

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

УДК 621.396

РЕШЕНИЕ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МОДЫ СТУПЕНЧАТОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКОННОГО ВОЛНОВОДА С КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

*Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А., Кубанов В.П.**Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: burdin@psati.ru*

В данной работе рассмотрено решение для фундаментальной моды ступенчатого оптического волоконного волновода из кварцевого стекла, учитывающее все составляющие зависимости показателя преломления материала от пиковой мощности оптического излучения вследствие нелинейности Керра. Методом приближения Гаусса для фундаментальной моды в аналитическом виде получены формула для постоянной распространения и характеристическое уравнение относительно эквивалентного радиуса пятна моды, которые учитывают все составляющие показателя преломления материала световода, обусловленные нелинейностью Керра. Для ряда примеров приведены результаты вычислений зависимостей эквивалентного радиуса пятна моды и постоянной распространения моды от мощности оптического излучения при условии распространения в световоде только фундаментальной моды. Показано, что в этом случае с погрешностью менее 0,1% зависимость постоянной распространения фундаментальной моды от мощности оптического излучения может быть аппроксимирована полиномом второй степени. Для рассмотренных примеров волоконных волноводов из кварцевого стекла получены значения коэффициентов аппроксимации.

Ключевые слова: световод, оптическое волокно, фундаментальная мода, плавленое кварцевое стекло, нелинейность Керра, волоконный фемтосекундный лазер, постоянная распространения моды, характеристическое уравнение, эквивалентный радиус пятна моды, метод приближения Гаусса

Введение

Прогресс в области создания волоконных фемтосекундных лазеров и их приложений [1-6] делает крайне актуальной задачу моделирования процессов распространения в оптических волоконных волноводах ультракоротких импульсов большой мощности. Уже сегодня с помощью таких лазеров получены импульсы длительностью менее 30 фемтосекунд с пиковой мощностью до 81 ГВт и энергией 2,6 МДж [1-3]. При таких значениях пиковой мощности нельзя не учитывать зависимости параметров мод оптического волновода от нелинейности [7-8].

Для световодов из плавленого кварцевого стекла можно полагать, что при фемтосекундных длительностях импульсов можно ограничиться учетом только нелинейности Керра [9-10]. При этом условии в [11] методом приближения Гаусса [12-14] было получено аналитическое решение для фундаментальной моды кварцевого ступенчатого оптического волокна с учетом влияния керровской нелинейности. Однако авторы [11] полагали, что мощность достаточно мала, чтобы пренебречь составляющими, включающими оптическую мощность во второй степени. Следует ожидать, что при значениях пиковой мощности порядка десятков мегаватт это недопустимо.

В данной работе рассмотрено решение для фундаментальной моды ступенчатого оптического волоконного волновода из кварцевого стекла, учитывающее все составляющие зависимости показателя преломления материала от пиковой мощности оптического излучения вследствие нелинейности Керра. Представлены результаты анализа зависимостей радиуса пятна и постоянной распространения фундаментальной моды такого волновода от пиковой мощности оптического излучения, обусловленных керровской нелинейностью.

Постоянная распространения фундаментальной моды кварцевого ступенчатого оптического волновода с керровской нелинейностью

При выводе выражения для постоянной распространения фундаментальной моды ступенчатого волоконного световода с керровской нелинейностью как в [11] воспользуемся методом приближения Гаусса [12-14]. В частности, используем представленную в [14] форму записи общей формулы для постоянной распространения некоторой моды заданных азимутального и радиального порядков круглого оптического

волновода с произвольным профилем показателя преломления:

$$\beta^2 = \int_0^2 k^2 n^2(x) [F_m^{(l)}(x)]^2 dx - \frac{1}{a^2 R_0^2}, \quad (1)$$

$$x = (R/R_0)^2; R = r/a; R_0 = r_0/a, \quad (2)$$

где β – постоянная распространения моды; $k = 2\pi/\lambda$ – постоянная распространения в свободном пространстве; λ – длина волны; n – показатель преломления материала оптического волокна; a – радиус сердцевины оптического волокна; r_0 – эквивалентный радиус пятна моды; $F_m^{(l)}(x)$ – функция радиального распределения поля моды азимутального порядка l и радиального порядка m по сечению оптического волокна; $C_{l,m}$ – константа, определяемая в зависимости от азимутального порядка и радиального порядка моды; r – радиальная координата.

