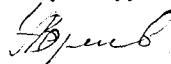


ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ЧЕРЕПНЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

Исследование и разработка методов синтеза многозвенных СВЧ-структур с частотно-зависимыми связями

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.12.21 – Радиотехнические системы
специального назначения, включая технику СВЧ
и технологию их производств

Тула 1998

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Совершенствование радиотехнических систем специального назначения неразрывно связано с повышением точности проектирования устройств на основе многозвенных фильтрующе-согласующих структур техники СВЧ. Эти устройства осуществляют главным образом предварительную обработку входного сигнала и поэтому во многом определяют выходные характеристики системы в целом. Вместе с тем настройка многозвенных структур и подгонка их конструктивных параметров занимает значительную часть времени как на этапе отработки, так и при производстве новой аппаратуры.

Отсюда следует необходимость ужесточения требований к качеству многозвенных фильтрующе-согласующих структур и воспроизводимости их параметров, что определяет постановку задачи существенного увеличения точности проектирования указанных структур и достижения на его основе значительного сокращения доводочных и юстировочных работ при производстве устройств техники СВЧ. Решению указанной задачи во многом способствовали работы отечественных ученых: И.В. Лебедева, Л.А. Вайнштейна, А.Л. Микаэляна, Л.В. Алексейчика, М.Е. Ильченко, Б.Ю. Капищевича, В.А. Коробкина, Е.Р. Трубахина, Ю.А. Покровского, а также ряда зарубежных – Дж. Маттея, Л. Янга, Е. Джонса, Дж. Роулса, Т. Абея, Р. Левин и др.

В настоящее время один из основных путей повышения точности проектирования – создание более точных методов синтеза на основе моделей резонансных звеньев, адекватных реальным объектам. Существующие модели в большинстве своем либо построены на элементах с сосредоточенными параметрами, либо не учитывают такой важный аспект, как дисперсия связи между компонентами, а если и учитывают, то частично, принимая во внимание лишь частотную зависимость фазы параметра связи. Вместе с тем дисперсный характер элементов связи в значительной степени определяет частотные характеристики многозвенных, особенно широкополосных, избирательных структур техники СВЧ. С учетом возрастания требований к радиотехническому системам, используемым для передачи и приема широкополосных сигналов тема диссертационной работы является актуальной.

Объект исследования диссертации – многозвенные фильтрующе-согласующие структуры техники СВЧ с частотно-зависимыми параметрами элементов связи.

Предмет исследования диссертации – взаимосвязанная совокупность методов, моделей и алгоритмов синтеза многозвенных СВЧ структур с частотной избирательностью.

Целью работы является сокращение сроков и стоимости отработки устройств техники СВЧ на основе многозвенных резонансных структур путем существенного уменьшения объема настроечных и доводочных работ за счет повышения точности проектирования.

Задачи исследований.

1. Установление особенностей многозвенных СВЧ-структур с частотнозависимыми связями и реализуемых в них волновых явлений.
2. Декомпозиция методов синтеза многозвенных структур техники СВЧ и анализ основных особенностей составляющих метода – прототипов, обобщенных частотных переменных, математического аппарата, математических моделей и алгоритмов синтеза.

3. Разработка метода и алгоритмов синтеза многозвенных Структур с непосредственными связями, учитывающих фазо-частотные характеристики элементов связи.
4. Разработка метода и алгоритмов синтеза многозвенных структур с непосредственными связями, учитывающих амплитудно-частотные характеристики элементов связи.
5. Разработка методов и алгоритмов синтеза многозвенных структур с четвертьволновыми частотно-зависимыми связями, имеющими неидентичные амплитудные и фазовые характеристики.
6. Разработка методов и алгоритмов синтеза многозвенных полосно-заграждающих фильтров с частотнозависимыми связями.
7. Разработка математических моделей и методов анализа многозвенных структур с двухмодовыми резонансными звеньями.

Методы исследования. Для получения основных теоретических результатов были использованы методы теории дифференциальных уравнений, методы теории функций комплексной переменной и методы матричных алгебры и анализа. Разработка алгоритмов осуществлялась на основе объектно-ориентированного подхода к организации данных и алгоритмов.

Научная новизна работы заключается в распространении теоретических положений и прикладных приемов методов анализа и синтеза на основе фазовой координаты и рекуррентных формул Покровского на класс многозвенных избирательных устройств с неидентичными частотными зависимостями параметров связи и на класс многомодовых многозвенных избирательных устройств. Конкретно, в диссертации получены следующие оригинальные результаты.

1. Исследован механизм переноса мощности через отрезки запердельного волновода конечной длины.
2. Установлены особенности математических моделей явлений взаимодействия запердельных волн с различными нагрузками.
3. Разработаны новые методы синтеза ППФ с непосредственными частотно-зависимыми связями обеспечивающие существенное повышение точности проектирования и отличающиеся:
 - новой частотной переменной, учитывающей не только фазочастотные характеристики элементов связи и линий передачи звеньев, но и амплитудно-частотные характеристики элементов связи;
 - новым алгоритмом синтеза, учитывающим несимметричность не только фазочастотных, но и амплитудно-частотных характеристик элементов связи;
 - новым алгоритмом синтеза многозвенных структур с неидентичными резонансными звеньями
4. Разработаны методы синтеза полосно-пропускающих фильтров с четвертьволновыми связями, отличающиеся новым прототипом и новым алгоритмом, учитывающими фазочастотные и амплитудно-частотные характеристики элементов связи, а также неидентичность резонансных звеньев и обеспечивающие повышение точности проектирования многозвенных устройств СВЧ с четвертьволновыми связями.
5. Разработан метод синтеза полосно-заграждающих фильтров с непосредственными связями, отличающийся учетом частотной зависимости параметров элементов связи и обеспечивающий повышение точности проектирования заграждающих фильтрующих устройств СВЧ с непосредственными связями.
6. Разработаны математические модели и методы анализа многозвенных структур с двухмодовыми резонансными звеньями позволяющие рассчитывать характеристи-

ки неминимально-фазовых фильтров СВЧ с частотно-зависимыми параметрами элементов связи.

Практическая ценность и реализации результатов. Применение разработанных методов, моделей и алгоритмов существенно повышает точность проектирования многозвенных фильтрующе-согласующих устройств техники СВЧ (для ряда основных параметров в несколько раз).

