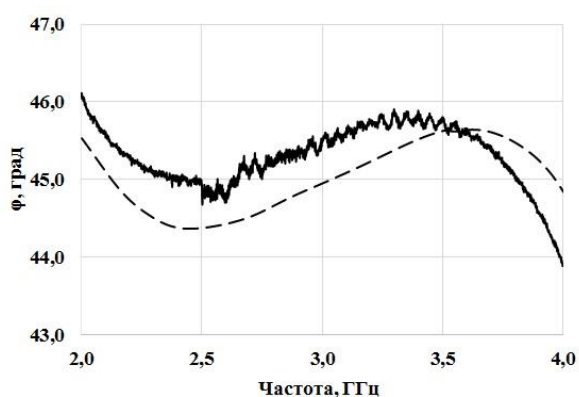
Рис. 2. Фазосдвигающие каналы ФФ первого (а) и второго (б) типа и их расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) частотные характеристики: ФЧХ (в, г) и КСВН портов (д, е).

Третий раздел посвящен дальнейшему развитию ФК на основе ступенчатых одиночных ЛП со ступенчатыми шлейфами - ФК на основе плавной ЛП с плавным короткозамкнутым шлейфом. Эта модификация позволяет несколько улучшить согласование ФК, поскольку структуры на

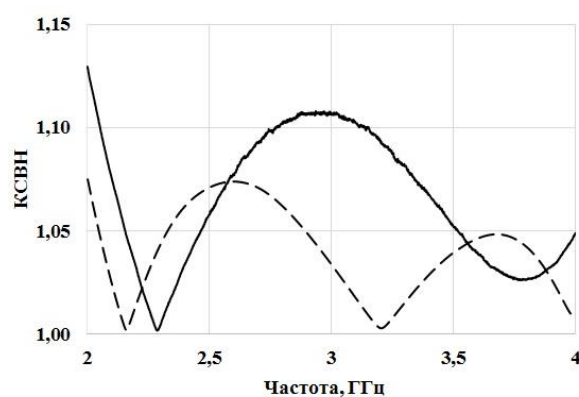
плавных ЛП не содержат скачков волнового сопротивления. Фотография изготовленного образца ФК в измерительной оснастке приведена на рис. 3, а. Частотные характеристики электродинамической модели и экспериментального образца приведены на рис. 3, б, в. Максимальное экспериментальное значение КСВН составляет 1,12, отклонение ФЧХ от номинального значения фазового сдвига не превышает $1,12^\circ$.



а



б



в

Рис. 3. ФК на основе одиночной плавной ЛП с плавным короткозамкнутым шлейфом (а) и его расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) частотные характеристики: ФЧХ (б) и КСВН (в).

Глава 3 содержит результаты решения задач синтеза фиксированных фазовращателей с фазосдвигающим каналом на основе связанных линий передачи, нагруженных короткозамкнутым шлейфом.

В первом разделе содержатся результаты исследования ФК на основе связанных ступенчатых ЛП класса II со шлейфом.

Связанные ступенчатые ЛП класса II образуются каскадным включением чередующихся отрезков однородных распределенно-связанных и несвязанных ЛП с различными электрическими длинами, при этом отрезки связанных ЛП имеют одинаковые коэффициенты связи, условия идеальной направленности предполагаются для них выполненными. Волновые сопротивления несвязанных ЛП полагаются равными волновому сопротивлению подводящих ЛП.

В работе исследуется ФФ со структурой ФК на основе ступенчатой ЛП класса II, нагруженной короткозамкнутым шлейфом. В данном случае шлейф выполняет роль не только соединительного отрезка между связанными ЛП, но и позволяет обогатить математическую модель ФФ дополнительными варьируемыми параметрами.