С учетом вклада нелинейности Керра распределение показателя преломления вдоль радиуса ступенчатого оптического волокна описывается формулой [7]:

$$n_N(R) = n_S + n_2 I(R), \quad (3)$$

где n_2 – параметр керровской нелинейности, мкм²/Вт; $I(R)$ – распределение интенсивности оптического излучения вдоль радиуса волокна; $n_S(R)$ – профиль показателя преломления ступенчатого оптического волокна без учета нелинейности, который, согласно [12], описывается соотношением:

$$n_S(R) = \begin{cases} n_c, & R \leq 1; \\ n_{cl}, & R > 1. \end{cases} \quad (4)$$

Предполагается, что распределение интенсивности оптического излучения в волоконном световоде имеет осевую симметрию и согласно приближению Гаусса [12] распределение фундаментальной моды по сечению волоконного световода описывается с учетом (2) как

$$F_m^{(l)}(x) = \exp(-x/2). \quad (5)$$

Тогда, согласно (2)-(5), если в ступенчатом оптическом волокне распространяется только фундаментальная мода, то его профиль показателя преломления может быть представлен как:

$$n_N(x) = n_S(R) + n_2 \frac{P_m \exp(-x)}{\pi a^2 2R_0^2}, \quad (6)$$

где P_m – пиковая оптическая мощность. Здесь учитывали, что радиус пятна моды волоконного

световода в два раза больше его эквивалентного значения по аппроксимации Гаусса [15]. Подставляя (5) и (6) в (1), получаем:

$$\beta^2 = \left(\sum_{i=1}^3 Int_i \right) + \frac{1}{a^2 R_0^2};$$

$$Int_1 = k^2 \left(\int_0^{x_0} n_c^2 e^{-x} dx + \int_{x_0}^{\infty} n_{cl}^2 e^{-x} dx \right); \quad (7)$$

$$Int_2 = 2k^2 A_1 x_0 \left(\int_0^{x_0} n_c^2 e^{-2x} dx + \int_{x_0}^{\infty} n_{cl}^2 e^{-2x} dx \right);$$

$$Int_3 = k^2 A_1^2 x_0^2 \int_0^{\infty} e^{-3x} dx;$$

$$A_1 = n_2 P_m / 2\pi a^2; x_0 = 1/R_0^2.$$

Интегрируя (7) согласно [16-18], получаем выражение для постоянной распространения фундаментальной моды в ступенчатом оптическом волокне с учетом нелинейности Керра:

$$\beta^2 = k^2 n_c^2 - k^2 N A^2 e^{-x_0} - k^2 \Delta n A_1 x_0 e^{-2x_0} + k^2 n_c A_1 x_0 + k^2 A_1^2 x_0^2 / 3 - x_0 / a^2. \quad (8)$$

В отличие от решения, представленного в [11], выражение (8) включает все составляющие показателя преломления материала, обусловленные нелинейностью Керра.

Характеристическое уравнение относительно эквивалентного радиуса пятна фундаментальной моды кварцевого ступенчатого оптического волновода с керровской нелинейностью

Согласно методу приближения Гаусса [12] уравнение относительно эквивалентного радиуса пятна моды получаем, дифференцируя выражение для постоянной распространения моды по эквивалентному радиусу пятна моды и приравнявая эту производную к нулю, что эквивалентно уравнению $\frac{\partial \beta^2}{\partial x_0} = 0$. Дифференцируя (8) по x_0 и приравнявая полученную производную к нулю, получаем следующее характеристическое уравнение:

$$V^2 \left\{ e^{-x_0} + \frac{A_1}{NA^2} [\Delta n (2x_0 - 1) e^{-2x_0} - n_c] + \frac{2A_1^2 x_0^2}{3NA^2} \right\} - 1 = 0; \quad (9)$$

$$V^2 = k^2 a^2 NA^2, NA^2 = n_c^2 - n_{cl}^2, \Delta n = n_c - n_{cl}.$$

В отличие от известного решения, представленного в [11], уравнение (9) учитывает все со-

ставляющие показателя преломления материала, обусловленные нелинейностью Керра.

