

14. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of packet jitter for correlated traffic. *International Conference on «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019»*, 2019, vol. 11660, p. 610–620. (Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham). DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9_53.
15. Tarasov V.N., Kartashevskij I.V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovanij v upravly-aemoj sisteme massovogo obsluzhivaniya $H_2/H_2/1$ [Determination of the average waiting time for requirements in a managed mass service system $H_2/H_2/1$]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*, 2014, no. 3 (57), pp. 92–96. (In Russian).
16. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. Vosstanovlenie momentnyh harakteristik raspredeleniya intervalov mezhdru paketami vkhodyashchego trafika [Recovery of moment characteristics of the distribution of intervals between packets of incoming traffic]. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 40–44. (In Russian).

Received 31.01.2020

УДК 621.315

УДАЛЕННОЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЯЗИ И ИНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОАО «РЖД» НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ POF

Белоногов А.С., Шорохов Н.С.

Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, РФ

E-mail: abelonogov@rambler.ru

Статья описывает способ и систему передачи энергии лазерного излучения высокой мощности по оптоволокну для электроснабжения удаленных от основных источников питания электронных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, оптических сетей и узлов на основе технологии Power-over-Fiber с использованием специального волоконно-оптического кабеля и лазерной системы высокой мощности. Причем используемые кабели обеспечивают возможность передачи энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, и эти расстояния и уровни передаваемой мощности ранее считались недостижимыми. Стоит отметить, что этого удалось добиться за счет особой многослойной структуры кабеля, а в спектральной характеристике лазерного излучения – отсутствия спектра частот, на котором возникают явления вынужденного рамановского рассеяния, что позволило достичь приведенных в работе теоретических и экспериментальных результатов. Кроме того, предполагается, что конструкция кабелей будет выдерживать суровые атмосферные условия эксплуатации. Приведены результаты эксперимента, которые показали возможность передачи пиковой вводимой мощности лазера 5 кВт на расстояние 2 км по оптическому кабелю с получением на выходе системы 51 % исходной вводимой мощности.

Ключевые слова: *Power-over-Fiber, передача энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, оптическое волокно, вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, вынужденное рамановское рассеяние, стоксовы и антистоксовы компоненты, QВН-коннектор, коллиматор, удаленное электроснабжение оптических сетей, узлов и прочих электроустройств посредством волоконно-оптического кабеля*

Введение

Кратко опишем смысл технологии Power-over-Fiber (PoF): подразумевается, что мощность, необходимая для питания удаленного устройства, передается по оптоволокну в виде оптического излучения, генерируемого лазерным источником, с величиной оптической мощности порядка сотен мВт–десятков Вт, что значительно превышает значения, используемые в телекоммуникациях. На стороне питаемого устройства находится полупроводниковый фотоприемник особой

конструкции, называемый фотовольтаическим преобразователем, чаще всего многослойной структуры, показывающий высокую эффективность преобразования мощности на рабочей длине волны (более 25 %).

Преобразователь не имеет внешнего питания, генерация носителей заряда происходит исключительно за счет подводимой оптической мощности. При подключении преобразователя в цепь питаемого устройства преобразователь начинает работать как источник постоянного тока. Он пре-

образует мощность оптического излучения, распространяющегося по оптоволокну, в электрическую мощность. Величина электрической мощности и напряжения на выходе преобразователя зависит от характеристик выбранного преобразователя, а также от величины оптической мощности на его входе.

Используемое в статье понятие «энергия лазерного излучения высокой мощности» означает лазерный пучок, имеющий мощность порядка 5 кВт, если не указано иное. Термин «большие расстояния» – не менее 500 м, если не указано иное. Термины «значительная потеря мощности» и «значительные потери мощности» означают: не больше чем 2,0 дБ/км в зависимости от выбранной рабочей длины волны излучения; термин «значительная передача мощности» – передачу по меньшей мере около 50 % мощности [1].