Достигаемая высокая точность проектирования многозвенных устройств практически исключает необходимость технологических операций подгонки и подстройки при использовании материалов с разбросом параметров в пределах заданного допуска, что подтверждается малым (не более 5 %) отличием измеренных в ходе экспериментальных исследований значений параметров спроектированных устройств от требуемых.

На основе разработанных методов синтеза многозвенных СВЧ структур с частотно-зависимыми связями создан комплект таблиц для расчета параметров прототипов с чебышевской частотной характеристикой модуля коэффициента отражения. В рассчитанных таблицах исходным является не полоса пропускания, а фазовая координата, что делает их пригодными для синтеза устройств с любой элементной базой.

По результатам исследований издано учебное пособие "Автоматизированное проектирование фильтрующих и согласующих СВЧ устройств на основе ВДСЗС-прототипа" и разработан пакет программ для синтеза фильтрующе-согласующих устройств техники СВЧ на основе регулярных многослойных плоских волноводно-диэлектрических структур, используемый в учебном процессе кафедры "Радиоэлектроника" ТулГУ при изучении курсов "Электродинамика и распространение радиоволн", "Устройства СВЧ и антенны".

Диссертационная работа выполнена в рамках исследований по гранту «Фундаментальные исследования волновых процессов в фильтрующих и согласующих СВЧ устройствах и разработка нового метода их проектирования» (программа «Фундаментальные исследования в области электроники и радиотехники»).

На защиту выносятся:

1. Особенности волновых явлений в резонансных звеньях с запердельными волнами.
2. Особенности математических моделей резонансных и антирезонансных звеньев с запердельными связями.
3. Метод и алгоритмы синтеза многозвенных структур с непосредственными связями, имеющими частотно-зависимые фазовые характеристики.
4. Метод и алгоритмы синтеза многозвенных структур с непосредственными связями, имеющими частотно-зависимые амплитудные характеристики.
5. Метод и алгоритмы синтеза многозвенных структур с четвертьволновыми частотно-зависимыми связями, имеющими неидентичные фазовые и амплитудные характеристики.
6. Математические модели и метод анализа многозвенных структур с двухмодовыми резонансными звеньями.

Достоверность результатов работы подтверждается адекватностью полученных математических моделей волновым процессам в многозвенных резонансных структурах и применением строго обоснованных методов:

- анализа линейных цепей с распределенными параметрами;
- модифицированных рекуррентных формул Покровского для параметров многослойных диэлектрических структур.

Контроль результатов осуществлялся путем сравнения с известными тестовыми результатами и с экспериментально полученными данными.

Публикации и апробация работы. По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, сделано 15 докладов на конференциях и семинарах.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти разделов и заключения. Содержит 176 страниц основного текста, 22 рисунка, 6 таблиц, библиографию из 83 наименований, 2 приложения, акт о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель диссертационной работы, обоснована ее актуальность, представлен обзор зарубежных и отечественных публикаций, определены задачи исследования, кратко изложено содержание диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведено исследование особенностей многоэлементных СВЧ-структур с частотно-зависимыми связями и реализуемых в них возможных явлений.

В рамках обобщенного волнового подхода к рассматриваемым структурам элементарные связи различного вида могут быть описаны единственными боковыми параметрами в виде коэффициентов отражения R или прохождения D , эволюционных элементов матрицы рассеяния S_{11} и S_{22} .

Очевидно, что в многоэлементной структуре, состоящей из нескольких резонансных элементов, частотная избирательность каждого звена обусловлена не только дисперсией волнового числа линии передачи резонатора θ

$$\theta = 2\pi/l\lambda,$$

зависящей от длины резонатора l и длины волны λ и длины передачи $A(\omega)$, но и дисперсией фазовых сдвигов при отражении $r(\omega)$, поскольку интерференционные явления в резонансном звене связываются не величиной θ , а полным фазовым сдвигом волны в резонаторе $r_2(\omega)$

$$r_2(\omega) = r_1(\omega) + r_2(\omega) - 2\theta(\omega).$$

Очевидно также, что частотная крутизна резонатора $(\partial r_2/\partial\omega)$, определяющая его частотно-избирательные свойства, должны учитывать и дисперсию фазовых сдвигов при отражении

$$(\partial r_2/\partial\omega) = (\partial r_1/\partial\omega) + (\partial r_2/\partial\omega) - 2(\partial\theta(\omega)/\partial\omega).$$

Однако, в ряде известных методов дисперсия фазовых сдвигов при отражении не учитывается вовсе (ступенчатый прототип) или лишь частично (ИЧ-прототип, ВДФ и ВДСЭС-прототипы).

Игнорирование дисперсии фазовых сдвигов при отражении вызывает при проектировании ошибку в ширине полосы пропускания от единиц до сотен процентов.

Частичный учет фазочастотных характеристик элементов связи состоит в том, что не учитывается несимметричность этих характеристик, в результате чего наблюдается значительное (более 10 раз) превышение коэффициента отражения в полосе пропускания по сравнению с его допустимым значением.

И, наконец, в рамках всех известных методов не учитываются амплитудно-частотные характеристики элементов связи — $R(\omega)$.

Пренебрежение этой зависимостью означает пренебрежение частотной зависимостью добротности резонансных звеньев, которая для широкополосных систем может приводить к погрешности в ширине полосы пропускания до 30 ... 50 % и превышению коэффициента отражения в полосе пропускания почти на порядок.

Наиболее существенно дисперсия фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик проявляется в структурах с запредельными связями. Поэтому значительный интерес представляют особенности волновых явлений в таких структурах и их математических моделей, поскольку в ряде случаев эти структуры являются минимально-фазовыми цепями. Показано, что без нарушения закона сохранения энергии коэффициент отражения запредельной волны от некоторых неоднородностей может значительно превышать единицу, а перенос в среднем энергии через отрезок запредельного волновода конечной длины обусловлен взаимодействием в среднем электрического вектора затухающей волны с магнитным вектором волны нарастающей и магнитного вектора волны затухающей с электрическим вектором нарастающей волны.

