

ТЕОРИЯ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

УДК 621.39

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ
ФАЗОКОНТУРНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

© 2022 г. С. А. Иванов^а, П. В. Закалкин^а, И. Ю. Смирнов^а, *

^аВоенная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, 194064 Российская Федерация

*E-mail: sensemile.nic@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2020 г.

После доработки 24.11.2020 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

Рассмотрен новый подход к моделированию оптического волокна. Исследован вопрос распространения положений теории цепей на элементы с рассредоточенными элементами – оптическое волокно. Показано, что основой решения задачи синтеза параметров оптического волокна в теории цепей является метод моделирования четвертьволнового отрезка линии схемой фазового контура первого порядка.

DOI: 10.31857/S0033849422050072

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития оптических технологий оптическое волокно (ОВ) нашло широкое применение не только в телекоммуникации, но и во многих других отраслях [1]. В зависимости от целевого приложения различаются необходимые масштабы производства требуемого типа ОВ – от крупносерийного до штучного производства специализированных ОВ.

Производство ОВ сложный и дорогостоящий процесс, поэтому на этапе его разработки требуется предварительное моделирование. В известных программных продуктах, позволяющих моделировать ОВ (например, Code V, ZEMAX, Opal, TracePro), преимущественно используются имитационные методы. Имитационные модели удобно применять при моделировании существующих объектов для определения их показателей в переменных условиях. Это требует проведения множества экспериментов, ограниченных точностью выходных данных, с последующей аппроксимацией и повторением. Для разработки новых типов специализированных ОВ требуются строгие методы моделирования, позволяющие находить оптимальные значения показателей волокна без проведения аппроксимационных этапов на физическом объекте. В данных методах используется аналитическое моделирование, ограниченное детерминированными процессами, требующее меньше вычислительной мощности, математически проверяемое в прямой и обратной постановке.

Методы аналитического моделирования в области связи хорошо проработаны положениями

теории цепей, применяемой для расчетов фильтров, корректоров, трансформаторов, линий связи и т.п. в различных диапазонах частот – от сверхнизких до сверхвысоких.

Наличие у ОВ избирательности волновой характеристики затухания, подобной имеющейся у оптических фильтров (ОФ), дает основания поиска модели ОВ в виде оптического фильтра, частотные характеристики которого полностью (или максимально приближенно) отображают частотные характеристики затухания ОВ. В основе распространения оптического сигнала (ОС) по ОВ лежит многократно повторяющееся явление полного внутреннего отражения (ПВО) (рис. 1) [1, 2]. При отражении ОС проникает во вторую среду, проходит там расстояние порядка длины волны распространяющегося ОС и возвращается в первую среду. Таким образом возникает сдвиг точки выхода сигнала относительно точки входа [3–5]. Данное явление получило название эффекта Гуса–Хенхена, а факт его существования дает основание для отнесения ОВ к оптическим гетероструктурам (ОГС) – направляющим системам, предназначенным для передачи сигналов оптического диапазона длин волн: инфракрасного, видимого, ультрафиолетового и рентгеновского [6]. Гетероструктуры как системы, составленные из чередующихся пар элементов с отличающимися значениями однотипных параметров, обладают спектральной избирательностью. В данной статье теория и расчет ОГС основаны на общем подходе к структурам как к цепям с распределенными па-

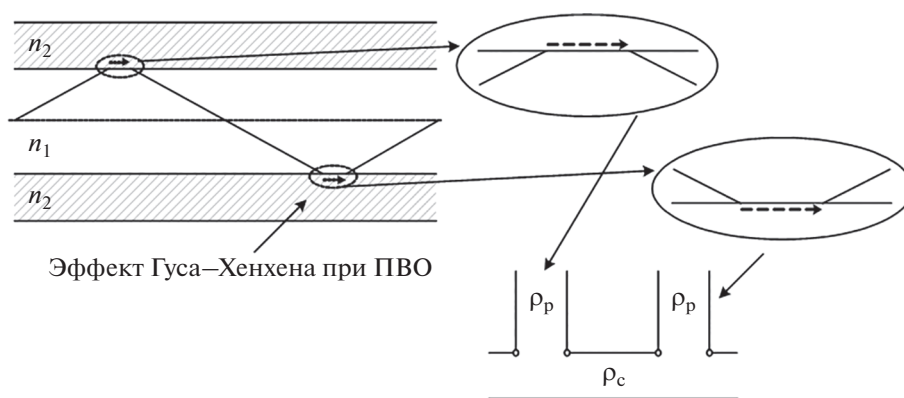


Рис. 1. Моделирование эффекта Гуса–Хенхена резонансным контуром.

раметрами, состоящими из отрезков передающих линий, исследуемых методами теории цепей.

Применение теории цепей было распространено и на оптический диапазон в части элементов с сосредоточенными элементами (оптических многослойных фильтров и корректоров) [6].