На сети ОАО «РЖД» активно внедряются современное телекоммуникационное оборудование, оптические сети связи, сетевые элементы связи и иное электрооборудование. К тому же с недавнего времени актуальной стала задача организации «последней мили» и систем видеоконтроля на базе технологии **Passive Optical Network (PON)** или ее вариаций, в частности GPON, EPON и т. д. Внедрение технологии **GPON** обеспечивает весь спектр услуг связи, однако существовавшее ранее удаленное электропитание оконечного оборудования, позволявшее пользоваться телефонной связью в качестве источника питания при перерывах в энергоснабжении, стало невозможным. Поэтому для обеспечения связи и электропитания удаленных объектов автоматики, телемеханики и связи (АТС), оптических узлов и сетей связи предлагается осуществлять передачу электроэнергии по оптоволоконному кабелю, используя технологию PoF [2].

Описание проблемы

До недавнего времени считалось, что существует парадигма, заключающаяся в том, что передача энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния без значительной потери мощности является недостижимой, причем 45 % передаваемой мощности – это потеря в оптическом волокне и 50 % – потеря в фотоэлементе при преобразовании энергии света в электрический ток. Это подтверждает, например, характеристика продукции компании LaserMotive, создавшая линию продуктов PoF, которая позволяет обеспечивать передачу до 10 Вт энергии на расстояние до 10³ м [2].

Вследствие этого также считалось, что нет основания для конструирования или исследования структуры оптического волокна или волоконно-оптического кабеля, предназначенного для передачи энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния.

Потери мощности в оптическом волокне на больших расстояниях происходят по многим причинам, включая [3]:

– потери на поглощение:

$$a_n = \frac{8,69\pi n}{\lambda} \operatorname{tg} \delta, \text{ дБ/км}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, мкм; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь в световоде;

– потери на поглощение из-за гидроксильных ионов ОН:

$$\alpha_{OH} = \begin{cases} \bar{\alpha}_{OH}, & \bar{\alpha}_{OH} \leq \alpha_{OH.\max}, \\ \alpha_{OH.\max}, & \bar{\alpha}_{OH} > \alpha_{OH.\max}, \end{cases} \text{ дБ/км}, \quad (2)$$

где

$$\alpha_{OH.\max} = \alpha_{SE} - \alpha_{PP}(\lambda_{SE}) - \alpha_{ИКП}(\lambda_{SE}), \text{ дБ/км}, \quad (3)$$

$$\bar{\alpha}_{OH} = \frac{7\Delta\alpha_{OH}}{49 + (\lambda - \lambda_{SE})^2} \text{ дБ/км}. \quad (4)$$

– рэлеевское рассеяние:

$$\alpha_{PP} = \frac{C_{PP}}{\lambda^4}, \text{ дБ/км}, \quad (5)$$

где λ – длина волны, мкм; C_{PP} – постоянная, которая зависит от состава материала сердцевины волокна и лежит в пределах $C_{PP} = 0,7 \dots 0,9 \text{ мкм}^4 \cdot \text{дБ/км}$;

– бриллюэновское рассеяние и рамановское рассеяние (ВРМБ).

Порог ВРМБ достигается при критической мощности накачки p_0^{cr} [4], которую можно оценить из выражения

$$g_b p_0^{cr} L_{эфф} / A_{эфф} \approx 21, \quad (6)$$

где $L_{эфф}$ – эффективная длина взаимодействия; $A_{эфф}$ – эффективная площадь сечения оптического волокна; g_b – коэффициент ВРМБ усиления.

Если взять обычные параметры световода для оптической связи на $\lambda = 1,55$ мкм: $A_{эфф} = 50 \text{ мкм}^2$, $L_{эфф} = 20 \text{ км}$, $g_b = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м/Вт}$, то (6) дает критическую мощность накачки $p_0^{cr} = 1 \text{ мВт}$. Такой низкий порог делает ВРМБ доминирующим нелинейным процессом в световодах [8].

