

13. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: ВШ, 2000. – 480 с.

14. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1966. – 576 с.

DISCRETE CHANNEL CAPABILITY POTENTIALITIES RECOGNIZING STOCHASTIC NATURE OF CONTINUOUS CHANNEL INCLUDED IN DISCRETE CHANNEL

Batenkov K. A.

Capability potentiality analytic form of discrete channel composing continuous channel, modulator and demodulator. Continuous channel nature describes likelihood function, operations of modulation and demodulation identify by output demodulator signal stochastic properties.

Keywords: continuous channel discrete mapping, discrete channel, continuous channel, likelihood function.

Батенков Кирилл Александрович, к.т.н., докторант Кафедры теоретических основ связи и радиотехники Академии ФСО РФ. Тел. 8-903-881-22-67. E-mail: pustur@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.315

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДОВОГО ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С МИКРОТРЕЩИНОЙ В ОБОЛОЧКЕ СВЕТОВОДА

Бурдин В.А., Дмитриев Е.В.

Предложена модель, описывающая составляющую двулучепреломления ступенчатого кварцевого одномодового оптического волокна, обусловленную нарушением осевой симметрии конструкции световода из-за микротрещины в оболочке. Получено выражение для расчета приближенных оценок данной составляющей. Представлены результаты вычислений оценок для стандартного ступенчатого волокна типа SMF28e.

Ключевые слова: ступенчатое оптическое волокно, световод, двулучепреломление, микротрещина, зеркальная зона, показатель преломления, мода.

Введение

Как известно, двулучепреломление, которое является одним из основных факторов, определяющих поляризационные свойства оптических волоконных световодов, есть результат совместного действия асимметрии конструкции световода и упругих механических напряжений в волокне. Световоды стандартных ступенчатых оптических волокон (ОВ) делают круглыми, и двулучепреломление в них при отсутствии дефектов обусловлено в основном допусками на отклонения параметров, изгибами волокон и внешними механическими нагрузками на них. Конструкции оптических кабелей (ОК) связи предназначены для защиты ОВ от внешних воздействий. Как следствие, двулучепреломление световодов ОВ в таких ОК относительно невелико.

Рост микротрещины с поверхности оболочки световода нарушает осевую симметрию его конструкции, создает упругие механические напряжения в ОВ и в итоге приводит к увеличению двулучепреломления на участке ОВ с подобным дефектом. Это позволяет применять для мониторинга ОВ кабелей связи для выявления на ранней стадии и локализации участков с развивающимися в оболочке микротрещинами методы поляризационной рефлектометрии [1-3]. Для разработки систем контроля состояния ОВ на основе данных методов представляют интерес оценки двулучепреломления стандартных ступенчатых ОВ в зависимости от размера микротрещины в оболочке световода.

Известно, что двулучепреломление моды изогнутого отрезка ОВ может быть представлено как сумма двух составляющих [4-6]:

$$B = B_s + B_g, \quad (1)$$

где составляющая B_s – двулучепреломление световода, индуцированное упругими механическими напряжениями; B_g – двулучепреломление, обусловленное нарушением осевой симметрии распределения показателя преломления по сечению световода. Иногда его называют двулучепреломлением, обусловленным геометрией (формой, конструкцией) световода.

В данной работе предлагается модель для расчета оценок составляющей двулучепреломления

B_g стандартных кварцевых ступенчатых одно-
довых ОВ с микротрещиной в оболочке световода.

**Модель микротрещины на поверхности
оболочки световода**

Согласно [7-10], на микротрещине в оболоч-
ке ОВ принято выделять область зародыша, зер-
кальную зону, область замутнения и перистую
область (см. рис. 1). Полагают, что активной зо-
ной разрушения ОВ является зеркальная зона,
рост которой и приводит к полному обрыву во-
локна вследствие усталостного разрушения. Со-
ответственно, размер микротрещины оценивают
радиусом зеркальной зоны.

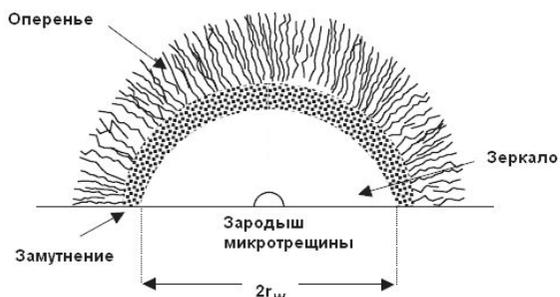


Рис. 1 Классификация зон в области микротрещины ОВ

Согласно изложенной в [10] методике размер
микротрещины r_w определяют по измеренному
с помощью микроскопа изображению и радиус
зеркальной зоны r_x в соответствии с рис. 2 вычи-
сляют по формуле:

$$r_x = \sqrt{r_w^2 + (b - \sqrt{b^2 - r_w^2})^2}, \quad (2)$$

где $2r_w$ – ширина зеркальной зоны микротрещи-
ны; b – радиус световода ОВ.