Цель данной работы – решить задачу распространения положений теории цепей на элементы с рассредоточенными элементами – ОВ, что позволит аналитически, с применением апробированных на практике научных методов и методик, рассчитывать параметры волокна в прямой и обратной постановке.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВЕНА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В различных учебниках, научных изданиях и отчета приводится множество волновых характеристик затухания ОВ [7–9], которые имеют существенные отличия по форме и величине при прочих равных условиях. Производители ОВ и оптических кабелей (ОК) также, производя измерения волновой характеристики затухания одного и того же ОВ при различных условиях, получают существенно отличающиеся результаты, хотя типы ОВ стандартизованы и их характеристики производители приводят справочно. Этот факт объясняется тем, что при изменении радиуса изгиба ОВ изменяется и количество переотражений ОС и чем больше этих переотражений, тем больше затухание сигнала и уже полоса пропускания.

Но сами по себе многократные переотражения не дали бы такого эффекта без распространения ОС во второй среде. В однородной среде сигнал практически не претерпевает затухания [10]. Отсюда следует, что именно нарастание количества сдвигов ОС и его суммарного пути распространения во второй среде при многократном ПВО определяет изменение волновой характеристики затухания ОВ, а также угол падения ОС и материа-

лы, из которых изготовлены сердцевина и оболочка ОВ. Таким образом, явление сдвига Гуса–Хенхена дает основание для рассмотрения и расчета оптических направляющих систем с точки зрения теории цепей.

В данной статье это явление моделируется резонансным контуром (рис. 1), включенным в оптический путь прохождения сигнала. В этом случае ОВ, состоящее из сердцевины с показателем преломления n_1 и оболочки с n_2 , моделируется схемой фильтра в виде длинной линии, с волновым сопротивлением ρ_c , с упорядоченно включенными в нее резонансными контурами с волновым сопротивлением ρ_p . Таким образом, задача расчета оптических характеристик ОВ сводится к расчету характеристик оптического многошлейфного фильтра (ОМШФ).

Для расчета параметров резонансного контура необходимо оценивать величину сдвига Гуса–Хенхена в различных средах распространения. Для оценки величины сдвига были проведены расчеты по формулам, полученным Ренардом в результате исследования эффекта Гуса–Хенхена [11].

Величина сдвига в случае s -поляризации с учетом того, что $\mu = 1$, рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\perp} = \frac{1}{\pi} \frac{\sin \Theta_1 \cos^2 \Theta_1}{1 - (n_2/n_1)^2} \frac{\lambda}{(\sin^2 \Theta_1 - (n_2/n_1)^2)^{1/2}}. \quad (1)$$

Величина сдвига в случае p -поляризации определяется по формуле

$$\Delta_{\parallel} = \frac{1}{\pi} \frac{K \sin \Theta_1 \cos^2 \Theta_1}{K^2 \cos^2 \Theta_1 + \sin^2 \Theta_1 - (n_2/n_1)^2} \times \frac{\lambda}{(\sin^2 \Theta_1 - (n_2/n_1)^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $\Theta_1 \in [\Theta_{кр}; \pi/2]$, $\Theta_{кр}$ – критический угол ПВО.

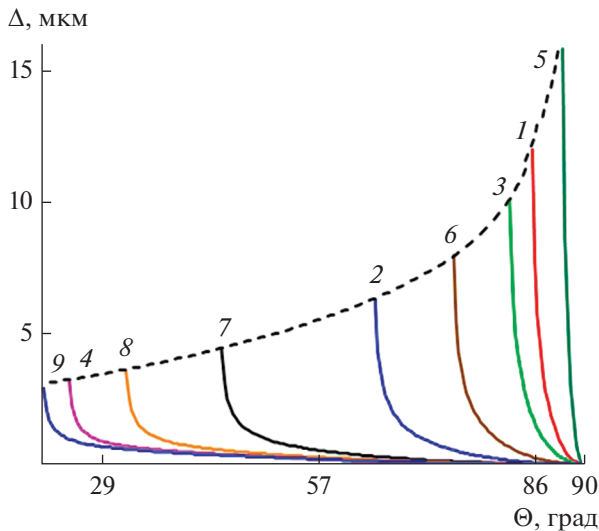


Рис. 2. Характеристика сдвига Гуса–Хенхена вдоль границы раздела сред в ОВ для s -поляризации на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм при различных отношениях ПП и его материалов (кривые 1–9, пояснения см. в тексте); штриховая кривая – зависимость максимального сдвига Δ_{\max} от предельного угла ПВО $\Theta_{\text{кр}}$.

Все параметры среды с большим показателем преломления (ПП) обозначаются нижним индексом 1, а с меньшим показателем – индексом 2; K – диэлектрическая постоянная. Из формул (1) и (2) видно, что величина сдвига Гуса–Хенхена прямо пропорциональна длине волны λ .

