

ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

РГБ/ОД

- 9 НОЯ 2000

ПОКРОВСКАЯ ЛЮДМИЛА ЮРЬЕВНА

**МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МНОГОЗВЕННЫХ
ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ТЕХНИКИ СВЧ**

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 2000

Работа выполнена на кафедре РЭ Тульского государственного университета

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
доцент Е. А. Макарецкий

Официальные оппоненты:

академик МАИ,
заслуженный деятель науки и
техники РФ,
доктор технических наук,
профессор Басалов Ф. А.

кандидат физико-матема-
тических наук,
доцент Н. Ф. Ряполов

Ведущая организация:

Тульский филиал Коломенского
конструкторского бюро
машиностроения

Защита диссертации состоится "6" июля 2000г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 063.47.09 в Тульском государственном университете по адресу: 300600, г. Тула, пр. Ленина, 92 (9^й учебный корпус, ауд. 101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "3" июня 2000г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., проф.



Е. В. Ларкин

3845.74-015с116.0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение эффективности существующих радиотехнических систем специального назначения, как и разработка новых образцов техники СВЧ в сложившейся экономической ситуации невозможны без существенного сокращения сроков и стоимости обработки элементов и устройств СВЧ-диапазона.

Однако, современное производство СВЧ-устройств остается трудоемким и малопроизводительным процессом. В значительной степени это относится к многозвенным резонансным структурам СВЧ-диапазона, выполняющим роль частотно-избирательных устройств.

Задача создания частотно-избирательных устройств СВЧ-диапазона является в электродинамике СВЧ одной из ключевых. Фильтрующие устройства входят в состав большинства СВЧ-узлов. Кроме классических применений в качестве устройств подавления частотных составляющих сложного сигнала, СВЧ-фильтры используются и для решения задач разделения частот в многоканальных распределительных устройствах.

Несмотря на существенные успехи в теории проектирования многозвенных фильтрующих и согласующих устройств СВЧ-диапазона, связанных с работами А.Л. Фельдштейна, Л.Р. Явича, Б.Ю. Капилевича, Л.В. Алексейчика, М.Е. Ильченко, В.А. Коробкина, Ю.В. Егорова, В.В. Никольского, Нарытника, Федорова, Малкова Г.А., Мирских Г.А., А.В. Польшкина, А.В. Черешневá в России и П. Ричардса, Н. Рибле, Д. Маттея, Л. Янга, Е. Джонса в США, А. Матсумото в Японии, и многих других за рубежом, проблема сроков и стоимости обработки новых образцов техники СВЧ остается нерешенной.

Основной причиной, не позволяющей решить проблему, является отсутствие методов синтеза многозвенных резонансных структур, учитывающих поглощение в самом процессе синтеза, а не на завершающей стадии, как это принято в известных методах.

Поэтому задача создания методов синтеза диссипативных структур является весьма важной и актуальной, поскольку ее решение позволит существенно повысить эффективность технологии производства техники СВЧ путем значительного сокращения и даже полной ликвидации доводочных и настроечных работ.

Объект исследования диссертации — диссипативные многозвенные волноводно-диэлектрические структуры техники СВЧ и особенности технологии их проектирования и производства.

Предмет исследования диссертации — взаимосвязанная совокупность методов, моделей и алгоритмов проектирования многозвенных резонансных диссипативных структур с распределенными постоянными, обеспечивающая, путем повышения точности их проектирования, снижение сроков и стоимости технологических процессов производства техники СВЧ.

Целью работы является сокращение сроков и стоимости обработки техники СВЧ на основе резонансных многозвенных диссипативных структур путем существенного уменьшения объема или полного исключения настроечных и доводочных работ за счет повышения точности проектирования.

Задачи исследований:

1. Анализ известных методов синтеза идеальных многозвенных резонансных СВЧ-структур.
2. Разработка методов синтеза идеальных СВЧ-структур как основы методов синтеза диссипативных СВЧ-структур.
3. Разработка моделей и алгоритмов анализа диссипативных многозвенных волноводно-диэлектрических СВЧ-структур.
4. Разработка методов, моделей и алгоритмов синтеза диссипативных резонансных многозвенных СВЧ-структур.
5. Синтез реальных СВЧ-структур и их экспериментальные исследования.

На защиту выносятся:

1. Новый прототип многозвенных устройств на связанных линиях, учитывающий отличие волн от поперечных и наличие поглощения.
2. Модели прямого аналитического синтеза многозвенных структур с непосредственными связями..
3. Метод синтеза многозвенных структур с существенно неидентичными резонансными звеньями.
4. Математические модели ВДСЗС-прототипа с учетом поглощения как в линии передачи, так и в элементах связи.
5. Метод синтеза диссипативных многозвенных структур.
6. Модели и алгоритмы синтеза одно-, двух- и трехзвенной диссипативных структур методом неопределенных коэффициентов.
7. Модели и алгоритмы преобразования элементов матрицы рассеяния для диссипативных структур.

Методы исследования. Для получения основных теоретических результатов использованы методы классической электродинамики, теории функций комплексной переменной, методы математической физики.

Научная новизна. В результате выполнения работы:

1. Разработан (совместно с А.В. Польшкиным) новый прототип многозвенных устройств на связанных линиях, учитывающий отличие волн в линиях от поперечных, а также дисперсию элементов связи и поглощение, обеспечивающий повышение точности проектирования фильтрующих устройств данного типа.
2. Предложен обобщенный прототип многозвенных диссипативных структур – ВДСЗС-прототип с поглощением, позволяющий учесть влияние поглощения не только в линиях передачи резонансных звеньев, но и в элементах связи, что обеспечивает повышение точности проектирования.
3. Разработаны модели прямого аналитического синтеза многозвенных фильтрующих и согласующих устройств, обеспечивающих существенное по-

вышение производительности процесса проектирования.

4. Разработаны модели и алгоритмы синтеза структур с неидентичными звеньями, обеспечивающие повышение точности их проектирования.

5. Установлены соотношения между элементами матрицы рассеяния – однозвенных и двухзвенных диссипативных структур как с непосредственными связями, так и с четвертьволновыми связями, обеспечивающие создание алгоритмов наращивания и редукции математических моделей многозвенных диссипативных структур.