Во втором разделе проведен анализ методов синтеза многозвенных СВЧ-структур. Точный параметрический синтез СВЧ-устройств требует подбора граничных условий, соответствующих геометрической структуре связанных элементов СВЧ-тракта таким образом, чтобы решение уравнений Максвелла обеспечило бы требуемую частотную характеристику системы. На практике задача решается путем моделирования, в основе которого лежит общность основных физических закономерностей в линейных системах различных типов. Моделирование включает в себя три этапа:

- а) по заданным техническим требованиям рассчитывается модель (прототип);
- б) из конструктивных и других соображений выбирается тип звеньев фильтра СВЧ;
- в) обеспечиваются (приблизительно в некоторой полосе частот) эквивалентность звеньев фильтра и прототипа.

На современном этапе развития теории проектирования СВЧ-устройств известные методы синтеза включают следующие элементы: прототип СВЧ-устройства, обобщенную частотную переменную, математический аппарат, математическую модель, алгоритм и методику синтеза.

В настоящее время нашли широкое применение четыре вида прототипов:

- фильтр низких частот (ФНЧ) и его производные на сосредоточенных элементах;
- ступенчатый переход на линиях с распределенными параметрами;
- волноводно-диэлектрический фильтр (ВДФ);
- ВДСЗС-прототип.

Отождествление фильтров СВЧ с LCR -фильтрами на сосредоточенных элементах при помощи эквивалентных схем позволяет более наглядно и просто представить схемы фильтров СВЧ и использовать при расчете последних богатый расчетный материал теории цепей с сосредоточенными постоянными и теории четырехполюсников.

Параметры эквивалентного четырехполюсника можно определить двумя способами: путем эксперимента и путем непосредственного решения уравнений поля. Чаще всего пользуются первым из них, как наиболее доступным. Математическое решение известно лишь для немногих простейших неоднородностей.

Прототипом фильтра СВЧ может быть выбран фильтр с любыми электрическими и конструктивными параметрами, для которого имеется хорошо разработанная мето-

днка расчета и обеспечения адекватности прототипа фильтру.

Во-первых, это может быть фильтр нижних частот. В этом случае алгоритм синтеза фильтров, применяемый в теории цепей, претерпевает минимальные изменения при переходе к цепям СВЧ. В основе данной методики лежит замена нормированной текущей частоты прототипа $s_{\text{прот}} = j\omega$ на некоторую функцию $s = f(s_{\text{ФВЧ}})$, вид которой зависит от типа фильтра.

На СВЧ элементы фильтров с сосредоточенными постоянными должны быть заменены элементами для распределенных постоянных.

По известным добротностям резонаторов определяется геометрия СВЧ элементов фильтра.

Во-вторых, для упрощения процедуры синтеза в качестве прототипа может быть выбран не ФНЧ, а фильтр того же типа, что и проектируемый, выполненный на сосредоточенных элементах (обычно по лестничной схеме), в которой нормированные сопротивления продольных ветвей Z_m и проводимости поперечных ветвей Y_{m+1} имеют одинаковую частотную зависимость, а именно:

$$Z_m = jk_m \eta, \quad Y_{m+1} = jk_{m+1} \eta,$$

где $\eta = f(\omega)$ - функция частоты (частотная переменная); k_m, k_{m+1} - постоянные, $m = 1, 3, 5, \dots$ - номер ветви, первая ветвь лестничной схемы ($m = 1$) предполагается, для определенности, последовательной.

Составление ИЧ-прототипа с реальными СВЧ-структурами с частотно-зависимыми элементами связи позволяет установить следующие его недостатки.

1. Неучет (в общей постановке) дисперсии фазовых сдвигов при отражении от элементов связи при расчете нагруженной добротности

$$Q = \left[k\pi |r| / \left(1 - |r|^2 \right) \right] \left[\lambda_{\text{вс}} / \lambda_0 \right]^2,$$

где r - коэффициент отражения от левого и правого краев контура; $k = 1, 2, 3, \dots$ - номер резонанса; $\lambda_0, \lambda_{\text{вс}}$ - длина волны в открытом пространстве и в линии.

2. Неучет отличия длины резонаторов l от полуволновой, что подтверждается отсутствием данного параметра в выражении для нагруженной добротности. Следует, однако, заметить, что в ряде случаев первые два недостатка устраняются путем корректировки длины резонаторов, однако подобные корректировки являются частными и методика получения их неясна.

3. Неучет несимметричности фазочастотной характеристики как линий передачи резонансных звеньев, так и элементов связи.

4. Неучет амплитудно-частотной характеристики элементов связи, т. е. неучет частотной зависимости добротности резонаторов: $Q(\omega_0) \neq Q(\omega_0^+) \neq Q(\omega_0^-)$. Для шпирокополосных структур величина $\Delta Q/Q$ может достигать 15 и более процентов.

5. При определении числа звеньев в ИЧФ не учитываются ни дисперсия ИЧ, ни частотная зависимость фазовых сдвигов при отражении от элементов связи.

6. При синтезе ИЧФ с Чебышевской характеристикой при четном числе звеньев необходимо рассчитывать и вводить в схему идеальные трансформаторы, что увеличивает сроки и стоимость как проектирования, так и производства.

7. В качестве частотной переменной используется не фазовая координата Φ и даже не электрическая длина линии передачи резонатора θ , а относительная частотная расстройка $\eta = \omega/\omega_0 - \omega_0/\omega$.

Неучет неидентичности резонаторов по фазовой координате Φ_i приводит к искажению ЧХ ППФ и ошибкам проектирования. Следовательно, при переходе от НЧ-прототипа к реальному СВЧ ППФ ошибка тем больше, чем больше различие Φ_i отдельных резонаторов.

Кроме перечисленных недостатков необходимо отметить неучет потерь и многомодовости СВЧ линий передачи.

В ряде методов проектирования многозвенных СВЧ-структур в качестве прототипа используется ступенчатый прототип, предложенный Н. Рибле и представляющий собой линию передачи с ТЕМ-волной и скачкообразным изменением волнового сопротивления ρ , от ступеньки (ступенчатый переход).

На основе ступенчатого прототипа рассчитаны и широко используются таблицы, в которых указаны значения перепадов волновых сопротивлений $\dot{q}_i = \rho_{i+1}/\rho_i$ в функции полосы пропускания перехода $2(\Delta f/f_0)$ в зависимости от числа звеньев N и вида характеристики (чебышевская или максимально плоская).