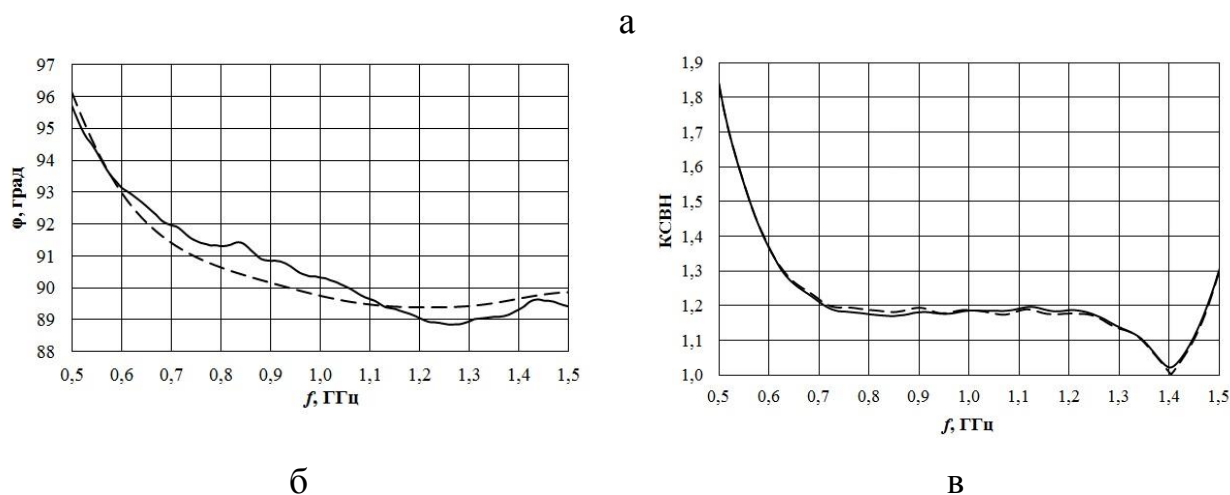
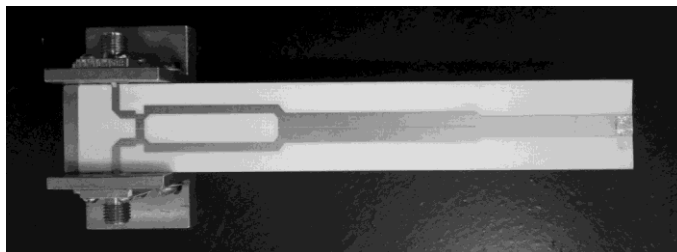
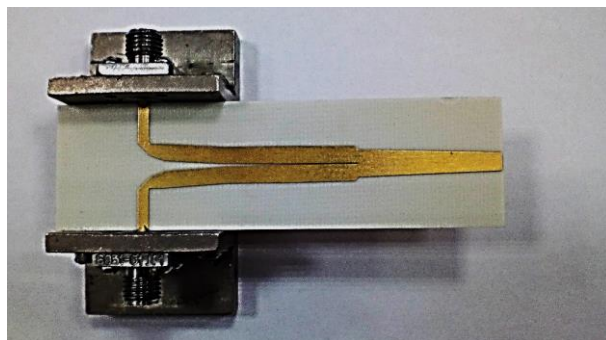


Рис. 4. ФК на основе связанных ЛП класса II с короткозамкнутым шлейфом (а) и его расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) частотные характеристики: ФЧХ (б) и КСВН (в).

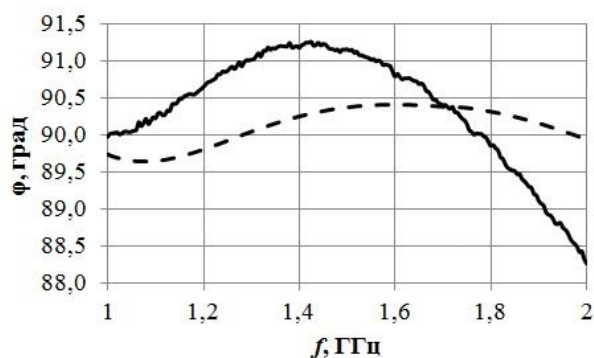
Решены в приближении Т-волн задачи синтеза для ФФ с трех- и пятиступенчатыми ФК. Выполнено схемотехническое и электродинамическое моделирование трехступенчатого ФФ на микрополосковой ЛП. Изготовлен экспериментальный образец ФК (рис. 4, а) и проведено его экспериментальное

исследование. Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик приведено на рис. 4, б, в.