6. Разработан алгоритм наращивания математических моделей диссипативных структур с непосредственными и четвертьволновыми связями. (на основе алгоритма В.И. Бондаренко для идеальных структур), обеспечивающий существенное повышение точности и производительности процесса анализа многозвенных диссипативных структур.

7. Разработан алгоритм редукции математических моделей многозвенных диссипативных структур с непосредственными и четвертьволновыми связями (на основе алгоритмов Бондаренко В.И. для идеальных структур) – математический аппарат методов синтеза диссипативных структур: классический и метод неопределенных коэффициентов.

8. Разработаны методы синтеза многозвенных диссипативных структур по отраженной и проходящей волнам, обеспечивающие значительное повышение точности проектирования реальных многозвенных СВЧ-структур.

Практическая ценность реализации результатов. Применение разработанных методов, моделей и алгоритмов в проектировании многозвенных фильтрующих и согласующих устройств как с непосредственными так и четвертьволновыми связями при использовании материалов с разбросом параметров в пределах заданного допуска почти полностью исключает необходимость в технологических операциях подгонки и подстройки новых образцов техники СВЧ.

По результатам исследований изданы учебные пособия: “Обобщенный волновой синтез многозвенных структур с распределенными параметрами на основе ВДСЗС-прототипа” и “Автоматизированное проектирование фильтрующих и согласующих СВЧ-устройств на основе ВДСЗС–прототипа”, используемые в учебном процессе кафедры “Радиоэлектроника” ТулГУ при изучении курсов “Электродинамика и распространение радиоволн” и “Устройства СВЧ и антенны”.

Работа выполнялась по грантам МО РФ “Фундаментальные исследования волновых процессов в многозвенных СВЧ структурах и разработка нового метода их проектирования.”

Обоснованность и достоверность результатов работы. Теоретические результаты диссертационной работы получены строгообоснованными методами классической электродинамики, а также методами рекуррентных формул Власова и Покровского.

Контроль результатов исследований осуществлялся путем:

- проверки выполнения законов сохранения энергии;
- сравнение с известными тестовыми результатами;
- сравнение с экспериментально полученными результатами;

Публикации и апробация работы. По материалам диссертации опубликовано 23 печатных работы, сделано 11 докладов на международных и всероссийских конференциях.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 5 разделов, заключения и приложения. Содержит 165 страниц основного текста, 17 рисунков, 3 таблиц, библиографию из 108 наименований, приложений, акты внедрения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, её научная новизна, основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен анализ известных методов синтеза идеальных многозвенных структур с точки зрения их пригодности для разработки на их основе методов синтеза структур с потерями. Установлены особенности и недостатки известных методов и их основных составляющих. Так, в методах синтеза, основанных на низкочастотных прототипах невозможно учесть как дисперсию, так и поглощение в элементах связи, что делает эти методы непригодными для синтеза диссипативных структур.

В методах синтеза на основе ступенчатого прототипа элементами связи являются скачки волнового сопротивления, в которых также невозможно описать ни дисперсию, ни поглощение в элементах развязки.

Методы синтеза на основе ВДФ- прототипа успешно работают лишь при определенном сочетании электрических параметров звеньев, что затрудняет их использование в качестве обобщенного метода синтеза структур с потерями.

Наиболее перспективными являются методы, основанные на ВДСЗС- прототипе, поскольку они в принципе позволяют учесть все реальные характеристики как линий передачи резонаторов, так и элементов связи.

Однако эти методы не обобщены на многозвенные структуры с неидентичными резонансными звеньями, а также на структуры на основе связанных линий передачи. Кроме того, отсутствуют методы прямого аналитического синтеза структур при числе звеньев более 3^x .

В соответствии с выше изложенным во втором разделе произведено обобщение ВДСЗС- прототипа и методов анализа и синтеза на его основе на многозвенные структуры на связанных линиях и разработаны математические модели прямого аналитического синтеза ВДСЗС- прототипа.

Простейший однозвенный фильтр на связанных линиях (рисунок 1) содержит следующие основные элементы: элементы связи ЭС₁ и ЭС₂ и резонатор Р, причем участок III есть линия передачи резонатора.

Как видно из схемы, для унификации с ВДСЗС-прототипом линии 3 и 5 на участке II и линии 5, 7 на участке IV считаются частью элементов связи, а линия 5 на участке III – линией собственно резонатора.

Для использования ранее развитой теории проектирования фильтров на основе ВДСЗС-прототипа необходимо определить коэффициенты отражения от элементов связи и коэффициенты прохождения через эти элементы.

Для левого элемента связи отраженная от него волна в сечении $x = 0$ и коэффициент отражения описываются выражениями

$$B_3(0) = A_3(0) \left[\cos^2(l_3/L_{св}) \right] e^{-j2K_{xp}l_3} \dot{R}_3 [1 - \dot{R}_{\Sigma 35}]^{-1}; \quad (1)$$

$$\dot{R}_{\Sigma 35} = -\dot{R}_3 \dot{R}_5 e^{-jK_{35}l_3} e^{-jK_{53}l_3} \sin^2(l_3/L_{св}), \quad (2)$$

где: \dot{R}_3 – коэффициент отражения от конца изолированной линии 3; \dot{R}_5 – коэффициент отражения от конца изолированной линии 5; $\dot{R}_{\Sigma 35}$ – коэффициент отражения за цикл по петле обратной связи в линиях 3,5 на участке II, учитывающий переход волны из линии 3 в линию 5 и обратно с учетом фазового сдвига ($-\pi/2$) при переходе.