Согласно [5], в случае вынужденного бриллюэновского рассеяния (ВБР) «порог возрастает как квадрат диаметра модового поля (ДМП) сигнала и обратно пропорционально эффективной длине волокна. Следовательно, для повышения

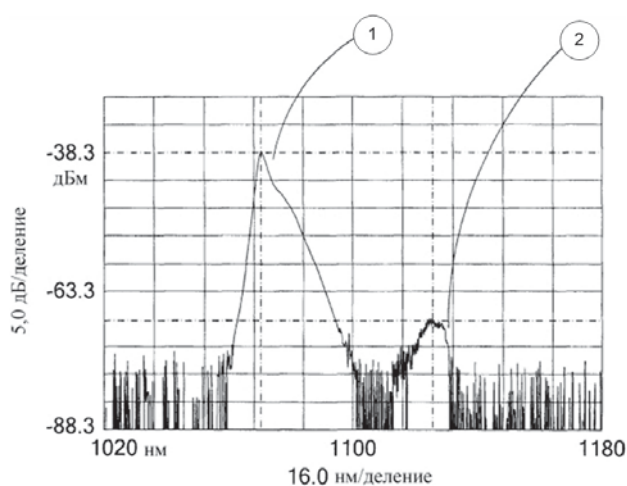


Рисунок 1. Вид спектра из предыдущего поколения техники с показом наличия явления вынужденного рамановского рассеяния [6]

мощности желательно иметь больший размер сердцевины и меньшую длину волокна». В статье Corning [10] отмечено, что «из рассеяний трех типов (рэлеевского, рамановского и бриллюэновского) ВБР признается доминирующим в нелинейных характеристиках оптического волокна». Далее указано, что «кривая выходной мощности... также показывает, что мощность сигнала снижается при повышении входной мощности сверх определенного предела. Этот вредный результат будет эффективно ограничивать выходную мощность сигнала, но будет продолжаться передача мощности стоксовой (отраженного) компоненты сигнала с помощью электрострикционного процесса, который лежит в основе явления вынужденного бриллюэновского рассеяния», что отражено в работе [9]. При этом «вынужденное бриллюэновское рассеяние известно как явление, сильно ограничивающее проектирование различных оптических систем передачи, усилителей и лазеров» [10].

Данная парадигма, дополненная техническими испытаниями, подтверждала факт существования связи между длиной волокна и передаваемой мощностью, и она показана в работе Mr. Muto в [6]. Однако при этом автор [6] установил, что мощность 4 кВт транспортируется по волокну длиной 1 км, когда к волокну прикладывается мощность лазера 5 кВт, однако дальнейших положительных результатов не было достигнуто, ибо Mr. Muto не смог исключить явление вынужденного рамановского рассеяния (ВРР). Как показано далее, это вредное явление эффективно ограничивает выходную мощность по мере увеличения длины кабеля или мощности излучения. Явление вынужденного рамановского рассеяния можно наблюдать в спектре излучения оптического волокна, который отражен на рисунке 1.

На рисунке 1 лазерный пучок показан в виде отметки «1», а вынужденное рамановское рассеяние – в виде отметки «2». Таким образом, до настоящего времени считалось, что при увеличении входной мощности от лазера или длины волокна выходная мощность волокна не будет повышаться вследствие ВБР, ВРР и других нелинейных явлений. В частности, при вынужденном бриллюэновском рассеянии выходная мощность передается по волокну обратно ко входу. Кроме того, ВБР, ВРР, а также другие вредные нелинейные эффекты в дополнение к ограничению величины мощности, которую можно передавать на выход волокна, могут приводить к нагреву волокна и в конечном счете к повреждению. Поэтому, как признает [6], «установлено, что доставка мощности 10 кВт возможна только по волокну длиной 250 м при диаметре сердцевины волокна 150 мкм. Таким образом, физическим явлением, которое ограничивает передаваемую мощность, является вынужденное рамановское рассеяние». В итоге автор [6], как это до него делали другие, считал невозможным передачу энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния.

Передача энергии лазерного излучения высокой мощности по оптическому кабелю на большие расстояния

В данной работе утверждается, что доставка энергии лазерного излучения высокой мощности на длинные расстояния возможна за счет создания системы с лазером и волоконно-оптическим кабелем, в которой исключены потери, вызванные нелинейными эффектами волокна, и которая обеспечивает передачу энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния без значительной потери мощности [1].