Для сравнительного анализа изменения сдвига при различных свойствах сред были взяты девять различных соотношений ПП сред (рис. 2, кривые 1–9 соответственно):

- 1) $n_1 = 1.47, n_2 = 1.46$ (стандартное кварцевое ОВ);
- 2) $n_1 = 1.47, n_2 = 1.32$ (ОВ с кварцевой сердцевиной и полимерной оболочкой);
- 3) $n_1 = 1.47, n_2 = 1.45$ (кварцевое ОВ с экспериментальным ПП оболочки);
- 4) $n_1 = 3.22, n_2 = 1.32$ (полимерное ОВ с экспериментальным ПП);

- 5) $n_1 = 1.47, n_2 = 1.46$ (кварцевое ОВ с экспериментальным ПП оболочки);
- 6) $n_1 = 1.47, n_2 = 1.41$ (кварцевое ОВ с экспериментальным ПП оболочки);
- 7) $n_1 = 1.87, n_2 = 1.32$ (кварцевое ОВ с экспериментальным ПП сердцевины);
- 8) $n_1 = 2.47, n_2 = 1.32$ (кварцевое ОВ с экспериментальным ПП сердцевины);
- 9) $n_1 = 3.4, n_2 = 1.32$ (полимерное ОВ с экспериментальным ПП).

Результаты расчетов сдвига Гуса–Хенхена для s -поляризации представлены на рис. 2.

Из полученных характеристик видно, что при увеличении отношения показателей преломления оптических сред:

- предельный угол ПВО уменьшается, а сектор ПВО увеличивается (закон Снеллиуса);
- максимум смещения (Δ_{\max}) убывает (см. рис. 2);
- избирательные свойства единицы длины ОВ усиливаются:

$$\Delta_{\max} = \lambda \left(\frac{3}{2} \exp\left(\Theta_1 - \frac{1}{3}\right) + \frac{1}{3 \cos \Theta_1} \right). \quad (3)$$

Для моделирования ОВ необходимо ввести новое понятие – звено ОВ (рис. 3). Звено оптического волокна – линейный участок ОВ длиной L_0 , состоящий из трех участков.

1. Участка ОВ длиной l_{o1} , в котором ОС распространяется в оболочке ОВ при первом ПВО, составляющего половину сдвига Гуса–Хенхена.
2. Участка ОВ длиной l_c , в котором ОС прямолинейно распространяется в сердцевине ОВ между первой и второй точками отражения ОС от граничных противоположных слоев ОВ.
3. Линейного участка ОВ длиной l_{o2} , в котором ОС распространяется в оболочке ОВ при втором ПВО, составляющего половину сдвига Гуса–Хенхена.

При этом участки $l_{o1} = l_{o2} = l_o$ имеют смысл введенных лучом квантовых ям [12, 13], которые обладают ярко выраженными свойствами резонаторов с резонансными частотами f_p .

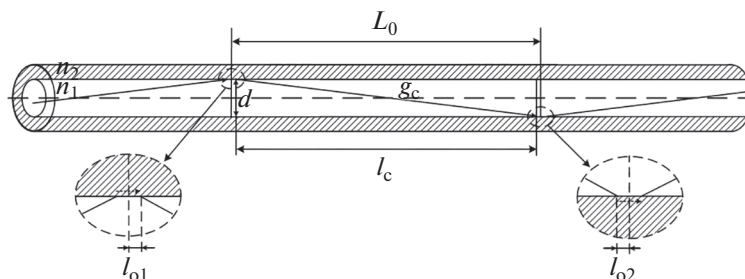


Рис. 3. Графическое представление звена оптического волокна.

Количество звеньев $N_{зв}$ на ОВ длиной 1 м исчисляется десятками тысяч. И при таком большом количестве звеньев затухание ОВ остается невысоким. Это объясняется, во-первых, высокой добротностью материала участка звена ОВ (кварцевое стекло), во-вторых, широкой полосой пропускания (ППр) звеньев ОВ и, в-третьих, тем, что все звенья ОВ имеют одинаковые конструктивные и материальные параметры, а это обеспечивает согласованное (без отражений) включение всех звеньев ОВ между собой.

Выделим на рис. 3 треугольник, размер одного катета которого – это диаметр сердцевины d , гипотенуза – длина пути ОС на участке звена g_c , второй катет – проекция гипотенузы на ось волокна l_c . Угол между первым катетом и гипотенузой изменяется в пределах

$$\Theta_{кр} < \Theta_1 < \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