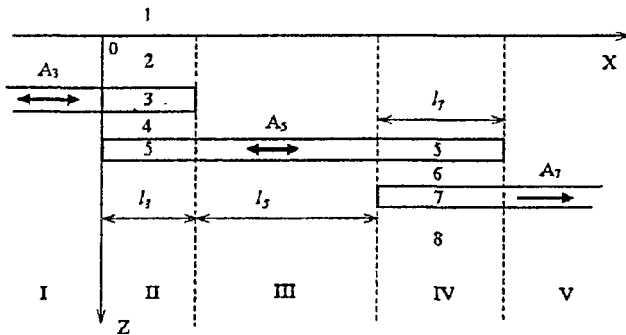


Рисунок 1 – Схема однозвенного фильтра на связанных линиях

Проходящая через элемент связи волна в сечении $x = l_3$ в линии 5

$$A_5(l_3) = A_1(0)(-j)e^{-jK_{x3}l_3} \cdot \frac{(1 + \dot{R}_3 \dot{R}_5 e^{-jK_{x3}l_3} e^{-jK_{x5}l_3}) \sin(l_3/L_{\text{св}})}{1 - \dot{R}_{\Sigma 35}}. \quad (3)$$

Таким образом, коэффициент отражения от элемента связи $\dot{R}_{I,III}$ и коэффициент прохождения $\dot{D}_{I,III}$ описываются соответственно выражениями

$$\dot{R}_{I,III} = \frac{\dot{R}_3 e^{-j2K_{x3}l_3} \cos(l_3/L_{\text{св}})}{1 + \dot{R}_3 \dot{R}_5 e^{-j(K_{x3}l_3 + K_{x5}l_3)} \sin^2(l_3/L_{\text{св}})}; \quad (4)$$

$$\dot{D}_{I,III} = -je^{-jK_{x3}l_3} \frac{|1 + \dot{R}_3 \dot{R}_5 e^{-j(K_{x3}l_3 + K_{x5}l_3)}| \sin(l_3/L_{\text{св}})}{1 + \dot{R}_3 \dot{R}_5 e^{-j(K_{x3}l_3 + K_{x5}l_3)} \sin^2(l_3/L_{\text{св}})}; \quad (5)$$

Анализ выражений (4), (5) показывает, что в них учтена обратная связь с суммарным коэффициентом передачи (по амплитуде) $(\dot{R}_{I,III})_{\text{о.с}}$ за цикл:

$$\begin{aligned} (\dot{R}_{I,III})_{\text{о.с}} &= (-j)^2 \dot{R}_3 \dot{R}_5 e^{-j(l_3(K_{x3} + K_{x5}))} = \\ &= |R_3 R_5| \exp[j(-\pi - K_{x3}l_3 - K_{x5}l_3 + r_3 + r_5)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Изменение амплитуды волны (без учета поглощения в линии)

$$|R_{I,III}|_{\text{о.с}} = |R_3 R_5|. \quad (7)$$

Изменение фазы за цикл

$$r_{\Sigma \text{о.с}} = r_3 + r_5 - \pi - 2K_{x3}l_3. \quad (8)$$

Математическая модель элемента связи в функции фазовой координаты Φ :

$$\begin{aligned} \dot{R}_{I,III}(\Phi) &= \frac{|R_3| e^{j2\Phi} e^{-jr_5} \cos^2(l_3/L_{\text{св}})}{1 + |R_3 R_5| e^{j2\Phi} \sin^2(l_3/L_{\text{св}})} = \frac{|R_3| e^{j2\Phi} e^{-jr_5} \cos^2(l_3/L_{\text{св}})}{e^{-j\Phi} + |R_3 R_5| e^{j2\Phi} \sin^2(l_3/L_{\text{св}})} = \\ &= e^{j(\Phi - r_5)} \frac{|R_3| \cos^2(l_3/L_{\text{св}})}{[1 + |R_3 R_5| \sin^2(l_3/L_{\text{св}})] \cos \Phi - j[|R_3 R_5| \sin^2(l_3/L_{\text{св}})] \sin \Phi}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{R}_{I,III}(\Phi) = |R_{I,III}(\Phi)| e^{jR_{I,III}(\Phi)}; \quad (10)$$

$$r_{I,III}(\Phi) = (\Phi - r_5) + \operatorname{arctg} \frac{|1 - |R_3 R_5| \sin^2(l_3/L_{CB})| \sin \Phi}{|1 + |R_3 R_5| \sin^2(l_3/L_{CB})| \cos \Phi}; \quad (11)$$

$$|R_{I,III}(\Phi)| = \frac{|r_3| \cos^2(l_3/L_{CB})}{\sqrt{|1 + |R_3 R_5|^2 \sin^4(l_3/L_{CB}) + 2|R_3 R_5| \sin^2(l_3/L_{CB}) (\cos^2 \Phi - \sin^2 \Phi)}};$$

$$\Phi = 0,5(r_3 + r_5 - 2K_{x3}l_3) = 0,5(r_{\Sigma})_{o.c.} \quad (12)$$

Известные модели и классический метод синтеза ВДЗСЗ-прототипа, могут быть существенно упрощены за счет исключения наиболее трудоемких этапов по расчету промежуточных коэффициентов и редукции системы за счет использования специальных формул для непосредственного расчета коэффициентов R_i через корни P_i^y, P_i^{3H} и нормирующие множители K_i .

Так, для трехзвенной структуры эти формулы имеют вид:

$$(R_4)_1 = \frac{1 + \sum_{i=1}^3 P_i^{3H} + \prod_{i=1}^3 P_i^{3H} + P_1^{3H}(P_2^{3H} + P_3^{3H}) + P_2^{3H}P_3^{3H}}{[1 + (P_1^y + P_3^y) + P_1^y P_3^y] K_3}; \quad (13)$$

$$(R_4)_2 = \frac{[1 - (P_1^y + P_3^y) + P_1^y P_3^y] K_3}{1 - \sum_{i=1}^3 P_i^{3H} + \prod_{i=1}^3 P_i^{3H} + P_1^{3H}(P_2^{3H} + P_3^{3H}) + P_2^{3H}P_3^{3H}}; \quad (14)$$

$$(R_3)_1 = \frac{(P_1^y + P_3^y) - 2P_1^y P_3^y - R_4 \prod_{i=1}^3 P_i^y - R_4 \sum_{i=1}^3 P_i^{3H}}{[(P_1^y + P_2^y) - \prod_{i=1}^3 P_i^y - \sum_{i=1}^3 P_i^{3H}] + \frac{2R_4(P_1^{3H}P_2^{3H} + P_1^{3H}P_3^{3H} + P_2^{3H}P_3^{3H})}{[(P_1^y + P_2^y) - \prod_{i=1}^3 P_i^y - \sum_{i=1}^3 P_i^{3H}]}}; \quad (15)$$

$$(R_3)_2 = \frac{R_4(P_1^y + P_3^y + 2P_1^y P_3^y) - \prod_{i=1}^3 P_i^{3H} - \sum_{i=1}^3 P_i^{3H}}{(P_1^y + P_3^y) - R_4 \prod_{i=1}^3 P_i^y - R_4 \sum_{i=1}^3 P_i^{3H}}$$

$$-\frac{2(P_1^{3H} P_2^{3H} + P_1^{3H} P_3^{3H} + P_2^{3H} P_3^{3H})}{(P_1^4 + P_3^4) - R_4 \prod_{i=1}^3 P_i^4 - R_4 \sum_{i=1}^3 P_i^{3H}}; \quad (16)$$