На рисунке 2 приведена структура испытательной системы, которая позволяет провести эксперимент по передаче энергии лазерного излучения высокой мощности на длинные расстояния, оценить различные типы волокон и кабеля для передачи высокой оптической мощности по волокну.

При этом желательно иметь волоконно-оптический кабель, который обеспечивает доставку энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния без значительной потери мощности. Поэтому, исходя из выводов [1], в работе предлагается использовать для эксперимента несколько волоконно-оптических кабелей для передачи энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, чтобы оце-

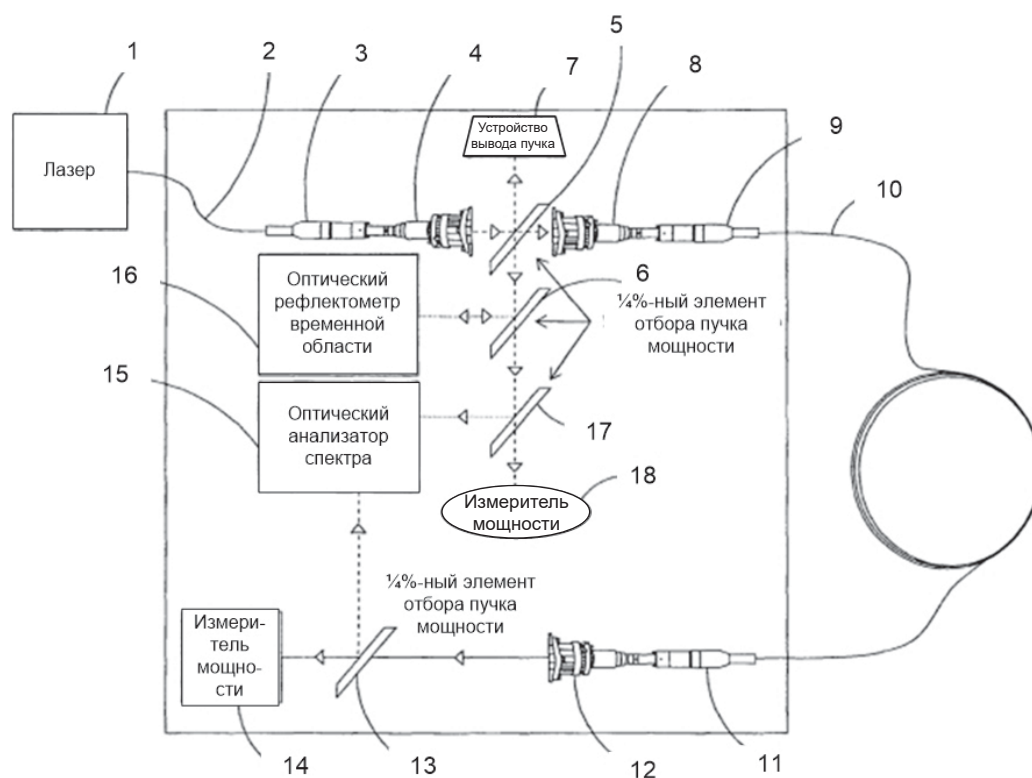


Рисунок 2. Функциональная схема испытательной системы [1]

нить возможности метода на разных длинах оптического кабеля.

Будем использовать кабель, представляющий собой слоистую структуру, содержащую: сердцевину; оболочку; покрытие; два защитных слоя. Используемый оптический кабель должен быть особой технической конструкции длиной от 0,5 км до 5 км, диапазон затухания которого в зависимости от рабочей длины волны составляет от 2 до 0,5 дБ/км в зависимости от длины волны излучения.

Кроме того, необходимо создать условия, чтобы в испытуемый волоконно-оптический кабель поступало лазерное излучение, в котором отсутствовал спектр, относящийся к вынужденному рамановскому излучению. Кабель должен обеспечить передачу энергии лазерного излучения, имеющую мощность от 1 до 10 кВт. Детальные сведения о структуре кабеля приведем в последующих работах.