Анализ влияния керровской нелинейности на радиус пятна фундаментальной моды ступенчатого оптического волновода

В целях оценивания зависимости эквивалентного радиуса пятна от пиковой мощности оптического излучения были рассмотрены примеры волоконного оптического волновода с диаметром сердцевины 2,0 мкм (см. пример №1); 4,15 мкм (пример №2) и 8,0 мкм (пример №3). Значения показателя преломления материала сердцевины и оболочки, параметра керровской нелинейности были заданы как для стандартного ступенчатого оптического волокна SMF-28 [19]. Для примера №1 расчеты были выполнены на длине волны 800 нм, а для примеров №2 и №3 на длине волны 1550 нм. Соответственно, в примере №2 рассмотрено оптическое волокно типа SMF-28 с учетом керровской нелинейности на длине волны 1550 нм.

На рис. 1 приведены результаты решения уравнения (8) для примера №1, а на рис. 2 – для примеров №2 и №3. Анализ уравнения (9) и результатов вычислений показал, что, как и ожидалось, вследствие нелинейности Керра с увеличением мощности оптического излучения радиус пятна моды уменьшается. В зависимости от величины $n_2 P_m n_c / \lambda^2$ можно выделить три области решения уравнения (9). При значениях этой величины до 0,8 - 0,9 существует только одно решение уравнения. При значениях более 0,9 появляется второе решение. Однако уже при $n_2 P_m n_c / \lambda^2 \rightarrow 1$ уравнение (9) не имеет решений. Вопрос о физическом смысле второго решения характеристического уравнения выходит за рамки статьи и здесь не рассматривается.

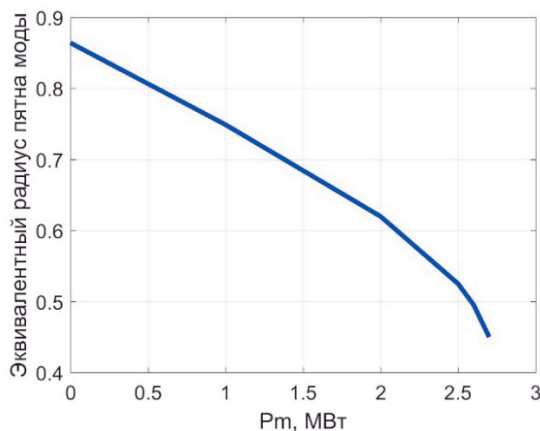


Рис. 1. Результаты решения уравнения (8) для примера №1

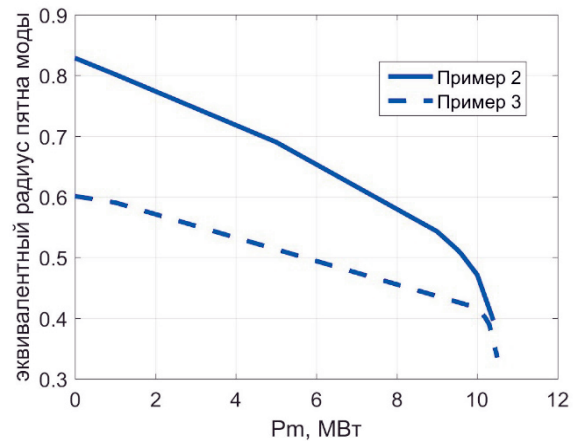


Рис. 2. Результаты решения уравнения (8) для примеров №2 и №3

Анализ влияния керровской нелинейности на постоянную распространения фундаментальной моды ступенчатого оптического волновода

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты вычислений зависимостей постоянной распространения фундаментальной моды от пиковой мощности в ступенчатом оптическом волокне с керровской нелинейностью по формулам (8 - 9).

Анализ полученных зависимостей показал, что они с высокой степенью точности могут быть аппроксимированы полиномами второй степени. В таблице 1 приведены значения коэффициентов аппроксимации и оценки максимальной погрешности такой аппроксимации для рассмотренных примеров. Во всех рассмотренных случаях погрешность не превысила 0,01%.

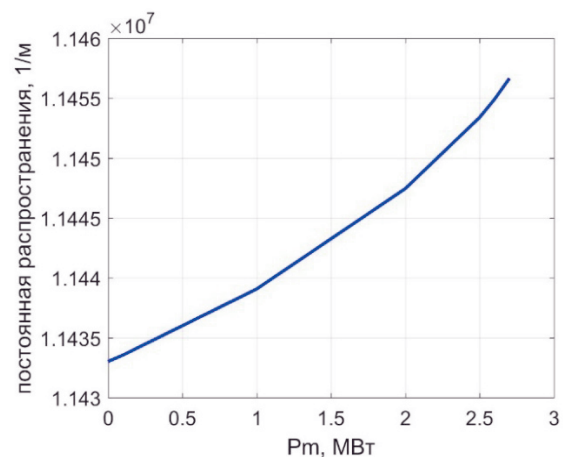


Рис. 3. Зависимость постоянной распространения фундаментальной моды от мощности оптического излучения для примера №1

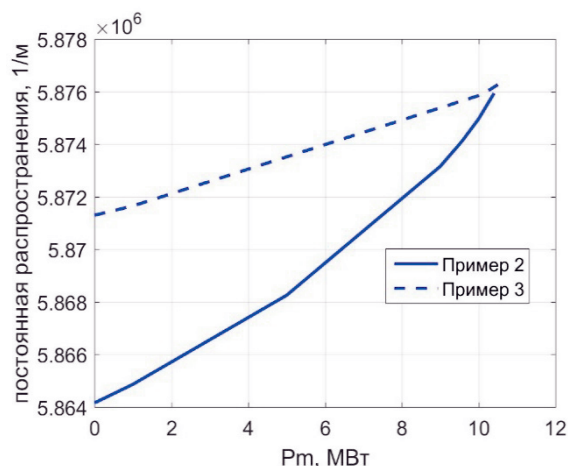


Рис. 4. Зависимость постоянной распространения фундаментальной моды от мощности оптического излучения для примеров №2 и №3

Заключение

В работе представлен вывод выражения для фундаментальной моды кварцевого ступенчатого волоконного световода с керровской нелинейностью и характеристического уравнения для нее. В отличие от известных решений представленное в данной работе учитывает все составляющие показателя преломления материала, обусловленные нелинейностью Керра.

Таблица 1. Значения коэффициентов аппроксимации и оценки максимальной погрешности

Номер примера	$\beta \cdot 10^{-6} = a + bP_m + cP_m^2$			δ_{max} , %
	a	b	c	
1	11,43	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	0,004
2	5,86	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$5,78 \cdot 10^{-5}$	0,006
3	5,87	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	0,001

Для ряда примеров приведены результаты вычислений зависимостей эквивалентного радиуса пятна моды и постоянной распространения моды от мощности оптического излучения при условии распространения в световоде только фундаментальной моды.

Показано, что в этом случае с погрешностью менее 0,1% зависимость постоянной распространения фундаментальной моды от мощности оптического излучения может быть аппроксимирована полиномом второй степени. Для рассмотренных примеров волоконных волноводов из кварцевого стекла получены значения коэффициентов аппроксимации. Исследование выполнено

при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60015 мол_а_дк.

Литература

1. Debord B., Alharbi M., Vincetti L. e. a. Multi-meter fiber-delivery and pulse self-compression of milli-Joule femtosecond laser and fiber-aided laser-micromachining // Optics express. No 22 (9), 2014. – P. 10735-10746. doi: 10.1364/OE.22.010735.
2. Pouysegur J., Guichard F., Weichelt B. e. a. Single-stage Yb:YAG booster amplifier producing 2.3 mJ, 520 fs pulses at 10 kHz // Proceedings Advanced Solid State Lasers, hal-01359547, 2015.
3. Debord B., Gerome F., Paul P.-M., Husakou A., Benabid F. 2.6 mJ energy and 81 GW peak power femtosecond laserpulse delivery and spectral broadening in inhibited coupling Kagome fiber // CLEO, STh4L.7.pdf, 2015, doi.org/10.1364/CLEO_SI.2015.STh4L.7.
4. Kryukov P. G. Femtosecond pulses. The introduction of a new area of laser physics. M.: Fizmatlit, 2008. – 205 p.
5. Stingl A. Femtosecond future // Nature Photonics, No. 4, 2010. – 158 p.
6. Sibbett W., Lagatsky A. A., Brown C. T. A. The development and application of femtosecond laser systems // Optics Express, No. 20 (7), 2012. – P. 6989-7001.
7. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. United States: Academic Press, 2001. – 467 p.
8. Lancry M., Poumellec B., Chahid-Erraji A. e.a. Dependence of the femtosecond laser refractive index change thresholds on the chemical composition of doped-silica glasses // Optical Materials Express. Vol. 1, No. 4, 2001. – P. 711-723. doi: 10.1364/OME.1.000711.
9. Wood R.M. Laser-Induced Damage of Optical Materials. Boca Raton, United States: CRC Press, 2003. – 241 p.
10. Ristau D. Laser-Induced Damage in Optical Materials. Boca Raton, United States: CRC Press, 2014. – 551 p.
11. Burdin V.A., Bourdine A.V. Dispersion characteristics of step index single mode optical fiber with Kerr nonlinearity // SPIE Proceedings. Optical Technologies for Telecommunications, 2016. Vol. 10342, 2017. – P. 10342-0N (11). doi: 10.1117/12.2270639
12. Снайдер А., Лав Дж. Теория диэлектрических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
13. Бурдин В.А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий пе-

- редачи сетей связи // М: Радио и связь, 2002. – 312 с.
14. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Решение для произвольной направленной моды круглого оптического волокна на основе метода приближения Гаусса // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 14, №2, 2011. – С. 65-72.
15. Petermann K. Fundamental mode microbending loss in graded-index and W fibres // Optical and Quantum Electronics, No. 9, 1977. – P.167-170. doi: 10.1007/BF00619896.
16. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1977. – 228 с.
17. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. – 830 с.
18. Градштейн И., Рыжик И. Таблицы интегралов. М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
19. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.

Получено 20.10.2017

Андреев Владимир Александрович, д.т.н., профессор, президент Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. (8-846) 228-03-38. E-mail: andreev@psati.ru

Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., профессор, проректор по науке и инновациям, заведующий Кафедрой линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС) ПГУТИ. Тел. (8-846-332-21-61). E-mail: burdin@psati.ru

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., доцент, профессор Кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-66. E-mail: bourdine@psuti.ru

Кубанов Виктор Павлович, д.т.н., профессор, советник при ректорате ПГУТИ. Тел. (8-846) 228-00-59. E-mail: kubanov@psati.ru

SOLUTION FOR THE FUNDAMENTAL MODE OF A STEP-INDEX LIGHTGUIDE WITH KERR NONLINEARITY

Andreev V.A., Bourdine A.V., Burdin V.A., Kubanov V.P.

Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russia Federation

E-mail: burdin@psati.ru

The progress in the development of femtosecond fiber lasers and their applications makes the problem of modeling the high power ultrashort pulses propagation in optical fiber cables extremely important. Modern fiber lasers can generate pulses with a duration of less than ten femtoseconds with a peak power of up to tens GW. At such values of peak power nonlinear effects cannot be ignored. For fused quartz fibers and femtosecond pulse duration it can be assumed that only the Kerr nonlinearity is present. For this assumption the approximate analytical solution for the fundamental mode of an optical fiber with step-index profile was already found. This solution was obtained with Gaussian approximation method and it already takes the Kerr nonlinearity into account. However, it neglects the second degree of approximation, which is unacceptable at peak power values exceeding tens of megawatts. In this paper, we consider a solution that takes into account refractive index dependence on high-order terms of light signal peak power which occurs due to the Kerr nonlinearity. For some optical fibers studied the results of the analysis are presented, showing the dependency of the fundamental mode spot radius and propagation constant on the light signal peak power in the presence of the Kerr nonlinearity. It is shown that, with an error of less than 0.1%, the dependence of the fundamental mode propagation constant on the light signal power can be approximated by a second-order polynomial. For the considered optic fiber samples the values of the approximation coefficients were obtained.