При сравнении ступенчатого прототипа с реальными многозвенными структурами с частотно зависимыми элементами связи и линиями передачи в резонаторе обнаруживаются следующие недостатки рассматриваемой модели.

1. Основной и единственной волной в прототипе считается ТЕМ- волна, для которой дисперсия линии передачи отсутствует.
2. Волновые сопротивления участков ρ_i не зависят от частоты.
3. Фазовые сдвиги при отражении от звеньев (ступеней) равны 0 или π и не зависят от частоты.
4. Модули коэффициентов отражения также не зависят от частоты.
5. Длина одного звена ступенчатого перехода при резонансе точно кратна нечетному числу $\lambda_D/4$, поэтому длина резонатора в ППФ точно равна или кратна $\lambda_D/2$.
6. Электрическая длина линии звена при резонансе точно равна или кратна π .
7. Напряженная добротность резонатора не зависит от частоты.

Таким образом, ступенчатый прототип весьма существенно отличается от реальных устройств с частотно зависимыми элементами связи.

Особенность использования ВДФ-прототипа для синтеза многозвенных фильтрующих и согласующих устройств состоит в том, что многозвенные структуры с непосредственными связями в рамках этого прототипа рассматриваются как структуры с четвертьволновыми связями. Исследованы фазовые и амплитудные условия адекватности ВДФ с непосредственными и четвертьволновыми связями. Установлено, что оба условия выполняются лишь в частном случае определенного соотношения между фазовыми сдвигами от элементов связи ($r_{35} + r_{53} = \pi$) при определенном выборе параметров волновода, материалов и режима работы волновода.

Анализ показал, что для ВДФ-прототипа данное условие при изменении частоты не выполняется, что нарушает адекватность моделей. Так, коэффициент отражения на резонансной частоте точно спроектированного двухзвенного ППФ с максимально плоской характеристикой вместо нулевого значения определяется выражением:

$$|\Gamma| > 0,5C = 0,5 - 0,25(1 - \cos r_{\Sigma}).$$

При $r_{\Sigma 1} = \pi/2$ и $r_{\Sigma 2} = 30^\circ$ соответственно имеем $|\Gamma_1| = 0,5 - 0,25(1 - 0) = 0,25$ и $|\Gamma_2| = 0,5 - 0,25(1 - 0,5) = 0,375$.

То есть, "амплитудные" условия адекватности выполняются только при условии $r_{22} = r_{33} + r_{32} = \pi$. Невыполнение этих условий на других частотах приводит к значительным погрешностям — КСВ на резонансной частоте может достигать значений много больше допустимого, а величина $|\Gamma|$ может превышать требуемое значение в полосе пропускания более чем на порядок!

Что касается фазовых условий адекватности ППФ с непосредственными и четвертьволновыми связями, то неточное их выполнение в общем случае приводит к смещению полосы пропускания ППФ на величину, зависящую как от расстройки Δl , так и от ширины полосы пропускания, причем это смещение может составлять от 10 до 100% от полосы пропускания.

Дальнейшим шагом в разработке более эффективного прототипа многозвенных СВЧ-структур можно считать ВДСЗС-прототип (рис. 1).

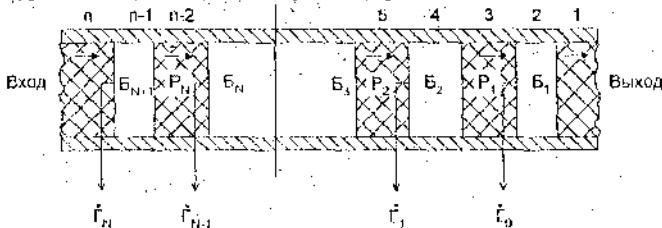


Рис. 1.

В качестве основного типа волны рассматривается волна H_{10} , которая, как известно, обладает дисперсией.

В качестве обобщенной частотной переменной к такому прототипу используется фазовая координата

$$\Phi = 0,5(r_{\Sigma}) = 0,5(r_{11} + r_{33}) - \theta_3.$$

Таким образом, в отличие от рассмотренных выше прототипов ВДСЗС прототип действительно учитывает дисперсию фазовых сдвигов при отражении, что существенно повышает точность проектирования, но не устраняет необходимость дальнейшего совершенствования методов проектирования, поскольку обладает следующими недостатками.

1. Неучет амплитудно-частотных характеристик элементов связи.
2. Неучет наглядности фазовых координат для многозвенной структуры.
3. Неучет многомодовости СВЧ линий передачи.

К дополнительным недостаткам ВДСЗС-прототипа и методов синтеза на его основе можно отнести:

- отсутствие метода синтеза многозвенных ППФ с четвертьволновыми связями;
- отсутствие метода синтеза многозвенных ИЗФ;
- отсутствие метода синтеза многозвенных согласующих устройств;
- неучет многомодовости линий передачи.

В теории проектирования любых устройств одной из важнейших составляющих является математический аппарат, обеспечивающий как достаточную точность, так и производительность процесса проектирования. Дополнительным требованием, предъявляемым к математическому аппарату, должна быть информативность математиче-

ских моделей, построенных на его основе, облегчающая физическое осмысление процесса синтеза.

В методах аналитического синтеза многозвенных СВЧ-структур исходной является математическая модель всей многозвенной структуры.

В результате особое значение приобретают алгоритмы построения этих моделей, соответствующие процедуре наращивания числа звеньев всей структуры.

В зависимости от физических моделей прототипов многозвенных СВЧ-устройств в теории их проектирования используется как аппарат различного рода матриц, так и аппарат рекуррентных формул.

В синтезе многозвенных СВЧ-структур на основе ПЧ-прототипа естественно использовать матрицы, оперирующие характеристиками цепей с сосредоточенными постоянными – матрицы сопротивлений [2], матрицы проводимости [1], матрицы передачи [а].

Достоинством аппарата матриц является его универсальность и простота определения элементов некоторых матриц для каскадного соединения четырехполосников и восьмиполосников.

Дополнительным усовершенствованием аппарата матриц можно считать аппарат теории графов, позволяющий на основе готовых графов отдельных элементов, входящих в рассматриваемое устройство, построить ориентированный граф всего устройства и определить его электрические параметры.