В системе (см. рисунок 2) предусмотрены лазер 1, короткое, длиной около 25 м, оптическое волокно 2 диаметром 300 мкм, соединяющее лазер с QFN-коннектором 3 (кварцевым кубическим), который соединяет волокно 2 с коллиматором 4. Коллиматор 4 коллимирует лазерный пучок, который пропускается через 1/4%-ный элемент 5 отбора пучка. Из этой точки в системе пучок может быть направлен к 1/4%-ному элементу 6 отбора пучка, элементу 7 вывода пучка или коллиматору 8.

Коллиматор 8 фокусирует пучок с образованием входного пучка для QFN-коннектора 9. Коллиматор 8 содержит фокусирующую линзу, теплоотвод и приемную часть коннектора для волокна. Коннектор 9 соединен с коллиматором 8. Коннектор 9 прикреплен к длинному испытуемому волокну 10. Длинное испытуемое волокно 10 имеет QFN-коннектор 11, который соединяет испытуемое волокно 10 с коллиматором 12. Лазерный пучок из коллиматора 12 проходит на 1/4%-ный элемент 13 отбора пучка. Пучок от элемента 13 может проходить к измерителю 14 мощности или оптическому анализатору 15 спектра (ОАС).

Оптический рефлектометр 16 временной области (ОРВО) передает и принимает синхронизированный лазерный пучок через элемент 16 отбора, направляя к элементу отбора 5 и далее по волокну 10. Оптический рефлектометр 16 временной области также можно использовать для тестирования волокна 10 отдельно от лазера 1. Лазерный пучок из лазера 1 проходит через элемент 6 отбора к 1/4%-ному элементу 17 отбора пучка и далее на оптический анализатор 15 спектра или на измеритель 18 мощности.

В рассмотренной системе (см. рисунок 2) источник лазерного излучения должен иметь высокую мощность: от 1 до 10 кВт. Лазер может быть любого типа, но совместим по техническим параметрам с испытуемыми кабелями. Примером такого предпочтительного лазера, предназначен-

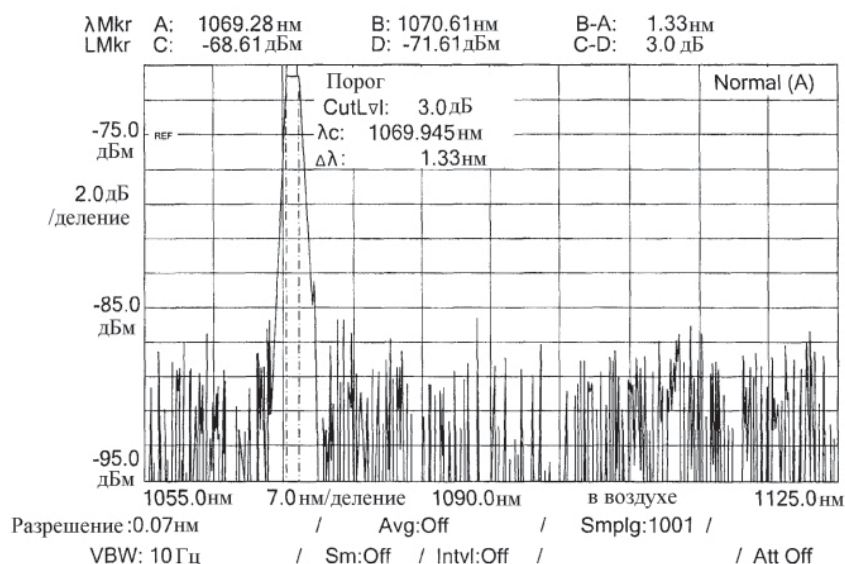


Рисунок 3. Спектр энергии лазерного излучения, передаваемой тестируемым волокном, с демонстрацией отсутствия явления вынужденного рамановского рассеяния [1]