Keywords: lightguide, optical fiber, fundamental mode, fused quartz fiber, Kerr nonlinearity, fiber laser, mode propagation constant, characteristic equation, equivalent mode spot radius, Gaussian approximation

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.4.01

Andreev Vladimir Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77 Moskovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Doctor of Technical Science; Professor. Tel.: +78462280338. E-mail: andreev@psati.ru

Bourdine Anton Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77 Moskovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Doctor of Technical Science; Associated Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: bourdine@psuti.ru

Burdin Vladimir Alexandrovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77 Moskovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Communication Lines; Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +78463322161. E-mail: burdin@psati.ru

Kubanov Viktor Pavlovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara 443090, Russian Federation; Professor of the Department of Electrodynamics and Antennas, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel.: +78462280022. E-mail: kubanov@psati.ru

References

1. Debord B., Alharbi M., Vincetti L., Husakou A., Fourcade-Dutin C., Hoenninger C., Mottay E., Gerome F., Benabid F. Multi-meter fiber-delivery and pulse self-compression of milli-Joule femtosecond laser and fiber-aided laser-micromachining. *Optics express*, 204, vol. 22, no. 9, , pp. 10735-10746. doi: 10.1364/OE.22.010735.
2. Pouysegur J., Guichard F., Weichelt B., Delaigue M., Zaouter Y., Hyonninger C., Mottay E., Georges P., Druon F. Single-stage Yb:YAG booster amplifier producing 2.3 mJ, 520 fs pulses at 10 kHz. *Proceedings Advanced Solid State Lasers*, 2015, hal-01359547. doi: 10.1364/ASSL.2015.AW3A.5.
3. Debord B., Gerome F., Paul P.-M., Husakou A., Benabid F. 2.6 mJ energy and 81 GW peak power femtosecond laserpulse delivery and spectral broadening in inhibited coupling Kagome fiber. *CLEO*, 2015, STh4L.7. doi: 10.1364/CLEO_SI.2015.STh4L.7.
4. Kryukov P.G. *Femtosecond pulses. The introduction of a new area of laser physics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 205 p.
5. Stingl A. Femtosecond future. *Nature Photonics*, 2010, no. 4. 158 p.
6. Sibbett W., Lagatsky A.A., Brown C.T.A. The development and application of femtosecond laser systems. *Optics Express*, vol. 20, no.7, 2012, pp. 6989-7001.
7. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 2001. 467 p.
8. Lancry M., Poumellec B., Chahid-Erroj, A., Beresna M., Kazansky P.G. Dependence of the femtosecond laser refractive index change thresholds on the chemical composition of doped-silica glasses. *Optical Materials Express*, 2001, vol. 1, no. 4, pp. 711–723. doi: 10.1364/OME.1.000711.
9. Wood R.M. *Laser-Induced Damage of Optical Materials*. Boca Raton, United States, CRC Press Publ., 2003. 241 p.
10. Ristau D. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*. Boca Raton, United States, CRC Press Publ., 2014, 551 p.
11. Burdin V.A., Bourdine A.V. Dispersion characteristics of step index single mode optical fiber with Kerr nonlinearity. *SPIE Proceedings*, 2017, vol. 10342, pp. 10342-0N. doi: 10.1117/12.2270639.
12. Snajder A., Lav Dzh. *Teoriya dielektricheskikh volnovodov* [Theory of dielectric waveguides]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1987. 656 p.
13. Burdin V.A. *Osnovy modelirovaniya kusochno-regulyarnykh volokonno-opticheskikh linij peredachi setej svyazi* [Fundamentals of modeling of piecewise-regular fiber-optic transmission lines of communication networks]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2002. 312 p.
14. Burdin V.A., Bourdine A.V. Reshenie dlya proizvol'noj napravlyaemoj mody kruglogo opticheskogo volokna na osnove metoda priblizheniya gaussa [Solution for an arbitrary guided mode of a circular optical fiber based on the Gaussian approximation method]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2011, vol. 14, no. 2, pp. 65–72.
15. Petermann K. Fundamental mode microbending loss in graded-index and W fibres. *Optical and Quantum Electronics*, 1977, no. 9, pp. 167-175. doi: 10.1007/BF00619896.
16. Dvajt G.B. *Tablicy integralov i drugie matematicheskie formuly* [Tables of integrals and other mathematical formulas]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 228 p.
17. Abramovic M., Stigan I. *Spravochnik po special'nym funkciyam* [Directory of special functions]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 830 p.
18. Gradshtejn I., Ryzhik I. *Tablicy integralov* [Tables of integrals]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 1100 p.