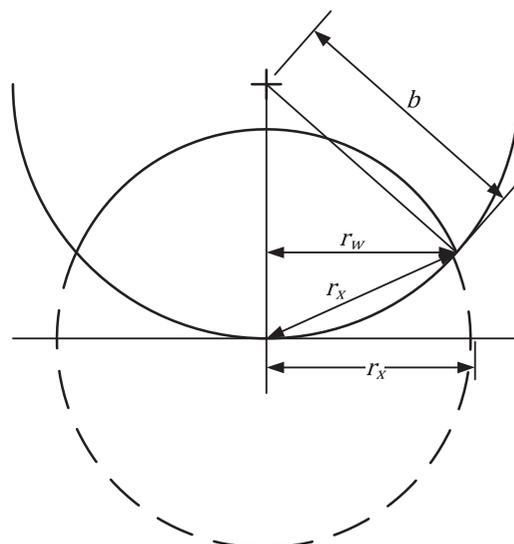
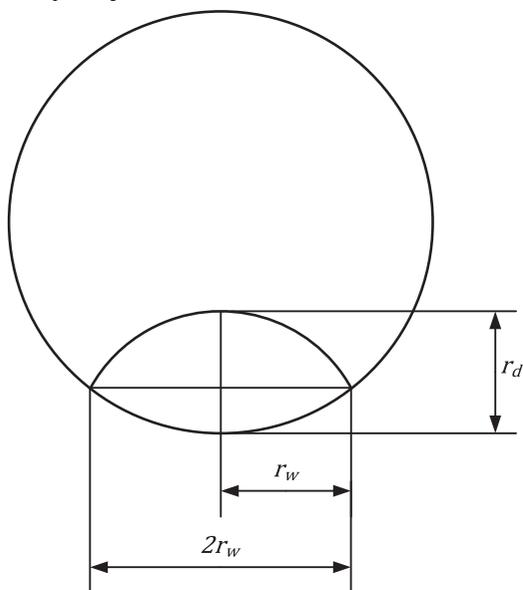


Рис. 2. Размеры микротрещины кварцевого ОВ

Как и в [11], введем параметр d_p – расстояние
от оптической оси световода до границы зеркаль-
ной зоны и выполним построения, приведенные
на рис. 3. Формулы, описывающие взаимосвязи
параметров геометрии зеркальной зоны микротрещины
в оболочке световода, имеют вид [12]:

$$\begin{aligned} r_x &= b - d_p, \\ H &= 0.5 \cdot (2b^2 - r_x^2) / b, \\ r_w^2 &= b^2 - H^2, \\ R(\theta) &= b \cdot \cos\theta - \sqrt{r_x^2 - b^2 \sin^2\theta}, \quad r_x \leq b. \end{aligned}$$

В качестве модели для расчета двулучепрелом-
ления ступенчатого ОВ с микротрещиной в обо-
лочке световода будем рассматривать конструк-
цию, представленную на рис. 4, где 1 – сердцевина
световода; 2 – оболочка световода; 3 – зеркальная
зона микротрещины; 4 – первичное защитно-
упрочняющее эпоксиакрилатное покрытие.