Таблица. Результаты эксперимента

Пиковая входимая мощность, Вт	Пиковая выводимая мощность, Вт	Процент переданной мощности, %
924	452	48,9
1535	864	56,3
1563	844	54,0
1660	864	52,0
1818	970	53,3
1932	1045	54,1
2000	1100	55,0
2224	1153	51,8
2297	1216	52,9
2495	1250	50,1
2632	1329	50,5
2756	1421	51,6
3028	1592	52,6
3421	1816	53,1
3684	1987	53,9
3947	2105	53,3
4342	2263	52,1
4605	2382	51,7
4868	2487	51,1

ного для использования совместно с волоконно-оптическими кабелями для передачи электроэнергии в настоящем устройстве, является IPG 20000 YB [7] (фирмы IPG). Данный лазер состоит из 20 модулей. В результате особенности работы этих модулей происходит поддержание низких значений рамановского усиления и бриллюэновского усиления на определенных рабочих длинах волн модулей, что в итоге приводит к последующему ослаблению ВБР и ВРР в волокне.

Экспериментальное исследование предлагаемой системы

Проведем эксперимент на системе, показанной на рисунке 2. Настроим лазер IPG 20000 YB [7]

таким образом, чтобы он работал с КПД 10 % при частоте повторения импульсов 1 кГц. В этом примере рабочие условия устанавливали такими, чтобы длительность импульсов поддерживалась большей, чем постоянная времени вынужденного бриллюэновского рассеяния. Поэтому отсутствие вынужденного бриллюэновского рассеяния в эксперименте было обусловлено волокном и лазером, а не длительностью импульсов. Лазерный пучок передавали по волокну длиной 2 км при температуре около 150 °С, давлении окружающей среды и при затухании оптической мощности 0,8 дБ/км.

Испытуемый волоконно-оптический кабель в эксперименте имел сердцевину из плавленного

кварца диаметром около 500 мкм, оболочку из легированного фтором плавленного кварца, имеющую толщину 50 мкм, покрытие из акрилата толщиной около 60 мкм и защитное покрытие из нержавеющей стали с наружным диаметром около 3,175 мм и длиной около 2 км. Волокно имело числовую апертуру 0,22.

Полученные результаты приведены в таблице, где значения максимальной вводимой мощности и максимальной выводимой мощности представлены в ваттах. Спектр частот, наблюдаемый в кабеле на мощности 4868 Вт, показан на рисунке 3. Из спектра ясно видно отсутствие явления ВРР. Кроме того, линейная связь между входной и выходной мощностями подтверждает отсутствие явления ВРР. К тому же при импульсной работе лазера с изменением длины волны вследствие формирования импульса с линейной частотной модуляцией может вноситься дополнительный вклад в подавление явлений ВРР и ВРР, поскольку эффективно возрастает ширина спектральной линии лазера.

Выводы

Описанная система POF продемонстрировала, что существует возможность передавать энергию лазерного излучения большой мощности по оптическим кабелям с низкими потерями на большие расстояния с дальнейшим преобразованием в электрическую энергию и тем самым обеспечивать удаленное электроснабжение не только устройств АТС ОАО РЖД, но и иных устройств, например лазерных инструментов, таких как инструменты лазерной сварки и резки, различных буровых установок и т. п.

Литература

1. Патент РФ 2551392. Волоконно-оптический кабель для передачи энергии лазерного из-

лучения высокой мощности на большое расстояние. № 2011138270/28, заявл. 17.02.2010, опублик. 27.03.2013. Бюл. № 9.

2. Терехов А.Н. Анализ вероятности обеспечения удаленного электропитания оптических сетевых терминалов через оптоволоконный кабель // Т_Comm. 2014. № 12. С. 95–97.
3. Белоногов А.С. Электрические основы связи на железнодорожном транспорте. Самара: Изд. СамГУПС, 2012. С. 13–19.
4. Kaiser W., Maier M. Laser Handbook. North-Holland, Amsterdam. Part. E2. 1972. Vol. 2.
5. Crystal Fiber A/S (February 28th, 2006). White Paper, Towards 100 kW fiber laser system scaling up power in fiber lasers for beam combining. P. 14.
6. Muto S., Tei K., Fujioka T. Laser cutting for thick concrete by multi-pass techniques // Chinese Optics Letters. 2007. Vol. 5. P. 39–41.
7. Патент РФ 2522016. Способ и система для проходки ствола скважины с использованием лазера большой мощности. № 2011110388/03, заявл. 2009.08.19, опублик. 2014.07.10. Бюл. № 19.
8. Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. М.: ООО «Солон Р», 1999. С. 103–107.
9. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М.: Радио и связь, 2000. С. 298–299.
10. Ruffin A.B. Stimulated Brillouin scattering: an overview of measurements, system impairments, and applications // Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements, Boulder, CO, USA, 2004. P. 23–28.