Недостатком математического аппарата как матриц, так и графов, является их сложность и невозможность извлечения некоторых фундаментальных соотношений между обобщенными параметрами волновых структур.

Другим направлением в развитии аппарата как анализа, так и синтеза многозвенных СВЧ-устройств является аппарат рекуррентных формул, в рамках которого обобщенными волновыми характеристиками полей являются комплексные амплитуды волн (падающих, отраженных и прошедших), а также обобщенные волновые параметры структур – коэффициенты отражения R или Γ и коэффициенты прохождения D или H по комплексным амплитудам этих волн.

Основным физическим явлением, обуславливающим частотную избирательность многозвенных СВЧ-структур, является интерференция однонаправленных (однонаправленных) волн.

Как известно, в явлении интерференции основную роль играют не столько амплитуды, сколько фазовые соотношения между взаимодействующими волнами.

Именно поэтому наиболее информативными оказываются те модели волновых структур, в которых фазовые соотношения между взаимодействующими волнами представлены в явном виде.

В методах синтеза на основе ПЧ, ступенчатого и ВДФ прототипов модели СВЧ-структур образованы на основе аппарата матриц и используют переменные Ричардса или Гибле, являющиеся функцией электрической длины линии передачи резонатора θ .

В методе синтеза на основе ВДСЗС-прототипа исходными являются модели многозвенных структур по отраженной волне; т.е. коэффициенты отражения по амплитуде $\Gamma_N(\Phi)$ в функции фазовой координаты Φ . Так для $N=1, 3$ эти выражения имеют вид:

$$\Gamma_1(\Phi) = \frac{(R_2 - R_1) \cos \Phi - j(R_2 + R_1) \sin \Phi}{(1 - R_2 R_1) \cos \Phi - j(1 + R_2 R_1) \sin \Phi} = \frac{A_{01} \cos \Phi + jA_{11} \sin \Phi}{B_{01} \cos \Phi + jB_{11} \sin \Phi}$$

$$\dot{r}_3(\Phi) = \frac{A_{03} \cos \Phi + jA_{13} \sin \Phi + A_{23} \cos \Phi \sin^2 \Phi + jA_{33} \sin^3 \Phi}{B_{03} \cos \Phi + jB_{13} \sin \Phi + B_{23} \cos \Phi \sin^2 \Phi + jB_{33} \sin^3 \Phi}$$

В общем случае, с учетом замены $P = -jg\Phi$

$$\dot{r}_N(\Phi, P) = (A_{NN} \cos^N \Phi)_{r_N(P)} / \left[(B_{NN} \cos^N \Phi)_{r_N(P)} \right]$$

Таким образом, в данных моделях дается полная информация о фазовых соотношениях между взаимодействующими волнами, что выгодно отличает эти модели от всех предыдущих моделей.

На основе результатов, полученных в разделах 1 и 2, определены основные пути совершенствования методов синтеза структур с частотно-зависимыми связями:

- разработка более информативной частотной переменной, учитывающей все виды частотной зависимости основных параметров элементов резонансных звеньев;
- разработка единого прототипа для ППФ и ПЗФ, в частности для ППФ с непосредственными и четвертьволновыми связями;
- разработка таблиц синтеза единого прототипа в функции наиболее информативной переменной;
- разработка моделей резонансных звеньев в многомодовом приближении.

В третьем разделе разрабатываются высокоточные методы синтеза продольно-пропускающих, и продольно-заграждающих многозвенных СВЧ-фильтров.

В соответствии с результатами разделов 1 и 2, вместо условия равенства фазовых координат на границах полосы пропускания, используемого в настоящее время, необходимо применять более точное условие, которое в расширенном виде описывается соотношением

$$\frac{4R_1(\omega_{\Pi}^+) \sin^2 \Phi(\omega_{\Pi}^+)}{1 + R_1^2(\omega_{\Pi}^+) - 2R_1(\omega_{\Pi}^+)R_2(\omega_{\Pi}^+)} = \frac{4R_1(\omega_{\Pi}^-) \sin^2 \Phi(\omega_{\Pi}^-)}{1 + R_1^2(\omega_{\Pi}^-) - 2R_1(\omega_{\Pi}^-)R_2(\omega_{\Pi}^-)}$$

Установлено, что наиболее информативной обобщенной частотной переменной в отличие от фазовой координаты Φ является обобщенная расстройка z , включающая в себя и фазовую координату, и модуль коэффициентов отражения от барьеров.

Повышение точности проектирования в рамках новой переменной достигается на основе фиктивной фазовой координаты Φ_{Φ} , определяемой из условия:

$$\frac{2\sqrt{R_{2L}R_{1L}}}{1 - R_{2L}R_{1L}} \sin \Phi_{\Phi}^+ = \frac{2\sqrt{R_{2P}R_{1P}}}{1 - R_{2P}R_{1P}} \sin \Phi^+$$

и отличающейся от истинной фазовой координаты Φ , следующим образом:

$$\Phi_{\Phi} = \arcsin \left\{ \sqrt{\frac{R_{2L}R_{1L}}{R_{2P}R_{1P}}} \left(\frac{1 - R_{2P}R_{1P}}{1 - R_{2L}R_{1L}} \right) \sin \Phi \right\}$$

Для узкополосных ППФ это соотношение может быть представлено в виде

$$\Phi_{\Phi} \cong \Phi_L \left\{ \sqrt{\frac{R_{2L}R_{1L}}{R_{2P}R_{1P}}} \left(\frac{1 - R_{2P}R_{1P}}{1 - R_{2L}R_{1L}} \right) \right\} = \Phi_L M_L$$

Синтез устройства проводится по средней фиктивной фазовой координате $\Phi_{\Phi\Pi}$

$$\Phi_{\Phi\Pi} = 0,5(|\Phi_{\Phi\Pi+}| + |\Phi_{\Phi\Pi-}|) = 0,5(M_{\Pi+}|\Phi_{\Pi+}| + M_{\Pi-}|\Phi_{\Pi-}|)$$

Введение фиктивной фазовой координаты позволяет с наименьшими затратами использовать имеющиеся методы и алгоритмы синтеза на основе ВДСЗС-протокола для реализации более точных методов на основе новой переменной. Отметим достоинства предложенного метода синтеза.