В третьем разделе разработаны модели и алгоритмы синтеза многозвенных структур с неидентичными звеньями. Существующие методы синтеза каскадных многозвенных фильтрующих и согласующих устройств предполагают идентичность резонансных звеньев или с точки зрения электрической длины \mathcal{G} линии передачи резонаторов, или фазовых координат Φ резонаторов в целом.

В тоже время большинство реальных СВЧ- и оптических фильтров и согласующих устройств представляют собой каскадные соединения звеньев, у которых различны как электрическая длина линии передачи \mathcal{G} , так и фазовые координаты Φ .

Следует отметить особенность известных методов синтеза: расчет числа звеньев N и коэффициентов отражения от барьеров R_i производится в предположении идентичности резонаторов. Но после расчета N и R_i осуществляется точный расчет геометрической длины l_{pi} каждого из резонаторов, в результате чего обеспечивается идентичность всех резонаторов лишь на резонансной частоте. Поскольку геометрическая длина резонаторов различна и различны барьеры, то частотные зависимости $\mathcal{G}(\omega)$ и $\Phi(\omega)$ для различных резонаторов различны.

Так, например, в ступенчатом переходе с прямоугольного волновода на микрополосковую линию (МПЛ) используются резонансные звенья, в которых в качестве линии передачи применяются П-образные волноводы с различной высотой выступа. В таких волноводах различна критическая длина волны λ_{KPi} , и поэтому при равенстве электрической длины ступенек $\mathcal{G}_{pi} = \mathcal{G}_{pk}$ на резонансной частоте ω_p зависимость длины ступенек от частоты неодинакова: $\mathcal{G}_i(\omega) \neq \mathcal{G}_k(\omega)$.

В фильтрующих и согласующих устройствах на основе ВДСЗС при числе звеньев более двух ($N > 2$) неодинаковыми становятся $(N+1)/2$ резонаторов.

Неучет различия частотных зависимостей $\mathcal{G}(\omega)$ и $\Phi(\omega)$ различных звеньев приводит к значительным погрешностям при проектировании таких устройств, а также к существенному увеличению трудоемкости процесса производства за счет увеличения трудоемкости подстроечных операций.

Для получения коэффициента отражения от двузвенной структуры с неидентичными звеньями используем известный алгоритм наращивания математических моделей каскадных структур с непосредственными связями:

$$\dot{r}_2(\Phi_2) = \frac{R_3 - \dot{r}_1(\Phi_1)e^{j2\Phi_1}}{1 - R_3\dot{r}_1(\Phi_1)e^{j2\Phi_1}}. \quad (17)$$

Модели синтеза двузвенных устройств с максимальноплоской характеристикой имеют вид:

$$R_{2кр} = -\frac{C(1+R_1^2)}{2R_1(1-C)} \pm \sqrt{\left[\frac{C(1+R_1^2)}{2R_1(1-C)}\right]^2 + \frac{1+C}{1-C}},$$

$$R_{2кр} = -\frac{C}{h}\sin^2\Phi_n + \sqrt{\left(\frac{C}{h}\sin^2\Phi_n\right)^2 + 1}. \quad (18)$$

Ширина полосы пропускания двузвенной структуры

$$2|\Delta\Phi_n| = 2\arcsin\sqrt{\frac{h(1-R_{2кр}^2)}{2R_{2кр}C}}, \quad (19)$$

где $C = \sin\Phi_2 / \sin\Phi_1$.

Из формулы (17) видно, что с увеличением коэффициентов C при $\Phi_n = const$ требуемое значение R_2 оказывается меньше, чем при $C = 1$. Наоборот, как видно из формулы (18), при том же значении $R_{2кр}$ рост C вызывает сужение полосы пропускания.

В четвертом разделе разработаны методы, модели и алгоритмы синтеза многозвенных структур с учетом поглощения. Одной из важнейших особенностей реальных СВЧ-устройств является наличие в них потерь энергии, в том числе в результате поглощения.

Существующие методы проектирования таких устройств либо пренебрегают поглощением вообще, либо вносят некоторые поправки в результаты синтеза идеальных устройств [3, 30, 31]. Как правило, в этих случаях учитывается лишь поглощение в линиях передачи звеньев и не учитывается поглощение в элементах связи (барьерах).

На самом деле, как будет показано выше поглощение имеет место во всех элементах звена: как в линиях передачи, так и в устройствах связи (развязки).

Поглощение в элементах связи приводит к тому, что коэффициент отражения от реального элемента (барьера) \tilde{R}_i по сравнению с коэффициентом отражения от идеального барьера R_i уменьшается пропорционально коэффициенту ослабления отражательной способности $LR(i)$: $\tilde{R}_i = R_i LR(i)$. Аналогично, коэффициент прохождения волны через барьер с поглощением \tilde{h}_i ослабляется в $Lh(i)$ раз: $\tilde{h}_i = h_i Lh(i)$.

Поглощение в линии передачи звена вызывает уменьшение коэффициента передачи (по мощности) самой линии в T_i раз.

И, наконец, наличие поглощения во всех элементах звена вызывает изменение в одном из фундаментальных соотношений между элементами матрицы рассеяния: $|\dot{S}_{11}\dot{S}_{22} - \dot{S}_{12}\dot{S}_{21}| = |\dot{R}_{13}\dot{R}_{31} - \dot{D}_{13}\dot{D}_{31}| \equiv |F_1| < 1$.

Особенность устройств с поглощением состоит в том, что количественные характеристики поглощения зависят не только от поглощательных свойств материалов, но и от ряда других конструктивных параметров (например, размеров), которые априорно неизвестны [35].

Поэтому синтез устройств с поглощением в качестве основного этапа включает синтез идеального прототипа, по параметрам (размерам, структуре и материалам) которого определяются коэффициенты ослабления $LR(i)$, T_i , $Lh(i)$, учитывающие поглощение. Эти коэффициенты, как и параметры идеального прототипа, являются первым приближением в итерационном процессе проектирования, т.е. $[T_i]_1$, $[LR(i)]_1$, $[Lh(i)]_1$. Полученные в первом приближении коэффициенты ослабления используются в качестве исходных констант в алгоритмах проектирования или прототипа, или самого устройства во втором приближении: $[T_i]_2$, $[LR(i)]_2$, $[Lh(i)]_2$. Далее описанный процесс повторяется до тех пор, пока не будет обеспечена необходимая точность синтеза.

Как правило, изменение коэффициентов ослабления после второй итерации совершенно незначительны, и в дальнейшем эти коэффициенты можно считать неизменными. Синтез прототипов и устройств должен проводиться по специальным алгоритмам, использующим математические модели устройств с поглощением.

Установлены коэффициенты ослабления отражательной и пропускной способности границ раздела L_{mn} для волн типа Н и Е и барьеров в виде отрезков запредельного волновода с толщиной d и постоянной затухания q . Так, например, для первого барьера многозвенной структуры:

$$LR(1) = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{L_{32}^2 + L_{12} \exp(-4q_2 d_2) - 2L_{12} L_{32} \exp(-2q_2 d_2) \cdot \cos(\tau_{12} - r_{32} - 2\beta_2 d_2)}{1 + L_{12}^2 L_{32}^2 \exp(-4q_2 d_2) - 2L_{12} L_{32} \exp(-2q_2 d_2) \cdot \cos(\tau_{12} + r_{32} - 2\beta_2 d_2)}},$$

$$Lh(1) = \sqrt{\frac{(1 + L_{32}^2 + 2L_{32} \cos r_{32})(1 + L_{12}^2 - 2L_{12} \cos r_{12})}{\exp(2q_2 d_2) + L_{12}^2 L_{32}^2 \exp(-2q_2 d_2) - \cos(r_{12} + r_{32} - 2\beta_2 d_2)}} \times |h_1|^{-1},$$

где R_1 и h_1 параметры идеальной структуры.

Установлены математические модели и алгоритмы синтеза многозвенных структур с учетом поглощения во всех элементах структуры.

Коэффициент передачи однозвенной резонансной структуры по мощности

$$\begin{aligned} |\tilde{h}_{31}(\Phi, T)|^2 &= \bar{P}_{\text{вых}}(\Phi, T) / \bar{P}_{\text{вх}} = |h_1|^2 |Lh(1)|^2 |h_1|^2 |Lh(2)|^2 \times \\ &\times T_1 \left\{ [1 - R_1 R_2 T_1 LR(1) LR(2)]^2 + 4 R_1 R_2 T_1 LR(1) LR(2) \sin^2 \Phi \right\}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$|h_1|^2 = 1 - R_1^2; \quad |h_2|^2 = 1 - R_2^2. \quad (21)$$

Заметим, что индексы 1 и 2 в параметрах h , R , LR , Lh обозначают номера барьеров, а индекс 1 в параметрах T и Φ – номер резонатора или резонансного звена (рисунок 1.1).

Коэффициент отражения по амплитуде от однозвенной структуры с учетом поглощения

$$\tilde{\Gamma}_1(\Phi, T) = \frac{C_{01} \cos \Phi_1 + jC_{11} \sin \Phi_1}{D_{01} \cos \Phi_1 + jD_{11} \sin \Phi_1}, \quad (22)$$

где

$$\begin{cases} C_{01} = R_2 LR(2) - F_2 R_1 LR(1) T_1; \\ C_{02} = R_2 LR(2) + F_2 R_1 LR(1) T_1; \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} D_{01} = 1 - R_2 LR(2) R_1 LR(1) T_1; \\ D_{02} = 1 + R_2 LR(2) R_1 LR(1) T_1; \end{cases} \quad (24)$$

$$F_2 = R_2^2 \{ [LR(2)]^2 \} + (1 - R_2^2) \{ [Lh(2)]^2 \}. \quad (25)$$

Коэффициент отражения по мощности однозвенной резонансной структуры с учетом поглощения

$$\begin{aligned} |\tilde{\Gamma}_1(\Phi, T)|^2 &= \bar{P}_{\text{отр}} / \bar{P}_{\text{над}} = \frac{C_{01}^2 + (C_{11}^2 - C_{01}^2) \sin^2 \Phi_1}{D_{01}^2 + (D_{11}^2 - D_{01}^2) \sin^2 \Phi_1} = \\ &= \frac{[R_2 LR(2) - F_2 R_1 LR(1) T_1]^2 + 4R_2 LR(2) R_1 F_2 LR(1) T_1 \sin^2 \Phi}{[1 - R_2 LR(2) R_1 LR(1) T_1]^2 + 4R_2 LR(2) R_1 LR(1) T_1 \sin^2 \Phi} \end{aligned} \quad (26)$$

где $\Phi = 0,5r_{23} = 0,5(r_{31} + r_{35} - 2\gamma_3 l_3)$.