Получено 07.02.2020

Белоногов Алексей Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). 443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18. Тел. +7 846 303-75-09. E-mail: abelonogov@rambler.ru

Шорохов Николай Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры электротехники СамГУПС. 443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18. Тел. +7 846 303-75-09. E-mail: nik-shorokhov@mail.ru

REMOTE POWER SUPPLY OF OPTICAL NETWORKS, NETWORK COMMUNICATION ELEMENTS AND OTHER ELECTRICAL EQUIPMENT OF JSCO «RZD» ON POF TECHNOLOGY

Belonogov A.S., Shorokhov N.S.

Samara State Transport University, Samara, Russian Federation

E-mail: abelonogov@rambler.ru

The article describes the method and system of high power laser transmission over fiber optic for power supply of electronic devices of railway automatics, telemechanics and communications, optical networks and nodes based on Power-over-Fiber technology using special fiber optic cable and high power laser system. Use of these cables enables transmission of high power laser radiation energy over long distances, and these distances and power transmission levels were previously considered unattainable. This was achieved due to the special multi-layer structure of the cable used, as well as the absence of the frequency spectrum in the spectral characteristics of laser radiation, where the phenomena of forced Raman scattering occur. The results of the experiment are presented, which showed the possibility of transmitting a peak input laser power of 5 kW at a distance of 2 km, having received 51 % of the initial power at the system output. In addition, the cable design is expected to withstand severe atmospheric conditions.

Keywords: *Power-over-Fiber technology, high power laser transmission of energy over long distances, optical fiber, stimulated Raman scattering, Mandelstam – Brillouin stimulated scattering, stokes component, anti-Stokes component, QBH-connector, collimator, remote power supply of optical networks, nodes and other electrical devices via fiber optic cable*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.03

Belonogov Aleksey Sergeevich, Samara State Transport University Samara, 18, Perviy Bezimyanniy pereulok, Samara, 443066, Russian Federation; PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +7 846 303-75-09. E-mail: abelonogov@rambler.ru

Shorokhov Nikolay Sergeevich, Samara State Transport University Samara, 18, Perviy Bezimyanniy pereulok, Samara, 443066, Russian Federation; PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +7 846 303-75-09. E-mail: nik-shorokhov@mail.ru

References

1. Patent RF. no. 2551392. Volokonno-opticheskij kabel' dlya peredachi energii lazernogo izlucheniya vysokoj moshchnosti na bol'shoe rasstoyanie [Optical fiber cable for transmission of high power laser energy over great distances]. No. 2011138270/28, decl. 17.02.2010, publ. 27.03.2013. Bul. no. 9. (In Russian).
2. Terekhov A.N. Analiz veroyatnosti obespecheniya udalennogo elektropitaniya opticheskikh setevikh terminalov cherez optovolokonnyy kabel [Probability analysis of providing remote power to optical network terminals via fiber optic cable]. *T-COMM*, 2014, no. 12, pp. 95–97. (In Russian).
3. Belonogov A.S. *Elektricheskie osnovy svyazi na zheleznodorozhnom transporte* [Electrical fundamentals of communication in railway transport: guidelines for practical exercises]. Samara: Izd. SamGUPS, 2010, pp. 13–19. (In Russian).
4. Kaiser W., Maier M. *Laser Handbook*. Noth-Holland, Amsterdam. Part. E2, 1972, vol. 2.
5. Crystal Fiber A/S (February 28th, 2006). White Paper, Towards 100 kW fiber laser system scaling up power in fiber lasers for beam combining, p. 14.
6. Muto S., Tei K., Fujioka T. Laser cutting for thick concrete by multi-pass techniques. *Chinese Optics Letters*, 2007, vol. 5, pp. 39–41.
7. Patent RF no. 2522016. *Sposob i sistema dlya prohodki stvola skvazhiny s ispol'zovaniem lazera bol'shoj moshchnosti* [Hole-making method and system using high-power laser]. No. 2011110388/03, decl. 19.08.2009, publ. 10.07.2014. Bul. no. 19. (In Russian).
8. Sklyarov O.K. *Sovremennye volokonno-opticheskie sistemy peredachi, apparatura i elementi* [Modern fiber optic transmission systems, equipment and elements]. Moscow: OOO «Solon R», 1999, pp. 103–107. (In Russian).