Выразим длину гипотенузы треугольника g_c через значения диаметра сердцевины ОВ d и угла Θ_1 в виде

$$g_c = d / \cos \Theta_1. \quad (5)$$

Из (5) следует, что длина g_c изменяется от критической величины, соответствующей критическому углу ПВО $g_c = g_{c_{кр}} = d / \cos \Theta_{кр}$, до бесконечности. Последнее означает, что ОС свободно распространяется в сердцевине параллельно границам раздела двух сред, не касаясь граничных слоев. Из теории цепей известно, что в однородном участке линии без потерь могут распространяться сигналы с любыми длинами волн, при этом количество укладываемых четвертьволновых отрезков на участке звена зависит от длины волны сигнала

$$N_{\lambda/4} = 4g_c / \lambda. \quad (6)$$

Необходимо особо выделить случай $N_{\lambda/4} = 1$, когда на длине g_c укладывается только один четвертьволновый отрезок с частотой, равной

$$f_c = c / g_c. \quad (7)$$

В таком звене при $N_{\lambda/4} = 1$ длина участка в сотни (тысячи) раз длиннее средней длины волны полосы прозрачности звена ОВ и, следовательно, частота f_c будет во столько же раз меньше средней частоты звена ОВ.

На рис. 4 показано расположение характерных частот звена ОВ: граничные частоты заданной ППр звена ОВ (f_1 и f_2), частота участка l_c ОВ f_c , частота наведенного резонатора f_p и средняя частота ППр $f_{ср}$. Указанное несимметричное расположение характерных частот является особенностью звена ОВ, и при построении его модели эта особенность должна быть учтена.

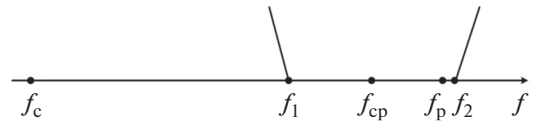


Рис. 4. Расположение характерных частот звена ОВ на оси частот.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ ФАЗОКОНТУРНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

В данной работе теория и расчет ОГС основаны на общем подходе к структурам, как к цепям с распределенными параметрами, состоящими из отрезков передающих линий. Так как для ОВ характерен шлейфный способ соединения резонатора со связкой, то оно относится к определенному типу ОГС – ОМШФ [6, 14].

Основой моделирования является установление условий, при которых существует подобие между оригиналом и моделью. Определенные явления оригинала и модели считаются подобными, если они описываются одинаковыми по форме уравнениями.

Рассмотрим уравнения передачи оригинала – отрезка электрической линии без потерь (рис. 5б) на оси частот распределенных систем f . Обобщенная матрица передачи для нее имеет вид [15–18]

$$[A_{л}] = \begin{bmatrix} \cos \omega & j\rho \sin \omega \\ j \sin \omega & \cos \omega \\ \rho & \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\omega = \beta l = \pi f / 2f_0$ – волновая длина отрезка линии; $\beta = 2\pi / \lambda = 2\pi f / v$ – коэффициент фазы отрезка линии; v – скорость распространения волны в линии; λ – длина волны в линии; f_0 – первая резонансная частота отрезка линии при длине $l = \lambda_0 / 4$; ρ – нормированное волновое сопротивление линии без потерь.

На резонансной частоте f_0 входное сопротивление четвертьволнового отрезка ($\lambda/4$ -отрезка) линии при нагрузочном сопротивлении $W_{н} = 0$ (короткое замыкание отрезка) равно бесконечности, а при $W_{н} = \infty$ (холостой ход отрезка) – нулю.

Аналогичными свойствами на оси частот сосредоточенных систем $x = f / f_0$ обладает фазовый контур первого порядка – ФК1П (рис. 5в) [6, 19]. Коэффициенты обобщенной матрицы ФК1П выражаются через сопротивления его плеч Z_a и Z_b :

$$[A_{ФК}] = \begin{bmatrix} \frac{Z_b + Z_a}{Z_b - Z_a} & \frac{2Z_b Z_a}{Z_b - Z_a} \\ 2 & \frac{Z_b + Z_a}{Z_b - Z_a} \\ \frac{Z_b - Z_a}{Z_b - Z_a} & \frac{Z_b + Z_a}{Z_b - Z_a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - x^2}{1 + x^2} & \frac{j\rho' 2x}{1 + x^2} \\ j & 2x \\ \rho' 1 + x^2 & 1 + x^2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

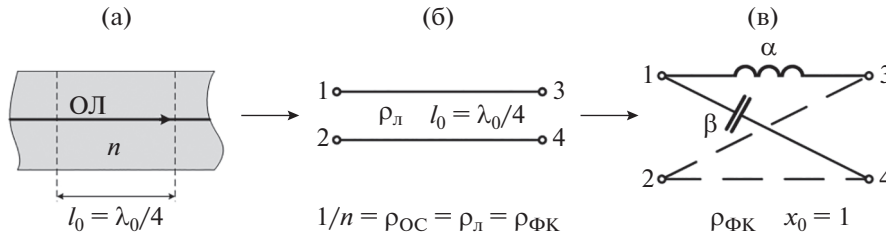


Рис. 5. Четвертьволновой оптический слой и его модели: а – четвертьволновой оптический слой, б – модель в виде четвертьволнового отрезка линии; в – модель в виде ФК1П без потерь.