Относительная величина мощности потерь в однозвенной резонансной структуре

$$\begin{aligned} \Pi_1(\Phi, T) &= \tilde{P}_{\text{пот}} / \tilde{P}_{\text{над}} = 1 - |h_1(\Phi)|^2 - |\Gamma_1(\Phi)|^2 = \\ &= \frac{(D_{01}^2 - C_{01}^2) + [(D_{11}^2 - D_{01}^2) - (C_{11}^2 - C_{01}^2)] \sin^2 - T_1^2 |h_1|^2 |h_2|^2 |Lh(1)|^2 |Lh(2)|^2}{D_{01}^2 + (D_{11}^2 + D_{01}^2) \sin^2 \Phi_1} \end{aligned} \quad (27)$$

Условие согласования

$$\begin{aligned} [R_2 LR(2) - F_2 R_1 LR(1) T_1]^2 &= 0. \\ R_i \cdot LR(i) &= \tilde{R}_i \end{aligned} \quad (28)$$

Ширина полосы пропускания по отраженной волне на уровне Γ_{\max}

$$2|\sin \Phi_{\Pi}| = 2|\Gamma|_{\max} \left[1 - F_2 (\tilde{R}_1 T)^2 \right] \left[2\sqrt{1 - \frac{|\Gamma|_{\max}^2}{F_2} F_2 \tilde{R}_1 T} \right]^{-1} \quad (29)$$

Ширина полосы пропускания по мощности проходящей волны на уровне 0,5:

$$2 \sin \Phi_{0,5} = 2(1 + \eta_1)(1 - R_1^2) [2R_1 T_1 \sqrt{F_2}]^{-1}, \quad (30)$$

где $\eta_1 = R_1^2 (1 - F_2 T_1^2 [LR(1)]^2) / [1 - R_1^2]$

Требуемое значение модуля коэффициента отражения от первого барьера

$$R_1 = \frac{1}{T_1 LR(1) \sqrt{F_2}} (\sqrt{1 + \sin^2 \Phi_{0,5}} - \sin \Phi_{0,5}). \quad (31)$$

Из выражения (31) видно, что с ростом поглощения для обеспечения той же полосы пропускания необходимо увеличить коэффициент отражения от барьеров.

При синтезе многозвенных структур с поглощением необходимо учитывать невыполнение закона сохранения энергии, т. е. $\bar{P}_{\text{пад}} \neq \bar{P}_{\text{отп}} + \bar{P}_{\text{прох}}$. Поэтому синтез многозвенной структуры возможен в двух вариантах: синтез структуры с заданной характеристикой по отраженной волне; синтез структуры с заданной характеристикой по проходящей волне.

Приведем результаты синтеза двузвенной структуры с максимальноплоской характеристикой по отраженной волне

$$R_3 = F_3 T_2 F_2 T_1 R_1 LR(1) / LR(3). \quad (32)$$

$$(\tilde{R}_{2xp})_1 = 2F_2 T_1 \tilde{R}_1 / (1 + F_2 T_1^2 R_1^2); \quad (33)$$

$$(\tilde{R}_{2xp})_2 = \frac{|\Gamma|_N [1 + F_3 (T_2 F_2 T_1)^2 \tilde{R}_1^2] - 4F_3 T_2 F_2 T_1 \tilde{R}_1 \sin^2 \Phi_{\Pi}}{|\Gamma|_N \tilde{R}_1 (F_3 T_2^2 F_2 T_1 + T_1)} \quad (34)$$

с учетом зависимостей

$$\tilde{R}_1 = R_1 LR(1); \quad LR(1) \approx LR(3).$$

Для синтеза прототипа двухзвенного устройства с чебышевской характеристикой по отраженной волне необходимо решить следующую систему уравнений

$$\tilde{R}_3 = \tilde{R}_1 F_3 T_2 F_2 T_1; \quad (35)$$

$$(\tilde{R}_2)_1 = (2\tilde{R}_1 F_2 T_1 \cos^2 \Phi_{II})(1 + \tilde{R}_1^2 F_2 T_1^2)^{-1}; \quad (36)$$

$$(\tilde{R}_2)_2 = \frac{1 + \tilde{R}_1^2 F_3 (T_2 F_2 T_1)^2 - 2\tilde{R}_1 F_3 T_2 F_2 T_1 |\Gamma_N|^{-1} \sin^2 \Phi_{II}}{\tilde{R}_1 T_1 (1 + F_3 T_2^2 F_2)}. \quad (37)$$

Синтез прототипа трехзвенного устройства с максимально плоской характеристикой по отраженной волне производится путем решения следующих уравнений:

$$\tilde{R}_4 = F_4 F_3 F_2 T_3 T_2 T_1 \tilde{R}_1; \quad (38)$$

$$(\tilde{R}_2)_1 = \frac{6\tilde{R}_4 - \tilde{R}_3 (\tilde{R}_4 T_2 \tilde{R}_1 F_2 T_1 + F_4 T_3)}{\tilde{R}_4 (\tilde{R}_1 T_1 + \tilde{R}_3 T_2) + F_4 T_3 (F_3 T_2 + \tilde{R}_4 \tilde{R}_1 T_1)}; \quad (39)$$

$$(\tilde{R}_2)_2 = \frac{F_4 T_3 (\tilde{R}_3 + \tilde{R}_1 F_3 T_2 F_2 T_1) - \tilde{R}_4 (1 + \tilde{R}_3 T_2 F_2 T_1 \tilde{R}_1)}{F_4 T_3 (\tilde{R}_3 T_2 + \tilde{R}_3 \tilde{R}_1 T_1) - \tilde{R}_4 (R_1 T_1 + \tilde{R}_3 T_2)}; \quad (40)$$

$$4\tilde{R}_4 \sin^3 \Phi_{II} = h \left\{ 1 + \tilde{R}_3 T_2 F_2 T_1 - \tilde{R}_4 F_4 T_3 [\tilde{R}_3 + \tilde{R}_1 F_3 T_2 F_2 T_1] - \tilde{R}_2 \times \left[(\tilde{R}_1 T_1 + \tilde{R}_3 T_2) - \tilde{R}_4 F_4 T_3 (F_3 T_2 + \tilde{R}_3 \tilde{R}_1 T) \right] \right\} \quad (41)$$

Проверим правильность полученных выражений, рассмотрев их для случая без потерь с учетом симметрии ($R_1=R_4$; $R_2=R_3$; $T_1=1$, $F_1=1$).

Из уравнений (39), (40) и (41) соответственно имеем

$$R_2 = - \left[(1 + R_1^2) / 2R_1 \right] + \sqrt{3 + \left[(1 + R_1^2) / 2R_1 \right]^2}; \quad (42)$$

$$R_2 = R_3; \quad R_2 = \sqrt{1 - 8R_1[h(1 - R_1^2)]^{-1} \sin^2 \Phi_{II}}, \quad (43)$$

что полностью совпадает с известными результатами.