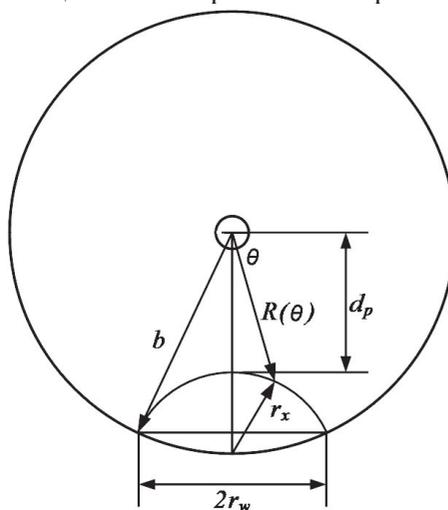


Рис. 3. Параметры микротрещины кварцевого ОВ

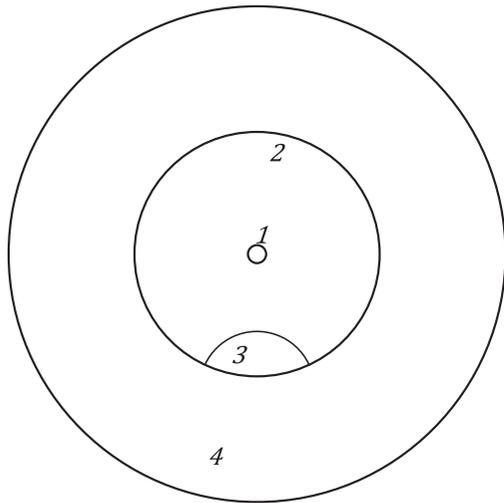


Рис. 4. Модель сечения световода с микротрещиной в оболочке

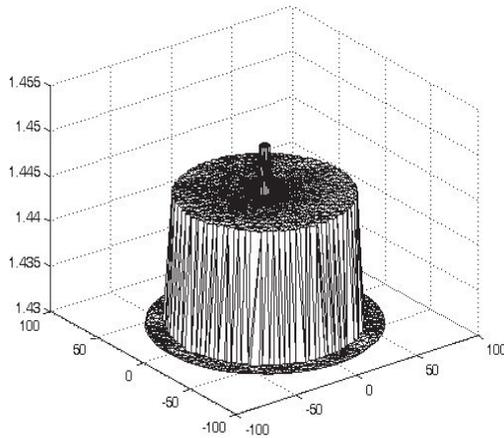


Рис. 5. ОВ без дефекта

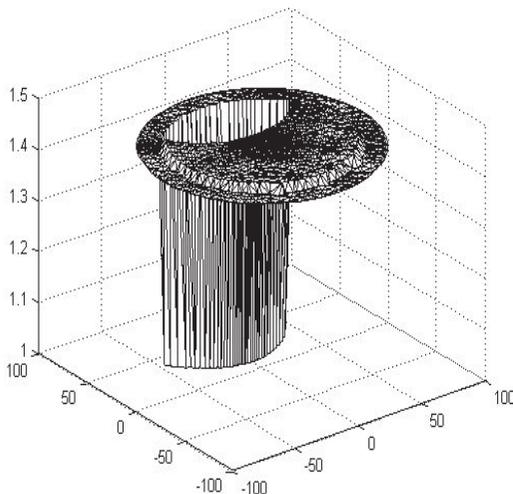


Рис. 6. ОВ с микротрещиной в оболочке световода при $d_x/a = 2$

На рис. 5-6 приведены распределения значений показателя преломления материала световода по его сечению при наличии микротрещины в оболоч-

ке и в случае ее отсутствия. На рис. 6 сердцевина визуально не проявляется, что объясняется пренебрежимо малым разбросом значений показателей преломления сердцевины и оболочки из кварцевого стекла по сравнению с разбросом значений показателей преломления кварцевого стекла и воздуха.

Модель для расчета оценок двулучепреломления ступенчатого ОВ с микротрещиной в оболочке световода

Значения B_g определяют как разность между постоянными распространения моды вдоль медленной и быстрой осей [4]:

$$B_g = (\beta_x - \beta_y) / k, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad (6)$$

где λ – длина волны. В [13] методом возмущений было получено приближенное решение для определения двулучепреломления ступенчатого одномодового оптического волокна с локальной неоднородностью в сердцевине световода. В общем случае решение для световода с локальной неоднородностью в произвольной области сечения световода согласно [13] записывается в виде:

$$\beta_x = \tilde{\beta} + \frac{k\Delta\Delta_T^2}{2\tilde{N}} \int_{S_p} \{|e_x|^2 + |e_z|^2\} dS; \quad (7)$$

$$\beta_y = \tilde{\beta} + \frac{k\Delta\Delta_T^2}{2\tilde{N}} \int_{S_p} |e_y|^2 dS,$$

а двулучепреломление $B = \beta_x - \beta_y$, соответственно, выражением

$$B = \frac{k\Delta\Delta_T^2}{2\tilde{N}} \int_{S_p} \{|e_x|^2 - |e_y|^2 + |e_z|^2\} dS.$$

Здесь $e_x; e_y; e_z$ составляющие поля моды невозмущенного световода; $\tilde{\beta}$ постоянная распространения моды невозмущенного световода; \tilde{N} – нормировка для моды невозмущенного световода; S_p – площадь локальной неоднородности в сечении световода.