Во-первых, в его рамках учитываются реальные фазо-частотные характеристики как элементов связи, так и линий передачи резонаторов, в том числе их несимметричность. Во-вторых, учитывается реальная частотная зависимость модулей коэффициентов отражения, в том числе и их несимметричность.

Для повышения точности проектирования многосвязных структур с непосредственными связями и неидентичными резонансными звеньями вводится эффективная фазовая координата на границах носовы пропускания структуры $\Phi_{II,эф}$, равная фазовой координате гипотетической структуры с идентичными звеньями и такой же, как у реального устройства. АЧХ.

Эффективная фазовая координата определяется через истинную расстройку Φ_{II} и корректирующий множитель α : $\Phi_{II,эф} = \alpha \Phi_{II}$.

Для установления возможных значений корректирующего множителя необходимо определить максимальное значение перепада фазовых координат звеньев $\Phi_{II,max}/\Phi_{II,min}$. Как правило, в многосвязных ППФ с непосредственными связями минимальной фазовой координатой обладают крайние резонаторы, а максимальной — центральные (центральный). Следует учесть, что на величину корректирующего множителя оказывают влияние амплитудно-частотные характеристики элементов связи. Для случая, когда эти характеристики не обладают дисперсией, возможные значения коэффициента α определяются соотношением: $1 < \alpha \leq (\Phi_{II,max}/\Phi_{II,min})$. При наличии дисперсии: $1 < \alpha \leq (\Phi_{II,max}/\Phi_{II,min}) \cdot 2(M_{II+} + M_{II-})^{-1}$.

При синтезе структур с неидентичными звеньями и наличии дисперсии амплитудно-частотных характеристик элементов связи проектирование устройства необходимо проводить по уточненной эффективной фазовой координате, т.е. по "эффективной фиктивной" фазовой координате. В этом случае в алгоритмах синтеза фазовая координата Φ_{II} должна быть заменена на фиктивную фазовую координату $\Phi_{II,эф}$.

Для повышения точности и произвольности процесса проектирования ППФ с четвертьволновыми связями разработаны методы синтеза, в рамках которых ППФ с четвертьволновыми связями синтезируются как ППФ с непосредственными связями с введением некоторых изменений.

Первое из них состоит в том, что после вычисления коэффициентов отражения внутренних барьеров ППФ с непосредственными связями производится замена непосредственной связи на четвертьволновую в соответствии с соотношением

$$|R_{75}(\omega_p)| = \left\{ |R_{75}(\omega_p)| + |R_{53}(\omega_p)| \right\} / \left\{ 1 + |R_{75}(\omega_p)| |R_{53}(\omega_p)| \right\}.$$

Второе изменение состоит в учете дополнительного фазового сдвига $\Delta\Phi_5$ и замене фазовых сдвигов при отражении от внутренних барьеров по алгоритму

$$r_{37} = r_{55} + \arctg \frac{(|R_{75}| - |R_{53}|) \sin \Delta\Phi_5}{(|R_{75}| + |R_{53}|) \cos \Delta\Phi_5} - \arctg \frac{(1 - |R_{75}| |R_{53}|) \sin \Delta\Phi_5}{(1 + |R_{75}| |R_{53}|) \cos \Delta\Phi_5}.$$

Предложенный метод позволяет синтезировать ППФ с четвертьволновыми связями с учетом реальных фазо-частотных и амплитудно-частотных характеристик эле-

ментов связи при любом числе звеньев как для максимально плоской, так и чебышевской характеристик.

По разделу 3 сделаны следующие выводы.

1. Разработаны новые методы синтеза ПДФ с непосредственными частотно-зависимыми связями, обеспечивающие существенное повышение точности проектирования и отличающиеся:
 - новой частотной переменной, учитывающей не только фазочастотные характеристики элементов связи и линий передачи звеньев, но и амплитудно-частотные характеристики элементов связи;
 - новым алгоритмом синтеза, учитывающим несимметричность не только фазочастотных, но и амплитудно-частотных характеристик элементов связи;
 - новым алгоритмом синтеза многозвенных структур с ненаданными резонансными звеньями.

2. Разработаны новые методы синтеза ПДФ с четвертьволновыми частотно-зависимыми связями, отличающиеся от известных:
 - новым прототипом (модифицированный ВДСЭС-прототип);
 - новой обобщенной частотной переменной (фиктивная фазовая координата);
 - новым алгоритмом синтеза (синтез ПДФ с четвертьволновыми связями на основе прототипа с непосредственными связями), и обеспечивающие как повышение точности проектирования, так и расширение возможности методов.

В рамках предложенных методов оказывается возможным синтез ПДФ с четвертьволновыми связями с чебышевской характеристикой для четного числа звеньев без введения дополнительных трансформаторов.

3. Разработан метод синтеза ПДФ, отличающийся новым прототипом (ВДСЭС-прототип), новой частотной переменной, новым алгоритмом синтеза и обеспечивающий повышение точности и производительности процесса проектирования.
4. Рассчитаны таблицы синтеза единого прототипа для чебышевской характеристикой в полосе пропускания и функции фазовой координаты, применение которых позволяет унифицировать технологию проектирования многозвенных СВЧ-структур.
5. Применение разработанных методов синтеза позволяет увеличить точность и производительность процесса проектирования, сократить тем самым сроки и стоимость разработки и изготовления новых образцов техники СВЧ.

В четвертом разделе проведена разработка моделей и алгоритмов анализа и синтеза многозвенных структур с двухмодовыми резонансными звеньями.

Наименее сложным из многомодовых резонансных звеньев можно считать двухмодовое резонансное звено, в котором преобразование мод осуществляется лишь в одной из неоднородностей — элементе связи резонатора с линией передачи. Схема этого представлена на рис. 2.

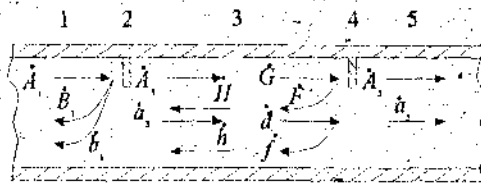


Рис. 2.

Анализ взаимодействия волн в резонаторе 3 с учетом их преобразования позволяет определить выражение для коэффициентов отражения \hat{R} и прохождения \hat{D} первой и второй мод при пассивной структуре первой модой:

$$\hat{R}_{15}(1,1) = \left[\hat{R}_1(1,1) + \hat{D}_1(1,1) \frac{\hat{C}_1 \hat{C}_6 + \hat{C}_2 \hat{C}_3}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} + \hat{D}_1(2,1) \frac{\hat{C}_3 \hat{C}_5 + \hat{C}_1 \hat{C}_4}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} \right];$$

$$\hat{R}_{15}(2,1) = \left[\hat{R}_1(1,1) + \hat{D}_1(1,1) \frac{\hat{C}_1 \hat{C}_6 + \hat{C}_2 \hat{C}_3}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} + \hat{D}_1(2,1) \frac{\hat{C}_3 \hat{C}_5 + \hat{C}_1 \hat{C}_4}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} \right];$$

$$\hat{D}_{15}(1,1) = \hat{T}_1 \hat{D}_2(1,1) \left[\hat{D}_1(1,1) + \hat{R}_1(1,1) \frac{\hat{C}_1 \hat{C}_6 + \hat{C}_2 \hat{C}_3}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} + \hat{R}_1(2,1) \frac{\hat{C}_3 \hat{C}_5 + \hat{C}_1 \hat{C}_4}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} \right];$$

$$\hat{D}_{15}(2,1) = \hat{T}_1 \hat{D}_2(2,2) \left[\hat{D}_1(1,2) + \hat{R}_1(1,2) \frac{\hat{C}_1 \hat{C}_6 + \hat{C}_2 \hat{C}_3}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} + \hat{R}_1(2,2) \frac{\hat{C}_3 \hat{C}_5 + \hat{C}_1 \hat{C}_4}{\hat{C}_5 \hat{C}_6 - \hat{C}_2 \hat{C}_4} \right];$$

где коэффициенты \hat{C}_i определяются через коэффициенты передачи линии резонатора для первой \hat{T}_1 и второй \hat{T}_2 мод, коэффициенты отражения и прохождения n -ой неоднородности для m -ой моды $\hat{R}_n(m, m)$, $\hat{D}_n(m, m)$ и коэффициенты преобразования $\hat{R}_1(m, k)$, $\hat{D}_1(m, k)$, т.е. преобразования моды m в моду k .

$$\hat{C}_1 = \hat{D}_1(1,1) \hat{T}_1^2 \hat{R}_2(1,1); \quad \hat{C}_2 = \hat{R}_1(2,1) \hat{T}_1^2 \hat{R}_2(1,1); \quad \hat{C}_3 = \hat{D}_1(1,2) \hat{T}_2^2 \hat{R}_2(2,2);$$

$$\hat{C}_4 = \hat{R}_1(1,2) \hat{T}_2^2 \hat{R}_2(2,2); \quad \hat{C}_5 = 1 - \hat{R}_1(1,1) \hat{T}_1^2 \hat{R}_2(1,1); \quad \hat{C}_6 = 1 - \hat{R}_1(2,2) \hat{T}_2^2 \hat{R}_2(2,2).$$

Полученные модели являются основой для разработки численных моделей и алгоритмов анализа и синтеза двухмодовых структур, например, двухмодовых ВДФ с одной преобразующей неоднородностью в резонансной звене. В том случае, когда вторая мода является паразитной при заданной длине модуля, могут быть с успехом использованы при анализе и синтезе структур с двумя преобразующими неоднородностями, поскольку интерференцией паразитных волн в резонансной звене можно практически пренебречь. Так, влияние паразитной выделенной моды на фазовую координатную звена и модуль коэффициента отражения преобразующего барьера описывается выражением

$$\Delta \Gamma_1 = -0,5 \alpha \cos \alpha \left\{ \left[r \sin \beta / R_2(1,1) \right] \exp(-2q_2 l_p) \right\},$$

$$\left| R_{13}(1,1) \right|_{\text{доп}} = \left| R_{13}(1,1) \right| + \gamma \exp(-2q_2 l_p) \cos \delta,$$

$$\text{где } \alpha = \left| R_{31}(2,1) R_{31}(1,2) R_{35}(2,2) \right|; \quad \delta = \varphi_{31}(2,1) + \varphi_{35}(1,1) + \varphi_{13}(1,1) + \varphi_{31}(1,2) - 2K_{z3} l_p;$$

$$\beta = \varphi_{31}(2,1) + \varphi_{31}(1,2) + \varphi_{35}(1,1) - 2K_{z3} l_p; \quad \gamma = \left| D_{31}(2,1) R_{35}(2,2) R_{31}(1,2) \right|_{15}(1,1) R_{35}(1,1) \left| \right|.$$

Установлены качественные и количественные показатели влияния заурядной паразитной моды на характеристики резонансного звена, которые позволяют внести коррекцию в алгоритмы синтеза многозвенных ПДФ в рамках двухмодового приближения.

Разработанные модели позволяют произвести уточненный синтез многозвенных структур с учетом многомодовости линии передачи, повысив тем самым точность проектирования.

Пятый раздел посвящен анализу результатов экспериментов — натурального, при котором определялись частотные характеристики полосовых СВЧ-фильтров, спроектированных по разработанным и традиционно применяемым алгоритмам.

Проведенные исследования подтверждают эффективность разработанных методов синтеза при проектировании селективных многозвенных СВЧ устройств.

В ходе проведения экспериментов исследованы частотные характеристики моделей фильтров, спроектированных с использованием разработанных методов, в частотном диапазоне 1,0 — 10,0 см. Экспериментальные результаты отличаются от требуемых значений параметров не более, чем на 5%, что подтверждает отсутствие необходимости настройки и, следовательно, возможность повышения производительности технологического процесса.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и указаны перспективы дальнейшего развития и внедрения разработанных методов и алгоритмов в высокоточные технологические системы производства СВЧ техники.