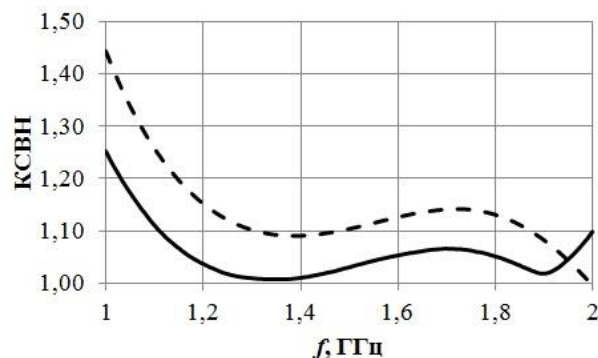
Второй раздел посвящен ФФ с ФК на основе плавных связанных ЛП с плавным короткозамкнутым шлейфом. В качестве начальной в приближении рассматривалась модель трехступенчатого ФФ на связанных ЛП с однородным шлейфом. На основе полученных решений разработана схмотехническая модель ФФ, после чего совершен переход на плавные ЛП и построена соответствующая электродинамическая модель в симуляторе AWR AXIEM. Частотные характеристики электродинамической модели и экспериментального образца (рис. 5, а) приведены на рис. 5, б, в.



а



б



в

Рис. 5. ФК на основе связанных ЛП с плавным короткозамкнутым шлейфом (а) и его расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) частотные характеристики: ФЧХ (б) и КСВН (в).

Второй раздел посвящен ФФ с ФК на основе плавно-ступенчатой ЛП класса II с плавно-ступенчатым шлейфом. В качестве начальных использованы

решения в приближении Т-волн для ФФ класса II ($\varphi_0=90^\circ$, $\kappa=2,5$), приведенные в первом разделе главы. Затем однородный шлейф заменен на трехступенчатый и проведена параметрическая оптимизация структуры. На основе полученных решений синтезирована схмотехническая модель на микрополосковой ЛП, ее частотные характеристики приведены на рис. 6, б, в. На следующем этапе синтеза, пользуясь методом декомпозиции, произведен учет влияния электродинамических моделей плавных переходов между отрезками ЛП и проведена оптимизация длин однородных ЛП. На основе полученных решений построена электродинамическая модель в симуляторе AWR AXIEM (рис. 6, а), ее частотные характеристики приведены на рис. 6, б, в. Сравнение характеристик схмотехнической и электродинамической моделей показывает достаточно хорошее их совпадение, что подтверждает правильность метода.