Несмотря на то что площадь, которую может занимать в сечении световода микротрещина, достаточно велика, малая доля мощности оптического излучения в оболочке позволяет применить для решения поставленной задачи метод возмущений и, соответственно, применить методику поиска решения, используемую в [13].

Для описания составляющих поля основной моды невозмущенного световода воспользуемся известными

ми формулами для слабонаправляющего однододового ступенчатого волоконного световода [13-15]:

$$e_x = -\frac{U}{W} \cdot \frac{a_1 K_0(WR) - a_2 K_2(WR)}{K_1(W)} \cos \varphi;$$

$$e_y = -\frac{U}{W} \cdot \frac{a_1 K_0(WR) + a_2 K_2(WR)}{K_1(W)} \cos \varphi;$$

$$e_z = -\frac{j U K_1(W)}{\tilde{\beta} a K_1(W)};$$

$$a_1 = 0,5 \cdot (F_2 - 1); a_2 = 0,5 \cdot (F_2 + 1);$$

$$F_2 = \left(\frac{V^2}{UW} \right)^2 \frac{1}{b_1 + b_2};$$

$$b_1 = \frac{1}{2U} \left[\frac{J_0(U)}{J_1(U)} - \frac{J_2(U)}{J_1(U)} \right];$$

$$b_2 = \frac{1}{2W} \left[\frac{K_0(U)}{K_1(U)} + \frac{K_2(U)}{K_1(U)} \right];$$

$$U^2 = a^2 \cdot (k^2 n_0^2 - \tilde{\beta}^2); W^2 = V^2 - U^2;$$

$$V = k a n_0 \sqrt{2\Delta}; \Delta = \frac{n_0^2 - n_{cl}^2}{2n_0^2};$$

$$\Delta n_T^2 = n_T^2 - n_C^2; R = \frac{r}{a};$$

$$\tilde{N} = \frac{\pi a^2 n_0}{2} \cdot \frac{V}{U} \cdot \frac{K_1(W)}{K_0(W)},$$

где n_0 – показатель преломления материала сердцевины световода; n_{cl} – показатель преломления материала оболочки световода; n_T – значение показателя преломления материала в зоне локальной неоднородности; a – радиус сердцевины световода.

Постоянная распространения невозмущенного ступенчатого световода находится при решении характеристического уравнения:

$$\frac{1}{U} \cdot \frac{J_1(U)}{J_0(W)} = \frac{1}{W} \cdot \frac{K_1(W)}{K_0(W)}.$$

Подставляя (10)-(18) в (9), получаем

$$B_g = \frac{k \Delta n_T^2 U^2}{\tilde{N} K_1^2(W)} \cdot \int_{-\varphi_m}^{\varphi_m} \int_{R_m(\varphi)}^b \left\{ \frac{K_1^2(WR)}{(\tilde{\beta} a)^2} - \frac{4a_1 a_2}{W^2} K_0(WR) K_2(WR) \right\} \cos^2 \varphi R dR d\varphi$$

и $\varphi_m = \arcsin(r_w / b)$.

Воспользуемся рекуррентным соотношением [16-17]:

$$K_{v-1}(z) - K_{v+1}(z) = -2\nu K_v(z)/z.$$

Из (20), возводя левую и правую части в квадрат и группируя члены, получаем, что

$$K_{v-1}(z) \cdot K_{v+1}(z) = \frac{1}{2} [K_{v-1}^2(z) + K_{v+1}^2(z)] - \frac{2\nu^2}{z^2} K_v^2(z).$$

Отсюда следует

$$\int K_{v-1}(z) \cdot K_{v+1}(z) z dz = \frac{1}{2} \int K_{v-1}^2(z) z dz + \frac{1}{2} \int K_{v+1}^2(z) z dz - 2\nu^2 \int \frac{K_v^2}{z} dz.$$

Воспользовавшись табличными интегралами [16-17]:

$$\int K_v^2(z) z dz = \frac{z^2}{2} [K_v^2(z) - K_{v-1}(z) K_{v+1}(z)];$$

$$\int \frac{1}{z} K_v^2(z) dz = \frac{1}{2} [K_0^2(z) - K_1^2(z)],$$

получаем

$$\int K_{v-1}(z) \cdot K_{v+1}(z) z dz = \frac{z^2}{4} [K_0^2(z) - K_1^2(z) + K_2^2(z) - K_1(z) \cdot K_2(z)] - K_0^2(z) + K_1^2(z)$$