где $Z_a = jx_a$ – индуктивное сопротивление продольного плеча; $Z_b = 1/jx\beta$ – емкостное сопротивление поперечного плеча; α – нормированная индуктивность ФК1П; β – нормированная емкость ФК1П; $x_0 = 1/(\alpha\beta)^{1/2}$ – резонансная и антирезонансная частоты на оси частот x систем с сосредоточенными параметрами ФК1П при сопротивлениях нагрузки соответственно $Z_H = \infty$ и $Z_H = 0$; $\rho' = (\alpha\beta)^{1/2}$ – нормированное волновое сопротивление ФК1П, без потерь. Из равенства матриц (8) и (9) [6, 19]

$$[A_{\text{Л}}] = [A_{\text{ФК}}] \quad (10)$$

следуют соотношения

$$\cos \omega = \frac{1-x^2}{1+x^2}, \quad \sin \omega = \frac{2x}{1+x^2}, \quad \rho = \rho', \quad (11)$$

откуда определяются прямое и обратное преобразование частоты ФК1П и волновой длины отрезка линии:

$$x = \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right), \quad [A_{\text{ОС}}] = \begin{bmatrix} \cos \omega & j \sin \omega \\ jn \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Следовательно, при изменении частоты x от 0 до ∞ фазовый контур как модель повторяет частотные характеристики отрезка линии как оригинала, если переменная волновая длина ω изменяется при этом от 0 до π .

Рассмотрим оптический слой (рис. 5а). Его матрица передачи, матрица Абея [6, 14], имеет вид

$$[A_{\text{ОС}}] = \begin{bmatrix} \cos \omega & j \sin \omega \\ jn \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Сравнение матриц передачи отрезка линии, ФК1П и оптического слоя обнаруживает их идентичность, которая дает основание сделать вывод о том, что ОГС относятся к классу волновых аналоговых фильтров (ВАФ). Следовательно, оптический слой толщиной $l = \lambda_0/4$ может быть представлен моделью в виде четвертьволнового отрезка двухпроводной электрической линии с распределенными элементами и моделью в виде ФК1П с сосредото-

ченными элементами. Это означает, что дальнейшее рассмотрение принципов построения ОВ в виде ОГС можно заменить рассмотрением принципов построения фильтров на фазовых контурах (ФФК) или ВАФ. Все результаты исследований будут справедливы для всего класса ВАФ и для их общей модели ФФК.

Одними из основных расчетных параметров оригинала (отрезка линии) и его модели (ФК1П) являются текущие частоты оригинала f и нормированной модели x , связанные между собой соотношением

$$x = \operatorname{tg} \frac{\pi f}{4f_0}, \quad (14)$$

где $x_0 = 1$ – нормированная резонансная частота модели, f_0 – первая резонансная частота оригинала.

Вторым основным расчетным параметром является нормированное значение волнового сопротивления отрезка линии $\rho_{\text{Л}}$ и равное ему значение волнового сопротивления ФК1П $\rho_{\text{ФК}}$, т.е.

$$\rho_{\text{Л}} = \rho_{\text{ФК}}. \quad (15)$$

Так как в ОВ и слоях магнитная проницаемость равна единице ($\mu = 1$), то в качестве волнового параметра в них принят показатель преломления, выражаемый через значение диэлектрической проницаемости материала ϵ или через нормированное значение волнового сопротивления линии $\rho_{\text{Л}}$.

$$\rho_{\text{Л}} = \sqrt{\mu/\epsilon}, \quad n = \sqrt{\mu\epsilon}, \quad \mu = 1, \quad n = 1/\rho_{\text{Л}}. \quad (16)$$

Таким образом, используя метод моделирования, можно перевести задачу синтеза ВАФ в области частот f ($0 < f < 2f_0$) в задачу синтеза его модели – ФФК в области частот x ($0 < x < \infty$). Решение задачи синтеза ФФК рассматривается в [6, 14, 19] для некоторых видов топологий ФФК, совпадающих с топологией ОМШФ. Там же показано, что с помощью определенных преобразований частоты требования к частотной характеристике затухания LC-ФФК пересчитываются в требования к низкочастотному (НЧ) $\alpha\beta$ -фильтру – НЧ-прото-