Приведем общий алгоритм синтеза многосвязных структур с поглощением.

Синтез структур с поглощением должен проводиться по итерационной методике, содержащей синтез идеального устройства, т.е. расчет модулей коэффициентов отражения от барьеров R_i без потерь, и расчет всех конструктивных параметров идеального устройства. Далее по этим параметрам с учетом поглощательных свойств металлов рассчитываются коэффициенты ослабления в первом приближении: $\{Lh(i)\}_1$, $\{Lh(i)\}_1$, $(T)_1$. Затем решаются все уравнения синтеза структуры с поглощением, т.е. по заданной форме характеристики, значениям $|\Gamma|_{\max}$ и Φ_{II} определяются все коэффициенты $(\tilde{R}_i)_1$ структуры с поглощением в первом приближении, после чего рассчитываются конструктивные параметры устройства во втором приближении, а также коэффициенты ослабления во втором приближении. Далее рассчитываются все коэффициенты $(\tilde{R}_i)_2$ во втором приближении и т.д. Процедура повторяется до тех пор, пока изменение величины $(1 - \tilde{R}_i)$ не достигнет допустимого значения, например,

$$|(1 - \tilde{R}_i)_n - (1 - \tilde{R}_i)_{n-1}| < 0,01 |1 - \tilde{R}_i|. \quad (44)$$

Конкретно для трехзвенной структуры необходимо отметить следующие особенности алгоритма синтеза:

1. По заданным значениям $|\Gamma|_{\max}$ и Φ_{II} вычисляются коэффициенты $R_1 = R_4$; $R_2 = R_3$; $R_i = (R_i)_1$.
2. По найденным значениям $(R_i)_1$ вычисляются коэффициенты ослабления в первом приближении.
3. По формуле (38) рассчитывается значение $(\tilde{R}_4)_1$.
4. По значениям $(\tilde{R}_1)_1$ и $(\tilde{R}_4)_1$ решается система уравнений (39) и (40), в результате чего вычисляется значение $(\tilde{R}_3)_1$.
5. По рассчитанным значениям $(\tilde{R}_1)_1$, $(\tilde{R}_3)_1$ и $(\tilde{R}_4)_1$, определяется величина $(\tilde{R}_2)_1$.
6. Все известные величины подставляются в уравнение (41), которое вначале не будет удовлетворяться.
7. Задается значение R_1 во втором приближении: $(R_1)_2 = (R_1)_1 + 0,001[1 - (R_1)_1]$.
8. Процедуры 1 - 6 повторяются до тех пор, пока не будет выполняться основное условие.

Следует заметить, что коэффициенты ослабления, как правило, изменяются незначительно и их уточнения во втором и более высоких приближениях не требуется.

В заключение раздела 4 приведены модели и алгоритмы синтеза многозвенных диссипативных структур с четвертьволновыми связями, а также структур на основе связанных линий передачи.

Пятый раздел посвящен экспериментальным исследованиям многозвенных диссипативных структур, спроектированных разработанными выше методами.

Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими выводами.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и определены перспективы дальнейшего развития и внедрения разработанных методов, моделей и алгоритмов в высокоточные технологические системы по производству техники СВЧ.

В приложении приведены выводы соотношений между элементами матрицы рассеяния многозвенных диссипативных структур с непосредственными и четвертьволновыми связями.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполнения диссертационной работы решена задача существенного повышения точности и производительности процессов проектирования и производства многозвенных диссипативных устройств техники СВЧ, что позволяет повысить эффективность технологии производства техники СВЧ путем значительного сокращения доводочных и юстировочных работ.

1. Разработан (совместно с А.В. Полюнкиным) новый прототип многозвенных устройств на связанных линиях, учитывающий отличие волн в линиях и поперечных, а также дисперсию элементов связи и поглощение, обеспечивающий повышение точности проектирования фильтрующих устройств данного типа.

2. Предложен обобщенный прототип многозвенных диссипативных структур – ВДСЗС-прототип с поглощением, позволяющий учесть влияние поглощения не только в линиях передачи резонансных звеньев, но и в элементах связи, что обеспечивает повышение точности проектирования.

3. Разработаны модели прямого аналитического синтеза многозвенных фильтрующих и согласующих устройств, обеспечивающих существенное повышение производительности процесса проектирования.

4. Разработаны модели и алгоритмы синтеза структур с неидентичными звеньями, обеспечивающие повышение точности их проектирования.

5. Установлены соотношения между элементами матрицы рассеяния многозвенных и двухзвенных диссипативных структур как с непосредственными связями, так и с четвертьволновыми связями, обеспечивающие создание алгоритмов наращивания и редукции математических моделей многозвенных диссипативных структур.

6. Разработан алгоритм наращивания математических моделей диссипативных структур с непосредственными и четвертьволновыми связями. (на основе алгоритма В.И. Бондаренко для идеальных структур), обеспечивающий существенное повышение точности и производительности процесса анализа многозвенных диссипативных структур.

7. Разработан алгоритм редукции математических моделей многозвенных диссипативных структур с непосредственными и четвертьволновыми связями (на основе алгоритмов Бондаренко В.И. для идеальных структур) – математический аппарат методов синтеза диссипативных структур: классический и метод неопределенных коэффициентов.

8. Разработаны методы синтеза многозвенных диссипативных структур по отраженной и проходящей волнам, обеспечивающие значительное повышение точности проектирования реальных многозвенных СВЧ-структур.