и, подставляя (23); (25) в (19), окончательно получаем

$$B_g = \frac{k \Delta n_T^2 U^2}{\tilde{N} K_1^2(W)} \cdot \int_{-\varphi_m}^{\varphi_m} \left\{ \frac{G_1 [R_m(\varphi), b]}{(\tilde{\beta} a)^2} - \frac{4a_1 a_2}{W^2} G_0 [R_m(\varphi), b] \right\} \cos^2 \varphi d\varphi$$

и $\varphi_m = \arcsin(r_w / b)$;
 $R_m(\varphi) = b \cdot \cos \varphi - \sqrt{r_x^2 - b^2 \sin^2 \varphi}.$

Здесь

$$G_{11} [R_m(\varphi), b] = \Psi_1(b) - \Psi_1 [R_{1m}(\varphi)];$$

$$G_{02} [R_m(\varphi), b] = \Psi_0(b) - \Psi_0 [R_{2m}(\varphi)];$$

$$\Psi_{11}(R) = \frac{R^2}{2} [K_1^2(WR) - K_0^2(WR) \cdot K_2^2(WR)];$$

$$\Psi_{02}(R) = \frac{R^2}{4} [K_0^2(WR) - K_1^2(WR) + K_2^2(WR) - K_1(WR) \cdot K_3(WR)] - K_0^2(WR) + K_1^2(WR).$$

На рис. 7 представлены результаты расчета оценок «геометрической» составляющей двулучепреломления стандартного ступенчатого однодого кварцевого ОВ типа SMF28e в зависимости от отношения радиуса зеркальной зоны к радиусу сердцевинки световода. Приведены примеры вычислений для длины волны $\lambda = 1,55$ мкм. Согласно [18], для ОВ типа SMF28e диаметр сердцевинки принимали равным $a = 4,15$ мкм, радиус оболочки $b = 62,50$ мкм, а разброс показателей преломления сердцевинки и оболочки световода 0,36%.

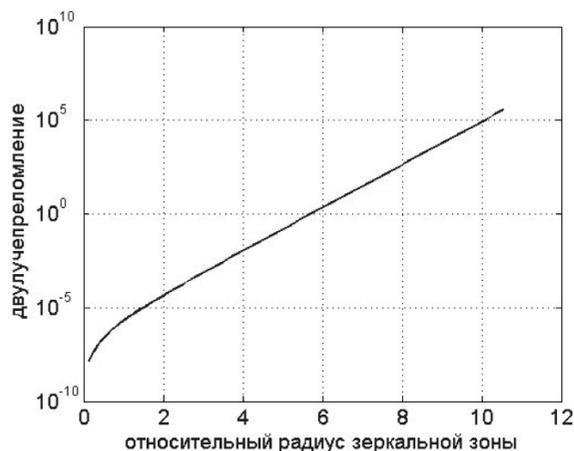


Рис. 7. Зависимость модовой составляющей двулучепреломления стандартного ступенчатого ОВ с микротрещиной в оболочке от отношения радиуса зеркальной зоны к радиусу сердцевинки световода – r_x/a

Показатели преломления чистого кварцевого стекла оболочки и сердцевинки, легированного окисью германия, рассчитывались по формуле Селмейера [1; 19-20] согласно методике, изложенной в [20]. При этом показатель преломления в зеркальной области полагали равным $n_T = 1$. Интегрирование в (26) выполняли численно методом трапеций. Погрешности вычисления интегралов оценивали по результатам вычислений с уменьшенным вдвое шагом. Во всех рассмотренных примерах она не превышала 0,1%. Как следует из графиков, при значениях радиуса зеркальной зоны микротрещины более радиуса сердцевинки световода «геометрическое» двулучепреломление растет практически пропорционально логарифму радиуса зеркальной зоны. При увеличении размера микротрещины в два раза двулучепреломление возрастает практически на два порядка.

Заключение

В работе получено выражение для расчета оценок составляющей двулучепреломления стандартных ступенчатых кварцевых ОВ, об-

условленной нарушением осевой симметрии конструкции световода из-за микротрещины в оболочке. Получены оценки рассматриваемой составляющей двулучепреломления для ОВ типа SMF28e в зависимости от размера зеркальной зоны микротрещины. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о высокой чувствительности поляризационных характеристик ОВ к дефектам в оболочке и потенциальной возможности выявления локальных дефектов типа микротрещины на поверхности оболочки световода на ранней стадии их развития методами поляризационной рефлектометрии.