типу с текущей частотой η и резонансной частотой $\eta_0 = 1/\sqrt{\alpha\beta}$. В соответствии с алгоритмом

$$f \rightarrow x \rightarrow \eta. \quad (17)$$

В современной теории и практике проектирования фильтров нижних частот существуют фундаментально разработанные многочисленные аналитические методы анализа, синтеза, преобразования и оптимизации схем НЧ-прототипов с различными частотными характеристиками: Чебышёва, Баттерворта, Лежандра, Бесселя и др. [15–18, 21]. Метод моделирования позволяет полностью использовать весь арсенал наработанных методов при решении задач синтеза ОМШФ и, таким образом, сложнейшие задачи синтеза ОМШФ могут быть точно решены методами общей теории фильтров и теории цепей. По найденным требованиям к частотным характеристикам НЧ-прототипа определяются количество элементов в схеме и их значения. Значения элементов НЧ-прототипа с применением обратных преобразований частоты пересчитываются в значения вторичных параметров ВАФ, знание которых позволяет перейти к конструктивному расчету элементов ВАФ с учетом используемых в них видов колебаний в соответствии с алгоритмом:

$$\eta \rightarrow x \rightarrow f. \quad (18)$$

Таким образом, ФК1П является моделью оптического слоя толщиной $l = \lambda_0/4$. Теперь необходимо определить модель участка сдвига Гуса–Хенхена для режима ПВО. В случае превышения падающего на границу раздела сред ОС критического значения ПВО он разделяется на преломленный и отраженный. На границе двух сред три луча соединены в один узел. Заменяем каждый участок лучей схемами многосвязных фазоконтурных цепочек для параллельного соединения (рис. 6а) и для последовательного соединения (рис. 6б). Вариант последовательного соединения выходов трех фазоконтурных четырехполосников (ФЧП) представляет особый интерес для построения модели резонатора.

При $\Theta_1 = \Theta_2$ угол равен $\pi/2$, и тогда преломленный ФЧП заменяется двухполосником с одним разомкнутым ФК1П, включенным только в одну ветвь. Необходимое соединение падающей и отраженной ФЧП происходит через неполный четырехполосник с разомкнутым ФК1П в одной ветви, как это показано на рис. 6в. Таким образом, моделью сдвига Гуса–Хенхена является ФК1П в режиме двухполосника с холостым ходом, который в цепи каскадно включенных ФЧП является резонатором.

Далее, при увеличении угла падения ОС на границу раздела сред величина сдвига Гуса–Хен-

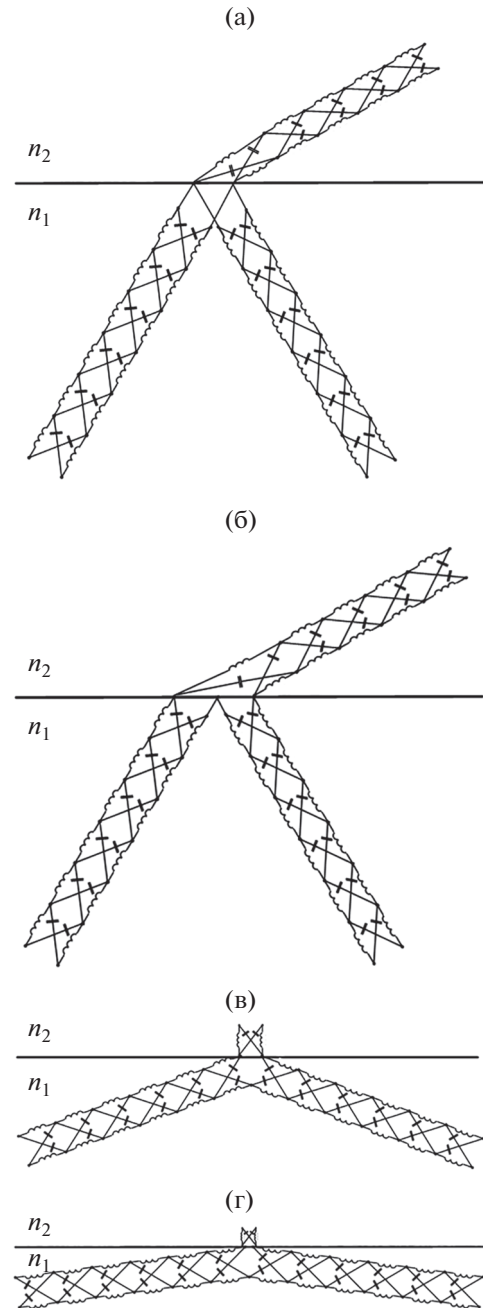


Рис. 6. Моделирование ОВ ФФК при падении оптического луча на границу раздела сред в секторе углов: а – превышающих критический для ПВО для последовательного соединения фазоконтурных моделей; б – превышающих критический для ПВО для параллельного соединения фазоконтурных моделей; в – ПВО $\Theta_{кр} = \Theta_1$; г – ПВО $\Theta_1 > \Theta_{кр}$.

хена уменьшается, что объясняется увеличением резонансной частоты ФК1П, которая в пределе переходит в частоту $x = \infty$, и уменьшением его волнового сопротивления (рис. 6г).