Диссертационная работа выполнялась по гранту МО РФ "Фундаментальные исследования волновых процессов в многозвенных СВЧ-структурах и разработка нового метода их проектирования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Покровский Ю.А., Макарецкий Е.А., Покровская Л.Ю., Полинкин А.В. Обобщенный волновой синтез многозвенных структур с распределенными параметрами на основе ВДСЗС-прототипа. Учеб. пособие. / Под ред. Ю.А. Покровского. – Тула, 1996.
2. Покровский Ю.А., Макарецкий Е.А., Полинкин А.В., Покровская Л.Ю. Новый прототип фильтрующих СВЧ-устройств на связанных линиях и методы его синтеза // Сб. тезисов докладов 51-й научной сессии, посвященной Дню Радио. Часть 1. – М., 1996. – с.56-57.
3. Покровский Ю.А., Полинкин А.В., Покровская Л.Ю., Черешнев А.В. Автоматизированное проектирование фильтрующих согласующих СВЧ-устройств на основе ВДСЗС-прототипа. Учеб. пособие / Под ред. Ю.А. Покровского. – Тула, 1997.
4. Полинкин А.В., Покровская Л.Ю. Новый прототип СВЧ-структур на связанных линиях и методы синтеза фильтрующих устройств на его основе. Труды НТК "Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация". Том 1. – Воронеж, 1997. – с.152-161.
5. Покровская Л.Ю. Модели и алгоритмы прямого аналитического синтеза каскадных многозвенных СВЧ-фильтров с неидентичными резонансными звеньями. Труды НТК "Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация". Том 1. – Воронеж, 1997. – с.142-151.
6. Покровская Л.Ю. Синтез фильтрующих и согласующих СВЧ и оптических устройств с учетом поглощения на основе ВДСЗС-прототипа // Известия ТулГУ, серия "Радиооптика и радиотехника СВЧ". – Тула, 1997. – с.41-45.
7. Покровская Л.Ю., Зуева И.В., Титов С.Н. Разработка и исследование пассивных устройств стабилизации угловых характеристик лазерных

- источников. 3-я Международная конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". – Харьков-Туапсе, 1997. – с.349.
8. Польшинкин А.В., Покровская Л.Ю. Сравнительный анализ алгоритмов синтеза многозвенных СВЧ-устройств и пути повышения их эффективности. Всероссийская НТК "Новые информационные технологии в научных исследованиях радиоэлектроники". – Рязань, 1997. – с. 55-56.
 9. Польшинкин А.В., Покровская Л.Ю. Оптимальная идентификация объектов при автоматизации проектирования фильтрующих и согласующих СВЧ-устройств. Всероссийская НТК "Новые информационные технологии в научных исследованиях радиоэлектроники". – Рязань, 1997. – с. 57-58.
 10. Покровский Ю.А., Польшинкин А.В., Покровская Л.Ю., Черешнев А.В. Совершенствование физико-математического обеспечения вычислительных систем информационно-вычислительных комплексов СВЧ и оптического приборостроения // Сб. тезисов докладов XIV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1997. – с.30.
 11. Макарецкий Е.А., Покровская Л.Ю., Польшинкин А.В., Кудряшов А.Н. Экспресс-измеритель ε и $tg\delta$ жидких и сыпучих диэлектриков в сантиметровом диапазоне // Тезисы докладов II Всероссийской НТК "Методы и средства измерения физических величин". Часть 1. – Нижний Новгород, 1997. – с.8.
 12. Макарецкий Е.А., Покровская Л.Ю., Польшинкин А.В., Кудряшов А.Н. Прецизионный измеритель малых отклонений диэлектрической проницаемости СВЧ-материалов // Тезисы докладов II Всероссийской НТК "Методы и средства измерения физических величин". Часть 1. – Нижний Новгород, 1997. – с.6.
 13. Макарецкий Е.А., Покровская Л.Ю., Бондаренко В.И. Лазерный дистанционный датчик угловых отклонений // Тезисы докладов II Всероссийской НТК "Методы и средства измерения физических величин". Часть 1. – Нижний Новгород, 1997. – с.66.
 14. Макарецкий Е.А., Покровская Л.Ю., Титов С.Н. Модели пространственной свертки аналоговых оптических сигналов математические и физические модели технических объектов // Труды международной НТК "Нейронные, реляторные и непрерывно-логические сети и модели", 1997. – с.83.
 15. Покровская Л.Ю. Математические модели прямого аналитического синтеза прототипа трехзвенного фильтра // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1998. – с.5.
 16. Покровская Л.Ю. Математические модели прямого аналитического синтеза ВДСЗС-прототипа. // Сб. тезисов докладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1998. – с.6.
 17. Покровская Л.Ю. Особенности математических моделей каскадных многозвенных волновых структур с поглощением. // Сб. тезисов док-

- ладов XV научной сессии, посвященной Дню Радио. – Тула, 1998. – с.7.
- 18.Полынкин 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.
- 19.Полынкин 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.
- 20.Кудряшов А.Н., Черешнев А.В., Покровская Л.Ю. Минимизация погрешностей измерения ϵ и $tg\delta$ в резонансном СВЧ-измерителе в методе индикации состояний по отраженной волне // Тезисы докладов III Всероссийской НТК "Методы и средства измерения физических величин". Часть 1. – Нижний Новгород, 1998. – с.29.
- 21.Покровская Л.Ю. Математические модели прототипа однозвенной резонансной структуры с учетом поглощения // Известия ТулГУ серия "Радиооптика и радиотехника СВЧ". Том 2. Вып.1. – Тула, 1999. – с. 41.
- 22.Покровский Ю.А., Покровская Л.Ю., Черешнев А.В. Новые методы синтеза многозвенных фильтрующих и согласующих СВЧ-устройств // Известия ТулГУ серия "Радиооптика и радиотехника СВЧ". Том 2. Вып.2. – Тула, 1999. – с. 47.
- 23.Покровская Л.Ю. Алгоритмы наращивания и редукции математических моделей многозвенных СВЧ-структур с четвертьволновыми связями с учетом поглощения. // Известия ТулГУ серия "Радиооптика и радиотехника СВЧ". Том 2. Вып.2. – Тула, 1999. – с. 69.

Подписано в печать *1,06,00*. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага типографская № 2
 Офсетная печать. Усл. печ. л. *1,1*. Усл. кр.-отг. *1,1*. Уч. изд. л. *1,0*.
 Тираж *30* экз. Заказ *382*.
 Тульский государственный университет. 300600, г. Тула, пр. Ленина, 92.
 Редакционно-издательский центр Тульского государственного университета.
 300600, г. Тула, ул. Болдына, 151