В приложениях приведены таблицы для синтеза ВДСЗС-прототипа с чебышевской частотной характеристикой и акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполнения диссертационной работы решена задача существенно увеличить точности проектирования многозвенных резонансных структур СВЧ-устройств, что позволяет повысить эффективность технологии производства техники СВЧ путем значительного сокращения доводочных и юстировочных работ.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Выполнена декомпозиция методов синтеза многозвенных структур СВЧ диапазона и проведен анализ основных особенностей элементов синтеза, что позволило определить ключевые моменты в повышении точности проектирования многозвенных фильтрующе-согласующих устройств техники СВЧ.
2. Разработаны методы и алгоритмы синтеза многозвенных структур с непосредственными связями, отличающиеся учетом частотной зависимости фазовых и амплитудные характеристик элементов связи, что обеспечивает повышение точности проектирования многозвенных устройств СВЧ с непосредственными связями и снижение трудоемкости и стоимости настроечных работ.
3. Разработаны методы и алгоритмы синтеза многозвенных структур с четвертьволновыми связями, отличающиеся учетом неидентичности элементов связи и частотной зависимости их характеристик, что обеспечивает повышение точности проектирования многозвенных устройств СВЧ с четвертьволновыми связями и снижение трудоемкости и стоимости настроечных работ.
4. Создан комплект таблиц для расчета параметров прототипов полдосно-пропускающих фильтров и согласующих устройств с чебышевской частотной характеристикой, учитывающего дисперсию элементов связи.
5. Разработаны математические модели и методы анализа многозвенных структур с двухмодовыми резонансными звеньями, позволяющие рассчитывать характеристики неминимально-фазовых фильтров СВЧ с частотно-зависимыми параметрами элементов связи.
6. Разработаны методы синтеза многозвенных структур с двухмодовыми резонансными звеньями, обеспечивающие повышение точности проектирования неминимально-фазовых фильтров СВЧ с частотно-зависимыми параметрами элементов связи.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Подыкин А.В., Покровский Ю.А., Черешнев А.В. Разработка информационно-вычислительных комплексов для высокочастотных технологических систем СВЧ и радиооптического приборостроения // Сб. тезисов докл. 51-й науч. сессии. посв. Дню радио. Часть 1. – М.: 1996 – С. 87-88.

2. Покровский Ю.А., Подыкин А.В., Покровская Л.Ю., Черешнев А.В. Автоматизированное проектирование фильтрующих и согласующих СВЧ-устройств на основе ВДСЗ-протокола: Учебное пособие. – Тула, ТулГУ, 1997. – 119с.

3. Черешнев А.В., Бедня А.В. Пути повышения эффективности физико-математического обеспечения вычислительных систем информационно-вычислительных комплексов СВЧ приборостроения // Известия ТулГУ. Радиотехника и радиотехника СВЧ. – 1997. – вып.1. – С. 46 – 53.

4. Покровский Ю.А., Подыкин А.В., Покровская Л.Ю., Черешнев А.В. Совершенствование физико-математического обеспечения вычислительных систем информационно-вычислительных комплексов СВЧ- и оптического приборостроения // Сб. тезисов докладов XIX научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1997. – С. 30.

5. Черешнев А. В., Зуева Н. В. Совершенствование математического аппарата САПР многоэлементных фильтрующих и согласующих СВЧ-устройств на основе модифицированных рекуррентных формул // Тезисы докладов Всероссийской НТК "Новые информационные технологии в научных исследованиях радиоэлектроники". – Рязань, 1997. – С. 59-60.

6. Черешнев А. В., Бондаренко В. П. Повышение эффективности математического обеспечения САПР фильтрующих и согласующих СВЧ-устройств на основе новой частотной переменной // Тезисы докладов Всероссийской НТК "Новые информационные технологии в научных исследованиях радиоэлектроники". – Рязань, 1997. – С. 61-62.

7. Кудряшов А.Н., Черешнев А.В. Декомпозиция процесса измерения и пути повышения точности СВЧ измерителей параметров диэлектриков // Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. Методы и средства измерения физических величин. Часть 1. – Нижний Новгород, – 1997. – С. 8.

8. Подыкин А.В., Кудряшов А.Н., Черешнев А.В. Оптимизация фиксируемого состояния измерительного СВЧ-резонатора // Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. Методы и средства измерения физических величин. Часть 1. Нижний Новгород, 1997. – С. 30.

9. Кудряшов А.Н., Черешнев А.В., Покровская Л.Ю. Минимизация погрешностей измерения n и $\tan \delta$ в резонансном СВЧ-измерителе в методе индикации состояния по отраженной волне // Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. Методы и средства измерения физических величин. Часть 1. – Нижний Новгород, 1997. – С. 33.

10. Кудряшов А.Н., Черешнев А.В. Минимизация погрешности измерения n в резонансном СВЧ-измерителе в методе индикации состояния по волне в резонаторе // Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. Методы и средства измерения физических величин. Часть 1. – Нижний Новгород, 1997. – С. 31.

11. Черешнев А.В., Бедим А.В. Итерационный синтез СВЧ-фильтров на основе нового прототипа // Тезисы докладов Всероссийской студенческой конференции "Гагаринские чтения" – М.: МАТИ им. Циолковского, 1998. – С. 56.

12. Польшкин А.В., Кудряшов А.Н., Черешнев А.В., Покровская Л.Ю. Измеритель параметров диэлектриков в диапазоне СВЧ // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1998. – С. 8.

13. Польшкин А.В., Кудряшов А.Н., Черешнев А.В., Покровская Л.Ю. Измерение флуктуаций диэлектрической проницаемости в различных образцах СВЧ – материалов // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1998. – С. 9.

14. Черешнев А.В. Синтез многозвенных согласующих устройств // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1998. – С. 13.

15. Черешнев А.В., Бедим А.В. Физико-математические модели СВЧ-фильтров // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. Тула, 1998. – С. 36.

16. Черешнев А.В., Бедим А.В. Алгоритмы проектирования фильтрующих СВЧ-устройств // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. Тула, 1998. – С. 14.

17. Черешнев А.В., Бедим А.В. Алгоритм синтеза многозвенных СВЧ-фильтров // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1998. – С. 37.

Подписано в печать Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.
 Офсетная печать. Усл. печ. л. 60. Усл. кр.-огт. 100. Уч. изд. л. 99.
 Тираж 50 экз. Заказ 706.
 • Тульский государственный университет. 300600, г. Тула, пр. Ленина, 92.
 Редакционно-издательский центр Тульского государственного университета.
 300600, г. Тула, ул. Болдина, 151