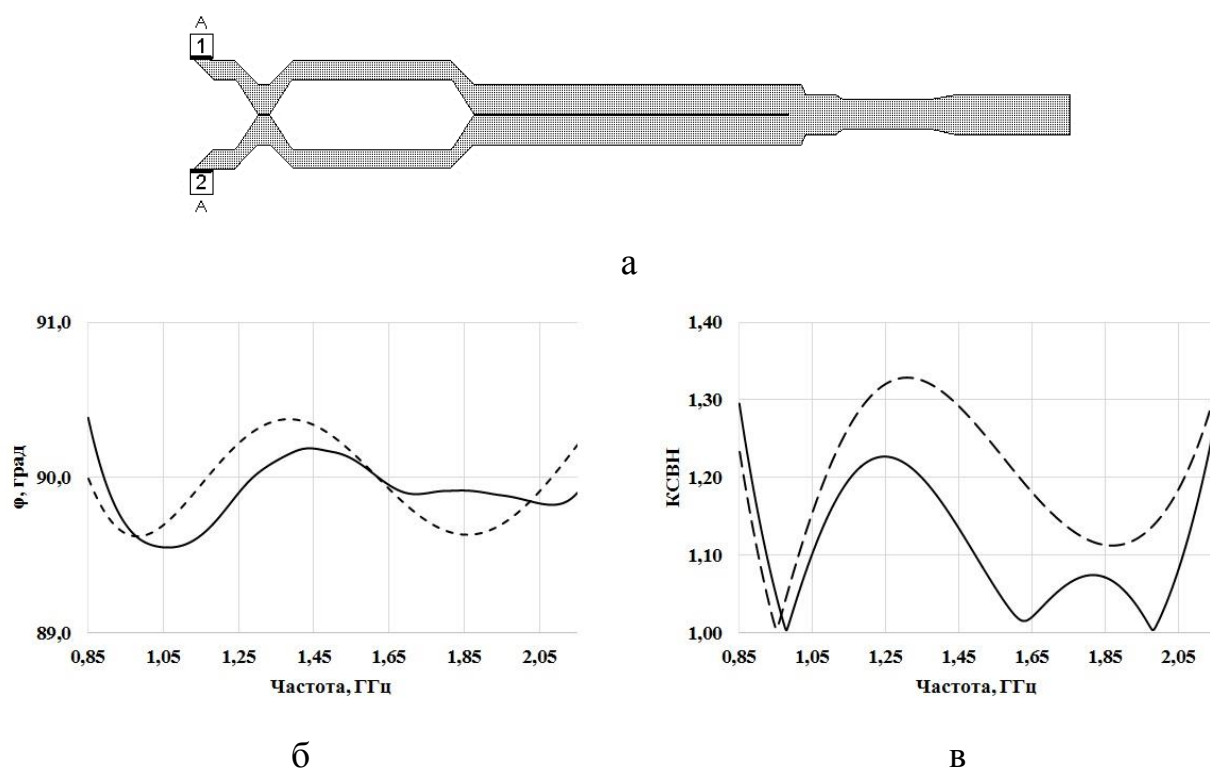


Рис. 6. ФК на основе связанных плавно-ступенчатых ЛП класса II с короткозамкнутым шлейфом (а) и его расчетные (пунктирная линия) и экспериментальные (сплошная линия) частотные характеристики: ФЧХ (б) и КСВН (в).

В **заключении** выделены основные выводы и результаты проведенной работы:

1. Исследованы фиксированные фазовращатели на основе одиночной ступенчатой ЛП со ступенчатым шлейфом. Получены два типа решений задачи синтеза для трехступенчатых ФФ в приближении Т-волн для номинального фазового сдвига $\varphi_0=22,5\dots135^\circ$ и перекрытия рабочего диапазона частот $\kappa=1,5\dots3$. Получены общие закономерности изменения волновых сопротивлений и электрических длин элементов ФФ. Сравнительный анализ полученных решений позволяет сделать вывод о значительном уменьшении габаритов устройства по сравнению с известными аналогами без ухудшения его электрических характеристик. Проведено схемотехническое и электродинамическое моделирование структур для $\varphi_0=45^\circ$, $\kappa=2$ (2-4 ГГц). Экспериментальное исследование подтвердило результаты моделирования.
2. Проведено исследование фиксированного фазовращателя, структура электрической цепи которого образована одиночной плавной ЛП с параллельно включенным плавным шлейфом. Решена задача синтеза в приближении Т-волн для случая $\varphi_0=45^\circ$, $\kappa=2$, численно и экспериментально исследована микрополосковая реализация устройства для рабочего диапазона частот 2-4 ГГц.
3. Проведено исследование ФФ на основе связанных плавных ЛП со шлейфом. Решена задача синтеза в приближении Т-волн для случая $\varphi_0=90^\circ$, $\kappa=2$ для структуры на основе трехступенчатых связанных линий с однородным шлейфом. На основе полученных решений разработана микрополосковая схемотехническая модель и произведен переход на плавные связанные ЛП и плавный шлейф. Проведено электродинамическое моделирование и экспериментальное исследование фазовращателя, подтвердившее правильность решений.