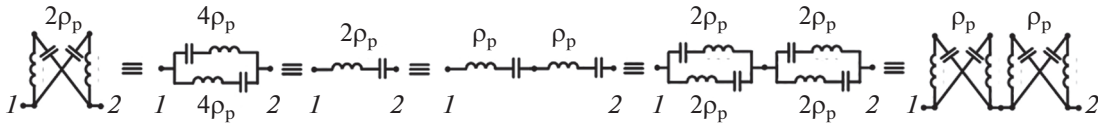


Рис. 7. Преобразование одного ФК1П с волновым сопротивлением $2\rho_p$ в два ФК1П с волновым сопротивлением ρ_p каждый. 1 – Вход, 2 – выход.

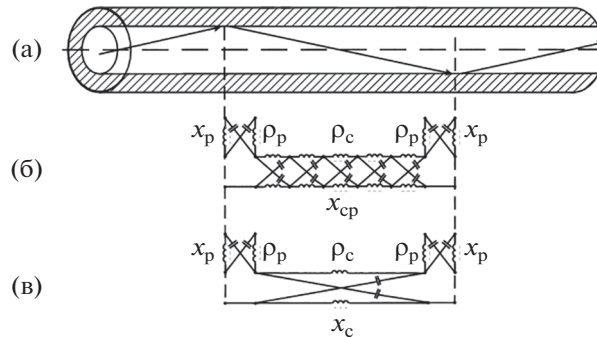


Рис. 8. Звено ОВ (а) и его модели: звено ФФК со связкой из N ФК1П с частотой x_{cp} (б) и со связкой из одного ФК1П с частотой x_c (в).

Для удобства моделирования ОВ при разбиении его на звенья необходимо иметь резонаторы по краям каждого из звеньев, поэтому модель сдвига Гуса–Хенхена, ФК1П в режиме двухполюсника с холостым ходом, необходимо разбить на два последовательно включенных ФК1П. При этом волновое сопротивление каждого из двух таких ФК1П будет в два раза меньше изначального. Порядок этого преобразования приведен на рис. 7.

Для удобства дальнейшего моделирования ОВ разделим резонатор на два последовательно включенных ФК1П. Каждый такой резонатор моделирует половину сдвига Гуса–Хенхена с волновым сопротивлением, равным половине волнового сопротивления модели полного сдвига Гуса–Хенхена. Тогда модель звена ОВ будет состоять из трехэлементного звена ФФК (рис. 8).

1. ФК1П в режиме холостого хода, т.е. четырехполюсник с разомкнутым выходом, включенный в последовательную ветвь каскадно включенных ФК1П – модели участка ОВ длиной l_{o1} , в котором ОС распространяется в оболочке ОВ при первом ПВО, составляющего половину сдвига Гуса–Хенхена, перед прямолинейным распространением оптического луча в сердцевине.

2. Цепи $N_{\lambda/4}$ каскадно-включенных ФК1П – модели участка ОВ, в котором ОС прямолинейно распространяется в сердцевине ОВ между первым и вторым явлениями ПВО (l_c).

3. ФК1П в режиме холостого хода, т.е. с разомкнутым выходом, включенный в последовательную ветвь каскадно-включенных ФК1П – модели участка ОВ длиной l_{o2} , в котором ОС распространяется в оболочке ОВ при втором ПВО, составляющего половину сдвига Гуса–Хенхена, после прямолинейного распространения ОС в сердцевине.

Модель следующего звена ОВ начинается снова неполным ФЧП-резонатором, продолжается цепочкой ФЧП-связкой и заканчивается неполным четырехполюсником-резонатором. Окончательная модель многозвенного ОВ представлена схемой многозвенного фильтра на фазовых контурах шлейфного типа со связками из N ФК1П (ФФК- N -Ш) (рис. 9).

Для этих фильтров в [6, 14, 19, 20] предложена следующая терминология: резонатор (двухполюсник) с волновым сопротивлением ρ_p и резонансной частотой x_p , связка с количеством ФК1П, равным N , и волновым сопротивлением ρ_c , коэффициент отношения волновых сопротивлений соседних связки и резонатора

$$v = \rho_c / \rho_p. \quad (30)$$

Фильтры на фазовых контурах относятся к классу электрических цепей с сосредоточенными элементами; цепи выполняют роль моста, соединяющего теорию и расчет фильтров на сосредото-

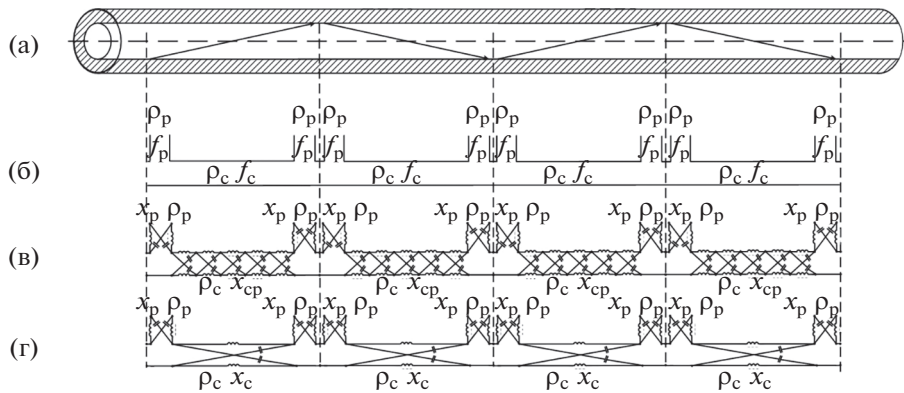


Рис. 9. Моделирование ОВ: а – ОВ; б – ОМШФ; в – многозвенный ФФК со связками из N ФК1П с частотой x_p ; г – многозвенный ФФК со связками из одного ФК1П с частотой x_c .

ченных элементах (ФСЭ) и ВАФ на отрезках передающих линий (см. рис. 9), к которым по признаку избирательности можно отнести и ОВ. Принадлежность ФФК к классу ФСЭ позволяет воспользоваться соответствующими преобразованиями частоты для пересчета его характеристик в характеристики фундаментально изученных типов LC-фильтров и свести, таким образом, задачу синтеза ВАФ к задаче аналитического синтеза соответствующего известного НЧ- или полосового LC-прототипа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель волокна в отличие от известных построена на основе фазоконтурных схем замещения и позволяет установить взаимозависимости параметров материалов, геометрических параметров и параметров передачи ОВ. Представленный подход к моделированию ОВ за счет последовательных и обоснованных преобразований и формирования структуры модели позволяет сделать принципиальное обобщение: ОВ, по физической сущности модели, является распределенным фильтром на отрезках передающих линий и относится к классу волновых аналоговых гетероструктур. Таким образом, применение положений теории цепей получает расширение на моделирование оптических направляющих систем с рассредоточенными элементами, что позволяет аналитически, с применением апробированных на практике научных методов и методик, решать задачи расчета параметров волокна в прямой и обратной постановке.

Практическое применение представленного подхода требует решения ряда частных задач: определение типа ОМШФ, к которому относится модель ОВ, и типа его характеристики затухания;

апробация разработанной модели ОВ путем сравнения расчетных характеристик с характеристиками производимых волокон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрекалов А.В., Тенякова Н.А. Физические основы волоконной оптики. М.: РИОР ИНФРА-М, 2018.
2. Haija A.I., Numan M.Z., Freeman W.L. Concise Optics: Concepts, Examples and Problems. Boca Raton: CRC Press, 2018.
3. Xiangmin Liu, Qingfen Yang // J. Opt. Soc. Amer. B. 2010. V. 27. № 11. P.2190.
4. Farmani A., Miri M., Sheikhi M.H. // J. Opt. Soc. Amer. B. 2017. V. 34. № 6. P. 1097.
5. Xiao-Jun Zhang, Hai-Hua Wang, Chun-Liang Wang et al. // J. Opt. Soc. Amer. B. 2015. V. 32. № 11. P. 2281.
6. Лапшин Б.А. Оптические гетероструктуры. Новая теория и расчет. СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
7. Dakin J.P., Brown R.G.W. Handbook of Optoelectronics: Enabling Technologies. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.
8. Мендес А., Морзе Т.Ф. Справочник по специализированным оптическим волокнам / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2012.
9. Дубнищев Ю.Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах. СПб.: Лань, 2011.
10. Агравал Г.П. Применение нелинейной волоконной оптики. СПб.: Лань, 2011.
11. Renard R.H. // J. Opt. Soc. Amer. 1964. T. 54. № 10. P. 1190.
12. Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.
13. Fischer-Cripps A.C. Waves, Particles and Fields: Introducing Quantum Field Theory. Abingdon: CRC Press, 2019.

14. *Иванов С.А., Иванов Н.А., Лапшин Б.А. и др.* Способ моделирования линии связи с распределенными параметрами. Пат. РФ № 2583740. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 13 от 10.05.2016.
15. *Матвиенко В.А.* Основы теории цепей. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016.
16. *Коган С.С.* Теория и расчет фильтров для установок дальней связи. М.: Связьиздат, 1950.
17. *Ланнэ А.А.* Оптимальный синтез линейных электронных схем. М.: Связь, 1978.
18. *Попов В.П.* Основы теории цепей. М.: Юрайт, 2017. Ч. 1.
19. *Лапшин Б.А.* Синтез фильтров и трансформаторов на отрезках передающих линий на основе фазо-контурных моделей // Дис. ... докт. технич. наук. СПб.: Военный университет связи, 2001. 246 с.
20. *Lapshin B.A., Petrakov V.A., Fedorov A.V.* // Proc. 7th IEEE Emerging Technologies Workshop: Circuits and Systems for 4G Mobile Communications, ETW'05. St. Petersburg. 2005. N.Y.: IEEE, 2005. P. 36.
21. *Bird J.* Electrical Circuit Theory and Technology. L.: Routledge, 2017.