Литература

1. Бурдин В.А., Дмитриев Е.В. Методы и средства локализации дефектов волокна в строительных длинах оптического кабеля // Вестник связи. № 7, 2010. – С. 19-21.
2. Бурдин В.А., Дмитриев Е.В. Локализация дефектов оболочки волоконного световода на коротких длинах оптического волокна // ИКТ. Т. 8, № 3, 2010. – С. 34-37.
3. Бурдин В.А., Дашков М.В., Дмитриев Е.В. Применение поляризационной рефлектометрии для мониторинга оптических волокон кабельных линий связи // Фотон-Экспресс. №6 (110), 2013. – С. 281-282.
4. Okamoto K. Fundamentals of optical waveguides. San Diego: Academic Press, 2000. – 430 p.
5. Galtarossa A., Menyuk C. R. Polarization mode dispersion. Springer, 2005. – 296 p.
6. Kumar A., Ghatak A. Polarization of light with applications in optical fibers. SPIE Press, 2011. – 246 p.
7. Shand E.B. Breaking stress of glass determined from dimension of fracture mirrors // J of Amer. Ceram. Soc. V.42 [10], 1959. – P. 474-477.
8. Mecholsky J.J., Rice R.W., Freiman S.W. Prediction of fracture energy and flaw size in glasses from measurements of mirror size // J of Amer. Ceram. Soc. V. 57 [10], 1973. – P. 440-443.
9. Mecholsky J.J. Fracture Surface Analysis of Optical Fibers // ASM International, Ceramics and glasses of the engineered materials handbook. V. 4, 1991. – P. 663-668.
10. Castilone R.J., Glaesemann G.S., Hanson T.A. Relationship between mirror dimensions and failure stress for optical fibers // Proceedings of SPIE. V. 4639, 2002. – P. 7991-7998.
11. Шафигуллин Л.Н. Техническое обслуживание ВОЛС. Моделирование и оптимизация технологических процессов. Казань: Новое знание, 2012. – 163 с.

12. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1981. – 720 с.
13. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
14. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. – 656 с.
15. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. – 512 с.
16. Градштейн И., Рыжик И. Таблицы интегралов // М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
17. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям // М.: Наука, 1979. – 830 с.
18. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 298 с.
19. Fleming J.W. Material dispersion in lightguide glasses // Electronics Letters. V. 14, №11, 1978. – P. 326-328.
20. Бурдин В.А. Метод учета дисперсионных свойств кварцевого стекла в задачах расчета хроматической дисперсии оптических волокон // ИКТ. Т. 6, № 2, 2008. – С. 37-41.

SIMULATION OF MODAL BIREFRINGENCE OF STEP INDEX OPTICAL FIBER WITH MICROCRACK IN CLADDING

Burdin V.A., Dmitriev E.V.

This work presents model for birefringence components in step index silica single-mode optical fiber occurring due to axial dissymmetry by micro crack in the cladding. The expression for approximate estimation of mentioned component value is derived. We represent some results of estimations for standard step index single-mode fiber SMF28e.

***Keywords:** step index optical fiber, optical waveguide, birefringence, micro crack, mirrored area, refractive index, mode.*

Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., профессор, проректор на науке и инновациям Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 332 21 61. E-mail: burdin@psati.ru

Дмитриев Евгений Владимирович, начальник научно-исследовательского отдела ПГУТИ. Тел. (8-846) 339 11 09. E-mail: nio@psati.ru

УДК 621.394.74

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫЗОВАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИНФОРМИРОВАННОСТИ О СОСТОЯНИИ ЦЕНТРОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫЗОВОВ

Глушак Е.В.

В статье проводится экспериментальное исследование модели распределенного центра обслуживания вызовов (РЦОВ) на основе имитационного моделирования. Представлены результаты моделирования, которые показывают качество обслуживания вызовов в РЦОВ при различных вариантах информированности о состоянии отдельных центров обслуживания вызовов (ЦОВ), входящих в состав РЦОВ.

***Ключевые слова:** распределенный центр обслуживания вызовов, информированность центров, время ожидания, время обслуживания, игровые модели, коэффициент загрузки.*

Введение

В настоящее время распределенные центры обслуживания вызовов нашли применение во многих социально-экономических отраслях, например, в службах экстренного реагирования, банковских и финансовых сферах, торговых, страховых, туристических компаниях, а также в информационно-справочных службах операторов связи. Благодаря именно РЦОВ обеспечивается связь с клиентами в любое время суток. Необходимость в маршрутизации вызова к операторам другого центра возникает в том случае, когда данный вызов может быть