19. Listvin A.V., Listvin V.N., SHvyrkov D.V. *Opticheskie volokna dlya linij svyazi* [Optical fibers for communication lines]. Moscow, LESARart Publ., 2003. 288 p.

Received 20.10.2017

УДК 50.03.05

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*Васильев В.И., Вульфин А.М., Гузаиров М.Б., Кириллова А.Д.
Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, РФ
E-mail: vasilyev@ugatu.ac.ru*

Целью статьи является разработка формализованной методики комплексной оценки выполнения требований к обеспечению защиты информации в автоматизированной системе с применением метода нечеткого логического вывода и экспертных оценок. Предложена процедура определения уровня значимости (критичности) обрабатываемой информации на основе системы нечетких правил (продукций) с учетом степени возможного ущерба от нарушения целостности, доступности или конфиденциальности информации. Рассмотрен пример, иллюстрирующий особенности применения предложенной методики к построению защищенной автоматизированной системы управления.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, защита информации, уровень значимости (критичности) информации, класс защищенности

Введение

Проблеме защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами (далее сокращенно АСУ ТП) в последние годы уделяется повышенное внимание на уровне общества, государственных и коммерческих структур, предприятий и организаций. Это в первую очередь относится к АСУ ТП, осуществляющим управление критически важными объектами, включающими в себя объекты топливно-энергетического комплекса, транспортной безопасности, использования атомной энергии, опасные производственные объекты, гидротехнические сооружения. Актуальность и острота проблемы обеспечения информационной безопасности (ИБ) АСУ ТП подчеркивается статистикой резкого роста числа инцидентов ИБ промышленных объектов и возрастанием тяжести последствий от реализации кибератак.

По результатам исследований, проведенных Центром ICS CERT при «Лаборатории Касперского» [1], в период с июля по декабрь 2016 года с вредоносным программным обеспечением (ПО) в России столкнулись 42% компьютеров, так или иначе относящихся к технологической сети предприятий. В 28% случаев вредоносное ПО попадало на компьютеры из Интернета, в 6% – при подключении переносных накопителей. В сетях промыш-

ленных предприятий обнаружено в общей сложности 20 тыс. модификаций вредоносного ПО.

В отчете «Лаборатории Касперского» также говорится, что ICS CERT обнаружил серию фишинговых атак, начавшихся не позднее июня 2016 года и продолжающихся до сих пор. Они направлены преимущественно на промышленные компании; в общей сложности во второй половине 2016 года атакам подверглись более 500 организаций из более чем 50 стран мира. Исследования показали, что из всех целевых атак, обнаруженных тогда «Лабораторией Касперского», каждая четвертая была направлена на предприятия. В системах промышленной автоматизации, в том числе на объектах критической инфраструктуры, обнаружено 75 незакрытых уязвимостей, включая 58 максимально критичных для безопасности предприятий. Из 75 обнаруженных в 2016 году уязвимостей к середине марта 2017 года производителями ПО было закрыто только 30.

Приведенные выше данные подтверждаются и результатами исследований компании Positive Technologies [2], согласно которым количество промышленных компаний, столкнувшихся с инцидентами ИБ в 2016 году, возросло почти в три раза по сравнению с 2015 годом. Как отмечают авторы [2], злоумышленники атаковали объекты критической инфраструктуры целенаправленно, причем атаки отличались тщательностью подготовки, нередко с использованием принципов социальной инженерии.