4. Исследованы фиксированные фазовращатели на основе связанных класса II с короткозамкнутым шлейфом. Решены задачи синтеза в приближении Т-волн для $\varphi_0=67,5\dots 90^\circ$, $\kappa=1,5\dots 3$. На основе решения для $\varphi_0=90^\circ$, $\kappa=3$ разработан трехступенчатый микрополосковый фазовращатель. Проведено схемотехническое моделирование. Электродинамическое моделирование и экспериментальное исследование показало приемлемые результаты, согласующиеся между собой, однако продемонстрировало трудности микрополосковой реализации устройства в силу наличия скачкообразных нерегулярностей в местах сочленения ЛП и паразитной связи между одиночными линиями.
5. Проведено исследование плавно-ступенчатого ФФ класса II со ступенчатым короткозамкнутым шлейфом. Решена задача синтеза в приближении Т-волн для ФФ с трехступенчатым ФК класса II и трехступенчатым шлейфом для $\varphi_0=90^\circ$, $\kappa=3$. Проведено схемотехническое моделирование микрополосковой реализации и выполнено устранение скачкообразных нерегулярностей за счет использования плавных переходов. Проведено электродинамическое моделирование показывающее преимущество плавно-ступенчатой структуры ФФ по сравнению со ступенчатой.

Полученные в приближении Т-волн решения для различных типов исследованных в работе фиксированных фазовращателей могут быть успешно использованы при инженерном проектировании устройств фазового смещения радиосигналов, реализованных на основе линий передачи с Т- и квази-Т-волнами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Саяпин К.А., Алексеев В.В., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Исследование широкополосных фиксированных фазовращателей на основе связанных плавных линий передачи со шлейфом // Радиотехника - №9, 2018. С. 38-42.
2. Саяпин К.А., Куцько П.П., Мещанов В.П., Шерстюков Д.Н. Сверхширокополосные фиксированные фазовращатели на связанных ступенчатых линиях передачи класса II со шлейфом / Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. С. 303-305.
3. Саяпин К.А., Алексеев В.В., Мещанов В.П. Исследование широкополосного фазовращателя на основе связанных плавных линий передачи со шлейфом / Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018. Материалы международной научно-технической конференции. – 2018, с. 493-498.
4. Саяпин К.А., Мещанов В.П. Разработка широкополосного дифференциального микрополоскового фазовращателя / Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2018: материалы Международного симпозиума и Молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2018 / под ред. Г.В. Симоненко, В.В. Тучина. – 2018, с. 59-64.
5. Саяпин К.А., Мещанов В.П., Давидович М.В. Новые структуры и устройства фазового смещения радиосигналов / Научные исследования студентов Саратовского государственного университета: материалы итоговой студенческой научной конференции. – 2018, с. 50-51.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мещанов В.П., Тупикин В.Д., Чернышев С.Л. Коаксиальные пассивные устройства / Под общей ред. В.П. Мещанова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993. 416 с.
2. Schiffman B.M. A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters // IRE Trans. 1958. V. MTT-6. No. 4. P. 232-237.
3. Wilds R.B. Try $\lambda/8$ stubs for fast fixed phase shifts // Microwave & RF. 1979. Vol. 6, No. 12. P. 67-68.
4. Алексеев А.Н., Аристархов Г.М. Широкополосные дифференциальные фазовращатели СВЧ на основе одиночных линий передачи // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. № 1. С. 63-69.
5. Meschanov V.P., Metelnikova I.V., Tupikin V.D., Chumaevskaya. A New Structure of Microwave Ultrawide-Band Differential Phase Shifter // IEEE Trans. 1994. V. 42. № 5. P. 762-765.
6. Д.С. Губин, А.П. Креницкий, В.П. Мещанов, Л.В. Шикова. Синтез фазовращателей на основе ступенчатой одиночной линии передачи со шлейфом // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 2. С. 162-167.
7. Губин Д.С., Креницкий А.П., Мещанов В.П., Шикова Л.В. Синтез фазовращателей на основе ступенчатой одиночной линии передачи класса II со шлейфом. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 7. С. 801-805.
8. Базлов Н.Н., Мещанов В.П., Шикова Л.В. Сверхширокополосные фазовращатели на основе плавной неоднородной одиночной линии передачи // 2011. Антенны. № 1. С. 37-43.
9. Jian-Xiao Wang, Lin Yang, Yue Liu, Yi Wang, Shu-Xi Gong. Design of a Wideband Differential Phase Shifter with the Application of Genetic Algorithm / Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 45-49, 2014.
10. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. В 2-х т. М.: Связь. 1972.