9. Slepov N.N. *Sovremennye tekhnologii cifrovikh optovolokonnikh setey svyazi* [Modern technology of digital fiber optic communication networks]. Moscow: Radio i svyaz, 2000, pp. 298–299. (In Russian).
10. Ruffin A.B. Stimulated Brillouin scattering: an overview of measurements, system impairments, and applications. *Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements*, Boulder, CO, USA, 2004, pp. 23–28.

Received 07.02.2020

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

ТРУДЫ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ «МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ»

УДК 621.391.1:621.395

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СО СДВИНУТЫМИ ГИПЕРЭРЛАНГОВСКИМ И ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМИ ВХОДНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ

Тарасов В.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

В данной статье представлены результаты исследований по системе массового обслуживания $HE_2/M/1$ со сдвинутыми вправо от нулевой точки гиперэрланговским и экспоненциальными входными распределениями. По определению Кендалла, система $HE_2/M/1$ с обычными распределениями относится к типу $G/M/1$, для которых в общем случае неизвестно решение для среднего времени ожидания требований в очереди. Эта же система со сдвинутыми распределениями трансформируется в систему $G/G/1$, для которой в общем случае также неизвестно решение для среднего времени ожидания. Учитывая тот факт, что, начиная с коэффициента вариации, равного четырем, распределение гипер-Эрланг имеет тяжелый хвост, рассматриваемая система может иметь активное приложение в современной теории телетрафика. Использование распределений гипер-Эрланга более высокого порядка затруднительно для вывода решения для среднего времени ожидания требований в очереди из-за нарастающей вычислительной сложности. Для гиперэрланговского закона распределения, как и гиперэкспоненциального закона, метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли дает возможность получить решение в конечном виде. В статье приведены результаты по спектральному разложению решения интегрального уравнения Линдли для системы массового обслуживания $HE_2/M/1$ со сдвинутыми распределениями, а также расчетная формула для среднего времени ожидания требований в очереди. Показано, что система $HE_2/M/1$ со сдвинутыми распределениями является системой с запаздыванием во времени и обеспечивает меньшее время ожидания по сравнению с обычной системой. Адекватность полученных результатов подтверждена корректностью использования классического метода спектрального разложения и результатами численного моделирования. Для вывода полученных результатов, а также для численных расчетов использован известный метод моментов теории вероятностей.

Ключевые слова: СМО $HE_2/M/1$ со сдвинутыми распределениями, среднее время ожидания в очереди, метод спектрального разложения, интегральное уравнение Линдли, преобразование Лапласа

Введение

Настоящая статья посвящена анализу системы массового обслуживания) СМО $HE_2/M/1$ со сдвинутыми вправо от нулевой точки гиперэрланговским и экспоненциальными входными распределениями. Система $HE_2/M/1$ с обычными распределениями рассмотрена в [1], где для нее представлены спектральное разложение решения интегрального уравнения Линдли и расчетная

формула для главной характеристики СМО – среднего времени ожидания требований в очереди. В отличие от обычной системы $HE_2/M/1$, систему со сдвинутыми распределениями обозначим $HE_2^-/M^-/1$.

Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли (ИУЛ) в теории систем массового обслуживания $G/G/1$ занимает важное место. Одна из форм интегрального уравнения Линдли выглядит так [2; 3]: